

Universität Hohenheim

Fakultät für Agrarwissenschaften

Institut für Pflanzenproduktion und Agrarökologie in den Tropen
und Subtropen

Fg. Wasserstressmanagement bei Kulturpflanzen in den
Tropen und Subtropen (380c)



Optimierung von aeroponischen Anbausystemen für Reis

Marc Schmierer

Matrikelnummer: 344517

Diplomarbeit vorgelegt im Studiengang Agrarbiologie

Hohenheim, März 2010

Erstgutachter: Prof. Dr. Folkard Asch

Zweitgutachter: Prof. Dr. Joachim Sauerborn

Erklärung

Ich versichere, diese Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Arbeit, die anderen Werken nach Wortlaut oder Sinn entnommen wurden, kenntlich gemacht zu haben.

Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Stuttgart, 28. Februar 2010

Marc Schmierer

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
1. Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
2. Aeroponik.....	4
2.1 Erdlose Kulturverfahren - Einführung.....	4
2.1.1 Definition.....	4
2.1.2 Nährlösung.....	5
2.1.3 Substrate	6
2.2 Aeroponische Systeme.....	6
2.2.1 Definition.....	6
2.2.2 Technik und Eigenschaften aeroponischer Systeme.....	7
2.2.2.1 Überblick.....	7
2.2.2.2 Tropfengröße.....	9
2.2.2.3 Bewässerungsfrequenz	9
2.2.3 Vergleich hinsichtlich pflanzenbaulicher Eignung	11
2.2.4 Spezielle Eigenschaften aeroponischer Systeme	12
2.2.5 Wissenschaftliche Anwendungen.....	14
2.2.6 Kommerzielle Pflanzenproduktion.....	15
3. Reis.....	17
3.1 Herkunft, Domestikation und wirtschaftliche Bedeutung.....	17
3.2 Morphologie und Wachstum	18
3.2.1 Spross.....	18
3.2.2 Wurzel.....	20
3.3 Reisanbau und Wasserverbrauch.....	21
3.4 Reis und Aeroponik.....	22
4. Material und Methoden.....	24
4.1 Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern.....	24
4.1.1 Lüfter	24
4.1.2 Vernebler.....	25
4.1.3 Pflanzbehälter.....	25
4.1.4 Nährlösung.....	26
4.1.5 Pflanzenmaterial.....	26
4.1.6 Gesamtsystem.....	26
4.1.7 Versuchsaufbau.....	27
4.1.8 Ablauf und Datenerfassung.....	28
4.2 Versuch zur Bestimmung der Auswirkungen verschiedener pH-Werte.....	30
4.2.1 Aeroponisches System.....	30
4.2.2 Hydroponisches System.....	31
4.2.3 Ablauf und Datenerfassung.....	32
5. Ergebnisse.....	34
5.1 Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern.....	34
5.1.1 Temperatur.....	34
5.1.2 Trockenmasse und Wurzel-/Spross-Verhältnis.....	35
5.1.3 Wachstumsparameter Spross.....	36

5.1.4 Wachstumsparameter Wurzel	37
5.1.5 Gradient innerhalb der Behandlungen	37
5.2 Versuch zur Bestimmung der Auswirkungen verschiedener pH-Werte.....	38
5.2.1 Temperaturen.....	38
5.2.2 pH-Wert.....	39
5.2.3 Trockenmasse und Wurzel-/Spross-Verhältnis.....	40
5.2.4 Bestockungstriebe und Blattfläche.....	41
5.2.5 Maximale Wurzellänge.....	42
5.2.6 Gaswechsellmessung.....	43
6.Diskussion.....	44
6.1 Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern.....	44
6.2 Versuch zur Bestimmung der Auswirkungen verschiedener pH-Werte.....	48
7. Zusammenfassung.....	53
Literaturverzeichnis.....	54
Danksagung.....	59
Anhang.....	60
A - Steuergerät.....	60
B - Versuchsdaten in tabellarischer Form.....	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nebeldecke über einem Ultraschallvernebler.....	24
Abbildung 2: Vernebler der Firma Conrad Electronic.....	25
Abbildung 3: Verwendete Mörtelkübel mit Maßangaben.....	26
Abbildung 4: Gesamtaufbau des aeroponischen Systems.....	27
Abbildung 5: Pflanzplan Versuch 1.....	27
Abbildung 6: Aeroponisch gekeimter Reis (Versuch 1).....	28
Abbildung 7: Skizze des aeroponischen Systems in Versuch 2.....	30
Abbildung 8: Skizze der Behälter des hydroponischen Systems.....	31
Abbildung 9: Pflanzplan Versuch 2.....	34
Abbildung 10: Aeroponisches Anzuchtssystem für Reis System	34
Abbildung 11: Hydroponische Anzuchtssystem für Reis.....	34
Abbildung 12: Vernebler und Lüfter in den aeroponischen Systemen	34
Abbildung 13: Durchschnittliche Tages- und Nachttemperatur im Gewächshaus [°C]	35
Abbildung 14: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf die Gesamttrockenmasse zweier Reissorten [g].....	36
Abbildung 15: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf das Wurzel-/Spross-Verhältnis zweier Reissorten [g/g].....	36
Abbildung 16: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf die Blattfläche zweier Reissorten [cm ²].....	37
Abbildung 17: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf die Anzahl der Bestockungstriebe zweier Reissorten.....	37
Abbildung 18: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf die Anzahl an Kronenwurzeln zweier Reissorten.....	38
Abbildung 19: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf die maximale Wurzellänge zweier Reissorten [cm].....	38
Abbildung 20: Gesamttrockenmasse aeroponisch angezüchteter Reispflanzen in drei Befeuchtungsvarianten in Abhängigkeit zur Entfernung von der Nebelquelle.....	38
Abbildung 21: Durchschnittliche Tages- und Nachttemperatur während des Versuchs [° C]	39
Abbildung 22: Tägliche Veränderung des pH-Wertes der Nährlösung vom Sollwert.....	40
Abbildung 23: Auswirkung verschiedener Anzuchtmethoden und pH-Werte der Nährlösung auf die Gesamttrockenmasse zweier Reissorten [g].....	41
Abbildung 24: Auswirkung verschiedener Anzuchtmethoden und pH-Werte der Nährlösung auf das Wurzel/Spross-Verhältnis zweier Reissorten [g/g].....	41
Abbildung 25: Auswirkung verschiedener Anzuchtmethoden und pH-Werte der Nährlösung auf die Anzahl an Bestockungstrieben zweier Reissorten.....	42
Abbildung 26: Auswirkung verschiedener Anzuchtmethoden und pH-Werte der Nährlösung auf die Blattfläche zweier Reissorten [cm ²].....	42

Abbildung 27: Auswirkung verschiedener Anzuchtmethoden und pH-Werte der Nährlösung auf die maximale Wurzellänge zweier Reissorten [cm].....	43
Abbildung 28: Assimilationsraten, Transpirationsraten, Assimilation/ Transpiration und SPAD-Werte von aero- und hydroponisch angezogenem Reis (Chomrong) unter verschiedenen pH-Werten.....	44
Abbildung 29: Mangelsymptome an aeroponisch wachsenden Reispflanzen unter kurzer Befeuchtungsdauer.....	45
Abbildung 30: Wassertropfen an Wurzelspitzen von aeroponisch gekeimtem Reis.....	46
Abbildung 31: Platinenvorlage des in den Versuchen verwendeten Steuergerätes.....	61
Abbildung 32: Steuergerät für Nebler und Lüfter.....	61
Abbildung 33: Steuergerät, Schaltplan	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Yoshida Nährlösung.....	26
Tabelle 2: Daten Versuch 2 (Teil 1).....	65
Tabelle 3: Daten Versuch 2 (Teil 2).....	66
Tabelle 4: Gaswechseldaten (Versuch 2).....	67
Tabelle 5: Daten Versuch 1.....	68

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Ausgangspunkt dieser Arbeit war die Idee, Grundnahrungsmittel in einem mehrstöckigen Gewächshaus zu produzieren. Ein solches Gebäude sollte aus Kosten- und Stabilitätsgründen möglichst in Leichtbauweise konstruiert sein, was spezielle Anforderungen an das implementierte Anbausystem stellt. Eine Versorgung der Pflanzen mit Nährlösung in flüssiger Form wie in herkömmlichen hydroponischen Systemen würde diesen Anforderungen aufgrund des Eigengewichts der Nährlösung nicht gerecht werden. Aus denselben Gründen ist auch der Einsatz von Substraten zur Halterung der Pflanzen und als Speichemedium für die Nährlösung kritisch zu sehen. Aeroponische Systeme sind substratfreie Anbausysteme, in denen die Nährstoff- und Wasserversorgung über einen Nährstoffnebel erfolgt. Diese Systeme können prinzipbedingt leichter konstruiert werden als hydroponische oder substratbasierte, insbesondere dann, wenn die Nährlösung nicht direkt unter den Pflanzen vernebelt, sondern schon als Nebel in den Wurzelraum gelangt.

Aeroponische Systeme, in denen der Nährstoffnebel durch ultraschallbasierte Zerstäubung der Nährlösung erzeugt wird, zeichnen sich durch eine besonders geringe Tropfengröße innerhalb des entstehenden Nährstoffnebels aus. Dieser Nebel lässt sich daher über größere Strecken und eventuell auch über einen gewissen Höhenunterschied transportieren.

Es existieren verschiedene Untersuchungen zur aeroponischen Anzucht von Reis. Diese sind jedoch zum einen schon älter und wurden nicht in Ultraschall-Systemen durchgeführt, zum anderen lag das Versuchsziel in der Identifikation trockenresistenter Sorten für den Feldanbau und nicht in der Optimierung des aeroponischen Systems hinsichtlich Ertragskomponenten oder der Beeinflussung morphologisch bzw. physiologischer Wachstumsmerkmale. Von Interesse ist allerdings, dass in diesen Arbeiten beschriebene Wurzelsysteme bis zu über einem Meter lang wurden. In einem mehrstöckigem Gewächshaus müsste dadurch die Höhe der einzelnen Stockwerke relativ groß gehalten werden, was die maximale Anzahl an Stockwerken, und damit die Gesamtanbaufläche pro Grundfläche, bei einer bestimmten Gesamthöhe des Gebäudes verringern würde.

1.2 Zielsetzung

Über den Aufbau eines aeroponischen Systems auf Ultraschallbasis lagen nur wenige Informationen vor. In Vorversuchen wurde ein einfaches aeroponisches System aufgebaut und getestet. Das System sollte dazu dienen, Probleme sichtbar zu machen und zu lösen. Ziel war es, ein einfaches aeroponisches System zu entwickeln, auf dessen Basis in nachfolgenden Versuchen Verbesserungen vorgenommen werden konnten.

Mit den Versuchen dieser Arbeit galt es 2 Aspekte eines möglichen aeroponischen Systems zu untersuchen, zu denen in der Literatur keine Angaben verfügbar sind:

1. Die Wahl einer möglichst optimalen Befeuchtungs- bzw. Befeuchtungsfrequenz der Wurzeln mit Nährstoffnebel.
2. Auswirkungen des pH-Wertes der Nährlösung auf das Längenwachstum der Wurzeln und auf andere Wachstumsparameter junger Reispflanzen.

Die Befeuchtungs- bzw. Befeuchtungsintervalle, und somit auch die Zeit, in denen die Pflanzenwurzeln trocken stehen, sind Kernparameter eines aeroponischen Systems. Davon hängt ab, wie viel Wasser und Nährstoffe pro Zeiteinheit an die Wurzeln transportiert werden. Bei zu langen Unterbrechungen der Befeuchtung laufen die Wurzeln Gefahr, auszutrocknen. Bei zu langen Befeuchtungsintervallen, oder wenn die Vernebler ohne Unterbrechung betrieben werden, kommt es auf Grund von den Ultraschallverneblern abgegebener Abwärme zu einem starken Anstieg der Temperatur der Nährlösung.

In den Vorversuchen wurde mit einer Befeuchtungsdauer von 5 min, gefolgt von 5 min Unterbrechung, gearbeitet. Dies erwies sich für ein erfolgreiches Anwachsen aeroponisch gekeimter Pflanzen als ausreichend. Vollständiges Abtrocknen der Wurzeln zum Ende der Befeuchtungsunterbrechung fand nicht statt.

Allerdings wirkt sich laut Weathers und Zobel (1992) ein zeitweiliges Abtrocknen positiv auf die Sauerstoffversorgung der Wurzeln und damit auf das Pflanzenwachstum aus. Demnach müssten sich längere Aus-Zeiten der Vernebler positiv in Wachstumsparametern bemerkbar machen. Eine verlängerte Befeuchtungsdauer erhöht demgegenüber die Wasser- und Nährstoffmenge, die pro Zeiteinheit an die Wurzeln transportiert wird.

Daher wurden in einem Versuch verschiedene Schaltzeiten der Ultraschallvernebler geplant und deren Auswirkungen auf die Jungpflanzenentwicklung von Reis untersucht.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkungen verschiedener pH-Werte der Nährlösung zu untersuchen. Die Verfügbarkeit von Nährstoffen für Pflanzen hängt unmittelbar vom pH-Wert des Bodens bzw. der Nährlösung ab (Schroeder, 1984). Insbesondere Mikronährstoffe sind erst bei geringeren pH-Werten ($< \text{pH } 5,5$) gut verfügbar. Nährstoffmangel führt bei Reis zu einer Steigerung der Wurzellänge (Nilufer *et al.*, 2000). Reis wächst in Hydrokultur üblicherweise in einem pH-Wert von 5 (Yoshida *et al.*, 1976). Ein alkalischer pH-Wert führt zu einer Verlängerung der Kronenwurzeln und deren Seitenwurzeln (Asch, persönliche Mitteilung, 2010). Es ist unbekannt, ob dieser Effekt auch unter aeroponischen Bedingungen auftritt.

Wurzelsysteme von großer Länge sind hinsichtlich einer technischen Implementierung aeroponischer Systeme problematisch, da sie die Gesamtgröße des Systems erhöhen würden. Andererseits sind höhere pH-Werte eventuell materialschonender, insbesondere für Vernebler und Lüfter des aeroponischen Systems selbst. Daher wurden die Effekte zweier verschiedener pH-Werte (pH 4 und pH 6) auf Wachstumsparameter von Jungpflanzen miteinander verglichen. Es sollte festgestellt werden, ob die in hydroponischen Systemen beschriebene Verlängerung des Wurzelsystems unter erhöhten pH-Werten ebenfalls unter aeroponischen Bedingungen auftritt. Zudem sollte beobachtet werden, ob unterschiedliche pH-Werte in aeroponischen Systemen noch andere Auswirkungen auf Wachstumsparameter zeigen. Zur Kontrolle wurden gleichzeitig Pflanzen in einem hydroponischen System kultiviert und deren Wachstumsparameter mit den aeroponisch kultivierten Pflanzen verglichen.

2. Aeroponik

2.1 Erdlose Kulturverfahren - Einführung

2.1.1 Definition

Erdlose Kulturverfahren bzw. hydroponische Anbauverfahren sind Verfahren zum Anbau von Pflanzen, in denen aus verschiedenen Gründen auf gewachsenen Boden als Wachstumsmedium verzichtet und statt dessen auf eine künstliche Alternative zurückgegriffen wird.

Die Bezeichnung „Hydroponik“ ist dem Griechischen entlehnt und setzt sich aus den Worten „*hydro*“ (Wasser) und „*ponos*“ (Arbeit) zusammen. Hinsichtlich der Abgrenzung von normalen Anbauverfahren bestehen verschiedene Definitionen, die jedoch alle die Verwendung einer Nährlösung und den Verzicht auf natürlich gewachsenen Boden beinhalten (Molitor, 1991; Harris, 1992; Benton Jones Jr., 2005a; Winterborne, 2005).

Der Begriff „Erdlose Kulturverfahren“ (*soilless culture*) ist nach Benton Jones Jr. (2005) allgemeiner zu verstehen, und „Hydroponik“ stellt einen Spezialfall von diesen dar. Erdlose Kulturverfahren umfassen demnach alle Anbauverfahren, bei denen auf gewachsenen Boden verzichtet wird, und statt dessen anorganische oder organische Substrate wie Steinwolle, Perlit oder Torf verwendet werden. Der Begriff „Hydroponik“ bezeichnet dagegen Verfahren, „bei denen Pflanzenwurzeln in einer geschlossenen, ständig belüfteten oder zirkulierenden Nährlösung gehalten werden“ (Benton Jones Jr., 2005a).

Molitor (1991) stellt den deutschen Begriff „Hydrokultur“ Verfahren gegenüber, bei denen „gärtnerische Erden“ zum Einsatz kommen, und verwendet „Hydrokultur“ als Überbegriff für Verfahren, bei denen auf inerte Substrate (also Substrate, die mit der Nährlösung keine Wechselwirkungen zeigen) zurückgegriffen wird, wie auch für Verfahren, bei denen auf Substrate gänzlich verzichtet wird. Demnach erfolgt in „erdlosen Kulturverfahren“ der Anbau von Nutzpflanzen unabhängig von gewachsenem Boden zum Ziele höherer Erträge, umweltfreundlicherer Produktionsabläufe und geringerer Arbeitskosten (Molitor, 1991).

Wenn im Weiteren von erdlosen Kulturverfahren die Rede ist, bezieht sich dies auf Verfahren mit inerten Substraten. Wird der Ausdruck Hydroponik oder Hydrokultur verwendet, sind Verfahren gemeint, in denen Wurzeln frei im Wasser stehen oder von Nährlösung umspült werden.

2.1.2 Nährlösung

In erdlosen Kulturverfahren ist die Nährlösung Trägersubstanz aller in Wasser lösbarer Makro-, Mikro- und Spurennährstoffe. Diese werden in Form einzelner Chemikalien oder fertig gemischt dem Wasser zugegeben. In Wasser liegen die Nährstoffe in ionisierter Form vor. Das zur Bereitung der Nährlösung verwendete Wasser sollte filtriert und frei von organischen Rückständen und mikrobiellen Verunreinigungen sein. Der pH-Wert ist abhängig von der Zusammensetzung der Nährlösung und kann durch Zugabe von Säuren oder Laugen (z.B. NaOH, HCl) auf einen für die jeweilige Pflanze optimalen Wert eingestellt werden. In der Wurzelzone sollte ausreichend Sauerstoff für Atmungsprozesse der Wurzel zu Verfügung stehen. In hydroponischen Systemen kann dies durch Einblasen von Luft unter Verwendung von Membranpumpen geschehen. Werden Substrate verwendet, sollten diese nie komplett oder andauernd wassergesättigt sein (Benton Jones Jr., 2005b).

In natürlich gewachsenem Boden gelangen Nährstoffe durch Massenfluss und Diffusionsprozesse über das Bodenwasser zur Wurzel und werden dort aufgenommen. Zudem steht das Bodenwasser in ständiger Wechselwirkung mit den Bodenteilchen. Es findet eine Vielzahl an Prozessen statt: chemische und physikalische Vorgänge lassen Böden verwittern und führen Nährstoffe in die Bodenlösung nach; Oxidationsprozesse beeinflussen das anstehende Bodenmaterial und organische Bodenbestandteile; über Austauschprozesse werden von Pflanzenwurzeln abgegebene Protonen aufgenommen und somit Versauerungsprozesse im Wurzelraum gepuffert; organische Substanzen im Oberboden werden abgebaut und mineralisiert (Stahr *et al.*, 2008).

In erdlosen Kulturverfahren sind diese Prozesse nicht vorhanden und/oder unerwünscht. Insbesondere soll der Transport der Nährstoffe zur Wurzel und deren Bereitstellung nicht über langsame Diffusions- und Mineralisierungsprozesse geschehen, sondern die Wurzel soll zu jeder Zeit von einer Nährlösung mit gleichbleibender Konzentration an Nährstoffen umgeben sein. Die Nachführung von aufgenommenen Nährstoffen sollte in erster Linie über Massenfluss geschehen. Um dies zu gewährleisten, kann in Hydrokultur die Nährlösung auf verschiedene Arten, beispielsweise durch Pumpen oder Belüftung, in Bewegung gehalten werden (Benton Jones Jr., 2005b). Bei substratbasierten Verfahren wird die Nährlösung meist recycelt, d. h. unter den Pflanzbehältern aufgefangen und entweder zyklisch oder ununterbrochen den Pflanzen zurückgeführt (Benton Jones Jr., 2005d).

Die Nährstoffversorgung in erdlosen Anbauverfahren ist gegenüber den Verhältnissen in natürlichem Boden generell vereinfacht. Die fehlenden, oder bei substrat-

basierten Verfahren zumindest stark verringerten Wechselwirkungen der Nährlösung mit dem Bodenmedium, sowie die herabgesetzte biologische Aktivität (Pilze, Bakterien, Mikroben) in der Wurzelzone führen zu Bedingungen, die für den Anwender besser zu kontrollieren sind und in den meisten Fällen in einer gegenüber natürlichen Systemen verbesserten Versorgungssituation der Pflanze resultieren (Benton Jones Jr., 2005c).

