



Universität für Bodenkultur, Wien
Abteilung Wein- und Obstbau
Department für Nutzpflanzenwissen-
schaften (DNW)



**Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt (DLR), Bremen**
Institut für Raumfahrtsysteme

Analyse von Säulenapfelbäumen für den Einsatz in extraterrestrischen Habitaten

(EVA System – Evaluation of Apple Trees in Bioregenerative Life Support
System)

Master's Thesis
zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science

eingereicht von

Markus Dorn, B. Sc.

Betreuer: Prof. Dr. Astrid Forneck
Dipl.-Wi. Ing. Daniel Schubert

Wien, im Juli 2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides Statt, dass ich die beiliegende Master-Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe.

Ferner gestatte ich der Universität für Bodenkultur, die beiliegende Master-Arbeit unter Beachtung insbesondere datenschutz- und wettbewerbsrechtlicher Vorschriften für Lehre und Forschung zu nutzen.

Ich weiß, dass jede Weitergabe meiner Master-Arbeit bzw. deren Ergebnisse an Dritte oder eine Publikation der Zustimmung des ersten Gutachter bedarf.

Mir ist bekannt, dass die Fakultät die Master-Arbeit von der Öffentlichkeit ausschließen kann.

Wien, den

Danksagung

Die Suche nach dem geeigneten Anbaurezept für Pflanzen im Weltall wird fortgesetzt – und ein zweites Mal habe ich die Möglichkeit einen aktiven Beitrag zu dieser Thematik zu leisten. Erste Tests und Experimente konnte ich dieses Mal in einem abgeschlossenen Laborsystem durchführen und bin gleichzeitig beeindruckt und überwältigt von den vielen modernen technischen Möglichkeiten. Je tiefer man sich jedoch mit dem Bereich der Pflanzenzucht im Weltall auseinandersetzt, desto mehr erfordert es Ideenreichtum, Ausdauer und Motivation - auch bei Rückschlägen, die nicht selten vorkamen. Trotzdem ist es fantastisch nach drei Jahren sprichwörtlich „ein paar Früchte der eigenen Arbeit zu ernten.“

Ich möchte zunächst an dieser Stelle all denjenigen danken, die mich gedanklich, finanziell und vor allem emotional unterstützt haben. Dazu gehören:

- **Daniel Schubert, ohne den mein zweiter Aufenthalt in Bremen nicht möglich gewesen wäre und auch für seinen außergewöhnlichen Ideenreichtum**
- **Prof. Dr. Astrid Forneck von der Universität für Bodenkultur für das Vertrauen in mein Unterfangen und die inhaltlichen Impulse für die Arbeit**
- **Ganz besonders den restlichen Mitgliedern des EDEN Teams, welches mich tatkräftig unterstützt hat und durch einen aktiven Gedankenaustausch zur permanenten Weiterentwicklung des Systems beitrug**
- **Meine Eltern und meine Freundin für die aufbauenden Worte aber auch liebevollen Ablenkungen**

Zu guter Letzt gebührt mein Dank allen fachfremden Menschen, mit denen ich mich über das Thema unterhalten habe und die mich mit kritischen Fragen in meinen Gedanken gelenkt haben.



Abb. 1 – Zwergapfelbaum oder “Zwerg mit Apfelbaum” [1]

„Einst hatte ich einen schönen Traum:

*Da sah ich einen Apfelbaum,
Zwei schöne Äpfel glänzten dran;
Sie reizten mich, ich stieg hinan.*

*Der Äpfelchen begehrt Ihr sehr,
Und schon vom Paradiese her.
Von Freuden fühl ich mich bewegt,
Daß auch mein Garten solche trägt.“
(Zitat von J. W. Goethes „Faustus“)*

Kurzfassung

Die Beobachtung und Erforschung des Weltalls hat eine lange Geschichte in den verschiedenen Menschheitsepochen und geht oft mit dem Wunsch einher, andere Planeten zu kolonisieren. Im Bereich der bemannten Raumfahrt wurde am Institut für Raumfahrtsysteme am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Bremen (Deutschland) eine neue Forschungsinitiative mit dem Namen EDEN (Evolution and Design of Environmentally-closed Nutrition-sources) eingeleitet. Das Ziel besteht darin effiziente Lebenserhaltungssysteme für den Einsatz in extraterrestrischen Habitaten zu entwickeln. Moderne Gewächshaustechnologie wird dazu eingesetzt, bewertet und in laufenden Pflanzenexperimenten getestet.

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Anbaumethode für Apfelbäume mit Säulenform für den Einsatz in extraterrestrischen Habitaten wie zum Beispiel Mond- oder Marsstationen. Für diesen Zweck wurde eine Pflanzenkammer (EVA-System „Evaluation of apple trees for Life Support Systems“) im institutseigenen EDEN Labor aufgebaut. Verschiedene CEA Technologien wie ein aeroponisches Nährstoffversorgungssystem und ein LED Modul für die Pflanzenbelichtung wurden integriert. Darüber hinaus wurde die EVA-Anbaukammer mit anderen Anbaukammern und einem Luftmanagement System verbunden.

Nach dem Systemaufbau wurden drei aufeinanderfolgende Experimente durchgeführt mit jeweils drei verschiedenen Anbaumethoden und unterschiedlichen Anpassungen der Klimasollwerte. In allen Experimenten konnte eine schnelle Anfangsentwicklung der Blütenorgane festgestellt werden. In der Folge traten jedoch vermehrt Wurzelpathogene auf und zwangen die Experimente zum Abbruch, um weitere Laborverunreinigungen zu vermeiden. In einer Fehleranalyse wurden verschiedene Problembereiche analysiert und anschließend diskutiert. Abschließend wird eine neu iterierte Anbaumethode mit überarbeiteten Zielsollwerten, sowie Empfehlungen für weitere Forschungsaktivitäten vorgestellt.

Schlagwörter

Apfel; CEA; Lebenserhaltungssystem; Extraterrestrisch; Habitat

Abstract

Space related research has a long history in different human eras and often accompanies the wish to colonize other planets. In this field of human space flight, the Institute of Space Systems at the German Aerospace Centre in Bremen (Germany) has announced a new research initiative for developing efficient life support systems for long term missions in extraterrestrial habitats called EDEN (Evolutionary Design of environmentally closed and nutrition-sources). Modern greenhouse technology especially controlled environment agriculture (CEA) is designed, evaluated and tested in ongoing plant experiments.

The presented master's thesis deals with the development of a cultivation method for columnar apple trees for the usage in extraterrestrial habitats including moon or mars stations. For this purpose a new plant cultivation chamber (EVA-System "Evaluation of apple trees for Life support systems") was built inside of the institute's EDEN lab. Different CEA technologies like an aeroponic fertigation system and LED modules for plant lighting were integrated. Above that, this growth chamber was connected with other chambers in the lab and with the central air management system.

After building up the system, three consecutive experiments were carried out. Within these experiments three different cultivation methods were tested with each time adapted target values for the climate. In all three experiments a fast development of blooming organs could be detected in the beginning. Subsequently rooting pathogens occurred and forced all experiments to shut down to avoid further contamination of the lab. In an analysis of errors different problematic aspects will be analysed and discussed. Finally a newly iterated cultivation method is presented as well as proposals for future experiments including adapted target values for the climate.

Keywords

Apple; CEA; Life Support System; extraterrestrial; habitat

Vorwort über die EDEN Initiative

Am Institut für Raumfahrtsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Bremen beschäftigt sich seit 2011 eine Forschungsinitiative mit dem Namen EDEN (**E**volution and **D**esign of **E**nvironmentally-closed **N**utrition-sources) mit bioregenerativen Lebenserhaltungssystemen (BLSS). Das Hauptanliegen ist die Entwicklung und Bewertung innovativer Gewächshaussysteme für den zukünftigen Einsatz in extraterrestrischen Habitaten auf Langzeitmissionen.

Nach verschiedenen theoretischen Vorstudien zu einzelnen Subsystemen eines BLSS wurde Anfang des Jahres 2014 ein Labor eingeweiht, welches seitdem als Testbett verschiedener CEA – Technologien verwendet wird. Die folgende Aufzählung gibt einen groben Überblick über die getesteten Geräte und Systeme:

- **Air Management System (AMS) zur Beeinflussung des Raumklimas**
- **Computer gestützte Kontrollsysteme zur Steuerung des AMS**
- **Innovative Sprühsysteme für erdelose Kulturverfahren (Aeroponik und Hydroponik)**
- **Neuartige Systeme zur künstlichen Pflanzenbeleuchtung (LEDs)**
- **CO₂ Injektionssysteme**
- **Systeme zur Nährstoffmischung und -applikation**
- **Ionen-Selektive Sensoren zur Bestimmung des Nährstoffversorgungszustand**
- **Verletzungsfreies Stress-Monitoring**
- **Design von Wachstumsunterkünften für verschiedene Pflanzenkandidaten**
- **Vollständige Systembewertung (In- und Outputs)**

Abgeleitet von den zuvor genannten Schwerpunkten der Forschungsaktivität, gibt es verschiedene Bauabschnitte, die chronologisch durchgeführt wurden und in einem laufenden Entwicklungsprozess bearbeitet werden. Die erste Phase widmete sich dem Aufbau des Labors mit seinen drei funktionalen Räumen: Analysebereich, Arbeitsbereich und Bio-Reinraum. Anschließend wurden alle benötigten Subsysteme (AMS, LED Belichtung, Sprühsysteme etc.) integriert und zunächst in Funktionstests überprüft. Nach erfolgreicher Erstdurchführung konnten erste Tests mit Pflanzen und einzelnen Elementen durchgeführt werden, um mögliche Fehlerquellen und Problembereiche aufzuspüren. Als das Labor danach weitgehend einsatzbereit war, werden nun im laufenden Prozess Pflanzenexperimente angesetzt, in denen geeignete Anbaurezepte im Hinblick auf die Belichtungsmenge, Tageslängen, den Nährstoffmix und Nährstoffsprühintervalle herausgefunden werden sollen. Das Ziel dieser Tests ist das Finden von Möglichkeiten zur Verkürzung der Kulturdauer, Erhöhung der Erntemenge und eine Reduzierung des Ressourceneinsatzes. Die Erfahrungen und Ergebnisse aus dem experimentellen Prozess sollen schließlich für die Konstruktion eines mobilen Anbaucontainers für analoge Testreihen auf der Erde verwendet werden. Die deutsche Neumayer - Forschungsstation des AWI wird dabei in der Antarktis als erste Station dienen.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	2
Danksagung	3
Kurzfassung.....	5
Abstract	6
Vorwort über die EDEN Initiative	7
Inhaltsverzeichnis.....	8
I Abbildungsverzeichnis.....	10
II Tabellenverzeichnis	12
III Abkürzungsverzeichnis	13
1 Einleitung	14
2 Fragestellung	16
2.1 Ziele.....	16
3 Literaturüberblick und Datengrundlage.....	17
3.1 Extraterrestrische Habitate und Lebenserhaltungssysteme	17
3.2 Bioregenerative Lebenserhaltungssysteme (BLSS)	18
3.3 Subsysteme	19
3.4 Bedeutung von Pflanzen im extraterrestrischen Habitat	20
3.5 Anforderungen an extraterrestrische Gewächshausmodule	22
3.6 Experimentelle Forschungseinrichtungen	23
3.7 CEA Technologien	25
3.7.1 Erdelose Kulturverfahren	27
3.7.2 Künstliche Belichtung	30
3.7.3 Steuerung der Umweltparameter	31
3.8 Der Kulturapfel.....	32
3.8.1 Allgemeine Informationen.....	32
3.8.2 Anforderung an Umweltfaktoren.....	32
3.8.3 Säulenäpfel	33
3.8.4 Literaturhinweise über die erdelose Anzucht von Apfelbäumen	34
3.9 Zusammenfassung	37

4	Material und Methoden	38
4.1	Material	38
4.1.1	Die Ausstattung des EDEN Labors	38
4.1.2	Wachstumschamber und Grundgerüst	39
4.1.3	Künstliche Belichtung	40
4.1.4	Aeroponisches System.....	41
4.1.5	Regelung der Atmosphäre	44
4.1.6	Pflanzenmaterial	45
4.2	Methoden.....	47
4.2.1	Kurzbeschreibung der Experimente	47
4.2.2	Versuchsaufbau	48
4.2.3	Kampagne Nr. 1.....	49
4.2.4	Kampagne Nr. 2.....	52
4.2.5	Kampagne Nr. 3.....	55
4.2.6	Maßnahmen während der Versuche	58
4.3	Zusammenfassung	60
5	Ergebnisse	61
5.1	Luftfeuchtemessungen.....	61
5.2	Temperatur- und Kohlenstoffdioxidmessungen	63
5.3	pH und EC Messungen.....	66
5.4	Beobachtungen aus dem Wurzelraum	67
5.5	Beobachtungen aus dem Blattwerk	69
6	Diskussion	71
6.1	Fehleranalyse.....	72
6.1.1	Aeroponik.....	72
6.1.2	Künstliche Belichtung	73
6.1.3	Steuerung klimatischer Faktoren	73
6.1.4	Nährlösung	74
6.1.5	Pflanzenschutzmanagement	74
6.2	Modifizierte Überführungsmethode	75
6.3	Vorschläge für weitere Forschungsaktivitäten - Ein Ausblick	77
7	Schlussfolgerung	79
8	Literaturverzeichnis.....	80
9	Bildquellenverzeichnis	84
IV	Anhang	86

I Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 – Zwergapfelbaum oder “Zwerg mit Apfelbaum” [1]	4
Abb. 2 - Arten von Lebenserhaltungssystemen [2]	17
Abb. 3 - Grundschemata eines Bioregenerativen Lebenserhaltungssystems [3].....	18
Abb. 4 - Funktionsschema eines LES [4].....	19
Abb. 5 - Beziehungen eines Gewächshausmoduls zu anderen Subsystemen im LES [5].....	20
Abb. 6 - Herkömmliche Nahrungsmittel für Astronauten früher und heute[6].....	20
Abb. 7 - Aufbau des VEGGIE Moduls [7].....	23
Abb. 8 - Biomass Production Chamber [1.]; Biosphere 2 [r.]; [8]	24
Abb. 9 - Aussehen verschiedener Forschungseinrichtungen für BLSS [9].....	24
Abb. 10 - Folientunnel mit einfacher CEA Ausstattung; r. NASA CELLS Plant growth chamber [10] .	25
Abb. 11 - Übersicht gärtnerischer Kulturverfahren [11]	27
Abb. 12 - Schematische Darstellungen erdeloser Kulturverfahren [12].....	28
Abb. 13 - Patentierte aeroponische Anbaueinrichtung (r.) [13]	29
Abb. 14 - Absorptionsspektrum für die pflanzliche Photosynthese [14].....	30
Abb. 15 - Funktionsschema von LEDs [15].....	30
Abb. 16 – Halterungssystem für Apfelbaumtriebe [16]	35
Abb. 17 - Die Anbaukammer innerhalb des BIO-Reinraumes.....	39
Abb. 18 - ITEM Grundgerüst	40
Abb. 19 - LED Panel (Bloom Power®);LED Leuchtmittel (Phillips - Green Production Module®) [17]	40
Abb. 20 – Versorgungssystem innerhalb der Anbaukammer.....	42
Abb. 21 - Anbauboxen mit aeroponischem Sprühsystem	43
Abb. 22 – Luft-Management-System (AMS).....	44
Abb. 23 - Säulenapfelbäume vor der Überführung in das aeroponische System	45
Abb. 24 - Schematischer Aufbau der EVA Unit mit Aeroponik und Beleuchtung.....	48
Abb. 25 – Bilderserie zum Versuchsaufbau des Experiment Nr. 1	51
Abb. 26 – Bilderserie zum Versuchsaufbau des Experiments Nr. 2	54
Abb. 27 – Bilderserie zum Versuchsaufbau des Experiments Nr. 3	57
Abb. 28 - 12 Stunden Chart der Relativen Luftfeuchte mit geradem Verlauf.....	61
Abb. 29 - 12 Stunden Chart der Relativen Luftfeuchte mit stark welligem Verlauf.....	62
Abb. 30 - 12 Stunden Chart der Luftfeuchte mit Verlaufsänderung durch Luftbefeuchter.....	62
Abb. 31 - 12 Stunden Chart der Luftfeuchte mit optimalem Verlauf.....	63
Abb. 32 - 12 Stunden Chart der Temperatur mit welligem Verlauf.....	63
Abb. 33 - 12 Stunden Chart mit optimalem Verlauf	64
Abb. 34 - CO ₂ -Konzentration im Tagesverlauf vom 23.07.2014 im gesamten Bio-Reinraum.....	64

Abb. 35 - 12 Stunden Chart der Luftfeuchte am 23.07.2014	65
Abb. 36 - pH und EC Wert Messungen während des Experiment Nr.1	66
Abb. 37 - pH und EC Wert Messungen während des Experiment Nr.3	66
Abb. 38 – Wurzelneubildung in Kampagne Nr.1	67
Abb. 39 – Infizierte Wurzeln in Kampagne Nr.1	67
Abb. 40 - Mikroskopische Aufnahme einer Wurzelprobe	68
Abb. 41 – l. Blütenentwicklung in der Kampagne Nr. 1; r. Blattchlorosen und -nekrosen.....	69
Abb. 42 – Welke des Blattwerkes im zeitlichen Ablauf aus der Kampagne Nr. 3.....	69
Abb. 43 - Verschiedene Insekten im Anbauzelt	70

II Tabellenverzeichnis

Tab. 1 – Anforderungen an ein extraterrestrisches Gewächshausmodul.....	22
Tab. 2 – Nährwert pro 100g Apfel	32
Tab. 3 – Bedingungen auf und außerhalb der Erde	37
Tab. 4 – PAR im EVA Modul gemessen in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{sek}^{-1}$	41
Tab. 5 – Nährlösungen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen	42
der Hauptnährstoffe verschiedener Autoren.....	42
Tab. 6 – Durchgeführte Messungen unterteilt nach Art der Steuerung und Aufzeichnung	44
Tab. 7 – Stammlösungen zur Anmischung der Nährlösung.....	58
Tab. 8 – Sechste Stammlösung mit Mikronährstoffen	58
Tab. 9 – Zusammensetzung der Nährlösung für 80 L Reservoir.....	58
Tab. 10 – Zusammenfassung aller drei Experimente bzw. Kampagnen	60
Tab. 11 – Auflistung verschiedener Testanlagen für extraterrestrische Habitate [5]	87

III Abkürzungsverzeichnis

AMS	...	Air Management System
AWI	...	Alfred Wegener Institut
BLSS	...	Biological Life Support System
CEA	...	Controlled Environment Agriculture
CEEF	...	Closed Ecology Experiment Facility
CELSS	...	Closed Ecological Life Support System
CO ₂	...	Kohlenstoff-Dioxid
DAQ	...	Data Aquisition System
DLR	...	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EC	...	Electrical Conductivity
ECLLS	...	Environmental Control and Life Support Systems
EDEN	...	Evolution and Design of Environmentally Nutrition Sources
ESA	...	European Space Agency
EVA	...	Evaluation of Apple Trees in Bioregenerative Life Support Systems
GC	...	Growth Chamber
ISS	...	International Space Station
LED	...	Licht emittierende Diode
LES	...	Lebenserhaltungssystem
LLDPE	...	Lineares Polyethylen niederer Dichte
NASA	...	National Aeronautics and Space Association
NIR	...	Near Infra Red
PAR	...	Photosynthetically Active Radiation
pH	...	Potentia hydrogenii
PP	...	Polypropylen
PPFD	...	Photosynthetically Active Photon Flux Density
RCCB	...	Rapid Cycle Crop Breeding
UV	...	Ultraviolet
VEGGIE	...	Vegetable Production Unit

1 Einleitung

Gedanken und Diskussionen über den Einsatz von Pflanzen zur Nahrungsversorgung von Menschen außerhalb der irdischen Atmosphäre sind nicht neu. Bereits in den 1960er Jahren gab es erste konkrete Überlegungen, Astronauten mit höheren Pflanzen auf Langzeitmissionen zu versorgen (Pilgrim und Johnson, 1962). Bis zum jetzigen Zeitpunkt stellt die Nachlieferung von Nahrungsmitteln, Treibstoffen, Wasser, Sauerstoff und weiteren Materialien an irdische Außenposten jedoch eine große technische und finanzielle Herausforderung dar. Der Grund dafür liegt vor allem in den erheblichen Restriktionen beim Volumen und dem Gewicht. Pflanzen direkt vor Ort anzubauen, also im extraterrestrischen Habitat, kann diesen Aufwand reduzieren. Gleichzeitig ergeben sich durch die Photosynthese nützliche Effekte, wie die CO₂-Reduktion und die Sauerstoffanreicherung der Atmosphäre, Recycling des Wassers durch Transpiration und nicht zuletzt die Produktion von pflanzlicher Biomasse.

Seit 2011 engagiert sich das Institut für Raumfahrtssysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Bereich der Entwicklung innovativer Gewächshauskonzepte für extraterrestrische Habitate und analysiert diese in kontinuierlichen Anbauexperimenten. Im Besonderen liegt der Fokus dieser so genannten EDEN-Forschungsinitiative (**E**volution and **D**esign of **E**nvironmentally-closed **N**utrition-sources) in der Suche nach geeigneten Pflanzenspezies für diese Pflanzenunterkünfte.

Ein „Pflanzenkandidat“, der mit dieser Arbeit vorgestellt werden soll, ist der Apfel. Im Besonderen handelt es sich hierbei um die Bewertung von Apfelbäumen mit Säulenform. Statt wie bisher vor allem nur einjährige, schnellwachsende Pflanzenarten, wie Salat, Weizen oder der Kartoffel zu untersuchen, rückt nun eine perrenierende Gehölzart in den Vordergrund. Das hat verschiedene Gründe:

- **Der Apfel ist seit ca. 10.000 Jahren in der menschlichen Ernährung bekannt (Fischer, 2002).**
- **Er hat eine hohe ernährungsphysiologische Bedeutung und eine gute Handhabung bei Ernte und Lagerung (Fischer, 2002).**
- **Er dient als mögliche Erweiterung des Speiseplans für Astronauten in Form von Obst.**
- **Neue Züchtungen haben sehr kompakte Zwergapfelbäume hervorgebracht und natürliche Ruhepausen im Jahresverlauf überwunden.**
- **Überschussproduktion von O₂ ist möglich und im Holz liegt ein großes Speicherpotenzial für Kohlenstoff aus CO₂ i**
- **Hohe Transpirationsraten**
- **Nutzung von Holzmaterialien**

In drei aufeinanderfolgenden Experimenten werden verschiedene Anbaukonzepte mit erdelosen Kulturverfahren und unterschiedlichen Klima-Sollwerten entwickelt und anschließend in der eigens dafür konstruierten EVA-Anbaukammer (**E**valuation of **A**pple **T**rees in bioregenerative life support systems) getestet. In einem Literaturüberblick werden zusätzlich verschiedene Themenbereiche zusammengefasst. Es handelt sich dabei unter anderem um Beschreibungen bereits durchgeführter Pflanzenexperimente anderer Forschungseinrichtungen. Dies dient der Beschreibung des Forschungsfeldes und dem Aufzeigen des Stands der Erkenntnisse.

Eine Analyse verschiedener CEA-Technologien (Controlled Environment Agriculture) soll einzelne Geräte vorstellen, sowie deren Potenziale für Weltraumanwendungen verdeutlichen. Ein dritter Themenabschnitt gibt den Überblick über Kultivierungsanforderungen an den Säulenapfelbaum. Die betrachteten Aspekte sollen insgesamt die grundlegenden zu testenden Parameter liefern und nach einer Fehleranalyse in einer neu überarbeiteten Anbaumethode für weitere Forschungsaktivitäten münden.

2 Fragestellung

Mit der Auswahl von Säulenapfelbäumen für den Einsatz in extraterrestrischen Habitaten rückt eine neue Pflanzenspezies in den Fokus der Betrachtungen. Auf den ersten Blick widersprechen die Eigenschaften von Apfelbäumen den Anforderungen an Kulturen für geschlossene Habitats. Er ist im Gegensatz zu schnell wachsenden einjährigen Nutzpflanzen wie Salat, Weizen oder Soja eine mehrjährige, perennierende Pflanzenart. Er hat dementsprechend einen mehrjährigen Lebens- und Entwicklungszyklus und bringt im ersten Standjahr noch keinen Ertrag. Der Bedarf an Nährstoffen und Wasser, sowie die Anforderungen an den Standraum sind im Gegensatz zu erstgenannten Nutzpflanzen enorm. Darüber hinaus gibt es wenig Erfahrung über den aeroponischen Anbau von verholzten Kulturen und auch die LED Belichtungstechnik für Pflanzen befindet sich noch im Entwicklungsstadium. Zusätzlich gibt es Restriktionen, die sich aufgrund der Architektur des EDEN Labors ergeben. Dazu zählen das maximal zu Verfügung stehende Anbauvolumen von 1 x 1 x 2m und die Notwendigkeit der Verbindung der Anbaukammer mit dem übrigen Kammernverbund innerhalb des Labors.

Die vorliegende Masterarbeit nimmt sich diesen Herausforderungen an und versucht darzustellen, wie ein mögliches System zum Anbau von Säulenäpfeln für den extraterrestrischen Raum aussehen und funktionieren könnte. Das Vorhaben bezieht sich somit auf die erste Phase der Forschung, sprich den sogenannten Groundtests, wie es für Projektstudien zu biologischen Lebenserhaltungssystemen für Habitats im Weltraum üblich ist.

2.1 Ziele

Ausgehend von den vielfältigen Problembereichen, die es zu lösen gilt, soll zunächst ein Literaturüberblick über den Stand der Technik von Controlled Environment Agriculture (CEA) im Hinblick auf verfügbare erdelose Kulturverfahren und LED Technologien informieren. Auf dieser Grundlage sind notwendige Geräte für die Ausstattung der Pflanzenkammer zusammenzustellen. Eine Analyse des Apfels im Allgemeinen und der derzeit verfügbaren Apfelsorten sollen Anfangsparameter für die Klimasollwerte liefern und die Genetik für die Pflanzenexperimente eingrenzen. Der Materialüberblick versteht sich somit als umfangreiche Datengrundlage für die drei Pflanzenexperimente. Mit diesen sollen zum einen die gewählten Anbauparameter und das Kulturverfahren auf dessen Funktionsfähigkeit überprüft und zum anderen Problembereiche im Zusammenhang mit der Apfelbaumkultivierung und dem Aufbau der Kammer herausgearbeitet werden. Damit zudem Pflanzenmaterial für die Experimente in ausreichender Größe zur Verfügung steht, muss eine Methode gefunden werden, wie zuvor in Erde gewachsene Bäume in erdelose Systeme überführt werden können.

3 Literaturüberblick und Datengrundlage

3.1 Extraterrestrische Habitate und Lebenserhaltungssysteme

Lebenserhaltungssysteme sind definitionsgemäß abgeschlossene Umgebungen, die auf Grund ihrer spezifischen Umweltbedingungen das Leben und Überleben von Organismen aller Art ermöglichen. Grundsätzlich gibt es nach Eckart (1996) zwei Kategorien von Lebenserhaltungssystemen. Sie werden in regenerative und nicht – regenerative Lebenserhaltungssysteme unterteilt (Abb. 2).