2.1.3 Substrate

Eine Klassifikation erdloser Kulturverfahren erfolgt hauptsächlich unter Berücksichtigung des eingesetzten Substrats. Substrate dienen der Speicherung von Nährlösung und als Halterung für Wurzeln und Pflanzen. Neben organischen Substraten wie Torf oder Rindenhumus, die die Zusammensetzung der Nährlösung beeinflussen können und mikrobieller Zersetzung unterliegen, existieren inerte Substrate wie Steinwolle oder Blähton. Sie sind chemisch inert, behalten ihre Struktur und sind aus phytosanitären Gründen organischen Substraten vorzuziehen. Substrate können in unterschiedlichen Formen angewandt werden, beispielsweise in Rinnen, Containern, Säcken usw.. Die Versorgung mit Nährlösung erfolgt meist durch Tröpfchenbewässerung (Molitor, 1991; Benton Jones Jr., 2005b).

Des Weiteren existieren substratfreie Verfahren, bei denen auf ein Trägersubstrat komplett verzichtet wird. Beispielsweise stehen im NFT-Verfahren (*Nutrient Film Technique*) die Pflanzen in Rinnen, die ständig oder in Zyklen von einem dünnen Nährlösungsfilm durchflossen werden. Das Wurzelsystem breitet sich mit der Zeit in der Rinne aus (Molitor, 1991).

Reis kann für wissenschaftliche Zwecke in reiner Hydrokultur substratfrei angebaut werden. Das Verfahren ist von Yoshida beschrieben (Yoshida *et al.*, 1976). Da die Luftversorgung der Wurzeln über Aerenchyme in der Wurzel geschieht, ist eine Belüftung der Nährlösung nicht notwendig. Für den kommerziellen Pflanzenbau haben solche Verfahren jedoch keine Bedeutung (Molitor, 1991).

2.2 Aeroponische Systeme

2.2.1 Definition

Weathers und Zobel (1992) definieren ein aeroponisches System als eine „Kulturmethode für ganze Pflanzen und/oder Pflanzengewebe, in dem die Wurzel oder das gesamte Pflanzengewebe durch einen Nebel aus Wasser und Luft versorgt wird.“ Als Hauptvorteile des Systems werden die hohe Sauerstoffversorgung der Wurzeln

und damit einhergehende positive Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum genannt, sowie die Möglichkeit, ein intaktes Wurzelsystem an der lebenden Pflanze für wissenschaftliche Zwecke untersuchen zu können (Zobel *et al.*, 1976; Weathers und Zobel, 1992; Benton Jones Jr., 2005d). Kritische Komponenten sind die physikalischen Eigenschaften des Nebels, die Zusammensetzung der Nährlösung und die Frequenz, in der die Nährlösung an die Wurzeln gebracht wird (Weathers und Zobel, 1992).

Zur Verneblung der Nährlösung sind verschiedene Techniken entwickelt worden. Diese werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

2.2.2 Technik und Eigenschaften aeroponischer Systeme

2.2.2.1 Überblick

Bezüglich der Nährlösung und deren Eigenschaften gilt dasselbe wie in anderen erdlosen Kulturverfahren. Zusätzlich muss die Nährlösung zerstäubt, vernebelt oder verspritzt und in aerosolischer Form an die Wurzeln transportiert werden. Zu diesem Zweck werden verschiedene Techniken eingesetzt. Es werden 3 Systeme unterschieden:

- **Zerstäubung mittels *Atomizing Disc*:** Die Nährlösung befindet sich am Boden eines Behälters und wird mittels einer sich in der Nährlösung befindenden, schnell drehenden Scheibe zerstäubt. Die Scheibe wird durch eine von oben in die Nährlösung hineinragende Achse angetrieben (Zobel *et al.*, 1976). An der Achse können sich zusätzlich Flossen befinden, die einen Luftstrom erzeugen. Dieser sorgt für Verteilung des Tropfennebels im Behälter. Die Wurzeln ragen vom Deckel durch Löcher in den Behälter. Der Nebel schlägt sich dort auf ihnen nieder. Die Methode hat zahlreiche Nachteile (Jarstfer und Sylvia, 1995): erstens können sich durch den mechanischen Charakter der Vorrichtung Wurzeln in Scheibe und Achse verfangen und diese blockieren, zweitens ist die Größe des Behälters beschränkt, da sich der entstehende Luftstrom nicht unbegrenzt ausbreitet und die Tropfen nur in einem bestimmten Winkel von der Scheibe weg beschleunigt werden. Es ist zudem nicht möglich, das Nährlösungsreservoir außerhalb des Pflanzbehälters unterzubringen. Es muss sich immer eine ausreichende Menge an Nährlösung im Behälter befinden. Die Menge an pro Zeiteinheit vernebelter Nährlösung hängt von der Rota-

tionsgeschwindigkeit der Scheibe ab und beträgt beispielsweise bei 3000 Umdrehungen pro min maximal 2 L/min (Soffer und Burger, 1988).

- **Zerstäubung mittels Pumpen und Düsen:** Die Nährlösung wird durch Düsen unterhalb oder neben den Wurzeln möglichst fein zerstäubt. Die Zuführung geschieht durch ein System aus Pumpen und Schläuchen (Weathers und Zobel, 1992). Die Nährlösung kann unter den Wurzeln aufgefangen und wiederverwendet werden. Die Beschaffenheit des entstehenden Nebels und die Menge an vernebelter Nährlösung wird durch die Art der Düse und den anliegenden Druck bestimmt, liegt aber in der Größenordnung von einem L/min (Fanourakis *et al.*, 2005). Ein Nachteil des Systems ist die Gefahr, dass die Düsen durch auskristallisierte Salze oder Verschmutzungen verstopfen können (Mohammad *et al.*, 2000), was eventuell ein zusätzliches Filtrieren nötig macht.
- **Zerstäubung mittels Ultraschallvernebler:** Die Nährlösung wird mittels Ultraschallvernebler zerstäubt. Ultraschallvernebler basieren auf einem piezokeramischen Element (Membran), dass durch Anlegen einer elektrischen Wechselspannung in Schwingung versetzt wird (Weathers und Zobel, 1992). Diese Schwingung breitet sich auf das umgebende Wasser, bzw. die Nährlösung aus. Es lösen sich kleine Tropfen von der Oberfläche. Die Tropfengröße ist gering (circa 10 µm) und konstant. Gebräuchliche Ultraschallvernebler mit einer Membran vernebeln ca. 250ml Wasser bzw. Nährlösung pro Stunde¹. Es existieren jedoch auch Geräte mit bis zu 10 Membranen². Die Membranen können aus Metall³, Teflon² oder Glas¹ bestehen. Letztere sind deutlich widerstandsfähiger gegenüber Korrosion. Ultraschallvernebler können im Gegensatz zu Pump/Düsen-Systemen nicht verstopfen. Weathers und Zobel (1992) nennen als weiteren Vorteil gegenüber den beiden anderen Systemen die Tatsache, dass Ultraschallvernebler aus weniger beweglichen Teilen bestehen. Dies verringert die Gefahr von mechanischen Defekten bzw. Beschädigung von Pflanzenteilen. Die Notwendigkeit einer Umwälzung des entstehenden Nebels durch Lüfter oder ähnliche Geräte dürfte diese Aussage allerdings zum Teil wieder relativieren.

1 Seliger Fogstar 100®

2 NUTRAMIST® 10 Head Fog Module

3 Ultraschallvernebler, Conrad Elektronik

2.2.2.2 Tropfengröße

In herkömmlichen Pump/Düsen-Systemen liegt die Tropfengröße des erzeugten Nebels höher als in Ultraschall-Systemen. In der Literatur finden sich nur wenige Angaben: bei Martin-Laurent *et al.* (1997) wird eine Tropfengröße von 300-500 μm angegeben. Bei Kratsch *et al.* (2006) wird über die Tropfengröße keine Aussage gemacht, allerdings wird der Hersteller der verwendeten Düsen angegeben. Dieser gibt auf seiner Internetseite⁴ die von seinen Düsen produzierte Tropfengröße mit 19 μm an. Allerdings ist nicht klar, ob dies das von Kratsch *et al.* verwendete Produkt ist und inwiefern sich die angesprochenen Probleme bezüglich eines Verstopfens der Düsen mit kleinerem Durchmesser verschärfen. Es bleibt festzustellen, dass auch mit Düsen sehr geringe Tropfengrößen möglich sind.

In Ultraschall-Systemen liegen die Angaben zu Tropfengrößen zwischen 0,5 und 35 μm (Buer *et al.*, 1996), 1 μm (Mohammad *et al.*, 2000) und 10 μm (Weathers und Zobel, 1992).

Über die Tropfengröße in Atomizing Disc Systemen waren keine Angaben zu finden.

Ein Vorteil der geringen Tropfengröße der Ultraschall-Systeme ist die Eigenschaft des Nebels, durch Luftbewegung sehr leicht transportierbar zu sein. Ein Einblasen des Nebels durch ein Rohrsystem von außerhalb ist eventuell auch über größere Strecken und über eine gewisse Höhendifferenz möglich. Es müsste geprüft werden, inwieweit Verluste durch Niederschlag bzw. Haftenbleiben der Tropfen innerhalb der Rohre möglicherweise durch die Wahl geeigneter Materialien oder die Gestaltung der Zuleitungen gering gehalten werden können.

Über die Auswirkungen verschiedener Tropfengrößen auf Pflanzenwachstum existiert zu diesem Zeitpunkt nur wenig Literatur. Aussagen diesbezüglich sind nur schwer zu treffen. In Kapitel 2.2.3 und 2.2.4 werden verschiedene Theorien diskutiert.

2.2.2.3 Bewässerungsfrequenz

Die Menge an Nährlösung, die pro Zeiteinheit an die Pflanzenwurzeln gebracht wird, hängt von zwei Faktoren ab: zum Einen von der Menge an Nährlösung, die pro Zeiteinheit vom verwendeten System (Ultraschallvernebler, Düse,...) in Nebel bzw. Tropfen verwandelt werden kann, zum Anderen von Frequenz und Arbeitszyklusdauer der Anlage, d.h. wie lange und wie oft Nährlösung verspritzt/vernebelt wird.

⁴ Siehe: <http://www.micromist.com> (zuletzt aufgerufen: 28.2.20010)

Beide Parameter sind innerhalb und zwischen den verschiedenen aeroponischen Systemen stark unterschiedlich.

Bei der *Atomizing Disc*-Methode sowie beim Pump/Düsen-System bewegt sich der Wert des ersten Parameters im Bereich von einem bis zwei L/min (Soffer und Burger, 1988).

Ultraschallvernebler erreichen weniger als einen L/h und Membran¹. Auch bei Geräten mit mehreren Membranen reichen die Leistungen nicht an die der beiden anderen Systeme heran. Eine Ultraschalleinheit mit zehn Membranen vernebelt beispielsweise eine Flüssigkeitsmenge von 2,5 L/h. Dies entspricht einem Wert von 40 ml/min. Da Ultraschallvernebler bzw. die piezokeramische Membran den Nebel nur erzeugen, nicht aber im Wurzelraum verteilen, ist noch zusätzlich technischer Aufwand in Form von Lüftern oder anderen geeigneten Geräten zur Verteilung des Nebels erforderlich.

Angaben bezüglich dieses Parameters für Pump/Düsen-Systeme stehen oft im Zusammenhang mit dem Arbeitszyklus (siehe unten).

Angaben bezüglich Bewässerungs- bzw. Befeuchtungsdauern zeigen sowohl innerhalb wie auch zwischen den verschiedenen Systemen starke Unterschiede: in einem Versuch von Fanourakis *et al.* (2005) wurde der Einfluss der Bewässerungsfrequenz auf das Wachstum von Chrysanthemen in einem Pump/Düsen-System untersucht. Die getesteten Bewässerungszyklen betrugen 1 x 6 min/h, 3 x 2 min/h und 1 x 12 min/h, wobei das beste Wachstum in der 3 x 2 min Variante erreicht wurde. Du Toit und Kirby (1997) verwendeten ein Pump/Düsen-System, in dem die Befeuchtungsdauer 1 s pro 15 min betrug. In andere Publikationen bezüglich Pump/Düsen-Systemen werden Befeuchtungsdauern von 40 s/70 s (Weber *et al.*, 2007) bzw. 15 s/min angegeben (Martin-Laurent *et al.*, 1997).

Barak *et al.* (1996) beschreiben ein Pump/Düsen-System, dass alle 5 min eine Nährlösungsmenge von 2,6 cm³ versprüht. Solche und ähnliche Informationen über die Menge an Wasser bzw. Nährlösung, die von den Düsen versprüht wird, finden sich jedoch nur bei Barak *et al.* und Fanourakis *et al.*. Zudem fehlen meist Informationen, wie die Düsen im Verhältnis zu den Wurzeln angebracht sind, oder wie viele Pflanzen von einer Düse versorgt werden. Eventuell vorhandene Angaben über den Druck, mit dem die Nährlösung versprüht wird, dürften nur im Zusammenhang mit genauen Informationen über die Düsen verwertbar sein.

Angaben zu Beneblungszeiten in Ultraschall-Systemen und *Atomizing Disc* Systemen waren in der Literatur nicht zu finden lassen.

1 Seliger Fogstar 100®

Die notwendige Dauer der Wasserversorgung und die Menge an einzusetzender Nährlösung hängen zusätzlich sowohl vom Entwicklungszustand der Pflanzen, also der Gesamtblattfläche und dem daraus resultierenden Wasserverlust, als auch vom Ausmaß des Wurzelsystems und dessen Aufbau, also der Fläche, die überhaupt vorhanden ist, um die angebotene Wassermenge aufzufangen und aufzunehmen, ab. Zudem ist es wahrscheinlich, dass all diese Parameter zusätzlich gattungs- bzw. artspezifisch sind, woraus sich zusätzliche Schwierigkeiten bei der Beurteilung jeweils geeigneter Systeme oder deren Modifikationen ergeben.

2.2.3 Vergleich hinsichtlich pflanzenbaulicher Eignung

Bezüglich eines direkten Vergleiches der verschiedenen Systeme finden sich in der Literatur nur wenig Informationen. Sylvia und Jarstfer (1995) verglichen die drei oben beschriebenen Systeme hinsichtlich ihrer Tauglichkeit bezüglich der Innokulation von Mykorrhiza an Wurzeln von Süßkartoffeln. Das Ultraschall-System stellte sich als am wenigsten geeignet heraus. Feuchtigkeit gelangte nur unzureichend an die Wurzeln. Die Pflanzen litten unter Trockenstress. Mykorrhiza konnten sich nicht erfolgreich an den Wurzeln etablieren. Das Pump/Düsen-System wies diese Probleme nicht auf und Pflanzen und Mykorrhiza entwickelten sich gut.

Mohammad *et al.* (2000) wiederholten den Versuch in ähnlichem Aufbau mit Sorghum. Die Aussagen von Sylvia und Jarstfer (1995) konnten dabei nicht bestätigt werden. Wachstum von Mykorrhiza und Pflanze waren am höchsten in der Ultraschallvariante. Die Autoren folgern, dass durch die geringere Tröpfchengröße mehr Feuchtigkeit im Wurzelraum gebildet wird und dies die Aufnahme von Nährstoffen aus dem Nährlösungsnebel verbessert. Diese Erklärung wird nicht weiter belegt. Probleme mit den beiden anderen Systemen, insbesondere verstopfte Zuleitungen und Düsen bei Pump/Düsen-Systemen sowie Beschädigungen von Wurzeln durch die Antriebsachse bei der *Atomizing Disc*-Methode lassen die Autoren das Ultraschall-System präferieren.

Ein Vergleich der verschiedenen Methoden ist schwierig: die Datenlage ist gering und es fehlt an Untersuchungen, die verschiedene Systeme unter kontrollierten Bedingungen vergleichen. Einige der vorgestellten Studien sind nicht mehr aktuell und die eingesetzten Techniken entsprechen nicht mehr dem neusten Stand. Auch stellt sich die Frage nach anderen biologischen und pflanzenbaulichen Parametern, die eventuell in aeroponischen Systemen besondere Beachtung finden sollten und sich je nach eingesetzter Technik unterscheiden können. Beispielsweise berichten Wea-

thers und Zobel (1992), dass in schwach konzentrierter Nährlösung Mangelsymptome in aeroponischen eher als in hydroponischen Systemen auftreten. Allerdings ist unbekannt, inwiefern solche Beobachtungen vom jeweils verwendeten System abhängen oder von Parametern wie Tropfengröße, Befeuchtungszyklus usw. beeinflussbar sind.

Um einen besseren Vergleich der Systeme zu ermöglichen, sollten Parameter, deren Kenntnis eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Methoden oder die genaue Herausarbeitung der jeweiligen Vor- und Nachteile erlauben würde, in pflanzenbaulichen Versuchen unter Verwendung aktueller Techniken untersucht werden. Beispielsweise die angesprochene Problematik bezüglich der Menge an Nährlösung, die pro Zeiteinheit an die Wurzel transportiert werden kann oder Veränderungen der Nährstofflösung an der Wurzeloberfläche. Insbesondere bei der Ultraschallmethode scheint es eine große Rolle zu spielen, in welcher Art und Weise der Nährlösungsnebel an die Wurzeln transportiert wird (siehe experimenteller Teil). Allerdings dürfte dies in ähnlicher Weise auch auf die anderen Methoden zutreffen.

2.2.4 Spezielle Eigenschaften aeroponischer Systeme

Charakteristisch für aeroponische Systeme ist die hohe Sauerstoffverfügbarkeit im Wurzelraum. Sauerstoff ist für Atmungsprozesse der Wurzel und damit für die Nährstoffaufnahme notwendig (Marschner, 1995d). Soffer und Burger (1988) konnten in einem aeroponischen System (*Atomizing Disc*) zeigen, dass eine hohe Sauerstoffversorgung eine positive Wirkung auf die Bewurzelung und das Wurzelwachstum von Hartholzstecklingen von *Ficus benjamini* und Stecklingen von Chrysanthemen hat. Sie stellten dabei definierte Sauerstoffsättigungen der Nährlösung durch Einströmen von Stickstoff in den Wurzelraum her. Bewurzelungserfolg der Stecklinge und deren Wurzelwachstum erhöhten sich signifikant mit höherem Sauerstoffgehalt der Nährlösung. In einem weiteren Versuch führten sie die Stecklinge soweit in die Behälter ein, dass deren unteres Ende in die Nährlösung am Boden reichte. Eine Gruppe der Stecklinge befand sich in Behältern, in denen die Zerstäuberscheibe still stand, die Nährlösung also nicht bewegt wurde und der obere Teil der Stecklinge keinem Nebel ausgesetzt war. Die andere Gruppe wurde in normal betriebene Behälter gesetzt. Bewurzelungsintensität sowohl an den sich unter wie auch an den sich über Wasser befindenden Teilen der Stecklinge erhöhte sich, wenn die Zerstäuberscheibe lief.

Die Autoren folgern aus ihren Ergebnissen auf einen positiven Effekt auf Wurzelwachstum, zum Einen von hoher Sauerstoffversorgung, zum Anderen vom Vorhandensein eines Nährlösungsnebels.

Weathers und Zobel (1992) beschreiben weitere Besonderheiten aeroponischer Systeme: Grenzschichteffekte, die sowohl bei *Atomizing Disc* Systemen als auch bei Pump/Düsen-Systemen auftreten. Eine ununterbrochene Befeuchtung der Wurzeln führt an der Wurzeloberfläche zur Ausbildung eines dünnen Nährlösungsfilmes, der stark an Nährstoffen verarmt ist. Setzt sich „frische“ Nährlösung auf diesem Film nieder, weist diese bezüglich des Nährstoffgehaltes einen starken Gradienten gegenüber dem bereits vorhandenem Nährlösungsfilm an der Wurzel auf. Beide Flüssigkeitsfraktionen vermischen sich nicht. Die frische Nährlösung läuft an dem Nährlösungsfilm auf der Wurzel ab. Laut den Autoren entsteht dadurch die Notwendigkeit, die Versorgung mit Nährlösung zeitweise zu unterbrechen, um ein Abtrocknen bzw. eine Aufnahme des Nährlösungsfilmes zu ermöglichen und somit die genannten Grenzschichteffekte zu vermeiden. Systeme, die einen Nebel aus möglichst kleinen Tropfen erzeugen, wie z.B. Ultraschallvernebler, verhindern laut den Autoren die Ausbildung solcher Grenzschichteffekte.

Es ist allerdings nicht klar, ob damit Nährlösungsfilme auf der Wurzel insgesamt gemeint sind, oder solche Nährlösungsfilme, die stark an Nährstoffen verarmt sind und somit direkt für die genannten Grenzschichteffekte verantwortlich sind. Eventuell ist davon ausgegangen worden, dass sich durch den feinen Ultraschallnebel insgesamt kleinere Mengen an Nährlösung auf der Wurzel niederschlagen, und somit kein nennenswerter Nährlösungsfilm entsteht.

Ein weiteres Problem besteht laut Weathers und Zobel (1992) in verringerter Sauerstoffversorgung und Akkumulation von Ethylen unter dem sich auf der Wurzel befindenden Nährlösungsfilm. Der Effekt ist unerwünscht, da beide Faktoren sich negativ auf das Wurzelwachstum auswirken (Marschner, 1995e). Bei Verwendung einer Intervallschaltung oder der Verwendung von Ultraschallverneblern sind die Probleme geringer (Weathers und Zobel, 1992).

Bezüglich der verwendeten Nährlösung finden sich in fast keiner der in dieser Arbeit zitierten Studien Hinweise auf eine spezielle Anpassung an aeroponische Systeme. Meist werden an die jeweiligen Pflanzen angepasste Standardnährlösungen verwendet (z.B. Hoagland, modifiziert). Lediglich die Aussage von Zobel und Weathers (1992) bezüglich der in aeroponischen Systemen schneller auftretenden Mangelsymptome lässt Schlüsse in diese Richtung zu. Da allerdings das System, auf das

sich diese Beobachtung bezieht, nicht näher beschrieben wird, sind Schlussfolgerungen schwierig. Jarstfer *et al.* (1995) berichten dagegen, dass zur erfolgreichen Innokulation der Wurzel mit Mykorrhiza eine abgeschwächte Nährlösung verwendet werden sollte.

2.2.5 Wissenschaftliche Anwendungen

Aeroponische Systeme sind in verschiedenen wissenschaftlichen Bereichen verwendet worden. Forschungsgegenstand waren meist Wurzeln oder damit verbundene Fragestellungen.

Du Toit und Kirby (1997) benutzten ein aeroponisches Pump/Düsen-System, um Maissorten auf Resistenz gegen *Fusarium graminearum* bzw. die von diesem Pilz hervorgerufene Wurzel- und Keimlingsfäule zu untersuchen. Es konnten Sorten mit ausgeprägter Resistenz identifiziert werden, bei denen gleichzeitig eine stärkere Feinwurzelbildung beobachtet wurde. Da die Ausbildung eines stark verzweigten Wurzelsystems ebenfalls eine Strategie zur Vermeidung von Trockenstress sein kann, erklären die Autoren diesen Zusammenhang mit der Eigenschaft des Erregers, die Pflanze zu infizieren, wenn diese unter Stress steht. Die Autoren sehen die Vorteile des aeroponischen Systems in der Möglichkeit, mehrmals Proben von intakten Wurzeln zu nehmen bzw. Messungen vorzunehmen.

Henzler *et al.* (1999) verwendeten aeroponisch gewachsene *Lotus japonicus* Pflanzen, um einen Zusammenhang zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit der Wurzeln und der Expression bestimmter Aquaporine während des Tagesverlaufs darzustellen. Dabei wurden unter anderem Wurzelzellen der Pflanzen in verschiedenen Tiefen des Cortex mit Hilfe einer Zelldrucksonde untersucht.

Kratsch *et al.* (2006) entwickelten ein modifiziertes Pump/Düsen-System, um Pflanzenwurzeln kontrollierten atmosphärischen Bedingungen auszusetzen. Die Pflanzbehälter bestanden dabei aus Glaskolben mit einer Öffnung am Boden, durch die über Düsen die Nährlösung eingespritzt wurde, und einer seitlichen Öffnung zum Einführen von Gas führenden Schläuchen. Das System wurde beispielhaft für die Bestimmung der optimalen Sauerstoffkonzentration während der N₂-Fixierung durch *Frankia*-Knöllchenbakterien verwendet.

Anwendungen bezüglich Erforschung und Vermehrung von Mykorrhiza wurden bereits weiter oben beschrieben (Jarstfer und Sylvia, 1995). Vorteile aeroponischer Kultur bei der Innokulation sind verbesserte phytosanitäre Bedingungen, höhere Innokulationsraten und die Möglichkeit, mykorrhizierte Wurzelstücke gezielt abzuernsten bzw. zu beproben und somit eine höhere Ausbeute an Pilzmaterial zu erhalten.

Auch das Wachstum und die Nodulation von stickstofffixierenden Knöllchenbakterien lassen sich durch Einsatz aeroponischer Systeme verbessern (Martin-Laurent *et al.*, 1997).

2.2.6 Kommerzielle Pflanzenproduktion

Über den Anteil aeroponischer Anbauverfahren innerhalb der Pflanzenproduktion bzw. an der Pflanzenproduktion in erdlosen Kulturverfahren konnten keine Daten gefunden werden. Es wird berichtet, dass Aeroponik in Singapur erfolgreich in der Gemüseproduktion verwendet wird (Lay *et al.*, 2002), allerdings nicht in welchem Umfang dies stattfindet. Daneben existieren noch Berichte in nichtwissenschaftlichen Zeitschriften über einzelne Unternehmer, die Aeroponik erfolgreich im Pflanzenbau einsetzen⁵.

Studien zur Leistungsfähigkeit aeroponischer Systeme im Vergleich zu konventionellem Pflanzenbau oder anderen erdlosen Anbauverfahren sind selten. Hayden (2006) verglich ein aeroponisches Pump/Düsen-System mit verschiedenen anderen Anbaumethoden für Medizinal- und Gewürzpflanzen. Dabei fand ein sogenanntes *A-Frame* System Verwendung, d.h., die Pflanzfläche ist nicht waagrecht, sondern läuft dachförmig schräg nach oben zu. Die Düsen sind in verschiedenen Höhen seitlich und unter den Wurzeln angebracht. Dies führt zu einer erheblich gesteigerten Flächennutzung gegenüber waagrechtlicher Anordnung von Pflanzen. In einem Anbauversuch mit *Yerba mansa* konnte dadurch eine Pflanzdichte von 118 Pflanzen pro m³ im Aeroponiksystem gegenüber 3,2 Pflanzen pro m³ im Feldanbau erreicht werden. Der Trockenmasseertrag pro Pflanze im Aeroponiksystem war zwar vergleichsweise geringer, in Bezug auf Fläche lag er allerdings aufgrund der hohen Pflanzdichte um das 23fache höher. In der Publikation wird ebenso von positiven Ergebnissen beim Anbau von Ingwer und Kleinem Helmkraut berichtet. Für Ingwer wurde dabei ein spezielles Aeroponiksystem entwickelt, in dem das Rhizom in einem speziellen Medium wächst und die Adventivwurzeln durch eine poröse Membran in den Wurzelraum wachsen.

Aeroponische Systeme wurden ebenfalls erfolgreich in der Produktion von Saatkartoffeln getestet. Dabei kann die Knollenausbeute gegenüber anderen erdlosen Verfahren um das 10fache höher liegen (Nugaliyadde *et al.*, 2005). Allerdings muss mit Einbußen beim durchschnittlichen Knollengewicht gerechnet werden (Ritter *et al.*, 2001).

⁵ z.B.: Weaver, A.G. Big-time Farmer of Tiny Crop. The Growing Edge. November/December 2008 (zuletzt aufgerufen: 28.2.2010)

Des Weiteren wurden aeroponische Systeme bei der Produktion von *Acacia mangium*, einer Hartholzart aus Asien, erfolgreich getestet. Bei der Produktion von Jungpflanzen spielt eine erfolgreiche Infektion der Wurzeln mit stickstofffixierenden Bradyrhizobien eine entscheidende Rolle für das Erreichen ökonomisch sinnvoller Wachstumsraten. Es konnte gezeigt werden, dass aeroponische Systeme für diesen Prozess besonders geeignet sind (Martin-Laurent *et al.*, 1997). Die Wachstumsraten der Jungpflanzen im aeroponischen System können um das 4fache höher sein als in Sand und doppelt so hoch wie in Hydrokultur. Zurückgeführt wird dies auf die besonders erfolgreiche Innokulation mit Bradyrhizobien und der damit verbundenen hohen N-Fixierungsrate.

In der kommerziellen Pflanzenproduktion scheinen die Hauptnachteile aeroponischer Systeme in den höheren Kosten, dem gesteigerten technischen Aufwand und der damit verbundenen Notwendigkeit von Fachwissen bzw. Fachpersonal zu liegen. Zudem sind aeroponische Systeme gegen Ausfälle abzusichern. Eine Unterbrechung der Wasserversorgung führt zu einem Totalverlust der Ernte. Die in diesem Abschnitt genannten Beispiele beziehen sich vor allem auf Spezialanwendungen (z.B. Saatkartoffeln) oder die Produktion sog. *High Value Crops* (z.B. Medizinalpflanzen).

3. Reis

3.1 Herkunft, Domestikation und wirtschaftliche Bedeutung

Die Gattung *Oryza* wird der Familie der Süßgräser (Poaceae) aus der Ordnung der Süßgrasartigen (Poales) zugeordnet. Es handelt sich um ein- oder mehrjährige krautige Gewächse, die unter halbaquatischen oder terrestrischen Bedingungen wachsen. Die Gattung umfasst mindestens zwanzig Wild- und zwei kultivierte Spezies, *O. sativa* und *O. glaberrima* (Macleane *et al.*, 2002b).

Heutige Kenntnis über die geographische Verteilung und die Biosystematik von *Oryza* legt nahe, dass sich die Gattung bis vor 130 Millionen Jahren auf dem Superkontinent Gondwana entwickelt und nach dessen Auseinanderbrechen in die gegenwärtig vorhandenen Spezies ausdifferenziert hat. *O. sativa* entwickelte sich demnach in Indien und auf dem Süd-Ost-Asiatischen Festland aus den noch heute in Asien zu findenden Wildspezies *O. rufipogon* (perennierend) und *O. nivara* (anuell), während sich die Entwicklung von *O. glaberrima* in Westafrika vollzog (Chang, 2003).

Neuere Erkenntnisse bezüglich der Herkunft der beiden wirtschaftlich bedeutendsten Unterarten von *O. sativa*, *O. sativa indica* und *O. sativa japonica* legen nahe, dass beide Arten unabhängig von einander durch Domestikation aus *O. rufipogon* entstanden sind (Londo *et al.*, 2006). Als Ursprungsort werden dabei das östliche Indien für *O. sativa indica* sowie Südchina für *O. sativa japonica* genannt.

Für die afrikanische *O. glaberrima* Spezies finden sich Diversitätszentren im oberen Nigerdelta und nordwestlich in einem Gebiet nahe der guinesischen Küste (Chang, 2003).

Älteste Zeugnisse der Nutzung von Reis als Nahrungspflanze durch den Menschen in Form von in Tonscherben sichtbaren Abdrücken von Spelzen bzw. Körnern liegen aus Thailand vor und datieren bis in das Jahr 10000 v. Chr. zurück. Die ältesten Hinweise auf Reisnutzung im landwirtschaftlichen Sinne sind circa 8000 Jahre alt und finden sich in China am Mittellauf des Jangtse und am Huai-Fluss (Macleane *et al.*, 2002a).

Heute wird Reis in mindestens 95 Ländern angebaut und gilt zusammen mit Mais und Weizen als eine der wichtigsten Nutzpflanzen für die menschliche Ernährung. 2008 betrug die weltweite Anbaufläche 158 mio. ha. (Weizen: 223 mio. ha., Mais: 161 mio. ha), davon 141 mio. ha. in Asien und 9 Millionen Hektar in Afrika. Die Gesamternte für 2008 betrug 685 Millionen Tonnen, davon 622 Tonnen in Asien (Macleane *et al.*, 2002a; Coats, 2003; Food and Agriculture Organization, 2009).

3.2 Morphologie und Wachstum

3.2.1 Spross

Der oberirdische Teil der Reisflanze besteht aus einem Haupttrieb und mehreren sekundären Bestockungstrieben. Die Triebe sind modular aus aufeinanderfolgenden Sprossabschnitten (Internodien) aufgebaut. Diese sind an ihren oberen und unteren Enden von Knoten (Nodien) begrenzt. An den oberen Enden der Internodien entstehen neue Blätter, an den unteren Enden neue Triebe. Der Halm verlängert sich aus einem Streckungswachstum der Internodien. Tendenziell sind die unteren Internodien kürzer und dicker als die oberen. Dies dient der Stabilität (Wopereis *et al.*, 2009).

Die Blätter sind aus Blattspreite und einer den Spross umschließenden Blattscheide aufgebaut, an deren Basis Blattöhrchen und ein Blatthäutchen (Ligula) zu finden sind. Die längliche Blattspreite ist von der Basis zur Spitze von einer Mittelrippe durchzogen. Links und rechts von dieser verlaufen parallelnervig die Blattadern (Moldenhauer und Gibbons, 2003).

Der Blütenstand ist eine Rispe. Sie entsteht aus dem letzten Internodium, ist mehrfach verzweigt und trägt zwischen 50 und 500 Ährchen. Die Blüte selbst besteht aus einer nicht vollständig entwickelten paarigen Hüllspelze, sowie jeweils einer Deck- und einer Vorspelze, die die Blütenorgane, bestehend aus sechs Staubblättern und einem Stempel, umschließen. Reis ist ein Selbstbestäuber (Moldenhauer und Gibbons, 2003).

Die Frucht ist eine Karyopse. Ein unpoliertes Reiskorn trägt noch die Hülle aus Deck- und Vorspelze, die Rachilla (Blütenstiel), und eventuell noch die Hüllspelze. Die eigentliche Frucht besteht hauptsächlich aus Embryo und Endosperm und besitzt ein Trockengewicht von circa 10 bis 45 Milligramm. (Maclean *et al.*, 2002b)

Das Wachstum einer Reispflanze teilt sich in eine generative und vegetative Phase. Die vegetative Phase beginnt mit der Keimung, geht über in die Jungpflanzenentwicklung und endet mit dem Beginn der Bildung der Rispe. Die Keimung ist charakterisiert durch das Erscheinen von Koleoptile (Keimscheide) und Koleorhiza (Wurzelscheide). Das Reiskorn quillt auf, bis der Feuchtegehalt des Korns für die Keimung ausreichend ist. Als Folge kommt es zu Aktivierung des Stoffwechsels. Durch Atmung wird aus Kohlenhydraten Energie mobilisiert. Unter aeroben Bedingungen erscheinen nun gleichzeitig Koleoptile und Koleorhiza. Liegen anaerobe Bedingungen vor, ist die Entwicklung der Koleorhiza verzögert (Moldenhauer und Gibbons, 2003). Keimraten von 80 bis 90 % können je nach Umweltbedingungen in-

nerhalb von 8 bis 20 Tagen erreicht sein (Yoshida, 1981). Die optimale Keimtemperatur beträgt zwischen 27 und 37° Celsius (Moldenhauer und Gibbons, 2003).

Wachstumsstadien der Jungpflanze werden als V1 bis V4 Stadium bezeichnet. V1 bezeichnet den Keimling mit Prophyll (Vorblatt) und erstem voll entwickeltem Blatt. Das Prophyll entwickelt sich aus der Koleoptile. Nach Erscheinen des Prophylls folgt die Bildung des ersten voll entwickelten Blattes. Mit dem Erscheinen des vierten voll entwickelten Blattes am Haupttrieb ist das V4 Stadium erreicht und die Jungpflanzenphase gilt als abgeschlossen. Es beginnt die Bestockung (Moldenhauer und Gibbons, 2003).

Der erste Bestockungstrieb erscheint zusammen mit dem fünften Blatt des Haupttriebes und entwickelt sich aus der Blattachsel des zweiten Blattes. Der zweite Bestockungstrieb folgt gleichzeitig mit dem sechsten Blatt des Haupttriebes an der Blattachsel des dritten Blatts usw.. An den Bestockungstrieben setzt sich dieses Muster fort, so dass auch hier neue Triebe jeweils drei Blätter unterhalb des jüngsten Blattes entstehen (Yoshida, 1981).

Die Anzahl an Bestockungstrieben, die tatsächlich gebildet werden, ist abhängig von Reihenabstand, Nährstoffversorgung, Licht- und Temperaturbedingungen, genetischen Faktoren und eventuell noch anderen Umständen. Einen großen Einfluss hat ebenfalls das Anbauverfahren: beim Streusaatverfahren bilden sich deutlich weniger Bestockungstriebe (2-5) als wenn eine Verpflanzung der Jungpflanzen stattfindet (10-30) (Yoshida, 1981; Moldenhauer und Gibbons, 2003).

Die reproduktive Phase beginnt mit der Entwicklung der Rispen in der Sprossspitze circa 15 bis 30 Tage vor dem Ährenschieben. Diese Entwicklung ist von außen zunächst nicht sichtbar. Im weiteren Verlauf erfolgt eine Verlängerung der Internodien, die mit einer sichtbaren Vergrößerung der Pflanzenhöhe einhergeht. Die Fahnenblätter, die in dieser Phase gebildet werden, zeigen ein verändertes Erscheinungsbild. Die Unterschiede betreffen Farbe, Länge und Anstellwinkel. Zudem werden Bestockung und Wurzelwachstum reduziert. Circa zwei Tage vor dem Ährenschieben streckt sich das letzte Internodium noch einmal um bis zu 20 cm (Yoshida, 1981).

Mit dem Ährenschieben wird die Rispe sichtbar und innerhalb der nächsten 10 Tage beginnt die Blüte. Vor- und Deckspelze öffnen sich, um die Antheren durch Verlängerung der Staubfäden nach außen zu schieben. Vor dem Öffnungsprozess werden jedoch von der Anthere Pollen freigegeben und fallen auf das Stigma. Reis ist daher in erster Linie ein Selbstbefruchter (Moldenhauer und Gibbons, 2003).

Aus dem Fruchtknoten entwickelt sich das Reiskorn, das während der Reifephase eine Farbänderung von grün nach gelb durchläuft, und am Ende einen Wassergehalt von unter 20 % aufweist (Moldenhauer und Gibbons, 2003).

3.2.2 Wurzel

Reis bildet je nach Entwicklungsstadium und Umweltbedingungen bis zu drei verschiedene Arten von Wurzeln: eine Keimwurzel (*Radicula*), Mesokotylwurzeln und sprossbürtige Kronenwurzeln (*Adventivwurzeln*) (Yoshida, 1981).

Die Keimwurzel ist der Teil der Pflanze, der nach der Keimung als erster erscheint. Sie wächst bis zu einer Länge von 15 cm. Die Keimwurzel dient der Ernährung und Verankerung der Jungpflanze und bleibt bis zum Erscheinen des 7. Blattes aktiv. Mesokotylwurzeln entspringen dem Mesokotyl entlang der Sprossachse, treten allerdings nur unter anaeroben Bedingungen auf. Die Kronenwurzeln entwickeln sich direkt aus den oberen und unteren Regionen der untersten Sprossinternodien des Halmes und bilden den größten Teil des Wurzelsystems der adulten Pflanze. Wurzeln mit Ursprung am oberen Ende der Internodien sind dünner als Wurzeln, die sich aus dem unteren Ende heraus entwickeln (Yoshida, 1981; Moldenhauer und Gibbons, 2003).

Pro Sprossknoten können circa 25 einzelne Wurzeln gebildet werden. Sie können sich bis zu sechs mal verzweigen, wobei der Durchmesser mit dem Grad der Verzweigung abnimmt (1,5 mm - 40 µm). Das Wurzelwachstum erreicht sein Maximum während der Blüte und setzt sich bis zur Reife fort. Ebenfalls entstehen bis zur Reife durch Verzweigung neue aktive Wurzelzonen (Yoshida und Hasegawa, 1982).

An der Spitze einer einzelnen Wurzel befindet sich innerhalb der ersten 0,25 mm eine meristematische Region, von der das Längenwachstum ausgeht. Seitenwurzeln entstehen circa 30 - 40 mm hinter der Wurzelspitze. Die Aufnahme von Nährstoffen und Wasser ist am höchsten zwischen diesen beiden Regionen (Yoshida, 1981).

Zwischen Endo- und Epidermis finden sich entlang älterer Reiswurzeln luftgefüllte Hohlräume, sogenannte Aerenchyme (Yoshida und Hasegawa, 1982), die durchgängig mit Interzellularräumen in Spross und Wurzel verbunden sind. Durch diese Hohlräume kann die Wurzel unter anaeroben Bedingungen über den Spross mit Sauerstoff versorgt werden. Die radiale Durchlässigkeit für Sauerstoff ist an der Wurzelspitze am geringsten und steigt mit zunehmender Entfernung von dieser an (Colmer, 2003). Auf diese Weise kann Sauerstoff bis in die Wurzelspitze gelangen und deren Vordringen in sauerstoffarme Bodenschichten ermöglichen.

Reis kann auch unter Bedingungen mit guter Wasserversorgung Anzeichen von Trockenstress zeigen, insbesondere bei hoher Strahlungsintensität. Sichtbare Symptome sind beispielsweise zusammengerollte Blätter (*leaf rolling*). Dieser Effekt ist umso ausgeprägter, je besser die Pflanze ernährt, also je größer die Blattfläche ist, und je schwächer entwickelt das Wurzelsystem ist (Hirasawa *et al.*, 1992). Die Blätter der Reispflanze sind relativ dünn und die Zahl an Spaltöffnungen ist bis zu 10-mal größer als bei anderen Gräsern (Bouman *et al.*, 2006). Der transpirative Wasserverlust über die Blätter ist daher hoch. Bei starker Sonneneinstrahlung kann dieser nicht in ausreichendem Maße durch den Wassertransport über Wurzeln und Spross ausgeglichen werden. Die Gründe hierfür liegen auch in einer geringen hydraulischen Leitfähigkeit der Reisswurzel. Diese ist das Resultat eines im Vergleich zu anderen Getreidearten hohen axialen Widerstandes innerhalb der Wurzel mit Ursache in besonders stark entwickelten Schichten von Exo- und Endodermiszellen, einer verholzten Sklerenchymschicht an der Innenseite der Exodermis (Ranathunge *et al.*, 2003), sowie eines besonders hohen Suberingehalts der Exodermis (Schreiber *et al.*, 2005).