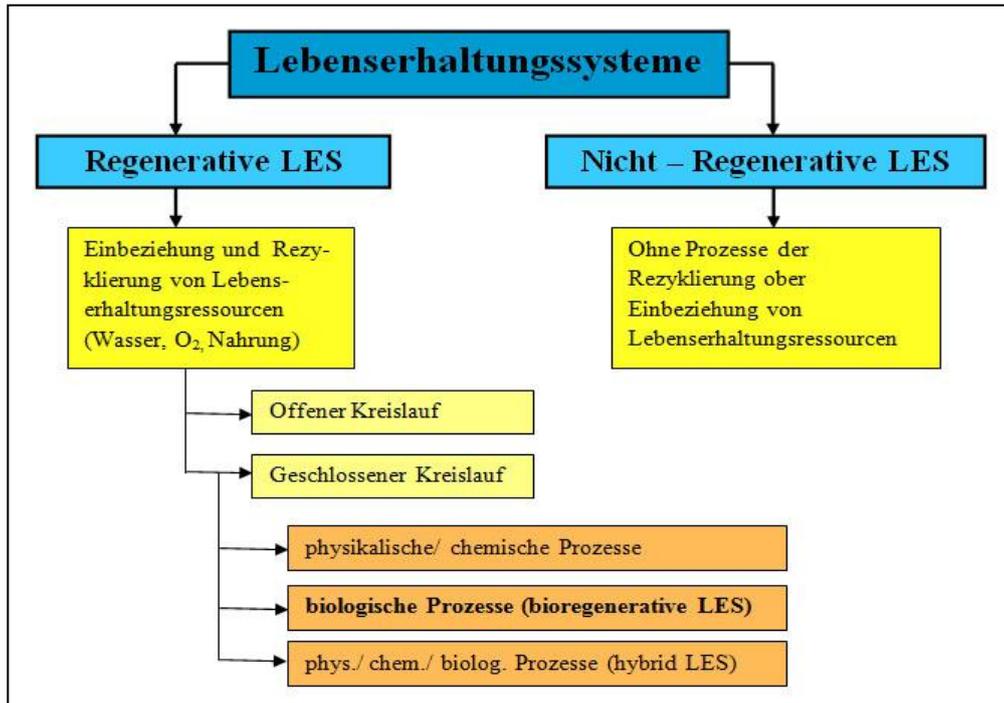


Abb. 2 - Arten von Lebenserhaltungssystemen [2]

Systeme mit regenerativen Lebenserhaltungsfunktionen können weitergehend in solche mit offenen oder mit geschlossenen Kreisläufen differenziert werden. In offenen Systemen fließt kontinuierlich Masse in das System und anschließend wieder hinaus. Erneuerung von verbrauchten Rohstoffen wird nicht angestrebt. Da diese Verfahren vergleichsweise einfach und sehr zuverlässig sind, wurden sie bisher in der bemannten Raumfahrt hauptsächlich eingesetzt. Problematisch an diesen Verfahren sind jedoch der hohe Stauraumbedarf für Nahrung und Abfälle und die finanziellen Anstrengungen für die Nachlieferung (vgl. Berkovich et al., 2009). Dadurch sind die Dauer der Mission, die Anzahl der Astronauten und die Entfernung von der Erde stark eingeschränkt (Horneck und Schauer, 2001).

Bei geschlossenen Systemen dagegen, werden die Abfallprodukte nach dem Verbrauch gesammelt und auf verschiedene Weise dem Kreislauf zurückgeführt. Die Häufigkeit von Nachlieferungen kann somit reduziert werden. Eine Möglichkeit stellt darüber hinaus die Einbeziehung von Höheren Pflanzen in das System dar, was auch mit dem Begriff ‚bioregenerative Lebenserhaltungssysteme‘ charakterisiert wird. Im DLR Gewächshausprojekt ‚EDEN‘ werden hauptsächlich diese Prozesse betrachtet.

3.2 Bioregenerative Lebenserhaltungssysteme (BLSS)

Das Konzept eines Bioregenerativen LES betrachtet die Einbeziehung von biologischen Komponenten, bestehend aus Pflanzen und tierischen Organismen in Weltraumhabitate (Glomb, 2013). Vor allem als Zusatz zum Lebenserhaltungssystem, bietet es nach Glomb (2013) gegenüber herkömmlichen chemisch - physikalischen Prozessen drei wesentliche Vorteile:

- **Reduzierung von mitzunehmender Nahrung durch integriertes biologisches System**
- **Erweiterung des Speiseplans und damit Steigerung der Gesundheit der Crew**
- **Psychologische und physiologische Vorteile im technisch sterilen Weltraumhabitat**

Lebensnotwendige Stoffe sowie lebende Organismen sind in einem BLES über verschiedene Kreisläufe miteinander verbunden. Pflanzliche Biomasse wird dabei im ersten Schritt in einer Pflanzenanbaukammer produziert und anschließend für die Crew zubereitet. Essbare Pflanzenteile werden verzehrt und die biologischen Abfallprodukte in einer Kompostierungseinheit mit Hilfe von Destruenten in pflanzenverfügbare Stoffe wiederverwertet. Gleichzeitig wird bei diesem Kreislaufsystem die umgebende Luft gereinigt und transpiriertes, durch die Pflanzen gereinigtes Wasser, zurückgewonnen. Die Voraussetzungen für die Etablierung eines solchen Systems in einem Weltraumhabitat sind trotz der zunächst simpel erscheinenden Kreisläufe, wie in Abb. 3 dargestellt, sehr vielfältig.

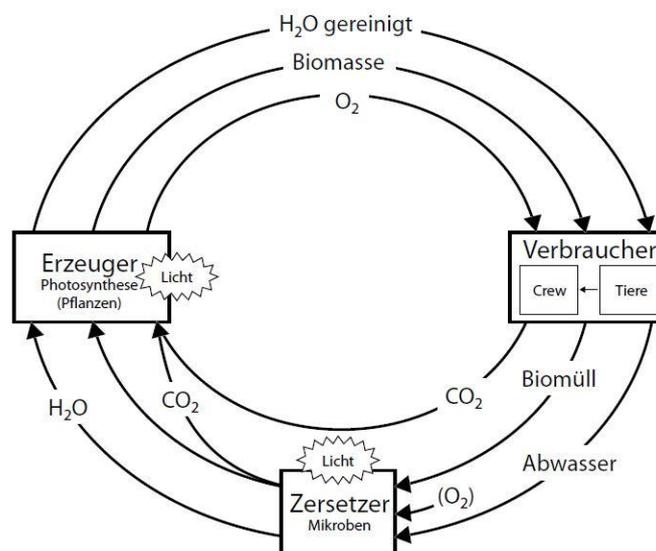


Abb. 3 - Grundschema eines Bioregenerativen Lebenserhaltungssystems [3]

Das Bereitstellen von grundlegenden Faktoren für die Photosynthese wie Wasser, Kohlendioxid und Licht sind essentiell. Daneben müssen die genetischen Informationen in Form von Samen in den Weltraum mitgenommen werden. Düngemittel für die Pflanzenernährung sowie Pflanzenschutz- und Pflanzenstärkungsmittel sind zusätzlich unverzichtbar. Die Vorteile pflanzenbasierter BLSS werden vor allem interessant bei verlängerter Missionsdauer (Puttkamer, 1987). Nach Glomb (2013) amortisiert sich ein BLSS bereits bei einer Missionsdauer von zwei Jahren.

3.3 Subsysteme

In den folgenden Abbildungen sind die Subsysteme eines Lebenserhaltungssystems mit den verschiedenen Modulen und Beziehungen zwischen den Elementen dargestellt. Der hervorgehobene rote Bereich markiert die bioregenerative Komponente. Hauptsächlich sind nach Eckart (1996) vier Hauptfunktionen zu erfüllen. Dazu gehört die Luftbelebung (Atmosphäre-Revitalization), die Nahrungsmittelproduktion (Food-Production), das Wassermanagement (Water-Management) und das Abfallmanagement (Waste-Processing).

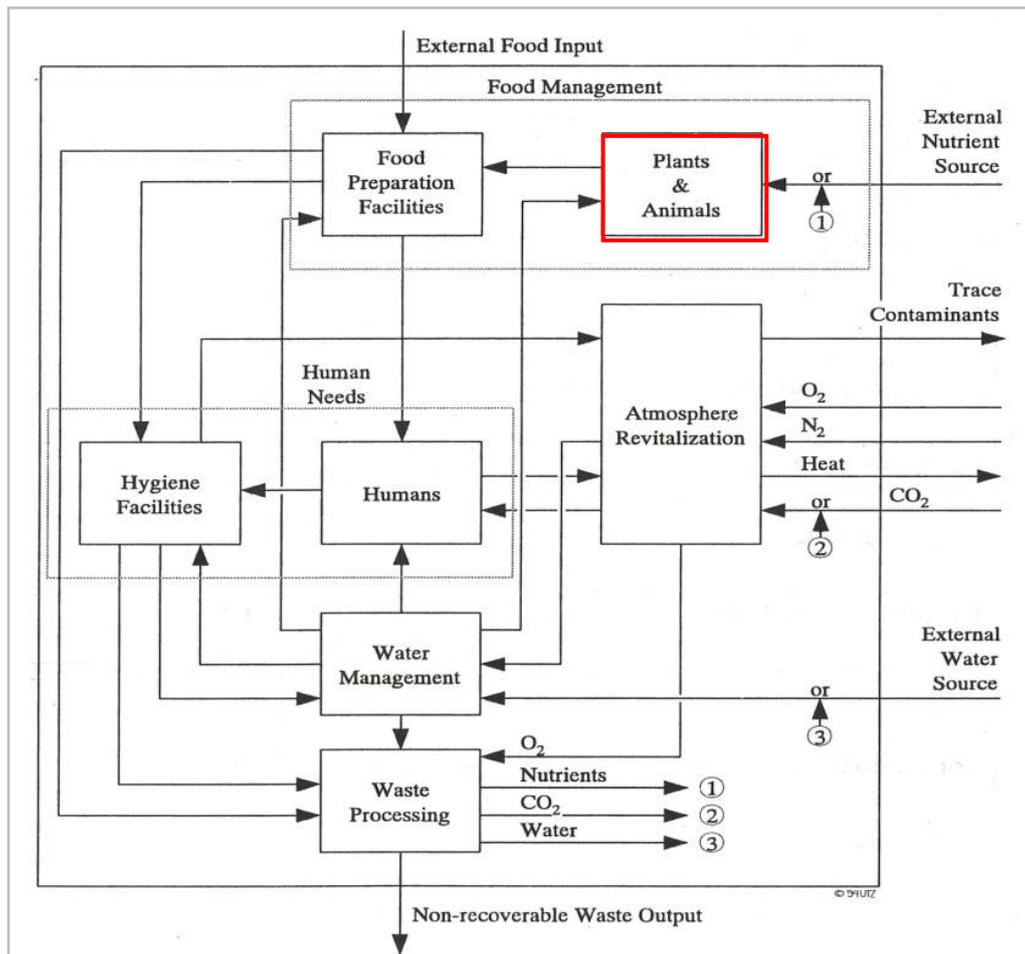


Abb. 4 - Funktionsschema eines LES [4]

Innerhalb des Systems wird die Etablierung geschlossener Kreisläufe angestrebt, um ein Austausch von Ressourcen mit der Umgebung vollständig zu verhindern. Dies ist jedoch nach derzeitigem Stand aufgrund der vielfältigen Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen noch nicht möglich (Gitelson und Lisovsky, 2008). „Ein Austausch mit der Umgebung findet wie auf der Erde, als nahezu geschlossenes System stets statt“ (Gitelson und Lisovsky, 2008). Das belegen auch Habitatstudien verschiedener Forschungseinrichtungen (vgl. Allen et al., 2003). Trotzdem kann durch neue Technologien der Systemabschluss weiter verbessert werden. In Anlehnung daran befasst sich die EDEN Forschungsgruppe mit der Weiterentwicklung der Nahrungsmittelproduktion. Ausgehend davon ist in Abb. 5 eine detailliertere Aufschlüsselung zu sehen, die die Nahrungsmittelproduktion in weitere Subsysteme untergliedert.

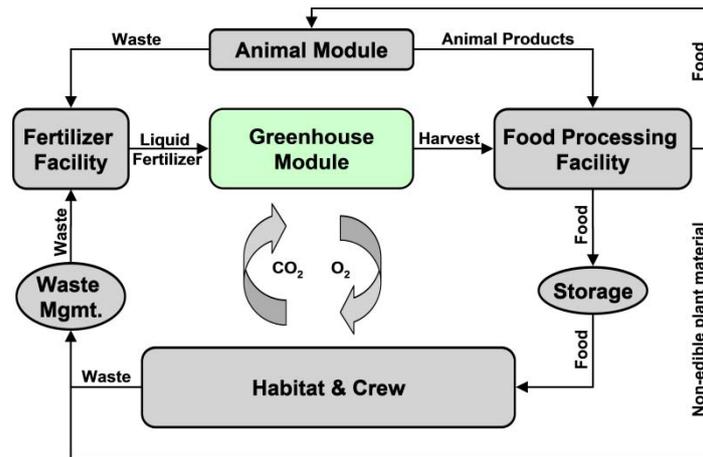


Abb. 5 - Beziehungen eines Gewächshausmoduls zu anderen Subsystemen im LES [5]

Durch die Einbeziehung biologischer Komponenten kann ein geschlossener Kreislauf hergestellt werden. Nach der Produktion von spezifisch ausgewählten Pflanzen, werden diese geerntet und in einer modifizierten Küche (Food-Processing Facility) verarbeitet. Entweder werden die Ernteprodukte eingelagert und der Crew als Nahrung bereitgestellt oder sie dienen der Fütterung von Tieren im Tiermodul (Animal-Module). Letzt genanntes Modul dient ebenfalls der Ernährung der Astronauten in Form von tierischen Produkten. Nicht essbares pflanzliches und tierisches Material wird an das Abfallverarbeitungssystem (Waste-Processing) weitergeleitet. Dort findet anschließend in der Düngereinrichtung (Fertilizer Facility) die Aufbereitung dieser Materialien zu flüssigem Dünger statt. Sie dienen erneut dem Wachstum der Pflanzen. Ein wichtiger Nebeneffekt ist im Gewächshausmodul die Umwandlung von CO₂ aus „veratmeter“ Luft zu frischem Sauerstoff.

3.4 Bedeutung von Pflanzen im extraterrestrischen Habitat

Weltweit haben Raumfahrtbehörden verschiedener Nationen in den vergangenen Jahrzehnten die Wichtigkeit der Pflanzenproduktion bei Aufenthalten im Weltraum hervorgehoben (vgl. McKay, 2004; vgl. Ferl et al. 2002). Herkömmliche Nahrungsversorgung beruhte dabei bislang vor allem auf die in dehydrierter und vakuumverpackter Form bereitgestellten Nahrungsmittel. Der Speiseplan und die Form haben sich allerdings seit den ersten Weltraumflügen kaum verändert.



Abb. 6 - Herkömmliche Nahrungsmittel für Astronauten früher und heute[6]

Vor Ort angebaute Pflanzen könnten nun die Vielfalt abgepackter Nahrungsmittel entscheidend erweitern. Dies wird vor allem im Falle von längeren Aufenthalten außerhalb der Erde interessant, um eine ausgewogene Ernährung der Astronauten sicher zu stellen. Es könnten dann beispielsweise auch gezielt Nutzpflanzen mit speziellen Inhaltsstoffen produziert werden (Functional Food), die nur von Zeit zu Zeit oder in geringen Mengen benötigt werden (vgl. NPR, 2007).

Neben der Erweiterung des Speiseplans stellen Pflanzen eine Möglichkeit dar, Kosten für Lagerung und Nachlieferung auf ein Minimum zu reduzieren (Tibbits und Alford, 1982; MacElroy et al. 1985). Nach Berkovich et al. (2004) liegen beispielsweise die Kosten für die Mitnahme von 1kg zur Weltraumstation ISS bei rund US\$30.000. Der Hauptvorteil direkter Pflanzenkultivierung ergibt sich jedoch durch den Prozess der Photosynthese. Stoffwechselabfallprodukte der Crew, wie zum Beispiel CO₂, werden dabei gezielt mit Wasser kombiniert, um daraus Nahrung und Sauerstoff zu produzieren. Gleichzeitig wird das Wasser, welches Hauptträgermedium im pflanzlichen Organismus ist, beim Durchfluss gereinigt. Anschließend kann es in Form von Transpirationswasser wieder aufgefangen werden. Neben Kohlenhydraten enthalten Pflanzen weitere Hauptnährstoffe für den Menschen, wie Fette und Eiweiße. Aber auch der Bedarf an geringer benötigten Mengen an Mineralien, Vitaminen und Spurenelementen ist auf diese Weise gedeckt (vgl. Tibbits und Alford, 1982). Obwohl die Entwicklung pflanzlicher Anbausysteme stetig voranschreitet, wird die pflanzliche Diversität bis auf absehbare Zeit limitiert bleiben. Dies ist vor allem der großen ingenieurstechnischen Herausforderung geschuldet, Pflanzenanbausysteme zu entwickeln, die möglichst leicht und platzsparend, gleichzeitig aber hochproduktiv sind und wenig Energie verbrauchen. Die Limitierung der möglichen Pflanzenspezies wird vor allem an der derzeitigen Größe und Anbaufläche im Weltraum von derzeit maximal 0,17m² deutlich (Zabel et al, 2014).

Über die Nahrungsproduktion hinaus haben Pflanzen einen positiven Effekt auf die Psyche und den physiologischen Zustand der Astronauten (vgl. Glomb, 2013). Das Funktionieren und die Sicherheit technischer Systeme und Subsysteme in einer extraterrestrischen Umgebung allein, reichen für das Wohlbefinden deren Bewohner nicht aus. Durch den Anbau von Biomasse kann eine erdnahe Umgebung geschaffen und das sehr technisch geprägte Habitat ein Stück weit ‚vermenschlicht‘ werden (vgl. Haeuplik-Meusberger, 2014).

Gleichzeitig ist aus geschlossenen Habitatstudien auf der Erde bekannt, dass sich eine Beschäftigung mit Pflanzen stressreduzierend auf den menschlichen Organismus auswirkt und auch gut in Zeiten geringer Forschungsaktivitäten angewendet werden kann (vgl. Glomb, 2013; Haeuplik-Meusberger, 2011; Horneck und Schauer, 2001).

Zusammenfassend stellen höhere Pflanzen ein Bindeglied zwischen den verschiedenen Elementen eines bioregenerativen Lebenserhaltungssystems dar und werden vor allem der Forderung nach geschlossenen Kreisläufen gerecht. Bei der Einbeziehung in zukünftige Langzeit-Weltraummissionen sind finanzielle Einsparungen möglich und die Gesundheit der Astronauten kann verbessert werden. Diese Aspekte wirken sich in ihrer Gesamtheit positiv auf den Missionsverlauf aus.

3.5 Anforderungen an extraterrestrische Gewächshausmodule

Gewächshausstrukturen und Anbausysteme für Nutzpflanzen auf anderen Himmelskörpern, unterscheiden sich grundlegend von solchen auf der Erde. Dies ist vor allem den lebensfeindlichen Bedingungen außerhalb der Erde geschuldet, die sich ohne eine schützende Hülle tödlich auf irdische Organismen auswirken würden (siehe auch Absatz 3.9).

Ein extraterrestrisches Habitat, wie bereits in Kapitel 3.1.2 beschrieben, ist in verschiedene Subsysteme unterteilt. Gewächshausmodule sollen zukünftig einige Aufgaben von physikalisch-chemischen Systemen zur Reinigung des umgebenen Klimas in einer Raumstation oder in Mond- und Marsstationen übernehmen. Das Design wird dabei hauptsächlich dadurch bestimmt, dass in einem isolierten Raum Bedingungen geschaffen werden, die für die Dauer der Mission das Überleben und Wohlergehen der Astronauten gewährleisten (Eckart, 1996). Die Funktionalität technischer Systeme muss dabei über die gesamte Dauer gesichert sein. Zudem müssen Quellen für Verunreinigungen schnell entdeckt und beseitigt werden können. Die folgende Tabelle zeigt weitere wichtige Anforderungen an ein extraterrestrisches Gewächshausmodul:

Tab. 1 – Anforderungen an ein extraterrestrisches Gewächshausmodul

1 Vorüberlegungen zur Mission
<ul style="list-style-type: none"> • Dauer des Aufenthaltes • Anzahl der zu ernährenden Astronauten und folglich die Anbaufläche • Pflanzenkandidaten/ Zusammensetzung des Speiseplans
2 Anforderungen an das Gewächshausmodul
<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Masse des Systems • Hohe Stabilität • Gute Isolierung und Abschließbarkeit • Optimale Ausnutzung des Raumes
3 Notwendige Bedingungen für Pflanzen
<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturspektrum ~15 – 28°C (+) • Licht in Menge und Qualität, so dass das Wachstum stimuliert wird • Schaffung einer Atmosphäre mit geeignetem Gas-Mix und Druck • Geringe Masse und ausreichendes Volumen
4 Nach der Landung
<ul style="list-style-type: none"> • Leichter und unkomplizierter Aufbau für schnellen Anbaustart
5 Anforderungen während der Pflanzenproduktion
<ul style="list-style-type: none"> • Pflanzenbauliche Managementfähigkeiten des Anbauers • Reparaturanspruch und Verfügbarkeit von Ersatzteilen • Optimale Regelung der Umweltparameter während der Pflanzenproduktion • Vielseitige Überwachungs- und Sicherheitsvorrichtungen • Qualitätsverbesserungen z.B. durch Hygienemaßnahmen

Quelle: modifiziert nach Zabelpitz (1986); Eckart (1994); Fowler et al. (2005)

3.6 Experimentelle Forschungseinrichtungen

Wie in der Einleitung erwähnt, werden seit den 1960er Jahren bioregenerative Lebenserhaltungssysteme in verschiedenen terrestrischen Testanlagen entwickelt und getestet (siehe auch Anhang).

Die Forschungen verfolgten dabei häufig ähnliche Ziele. Neben der Konstruktion geeigneter Anbauvorrichtungen werden pflanzenbauliche Konzepte gesucht, mit denen sich Pflanzen mit geringstem Aufwand, bezüglich mitzunehmender Masse, Platzbedarf und Ressourceneinsatz, produziert werden können, bei gleichzeitig größtmöglichem Nutzen für das Lebenserhaltungssystem. Dabei geht es neben der Nahrungsmittelproduktion auch um die Fähigkeit der Pflanzen, effektiv die Luft und Wasser zu reinigen und zu vitalisieren. Es bezieht sich also auf Probleme, die in Bezug auf geschlossene Kreisläufe gelöst werden müssen.

Da die Menschheit allerdings noch am Anfang des Verständnisses vom Verhalten der Pflanzen in reduzierter Schwerelosigkeit und reduzierten Druckverhältnissen ist, werden derzeit häufig Experimente zu dieser Thematik durchgeführt. Als Testfeld dient dabei die Internationale Raumstation, die im erdnahen Orbit kreist und mit verschiedenen Systemen für Pflanzentests ausgestattet ist. Ein Beispiel dafür ist das VEGGIE - Projekt (Vegetable Production Unit) der NASA in Kooperation mit dem Unternehmen Orbitec. Das System stellt lediglich die LED Beleuchtungstechnologie und Nährstoffe für das Pflanzenwachstum bereit, bedient sich sonst aber der umgebenden Atmosphäre in der ISS für die Temperatur- und Feuchtigkeitsführung sowie als Quelle von CO₂. Als Anbaumedium wird ein durchwurzelbares Kissen verwendet, in welchem verschiedene Salattypen und -sorten angebaut werden.



Abb. 7 - Aufbau des VEGGIE Moduls [7]

Derzeitige Anbaumöglichkeiten auf der ISS in Bezug auf die Fläche sind jedoch noch sehr gering (max. 0,17m²) und bedürfen weiterer Entwicklungsphasen, um sie zu vergrößern. Anders ist es in analogen Testflächen auf der Erde. In verschiedenen Projekten werden unterschiedliche Pflanzenkandidaten in innovativen Pflanzenanbaukammern getestet.



Abb. 8 - Biomass Production Chamber [l.]; Biosphere 2 [r.]; [8]

Das größte Testgelände war der in Arizona (USA) gelegene Gebäudekomplex Biosphere 2. Er sollte den Beweis bringen, dass Leben in einem komplett abgeschlossenen System möglich ist. Verschiedene Lebensbereiche wurden simuliert und der Anbau von Pflanzen diente der Versorgung der Bewohner. Sogar Apfelbäume wurden für die Versorgung der Biosphere-Bewohner angebaut. Obwohl es zahlreiche Erkenntnisse über geschlossene Systeme brachte, zwangen ebenso viele Probleme das Projekt zum Abbruch (Allen et al. 2003).

Heutzutage werden darüber hinaus auch viele wissenschaftliche Pflanzenversuche in Universitäten durchgeführt. Ein Beispiel dafür ist die Universität in Arizona, die innerhalb ihres Controlled Environment Agriculture Centers den Prototypen für ein Lunar Gewächshaus konstruiert hat (Abb. 9, links).



Abb. 9 - Aussehen verschiedener Forschungseinrichtungen für BLSS [9]

Daneben gibt es weitere Standorte in Extremregionen. Unter anderem wurden und werden an den Polregionen das McMurdo Gewächshaus in der Antarktis oder das Arthur Clarke Mars Gewächshaus auf Devon Island (Kanada) betrieben (Abb. 9, rechts).

3.7 CEA Technologien

Der Begriff **Controlled Environment Agriculture**, kurz CEA, bezieht sich auf die heutzutage intensivste Form der Landwirtschaft. Es sind vor allem Technologien für die geschützte Pflanzenproduktion in Gewächshäusern oder anderen Produktionssystemen in Innenräumen. Das Ziel von CEA ist dabei die Vermeidung von aufgezwungenem Stress für die Pflanzen oder externen Limits aufgrund des Klimas, um dadurch das volle genetische Spektrum des Wachstums und Produktionspotential auszuschöpfen (vgl. Albright und Langhans, 1996). Die verwendeten Systeme zeichnen sich vor allem durch einen hohen Technikeinsatz und einen signifikant hohen Energiebedarf für jede Operation aus. Darüber hinaus werden durch Albright und Langhans (1996) weitere Eigenschaften genannt:

- **Automatisierung der Pflanzen–Wachstums-Prozesse**
- **Hohe Investitionskosten, aber sehr arbeitseffizient**
- **Einsatz von Pestiziden und Herbiziden ist minimal durch Beeinflussung der Umgebung und biologischer Kontrolle**
- **Möglichkeit von höherer Jahresproduktion durch Unabhängigkeit von äußerer Umgebung**

Für eine erfolgreiche Anwendung von CEA Technologien ist eine Vielzahl von Verbindungen zwischen den drei Hauptelementen erforderlich. Dazu gehören:

- **Digitale und computergestützte Kontrolle der Umweltparameter**
- **Mechanisierung und Automatisierung der Produktionsprozesse**
- **Verbesserung der Systeme zur Pflanzenproduktion (z.B. Aero- und Hydroponik)**

Der Grad der technischen Ausstattung kann dabei sehr unterschiedlich sein und ist häufig direkt an das zur Verfügung stehende Kapital gebunden. So gibt es z.B. einfache geschützte Konstruktionen wie Folientunnel, die nur mit einer einfachen automatisierten Fertigungsanlage ausgestattet sind (siehe Abb. 10, links). Im Kontrast dazu stehen vollständig automatisierte Gewächshäuser, deren klimatische Umweltparameter über Klimacomputer gesteuert werden können.