Unter aeroben Bedingungen erreichen Reisswurzeln eine Tiefe von bis zu einem Meter, unter anaeroben Bedingungen selten mehr als 40 cm (Moldenhauer und Gibbons, 2003). Die stärkste Durchwurzelung des Bodens findet sich in einer Tiefe von 15 - 20 cm (Yoshida und Hasegawa, 1982).

3.3 Reisanbau und Wasserverbrauch

Weltweit existieren verschiedene landwirtschaftlicher Anbausystemen für Reis. Vom *International Rice Research Institute (IRRI)* werden vier Gruppen unterschieden: *Irrigated* (Nassreisanbau), *Rainfed lowland* (regenabhängiger Niederungsreisanbau), *Upland* (Trockenreisanbau) und *Flood Prone* (Tiefwasserreisanbau) (Maclean *et al.*, 2002b).

Bei Nassreisanbau sind die Felder geflutet und die Wasserversorgung ist die gesamte Anbauzeit über gesichert. Es erfolgt je nach Klima eine zusätzliche Bewässerung, insbesondere wenn der Anbau während einer Trockenzeit stattfindet. Der konstanten Wasserversorgung und intensiven Bewirtschaftungsmethoden sind hohe Erträge von circa drei bis neun Tonnen pro Hektar zu verdanken. Nassreisanbau findet auf circa 50% der Weltanbaufläche statt, liefert aber 75 % der Welternte.

Im regenabhängigen Niederungsreisanbau ist die Wasserversorgung weniger gut kontrolliert. Die Felder sind eingedämmt, aber nur während eines Teils der Anbauzeit geflutet. Die Gefahr von Totalüberflutungen und Dürren sowie die Tatsache,

dass diese Art des Reisanbaus oft auf weniger geeigneten Böden und unter schwierigeren klimatischen Bedingungen stattfindet, führen zu weniger stabilen Erträgen verglichen mit Nassreisanbau.

Trockenreisanbau ist das dominierende Anbausystem in Lateinamerika und Westafrika. Die Felder sind nicht eingedämmt und liegen zu keiner Zeit unter Wasser. Die Erträge sind mit ein bis zwei Tonnen pro Hektar gering. Trockenreisanbau wird vor allem von Kleinbauern in Subsistenzwirtschaft betrieben. Die Felder liegen auf Hügeln oder an Hängen.

Von Tiefwasserreisanbau wird gesprochen, wenn an über 10 Tagen ein Wasserstand von mehr als einem Meter vorliegt. Die Pflanzen können zeitweise ganz überflutet sein. Die Erträge sind extrem variabel.

Nassreisanbau liefert ca. 75 % der Weltproduktion. Die konstant hohen Erträge gehen mit hohem Wasserverbrauch einher. Der absolute Wasserverbrauch pro Kilogramm Ertrag ist bei Reis circa doppelt so hoch wie bei Weizen. Dabei unterscheiden sich die Pflanzen selbst nicht signifikant in der Wassernutzungseffizienz. Die Unterschiede liegen in den verschiedenen Anbausystemen (Barker *et al.*, 1998), und begründen sich darin, dass beim Nassreisanbau die Felder geflutet sind.

Etwa 24 – 30% des weltweiten Verbrauchs an Frischwasser werden für Nassreisanbau verwendet (Bouman *et al.*, 2006). Allerdings findet Nassreisanbau oft in niederschlagsreichen Gebieten statt, in denen Regenwasser genutzt werden kann. Jedoch könnten durch Wasserverschmutzung im Jahr 2025 20% des Nassreisanbaus von Wassermangel bedroht sein (Tuong und Bouman, 2003).

3.4 Reis und Aeroponik

Über Reisanbau in kommerziellen aeroponischen Systemen liegen keine Daten vor. Über die zu erwartenden Erträge im Vergleich mit oben genannten Systemen können somit keine Aussagen getroffen werden. Es stellt sich die Frage, ob Reis als halbaquatische Pflanze von der erhöhten Sauerstoffversorgung der Wurzeln in aeroponischen Systemen profitiert. Generell liegen die Erträge unter anaeroben Bedingungen in gefluteten Anbausystemen höher als unter aeroben Bedingungen. Auch die Erträge speziell für Trockenanbau angepasster Reissorten (*aerobic rice*) liegen unter den Erträgen im Nassreisanbau. Allerdings sinken die Erträge dieser Sorten erst im Laufe mehrerer Anbaujahre (Penga *et al.*, 2006).

In der Forschung sind aeroponische Systeme für Trockenstressversuche mit Reis verwendet worden. Es wurden bestimmte Charakteristika von Wurzelsystemen ver-

schiedener Sorten aufgenommen und auf Korrelationen mit Trockenstressresistenz untersucht. Maximale Länge und der Anteil an dicken Wurzeln korrelierten dabei positiv mit Trockenstressresistenz. Die Methode diente der Identifikation geeigneter Sorten (Reyniers *et al.*, 1982; Gupta und Toole, 1986; Loresto *et al.*, 1989; Namuco *et al.*, 1993). Von Interesse ist die Tatsache, dass die Wurzelsysteme teilweise über einen Meter lang wurden.

Reis bevorzugt Ammonium (NH_4^+) gegenüber Nitrat (NO_3^-) als Stickstoffquelle (Marschner, 1995c). NH_4^+ steht in wässriger Lösung in einem Gleichgewicht mit Ammoniak (NH_3). Unter alkalischen Bedingungen ist das Gleichgewicht in Richtung Ammoniak verschoben. Ammoniak ist unter Normalbedingungen gasförmig und kann entweichen, vor allem, wenn das Wachstumsmedium gut durchlüftet ist (Benbi und Nieder, 2003). Diese Tatsache muss in aeroponischen Systemen generell berücksichtigt werden. Da für Reis jedoch üblicherweise Nährlösungen mit saurem pH-Wert verwendet werden (1976), ist die Gefahr von Ammoniakverlusten eher gering einzuschätzen.

4. Material und Methoden

4.1 Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern

Das hier beschriebene aeroponische System wurde in Vorversuchen entwickelt. Es ermöglichte verlustfreies Umpflanzen und Anwachsen von Reiskeimlingen im aeroponischen System. Beim Zuschalten von Zusatzbeleuchtung in Form von 400 Watt Pflanzenlampen kam es jedoch zu Vertrocknen und Absterben von Pflanzen. Das System schien jedoch ausreichend, um die Reaktion von Reispflanzen auf verschiedene Befeuchtungsdauern zu beurteilen.

4.1.1 Lüfter

Ohne künstlich erzeugte Luftbewegung erzeugen Ultraschallvernebler nur eine Nebeldecke, die sich maximal wenige Zentimeter über die Wasseroberfläche erstreckt. Es ist notwendig, diese Nebeldecke mittels eines Luftstroms aufzuwirbeln und an die Wurzeln zu transportieren. Die zu diesem Zweck verwendeten Geräte müssen wasserdicht sein und der entstehende Luftstrom muss ausreichen, um den Nebel innerhalb des zu verwendeten Behälters homogen zu verteilen⁶.

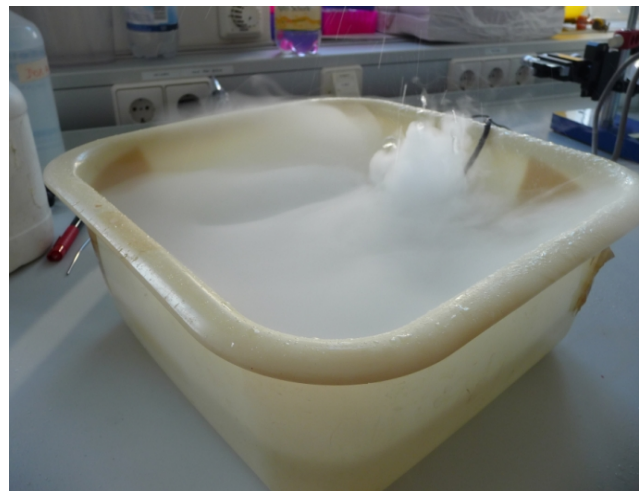


Abbildung 1: Nebeldecke über einem Ultraschallvernebler

In diesem Versuch wurden Lüfter der Firma Elektrosil verwendet. Diese sind vom TÜV Süd für ständigen Betrieb unter Wasser zertifiziert (Schutzklasse *IP68*). Die Bauform ist kompakt (je nach Modell 6 - 12 cm Durchmesser). Zur Stromversorgung können 12 Volt Netzteile verwendet werden. Der Preis liegt nicht wesentlich über dem vergleichbarer, nicht wasserfester Produkte (ca. 12 Euro). Die Lüfter sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht frei auf dem europäischen Markt erhältlich, sie konnten jedoch über die Firma Elektrosil bezogen werden.

Es wurde das Modell MGA8012LB-O25 verwendet.

⁶ Produkte, die laut Herstellerbezeichnung als wasserdicht bzw. wasserfest bezeichnet werden, dies jedoch nicht durch entsprechende Zertifizierung (TÜV o.ä.) nachweisen konnten, überstanden den Betrieb in feuchter Umgebung nur wenige min. Bei Kontakt mit der in den Versuchen verwendeten Nährlösung kam es sogar innerhalb von Sekunden zu irreparabler Schädigung.

4.1.2 Vernebler

Es wurden Ultraschallvernebler der Firma Conrad Elektronik verwendet (Abbildung 2; die auf dem Gerät angebrachten LEDs dienen optischen Effekten bei der Verwendung in Wasserspielen, Zimmerbrunnen o. ä.) Das piezokeramische Element, also die Ultraschall erzeugende Membran, bestand aus Kupfer. Die Kupfermembran war im Hinblick auf Korrosionsgefahr problematisch. In Verneblern anderer Hersteller werden weniger korrosionsanfällige Materialien wie z.B. Teflon oder Glas verwendet. Die Geräte von Conrad Electronic zeigten allerdings während der Vorversuche keine kritischen Veränderungen an der Membran. Es kam lediglich zu Farbänderungen, was nach eigener Beurteilung die Menge an erzeugtem Nebel nicht nachteilig beeinflusste. Die Membranen wurden während des Versuchs regelmäßig auf Auffälligkeiten untersucht.

Die Vernebler erzeugten zusätzlich zum Nebel wenige größere Tropfen. Diese waren nicht erwünscht, da in diesen Versuchen eine Evaluation des Ultraschallnebels erfolgen sollte. Daher fingen Spritzschutzvorrichtungen, bestehend aus einer Kunststoffpetrischale, die größeren Tropfen über den Neblern ab.



Abbildung 2: Vernebler der Firma Conrad Electronic

4.1.3 Pflanzbehälter

Als Behältnisse für das System dienten schwarze 90 L Mörtelkübel aus Polyethylen. Maße und Form sind der Abbildung 3 zu entnehmen. Als Abdeckung dienten 2 cm starke Polystyrolplatten. In diese wurden mit einer Handbohrmaschine mit Fräsvor-satz Löcher geschnitten. Die Pflanzen wurden mit Schaumstoffpropfen oberhalb der Wurzel in den Löchern befestigt. Bei Jungpflanzen wurde die Abdeckung aufgrund des geringen Eigengewichts mit an den Rändern der Polystyrolplatte geklebten Holzstegen beschwert.

Die aeroponischen Systeme standen auf Pflanztischen und waren direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt. Dies führte zu einem starken Temperaturanstieg der Nährlösung und des Wurzelraums. Daher wurden die Behälter mit Aluminiumfolie umklebt.

Die Temperaturerhöhung fiel daraufhin geringer aus. Messungen diesbezüglich finden sich in Abschnitt 35.

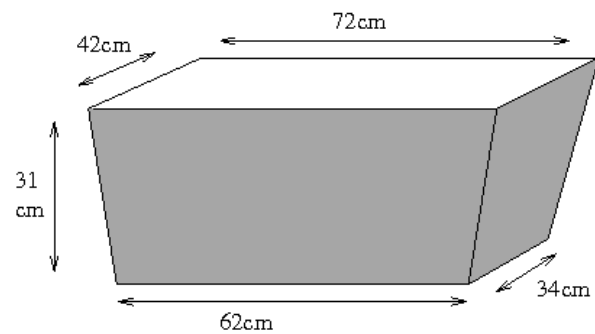


Abbildung 3: Verwendete Mörtelkübel mit Maßangaben

4.1.4 Nährlösung

Es wurde eine für Reis angepasste Nährlösung nach Yoshida (1976) verwendet. Tabelle 1 gibt die Konzentration an Nährstoffen in 100% Nährlösung an. Der Stickstoff lag je zur Hälfte als Ammonium und Nitrat vor. Für Jungpflanzen bis zu einem Alter von zwei Wochen wurde in den Versuchen 50% Nährlösung verwendet. Darauf wird im Text jeweils gesondert hingewiesen. Der pH-Wert der Nährlösung betrug pH 5. Dies wurde täglich kontrolliert und bei Abweichungen durch Zugabe von 1N HCl (Salzsäure) oder 1N NaOH (Natronlauge) korrigiert.

Element	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Mo	B	Zn	Cu	Fe
Konzentration (ppm)	40	10	40	40	40	0.5	0.05	0.2	0.01	0.01	2

Tabelle 1: Yoshida Nährlösung

4.1.5 Pflanzenmaterial

Es wurde Reis der Sorten Chomrong (*O. sativa japonica*) und Sahel 108 (*O. sativa indica*) verwendet. Chomrong ist eine traditionelle, kältetolerante Sorte aus Nepal, Sahel 108 ist eine vom *International Rice Research Institute (IRRI)* gezüchtete Hohertragssorte. Beide Sorten werden üblicherweise als Nassreis angebaut. Das Saatgut stammte vom *Africa Rice Center* (ehemals *WARDA*).

4.1.6 Gesamtsystem

Der Gesamtaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt. Nebler und Lüfter standen am Ende der Längsseite der Aeroponikbehälter. Die Nährlösung bedeckte den Boden der Behälter zu ca. 7 cm. Durch den Sog des Lüfters wurde der Nebel zwischen Spritzschutz und Nebler eingesaugt und im Behälter verteilt. Innerhalb von ca. 30 s

war der gesamte Behälter homogen mit dichtem Nebel gefüllt. Beim Anheben der Polystyrolabdeckung entwich sofort dichter Nebel aus dem Behälter.

In diesem System stand die Wasseroberfläche ca. 24 cm unter den Wurzelhälsen. Die Wurzeln sollten nicht in das Wasser wachsen, da sonst die Versorgung nicht mehr rein aeroponisch stattgefunden hätte. Das begrenzte den Zeitraum, in dem die Pflanzen im System verbleiben konnten. Da Jungpflanzenentwicklung beobachtet wurde, war das System hinsichtlich der Größe ausreichend.

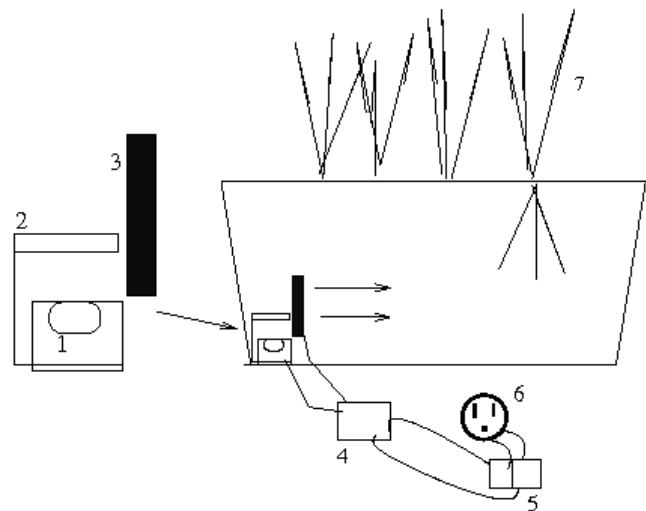


Abbildung 4: Gesamtaufbau des aeroponischen Systems
(1) Vernebler, (2) Spritzschutz, (3) Lüfter, (4) Steuergerät, (5) Netzteile, (6) Steckdose, (7) Pflanzen

4.1.7 Versuchsaufbau

Das in Abbildung 4 dargestellte System wurde 3 mal im Gewächshaus des Instituts 380C aufgebaut. Die Aeroponikbehälter waren auf Pflanztische gestellt. Zusätzliche Beleuchtung wurde nicht eingesetzt. Abbildung 5 zeigt den Versuchsaufbau. Die Vernebler waren oberhalb von Pflanze 2 platziert.

Nebler und Lüfter wurden mit einem Steuergerät auf Microcontrollerbasis gemäß den jeweiligen Schaltzeiten zyklisch an- und abgeschaltet. Das Gerät ist in Anhang A beschrieben. Daraus ergaben sich für die Wurzeln verschiedene Befeuchtungsdauern. Folgende Schaltzeiten wurden gewählt:

- 2 min Laufzeit gefolgt von 8 min Pause (kurze Befeuchtung, **KB**)
- 4 min Laufzeit gefolgt von 6 min Pause (mittlere Befeuchtung, **MB**)
- 6 min Laufzeit gefolgt von 4 min Pause (lange Befeuchtung, **LB**)

Vorlage für Nummerierung

R	R	R	R	R
R	1	2	3	R
R	4	5	6	R
R	7	8	9	R
R	10	11	12	R
R	13	14	15	R
R	R	R	R	R

Kurze Befeuchtung (KB)

R	R	R	R	R
R	S	S	C	R
R	S	C	C	R
R	S	S	C	R
R	S	C	C	R
R	S	C	S	R
R	R	R	R	R

Mittlere Befeuchtung (MB)

R	R	R	R	R
R	S	C	S	R
R	C	S	C	R
R	S	C	C	R
R	C	S	C	R
R	S	S	C	R
R	R	R	R	R

Lange Befeuchtung (LB)

R	R	R	R	R
R	S	C	S	R
R	C	S	S	R
R	C	S	C	R
R	S	S	C	R
R	S	C	C	R
R	R	R	R	R

Abbildung 5: Pflanzplan Versuch 1

Die Versuchspflanzen in den Behandlungen wurden gemäß der Vorlage links durchnummeriert. Reissorten: S=Sahel 108, C=Chomrong, R=Randpflanze

4.1.8 Ablauf und Datenerfassung

Die Pflanzen keimten unter mittlerer Befeuchtung in einem Polystyrolstreifen wie in Abbildung 6 ersichtlich. Die Polystyrolstreifen mit Saatgut wurden mit Kabelbinde in einem der Pflanzlöcher befestigt und befanden sich circa 10 cm unterhalb der Abdeckung. Zu Beginn wurde 25%ige Yoshida-Nährlösung verwendet. Nach 4 Tagen waren über 90% der Pflanzen gekeimt. Die Koleorhiza war durchschnittlich 4 cm lang, der Spross durchschnittlich 2-4 cm. 7 Tage später wurden die Pflanzen randomisiert (Münzwurf) in die Polystyrolabdeckung umgepflanzt. Die Versuchspflanzen waren von Randpflanzen umgeben. Insgesamt wurden pro Box 35 Pflanzen verwendet, davon je 15 Versuchspflanzen. Die Reihenabstände betrugen 8 cm, die Pflanzabstände 5,7 cm. Die Versuchspflanzen wurden gemäß der Vorlage links in Abbildung 5 nummeriert.



Abbildung 6: Aeroponisch gekeimter Reis (Versuch 1)

Mit dem Umsetzen der Pflanzen wurde die Konzentration der Nährlösung auf 50% erhöht. 7 Tage später wurde die Nährlösung gegen 100%ige ausgetauscht und im weiteren Versuchsverlauf wöchentlich erneuert. 27 Tage nach Versuchsbeginn wurden die Pflanzen geerntet und folgende Werte bestimmt:

- Maximale Wurzellänge
- Anzahl sprossbürtiger Kronenwurzeln
- Blattfläche (Area Meter⁷)
- Anzahl Bestockungstriebe
- Trockenmasse Spross (Wägung nach drei Tagen Trocknung bei ca. 70° C im Trockenschrank)
- Trockenmasse Wurzel (s.o.)
- Wurzel-/Spross-Verhältnis (Trockenmasse Wurzel / Trockenmasse Spross)

Zusätzlich wurden die Temperatur im Gewächshaus mit einem Tinytag TPG-4500 Plus aufgezeichnet und an drei Tagen die Wurzelraumtemperatur in allen drei Kisten gemessen.

Innerhalb des Versuchs fanden keine unabhängigen Wiederholungen der Behandlungen statt. Die Versuchsanlagen hatten Prototyp-Charakter und sollten erste Hinweise auf die Reaktion der Pflanzen auf die verschiedenen Befeuchtungsdauern ergeben. Es wurden multiple t-Tests im Rahmen einer Varianzanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in Balkendiagrammen dargestellt. Für Darstellung und statistische Berechnung wurde das Tabellenkalkulationsprogramm Gnumeric (Version 1.9.10) und dessen Statistikmodul verwendet. Das Statistikmodul basiert auf der Statistik-Software R.