Abb. 10 - Folientunnel mit einfacher CEA Ausstattung; r. NASA CELLS Plant growth chamber [10]

Die am höchsten entwickelten Systeme, sind solche, die für die Pflanzenkultivierung außerhalb der Erde eingesetzt werden sollen. Sie werden häufig mit dem Begriff **Environmental Control and Life Support Systems (ECLLS)** bezeichnet und unterscheiden sich zur irdischen Gewächshausproduktion durch ein vollständig geschlossenes System, welches nach Albright und Langhans (1996) eine gesunde und produktive Arbeitsumgebung für Menschen außerhalb der irdischen Biosphäre schaffen soll. Es geht hierbei weniger um das Finden einer möglichst wirtschaftlichen Produktionsweise im herkömmlichen gartenbaulichen Sinn. Der Fokus liegt vielmehr im Ausschöpfen des Potentials der Pflanzen, Kreisläufe in Bezug auf die Nahrungsmittelproduktion, Trinkwasserrückgewinnung sowie die Belegung der Atmosphäre, zu schließen.

Für das EVA-System hat die Auswahl des CEA-Systems einen entscheidenden Einfluss auf den Kulturerfolg. Die Voraussetzungen für einen erfolgreichen Anbau im EDEN Labor ist die Schaffung automatisierter Prozesse, um den Arbeitswand so gering wie möglich zu halten. Die Steuerung der photosyntheserelevanten Faktoren muss ebenfalls genauestens aufeinander abgestimmt sein und im Notfall trotzdem eine sichere Versorgung der Pflanzen garantieren. Zudem muss auf einer Grundfläche von 1 m² eine hochproduktive Atmosphäre geschaffen werden. Für alle Forderungen beinhaltet das ECLLS das größte Potenzial, weswegen folgende Komponenten im Anschluss genauer betrachtet werden sollen:

- **Erdelose Kulturverfahren**
- **Künstliche Belichtung**
- **Steuerung der Umweltparameter**
- **Stressmonitoring**

3.7.1 Erdelose Kulturverfahren

In den letzten Jahrzehnten hat sich im Gartenbau eine Vielzahl von Anbauverfahren in Gewächshäusern etabliert, von denen mehrere auch für Anwendungen im Weltraum in Frage kommen (siehe Abb. 11).

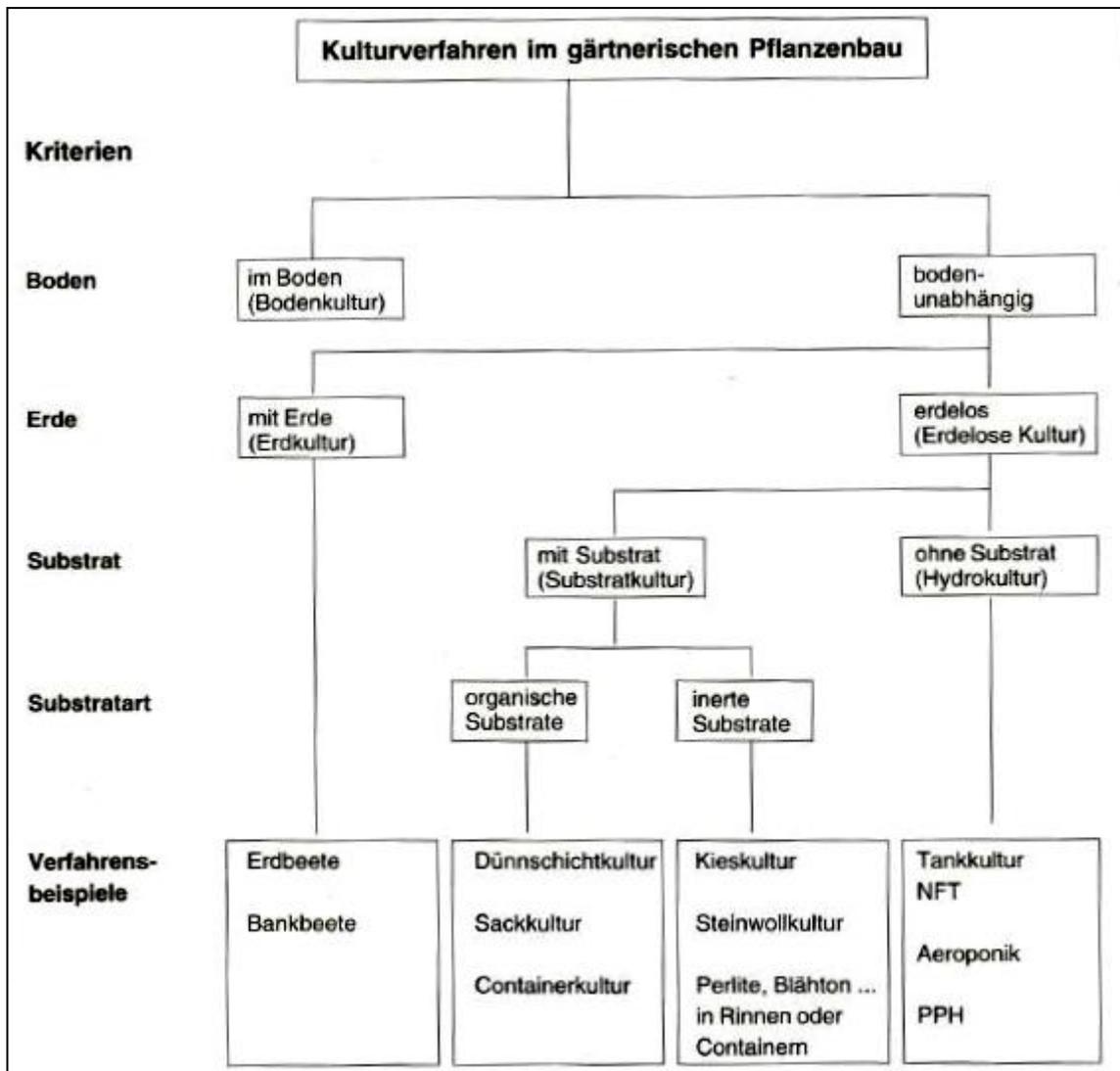


Abb. 11 - Übersicht gärtnerischer Kulturverfahren [11]

Nach Göhler et al. (2002) und Storck (1994) gibt es zwei Hauptunterteilungsmöglichkeiten gärtnerischer Produktionsverfahren:

- „Kultur im Boden“ (Bodenkultur)
- „bodenunabhängige“ Kulturverfahren.

Da für Gewächshausmodule im Weltraum vor allem bodenunabhängige Verfahren in Betracht gezogen werden, ist es notwendig, auf die weiteren Unterteilungen einzugehen. Diese erfolgt nach der

- Nährlösungsversorgung, in offene und geschlossene Systeme
- Art des Wurzelmediums, in Boden-, Substrat- und Nährlösungskultur

Die offenen Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass überschüssiges Wasser abläuft und nicht in den Kreislauf zurückgeführt wird. Es geht somit verloren. Damit unterliegt dieses System einer ständigen Nährstoffauswaschung und ist in Bezug auf die Umweltfreundlichkeit eher negativ zu bewerten.

In geschlossenen Systemen wird die überschüssige Nährlösung aus dem Bewässerungsvorgang aufgefangen und entweder in unveränderter Form oder nach Desinfektion und Kontrolle wieder dem Kreislauf und den nächsten Bewässerungsvorgängen zugeführt (vgl. Dickob, 1992). Das bedeutet weiterhin, dass alle Emissionswege, wie Abwasserleitungen und Außenluft in dem Sinne verschlossen sind, dass Erde, Wasser und Luft nicht verschmutzt und Abfälle nur kontrolliert entsorgt werden (vgl. Olympios, 1999).

Die Nährlösungskultur, die auch Hydrokultur genannt wird, ist neben der Substratkultur die zweite Gruppe der erdelosen Kulturverfahren. Sie wird in Kulturverfahren mit ständigem und solchen mit nur zeitweiligem Nährlösungskontakt unterteilt.

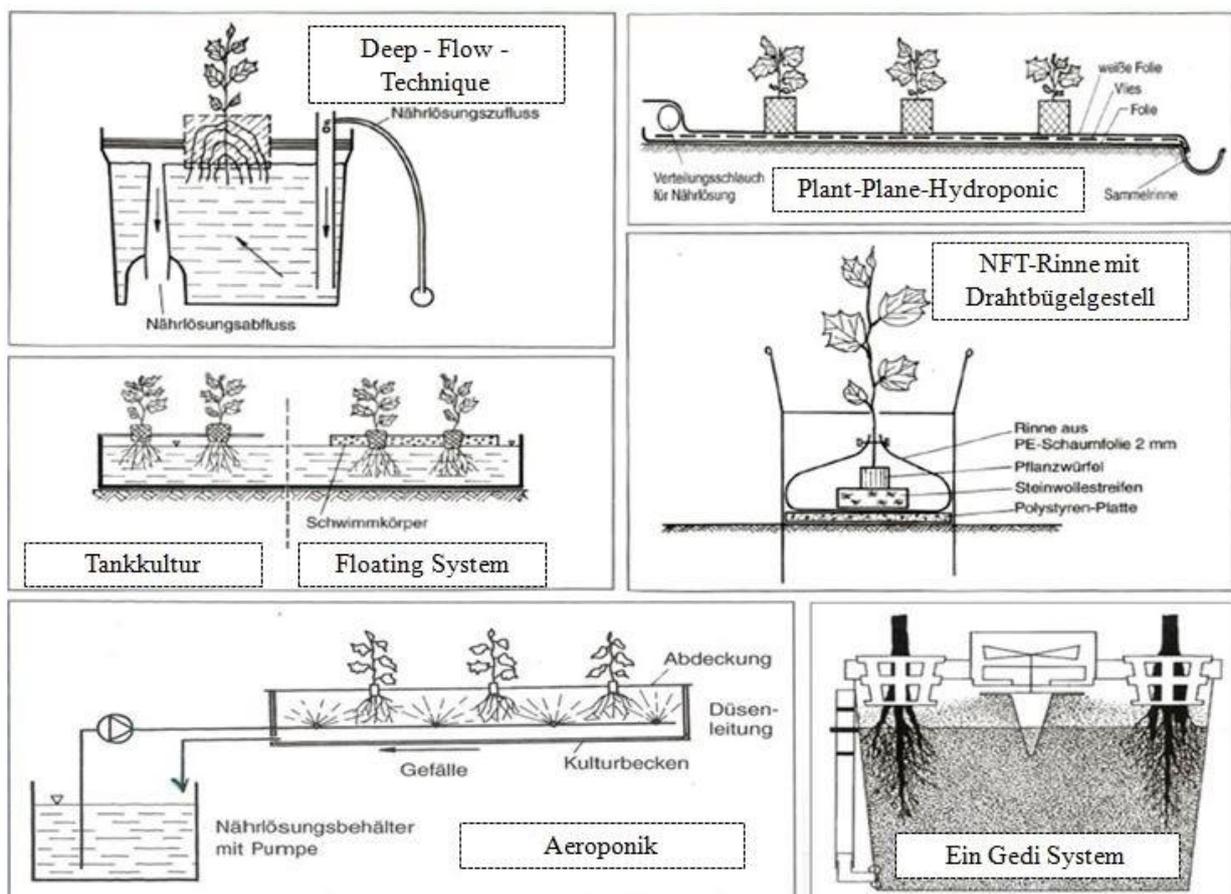


Abb. 12 - Schematische Darstellungen erdeloser Kulturverfahren [12]

Allen ist gemeinsam, dass abgesehen von den Anzuchtsubstraten die Pflanzenproduktion ausschließlich in „Nährlösungen ohne Substrat“ stattfindet (Göhler et al., 2002).

Beispiele für diese Verfahren wie in Abb. 12 dargestellt, haben folgende Bezeichnungen:

- **Nährfilmtechnik (NFT)**
- **Deep Flow Technique (DFT)**
- **Tank- und Wasserkultur**
- **Aero- und Hydroponik**
- **Plant-Plane-Hydroponik (PPH).**

Im Hinblick auf Gewächshausssysteme für Extremstandorte sind die Techniken der Aero- und Hydroponik (abgeleitet von *hydro*=Wasser; *aero*=Luft; *ponos*=Arbeit, also arbeitendes Wasser/ Luft) vielversprechend. In Anlehnung an Ihre Bezeichnung handelt es sich dabei um Methoden, die vollständig auf den Einsatz von Erde als Wachstumsmedium verzichten. Stattdessen werden die Pflanzen entweder in einer Nährlösung angebaut, die die Wurzeln umströmt oder die Wurzeln hängen frei in der Luft bzw. Anbaueinrichtung und werden in definierten Zeitintervallen mit einer Nährlösung besprüht (siehe Abb.13).

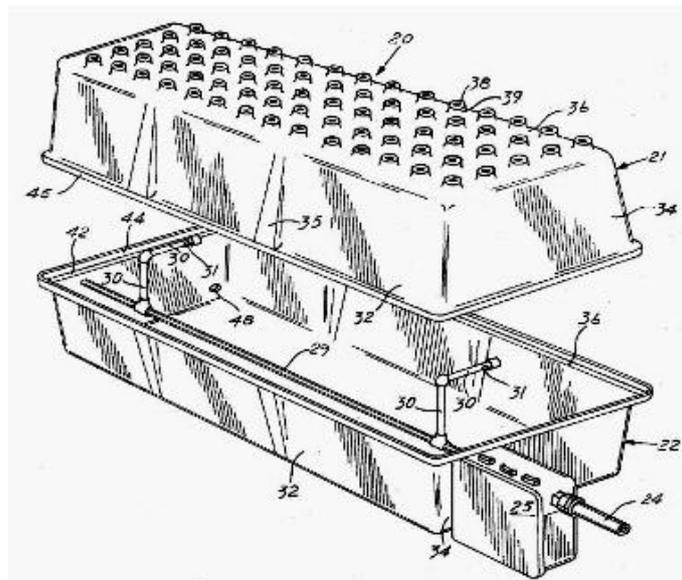


Abb. 13 - Patentierte aeroponische Anbaueinrichtung (r.) [13]

Ausführliche Beschreibungen der Verfahren sind unter anderem zu finden bei Jones (1997), Göhler et al. (2002), Zobel et al. (1976), Went et al. (1957), FAO (1990). Die Durchführung erfordert ein breites Wissen sowohl im pflanzenbaulichen als auch im ingenieurstechnischen Bereich. Die Kenntnis über die Zusammensetzung und Behandlung der Nährlösung ist dabei von entscheidender Bedeutung. Bei einwandfreiem Ablauf der Aero- oder Hydroponik sind Vorteile für extraterrestrische Habitate, vor allem Ressourceneinsparungen, möglich. Der Verzicht eines Anbaumediums bietet Möglichkeiten die Nährlösung stärker mit Sauerstoff anzureichern, was für ein optimales gesundes Wurzelwachstum notwendig ist (vgl. FAO, 1990).

3.7.2 Künstliche Belichtung

Einer der entscheidenden Faktoren für die energetische Unterstützung der Photosynthese ist die auftreffende und absorbierte Photonenzahl bzw. die Menge an zur Verfügung stehenden Lichtteilchen. Die Höhe der Photosynthese hängt dabei vor allem von der Qualität und Quantität des Lichtes ab. Der photosynthetisch aktive Bereich (PAR) befindet sich in einem Wellenlängenbereich zwischen 400 bis 700 nm (Tantau, 2014).

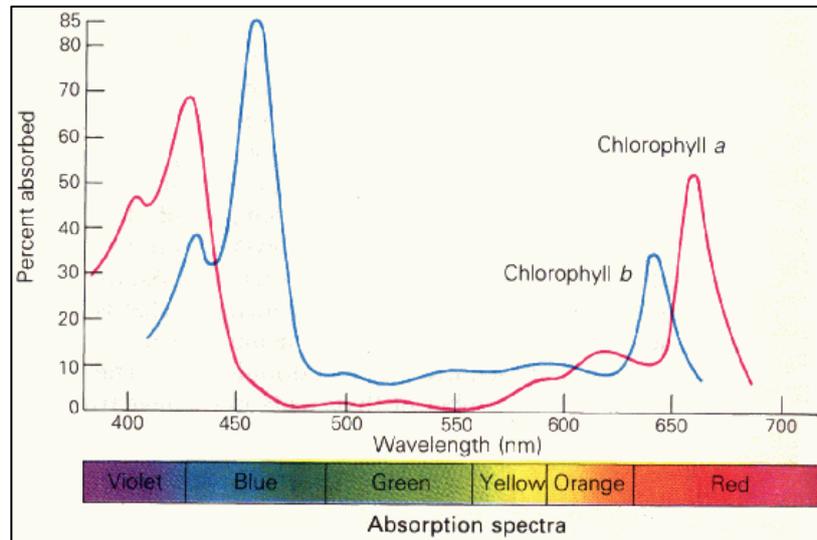


Abb. 14 - Absorptionsspektrum für die pflanzliche Photosynthese [14]

Neueste Entwicklungen unterstellen der Lichterzeugung mittels LED ein hohes Potential gerade im Hinblick auf mögliche Energieeinsparungen (vgl. Tantau, 2014). LEDs sind Licht emittierende Dioden mit einer positiven und einer negativen Schicht. Beim Durchfluss von Strom von der P- zur N-Schicht, werden Elektronen angeregt, Licht in bestimmten Wellenlängen, oder sogar als UV- oder NIR-Strahlung abzugeben. Die Farbe des Lichts hängt von den verwendeten Materialien und Prozessen der Herstellung ab (vgl. OSRAM, 2014). Auf diese Weise ist es möglich, Pflanzen spezifisch mit der benötigten Lichtmenge und -qualität zu versorgen.

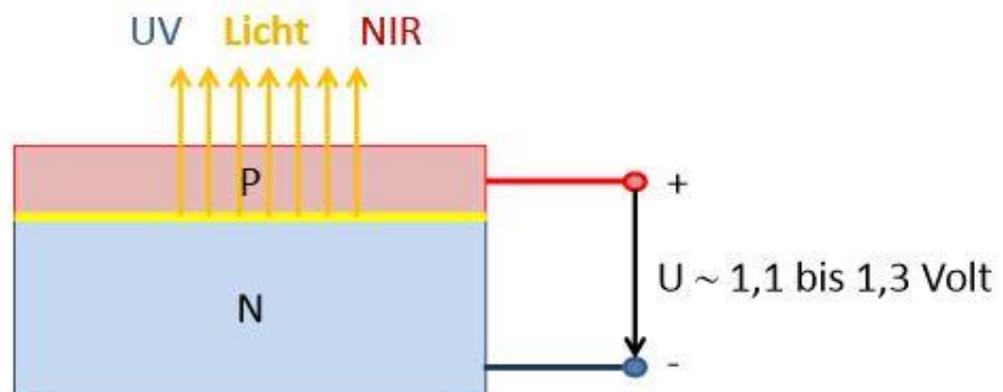


Abb. 15 - Funktionsschema von LEDs [15]

Trotz der im Vergleich zu anderen Leuchtmitteln hohen Wirkungsgrade von bis zu 35%, wird dennoch ein großer Anteil (65%) an Wärme abgegeben. Hohe Temperaturen verringern die Lebensdauern von LEDs, weshalb die Wärme entweder über effektive Kühlung oder Ventilation abgeführt werden muss. Bei gleichbleibend niedrigem Temperaturniveau ist die Lebensdauer mit bis zu 50.000 Stunden für Einzel-LEDs und 25.000 für LED-Leuchten vergleichsweise hoch. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der kompakten Bauweise der LED-Leuchten und der damit einhergehenden Möglichkeit des Intra Canopy Lightings (vgl. PHILIPS, 2014). Leuchtstreifen mit LEDs können somit zielgenau am Ort des Bedarfes angebracht werden, wodurch eine höhere Pflanzdichte ermöglicht wird. Schlussendlich ist bei zusätzlicher Erhöhung der Photoperiode eine Steigerung des Biomasseertrages möglich. Aufgrund des erhöhten Wirkungsgrades geht pro Watt weniger Energie in Form von Wärme verloren, was zu einer Reduktion des Energiebedarfes führt (vgl. Tantau, 2014).

3.7.3 Steuerung der Umweltparameter

Für ein optimales Wachstum haben Pflanzen spezifische Anforderungen an das sie umgebende Klima. Folgende Spannbreiten müssen für die Wachstumsfaktoren eingestellt werden können (Hublitz, 2005):

- **Temperatur** [15 – 28°C (+)]
- **relative Luftfeuchte** [50 – 85%]
- **CO₂ Gehalt** [0,034 – 0,150 vol%]
- **Luftbewegung** [0,1 – 1,0 m/s]
- **Lichtstärke** [200 – 2000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$]
- **Reinigung der Luft von Infektionsquellen und Störgasen (Pilze, Bakterien, Viren, Ethylen)**

In der Gewächshausproduktion werden diese Faktoren mit Hilfe eines Luft-Management Systems gesteuert. Computerprogramme wie LabVIEW®, PRIVA® oder RAM als Benutzeroberfläche kombinieren dabei die verschiedenen Parameter jeweils optimal nach den spezifischen Anforderungen einer Kultur. Für die Aufzeichnung aktueller Werte sind in der Gewächshauskonstruktion Sensoren und Messfühler angebracht. Nach der Erfassung werden sie mit den zuvor eingestellten Sollwerten verglichen. Bei Differenzen steuert das Programm anschließend verschiedene Elemente, wie Fenster, Ventilatoren, Heizungen und Sprühdüsen, um wieder das Niveau der Sollwerte zu erreichen. Meistens sind die zuvor erwähnten Klimafaktoren auch untereinander verknüpft. So muss beispielsweise die Bewässerungsmenge einer Kultur (ml/m^2) dreimal so hoch sein, wie die tägliche Strahlungssumme (J/cm^2) (Lattauschke, 2008).

Eine weitere wichtige Bedeutung in geschlossenen Systemen kommt der Reinigung der Luft zu. Aus Erfahrung von der Raumstation MIR wird über hohen Infektionsdruck und die Gefahr, ausgehend von pilzlichen und bakteriellen Schaderregern berichtet (vgl. Makimura et al. 2001). Da oft in der Nacht Luftfeuchten von <90% herrschen können, ist als vorbeugende Pflanzenschutzmaßnahme für eine ausreichende Zirkulation der Luft zur Abtrocknung des Pflanzenbestandes zu sorgen (vgl. Eshenauer und Anderson, 2004).

3.8 Der Kulturapfel

3.8.1 Allgemeine Informationen

Der Kulturapfel ist mit ca. 76 Millionen Tonnen Äpfel pro Jahr in der globalen Fruchtproduktion nach Bananen die zweit größte produzierte Fruchtgehölzart (FAO, 2012). Schon seit der Antike erfolgt der Anbau vor allem in Asien und in Europa. Genetische Variabilität ermöglichte die Züchtung angepasster Arten für verschiedene klimatische Gebiete, weswegen er heute in fast allen Teilen der Erde kultiviert wird (vgl. Fischer, 2002).

Im Hinblick auf das Konsumieren des Apfels, gibt es vielfältige Möglichkeiten. Durch das Pflücken kann er entweder direkt verzehrt oder im Lager bis zu einem Jahr gelagert werden. Darüber hinaus ist eine Verarbeitung zu Saucen, Mus oder Saft möglich. Außerdem können Äpfel zu Brei oder Süßigkeiten verarbeitet werden. Zu guter Letzt ist er neben dem Inhaltsstoff Pektin eine gute Quelle für wichtige Nährstoffe für den Menschen (Fischer, 2002).

Tab. 2 – Nährwert pro 100g Apfel

Nährstoff	Gehalt	Nährstoff	Gehalt
Energie	51,9 Kcal	Eisen	ca. 0,10-0,25 mg
Wasser	85 (80-90) g	Zink	0,1 mg
Eiweiß	0,3 g	Kupfer	50 µg
Fett	0,4 g	Mangan	50 µg
KH	7-13 g	Folsäure	3-5 µg
ung. FS	0,2 g	Vit. A	8,0 µg
Harnsr.	15,0 mg	Vit. B1	35 (15-60) µg
BStoffe	1,8-2,5 g	Vit. B2	30 (20-50) µg
Natrium	3,0 mg	Vit. B6	100 µg
Kalium	120 (90-150) mg	Vit. E	0,5 mg
Calcium	5 (3-12) mg	Vit. C	12 (3-25) mg
Magnesium	5 (4-7,5) mg	Carotinoide	0,07-0,14 µg
Phosphor	12 (7-17) mg		

Quelle: Herrmann, 2001

3.8.2 Anforderung an Umweltfaktoren

Für einen erfolgreichen Anbau von Apfelbäumen ist nach Fischer (2002) das optimale Zusammenwirken der klimatischen Faktoren, vor allem von Temperatur, Licht, Niederschlag und Bodeneigenschaften entscheidend.

Der Temperaturbereich zur maximalen Ausschöpfung des Photosynthesepotentials liegt bei 15 bis 30°C. Außerhalb dieses Bereiches kann es zu Verzögerungen im Baum- und Fruchtwachstum kommen, sowie zu Beeinträchtigungen der inneren Fruchtqualität (Fischer, 2012). Wenn der Apfelbaum jedoch genügend abhärten kann, übersteht er Temperaturen bis zu -25°C (Fischer, 2012). Ab 40 – 45°C kommt es zu Hitzeschäden und die Photosynthese wird gehemmt.

Des Weiteren ist der Apfelbaum auf den Umweltfaktor Licht angewiesen, da dies der Energielieferant für die Photosynthese ist, und dadurch das Baumwachstum und die Fruchtbildung stimuliert wird (Fischer, 2012). In einem künstlich belichteten Gewächshaus werden die Menge und die Lichtqualität an den Bedarf angepasst. Die geographische Ausrichtung der Bäume hat dabei keinen Einfluss. Entscheidend ist die Ausrichtung der Bäume nach der Position der Lichtquelle.

Ein weiterer Einfluss ergibt sich durch das Angebot an Wasser. Der Wasserbedarf von Apfelbäumen ist vergleichsweise hoch und beträgt im Jahr 700 mm. Diese Menge sollte nach Fischer (2012) bedarfsgerecht verteilt sein. Demnach ist der Bedarf besonders hoch zurzeit des Austriebs und Blüte im Frühjahr, wobei häufige Bodenvernässung zu Sauerstoffmangel der Wurzeln führen kann.

Die Luftbewegung im Baumbestand ist ebenfalls von Bedeutung. Wenn diese zu stark ist, kann der Bienenflug für die Bestäubung beeinträchtigt werden und bei zu trockenem Wind wird die Transpiration der Bäume erhöht (Fischer, 2012).

Die Betrachtung des Umweltfaktors Boden entfällt bei vorliegenden Experimenten, da ein erdeloses Kulturverfahren gewählt wurde. Der pH-Wert für Apfel sollte allerdings im Bereich um pH 5,5 bis 7 liegen (Fischer, 2012). Darüber hinaus beträgt die benötigte Nährstoffmenge bei einem zu Grunde gelegten Ertrag von 30 – 50 t/ha ca. 30 kg N, 10 kg P₂O₅, 50 – 80 kg K₂O, 5 kg CaO und 5,3 kg MgO pro Hektar (Fischer, 2012).

3.8.3 Säulenäpfel

In den 1960er Jahren wurden in der Summerland Research Station in British Columbia (Kanada) Mutanten der Sorte McIntosh entdeckt, welche sich durch einen kompakten säulenförmigen Wuchs auszeichneten. Diese nach dem Entdecker bezeichneten ‚Wijcik‘ - Bäume haben einen genetisch bedingten Säulenwuchs, weswegen sie auch Columnarbäume genannt werden (Rueß, 2009). Häufig werden sie anstelle der Unterlage M9 mit stärkerwüchsigen Unterlagen z.B. P14, M111, M25 kombiniert (Rühmer, 2010). Dadurch und durch die stark verkürzten Internodien versteift sich ihr Holzkörper, wodurch die Bäume statisch sehr robust sind und eine gute Standfestigkeit aufweisen (Rueß, 2009).

Ein weiterer Vorteil ist das Fehlen von langen Seitentrieben aufgrund der starken apikalen Dominanz. Die Seitentriebe werden zwar angelegt, jedoch im Wachstumsverlauf zu kurzen Fruchtspießen mit üppigem Blütenknospenbesatz umgewandelt (Rueß, 2009). Da in der Regel nur eine Mittelachse vorhanden ist, beziffert selbiger Autor mögliche Pflanzabstände mit 50 – 70cm.

Im Verhältnis zwischen vegetativem und generativem Wachstum zeichnen sich Columnare durch ein hohes Ertragsverhalten aus (Rueß, 2009). Zum Beispiel liegen die Erträge der CATS (Columnar Apple Trees) Züchtungsserie zwischen 4,1 bis 9,6 kg/Baum und das Fruchtgewicht bei 169 bis 218g (Rühmer, 2010). Aufgrund des hohen Ertragsverhaltens neigen Columnaren jedoch zu starker Alternanz (Rueß, 2009).

Darunter versteht man die Minderung des Blütenbesatzes durch zu starkes Wachstum und zu viele Früchte auf dem Baum. Es kommt dadurch im Folgejahr zur Einschränkung der Blütendifferenzierung (Fischer, 2012).

Ein weiterer Nachteil aufgrund des starken Fokus der Bäume auf die Fruchtausbildung, sind schlechtere Geschmacksqualitäten und niedrigere Zuckerwerte verglichen mit herkömmlichen Sorten (Rühmer, 2010).

Zudem ist, wenn auch nur in geringem Umfang, ein Baumschnitt bei Säulenapfelbäumen durchzuführen, da es sonst zu buschigen Verzweigungen und steilen Seitenästen kommen kann. Der Anbauer muss sich jedoch nicht, wie bei anderen Baumformen üblich, mit Erziehungsformen und dem Kronenaufbau beschäftigen. Es reicht die konsequente Entfernung der Seitentriebe (Rueß, 2009).

Die ersten Säulenapfelbaum-Generationen waren noch häufig anfällig für Schorf und Mehltau. Aufgrund der Kombination der dominanten Gene Co (columnarer Wuchs) und des Vf (Schorfresistenz von *Malus floribunda*) konnte das Risiko jedoch deutlich gesenkt werden.

Zukünftig ist davon auszugehen, dass die Züchtung von Apfelsorten beschleunigt werden kann und somit eine schnellere Introduktion von gewünschten Eigenschaften möglich wird. Am Julius-Kühn-Institut in Dresden (Deutschland) wurde dazu die Rapid Cycle Crop Breeding Methode (RCCB) entwickelt (Flachowsky, 2011). Auf diese Weise könnten beispielsweise genetisch bedingte Hürden überwunden werden (Samendormanzbrechung mit mind. 12 Wochen Niedrigtemperatur-Stratifikation; juvenile Phase mind. 10 Monate; Kältephase für die Blütenentwicklung mind. 10 Wochen) (Nocker und Gardiner, 2014). Auch bei der NASA werden bereits Versuche mit verschiedenen Zwergobstbaumkulturen mit Hilfe der RCCB Methode durchgeführt (vgl. Graham, 2014). Das Ziel ist die Erweiterung der möglichen anzubauenden Pflanzenarten in einem bioregenerativen Lebenserhaltungssystem.

3.8.4 Literaturhinweise über die erdelose Anzucht von Apfelbäumen

Die Methode der erdelosen Kultivierung von Apfelbäumen wurde in der Literatur bisher nur wenige Male erwähnt. Vor allem zur Untersuchung des Wurzelsystems und zur Pflanzenernährung sind aeroponische und hydroponische Systeme jedoch gut geeignet (Göhler und Molitor, 2002). Die hier dargestellten Literaturhinweise sollen gleichzeitig der Eingrenzung von klimatischen Sollwerten für den erdelosen Apfelanbau dienen, sowie als Erfahrungswert und Grundlage in die in dieser Masterarbeit durchgeführten Experimente einfließen.

Die wohl älteste bekannte Studie stammt von Roach et al. aus den 1950er Jahren. Über einen Zeitraum von vier Jahren (1951-1955) wurde eine Versuchsanlage mit kleinen Apfelbäumen beobachtet. Mit einer aufwendigen Konstruktion konnten unter kontrollierten Bedingungen und gezielt applizierten Defiziten im Spurenelementbereich pro Saison 256 Bäume untersucht werden. Im Ergebnis zeigten die Bäume in allen Jahren eine gute Entwicklung, wobei der Erfolg von der kontinuierlichen Versorgung der Wurzeln mit einer Nährlösung abhing.

Auch der Zeitpunkt der Pflanzung ist entscheidend, da er die Geschwindigkeit der Triebentwicklung beeinflusst. Roach et al. (1956) beschreiben die Form der Wurzeln als auffällig unverzweigt, lang und fleischig. Desweiteren wird berichtet, dass Wurzeln in stehender Nährlösung ohne zusätzliche Sauerstoffzufuhr mit einem schleimigen Belag aus Pilzen und Bakterien überzogen werden. In der Folge sterben die Wurzeln und auch die Pflanzen ab.

Als Richtwert für den pH wird der Wert 5.5 angegeben. Außerdem findet sich in der Studie ein vielversprechender Vorschlag für ein Halterungssystem für Apfelbaumtriebe (Abb. 16).

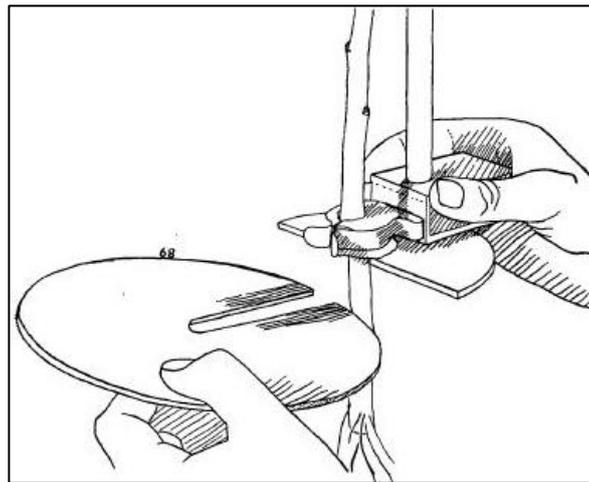


Abb. 16 – Halterungssystem für Apfelbaumtriebe [16]

Ungefähr 20 Jahre später führten Van Lune und Van Goor (1975) weitere Experimente zum Anbau von Apfelbäumen ohne Erde in einer umfließenden Nährlösung durch. Auch in diesen Experimenten wird vor Wurzelinfektionen durch pathogene Organismen gewarnt, die jedoch durch Sauerstoffanreicherung, Nährlösungstemperatur und dem verwendeten Unterlagentyp beeinflusst und verhindert werden können. Als Beispiel geben die Autoren für ein gutes Wurzelwachstum der Unterlage M9 eine Temperatur von 8 – 14°C an. Sie schlagen außerdem die monatliche Staffelung der Temperatureinstellung der Nährlösung abhängig vom Entwicklungszustand der Pflanzen vor. Im ersten Monat sind 10 – 12°C, im zweiten und dritten Monat 14°C und schließlich 16 – 17°C im vierten und fünften Monat angegeben. Analog sollten sich die Umgebungstemperaturen für die oberirdischen Pflanzenteile monatlich verändern. Für den ersten Monat 10-15°C (Tag) und 10-12°C (Nacht), im zweiten Monat 20°C und 14°C und im dritten bis fünften Monat 25°C und 15°C (Van Lune und Van Goor, 1975).

In einer neueren Veröffentlichung von Monteiro Corrêa et al. (2012) wird die hydroponische Anzucht von verschiedenen Fruchtgehölzen in Brasilien beschrieben. Als Nährlösung wird die von Hoagland als die am meisten verwendete vorgeschlagen. Sie sollte mit pH Werten von 4,5 bis maximal 7,5 und EC Werten von 0,75 bis maximal 2,0 appliziert werden. Da die Werte aufgrund der Aufnahme durch die Pflanzen ständig variieren, ist eine tägliche Kontrolle und gegebenenfalls Einstellung der Werte notwendig (Monteiro Corrêa et al. (2012)).

In einer weiteren Studie stellt Spethmann (2007) einen erhöhten Bewurzelungserfolg von Apfelbäumen durch die Verwendung von Langtrieben in Aussicht. Statt herkömmlich verwendeten Schnittlängen von 5 – 30 cm schlägt der Autor Längen von 50 bis 150 cm vor. Auch der Zeitpunkt der Pflanzung spielt eine wesentliche Rolle. Am besten geeignet sei der Zeitraum von Mitte Juni bis Ende Juli. Zusätzlich ist es auch wichtig, die Luftfeuchte für eine positive Bewurzelung permanent bei Werten um 90 – 100% zu halten, gerade bei hohen Temperaturen.

Auch bei Keppel et al. (1998) lassen sich einige Empfehlungen und Faustzahlen für die Kultivierung von Apfelbäumen finden, die in den anschließenden Experimenten berücksichtigt werden. So setzt den Autoren zufolge die Wurzelentwicklung nach dem Winter ab Temperaturen von 4-5°C ein. Die Hauptwurzelentwicklung erfolgt von April bis Juni und auch nach einem Minimum im Sommer erneut im Herbst. Die Hauptmasse der Wurzeln befindet sich in einer Tiefe von 15 bis 50 cm, wobei die Ausprägung des Wurzelsystems stark von den Unterlagen abhängig ist. So kommt es bei den Unterlagen M27 und M9 meist nur zum Wachstum von ein bis zwei Hauptwurzeln (beides schwachwüchsige). Bei mittelstark wachsenden Unterlagen bilden sich hingegen mehrere Hauptwurzeln aus. Außerdem weisen Keppel et al. (1998) darauf hin, dass ein früher Ertragseintritt das Wurzelwachstum hemmt.

3.9 Zusammenfassung

Die Einbeziehung von höheren Pflanzen in das Lebenserhaltungssystem ist attraktiv, da vor allem durch geschlossene Kreisläufe eine große Menge an Ressourcen eingespart und wiederverwertet werden kann. Dadurch entsteht gleichzeitig der positive Effekt, dass weniger Platz für mitzunehmende Güter, wie Sauerstoff, Nahrung und Treibstoff verwendet werden müsste. Dennoch erfordert die Verwendung von Pflanzen in bioregenerativen Lebenserhaltungssystemen aufgrund der vergleichsweise extremen Bedingungen im Weltraum ein hohes ingenieurtechnisches Geschick, sowie umfangreiche Kenntnisse im Pflanzenbau.

Tab. 3 – Bedingungen auf und außerhalb der Erde

Faktor	Ort im Weltraum			
	Erde	Weltraumstation	Mond	Mars
Gravitation	1	<0,001	0,165	0,38
Tageslänge	24 h	90 min	29, 53 d	24 h 39 m 35 s
Jahreslänge	365,25 d	365,25 d	365,25 d	687 d
Achsenneigung	23,5°	-	1,5°	25°
Atmosphärischer Druck	101,3 kPa	Künstlich	kein	1,0 kPa
Solarkonstante	1368 W/m ²	1368 W/m ²	1368 W/m ²	589 W/m ²
Temperaturbereich	-89,2°C bis 57,8 °C	22°C bis 28°C	-158°C bis 130°C	-143°C bis 17°C
Relative Luftfeuchte	0 % - 100 %	30% bis 45%	-	0,03%
Kohlendioxid - Gehalt	400 ppm	3000 - 7000 ppm	-	950.000 ppm

Quellen: Salisbury 1991; Fowler et al. 2000; Heret 2006

Die hohen technischen und pflanzenbaulichen Fähigkeiten sind umso mehr eine notwendige Voraussetzung, wenn mehrjährige Pflanzen bzw. Fruchtgehölzarten in Betracht gezogen werden. Sie stellen allerdings in der Erforschung und Entwicklung von bioregenerativen Lebenserhaltungssystemen bezüglich der Speiseplanerweiterung eine Neuheit dar. Und auch gegenüber der Aeroponik, obwohl interessant als Kulturverfahren für Weltraumhabitate, wird die Verwendung eines Wachstumsmediums noch häufig bevorzugt.

Die vielen bereits durchgeführten Forschungsprojekte auf diesem Gebiet der bioregenerativen Lebenserhaltungssysteme haben bereits ein hohes Maß an Erkenntnissen geliefert. Dennoch ist es weiterhin schwierig, herkömmliche chemische und physikalische Lebenserhaltungselemente vollständig durch biologische Komponenten, wie höhere Pflanzen, inklusive perennierenden Obstgehölzen, zu ersetzen. Ein gewisser Grad an Nachlieferung von Ressourcen wird bis auf weiteres bleiben (vgl. Horneck und Schauer, 2001). Zudem ist auch die Haltbarkeit eines solchen sehr technischen Anbausystems immer von der Funktionsfähigkeit der Maschinen und technischen Geräte abhängig (vgl. Gitelson und Lisovsky, 2008).

4 Material und Methoden

4.1 Material

4.1.1 Die Ausstattung des EDEN Labors

Im Labor des EDEN- Projektes befinden sich alle notwendigen Werkzeuge, Hilfsmittel und Systeme, die man für eine erfolgreiche Pflanzenproduktion mit CEA-Technologien benötigt. In Anlehnung an den Prozess der Pflanzenkultivierung (Vorbereitung, Versuchsaufbau, Auswertung) ist das Labor in einen Analyse-, Arbeits- und Experimentierbereich aufgeteilt. Für die Durchführung der Pflanzenexperimente gibt es insgesamt 12 Anbauunterkünfte, von denen fünf die Abmaße von 1m x 1m x 2m und 4 Kammern eine Dimensionierung von 1m x 0,6m x 1m aufweisen. Die Wachstumszelte sind über ein Wickelfalzrohrsystem mit dem AMS verbunden, mit welchem das pflanzenumgebende Klima optimal auf den Bedarf der Pflanzen angepasst werden kann (CO₂, Temperatur, Relative Luftfeuchte, Luftsterilisation). Die Nährstoffversorgung wird derzeit noch über ein im Zelt integrierten Tank bereitgestellt, für den manuell die Nährstoffe im Analyserraum angesetzt werden. Zukünftig wird ein Nährstoffversorgungssystem mit allen Zelten verbunden sein und regelmäßig die gewünschten Nährstoffkonzentrationen bereitstellen. Sprühintervalle werden derzeit ebenfalls noch mit Zeitschaltuhren von Omron® manuell eingestellt. Die Steuerung der Umweltparameter erfolgt computergestützt aus der Working Area mit Hilfe des Programms LabVIEW®. Analog zu den Luftparametern wird hier auch die Belichtungszeit eingestellt, sowie mit Hilfe von netzwerkverbunden Kameras Fotodokumentationen durchgeführt. Die aktuellen und in dieser Arbeit beschriebenen Wuchsexperimente mit Säulenapfelbäumen finden im Wachstumszelt 5 statt und werden im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben.

4.1.2 Wachstumskammer und Grundgerüst

Als Wachstumskammer dient ein speziell angefertigtes Anbauzelt der Firma HOMEbox® mit den Ausmaßen 1m x 1m x 2m. Die folgende Abbildung zeigt die Frontansicht, sowohl im unbeleuchteten Zustand als auch mit bereits eingebauten Lichtquellen.



Abb. 17 - Die Anbaukammer innerhalb des BIO-Reinraumes

Eine bewegliche Aluminium Konstruktion bietet gute Stabilität zum integrieren und befestigen von Lampen und anderem zusätzlichem Equipment. Es hat eine schwarze Außenhülle und eine weiße Innenseite, die der Reflektion des Lichtes dient. Zwei Fenster sind für Beobachtungen ohne Öffnen des Zelttes vorhanden. Über vier Reißverschlüsse lässt sich das Zelt öffnen und wieder verschließen. Zusätzlich gibt es eine Schutzwanne aus demselben Stoff wie die Seitenwände, um möglichen Überschwemmungen vorzubeugen. Vier Löcher sind darüber hinaus in der Zeltwand vorhanden. Einerseits dienen sie als Einlass für Stromkabel und Thermosensoren im Zelt. Andererseits sind zwei der Öffnungen über Rohre mit dem AMS verbunden. Eine Öffnung dient der Luftzufuhr und durch die Andere wird die Luft wieder abgesaugt.

Innerhalb des Zelttes befindet sich eine Konstruktion aus Aluminiumstahlprofilen von ITEM®. An dieser sind Stativklammern an Gewindestangen befestigt, mit denen die Bäume in die gewünschte Position gebracht werden können. Außerdem funktionieren sie als Stütze für die vier aeroponischen Boxen aus Polypropylen (PP) und als Befestigung für die Stromversorgung der Belichtung. Sie können zudem auch leicht mit anderen zusätzlich benötigten Geräten ausgestattet werden.

Unter das Aluminiumgerüst wurde ein Nährstofftank ebenfalls aus PP mit einem Fassungsvermögen von insgesamt 80 L geschoben, sowie die mobile Versorgungseinheit mit den erforderlichen Geräten für die Bewässerung installiert (siehe auch Abschnitt 4.2.4).

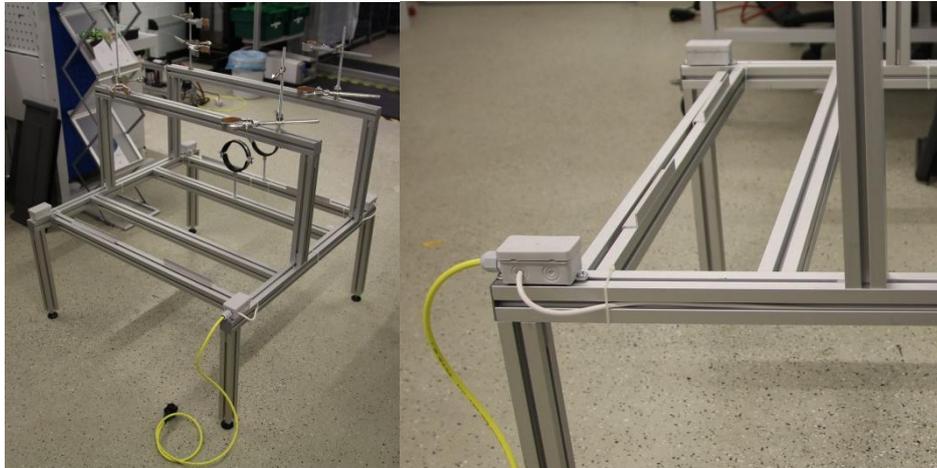


Abb. 18 - ITEM Grundgerüst

4.1.3 Künstliche Belichtung

Für die Beleuchtung im Zelt werden insgesamt fünf Leuchtmittel eingesetzt, die jeweils mit verschiedenen LED-Kombinationen versehen sind. Sie befinden sich sowohl direkt über den Pflanzen, als auch in den jeweiligen vier Ecken des Zeltes. Das LED Panel direkt über den Pflanzen ist das Modell BloomPower® Black 240. Laut Angaben des Herstellers sind in dem Panel 180 LEDs der 3W3-Klasse verbaut. Das heißt, es sind jeweils drei LEDs zu je 3 Watt vorhanden. Die Photonen-Flussdichte beträgt bei einem Abstand von 35 cm zu den Pflanzen laut Herstellerangaben $900 \mu\text{mol m}^{-2} \text{sek}^{-1}$. Dieser Wert bezieht sich auf eine Klimakammer mit einer Belichtungsfläche von 1m^2 . Außerdem eignet sie sich vor allem für die Blüte- und Fruchtphase [Eignung: ** (Vegetationsphase)***** (Blüte- und Fruchtphase)].

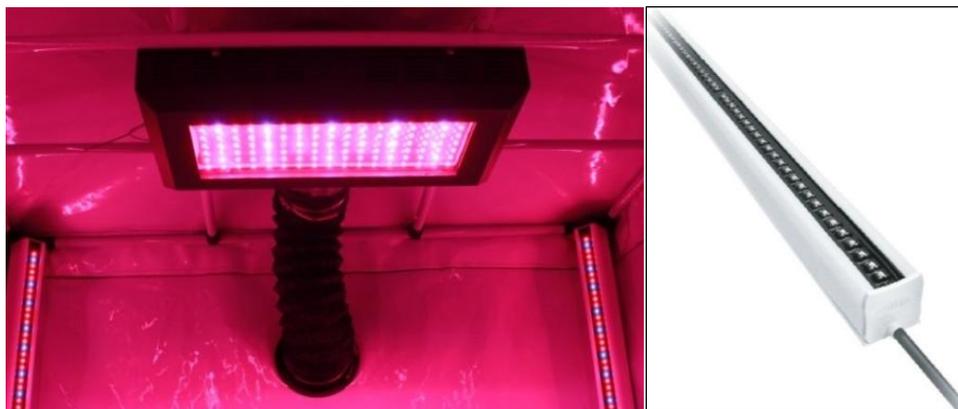


Abb. 19 - LED Panel (Bloom Power®);LED Leuchtmittel (Phillips - Green Production Module®) [17]

Die Belichtung von den vier Seiten innerhalb des Zeltes wird durch vier Philips Leuchtmittel mit der Bezeichnung ‚GreenPower LED production module dr/b 120‘ realisiert. Vor den Experimenten wurden mit zwei Geräten die Photonenflussdichte in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{sek}^{-1}$ gemessen.

Tab. 4 – PAR im EVA Modul gemessen in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{sek}^{-1}$

Messgröße und Messgerät	Abstand und Position des Messpunktes vom LED Panel					
	30cm		60cm		120cm	
PAR (Quantum Sensor)	1 - v.l.	126	1 - v.l.	106	1 - v.l.	82
	2 - h.l.	135	2 - h.l.	116	2 - h.l.	78
	3 - h.r.	141	3 - h.r.	123	3 - h.r.	74
	4 - v.r.	125	4 - v.r.	108	4 - v.r.	82
PAR (Spektrometer)	Mitte	119,7	Mitte	84,27	Mitte	73,15

Bei einem PAR - Wert im Mittel um die $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{sek}^{-1}$ entspricht das einem täglichem PPFD-Wert von $4,536 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$. Die Photoperiode für die Belichtung der Bäume wurde in den drei durchgeführten Experimenten jeweils geringfügig verändert. Oft geschah dies im Hinblick auf Möglichkeiten der Vermeidung von zu hohen Temperaturen oder niedriger Luftfeuchte. Im ersten Experiment wurde die Wachstumskammer zunächst für 10 Std belichtet und nach 11 Tagen auf 13 Std erhöht. Beim zweiten Experiment wurde von Anfang an 13 Std belichtet und beim dritten Experiment betrug die Belichtungsdauer 14 h.

4.1.4 Aeroponisches System

Wie bereits im Literaturkapitel erwähnt, werden für den Anbau von Nutzpflanzen in extraterrestrischen Habitaten erdelose Verfahren bevorzugt, da sie gegenüber der Bodenkultur wesentliche Vorteile aufweisen. Vor allem die Verfahren Hydro- und Aeroponik korrelieren dabei besonders mit den Ansprüchen an das Design eines Gewächshausmoduls. In den Experimenten wurde die Methodik der Aeroponik oder auch Wurzelsprühtechnik angewandt, wofür ein speziell angepasstes System aufgebaut wurde. Die Steuerung aller in diesem System verbauten Geräte in der Wachstumskammer wird über ein Versorgungssystem realisiert. Diese Versorgungseinheit verbindet die Nährstoff- und Wasserkreisläufe mit den aeroponischen Boxen. Innerhalb der vier Boxen sind Sprühsysteme mit je vier nichtrostenden Stahlnebeldüsen von AFT GmbH (DEU) verbaut. Die Bohrung der Düsen beträgt 0,5mm. Die Pumpleistung wird durch eine 10 bar Hochdruckpumpe aus der Flojet® Serie von XYLEM garantiert. Da die Nebeldüsen innerhalb der Box in zwei unterschiedlichen Höhen angebracht sind, können die freihängenden Wurzeln somit zielgenau mit Wasser und Nährstoffen versorgt werden. Die Nährlösung besteht dabei aus destilliertem Wasser, welches vor Benutzung in einer Osmose Anlage gefiltert wurde und beigemischten essentiellen Haupt- und Nebennährstoffen. Verschiedene Nährlösungsrezepte standen dafür zur Verfügung. Verwendet wurde die Empfehlung von Hoagland und Arnon, da sie bereits gute Erfolge in anderen Experimenten gebracht und mitunter die am meisten verwendete Nährlösung für wissenschaftliche Pflanzenexperimente ist (vgl. Jones, 1997; Trejo-Telléz und Gómez-Merino, 2012).