⁷ Area Meter MK2, Delta-T Devices

4.2 Versuch zur Bestimmung der Auswirkungen verschiedener pH-Werte

4.2.1 Aeroponisches System

Das System aus dem Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern wurde angepasst. Zwei der im ersten Versuch verwendeten Mörtelkübel wurden aufeinander geschraubt und die Verbindungsstellen mit Silikon abdichtet. Die Gesamthöhe des Behälters betrug 62 cm. Dies verlängerte die Zeit, in denen die Pflanzen im System verbleiben konnten, ohne in die Nährlösung hinein zu wachsen. Zwei der in Abbildung 7 dargestellten Systeme wurden jeweils unter eine 400 Watt Pflanzenleuchte platziert. Abbildung 11 zeigt ein Foto.

Nebler und Lüfter wurden mittig am Boden der Behälter platziert. Der erzeugte Luftstrom traf von unten auf die Wurzeln. Als Abdeckung für die Nebler dienten handelsübliche Pflanztöpfe. Ein Pflanztopf wurde halbiert und diente als Halterung für den Lüfter. Der Pflanzbehälter wurde am Boden mit einem zweiten Pflanzbehälter verklebt. Die gesamte Konstruktion wurde über den Nebler gestellt und bildete gleichzeitig einen Spritzschutz gegen vom Nebler zusätzlich erzeugte Tropfen. Durch Löcher an der Seite und am Boden wurde der erzeugte Nebel vom Lüfter in Richtung Wurzeln geblasen. Abbildung 10 zeigt die Konstruktion. Die Nährlösung im Behälter stand ca. 7 cm hoch und wurde täglich durch Zugabe von vollentsalztem

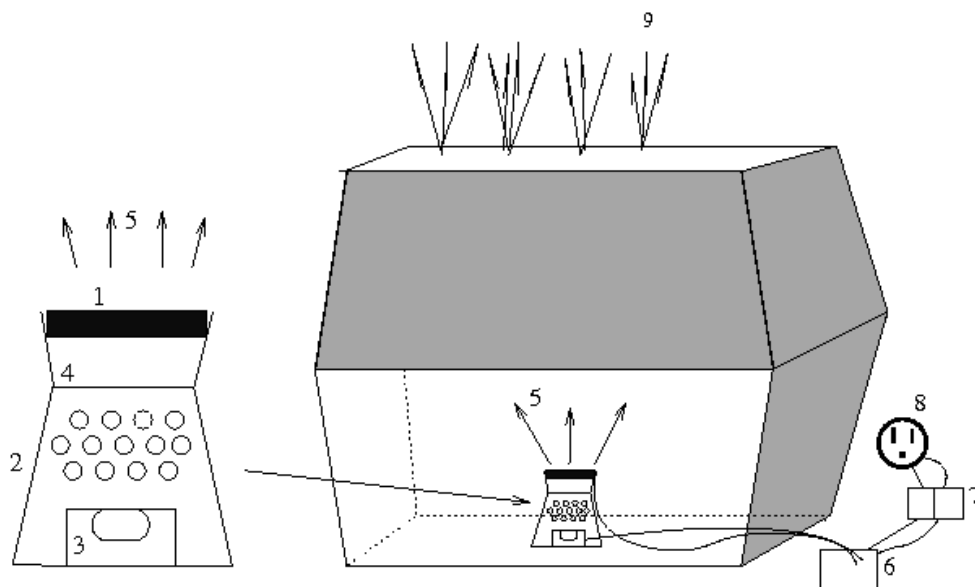


Abbildung 7: Skizze des aeroponischen Systems in Versuch 2
(1) Lüfter, (2) Abdeckung Nebler, (3) Nebler, (4) Halterung Lüfter, (5) Windrichtung, (6) Steuergerät, (7) Stromversorgung (8) Steckdose. (9) Pflanzen

Wasser konstant gehalten. Das System fasste circa 14 L Nährlösung. Dies entspricht 0,33 L Nährlösung pro Pflanze.

Die Pflanzabstände in der Polystyrolabdeckung betrugen 8 cm, die Reihenabstände 4,6 cm. Es wuchsen insgesamt 42 Pflanzen in jedem System, davon 20 Versuchspflanzen.

Die Reispflanzen wuchsen in Testläufen weitaus besser als in den Vorversuchen und im Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern. Nach Verpflanzen der Keimlinge in die Polystyrolabdeckung traten keine Verluste auf. Die Pflanzen wuchsen schneller und zeigten keine Anzeichen von Mangel. Ein Zuschalten der 400 Watt Pflanzenlampen war ohne Probleme möglich.

Die Vernebler von Conrad Elektronik zeigten nach dem Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern starke Korrosionserscheinungen an den Membranen. Insbesondere im Bereich der LEDs auf der Oberseite zeigte sich das Material stark beansprucht. Es kam zum Ausfall eines der Geräte. Daraufhin wurden Ultraschallvernebler der Firma Seliger GmbH beschafft. Diese waren aus einer Edelstahllegierung gefertigt und erzeugten den Nebel durch eine Glasmembran. Die Geräte trugen im Gegensatz zu den Geräten von Conrad Electronik nur eine Kontroll-LED auf der Oberseite. Das eingesetzte Modell war ein Fogstar 100.

Die Ansteuerung von Nebler und Lüfter geschah wie zuvor durch ein Steuergerät. Die Befeuchtungsdauer betrug 6 min/10 min. Der Pflanzen keimten aeroponisch wie beschrieben.

4.2.2 Hydroponisches System

Für das hydroponische System wurden Eurokisten mit den in Abbildung 8 ersichtlichen Abmessungen verwendet. Die Pflanzen wurden ebenfalls mit Schaumstoffpfropfen in einer Polystyrolabdeckung befestigt. Insgesamt wuchsen im System 36 Pflanzen, davon 16 Versuchspflanzen und 20 Randpflanzen. Die Pflanzabstände betrugen 5 cm, die Reihenabstände 4 cm. Das System fasste 11 L Nährlösung. Dies entspricht ca. 0,3 L pro Pflanze. Die Nährlösung wurde nicht belüftet. Abbildung 12 zeigt das System.

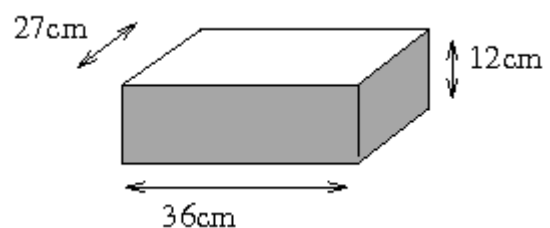


Abbildung 8: Skizze der Behälter des hydroponischen Systems

Die Keimung der hydroponisch kultivierten Pflanzen fand in Schalen statt. Es wurde ebenfalls 25%ige Yoshida Nährlösung verwendet. Um gleiche Lichtbedingun-

gen wie bei den aeroponisch keimenden Pflanzen zu gewährleisten, wurden die Schalen in die leeren Eurokisten gestellt und mit Polystyrol abgedeckt.

4.2.3 Ablauf und Datenerfassung

Es befanden sich zwei der aeroponischen Systeme und zwei der hydroponischen Systeme nebeneinander im Gewächshaus. Die pH-Werte der Nährlösung waren pH 4 und pH 6. Der pH-Wert der Nährlösungen in den verschiedenen Behältern wurde täglich kontrolliert und die Abweichungen zum Vortag notiert. Anschliessend wurde der pH-Wert durch Zugabe von 1N HCL oder NaOH auf den für die verschiedenen Behandlungen vorgesehenen Wert eingestellt.

Das Pflanzenmaterial war dasselbe wie in den vorhergegangenen Versuchen. Die in Tabelle 1 angegebene Nährlösung wurde während der Keimung in 25% Konzentration verwendet. Nach dem Umsetzen wurde die Konzentration auf 50% erhöht. Ab Woche 2 wurde 100% Nährlösung verwendet und wöchentlich erneuert.

Die Pflanzen waren innerhalb von drei Tagen gekeimt und wurden 8 Tage nach Versuchsbeginn umgepflanzt. Der Pflanzplan ist in Abbildung 9 dargestellt. Zwei Tage später wurde die Beleuchtung zugeschaltet. 35 Tage nach Versuchsbeginn wurden Assimilations- und Transpirationsdaten am jeweils jüngsten, vollentwickelten Blatt mit einem Porometer⁸ bestimmt. Die Messungen wurden nur bei Pflanzen der Sorte Chomrong durchgeführt, der Blattdurchmesser von Pflanzen der Sorte Sahel 108 war zu gering. Zusätzlich wurde die relative Chlorophyll-Dichte derselben Blätter mit einem SPAD-Meter⁹ bestimmt. 39 Tage nach Versuchsbeginn wurden die Pflanzen geerntet und folgende Ertragsdaten bestimmt:

- Maximale Wurzellänge (Zollstock)
- Blattfläche (*Area Meter*¹⁰)
- Anzahl Bestockungstriebe
- Trockenmasse Spross (Wägung nach drei Tagen Trocknung bei ca. 70° C im Trockenschrank)
- Trockenmasse Wurzel (s.o.)
- Wurzel-/Spross-Verhältnis (Trockenmasse Wurzel / Trockenmasse Spross)

8 GFS-3000, Heinz Walt GmbH

9 SPAD-502, Minolta

10 Area Meter MK2, Delta-T Devices

Pro Behandlung wurden 16 Pflanzen geerntet. 4 wurden jeweils stehen gelassen, um die weitere Entwicklung zu beobachten. Die statistische Auswertung erfolgte entsprechend dem Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern.

Vorlage für
Nummerierung

R	R	R	R	R	R
R	1	2	3	4	R
R	5	6	7	8	R
R	9	10	11	12	R
R	13	14	15	16	R
R	17	18	19	20	R
R	R	R	R	R	R

Aeroponisch pH 6

R	R	R	R	R	R
R	S	C	C	S	R
R	C	S	S	C	R
R	C	C	S	S	R
R	S	S	C	S	R
R	C	C	S	C	R
R	R	R	R	R	R

Aeroponisch pH 4

R	R	R	R	R	R
R	C	S	C	S	R
R	S	C	S	C	R
R	S	C	C	S	R
R	C	C	S	S	R
R	C	S	S	C	R
R	R	R	R	R	R

Hydroponisch pH 6

R	R	R	R	R	R
R	S	S	C	C	R
R	S	C	S	C	R
R	C	C	S	S	R
R	C	S	C	S	R
R	R	R	R	R	R

Hydroponisch pH 4

R	R	R	R	R	R
R	C	S	C	S	R
R	S	C	C	S	R
R	S	C	C	S	R
R	S	S	C	C	R
R	R	R	R	R	R

Abbildung 9: Pflanzplan Versuch 2
Reissorten: C=Chomrong, S=Sahel 108, R=Randpflanze



Abbildung 10: Vernebler und Lüfter in den aeroponischen Systemen

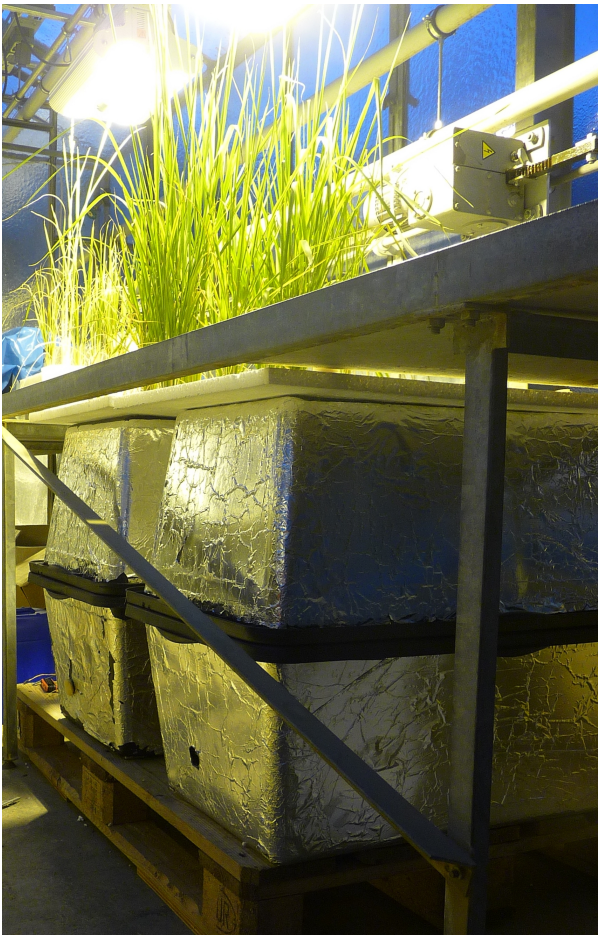


Abbildung 11: Aeroponische Anzuchtsysteme für Reis

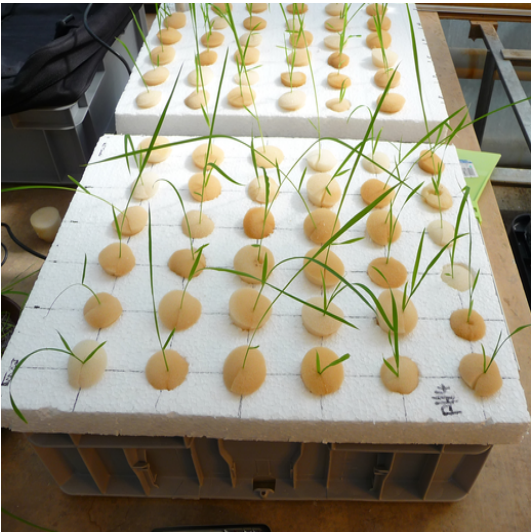


Abbildung 12: Hydroponische Anzuchtsystem für Reis

5. Ergebnisse

5.1 Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern

5.1.1 Temperatur

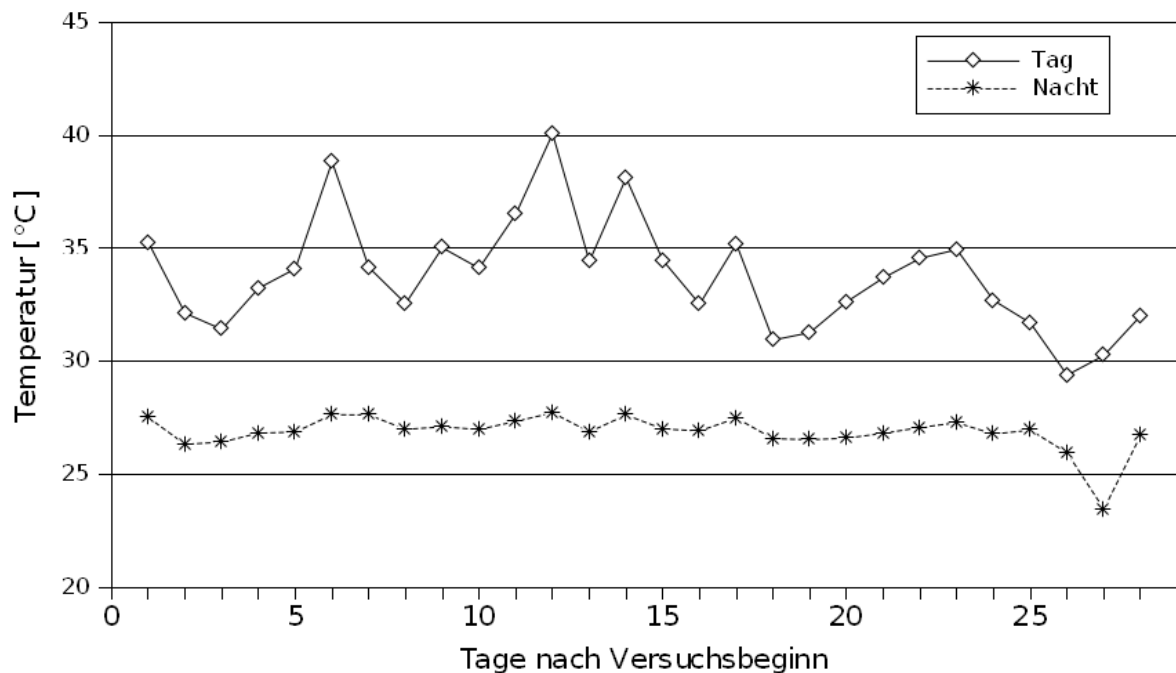


Abbildung 13: Durchschnittliche Tages- und Nachttemperatur im Gewächshaus [°C]

Der Versuch fand vom 16. 7. 2009 bis zum 12. 8. 2009 statt. Die Temperaturen lagen tagsüber teilweise über 40° C. Die Temperaturen der Nährlösung wurden täglich bei der Kontrolle des pH-Wertes mittels eines an der pH-Elektrode angebrachten Temperatursensors geprüft. Die höchste gemessene Temperatur der Nährlösung während des Versuchs lag bei 35° C. Abends und Nachts lag die Temperatur der Nährlösung nicht wesentlich über der Lufttemperatur im Gewächshaus.

Die Temperatur im Wurzelraum lag ebenfalls nicht wesentlich über der Lufttemperatur im Gewächshaus. Bei einer Messung während der heißesten Tagesperiode von 12:00 bis 16:00 ergaben sich Temperaturunterschiede zur Außentemperatur von durchschnittlich 0,4° C in der Variante mit kurzer Befeuchtung, (bei 33,5° C Außentemperatur), 0,5° C in der Variante mit mittlerer Befeuchtung (29, 4° C) sowie 0,8° C in der Variante mit langer Befeuchtung (31,5° C).

5.1.2 Trockenmasse und Wurzel-/Spross-Verhältnis

Lange Befeuchtungsdauer führte bei Chomrong zu einer signifikanten Steigerung der Gesamttrockenmasse. Pflanzen der Sorte Sahel 108 zeigten dagegen keine signifikanten Unterschiede auf die verschiedenen Befeuchtungsdauern bezüglich der gebildeten Gesamttrockenmasse (Abbildung 14).

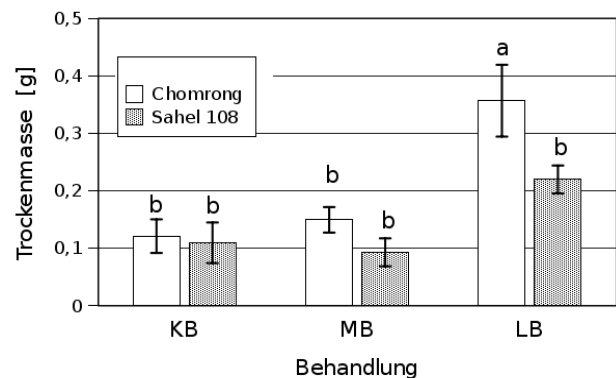


Abbildung 14: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf die Gesamttrockenmasse zweier Reissorten [g]
Mittelwerte aus jeweils 7 Einzelwerten; KB=kurze Befeuchtung, MB=mittlere Befeuchtung, LB=lange Befeuchtung; Fehlerbalken zeigen den Standardfehler, Mittelwerte mit dem selben Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant; $p \leq 0,5$; $LSD=0,13$

Bezüglich Wurzel-/Spross-Verhältnis fanden sich im Versuch keine signifikanten Auswirkungen der verschiedenen Befeuchtungsdauern, die Ausnahme war ein signifikant größeres Wurzel-/Spross-Verhältnis von Sahel 108 unter mittlerer Befeuchtung im Vergleich zu beiden Sorten unter kurzer Befeuchtung.

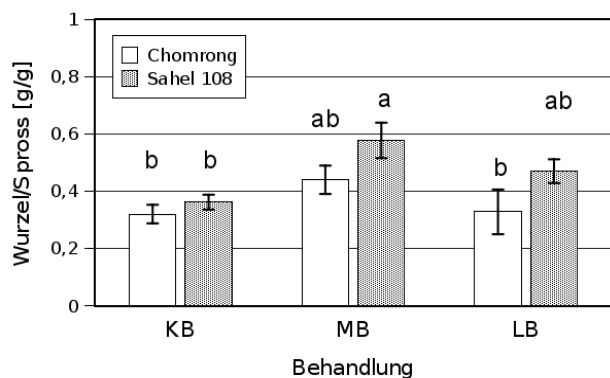


Abbildung 15: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf das Wurzel-/Spross-Verhältnis zweier Reissorten [g/g]
 $LSD=0,15$; Details siehe Abbildung 14

5.1.3 Wachstumsparameter Spross

Eine lange Befeuchtung bewirkte nur bei Chomrong eine signifikant größere Blattfläche als in den anderen Behandlungen (Abbildung 16). Bei Sahel 108 bewirkte die längere Befeuchtungsdauer dagegen keine signifikante Vergrößerung der Blattfläche gegenüber den kürzeren Befeuchtungsdauern.