Tab. 5 – Nährlösungen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen der Hauptnährstoffe verschiedener Autoren

Nährstoff	Hoagland und Arnon (1938)	Hewitt (1966)	Cooper (1979)	Steiner (1984)
	Mg/L			
N	210	168	200-236	168
P	31	41	60	31
K	234	156	300	273
Ca	160	160	170-185	180
Mg	34	36	50	48
S	64	48	68	336
Fe	2,5	2,8	12	2-4
Cu	0,02	0,064	0,1	0,02
Zn	0,05	0,065	0,1	0,11
Mn	0,5	0,54	2	0,62
B	0,5	0,54	0,3	0,44
Mo	0,01	0,04	0,2	Nicht betrachtet

Quelle: Trejo-Telléz, 2012

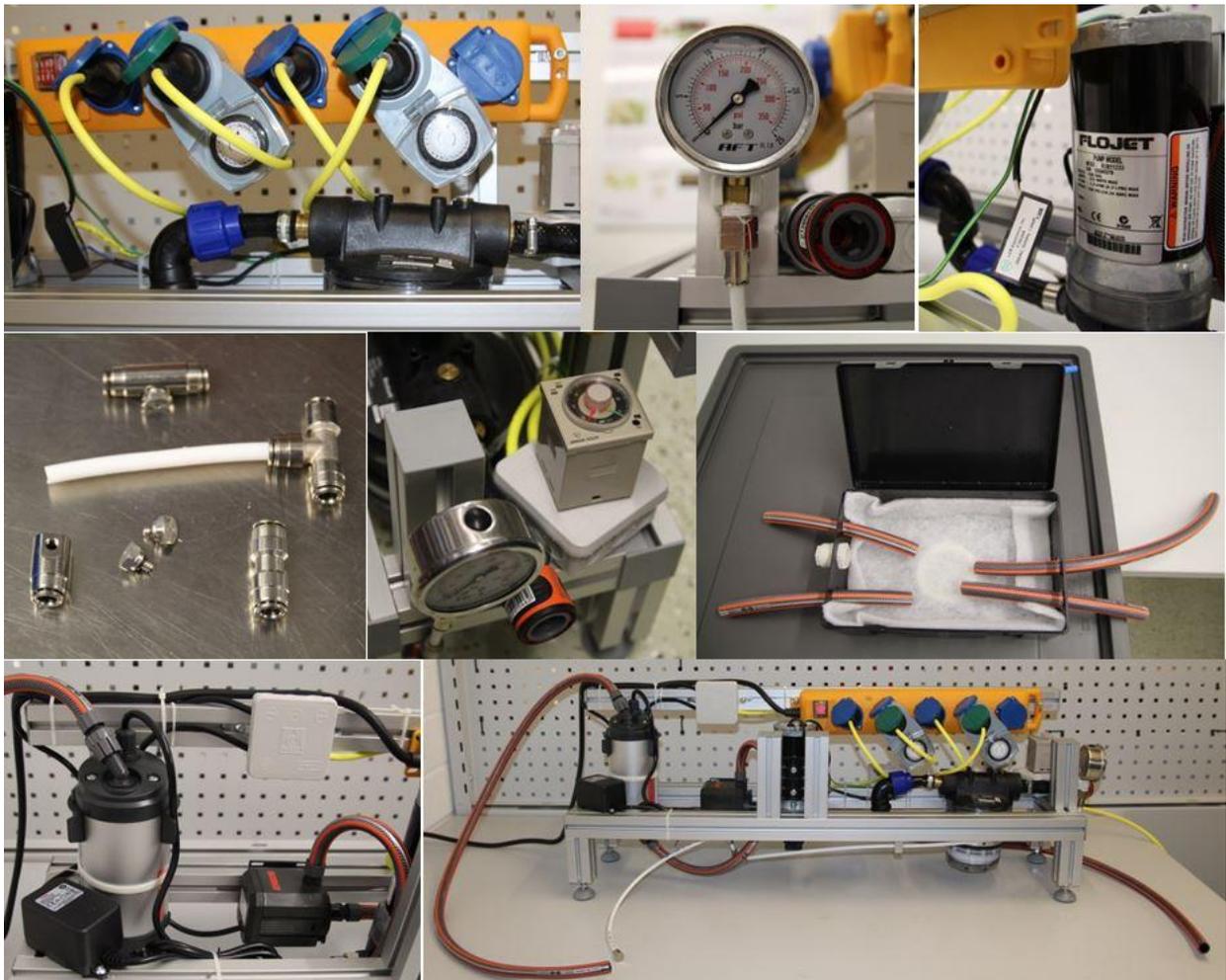


Abb. 20 – Versorgungssystem innerhalb der Anbaukammer

Für die Verbindung der Versorgungselemente wurden 3 verschiedene Schlauchtypen verwendet. Von der Pumpe ausgehend zu den Nebeldüsen handelt es sich dabei um einen High-Tech-LLDPE-Schlauch, der nach Standards für die Trinkwasserversorgung gefertigt ist. Er hat außen einen Durchmesser von 6,4 mm und innen von 4 mm. Im UV-Sterilisationskreislauf sind die Geräte mit einem 13 mm High Flex Schlauch von Gardena ® verbunden. Durch ein integriertes Spiralgewebe ist er flexibel, aber trotzdem stabil. Zwischen Nährstofftank und Hochdruckpumpe befinden sich schwarze Polyethylen Schlauchstücke mit einem Innendurchmesser von 14 mm und außen 20 mm.

Zur Unterstützung der Wurzeln wurde im Wurzelraum zusätzlich zum Sprühsystem ein Stabilitätsnetz aus grünlackiertem Wickeldraht gespannt, auch um eventuellen Überlagerungen der Wurzeln vorzubeugen. Die offenen Enden des Drahtes wurden mit Schrumpfschläuchen überzogen, um Wasserkontakt und in der Folge Rost zu vermeiden. Die Wurzeln wurden in einem vorher festgelegten Zeitintervall besprüht. Die Spannweite lag zwischen 20sek alle 3min und 30sek nach je 5min. Nach dem Besprühen blieb ein Teil der Flüssigkeit an den Wurzeln hängen (dies war in Form von Tröpfchen sichtbar). Der überschüssige Wasseranteil tropfte ab und wurde über ein Rückflusssystem nach voriger Reinigung dem Nährstoffreservoir wieder zugeführt. Diese Methode der Nährstoffversorgung bezeichnet man auch als geschlossenes System, da die aufgefangene Nährlösung wiederverwendet wird (vgl. Göhler und Molitor, 2002). In Abb. 21 sind die Boxen dargestellt, in der die Pflanzen hingen.



Abb. 21 - Anbauboxen mit aeroponischem Sprühsystem

Da es schnell zu Verunreinigungen im System kommen kann, sind insgesamt zwei vollständige Filterkreisläufe und zwei zwischengeschaltete Filter im System verbaut. In einem der Kreisläufe wird die Nährlösung zusätzlich noch mit einem UV Gerät (Eheim, DEU) sterilisiert. Die Hochdruckpumpe für die Bewässerung und die Belichtung durch das LED Panel bzw. der LED Leuchtmittel werden jeweils mit Zeitschaltuhren von Omron® geregelt.

4.1.5 Regelung der Atmosphäre

Die Regelung und Steuerung pflanzenrelevanter Umweltfaktoren erfolgt im EDEN Labor teilweise auf manuelle Art und Weise; andere Prozesse wiederum sind bereits automatisiert. Es gibt für die Regelung der Atmosphäre ein speziell angefertigtes AMS, mit welchem in Zukunft die Lufttemperatur, -feuchtigkeit und –zusammensetzung auch bezüglich Kohlendioxidgehalt und Reifegase sprich Ethylen geregelt werden können.



Abb. 22 – Luft-Management-System (AMS)

Die Steuerung erfolgt dabei über vorherige Messungen, die entweder analog und/ oder digital durchgeführt werden. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Messmethoden und Steuerungsprozesse.

Tab. 6 – Durchgeführte Messungen unterteilt nach Art der Steuerung und Aufzeichnung

	Art der Messung	Art der Steuerung	Art der Aufzeichnung
CO ₂	Digital/ CO ₂	Manuell durch Arbeiten im Raum	Digital/ LabVIEW
Lichtmenge	Manuell/ Quantumsensor	Fotoperiode und Abstand der LEDs	Digital/ schriftlich
Fotoperiode	Man. Festgelegtes Zeitintervall	Zeitschaltuhr (volle und halbe Std.)	Manuell/ schriftlich
pH - Wert	Manuell mit Kombometer	Säure: HNO ₃ - Base: KNO ₃	Manuell/ schriftlich
EC - Wert	Manuell mit Kombometer	+/- Hoagland Solution od. Wasser	Manuell/ schriftlich
Temperatur	Digital mit Thermoelementen	Klimaanlage und Abwärme der LEDs	Digital/ LabVIEW
Luftfeuchte	Digital mit Thermoelementen	Raumfeuchte + integr. Luftbefeuchter	Digital/ LabVIEW
Bewässerung	Man. festgelegtes Zeitintervall	aeroponisches Versorgungssystem; Zeitschaltuhr (Minuten und Sekunden)	Manuell/ schriftlich

Der Großteil der zu messenden Größen ist bislang noch manuell durchzuführen. In Zukunft sollen aber auch diese Prozesse zunehmend digitalisiert und vor allem automatisiert werden. Es steht bereits ein Nährstoffmixgerät bereit, welches die Einstellung der Nährlösung auf das gewünschte pH – und EC -Wertniveau gewährleisten soll, sowie Anschlussmöglichkeiten für zusätzliche technische CO_2 -Einspeisungen und Regelungen der Luftfeuchte.

4.1.6 Pflanzenmaterial

Es wurde im Voraus der Experimente nach geeignetem Pflanzenmaterial gesucht, welches die Anforderungen durch die Limitierungen im Anbauraum erfüllt. Die folgende Aufzählung zeigt wichtige Aspekte, die die Auswahl beeinflussen:

- **Wuchsform, die in die gegebenen Abmaße (1m x 1m x 2m) der Wachstumszelle passt**
- **Langsam wachsende Apfelbäume mit Säulenform**
- **Zwei Jahre altes Pflanzenmaterial für potentielle Blüte im selben Jahr**
- **Aktuelle Pflanzenhöhe zum Zeitpunkt der Überführung von 1 – 1,50 m**

Verschiedene Anbieter von Zwergapfelbäumen ließen sich auffinden, doch schließlich überzeugte das Angebot der Baumschule Lubera in Bad Zwischenahn (DEU). Es handelte sich bei den Exemplaren um Bäume mit den Bezeichnungen Lubera® Apfel Malini mit den Sorten Dulcessa®, Subito®, Fresco®, Equilibrio® und Pronto®.



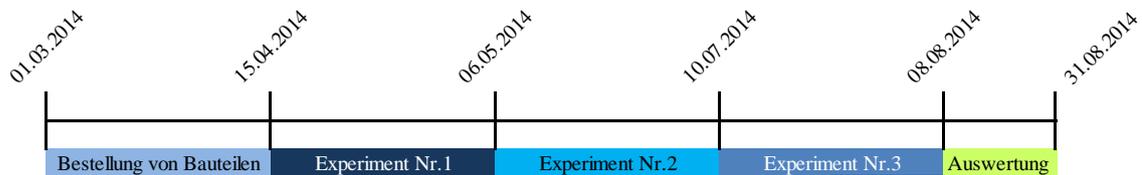
Abb. 23 - Säulenapfelbäume vor der Überführung in das aeroponische System

In der Produktbeschreibung sind die Bäume mit den Abmaßen von einer Höhe von zwei bis drei Metern und im Durchmesser zwischen 0,5 bis 0,8 m angegeben. Weiterhin zeichnen sie sich durch einen Säulenwuchs aus, sind sehr kompakt sowie schorf- und mehlttauresistent. Der Erntetermin wird um die Mitte des Monats September angesetzt. Laut Aussage des Produktionsleiters von Lubera sind die Sorten auf schwachwüchsigen M9 Unterlagen angezogen. Nicht zuletzt wurden sie gewählt, da sie bereits zweijährig waren und in der Folge mit einem Ertrag zu rechnen war. Entscheidend war auch, dass die Bäume direkt ohne Verzögerung von der Baumschule abgeholt werden konnten.

4.2 Methoden

Insgesamt wurde in drei Durchgängen die zuvor aufgebaute Anbauvorrichtung getestet. Im Folgenden sind diese Experimente mit Kampagnen eins, zwei und drei bezeichnet. Daran anschließend werden durchgeführte Maßnahmen beschrieben, die während der Kultivierung der Bäume durchgeführt wurden.

4.2.1 Kurzbeschreibung der Experimente



Die EVA - Experimente begannen in der Mitte vom April und teilen sich in drei aufeinander folgende Experimentierphasen auf. Zur Vorbereitung wurden zunächst Skizzen zum Aufbau der Wuchskammer angefertigt, sowie Vorüberlegungen angestellt zur benötigten Ausstattung. Zur Verfügung stand dafür die im Materialteil beschriebene Wachstumskammer, die mit dem EDEN AMS verbunden ist. Innerhalb dieser Kammer als Grundgerüst, mussten verschiedene Elemente untergebracht werden. Des Weiteren stand das gesamte Lager innerhalb des EDEN Labors zur Verfügung – unter anderem Aluminium – Profile von ITEM®, diversen Boxen, Lampen, Pumpen und Schläuche. Fehlende Gerätschaften wurden selbstständig bestellt und in das System integriert. Die Hauptaufgabe während dieser ersten Phase bestand in der eigenhändigen Entwicklung folgender Systeme:

- **Aeroponisches Anbausystem in vordefinierter Wachstumskammer**
- **Entwicklung eines Belichtungskonzeptes mit LEDs**
- **Stabilitäts- und Halterungssystem für die Säulenapfelbäume**
- **Nährstoffversorgungssystem und Reinigung der Nährlösung**

Nachdem die zuvor beschriebenen Systeme aufgebaut waren, konnten erste Performancetests durchgeführt und schließlich in die Wachstumskammer 5 (GC 5) innerhalb des Bio-Reinraumes integriert werden.

In der Folge fanden drei Wuchsexperimente statt. Die Einstellungen wurden dabei je Experiment verändert, so wie auch der Versuchsaufbau jeweils um Elemente erweitert oder reduziert wurde.

In den nächsten Kapiteln wird zunächst das verwendete Pflanzenmaterial beschrieben, gefolgt von der Beschreibung des Versuchsaufbaues und der verwendeten Elemente. Anschließend folgt die Durchführung und Dokumentation der Überführung der erdgewachsenen Apfelbäume in das erdelose aeroponische System und schließlich die Ergebnisse sowie die Auswertung.

4.2.2 Versuchsaufbau

In der folgenden Abbildung sind schematisch die verwendeten Elemente innerhalb des Wachstumszeltens dargestellt. Außerdem werden die Kreisläufe verdeutlicht, in denen die Geräte miteinander verbunden sind.

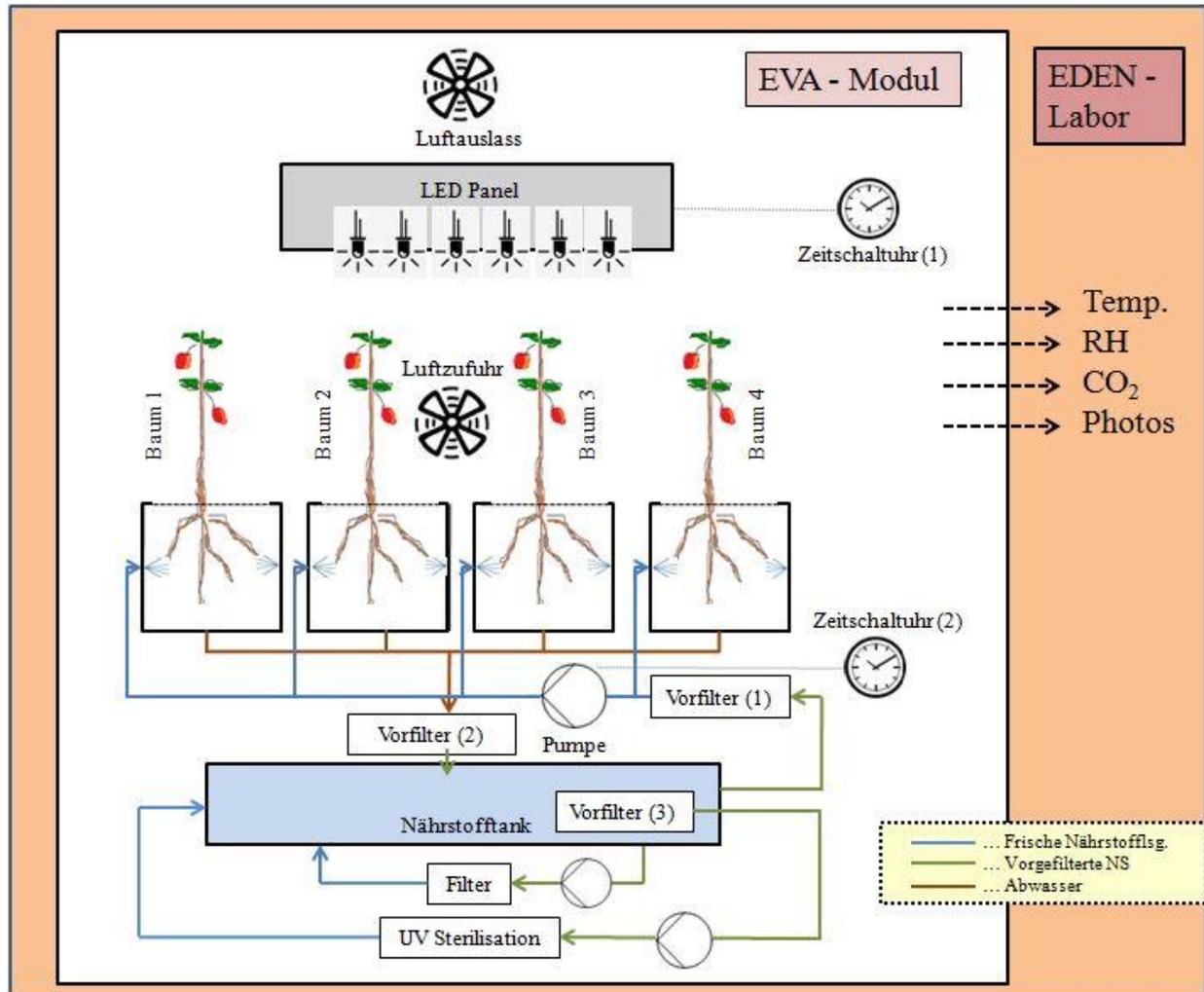


Abb. 24 - Schematischer Aufbau der EVA Unit mit Aeroponik und Beleuchtung

Innerhalb des EDEN Labors gibt es, wie schon in Kapitel 3.2.1 erwähnt, unterschiedliche Wachstumskammern. Das EVA Modul befindet sich am Eingang des Labors und hat die Bezeichnung Grow Chamber 5 (GC5). Über Sensoren und Thermoelemente werden Änderungen in der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, Kohlendioxidgehalt der Luft an den sich im Arbeitsbereich befindlichen Steuerungscomputer weitergeleitet und in Form von Klimadiagrammen sichtbar gemacht. Mit Webkameras lässt sich in Zukunft der Bestand ohne Öffnung der Zelte beobachten. Innerhalb des Zeltens gibt es im Bewässerungskreislauf verschiedene Filterstationen und eine UV-Sterilisation. Zusätzlich regeln zwei Zeitschaltuhren die Nährstoffsprühintervalle sowie die Belichtungsdauer. Für Luftbewegung sorgt das AMS, welches der Kammer Frischluft zuführt und anschließend verbrauchte Luft durch den Luftauslass wieder abzieht.

4.2.3 Kampagne Nr. 1

A. Vorbereitungsschritte

1.) Nach der Bestellung und dem Aufbau des Versuchsapparates wurden zunächst Funktionstests außerhalb des BIO-Reinraumes abgehalten. Es mussten Schlauchverbindungen überprüft und mögliche Lecks lokalisiert werden. Nach Beseitigung dieser Problemfelder erfolgte die Integration des Aluminiumgestells aus ITEM® Profilen, des Versorgungssystems mit dem Nährstofftank, der Reinigungseinheit für die Nährlösung und der Leuchtmittel. Im selben Zuge wurde die Rohrbelüftung des AMS Systems an das Zelt angeschlossen. Als letzter Vorbereitungsschritt wurde der Zeltinnenraum mit dem alkoholischen Desinfektionsmittel Mikrocid® AF (Schülke, DEU) gereinigt.

2.) Im Anschluss an den Aufbau wurden die zuvor besorgten Säulenäpfel mit folgender Methode für die aeroponischen Boxen vorbereitet:

- **Vorsorgliche Behandlung der oberirdischen Pflanzenteile mit dem Pflanzenschutzmittel Spruzit (1%ig) und anschließende halbstündige Wartezeit**
- **Bereitstellen der benötigten Materialien für die Auswaschung des Wurzelwerkes**
- **Manuelle Lockerung der Oberflächenerde im Topf und anschließende Entfernung**
- **Weitere Lockerung der wurzelumgebenden Erde durch intensiveres Eindringen mit den Händen**
- **Absprühen der übriggebliebenen Erdreste mit einer Sprühbrause und einem Druckwasserstrahl**
- **Eintauchen und Bewegen des Wurzelwerkes in einem mit Wasser gefüllten Bottich bis das Wasser sich verfärbt**
- **Ausschütten des mit Erde gesättigten Wassers und 6-malige Wiederholung des Vorganges bis Wurzelwerk frei von Erde war**
- **Entfernen letzter Erdreste im Analyserraum mit einer Pinzette**
- **Eintauchen der Wurzeln für 12h in Wasserlösung mit Wurzelhormon Rhizopon AA ®**
- **Einhängen und Befestigung der Bäume im Anbauzelt**

B.) Einstellung der Kammer

1.) Im ersten Experiment wurde die Nährlösung nach dem Rezept von Hoagland in halber Stärke angesetzt. Der EC-Wert lag zu Beginn bei EC=1.3 und der pH - Wert wurde auf ein Niveau von 6,0 mit Salpetersäure (HNO₃) eingestellt. Im Laufe des Experimentes wurde die Nährlösung zunächst mit zwei Filtern- und einem Desinfektionskreislauf gereinigt. Die zu filternde Nährstoffmenge lag bei 80l. Desinfiziert wurde mit einem UV-Sterilisator der Firma EHEIM. Die relative Luftfeuchte war mit Sollwerten von 80% bei Licht und 60% in der Dunkelphase angedacht. Die Temperatur war mit 20°C in der Lichtphase und mit 18°C in der Dunkelphase veranschlagt.

Das Sprühintervall für die Bewässerung wurde zunächst auf 20sek Bewässerung alle 2min eingestellt, wurde allerdings während der Kulturphase mehrmals verändert (30sek/2min; 30sek/3min; 30sek/4min). Die Lichtphasen wurden ebenfalls mehrmals verändert, aufgrund der Interaktion mit den benachbarten Zelten und der damit einhergehenden Wärmeentwicklung und -verteilung (10h Licht kontinuierlich; 11,5h; 13h im Intervall – alle 3Std. eine halbe Std. Dunkelheit). Die Temperatur der Nährlösung lag zwischen 19 und 20°C.

C.) Beobachtungen

- pH/ EC: Während des Experimentierzeitraumes kam es zu starken Schwankungen des pH - Wertes, was mitunter eine tägliche manuelle Einstellung des Wertes auf das gewünschte Niveau notwendig machte. Eine grafische Darstellung der gemessenen pH und EC Werte befindet sich im Abschnitt 4.3.
- Temperatur/ relative Luftfeuchte: Die Werte für beide Messgrößen wurden an je drei Messpunkten entnommen (über den aeroponischen Boxen in 70cm Höhe; in der Mitte der Bäume in 1,30m und direkt unter der Lampe in einer Höhe von 1,90m). Die Temperatur lag in der Lichtphase zwischen 23,1°C und 24,9°C und in der Dunkelphase zwischen 17,9°C und 20,4°C. Die Luftfeuchte schwankte im Bereich von 52% bis 65% in der Lichtphase und zwischen 71% und 89% in der Dunkelphase.
- es konnten Wurzelbildungen festgestellt werden, jedoch umgeben von stark infizierten alten Wurzeln

D.) Gründe für den Abbruch des Experimentes

- Überzug der Wurzeln mit schleimigem Sekret; pilzliche Fruchtkörper sichtbar durch Infektion der Wurzeln; chlorotische und nekrotische Verfärbung der Blätter; starke Blüte mit anschließendem Blattabwurf; nussiger Geruch innerhalb der Boxen, Verfärbung der Nährlösung von durchsichtig hellgelb zu dunkelbraun mit Schwebeteilchen; starke Schwankungen des Klimas und des pH - Wertes der Nährlösung; um Verunreinigung des Labors zu vermeiden – Abbruch von Experiment Nr. 1 nach 13 Tagen

E.) Fotodokumentation der Kampagne Nr. 1



Abb. 25 – Bilderserie zum Versuchsaufbau des Experiment Nr. 1

4.2.4 Kampagne Nr. 2

A. Vorbereitungsschritte

1) Der Aufbau aus dem ersten Experiment wurde im Grundsatz übernommen. Die Schlauchsysteme und auch der Nährstofftank sowie das Zeltinnere mussten jedoch gründlich desinfiziert werden. Die Schläuche wurden dafür mit Bleichmittel durchgespült und die aeroponischen Boxen und der Tank mit Mikrocid® AF ausgewischt. Anschließend wurden alle Teile wieder zurück in das Zeltinnere integriert.

2) Die Säulenapfelbäume wurden für das zweite Experiment wie folgt vorbereitet:

- **Analog zum Experiment Nr. 1 erfolgte die Behandlung der oberirdischen Pflanzenteile mit Spruzit mit 1%iger Lösung.**
- **Anschließend wurden diesmal die Wurzeln direkt über der Erdoberfläche abgesägt.**
- **Der übriggebliebene Teil der Bäume wurde in Wasserstoffperoxid Lösung 3%ig getaucht und fünf Minuten stehen gelassen.**
- **Danach wurden die Bäume in eine Röhre mit einem Fassungsvermögen von 0,75 l gehängt.**
- **Je eine Tablette Rhizopon® wurde zugegeben.**
- **Installation von zwei Durchlüfterpumpen für je 2 Röhren für die Sauerstoffanreicherung der Nährlösung**

B. Einstellung der Kammer

Die Nährlösung wurde wie in Experiment Nr. 1 nach dem Rezept von Hoagland in halber Stärke angesetzt. Der EC-Wert lag zu Beginn bei EC=1.2 bis EC=1.3 und der pH - Wert wurde auf ein Niveau von 6,3 mit Salpetersäure (HNO₃) eingestellt. Die Reinigung der Nährlösung erfolgte durch Auswechseln der Nährlösung (je 0,75l je Röhre) nach 12 – 13 Tagen. Zusätzlich wurden die Röhren mit Mikrocid® AF desinfiziert. Die Sollwerte für die relative Luftfeuchte und Temperatur blieben unverändert mit 80% und 20°C bei Licht und 60% und 18°C in der Dunkelphase. Um die Luftfeuchte jedoch konstant hochzuhalten, wurde zusätzlich ein Luftbefeuchter im Zelt verbaut. Die Lichtphasen wurden zunächst auf kontinuierlich 13 Stunden eingestellt und nach 29 Tagen auf 12 Stunden eingestellt. Die Temperatur der Nährlösung lag zwischen 17 und 19°C.

C. Beobachtungen

- pH/EC: Die Messung des pH- und EC-Wertes konnte im Exp. 2 aus Zeitgründen nur sporadisch durchgeführt. Es wurden dabei aber im Vergleich zu Exp. 1 nicht so große Schwankungen festgestellt. Die pH - Werte schwankten um Werte von 5.8 (durch Zugabe von HNO₃) und 6.5. Der EC-Wert war erneut überwiegend stabil bei 1.2 bis 1.3

- Temperatur/ relative Luftfeuchte: Die Aufzeichnung der Werte erfolgte nun bereits über das Programm LabView®. Es gab jedoch noch keine Möglichkeit der Speicherung der Messgrößen über einen Zeitraum länger als 24 Stunden. Die Temperatur schwankte zwischen 19°C in Dunkelheit und

26°C in der Lichtphase. Für die Luftfeuchte wurden starke Schwankungen festgestellt, vor allem in der Lichtphase, 60 bis <99% und ca. 80 % in der Dunkelphase.

- erneut kam es zu starken Infektionen der Unterlagen trotz Sauerstoffzufuhr mit Durchlüfterpumpe; minimale Wurzelentwicklung; keine Verbesserung durch Abtrennen der übriggebliebenen Unterlagen von den Stämmchen

D. Abbruch

Erneut starker Infektionsdruck erforderte permanente Desinfektion und Behandlung der Schnittstellen der Bäumchen. Wiederholte Öffnungen des Anbauzeltes in diesem Zuge hatten einen großen Einfluss auf das umgebende Klima. Um weitere Übertragung in den Bio Reinraum zu vermeiden, wurde das Experiment nach 66 Tagen abgebrochen.

E) Fotodokumentation der Kampagne Nr. 2



Abb. 26 – Bilderserie zum Versuchsaufbau des Experiments Nr. 2

4.2.5 Kampagne Nr. 3

A. Vorbereitende Schritte

Für das dritte Experiment wurden drei Bäume verwendet, ebenfalls aus derselben Baumschule (Lubera). Der Nährstofftank, Schlauchverbindungen, Anbauboxen und das Zeltinnere mussten erneut gründlich mit Mikrocid® AF gereinigt werden. Die Versorgungseinheit, die in Kampagne Nr. 2 nicht verwendet wurde, musste mit Bleichmittel durchspült werden. Zusätzlich zum bereits vorhandenen Versuchsaufbau wurde ein weiterer Filterkreislauf installiert, der zusätzlich Schwebstoffe aus dem Nährstofftank herausfiltern sollte. Die Gesamtzahl an Nährlösungsfiltern betrug somit vier. Im Anschluss an den Aufbau wurden die zuvor besorgten Säulenäpfel mit folgenden zwei Methoden für die aeroponischen Boxen vorbereitet:

- **Methode 1: siehe Kampagne Nr. 1; die Wurzeln wurden jedoch im Unterschied zum Exp. 1 sehr stark ausgedünnt; um jegliche Überlagerung zu vermeiden; die Reinigung wurde schonender durchgeführt, um Verletzungen vorzubeugen (insg. nur 3 Waschgänge) Desinfektion der Wurzeln mit Wasserstoffperoxid; 10 minütige Einwirkzeit**
- **Methode 2: Entfernen der Wurzeln über der Erdoberfläche analog zu Exp. Nr. 2 Reinigung mit Wasserstoffperoxid; Rinden Ritzungen 2mm tief und 1,5 cm lang; eintauchen in Wurzelhormon Clonex®; anschließend umwickeln mit steriler Mullbinde**
- **Allen Bäumen wurden jeweils mit einem Plastiksack überzogen, um eine gleichmäßig hohe Luftfeuchte zu etablieren**

B. Einstellung der Kammer

Die Nährlösung wurde nach dem Rezept von Hoagland für 80L angesetzt. Der EC-Wert wurde allerdings auf ein Niveau von 2.1 bis 2.3 angehoben und der pH - Wert mit 5,8 mit HNO₃ eingestellt. Die Aufzeichnung der Temperatur- und Luftfeuchtwerte erfolgte über drei Temperatur- und einen Luftfeuchtesensor. Diese Sensoren lieferten elektrische Werte, die im Programm LabVIEW® in Messgrößen umgewandelt wurden. Die Aufzeichnung konnte wie im Exp. Nr. 2 nur für maximal 24 Stunden durchgeführt werden. Die Sollwerte für die relative Luftfeuchte und Temperatur wurden stark angehoben auf 90% und 25°C bei Licht und 80% und 20°C bei Dunkelheit. Der zuvor installierte Luftbefeuchter wurde als Unterstützung für die Luftfeuchteregeung erneut eingesetzt. Die Lichtphase wurde konstant auf 14 Stunden eingestellt und während des Versuchszeitraumes nicht verändert. Die Temperatur der Nährlösung lag zwischen 19 und 21°C.

C. Beobachtungen

- pH/EC: Die Messung des pH- und EC-Wertes wurde im Exp. 3 wieder vermehrt durchgeführt. Nach 16 Tagen erfolgte dabei die erste Justierung. Es konnte ein stetiger Anstieg festgestellt werden. Die pH Werte schwankten um Werte von 5.8 (durch Zugabe von HNO₃) und 7.4. Der EC-Wert verhielt sich überwiegend stabil mit 2.1 bis 2.3.

- Temperatur/ relative Luftfeuchte: Die Aufzeichnung der Werte erfolgte ebenfalls über das Programm LabVIEW®, wie in Exp. 2 bereits beschrieben. Die Temperaturen schwankten zwischen 20°C in Dunkelheit und 27°C in der Lichtphase. Die Luftfeuchterege lung wurde mit einem zusätzlich installierten Luftbefeuchter unterstützt. Bei uneingeschränktem Betrieb konnten so Werte von ca. 80 % in der Lichtphase und 85 % in der Dunkelphase realisiert werden. Oft kam es jedoch auch zu Schwankungen durch den Wärmeeinfluss benachbarter Zelte, was zu Werten zwischen 65 und 92% in Lichtphasen und Werten zwischen 72 und 90 % in Dunkelphasen führte. Ein weiterer negativer Effekt entstand, wenn das im Luftbefeuchter integrierte Tankvolumen nach Wochenenden erschöpft war. Die Luftfeuchte fiel dann auf einen konstanten Wert von 60 % im Licht und 73 % in Dunkelheit.

- ebenfalls kam es erneut zu starken Infektionen der Wurzeln bei den zwei „Kandidaten“, die direkt den Sprühsystemen ausgesetzt waren. Bei der dritten Variante mit der Mullbinde war die Infektion weniger stark und es zeichnete sich nach 25 Tagen eine erste Wurzelentwicklung ab. Die Infektion wurde begleitet von Blattvergilbungen und schließlich Blattfall. Die Nährlösung blieb über den Versuchszeitraum gleichmäßig in der Farbe und auch der Geruch war uneingeschränkt neutral.

D) Abbruch

Starker Infektionsdruck erforderte wie in den zuvor durchgeführten Experimenten Desinfektion und Behandlung der Wurzeln. Der Aufwand zur Reinigung der Nährlösung war vergleichsweise geringer. Die Schwierigkeit der gleichmäßigen Regelung der Atmosphäre im Inneren des Zelt es machte jedoch schließlich eine grundlegende Erneuerung der Klimaregelungsarchitektur notwendig. Zusätzlich aus Gründen des Zeitmangels wurde das Experiment nach 29 Tagen beendet.

E.) Fotodokumentation der Kampagne Nr. 3



Durchführung der Methode 1 analog zu Kampagne 1, jedoch mit intensiverer Wurzelauddünnung



Durchführung der Methode 2 analog zu Kampagne Nr. 2; Entfernen der Wurzel und Behandlung mit Clonex



Nach der Integration der Bäume in den Wachstumsschrank (link);
Hinzufügen von Transpirationsschutz mithilfe von Plastiksäcken (rechts)



Abb. 27 – Bilderserie zum Versuchsaufbau des Experiments Nr. 3

4.2.6 Maßnahmen während der Versuche

Um die benötigten Einstellungen bezüglich des Klimas und der Kulturführung aufrecht zu erhalten, mussten während der Experimente unterschiedliche Schritte unternommen werden. Eine der Hauptmaßnahmen war die Justierung der Nährlösung. Nach der Empfehlung für die Zusammensetzung der Nährlösung von Hoagland und Arnon (1950) wurden zunächst vor jedem Experiment Nährstofflösungen für einen Tank mit einer Füllmenge von 80L gemischt. Zuvor wurden sechs Stammlösungen zu je einem Liter hergestellt, die je ein Mol eines Nährstoffes enthielten. Folgende Frischgewichte der Nährsalze wurden dafür in 1 Liter Gefäße gegeben:

Tab. 7 – Stammlösungen zur Anmischung der Nährlösung

Dünger	Formel	Formelgewicht (in g)
1. Kalium Nitrat	KNO_3	101,102
2. Ammonium dihydrogenphosphat	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	115,0244
3. Magnesium sulfat heptahydrat	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	246,4706
4. Kalzium Nitrat	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	236,1452
5. Eisen Chelat	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{FeN}_2\text{NaO}_8$	16,435

Die sechste Lösung der Mikronährstoffe ist eine Kombination aus mehreren Lösungen. Die Bestandteile sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tab. 8 – Sechste Stammlösung mit Mikronährstoffen

Formel	Menge	Einheit
H_3BO_3	1,43	g
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0,905	g
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,11	g
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,04	g
H_2MoO_4	0,01	g

Anschließend wurden folgende Konzentrationen aus diesen Stammlösungen für die Herstellung der finalen Nährlösung verwendet:

Tab. 9 – Zusammensetzung der Nährlösung für 80 L Reservoir

Stock Solution	Volume to Add to Bulk
KNO_3	240 mL
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	40 mL
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	80 mL
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	160 mL
Mikronährstoffe	80 mL
Eisen-Chelat	80 mL

Der Ziel pH - Wert wurde zunächst standardmäßig mit 5,8 angesetzt. Aufgrund von zum Teil starken Schwankungen des Wertes musste der pH - Wert vor allem im ersten Experiment täglich überprüft und justiert werden. Zusätzlich zum pH - Wert wurde der EC Wert beobachtet. Die Schwankungen waren jedoch nicht sehr stark, so dass eine Überprüfung im 5-Tagesintervall als ausreichend empfunden wurde. Alles in Allem war das Einstellen der Nährstoffkonzentration mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden, da nach der umfangreichen Desinfektion des Nährstofftanks jeweils eine neue Nährlösung zusammengemischt werden musste.

Für die Desinfektion der Wurzeln mussten zunächst stark infizierte Bereiche entfernt werden. Die übrigen Wurzeln wurden mit Papiertüchern trockengewischt. Im weiteren Schritt wurde der Ballen in die zuvor schon erwähnte Wasserstoffperoxid-Lösung (3%ig) getunkt und für 1 min einwirken gelassen. Es erfolgte anschließend eine Reinigung mit Leitungswasser und schließlich das Zurückhängen der Bäume in die Boxen.

4.3 Zusammenfassung

Die folgende Tabelle zeigt zusammenfassend die drei durchgeführten Experimente, hier Kampagnen benannt, mit den Einstellungen in Kurzform.

	Kampagne Nr. 1	Kampagne Nr. 2	Kampagne Nr. 3
Versuchszeitraum	17.04.2014 - 30.04.2014 [13 Tage]	06.05.2014 - 26.06.2014 [51 Tage]	10.07.2014 - 08.08.2014 [29 Tage]
Versuchsmethode	- insgesamt 4 Bäume - Abwaschen der Erde von den Wurzeln - Überführung in aeroponische Boxen inklusive Wurzeln	- insgesamt 4 Bäume - hydroponischer Bewurzelungsversuch - Entfernen des gesamten Wurzelwerkes	- insgesamt 3 Bäume - 1) 2 Bäume wie Kamp. Nr. 1 + stärkere Wurzeladnung - 2) 1 Baum wie Kamp. Nr. 2 mit ClonexGel und Mullbinde
Grundaufbau und verwendete Materialien	4 PE Boxen 1 LED Panel (Black Bloom Power Black) 4 LED Production Modules von Phillips 1 Filter Kreislauf mit UV-Sterilisation High Pressure Pump 4 Sprühdüsen pro Box mit 500 nm Bohrung	4 PE Rohre mit 0,75 L Volumen 1 LED Panel (Black Bloom Power Black) 4 LED Production Modules von Phillips Zusätzlicher Humidifier als Backup zum Haupt Luft Management System Belüftungspumpe für zusätzliche Sauerstoffversorgung der Röhren	Aufbau wie in Kampagne Nr. 1 1 LED Panel (Black Bloom Power Black) 4 LED Production Modules von Phillips Zusätzlich: Luftbefeuchter; zusätzlicher Filterkreislauf für Entfernung von Schwebeteilchen
Einstellung der Kammer [Sollwerte]	1/2 Hoagland Solution EC = 1,3 pH = 6,0 rHumidity = 80% (Licht)/ 60% (Dunkelheit) Temperatur = 20° C (Licht) / 18° C (Dunkelheit) Sprühintervall = 30sec alle 2 - 4 min Belichtung = 10h konstant bzw. 13h Intervall alle 3 Std=0,5 h dunkel= 11,5 h Nährstofflg. Temp. = 19 - 20°C	1/2 Hoagland Solution EC = 1,2 pH = 6,3 rHumidity = 80% (Licht)/ 60% (Dunkelheit) Temperatur = 20° C (Licht) / 18° C (Dunkelheit) Sprühintervall = - Belichtung = 13h konstant Nährstofflg. Temp. = 19 - 20°C	1/2 Hoagland Solution EC = 2,1 pH = 5,8 - 6,0 rHumidity = 90% (Licht)/ 80% (Dunkelheit) Temperatur = 25° C (Licht) / 20° C (Dunkelheit) Sprühintervall = Beginn 30sec/ 5 min; 20sec/ 3min Belichtung = 14h konstant Nährstofflg. Temp. = 19 - 21°C

Tab. 10 – Zusammenfassung aller drei Experimente bzw. Kampagnen

5 Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich vor allem auf die gewonnenen Daten des Klimasteuerungsprogrammes LabView. Dazu gehören Luftfeuchte-, Temperatur- und CO₂-Messungen. Aufgrund der zu dieser Zeit noch nicht vorhandenen Möglichkeit zur Speicherung von Daten über einen Zeitraum von mehr als 24 Stunden sind die Graphen entweder für 12 oder 24 Stunden dargestellt.

Es schließen sich danach pH und EC-Wert Messungen an, die sowohl in der ersten als auch in der dritten Kampagne durchgeführt wurden. Aufnahmen aus dem Wurzelwerk und der Blattmasse verdeutlichen die Entwicklung der Bäume.

5.1 Luftfeuchtemessungen

Zur Überwachung der klimarelevanten Faktoren wurde die Software LabVIEW® in Kombination mit dem Data Acquisition System (DAQ) von National Systems verwendet. Messungen der Werte wurden dafür sowohl im Bio-Reinraum als auch im Zelt an verschiedenen Stellen durchgeführt. Zu den gemessenen Faktoren zählen die Temperatur, die Luftfeuchte, die Konzentration an Kohlenstoffdioxid und die Photonendichte. In den folgenden Abbildungen sind zu erstgenannten Klimafaktoren insgesamt acht Graphen dargestellt.

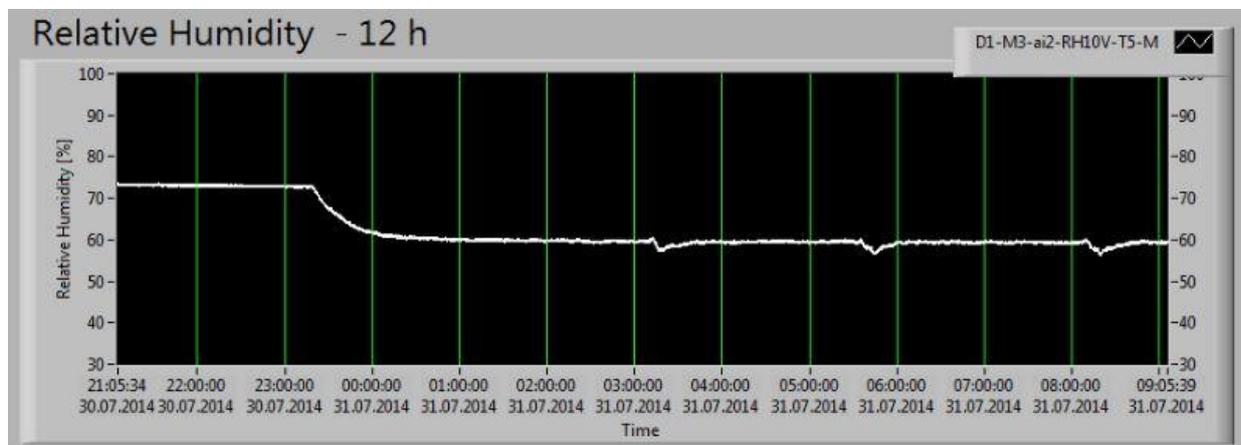


Abb. 28 - 12 Stunden Chart der Relativen Luftfeuchte mit geradem Verlauf

Der erste Graph der Luftfeuchte zeigt den Verlauf über 12 h am 30.07.2014. Der Wert beträgt im Abschnitt von 21 Uhr bis 23:30 Uhr ca. 73% und senkt sich in Folge des Einschaltens des Lichtes und aufgrund von Wärmeentwicklung auf einen Wert um 60%. Der niedrige Wert für die Luftfeuchte ist auf das Fehlen der zusätzlichen Befeuchtung durch die integrierte Luftbefeuchtung zurückzuführen, dessen Reservoir erst anschließend wieder gefüllt wurde.

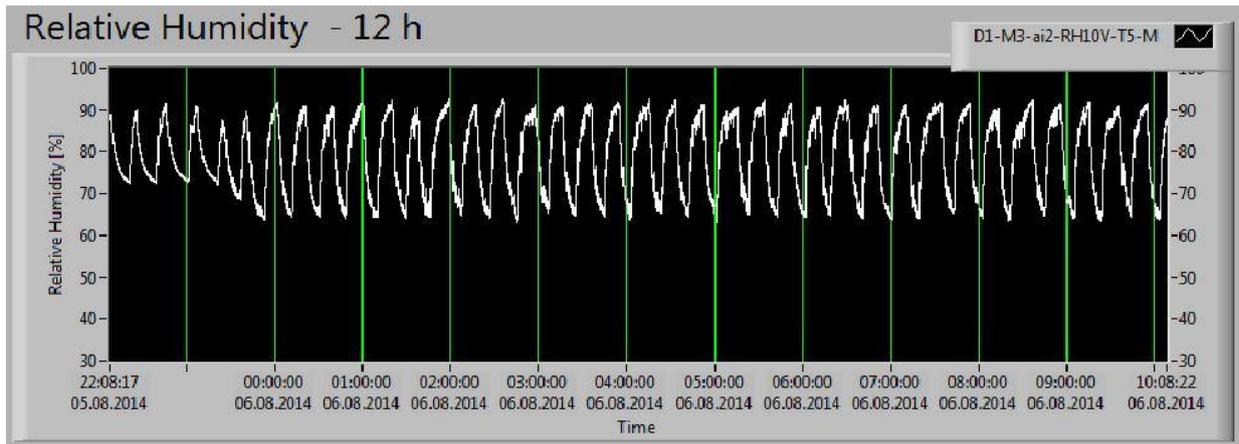


Abb. 29 - 12 Stunden Chart der Relativen Luftfeuchte mit stark welligem Verlauf

Der zweite Graph (Abb. 29) zeigt den Luftfeuchteverlauf am 06.08.2014. Die Schwankungen sind hier im Vergleich zum ersten Chart mit 63 % bis 90% wesentlich stärker. Ein im Zelt integrierter Feuchtigkeitssensor schaltete den Luftbefeuchter bei einer relativen Feuchte von ca. 63% an und befeuchtete das Zeltinnere auf bis zu 90 %.

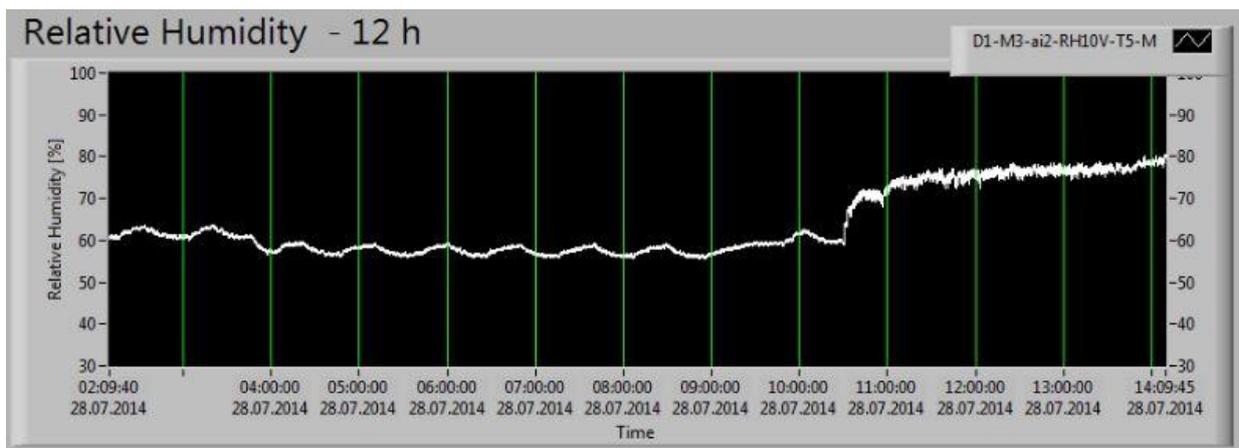


Abb. 30 - 12 Stunden Chart der Luftfeuchte mit Verlaufsänderung durch Luftbefeuchter

Der dritte Chart (Abb. 30) verdeutlicht die Auswirkung des zusätzlich integrierten Luftbefeuchters um 10:30 Uhr, nachdem dessen Reservoir sich in der vorausgegangenen Nacht erschöpft hat. Diese Situationen, vor allem mit einem einhergehenden niedrigen Luftfeuchteniveau, waren oft nach einem Wochenende präsent.

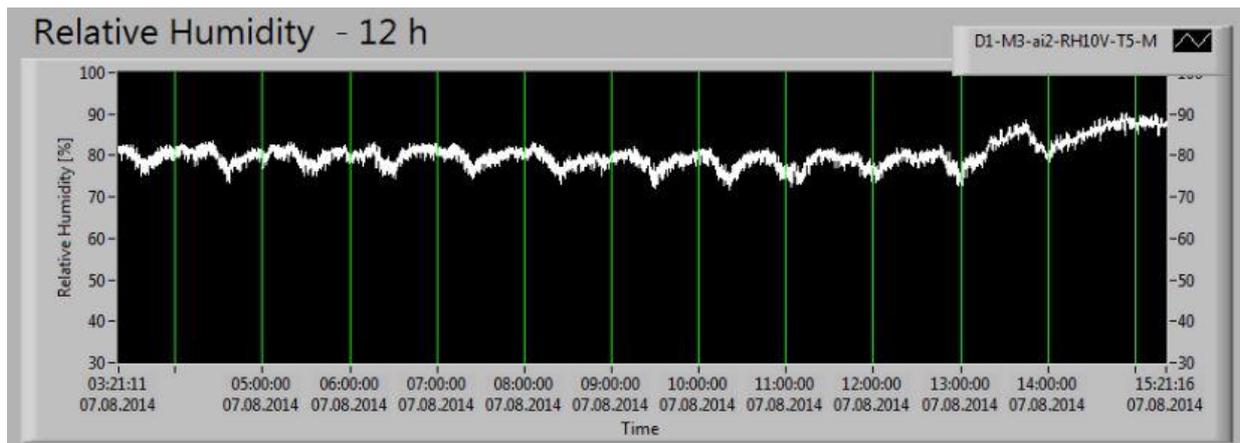


Abb. 31 - 12 Stunden Chart der Luftfeuchte mit optimalem Verlauf

Die vierte Momentaufnahme vom 07.08.2014 zeigt einen nahezu optimalen Verlauf (Abb. 31). Die Schwankungen bewegen sich lediglich zwischen 76 % und 86 % und halten sich vor allem auch in der Lichtphase recht konstant.

5.2 Temperatur- und Kohlenstoffdioxidmessungen

Wie zuvor schon bei den Luftfeuchtemessungen, geben die Temperaturkurven ein ähnliches Bild ab. Ebenfalls kommt es zu hohen Schwankungen, teils durch die Befeuchtung innerhalb des Zelttes. Aber auch die Wärmeverteilung im Inneren des Reinraumes, sowie die Wärmeentwicklung der anderen Zelte haben einen Einfluss auf die Temperaturschwankungen.

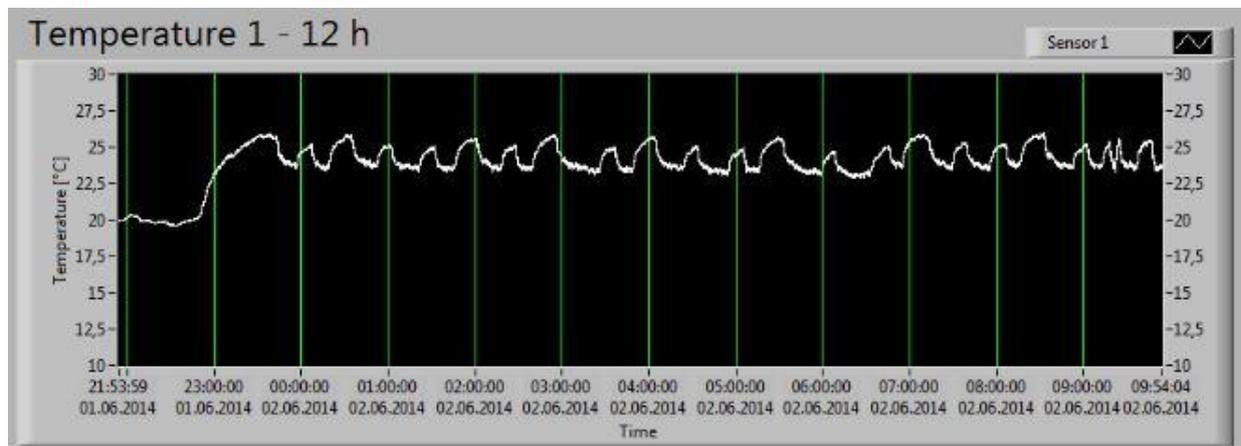


Abb. 32 - 12 Stunden Chart der Temperatur mit welligem Verlauf

Im Temperaturverlauf der Abbildung vom 01.06.2014 sind kleinere Schwankungen zu verzeichnen. Sie liegen im beleuchteten Zeitraum zwischen 20°C und rund 25°C. Die Dynamik wird durch die Verdunstungskühle aus der Befeuchtung verursacht und auch erneut durch den Einfluss der Luftzirkulation im Bio-Reinraum, sowie durch den Luftaustausch mit den anderen Zelten.

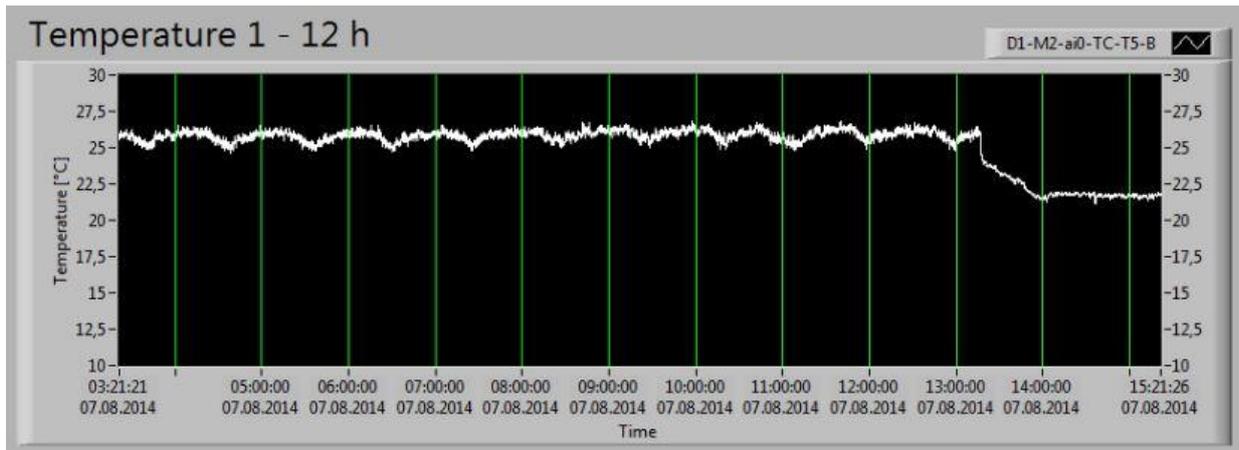


Abb. 33 - 12 Stunden Chart mit optimalem Verlauf

Die Temperaturführung vom 07.08.2014 ist nahezu konstant und bewegt sich im Mittel zwischen 25 und 27,5°C in der Lichtphase und in der Dunkelphase bei ca. 22°C (Abb.33).