Die mittlere Befeuchtungsdauer bewirkte gegenüber der kurzen Befeuchtungsdauer bei keiner der Sorten eine signifikante Veränderung in der Anzahl an Bestockungstrieben (Abbildung 17). Unter langer Befeuchtung wurden dagegen bei beiden Sorten signifikant mehr Bestockungstriebe gebildet. Nur der Unterschied von Chomrong bezüglich der Anzahl an Bestockungstrieben unter langer Befeuchtung zu Sahel 108 unter kurzer Befeuchtung war nicht signifikant.

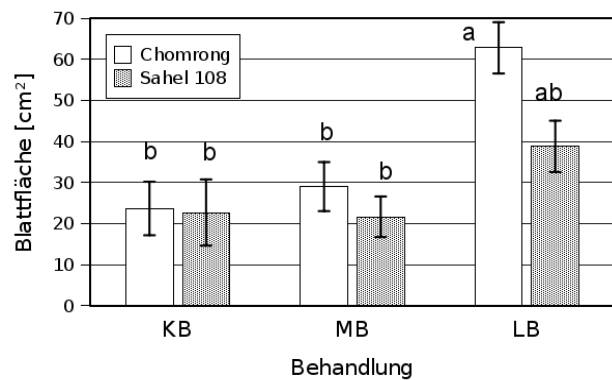


Abbildung 16: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf die Blattfläche zweier Reissorten [cm²]
LSD=22,4; Details siehe Abbildung 14

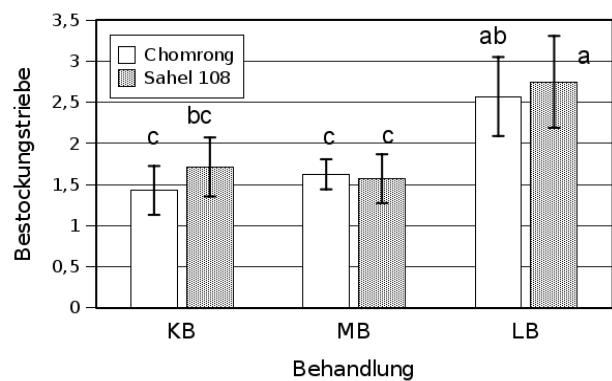


Abbildung 17: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf die Anzahl der Bestockungstriebe zweier Reissorten
LSD=1,1; Details siehe Abbildung 14

5.1.4 Wachstumsparameter Wurzel

Eine lange Befeuchtungsdauer bewirkte bei beiden Sorten eine signifikant größere Anzahl an Kronenwurzeln im Vergleich zu der kurzen Befeuchtungsdauer (Abbildung 18). Die Unterschiede bezüglich der Anzahl an Kronenwurzeln zwischen langer und der mittlerer Befeuchtung waren allerdings nur bei Sahel 108 signifikant.

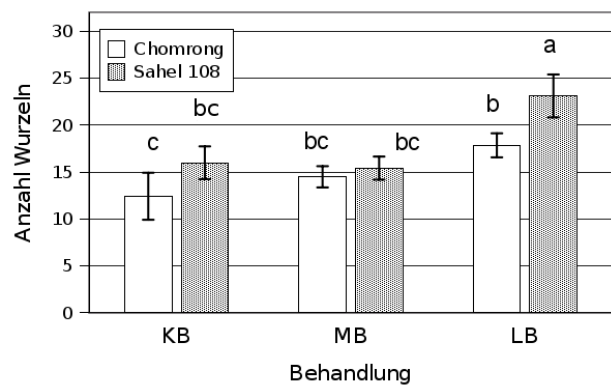


Abbildung 18: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf die Anzahl an Kronenwurzeln zweier Reissorten
LSD=5,38; Details siehe Abbildung 14

Die verschiedenen Befeuchtungsdauern führten im Versuch keine signifikanten Unterschiede in der maximalen Wurzellänge innerhalb der Sorten herbei. Der einzige signifikante Unterschied bezüglich Wurzellänge fand sich zwischen Chomrong unter langer Befeuchtungsdauer und Sahel 108 unter kurzer Befeuchtung (Abbildung 19).

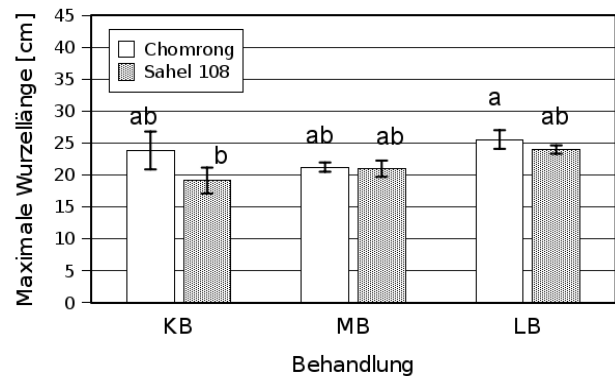


Abbildung 19: Auswirkung verschiedener Befeuchtungsdauern auf die maximale Wurzellänge zweier Reissorten [cm]
LSD=4,9; Details siehe Abbildung 14

5.1.5 Gradient innerhalb der Behandlungen

Abbildung 20 zeigt die durchschnittliche Gesamttrockenmasse in den verschiedenen Behandlungen für jede Reihe von Pflanzen (von links nach rechts). Pflanzen, die nah am Nebler wuchsen, zeigten durchweg ein höheres Gewicht als Pflanzen, die weiter vom Nebler entfernt platziert waren (siehe auch Abbildung 4 auf Seite 26).

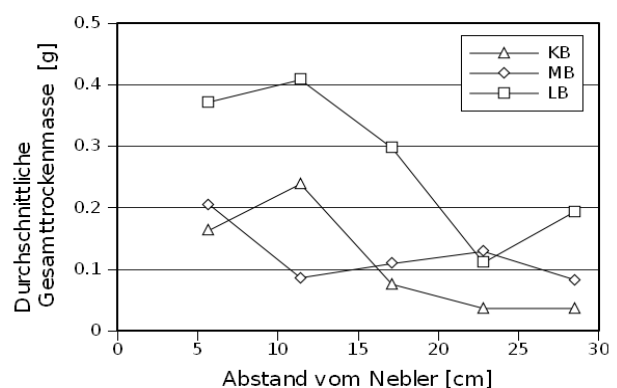


Abbildung 20: Gesamttrockenmasse aeroponisch angezuchteter Reispflanzen in drei Befeuchtungsvarianten in Abhängigkeit zur Entfernung von der Nebelquelle [g]. Datenpunkte zeigen die Mittelwerte von jeweils drei Pflanzen in einer Reihe.

5.2 Versuch zur Bestimmung der Auswirkungen verschiedener pH-Werte

5.2.1 Temperaturen

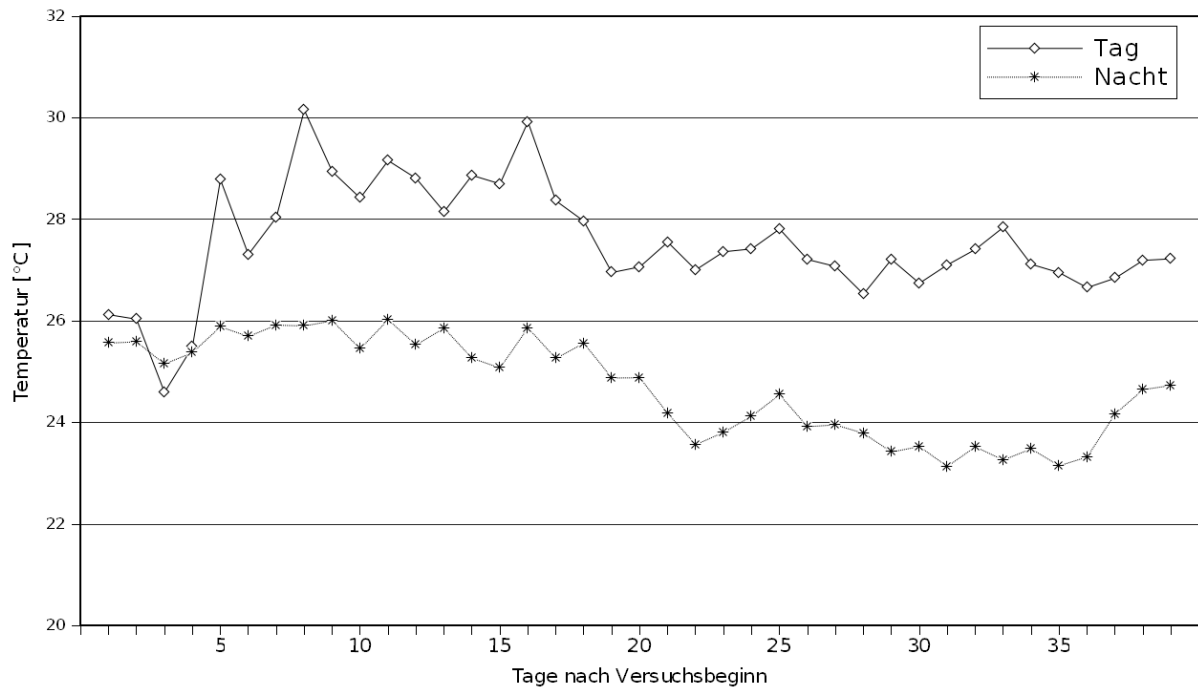


Abbildung 21: Durchschnittliche Tages- und Nachttemperatur während des Versuchs [° C]

Der Versuch fand vom 12.9.2009 bis zum 20.10.2009 statt. Die Lufttemperaturen im Gewächshaus lagen zwischen 30° C tagsüber und 23° C in der Nacht und damit deutlich niedriger als im Versuch zu Befeuchtungsdauern (Abbildung 21).

Die Aeroponik-Behälter waren unter den Pflanztischen platziert, das hatte zur Folge, dass die Temperaturen von Nährlösung und Wurzelraum auf maximal 26° C anstiegen.

5.2.2 pH-Wert

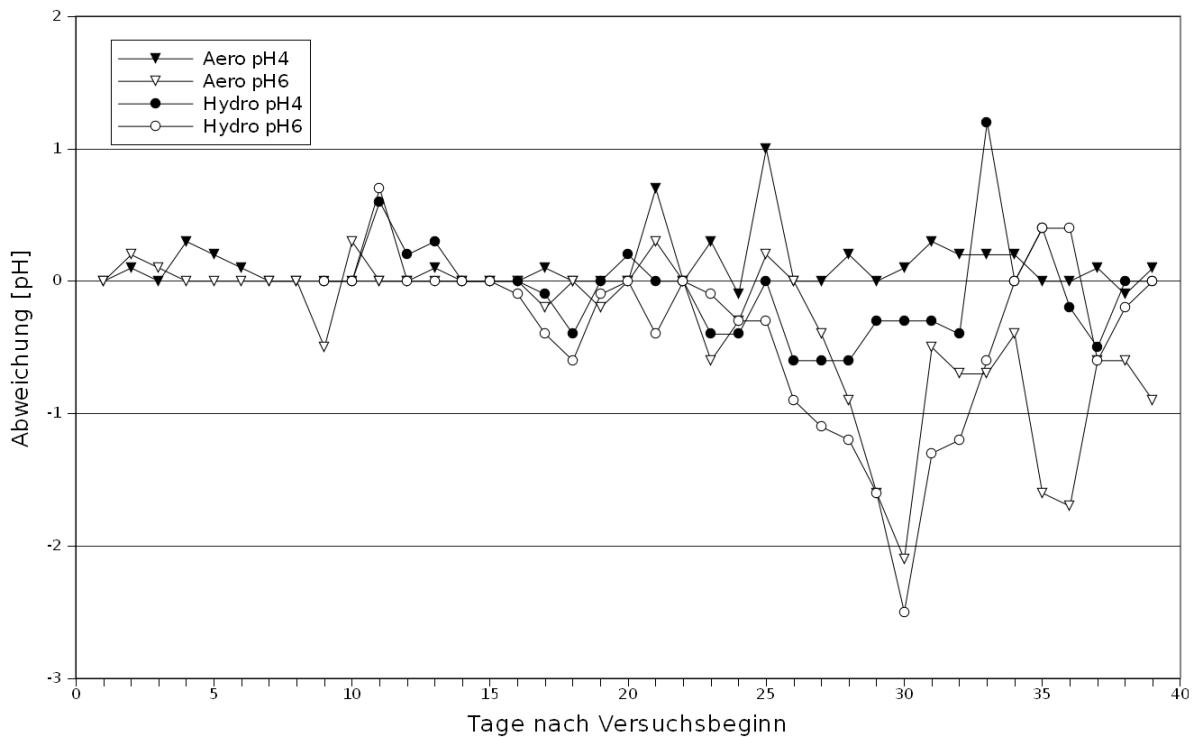


Abbildung 22: Tägliche Veränderung des pH-Wertes der Nährlösung vom Sollwert

Abbildung 22 zeigt die tägliche Abweichung des pH-Wertes der Nährlösung in den verschiedenen Varianten. Der pH-Wert wurde täglich gemessen. Die Abweichungen zum Vortag wurden anschließend durch 1N HCl oder NaOH auf die für die jeweiligen Behandlungen vorgesehenen Werte korrigiert (pH 4 und pH 6).

5.2.3 Trockenmasse und Wurzel-/Spross-Verhältnis

Bei Chomrong bewirkten Anzuchtmethode und pH-Wert keine signifikanten Unterschiede in der Gesamttrockenmasse, mit Ausnahme von Chomrong in hydroponischer Anzucht unter pH 6, wo die Trockenmasse signifikant verringert wurde (Abbildung 23).

Bei Sahel 108 wirkte sich die aeroponische Anzucht in einer signifikant verringerten Gesamttrockenmasse gegenüber der hydroponischen Anzucht aus.

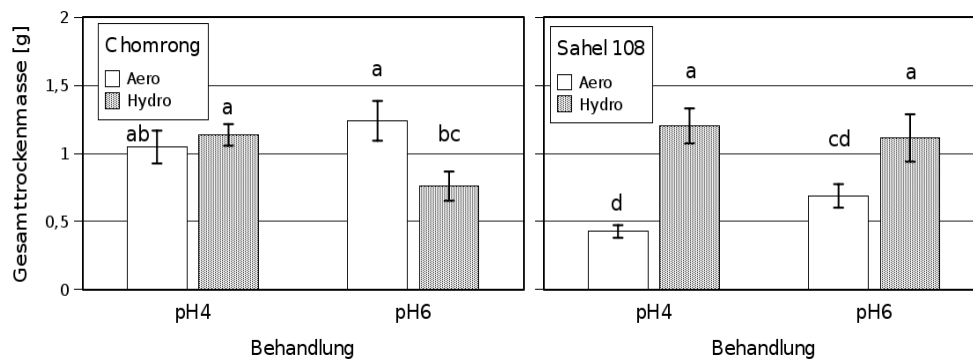


Abbildung 23: Auswirkung verschiedener Anzuchtmethoden und pH-Werte der Nährlösung auf die Gesamttrockenmasse zweier Reissorten [g]
Mittelwerte aus jeweils 8 Einzelwerten; Fehlerbalken zeigen den Standardfehler des Mittelwertes; Mittelwerte mit dem selben Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant $p < 0,5$; $LSD = 0,33$

Das Wurzel-/Spross-Verhältnis war sowohl bei Chomrong wie auch bei Sahel 108 in den aeroponischen Varianten signifikant größer als das in den hydroponischen Varianten (Abbildung 24). Die verschiedenen pH-Werte wirkten sich dagegen bei beiden Sorten nicht signifikant auf das Wurzel-/Spross-Verhältnisses aus.

Zwischen den Sorten zeigte sich bezüglich des Wurzel-/Spross-Verhältnis ein signifikanter Unterschied in der aeroponischen Anzuchtmethode mit pH 6. Hier war das Wurzel-/Spross-Verhältnis von Chomrong signifikant größer.

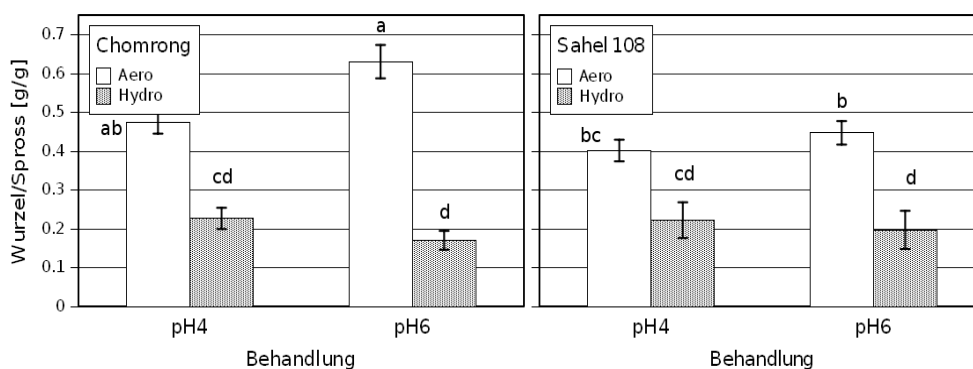


Abbildung 24: Auswirkung verschiedener Anzuchtmethoden und pH-Werte der Nährlösung auf das Wurzel/Spross-Verhältnis zweier Reissorten [g/g]
 $LSD = 0,18$; Details siehe Abbildung 23

5.2.4 Bestockungstriebe und Blattfläche

Chomrong bildete in aeroponischer Anzucht signifikant mehr Bestockungstriebe als hydroponisch (Abbildung 25), wobei die verschiedenen pH-Werte jeweils keinen Einfluss auf deren Anzahl hatten.

Bei Sahel 108 beeinflussten weder die Anzuchtmethode noch der pH-Wert die Anzahl der Bestockungstriebe.

Chomrong bildete in hydroponischer Anzucht signifikant weniger Bestockungstriebe als Sahel 108, während sich die Sorten in der aeroponischen Anzucht nicht unterschieden.

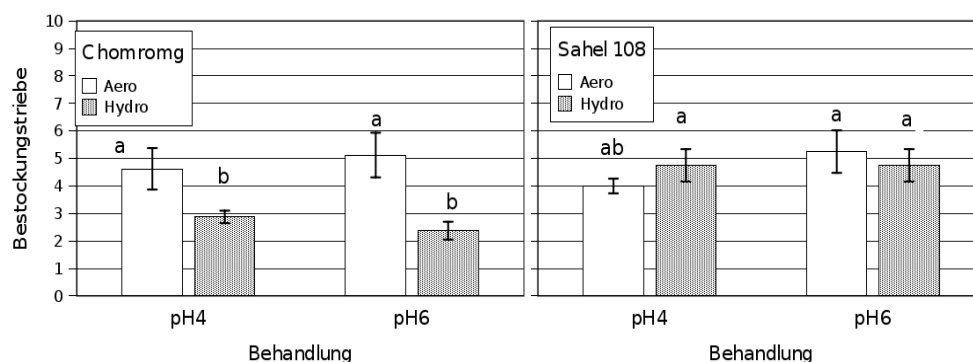


Abbildung 25: Auswirkung verschiedener Anzuchtmethoden und pH-Werte der Nährlösung auf die Anzahl an Bestockungstrieben zweier Reissorten
LSD=1,66; Details siehe Abbildung 23

Bei Chomrong hatten weder die Anzuchtmethode noch der pH-Wert signifikante Auswirkungen auf die Entwicklung von Blattfläche, im Gegensatz zu Sahel 108, wo die hydroponische Anzucht bei beiden pH-Werten signifikant größere Blattflächen induzierte (Abbildung 26).

Chomrong entwickelte unter aeroponischer Anzucht bei beiden pH-Werten signifikant mehr Blattfläche als Sahel 108 unter aeroponischer Anzucht.

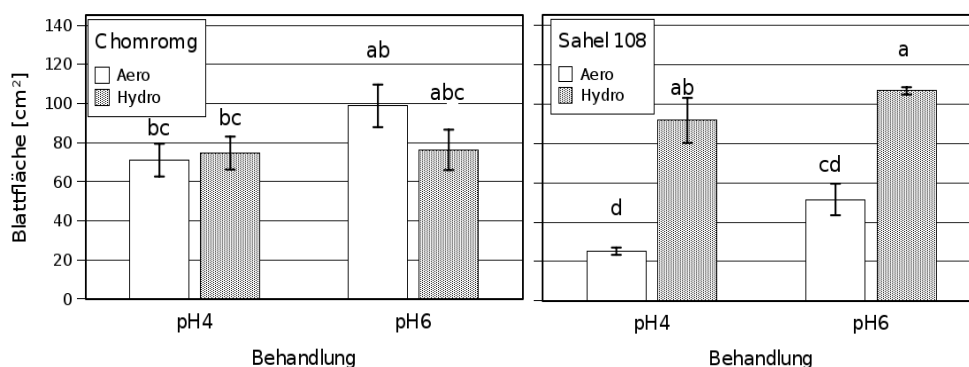


Abbildung 26: Auswirkung verschiedener Anzuchtmethoden und pH-Werte der Nährlösung auf die Blattfläche zweier Reissorten [cm²]
LSD=31,4; Details siehe Abbildung 23

5.2.5 Maximale Wurzellänge

Ein pH-Wert von 6 führte bei beiden Sorten zu signifikant längeren Wurzeln (Abbildung 27), allerdings nur in aeroponischer Anzucht. Die Wurzeln von Chomrong in dieser Behandlung waren dabei signifikant länger als die von Sahel 108.