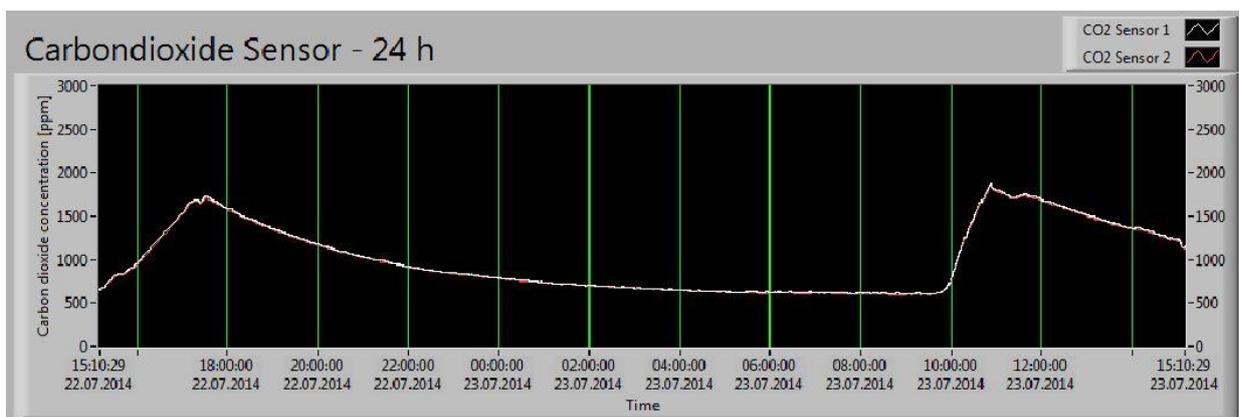


Abb. 34 - CO₂-Konzentration im Tagesverlauf vom 23.07.2014 im gesamten Bio-Reinraum

Abbildung 34 zeigt einen Verlauf der CO₂ Konzentration vom 22.07.2014. Zwei Peaks von ca. 1800 ppm sind dabei sichtbar, welche die Arbeitsaktivität innerhalb des Bio-Reinraumes zeigen. Die Kurve steigt dabei zunächst schnell an, flacht aber nach Verlassen des Raumes wieder kontinuierlich ab. Es muss zusätzlich erwähnt werden, dass der Anstieg der Konzentration ausschließlich durch die abgegebene Atemluft der Personen im Raum verursacht wird. Eine Zuführung von technischem CO₂ ist zwar in Zukunft geplant, konnte aber bis jetzt noch nicht implementiert werden. Das langsame Abflachen kann mehrere Gründe haben. Einerseits wäre es wünschenswert, dass die Pflanzen das CO₂ im Prozess der Photosynthese aufnehmen. Es ist andererseits auch möglich, dass durch Undichtigkeiten in der Raumkonstruktion das Gas entweicht.

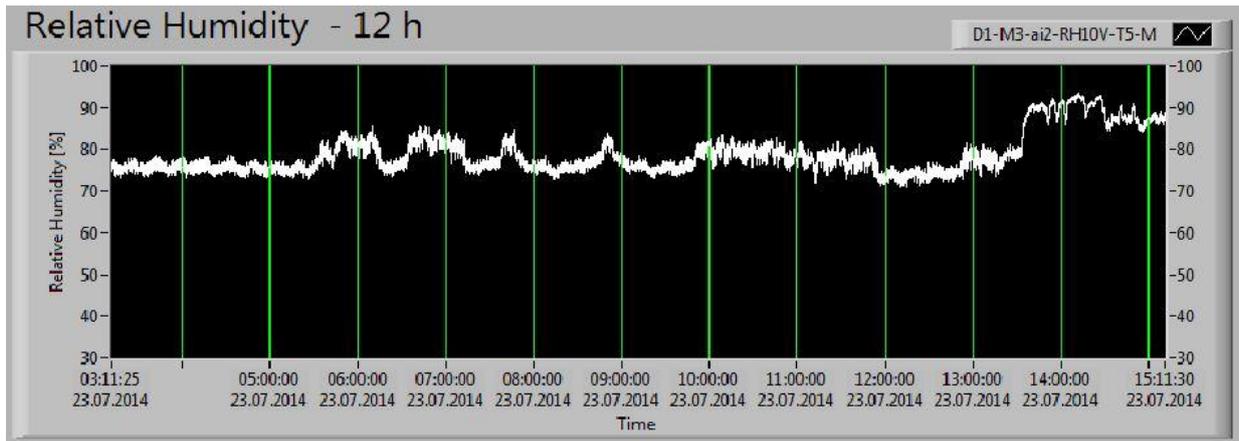


Abb. 35 - 12 Stunden Chart der Luftfeuchte am 23.07.2014

In der Abbildung 35 ist die Luftfeuchtigkeitskurve ebenfalls vom 23.07.2014 über einen Zeitraum von 12h dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass bei Hinzuziehen der vorigen CO2 Grafik die Konzentration in der Dunkelphase höher ist als am Tag. Aufgrund derzeitiger technischer Limitierungen können noch keine Abbildungen über den gesamten Kulturverlauf angezeigt werden. Trotzdem sind die intervallförmigen Unterschiede innerhalb der Klimabedingungen offensichtlich – was sich mitunter nachteilig für die angebauten Kulturen auswirkt.

5.3 pH und EC Messungen

Im Folgenden sind die Verläufe der pH- und EC-Werte der Nährlösung innerhalb der Versorgungstanks dargestellt. Aufgrund der Röhrenmethode ohne die Einbeziehung des Versorgungstanks im zweiten Experiment, beziehen sich die Abbildungen 36 und 37 auf das erste und das dritte Experiment.

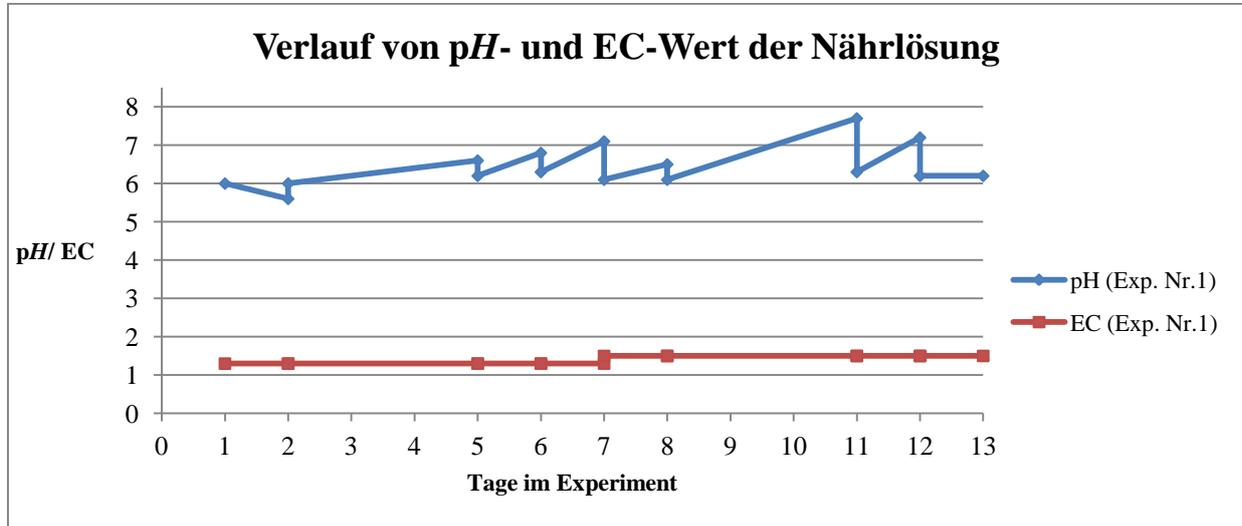


Abb. 36 - pH und EC Wert Messungen während des Experiment Nr.1

In beiden Verläufen ist ein stetiger Anstieg des pH-Wertes feststellbar. Senkrechte Striche an den verschiedenen Tagen verdeutlichen dabei die manuelle Einstellung des Wertes während des Versuchs. Es wurden mit Hilfe einer Pipette tröpfchenweise HNO_3 Säure in den Versorgungstank gegeben, bis das gewünschte Niveau wieder hergestellt war. Bei dem EC Wert konnten nur minimale bis keine Schwankungen erkannt werden.

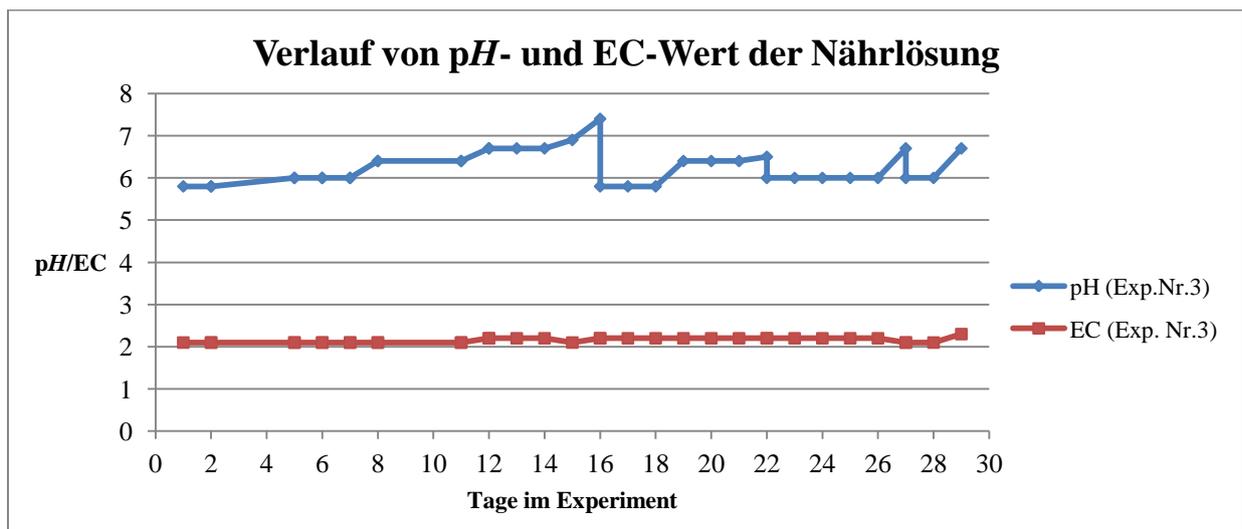


Abb. 37 - pH und EC Wert Messungen während des Experiment Nr.3

5.4 Beobachtungen aus dem Wurzelraum

In allen drei Experimenten war vor allem die Wurzelbildung problematisch. Nach dem Einhängen der Bäume in die aeroponischen Boxen kam es anfänglich vor allem im ersten Experiment zu Neubildungen von Wurzeln. Diese waren weiß, dick-fleischig und nahezu unverzweigt. Lediglich Im dritten Experiment war noch ein kleinster Wurzelansatz unter der Mullbinde zu erkennen.



Abb. 38 – Wurzelneubildung in Kampagne Nr.1

Nach kurzer Zeit wurde jedoch zunehmend ein schleimiger Überzug der Wurzeln sichtbar. Dieser Belag hatte eine hellbraune Farbe und war punktuell auf den Wurzeln ausgeprägt. Im weiteren Verlauf wurde die Konsistenz der Wurzeln zunehmend weicher, abgestorbene Wurzelreste lösten sich ab und sammelten sich im Vorfilter der Nährlösung. Parallel war auch ein „nussiger“ Geruch wahrnehmbar. Kurz vor dem Abbruch der ersten Kampagne waren zudem bereits pilzliche Fruchtkörper sichtbar.



Abb. 39 – Infizierte Wurzeln in Kampagne Nr.1

In der ersten Kampagne wurde zudem die Nährlösung nur in einem Kreislauf gereinigt. Das führte dazu, dass sich innerhalb kurzer Zeit die Verschmutzung der Nährlösung beschleunigte. Eine mikroskopische Aufnahme verdeutlicht die Ansammlung verschiedenster Mikroorganismen in der Nährlösung.

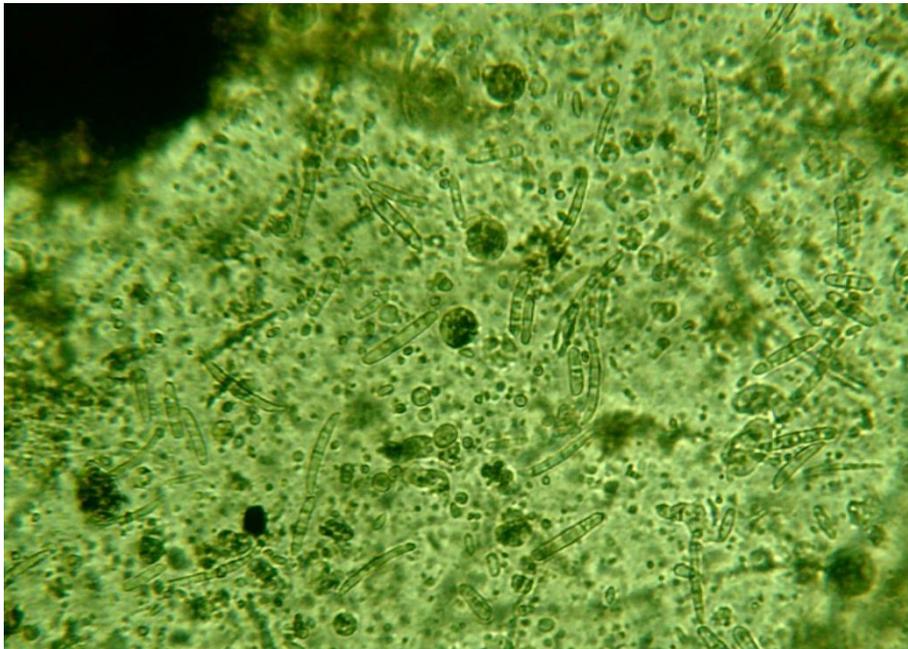


Abb. 40 - Mikroskopische Aufnahme einer Wurzelprobe

In der zweiten Kampagne gab es keine Verschmutzung, da das Wurzelwerk abgeschnitten wurde. Im letzten Versuch wurde zusätzlich noch ein zweiter Filter zur Reinigung des Tanks installiert. Das führte zwar zur erheblichen Reduzierung der Verschmutzung der Nährlösung durch Schwebeteilchen und auch der zuvor festgestellte „nussige“ Geruch war nicht mehr vorhanden. Das symptomatische Erscheinen von Schleim wiederholte sich jedoch in allen Experimenten trotz zunehmendem Augenmerk auf die Desinfektion der Bäume (Wasserstoffperoxid®, Previcur®) und der Reinigung der Nährlösung. Zusätzlich herrschte innerhalb der Box eine Luftfeuchte von bis zu 100% vor und es kam trotz der Installation des Metallgitters, welches zur Stabilisierung und Verteilung der Wurzeln gedacht war, zu Überlagerungen. An der Übergangsstelle vom feuchten Wurzelraum innerhalb der Box zur äußeren Atmosphäre wurde darüber hinaus unter der Neoprenabdichtung ein weißes Pilzmyzel sichtbar.

5.5 Beobachtungen aus dem Blattwerk

In allen drei Experimenten kam es stets anfänglich zu einer schnellen Blüten- und Blattentwicklung.



Abb. 41 – l. Blütenentwicklung in der Kampagne Nr. 1; r. Blattchlorosen und -nekrosen

Nach ein paar Tagen fingen die Blätter jedoch an, sich einzurollen, wodurch innere, näher am Haupttrieb liegende Blätter, überdeckt wurden. Diese hellten sich chlorotisch auf und hatten bereits kurze Zeit später Nekrosen. Anschließend verfärbten sich alle weiteren Blätter, die Bäume trockneten zunehmend aus und die Blüten, Blätter und auch anfänglich gebildeten Früchte wurden nach vorrangegangener Welke abgeworfen. In den folgenden Abbildungen ist der Verfall der Bäume anhand der dritten Kampagne dargestellt.



Abb. 42 – Welke des Blattwerkes im zeitlichen Ablauf aus der Kampagne Nr. 3



Abb. 43 - Verschiedene Insekten im Anbauzelt

Außerdem fanden trotz intensiver Desinfektion und Reinigung der Bäume verschiedene Insekten einen Weg in das Zeltinnere. Wie in Abbildung 43 dargestellt, handelte es sich dabei um eine Raupe, mehrere geschlüpfte Grüne Stinkwanzen und eine Spinne. Es ist davon auszugehen, dass sie entweder bei der Desinfektion der Bäume übersehen wurden oder während der Öffnung in die Zelte eingeschleppt worden sind. Alle drei Organismen hatten jedoch keinen Einfluss auf das Wachstum und die Entwicklung der Bäume.

6 Diskussion

Der Anbau von Säulenapfelbäumen in einem geschlossenen System mit Kunstlicht und dem Einsatz der Aeroponik als Kulturverfahren, stellte sich in seiner Durchführung als außerordentlich schwierig heraus. So kam es im Verlauf der drei Experimente zu verschiedenen Problemen während der Kultivierung.

Das größte Problem, welches die Bäume mit großer Wahrscheinlichkeit zum Absterben brachte, war die schnelle pathogene Infektion vorhandener und gleichzeitig ineffiziente Bildung neuer Wurzeln. Da fast alle mineralischen Nährstoffe über die Wurzeln aufgenommen werden, ist das Vorhandensein eines funktionierenden Wurzelsystems essentiell, da sonst wichtige Stoffwechselprozesse nicht durchgeführt werden können (Tromp et al. 2005). In allen drei Experimenten bildete sich punktuell ein hell bräunlicher Schleim, sowie ein leichter Film um die Wurzeln. Die Konsistenz der Wurzeln wurde zudem zunehmend weicher. In der Literatur wird berichtet, dass Wurzeln Exudate und schleimige Substanzen ausscheiden, um einen flüssigen Übergang zwischen Wurzeln und dem Boden herzustellen (Tromp et al. 2005). Eine dieser Substanzen aus den Wurzelausscheidungen ist das Phenol Phloridzin. Nach Aussage mehrerer Autoren ist es ein Stoff, der als Nährmedium für nekrotrophe Pathogene, wie *Phytophthora ssp.*, *Pythium spp.*, *Cylindrocarpon destructans* und *Rhizoctonia spp.* dient, welche in der Praxis oft bei Nachbauproblemen in der Apfelproduktion (im englischen ARD ‚Apple replant disease‘ bezeichnet) beteiligt sind (Hofmann et al. 2006; Gasser et al. 2009; Harrison et al. 2014). Die Symptome von ARD (verfärbte Wurzeln, Nekrosen an der Wurzelspitze, reduzierte Wurzelgesamtmasse) sind dabei ähnlich, wie die aus den in dieser Masterarbeit vorgestellten Kampagnen (Harrison et al. 2014).

Von schleimigen Wurzeln wird in der Literatur auch im Zusammenhang mit der Wurzelsprühtechnik berichtet (vgl. Roach et al, 1957; Van Lune und Van Goor, 1975). Als Gründe führen diese Autorengruppen das Fehlen von Sauerstoff im Wurzelraum an, was sich schnell in Infektionen und später in dem Absterben der Pflanze widerspiegelt. Weitere Gründe für Probleme im aeroponischen Anbau sehen dieselben Autoren in der Temperatur im Wurzelraum, welche zudem abhängig von der jeweiligen Unterlage ist. Für Unterlagen des Types M9 werden nach Bolas und Ruck (1955) Temperaturen von 8-14°C anstelle von 20 – 25°C empfohlen. Im EDEN Labor ist die Temperatur im Wurzelraum nicht explizit steuerbar gewesen, befand sich jedoch meistens bei einem Niveau leicht über 20°C und einer Luftfeuchtigkeit von <100%. Der Sauerstoffgehalt im Wasser beträgt bei dieser Temperatur in etwa 9,2 mg/L und könnte durch Absenken der Temperatur auf 11,3 mg/L bei 10°C erhöht werden (Henseler, 1999)

Die Wurzeln wurden in regelmäßigen Abständen mit Wasserstoffperoxid desinfiziert, wie es nach Myers (2014) empfohlen wird. Das Pflanzenschutzmittel Previcur N® wurde ebenfalls eingesetzt, da es sich bei den pilzlichen Erregern möglicherweise um *Pythium ssp.*, *Phytophthora ssp.* und Ähnliche handelte.

Trotz dieser Maßnahmen hielten die Infektion und die Wurzelfäule an. Es ist davon auszugehen, dass in der Versorgungseinheit bei dem Austausch der Nährlösung nicht alle Erreger beseitigt wurden. Es könnte daher auch ratsam sein, höhere Konzentration von Desinfektionsmitteln zu verwenden.

Im Bereich des Blattwerkes war zunächst eine starke Anfangsentwicklung der Blätter wahrnehmbar bei gleichzeitig intensiver Blütenbildung. In der Folge rollten sich die Blätter ein, trockneten aus und wurden mitsamt den Blüten abgeworfen. Diese Symptome sind typische Erscheinungen bei Pflanzen, die unter Stressbedingungen wachsen. Bei Trockenstress wird das Stresshormon Abscisinsäure (ABA) in den Wurzeln gebildet und zu den Blättern transportiert (Brunold et al. 1996). Pflanzen versuchen daraufhin, ihre Assimilationsfläche zu reduzieren durch Ausbildung einer Trennschicht, wodurch es zum Blattfall kommt. Desweiteren ist nach Brunold et al. (1996) die Blütenbildung und die Vitalität der Pollen bei mehrjährigen Pflanzen gehemmt.

Das Stresshormon Ethylen ist in diesem Zusammenhang auch als mögliche Ursache für das Einrollen bzw. Herabhängen der Blätter zu erwähnen. In den aeroponischen Boxen könnte möglicherweise aufgrund eines zu hoch eingestellten Sprühintervalls ein Sauerstoffmangel die Synthese von Ethylen in den Wurzeln bewirkt haben. Nach anschließendem Transport in den Spross äußert sich nach Brunold et al. (1996) Ethylen in der Form einer Epinastie und frühzeitigen Seneszenz. Unter dem Begriff versteht man ein „[...]einseitiges Wachstum eines dorsiventralen Pflanzenorgans unter dem Einfluss von Licht u. Wärme“, was unter anderem „[...]das Öffnen von Blütenblättern bewirkt.“ (Konradin Medien, 2014). Eine stressbedingte Notblüte könnte ebenfalls das schnelle Aufblühen der Bäume erklären (Wada und Takeno, 2010).

6.1 Fehleranalyse

Der Anbau von Pflanzen mit CEA Technologien (Aeroponik, LED Belichtung, und kontrollierten Umweltbedingungen) erwies sich als im hohen Maße herausfordernd und verlangte maximale Zuwendung und Aufmerksamkeit um schnell auf Probleme zu reagieren. Die folgenden Analysen beziehen sich vor allem auf negative Effekte ausgehend von den eingesetzten CEA Technologien, um die möglichen technischen Problembereiche herauszuarbeiten.

6.1.1 Aeroponik

Die Aeroponik birgt bislang noch viele Schwachstellen. Aufgrund des hohen Grades an Technik und dem Einsatz vielfältiger elektrisch betriebener Elemente ist eine Abhängigkeit von funktionierender Elektronik von entscheidender Bedeutung. Gleiches trifft zu, bedenkt man einen möglichen Systemausfall. Bei einem Stromausfall war und ist sowohl die Nährstoffversorgung, als auch die Belichtung gestoppt – beides zwei essentielle Dinge für die Pflanzenkultivierung. In der Literatur unterstreichen Gitelson und Lisovsky (2008) die Tatsache, dass die Haltbarkeit eines solchen Systems immer von der Funktionsfähigkeit der technischen Maschinen abhängt.

6.1.2 Künstliche Belichtung

Die künstliche Belichtung mit LEDs stellte im Bereich der perennierenden Pflanzen eine Neuheit dar. Die derzeitige Qualität der Beleuchtung ist von Panel zu Panel und zwischen den unterschiedlichen Herstellern dieser Leuchtmittel sehr verschieden. Zudem gibt es bisher noch keine praxistauglichen Erfahrungen, welche Farbspektren explizit für welche Kulturen verwendet werden müssen. Die eingesetzten Leuchtmittel in den Experimenten bestanden lediglich aus blauen und roten LEDs. Forschungen der NASA haben jedoch bereits gezeigt, dass auch grünes Licht einen Einfluss auf die Qualität und das Wachstum der Pflanzen hat (Kim et al. 2006). Ein verbindliches Konzept, welche Farbspektren konkret für das Wachstum des Apfelbaumes benötigt werden, ist also eine Herausforderung für zukünftige Experimente.

Außerdem war die Wärmeentwicklung besonders vom Hauptpanel ausgehend, über den Pflanzen sehr groß, was in der Zukunft durch effektive Kühlungsmaßnahmen reduziert werden muss. Darüber hinaus ist eine Überarbeitung der Beleuchtungsarchitektur innerhalb der Anbaukammer notwendig, um die Pflanzen noch effektiver mit der benötigten Menge an Lichtteilchen zu versorgen.

6.1.3 Steuerung klimatischer Faktoren

Ein weiteres Phänomen ergab sich bei der Steuerung der klimatischen Faktoren, insbesondere der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit. Da in das AMS bislang noch kein Luftbefeuchtungsgerät integriert ist, konnten beide Werte nicht immer auf das gewünschte Niveau gebracht werden. Die Anreicherung der Luft mit Wasser wurde mittels Raumbefeuchter außerhalb der Zelte durchgeführt. Die angefeuchtete Luft wurde dann in einen Rohrkreislauf transportiert, der mit den Anbauzelten verbunden ist. Aufgrund dieser Entfernung, der Position der Messfühler, die sich anfangs nicht in den Zelten befanden und der Klimaanlage, die beim Prozess der Kühlung dem Raum Feuchtigkeit entzieht, war vor allem die Regelung der Luftfeuchte ein entscheidendes Problem. Es kam deshalb nicht selten vor, dass die Werte in der Lichtphase zwischen 50 und 60 % lagen. Für die Anzucht von Bäumen ist das nach Spethmann (2007) und Graham (2014) ein schwerwiegender negativer Faktor, da für eine erfolgreiche Bewurzelung der Bäume eine gleichmäßig hohe Luftfeuchte mit Werten von bis zu <100% notwendig ist. Abhilfe und teilweise Unabhängigkeit brachte erst ein im Zelt zusätzlich integrierter Luftbefeuchter, der jedoch spätestens nach einem Tag wieder mit Wasser aufgefüllt werden musste. Dies hatte einen enormen zusätzlichen Zeitaufwand zur Folge. Des Weiteren unterlag der CO₂-Wert zum Teil hohen Schwankungen – abhängig vom Grad der Arbeitsaktivität und der damit ausgeatmeten Luft. Dies sollte sich verbessern, sobald technisches CO₂ in den Bio-Reinraum eingeleitet werden kann.