Unter pH 4 hatte die Anzuchtmethode keine signifikanten Auswirkungen auf die maximale Wurzellänge beider Sorten, die sich auch untereinander nicht signifikant unterschieden.

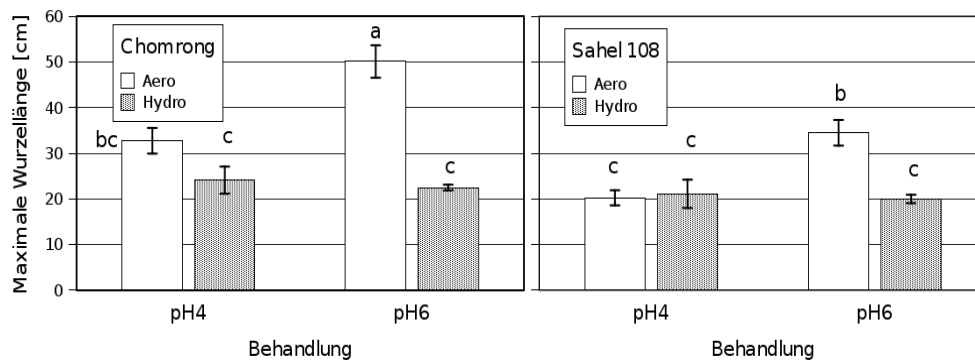


Abbildung 27: Auswirkung verschiedener Anzuchtmethoden und pH-Werte der Nährlösung auf die maximale Wurzellänge zweier Reissorten [cm]
LSD=6.7: Details siehe Abbildung 23

5.2.6 Gaswechselmessung

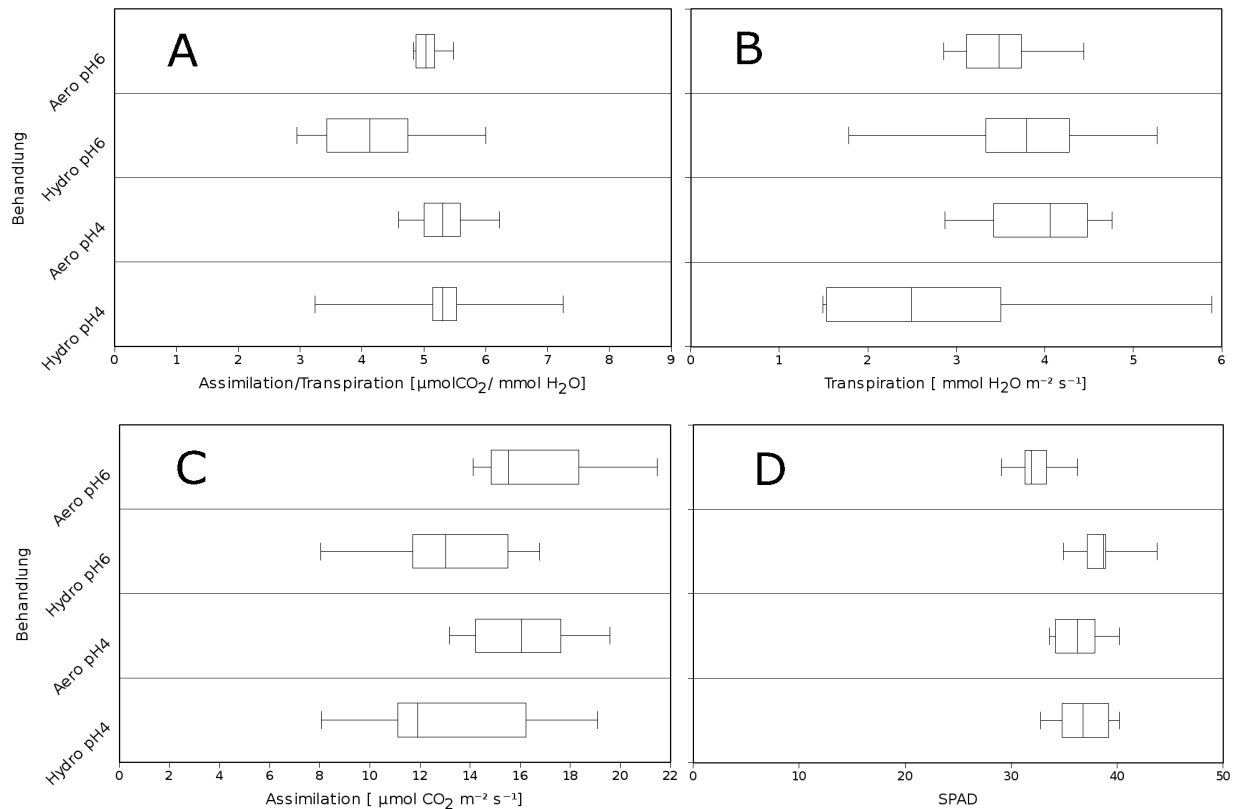


Abbildung 28: Assimilationsraten (A), Transpirationsraten (B), Assimilation/ Transpiration (C) und SPAD-Werte (D) von aero- und hydroponisch angezogenem Reis (Chomrong) unter verschiedenen pH-Werten
 Stichprobenanzahl aeroponischer Pflanzen: 6; Stichprobenanzahl hydroponischer Pflanzen: 5; Die Mittelwerte von Assimilationsraten, Transpirationsraten und Assimilation/Transpiration unterscheiden sich nicht signifikant. ($p < 0,5$; LSD Assimilation: 4,0; LSD Transpiration: 1,5; LSD Assimilation/Transpiration: 1,0) SPAD-Werte der aeroponischen pH6 Variante sind signifikant geringer als die restlichen Mittelwerte ($p < 0,5$; LSD=3,4)

Die Gaswechselmessungen lagen in für C3-Pflanzen üblichen Bereichen (Brück, persönliche Mitteilung, 2010) und ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen aero- und hydroponisch gewachsenen Pflanzen und unterschiedlichen Behandlungen (Abbildung 28). Die SPAD-Werte von Chomrong in der aeroponischen pH 6 Behandlung lagen signifikant unter den restlichen Mittelwerten.

6. Diskussion

6.1 Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern

Das Versuchsziel lag in der Identifikation der optimalen Befeuchtungsdauern für ein aeroponisches Anzuchtssystem für Reis.

Die vorliegenden Ergebnisse lassen Unterschiede im Wachstum junger Reispflanzen in den getesteten Befeuchtungsdauern erkennen (siehe auch Abbildung 14, 16 und 17):

- Die Unterschiede zeigten sich vor allem zwischen den Pflanzen, die in der Variante mit langer Befeuchtungsdauer wuchsen und den Pflanzen in den beiden Varianten mit kürzerer Befeuchtungsdauer.
- Innerhalb der Variante mit langer Befeuchtungsdauer waren Trockenmasse und Blattfläche von Chomrong durchweg höher als bei Sahel 108.
- Die Werte von Sahel 108 in der Variante mit langer Befeuchtung lagen meist zwischen den Werten von Chomrong in derselben Variante und den geringeren Werten der Pflanzen in den beiden anderen Varianten.
- Zwischen Pflanzen in der kurzen und Pflanzen in der mittleren Befeuchtung fanden sich bezüglich Trockenmasse, Anzahl an Bestockungstrieben und Blattfläche nur geringe Unterschiede. Auch Tendenzen waren nur schwer zu erkennen.

Dies lässt den Schluss zu, dass beide Sorten positiv auf die lange Befeuchtungsdauer reagiert haben, Chomrong allerdings mehr als Sahel 108. Die mittlere Befeuchtungsdauer bewirkte gegenüber der kurzen Befeuchtungsdauer dagegen keine Steigerung der Wachstumsparameter.

Zwischen der mittleren und der langen Befeuchtungsdauer scheint ein Schwellenwert existiert zu haben, vor dessen Überschreitung das Pflanzenwachstum gehemmt war.



Abbildung 29: Mangelsymptome an aeroponisch wachsenden Reispflanzen unter kurzer Befeuchtungsdauer

Dies zeigte sich auch in Mangelsymptomen der Pflanzen in den beiden Behandlungen mit kürzerer Befeuchtungsdauer (Abbildung 29). Bei Pflanzen in der Variante mit langer Befeuchtungsdauer traten diese Symptome nicht auf. Symptome von Trockenstress (z.B. *leaf rolling*) traten in keiner der Varianten auf. Auch aus den weiteren Versuchsdaten lassen sich keine Hinweise auf Trockenstress ableiten. Reis wurzelt unter Trockenstress tiefer als unter nichtgestressten Bedingungen (Asch *et al.*, 2005). Die maximale Wurzellänge der Versuchspflanzen zeigte allerdings keine klaren Unterschiede zwischen kürzeren und längeren Befeuchtungsintervallen (Abbildung 19). Die Unterschiede in den Wurzel-/Spross-Verhältnissen ließen ebenfalls keine klaren Tendenz erkennen (Abbildung 15).

Abbildung 30 zeigt, wie sich die Nährlösung im aeroponischen System am Wurzelende als Tropfen sammelte. Eventuell war die Nährstoffaufnahme aus diesen Tropfen für die Wurzeln nicht ohne weiteres möglich und die Nährstoffaufnahme während der Befeuchtung fand eher aus dem Fluss an Nährlösung statt, der von der gesamten Wurzel ablief und sich an der Wurzelspitze sammelte. Ein längeres Andauern dieses Vorganges in der Behandlung mit langer Befeuchtung könnte die Ernährungssituation der Pflanzen in dieser Behandlung verbessert haben.

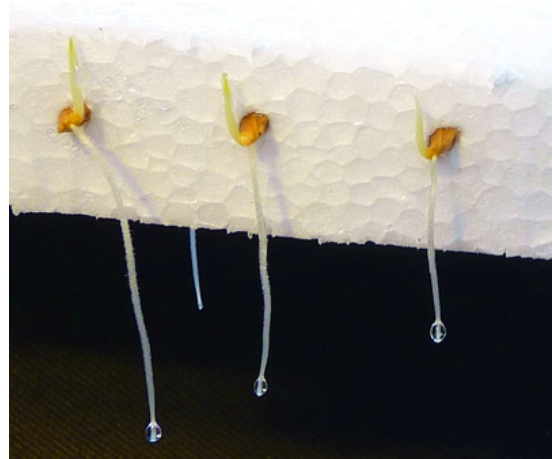


Abbildung 30: Wassertropfen an Wurzelspitzen von aeroponisch gekeimtem Reis

Weathers und Zobel (1992) beschreiben negative Effekte von reduzierter Sauerstoffversorgung von Wurzeln unter einem Nährlösungsfilm. Dies konnte im Versuch nicht bestätigt werden. Zwar fand auch in der Variante mit kurzer Befeuchtung kein vollständiges Abtrocknen der Wurzeln statt, jedoch ist nicht zu erwarten, dass das Wachstum sich unterhalb der für diese Variante gewählten Befeuchtungsdauer wieder verbessert. Eventuell traten die von Weathers und Zobel (1992) beschriebenen Effekte im Versuch nicht auf, da Reis unter anaeroben Bedingungen Aerenchyme zur Sauerstoffversorgung der Wurzeln entwickelt. Die Aerenchymbildung wird auch durch das Pflanzenhormon Ethylen gesteuert (Marschner, 1995a), dass sich laut Weathers und Zobel (1992) unter dem Nährlösungsfilm auf der Wurzel anstaut. Inwiefern sich Ethylen unter den Bedingungen des Versuchs tatsächlich unter dem Nährlösungsfilm angestaut hat, ist allerdings nicht bekannt. Eine Akkumulation von

Ethylen in den Aeroponikbehältern ist unwahrscheinlich, da die Polystyrolabdeckung mit Sicherheit nicht luftdicht auf den Mörtelkübeln auflag und die Abdeckung zudem täglich zur Kontrolle des pH-Wertes bzw. Nachfüllen von Flüssigkeit geöffnet wurde.

Daher sollten weitere Versuche bezüglich der Atmungs- bzw. Gaswechselsituation der Wurzeln durchgeführt werden.

Abbildung 20 zeigt den Einfluss des Abstandes, den die Pflanzen vom Vernebler aufweisen, auf die von den Pflanzen gebildete Trockenmasse. Die Behälter waren während der Befeuchtungsdauern homogen mit dichtem Nebel gefüllt. Beim Anheben der Polystyrolabdeckungen wurde innerhalb kurzer Zeit ein großer Teil des Nebels durch den Luftstrom der Lüfter aus den Behältern gedrückt. Daher war zu Beginn des Versuches davon ausgegangen worden, dass durch die homogene Verteilung des Nebels eine gleichmäßige Versorgung aller Pflanzen, unabhängig von deren Position zum Nebler, gewährleistet ist. Im Versuch zeigte sich jedoch, dass Pflanzen, die nah am Vernebler wuchsen, höhere Wachstumsraten aufwiesen, als Pflanzen weiter vom Nebler entfernt. Die Ursache für dieses Phänomen liegt möglicherweise in der Geschwindigkeit, mit der der Nebel, bzw. die Tropfen, auf die Wurzeln treffen. Die Windgeschwindigkeit dürfte in der Nähe der Nebler höher gewesen sein, als weiter von ihnen entfernt.

Gleichermaßen besteht die Möglichkeit, dass im späteren Verlauf des Versuchs ein Teil der Tropfen von Wurzeln abgefangen wurde, die sich näher am Nebler befunden haben und somit weiter vom Nebler entfernte Wurzeln schlechter mit Nährlösung versorgt wurden.

Unabhängig von der Ursache sind solche Gradienten innerhalb einzelner Behandlungen unerwünscht. Die Pflanzen sollten, in kommerziellen wie auch in wissenschaftlichen Anwendungen, möglichst gleichmäßig wachsen.

Dies wurde bei der Entwicklung des aeroponischen Systems für den zweiten Versuch berücksichtigt.

Im Versuch erwies sich eine Befeuchtungsdauer von 6 min/10 min als optimal. Darunter kam es zu Mangelercheinungen und verringertem Wachstum. Eine Verkürzung der Befeuchtungsdauer kann möglicherweise erreicht werden, wenn die Gründe für das Mangelwachstum von Reispflanzen unter kürzerer Befeuchtungsdauer genauer untersucht werden. Ebenso sollten Messungen vorgenommen werden, welche Menge an Nährlösung Wurzelsysteme junger Reispflanzen in einem ultraschallbasierten aeroponischen System aufnehmen können und inwiefern dies von

Parametern wie Nebeldichte, Stärke der eingesetzten Lüfter und deren Position zu den Pflanzenwurzeln abhängt. Über letzteres geben die Ergebnisse des Versuchs zu Auswirkungen verschiedener pH-Werte Hinweise, diese basieren jedoch auf Erfahrungswerten und nicht auf objektiven Messreihen.

6.2 Versuch zur Bestimmung der Auswirkungen verschiedener pH-Werte

Im Versuch sollte der Einfluss verschiedener pH-Werte auf Wachstumsparameter von Jungpflanzen zweier Reissorten, insbesondere der maximalen Wurzellänge, in einem aeroponischen Anzuchtsystem beobachtet werden. Parallel zu den Pflanzen in den aeroponischen Systemen wurden Reispflanzen in einem hydroponischen System angezogen.

Die Ergebnisse zeigen unterschiedliche Reaktionen der Pflanzen, sowohl auf die verschiedenen pH-Werte, als auch auf die verschiedenen Anzuchtssysteme:

- In den aeroponischen Anzuchtssystemen entwickelten Pflanzen der Sorte Chomrong durchweg mehr Trockenmasse und Blattfläche als Pflanzen der Sorte Sahel 108 (Abbildung 23 und Abbildung 26).
- Die Trockenmasse von Pflanzen der Sorte Sahel 108 war in hydroponischer Anzucht höher als in aeroponischer Anzucht (Abbildung 23).
- Das Wurzel-/Spross-Verhältnis der Pflanzen war in aeroponischer Anzucht generell größer als in hydroponischer Anzucht (Abbildung 24).
- Die maximale Wurzellänge der Versuchspflanzen wurde in hydroponischer Anzucht nicht vom pH-Wert der Nährlösung beeinflusst. Unter aeroponischer Anzucht führte ein pH-Wert von 6 jedoch im gesamten Versuch zu signifikant erhöhter maximaler Wurzellänge (Abbildung 27).
- Werte von Transpiration und Assimilation von Pflanzen der Sorte Chomrong wurden nicht durch die Anzuchtmethode oder den pH-Wert beeinflusst. Lediglich die SPAD-Werte von Pflanzen in aeroponischer Anzucht mit einem pH-Wert von 6 lagen signifikant unter den Werten der anderen Behandlungen (Abbildung 28).

In dem für diesen Versuch entwickelten aeroponischen System bildeten junge Reispflanzen der Sorte Chomrong gleich hohe (pH 4) oder sogar signifikant höhere (pH 6) Gesamttrockenmassen als in einem vergleichbaren hydroponischen System. Die Pflanzen im aeroponischen System zeigten keinerlei Mangelsymptome. Ausfälle traten ebenfalls nicht auf. Zudem wuchsen die Versuchspflanzen gleichmäßiger als in dem System, das im Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern zum Einsatz gekommen war. Die Vernebler waren unterhalb der Wurzeln platziert und der nebelführende Luftstrom traf von unten auf die Wurzeln. Diese Erfahrungen

können Hinweise geben, wie ein optimales Anzuchtssystem für Reis zu entwickeln ist.

Unterschiedliche Wachstumsraten von Chomrong und Sahel 108 unter aeroponischen Bedingungen deuteten sich schon im ersten Versuch an. Dies wurde hier bestätigt. Chomrong scheint sich für aeroponische Anzucht eher zu eignen als Sahel 108, zumal Sahel 108 hydroponisch weitaus höhere Wachstumsraten aufwies als aeroponisch. Ob Pflanzen sich für aeroponische Anzucht eignen, scheint bei Reis abhängig von der Wahl der Sorte zu sein.

Die aeroponisch gewachsenen Pflanzen wiesen durchweg ein höheres Wurzel-/Spross-Verhältnis auf als die hydroponisch gewachsenen (Abbildung 24). Unter natürlichen Bedingungen steigt das Wurzel-/Spross-Verhältnis unter Nährstoffmangel an (Marschner, 1995e). In technischen Anbausystemen mit sicher gestellter Ernährung der Pflanzen kann das Wurzelwachstum dagegen stark eingeschränkt sein. Im NFT-Verfahren (*Nutrient Film Technique*) kultivierte Pflanzen können bis zu 80 - 90% weniger Wurzelmasse entwickeln als unter natürlichen Bedingungen (Marschner, 1995e).

Im Versuch war die Gesamttrockenmasse bei Pflanzen der Sorte Sahel 108 in hydroponischer Anzucht durchweg höher als in aeroponischer Anzucht. Bei Pflanzen der Sorte Chomrong entwickelten aeroponisch gewachsene Pflanzen entweder mehr (pH 6) oder gleich viel (pH 4) Trockenmasse. Zudem liefern die Gaswechseldaten keine Hinweise auf höhere Assimilations- bzw. Transpirationsraten, die durch unterschiedliche Ernährungssituationen zu erklären wären. Die Wurzel-/Spross-Verhältnisse waren allerdings bei beiden Sorten stets höher in der aeroponischen Anzuchtvariante. Ein Zusammenhang zwischen Nährstoffversorgung und Wurzel-/Spross-Verhältnis ist somit nur schwer herzustellen.

In den hydroponischen Systemen stand den Pflanzen weniger Wurzelraum zur Verfügung als in den aeroponischen Systemen (siehe Abschnitt 4.2). Die Wurzeln erreichten nach wenigen Tagen den Boden der Hydroponikbehälter und füllten diese zum Ende des Versuchs größtenteils aus. Bei Pflanzen kommt es zu eingeschränktem Wachstum, wenn der Wurzelraum beschränkt ist (*root restriction stress*, z.B. in Topfkultur) (Marschner, 1995b). Allerdings betrifft dies nicht nur das Wurzel-, sondern ebenfalls das Sprosswachstum (Bonsai-Effekt). Da die Trockenmassen bei keiner der beiden Sorten in hydroponischer Anzucht signifikant geringer war als in aeroponischer Anzucht, ist ein Zusammenhang der höheren

Wurzel-/Spross-Verhältnisse mit den verschiedenen Wurzelraumgrößen ebenfalls nur schwer herzustellen.

Ethylen ist ein unter Normalbedingungen gasförmiges, wasserunlösliches Pflanzenhormon, das sich in verdichteten Böden in Wurzelnähe ansammelt und das Wurzelwachstum hemmt (Marschner, 1995b). Die hydroponischen Systeme waren nicht belüftet und vor allem gegen Ende des Versuchs größtenteils mit Wurzelmasse ausgefüllt. Eventuell kam es zu Ethylenansammlungen und infolgedessen zu vermindertem Wurzelwachstum, ohne dass dadurch das Sprosswachstum und damit die Gesamttrockenmasse gegenüber den Pflanzen in den aeroponischen Systemen verringert wurde. In den aeroponischen Systemen dagegen konnte Ethylen aufgrund des engen Kontaktes der Wurzeln mit der Atmosphäre möglicherweise leichter entweichen, vor allem während der Befeuchtungsunterbrechungen. Inwiefern es zu einer Ansammlung von Ethylen innerhalb der Aeroponikbehälter gekommen sein könnte, kann, wie im Versuch zur Bestimmung optimaler Befeuchtungsdauern, nicht beurteilt werden, jedoch ist nicht davon auszugehen, dass Behälter und Polystyrolabdeckung luftdicht waren.

Möglicherweise liegt die Ursache für die höheren Wurzel-/Spross-Verhältnisse der Pflanzen in den aeroponischen Systemen auch in der erhöhten Sauerstoffverfügbarkeit in deren Wurzelraum. Sauerstoff ist für Atmungsprozesse der Wurzel unerlässlich und eine hohe Sauerstoffverfügbarkeit wirkt sich positiv auf das Wurzelwachstum aus (Marschner, 1995e). Inwiefern die Reispflanzen im Versuch als Pflanzen mit halbaquatischem Ursprung von der erhöhten Sauerstoffversorgung im Wurzelraum profitiert haben könnten, ist allerdings fraglich, zumal es sich nicht um Sorten gehandelt hat, die für Trockenreisanbau gezüchtet waren.

Die Ursache für die höheren Wurzel-/Spross-Verhältnisse konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden. Fragestellungen, die diesbezüglich in weiteren Versuchen zu klären sind, sollten Ethylenkonzentrationen, Aerenchymbildung, Sauerstoffverfügbarkeit und Atmungsprozesse von Reispflanzen in aeroponischen Systemen betreffen.

In aeroponischer Anzucht war die maximale Wurzellänge bei beiden Sorten unter pH6 signifikant größer als unter pH 4 (Abbildung 27). In hydroponischer Anzucht fanden sich dagegen keine signifikanten Unterschiede. Die Verfügbarkeit von Nährstoffen hängt mitunter vom pH-Wert der Nährlösung ab. Insbesondere Spurennährstoffe wie z.B. Mangan sind erst unterhalb eines pH-Wertes von 5,5 gut verfügbar (Schroeder, 1984). Nährstoffmangel führt bei Reis zu einer Steigerung der Wurzel-

länge (Nilufer *et al.*, 2000). Ein pH-Wert der Nährlösung von pH 6 führte allerdings nicht zu verringerter Gesamttrockenmasse oder verringerter Blattfläche gegenüber pH 4. Dies macht Nährstoffmangel für die Erklärung der längeren Wurzeln unter pH 6 unwahrscheinlich.

Längere Wurzeln in aeroponischer Anzucht unter pH 6 können auch dadurch erklärt werden, dass es unter stark sauren pH-Werten zu Toxizität von Mikronährstoffen mit negativen Auswirkungen auf die Wurzellänge kommt (*root length inhibition*) (Marschner, 1995e). Dieser Effekt ist für Reis in Verbindung mit Zink, Kupfer und Nickel beschrieben (Cheung *et al.*, 1990). Die Nährlösung enthielt zu gleichen Teilen Stickstoff in Form von Ammonium und Nitrat. Reis bevorzugt Ammonium als Stickstoffquelle (Marschner, 1995c). Bei Ammoniumaufnahme kommt es zu einer Ansäuerung der Nährlösung, da pro aufgenommenem NH_4^+ -Molekül ein Wasserstoffion zum Ladungsausgleich abgegeben wird. Dies ist auch für Reis beschrieben (Yoshida *et al.*, 1976) und Abbildung 22 zeigt die Abweichungen des pH-Wertes der Nährlösung in den sauren Bereich, vor allem gegen Ende des Versuchs. Die Nährlösungsmengen, die sich in den aeroponischen Systemen an den Wurzeln befanden, waren weitaus geringer als die Gesamtmenge an Nährlösung, in der sich die hydroponisch kultivierten Pflanzen befanden. Die Nährstoff- bzw. Ammoniumaufnahme und damit einhergehende Versauerungsprozesse an den in aeroponischen Anzuchtssystemen gewachsenen Reispflanzen, dürften sich weitaus drastischer abgespielt haben, als sie in Abbildung 22 für die Gesamtmenge der Nährlösungen zu sehen sind. Eventuell wich der pH-Wert des Nährlösungsfilms an den Wurzeln der aeroponischen Pflanzen so stark nach unten ab, dass es zu einer Toxizität von Mikronährstoffen kam. Dieser Prozess dürfte an den Wurzeln der Pflanzen, die in einem pH-Wert von 4 kultiviert wurden, dementsprechend stärker zutage getreten sein. Yoshida-Nährlösung enthielt nur geringe Mengen an Zink und Kupfer. Nickel war nicht vorhanden (Tabelle 2), jedoch war in der Legierung, mit der das Gehäuse der Ultraschallvernebler behandelt war, Zink, Kupfer und Nickel enthalten¹¹. Es ist somit nicht auszuschließen, dass diese Elemente von den Ultraschallverneblern an die Nährlösung abgegeben wurden. Unter einem pH-Wert von 4 kann dies dann die Wurzellänge der Pflanzen verringert haben.

Die verschiedenen pH-Werte der Nährlösung führten in den hydroponischen Anzuchtssystemen nicht zu Unterschieden in der Wurzellänge. Dies kann mit den oben angesprochenen Effekten einer möglichen Ethylenansammlung innerhalb der Nährlösung erklärt werden, die die Bildung von längeren Wurzeln aufgrund schlechterer

¹¹ Bedienungsanleitung Fogstar 100

Mikronährstoffverfügbarkeit überdeckt haben könnte. Zudem befanden sich in den hydroponischen Systemen keine Geräte, die Nickel, Kupfer oder Zink an die Nährlösungen abgeben hätten können.

Die Maximale Wurzellänge, die Reispflanzen in einem aeroponischen System entwickeln, spielt eine große Rolle hinsichtlich der Entwicklung eines kommerziell genutzten, mehrstöckigen Gewächshauses, da hiervon maßgeblich konstruktive Parameter wie Stockwerkhöhe usw. abhängen. Daher sollten die oben angesprochenen Fragestellungen bezüglich der Beeinflussung der maximalen Wurzellänge von Reispflanzen in aeroponischen Systemen in weiteren Experimenten untersucht werden. Schwerpunkt sollte auf Nährstoffaufnahme in Abhängigkeit vom pH-Wert, auf den Ethylengaswechsel an der Wurzel und auf Toxizitätsproblematik bezüglich Mikronährstoffe bzw. Schwermetalle gelegt werden. Zudem sollte untersucht werden, inwiefern sich die Wurzellängen von aeroponisch wachsenden Reispflanzen durch der Nährlösung zugesetzte Pflanzenhormone beeinflussen lassen, ohne dass sich dies negativ auf Wachstums- bzw. Ertragsparameter auswirkt.

7. Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit war die aeroponische Anzucht von Reis.

Es wurden zwei Versuche durchgeführt. Im ersten wurden die Auswirkungen verschiedener Befeuchtungsdauern auf die Jungpflanzenentwicklung zweier Reissorten (Chomrong und Sahel 108) in einem aeroponischen System untersucht. Das System basierte auf Ultraschallverneblern, die eine Standardnährlösung für Reis vernebelten. Die getesteten Befeuchtungsdauern waren 2 min, gefolgt von 8 min Pause, 4 min, gefolgt von 6 min Pause und 6 min, gefolgt von 4 min Pause. Die höchsten Wachstumsraten wurden durch 6 minütige Befeuchtung erreicht, wobei Pflanzen der Sorte Chomrong unter dieser Befeuchtungsdauer höhere Wachstumsraten erzielten als Pflanzen der Sorte Sahel 108.

Im zweiten Versuch wurde der Einfluss zweier pH-Werte (pH 4 und pH 6) auf das Wachstum beider Reissorten in aeroponischen und hydroponischen Systemen untersucht. Wachstumsraten von Pflanzen der Sorte Chomrong waren in den aeroponischen Systemen höher oder gleich hoch wie in den hydroponischen Systemen, wohingegen Pflanzen der Sorte Sahel 108 in den hydroponischen Systemen höhere Wachstumsraten erzielten als in den aeroponischen. Das Wurzel-/Spross-Verhältnis war in den aeroponischen Systemen durchweg höher als in den hydroponischen Systemen. Zudem entwickelten Pflanzen in den aeroponischen Systemen unter einem pH-Wert von 6 eine größere maximale Wurzellänge als unter einem pH-Wert von 4.

Literaturverzeichnis

- Asch, F., Dingkuhn, M., Sow, A., Audebert, A., 2005. Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland rice. *Field Crops Research* 93(2-3), 223-236.
- Barak, P., Smith, J.D., Krueger, A.R., Peterson, L.A., 1996. Measurement of short-term nutrient uptake rates in cranberry by aeroponics. *Plant, Cell and Environment* 19(2), 237-242.
- Barker, R., D. Dawe, T.P., Tuong, T.P., Bhuiyan, L., Guerra, C., 1998. The outlook for water resources in the year 2020: Challenges for research on water management in rice production. *Assessment and Orientation Towards the 21st Century. Assessment and Orientation Towards the 21st Century, Proceedings of 19th Session of the International Rice Commission, Cairo.* .
- Benbi, K.B., Nieder, R., 2003. Nitrogen Dynamics. In: *Handbook of Processes and Modeling in the Soil-Plant System*. Routledge, 409-467.
- Benton Jones Jr., J., 2005a. Introduction. In: *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1-10.
- Benton Jones Jr., J., 2005b. The Nutrient Solution. In: *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 71-116.
- Benton Jones Jr., J., 2005c. Soil and Hydroponics. In: *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 15-19.
- Benton Jones Jr., J., 2005d. Systems of Hydroponic/Soilless Culture. In: *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 117-122.
- Bouman, B.A.M., Humphreys, E., Tuong, T.P., Barker, R., 2006. *Rice and Water*. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines.
- Buer, C.S., Correll, M.J., Smith, T.C., Towler, M.J., Weathers, P.J., Nadler, M., Seaman, J., Walcerz, D., 1996. Development of a nontoxic acoustic window nutrient-mist bioreactor and relevant growth data. *In vitro Cellular and Developmental Biology - Plant* 32(4), 299-304.
- Chang, T.T., 2003. Origin, domestication, and diversification. In: Wayne Smith, C. (Ed.), *Rice: Origin, History, Technology, and Production*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 3-25.
- Cheung, Y.H., Wong, M.H., Tam, N.F.Y., 1990. Root and shoot elongation as an assessment of heavy metal toxicity and 'Zn equivalent value' of edible crops. *Environmental bioassay techniques and their application*. Proc.conference Lancaster, 1988 , 377-383.

- Coats, B., 2003. Global rice production. In: Wayne Smith, C. (Ed.), *Rice: Origin, History, Technology, and Production*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 247-470.
- Colmer, T.D., 2003. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep-water rice (*Oryza sativa* L.). *Annals of Botany* 91(SPEC. ISS. JAN.), 301-309.
- Du Toit, L.J., Walker Kirby, H., Pedersen, W.L., 1997. Evaluation of an aeroponics system to screen maize genotypes for resistance to *Fusarium graminearum* seedling blight. *Plant Disease* 81(2), 175-179.
- Fanourakis, D., Verkerke, W., Heuvelink, E., 2005. Possibilities for soilless cultivation in cut chrysanthemum: effect of irrigation frequencies and spacing schedules.
- Food and Agriculture Organization, 2009. FAO statistical database. 2010(01/05).
- Gupta, P.C., Toole, J.C.O., 1986. Breeding for specific traits: Drought resistance. In: *Upland Rice: A Global Perspective*. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines, 148-175.
- Harris, D., 1992. Hydroponics: An Introduction. In: *Hydroponics: The Complete Guide to Gardening without Soil*. Struik, Cape Town, South Africa, 18-22.
- Hayden, A.L., 2006. Aeroponic and hydroponic systems for medicinal herb, rhizome, and root crops. *HortScience* 41(3), 536-538.
- Henzler, T., Waterhouse, R.N., Smyth, A.J., Carvajal, M., Cooke, D.T., Schäffner, A.R., Steudle, E., Clarkson, D.T., 1999. Diurnal variations in hydraulic conductivity and root pressure can be correlated with the expression of putative aquaporins in the roots of *Lotus japonicus*. *Planta* 210(1), 50-60.
- Hirasawa, T., Tsuchida, M., Ishihara, K., 1992. Relationship between resistance to water transport and exudation rate and the effect of the resistance on the mid-day depression of stomatal aperture in rice plants. *Japanese Journal Crop Science* 61, 145-152.
- Jarstfer, A.G., Sylvia, D.M., 1995. Aeroponic culture of VAM fungi. In: Varma, A., Hock, B. (Eds.), *Mycorrhiza: Structure, Function, Molecular Biology, and Biotechnology*. Springer, Berlin, 427-441.
- Kratsch, H.A., Graves, W.R., Gladon, R.J., 2006. Aeroponic system for control of root-zone atmosphere. *Environmental and experimental botany* 55, 70-76.
- Lay, P.T., He, J., Sing, K.L., 2002. Effects of root-zone temperature on the root development and nutrient uptake of *Lactuca sativa* L. "Panama" grown in an aeroponic system in the tropics. *Journal of Plant Nutrition* 25(2), 297-314.
- Londo, J.P., Chiang, Y.-., Hung, K.-., Chiang, T.-., Schaal, B.A., 2006. Phylogeography of Asian wild rice, *Oryza rufipogon*, reveals multiple independent domesticati-

- ons of cultivated rice, *Oryza sativa*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 103(25), 9578-9583.
- Loresto, G.C., Obien, M., Chang, T.T., 1989. Root and shoot characters as selection indices for drought resistance in rice. Paper presented at the IRRI Saturday Seminar .
- Macleane, J.L., Dawe, D.C., Hardy, B., Hettel, G.P., 2002a. Importance of rice; Rice Almanac. In: International Rice Research Institute, Bouake, Ivory Coast: West Africa Rice Development Association, Los Banos, Philippines, 1-11.
- Macleane, J.L., Dawe, D.C., Hardy, B., Hettel, G.P., 2002b. The Rice Plant and its Ecology; Rice Almanac. In: International Rice Research Institute, Bouake, Ivory Coast: West Africa Rice Development Association, Los Banos, Philippines, 11-31.
- Marschner, H., 1995a. Adaption of Plants to Adverse Chemical Soil Conditions. In: Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, 596-657.
- Marschner, H., 1995b. Effect of Internal and External Factors on Root Growth and Development. In: Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, 508-535.
- Marschner, H., 1995c. Functions of Mineral Nutrients: Macronutrients. In: Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, 229-299.
- Marschner, H., 1995d. Nutrient Availability in Soils. In: Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, 483-507.
- Marschner, H., 1995e. The Soil-Root Interface (Rhizosphere) in Relation to Mineral Nutrition. In: Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, 537-595.
- Martin-Laurent, F., Lee, S.-., Tham, F.-., He, J., Diem, H.G., Durand, P., 1997. A new approach to enhance growth and nodulation of acacia mangium through aeroponic culture. Biology and Fertility of Soils 25(1), 7-12.
- Mohammad, A., Khan, A.G., Kuek, C., 2000. Improved aeroponic culture of inocula of arbuscular mycorrhizal fungi. Mycorrhiza 9(6), 337-339.
- Moldenhauer, K.A.K., Gibbons, J.H., 2003. Rice morphology and development. In: Wayne Smith, C. (Ed.), Rice: Origin, History, Technology, and Production. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 103-127.
- Molitor, H., Dr., 1991. Erdlose Kulturverfahren. Deutscher Gartenbau 33, 2020-2024.
- Namuco, O.S., Ingram, K.T., Fuentes, L.T., 1993. Root characteristics of rice genotypes with different drought responses. International Rice Research Notes 18, 38.
- Nilufer, K.H., Mitali, B., Haque, .Z., 2000. Effect of nutrients and substratum on root characteristics in rice varieties. Indian Journal of Plant Physiology 5(4).

- Nugaliyadde, M.M., De Silva, H.D.M., Perera, R., Ariyaratna, D., Sangakkara, U.R., 2005. An Aeroponic System for the Production of pre-basic Seeds of Potato . Anals of Sri lanka Department of Agriculture 7, 199-208.
- Penga, S., Boumana, B., Visperasa, R.M., Castañedaa, A., Nieb, L., Parkc, H., 2006. Comparison between aerobic and flooded rice in the tropics: Agronomic performance in an eight-season experiment. Field Crops Research 96(2-3), 252-259.
- Ranathunge, K., Steudle, E., Lafitte, R., 2003. Control of water uptake by rice (*Oryza sativa* L.): Role of the outer part of the root. Planta 217(2), 193-205.
- Reyniers, F.N., Troung-Binh, Jacquinot, L., Nicou, R., 1982. Breeding for drought resistance in dryland rice. In: Drought Resistance in Crops with Emphasis on Rice. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Phillippines, 273-292.
- Ritter, E., Angulo, B., Riga, P., Herrán, C., Relloso, J., San Jose, M., 2001. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. Potato Research 44(2), 127-135.
- Schreiber, L., Franke, R., Hartmann, K.-., Ranathunge, K., Steudle, E., 2005. The chemical composition of suberin in apoplastic barriers affects radial hydraulic conductivity differently in the roots of rice (*Oryza sativa* L. cv. IR64) and corn (*Zea mays* L. cv. Helix). Journal of experimental botany 56(415), 1427-1436.
- Schroeder, D., 1984. Bodenkörper - Aufbau, Eigenschaften und Verhalten. In: Bodenkunde in Stichworten. Hirt, Berlin, 56-82.
- Soffer, H., Burger, W., 1988. Effects of dissolved oxygen concentration in aero-hydroponics on the formation and growth of adventitious roots. J. AMER. Soc. HORT. SCI. 113(2), 218-221.
- Stahr, K., Kandeler, E., Hermann, L., Streck, T., 2008. Eine Bodenlandschaft aus Granit - Kieselserie. In: Bodenkunde Und Standortlehre. Eugen Ulmer KG, Stuttgart, 23-90.
- Tuong, T.P., Bouman, B.A.M., 2003. Rice Production in Water-Scarce Environments. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines.
- Weathers, P.J., Zobel, R.W., 1992. Aeroponics for the culture of organisms, tissues and cells. Biotechnology Advances 10(1), 93-115.
- Weber, J., Tham, F.Y., Galiana, A., Prin, Y., Ducouso, M., and Lee, S.K., 2007. Effects of nitrogen source on the growth and nodulation of *Acacia mangium* in aeroponic culture. Journal of Tropical Forest Science 19(2), 103-112.
- Winterborne, J., 2005. Introduction: A Merging of Nature and Technology. In: Hydroponics: Indoor Horticulture. Pukka Press, Guildford, 1-3.
- Wopereis, M.C.S., Defoer, T., Idinoba, P., Diack, S., Dugué, M.J., 2009. Knowing the rice Plant. In: Curriculum for Participatory Learning and Action Research

- (PLAR) for Integrated Rice Management (IRM) in Inland Valleys of Sub-Saharan Africa: Technical Manual. Africa Rice Center (WARDA), Cotonou, Benin, 26-32.
- Yoshida, S., 1981. Growth and Development of the Rice Plant. In: International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines, 1-61.
- Yoshida, S., Forno, D.A., Cook, J.H., Gomez, K.A., 1976. Routine procedures for growing rice plants in culture solution. In: Laboratory Manual for Physiological Studies of Rice. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Laguna, Philippines, 61-65.
- Yoshida, S., Hasegawa, S., 1982. The rice root system: its development and function. In: Drought Resistance in Crops with Emphasis on Rice. International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna, Philippines, 97-114.
- Zobel, R.W., Del Tredici, P., Torrey, J.G., 1976. Method for Growing Plants Aeroponically. Plant Physiology 57(3), 344-346.

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Asch für die Betreuung, für sein Engagement, und für die Zeit, die er, ganz speziell am Ende dieser Arbeit, in mich investiert hat.

Herr Prof. Dr. Sauerborn für die Übernahme des Koreferats.

Isabel Schlegel, für die ganzen Kleinigkeiten, die Müsli-Riegel, ihr Mitleid, die Korrektur und vielem, vielem mehr.

Tanja Berndt für die ganzen Sachen im Labor und die zahlreichen Applikationen dieses Insektenvernichtungsmittels.

Herrn Dr. Brück für die aufbauenden Worte in den letzten Wochen.

Frau Schmid für die Büroarbeit, vor allem für die Bearbeitung von mir verursachter Mahnschreiben.

Ari und Suchit für die Einweisung in die *Walz-Machine* und die ganzen anderen Kleinigkeiten.

Nha, dank dem ich mir, egal um welche Uhrzeit oder an welchem Feiertag, nie Sorgen machen musste, ob ich den Institutsschlüssel dabei hatte.

Linda, auch für die ganzen Kleinigkeiten, speziell aber für die Vermittlung unzähliger Lebensweisheiten.

Dem Erfinder von dickem, grünem Draht (mit dickem, grünem Draht kann man so ziemlich alles zusammenbasteln).

Ich entschuldige mich für die Strapazen (Adams, 1992).

Vielen Dank!