6.1.4 Nährlösung

Ein weiteres Feld der Betrachtung ist die Nährlösung. Das gewünschte Niveau konnte zunächst durch die Mischung der einzelnen Nährlösungskomponenten vor dem Befüllen des Nährstofftanks festgelegt werden. Anschließend wurden die Parameter, beispielsweise der *pH*-Wert, mit einem Kombometer gemessen und mittels HNO_3 -Säure oder KNO_3 -Base auf den Sollwert eingestellt. Unterschiedliche Applikationshöhen der Nährstoffkonzentration brachten dabei keinen sichtbaren Unterschied, vermutlich da noch kein effizientes Wurzelsystem ausgebildet war. Trotzdem stieg der *pH*-Wert im Laufe der Experimente stetig an und musste mehrmals gesenkt werden. Die Genauigkeit des Gerätes bei einem 80 Liter Reservoir war allerdings nur unzureichend gegeben – weshalb auch hier große Schwankungen auftraten. Die Filterung der Nährlösung stellte sich ebenfalls als bedeutend heraus – da es bereits im ersten Experiment nach kurzer Zeit zu starken Verunreinigungen kam. Ein weiterer Filterkreislauf musste aus diesem Grund installiert werden, um zusätzlich Schwebeteilchen heraus zu filtern. Der Einsatz eines zusätzlichen bzw. stärkeren UV – Sterilisators wäre in diesem Zusammenhang denkbar, sowie eine Möglichkeit zur Steuerung der Nährlösungstemperatur. Nicht zuletzt könnte eine Aufteilung des Versorgungssystems in zwei Tanks (Abwasser- und Frischwassertank) die Regelung erleichtern.

6.1.5 Pflanzenschutzmanagement

Als wichtigster Bereich stellte sich das Pflanzenschutzmanagement heraus. Trotz der Sauberkeit im Bio-Reinraum kann es immer wieder zu Verunreinigungen durch Pilze und Bakterien kommen, welche die Experimente zum Abbruch zwingen können. Vor allem pilzliche Schaderreger fühlen sich in einem feuchten, dunklen und substratreichen Habitat wohl (vgl. Hallmann et. al, 2007). Um dieser Gefahr vorzubeugen, gibt es einerseits die Möglichkeit des chemischen Pflanzenschutzmitteleinsatzes mit systemischen und Kontaktmitteln und andererseits die Möglichkeit der vorbeugenden Pflanzenstärkung. Das Finden geeigneter Klimateinstellungen gehört ebenso dazu und kann mitunter auch als Pflanzenschutzmaßnahme gelten (vgl. Spethmann, 2007). Zum Pflanzenschutzmanagement zählt darüber hinaus die visuelle Kontrolle empfindlicher Pflanzenorgane – in dem vorliegenden Fall betrifft dies die Wurzeln. Wie schon erwähnt kam es bereits nach kurzer Zeit in allen drei Experimenten zur Bildung einer schleimigen Masse aus Bakterien und Pilzen an den Wurzeln, wodurch diese stark in ihrer Effektivität eingeschränkt wurden. Ähnliches Phänomen beschreibt auch Roach (1956), doch selbst seine Empfehlung einer größeren Anreicherung der Nährlösung mit Sauerstoff, brachte in der vorliegenden Versuchsreihe keine Änderung. Einzig bei tierischen Schädlingen konnte durch visuelle Kontrolle und anschließende manuelle Entfernung der Druck auf ein Minimum reduziert werden. Für ein erfolgreiches Pflanzenschutzmanagement ist in Zukunft eine schnelle und sichere Identifizierung der Pathogene entscheidend. Darauf aufbauend könnten dann entsprechende Pflanzenschutzmittel appliziert und der Befall gemindert werden. Die Priorität sollte jedoch bei einem vorbeugenden Pflanzenschutz liegen, um den Pflanzenschutzmitteleinsatz so gering wie möglich zu halten.

6.2 Modifizierte Überführungsmethode

Für zukünftige Experimente ist die Modifizierung der Ausgangsbedingungen unabdingbar. Daher soll in diesem Abschnitt, aufbauend auf den Erfahrungen der Experimente, eine neue Überführungsmethode präsentiert werden, die sowohl Veränderungen in der Vorbereitung, also die Architektur der Wachstumskammern und die eigentliche Experimentdurchführung betreffen.

Folgende Schritte und Aspekte betreffen die Vorbereitung:

- Überarbeitung der EDEN – AMS Struktur:
Die hohen Schwankungen im Bereich der Luftfeuchte und Temperatur im Tagesverlauf müssen gesenkt werden. Dafür ist der Einfluss durch benachbarte Zelte zu reduzieren.
- Verbesserung und Automatisierung der Nährstoffversorgung zur Vermeidung von häufigem Öffnen des Zeltes. In der Vergangenheit kam es vor allem dadurch zu turbulenten Klimaschwankungen.
- Die Verbesserung und Anpassung der Belichtungssituation ist ein wesentlicher Aspekt. Vor allem die Seitenmodule ‚Production Module‘ von Phillips müssen dichter an die Pflanzen herangebracht werden. Die Entfernung der Blätter von den LEDs sollte im Bereich von 10 cm liegen für eine effektive Photosynthese.
- Bereitstellung einer funktionierenden Kameraüberwachung für erste visuelle Diagnosen. Dadurch Reduzierung häufigen Öffnens der Zelte
- Die Recherche im Bereich möglicher Pathogene für Apfelbäume sollte intensiviert werden. Dazu zählt ein Maßnahmenplan im Falle des Auftretens von Symptomen, die Möglichkeit einer effektiven Analyse des Schaderregers und das Bereitstellen von Pflanzenschutzmitteln.

Bezüglich der Durchführung der Bewurzelung sind folgende Schritte zu unternehmen:

- Der Zeitpunkt der Überführung der Apfelbäume bezüglich des Jahresverlaufes hat einen wesentlichen Effekt auf die Entwicklung in der Klimakammer. Er ist daher auf die Monate Februar – März oder auf den August bis September zu legen um die Zeiten des größtmöglichen Wurzelwachstums abzudecken.
- Für die Art der Überführung gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder das Entfernen der Wurzelmasse mit anschließender Umwicklung der Schnittstelle mit einer Mullbinde und dem anschließenden Versuch der Bewurzelung weiterverfolgt werden. Die zusätzliche Verwendung von Pflanzenstärkungsmitteln oder das Anritzen der Rinde ist hierbei in Betracht zu ziehen. Die zweite Variante, bei der die Wurzeln ausgewaschen werden ist nur bedingt weiter zu empfehlen, da das Risiko des Einschleppens von Pathogenen sehr hoch ist. Möglicherweise ist die generative Anzucht mit anschließender Veredelung eine überlegenswerte Alternative.

Folgende Sollwerte sollten in zukünftigen Experimenten verwendet werden:

- **Temperatur: gestaffelt nach Monaten; im ersten Monat 10-15°C (Tag) und 10-12°C (Nacht), im zweiten Monat 20°C und 14°C und im dritten bis fünften Monat 25°C und 15°C**
- **relative Luftfeuchte: 95% während der Lichtphase; 85% in Dunkelheit**
- **pH- und EC-Wert: 5,8 – 6,0 (pH) und zw. 1,2 und 2 (EC); weitere Untersuchungen sind notwendig**
- **CO₂- Gehalt: > 350ppm**
- **Belichtung: 14h**
- **Sprühintervall: alle 3min für 20sec**
- **Nährlösungstemperatur: angepasst an die Art der Unterlage und den Jahreszeitpunkt monatlich gestaffelte Temperaturen von 8-17°C**

Zusätzlich ist eine Desinfektion des Rücklaufwassers erforderlich und das Ausdünnen der Blätter und Blüten könnte durchgeführt werden, um vegetatives Wachstum am Anfang zu fördern.

6.3 Vorschläge für weitere Forschungsaktivitäten - Ein Ausblick

Um in Zukunft ein erfolgreiches geschlossenes System für die Apfelbaumkultivierung in extraterrestrischen Habitaten zu etablieren, sind noch weitere Entwicklungen von CEA-Elementen und Testreihen, vor allem im Bereich der Klimaführung durchzuführen.

Die wichtigste Voraussetzung für die erfolgreiche Kultivierung in einem geschlossenen System ist mit Abstand die Hygiene. Quellen für Verunreinigungen können sehr vielseitig sein, gerade bei wiederholtem Einsatz der angedachten Anbaukonstruktion. In bereits benutzten Schläuchen, Pumpen und Versorgungstanks können sich schnell Schadorganismen beispielsweise als Dauersporen festsetzen und überdauern, bis wieder günstige Bedingungen für eine Neuinfektion gegeben sind. Eine Notwendigkeit ist daher die Ausweitung computergestützter Steuerungssysteme, so dass das Öffnen der Versuchskammer auf ein Minimum reduziert werden kann. Oft wurden in der Versuchszeit unbewusst Sporen ins System eingebracht, so dass es oft zu Neuinfektionen kam. Gleichzeitig müssen die verwendeten Geräte wie Pumpen und Filter noch effektiver gereinigt werden, damit es nicht zum Wiederaufkeimen nach erneuter Inbetriebnahme kommen kann.

Ein weiteres Anliegen muss die weitergehende Recherche im Bereich der Nährlösung und in dem Zusammenhang die damit verbundenen Applikationsmengen sein. Wenn der Anbau von Obstgehölzen mit einem erdelosen Kulturverfahren durchführbar ist, können zunächst verschiedene Auswirkungen von pH und EC Werten, sowie Versorgungszuständen mit einzelnen Nährstoffen getestet werden. Gleichzeitig ist das Finden einer geeigneten Nährlösung von entscheidender Bedeutung und kann ein Überblick geben, in welchen Wachstumsphasen welche Nährstoffkonzentrationen benötigt werden. Der Einsatz von Blattdüngern könnte ebenfalls eine Forschungsaktivität sein, um das Ausfallrisiko während der Bewurzelung zu verringern.

Parallel zu Nährlösungsversuchen sind die aeroponischen Sprühintervalle und Größen der Nebeldüsenöffnungen für den Wurzelraum zu diskutieren. Bei den verwendeten Bäumen in allen drei Experimenten kam es stets zu anfänglichen Welkeerscheinungen, die vom anfangs chlorotischen in einen nekrotischen Zustand übergingen. Das lässt mitunter darauf schließen, dass die Wasser- oder Nährstoffversorgung den Ansprüchen eines Apfelbaumes noch nicht gerecht werden konnte.

Darüber hinaus gibt es im Bereich des Pflanzenschutzes Forschungsbedarf. Es kann im Allgemeinen zwar davon ausgegangen werden, dass tierische Schädlinge im abgeschlossenen kontrollierten System keine Relevanz haben. Pilze, Bakterien und Viren sind dagegen ein ernst zu nehmendes Problem. Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln sollte daher diskutiert werden, bei gleichzeitigem Suchen nach optimalen Klimaparametern. Gleiches gilt für eine effektive und schnell durchführbare Reinigung des Düngertanks. In der Gewächshausproduktion gibt es eine Vielzahl von möglichen Verfahren, wovon die Reinigung mittels UV sicherlich die effektivste darstellt.

Neben allen Forschungsaktivitäten in Bezug auf das geschlossene System ist die Fortführung der Suche nach einer geeigneten Anbaumethode von großer Bedeutung.

Im Versuchszeitraum wurden verschiedene Methoden getestet. Bei allen konnten bis auf anfängliche Wurzelbildungsaktivitäten nur mäßige Erfolge festgestellt werden. Als vielversprechend kann allerdings die Auswaschung der Wurzeln, mit vorheriger Ausdünnung des Wurzelsystems auf ein Minimum, angesehen werden. In Kombination mit moderatem Pflanzenschutz und optimalen Klimaeinstellungen kann von höheren Erfolgen ausgegangen werden. Weiterhin ist auch der Einsatz von Bewurzelungshormonen mit anschließender Umwicklung mit einer Mullbinde weiter zu verfolgen, da ebenfalls anfängliche Wurzelentwicklungen beobachtet werden konnten. Aufgrund gesetzlicher Beschränkungen ist die Verwendung von Bewurzelungshormonen in Deutschland derzeit nicht legal, obwohl im Handel nur mäßige Alternativen verfügbar sind. Ein Vergleich mit anderen Methoden ist aber sicherlich sinnvoll.

7 Schlussfolgerung

Die Menschheit hat wie schon seit Urzeiten ein Bedürfnis fremde Orte kennenzulernen und sprichwörtlich in die Weiten des Universums zu schauen. Mit der Erforschung des Weltalls ist es nicht anders. In der Suche nach Möglichkeiten eine bemannte Weltraum - Mission zu verlängern oder für die Missionsteilnehmer angenehmer zu gestalten, sind kreative Systeme gefragt, was sich in der Fülle der unterschiedlichen Lebenserhaltungssysteme zu Testzwecken auf der Erde widerspiegelt.

In der vorliegenden Masterarbeit wurde der Fokus auf bioregenerative Lebenserhaltungssysteme gelegt, wie sie im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt auf ihre Einsatzfähigkeit getestet werden. Dabei ging es jedoch nicht um herkömmlich verwendete einjährige Pflanzenkandidaten wie Salat, Tomaten oder Gurken – sondern vielmehr um den Einsatz von Obstgehölzen, genauer gesagt columnare Zwergapfelbäume. Für diesen Zweck wurde eine neue Vorrichtung entworfen und konstruiert, welche den Anbau Raum für vier dieser Bäume bietet. Mit künstlicher LED-Belichtung und der Wurzelsprühtechnik Aeroponik galt es, die Bäume von der Erdkultur in ein erdeloses Anbauzelt zu überführen und anschließend das Wachstum zu bewerten. Dass dieses Anliegen allerdings zu einem großen ingenieurtechnischen Kraftakt werden würde, hatte niemand mit gerechnet. Einige Probleme traten auf, die die Qualität der Pflanzen nicht nur herabsetzten, sondern die Bäume nach kurzer Zeit sogar zum Absterben brachten. Bei drei aufeinander folgenden Experimenten wurden jeweils ähnliche Ergebnisse gewonnen, da es immer wieder erneut zum Ausbruch des Pilzwachstums im Wurzelraum kam. Mehrere Maßnahmen wurden getestet um dagegen anzugehen, aber die Bedingungen innerhalb der besprühten Boxen waren stets für Pilzkolonien und Wurzelpathogene vorteilhaft gegenüber den Bedingungen für die Entwicklung von Apfelbaumwurzeln.

Nichts desto trotz nehmen diese Fehlversuche nicht die Motivation, dass es in Zukunft möglich sein wird, perennierende Gewächse in Raumfahrtmissionen mit einzubeziehen. Gleichzeitig zeigt es aber auch, wie weit die Menschheit von deren Einsatz noch entfernt ist. In den nächsten Forschungsetappen muss das bestehende Testlabor zunächst umfassenden Verbesserungen unterzogen werden. Dazu gehört eine stärker automatisierte Klimasteuerung ohne die häufige Öffnung des Anbauzeltes, die zusätzliche Begasung der Pflanzen mit CO₂, ein effektiver Pflanzenschutz und Möglichkeiten zur frühzeitigen Feststellung von Pflanzenstress. Darüber hinaus sind die Erforschung und das Verständnis der physiologischen Prozesse in den Apfelbäumen von entscheidender Bedeutung.

Wenn diese Herausforderungen gelöst sind, können weitere Schritte für eine wirkliche Exploration von extraterrestrischen Gebieten diskutiert werden. Bis dahin versteht sich die vorgestellte Anbaueinrichtung für Apfelbäume als Weiterentwicklung bestehender CEA-Technologie und zum Aufzeigen der Schwierigkeiten und Herausforderungen, die mit der Erschaffung eines ökologischen Kreislaufes außerhalb der terrestrischen Umgebung verbunden sind.

8 Literaturverzeichnis

- Albright, L. D.; Langhans, R. W. (1996):** Controlled Environment Agriculture Scoping Study. Cornell University. Online verfügbar unter <http://www.cornellcea.com/attachments/Controlled%20Environment%20Agriculture%20Scoping%20Study%20pdf%20-%20Adobe%20Acrobat%20Professional.pdf>.
- Allen, J. P.; Nelson, M.; Alling, A. (2003):** The legacy of biosphere 2 for the study of biospherics and closed ecological systems. In: *Advances in Space Research* 31 (7), S. 1629–1639. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00103-0.
- Asao, Toshiki (Hg.) (2012):** Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches: InTech.
- Berkovich, Yu A.; Smolyanina, S. O.; Krivobok, N. M.; Erokhin, A. N.; Agureev, A. N.; Shanturin, N. A. (2009):** Vegetable production facility as a part of a closed life support system in a Russian Martian space flight scenario. Life Sciences in Space. In: *Advances in Space Research* 44 (2), S. 170–176.
- Brunold, C.; Rüeegg, A.; Brändle, R. (1996):** Stress bei Pflanzen. Ökologie, Physiologie, Biochemie, Molekularbiologie. Bern: P. Haupt.
- Dickob, D. (1992):** Übersicht und Begriffsdefinitionen über "Geschlossene Bewässerungssysteme". In: *KTBL* (0669).
- Eckart, P. (1996):** Spaceflight life support and biospherics. Torrance, Calif., Dordrecht, Boston: Microcosm Press; Kluwer Academic (Space technology library, v. 5).
- Eshenaur, B.; Anderson, R. (2004):** Managing the Greenhouse Environment to Control Plant Diseases. Plant Pathology Fact Sheet. Hg. v. University of Kentucky - College of Agriculture. Online verfügbar unter http://www2.ca.uky.edu/agcollege/plantpathology/ext_files/PPFShtml/PPFS-GH-1.pdf, zuletzt aktualisiert am 04.11.2004, zuletzt geprüft am 18.05.2015.
- FAO (1990):** Soilless culture for horticultural crop production. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO plant production and protection paper, 101).
- Ferl, R.; Wheeler, R.; Levine, H. G.; Paul, A.-L. (2002):** Plants in space. In: *Current Opinion in Plant Biology* (5), S. 258–263.
- Fischer, M. (Hg.) (2002):** Apfelanbau. Integriert und biologisch. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- Fowler, P. A.; Wheeler, R. M.; Bucklin, R. A.; Corey, K. A. (2000):** Low Pressure Greenhouse Concepts for Mars. In: *Mars Greenhouses. Concepts and Challenges*, S. 116–124. Online verfügbar unter <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050182966.pdf>.
- Gasser, S.; Naef, A.; Monney, P. (2009):** Nachbauprobleme in der Apfelproduktion. In: *Schweizerische Zeitschrift für Obst- und Weinbau* (10), S. 8–10.
- Glomb, K. (2013):** Bioregenerative Life Support System (BLSS) for Long Duration Human Space Missions. Graduate Team Paper. In: *NASA RASC-AL*. Online verfügbar unter <http://nia-cms.nianet.org/RASCAL/images/University-of-Colorado,-Boulder-Final-Paper-2013.aspx>, zuletzt geprüft am 31.07.2014.
- Göhler, F.; Molitor, H.-D.; Roth, K. (2002):** Erdelose Kulturverfahren im Gartenbau ; 111 Tabellen. Stuttgart: Ulmer.
- Graham, T. (2014):** Questions concerning rooting apple trees, 03.06.2014. E-Mail an M. Dorn.
- Haeuplik-Meusburger, S.; Paterson, C.; Schubert, D.; Zabel, P. (2014):** Greenhouses and their humanizing synergies. In: *Acta Astronautica* 96 (0), S. 138–150. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.11.031.
- Hallmann, J.; Tiedemann, A. von; Quadt-Hallmann, A. (2007):** Phytomedizin. [Grundwissen Bachelor] ; 77 Tabellen. Stuttgart: Ulmer (UTB, 2863 : Agrarwissenschaften, Gartenbauwissenschaften, Forstwissenschaften, Biologie).

Harrison, N.; Fernandez, F.; Tilston, E. (2014): Biology and management of apple replant disease. East Malling Research. Online verfügbar unter <http://www.emr.ac.uk/projectposts/biology-management-apple-replant-disease/>, zuletzt geprüft am 21.06.2015.

Häuplik-Meusburger, Sandra (2011): Architecture for astronauts. Design-in-use study and comparative analysis and evaluation of human activities in relation to the architecture of realized extra-terrestrial habitats. Wien: Springer-Verlag.

Henseler, Andreas (1999): Ökodiagramm. Digitale Foliensammlung. Stuttgart: Klett.

Heret, R. (2006): Daten unseres Mondes. Online verfügbar unter <http://www.heret.de/mathe/mond.shtml>, zuletzt geprüft am 02.07.2015.

Herrmann, K. (2001): Inhaltsstoffe von Obst und Gemüse. 50 Tabellen und Übersichten, 97 Formeln. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.

Hoagland, D. R.; Arnon, D. I. (1950): The water-culture method for growing plants without soil. revised by D. I. Arnon. Berkeley Calif.: Univ. of California The College of Agriculture (Circular / California Agricultural Experiment Station, 347).

Horneck, G.; Schauer, L. (2001): HUMEX. Study on the Survivability and Adaptation of Humans to Long-Duration Interplanetary and Planetary Environments. ESTEC. Online verfügbar unter <http://ecls.esa.int/ecls/attachments/ECLS/Perspectives/humex/tn5.pdf>, zuletzt geprüft am 31.07.2014.

Jones, J. B. (1997): Hydroponics. A practical guide for the soilless grower. Boca Raton, Fla.: St. Lucie Press.

Keppel, H.; Pieber, K.; Weiss, J.; Hiebler, A.; Mazelle, W. (1998): Obstbau. Anbau und Verarbeitung. 2., völlig neu b. Graz: Stocker (Praxisbuch).

Kim, H. H.; Wheeler, R. M.; Sager, J. C.; Gains, G. D.; Naikane, J. H. (2006): Evaluation of Lettuce Growth using supplemental green light with red and blue light-emitting diodes in a controlled environment - a review of research at Kennedy Space Center. In: *Acta Horticulturae* (711), S. 111–120.

Klumpp, T.; Lubitz, L. (2005): Künstliche Biosphären. Bausteine und Beispiele für autarke Lebensräume. Projektarbeit, Stuttgart. Fakultät für Architektur und Stadtplanung.

Konradin Medien (2015): Epinastie | Fremdwörter. Konradin Medien GmbH, Leinfelden-Echterdingen. Online verfügbar unter <http://www.wissen.de/fremdwort/epinastie>, zuletzt geprüft am 23.06.2015.

Looney, N. E. (Hg.) (2004): Horticulture: art and science for life. The colloquia presentations : a proceedings of the XXVI International Horticultural Congress : Toronto, Canada, 11-17 August, 2002. Leuven, Belgium: ISHS (*Acta horticulturae*, 642).

MacElroy, R. D.; Klein, H. P.; Averner, M. M. (1985): The Evolution of CELSS for Lunar Bases. In: W. W. Mendell (Hg.): Lunar bases and space activities of the 21st century. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, S. 623–633.

Makimura, K.; Hanazawa, R.; Takatori, K.; Tamura, Y.; Fujisaki, R.; Nishiyama, Y. et al. (2001): Fungal flora on board the Mir-Space Station, identification by morphological features and ribosomal DNA sequences. In: *Microbiol. Immunol.* 45 (5), S. 357–363.

McKay, C. P. (2004): The Case for Plants on Mars. In: N. E. Looney (Hg.): Horticulture: art and science for life. The colloquia presentations : a proceedings of the XXVI International Horticultural Congress : Toronto, Canada, 11-17 August, 2002. Leuven, Belgium: ISHS (*Acta horticulturae*, 642), S. 187–192.

Mendell, W. W. (Hg.) (1985): Lunar bases and space activities of the 21st century. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute.

Monteiro, R.; Carmo Pinto, S. I. do; Soares, R.; de Carvalho, V. A. M. (2012): Hydroponic Production of Fruit Tree Seedlings in Brazil. In: Toshiki Asao (Hg.): Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches: InTech.

- Myers, J. (2014):** How to Clean Slimy Roots in Hydroponics. Hg. v. eHow. Online verfügbar unter http://www.ehow.com/how_7170183_clean-slimy-roots-hydroponics.html#ixzz30MOsTq3q, zuletzt geprüft am 20.06.2015.
- Olympius, C. M. (1999):** Overview of soilless culture: advantages, constraints, and perspectives for its use in mediterranean countries. In: *Cahier Options Méditerranéennes* (31), S. 307–324.
- OSRAM GmbH (2014):** OSRAM-Wissen: die Lichtfarben der LED. OSRAM. Online verfügbar unter http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/led-home/professionelles-wissen/led-grundlagen/lichtfarben/index.jsp, zuletzt aktualisiert am 26.06.2012, zuletzt geprüft am 17.10.2014.
- PHILIPS (2014):** General Booklet - Philips LED-lighting in horticulture. Online verfügbar unter http://www.lighting.philips.de/pwc_li/main/shared/assets/downloads/pdf/horticulture/leaflets/general-booklet-philips-led-lighting-in-horticulture-DE.pdf, zuletzt aktualisiert am 23.01.2014, zuletzt geprüft am 17.10.2014.
- Pilgrim, A. J.; Johnson, S. P. (1962):** Investigation of selected Higher Plants as Gas Exchange Mechanisms for Closed Ecological Systems. Hg. v. The Boeing Company. Aerospace Medical Research Laboratories, Ohio (Technical Documentary Report). Online verfügbar unter <http://handle.dtic.mil/100.2/AD0296950>.
- Puttkamer, Jesco von (1987):** Der Mensch im Weltraum. E. Notwendigkeit. Frankfurt am Main: Umschau.
- Roach, W. A.; Neve, R.; Vanstone, F. H.; Philcox, H. J.; Delap, A. V.; Ford, E. M. (1957):** A Method of Growing Apple Trees by Spraying their Roots with Nutrient Solution. In: *Journal of Horticultural Science* (32), S. 85–98, zuletzt geprüft am 25.08.2014.
- Rueß, F. (2009):** Apfelsorten mit Säulenwuchs bald auch im Erwerbsanbau? Hg. v. Infodienst - LVWO Weinsberg. Online verfügbar unter <http://www.lvwo-bw.de/pb/,Lde/670878?LISTPAGE=670786>, zuletzt aktualisiert am 01.01.2015, zuletzt geprüft am 28.05.2015.
- Rühmer, T. (2010):** Apfelsorten mit Säulenwuchs. Ergebnisse aus der Sortenprüfung in Haidegg. Hg. v. Lebensressort Steiermark. Online verfügbar unter http://www.agrar.steiermark.at/cms/dokumente/11302381_13888112/16da0758/2010-01%20Apfelsorten%20mit%20S%C3%A4ulenwuchs.pdf, zuletzt geprüft am 19.05.2015.
- Salisbury, F. B. (1991):** Lunar Farming: Achieving Maximum Yield for the Exploration of Space. In: *HortScience* 26 (7), S. 827–833.
- Spethmann, W. (2007):** Increase of rooting success and further shoot growth by long cuttings of woody plants. In: *Propagation of Ornamental Plants - An international Journal*, Vol. 7 (3), S. 160–166.
- Storck, H. (Hg.) (1994):** Taschenbuch des Gartenbaues. Informationen und Entscheidungshilfen für den Betriebsleiter. 3., völlig Neubearbeitet Aufl. Stuttgart (Hohenheim): E. Ulmer.
- Tantau, H. J. (2014):** Ist LED-Belichtung wirtschaftlich? Steigerung der Effizienz notwendig. In: *Gemüse* 50, 2014 (1), S. 10–14.
- Tibbits, T. W.; Alford, D. K. (1982):** Controlled Ecological Life Support System. Use of Higher Plants. Hg. v. NASA, zuletzt geprüft am 31.07.2014.
- Trejo-Telléz, L. I.; Gómez-Merino, F. C. (2012):** Nutrient Solutions for Hydroponic Systems. In: Toshiki Asao (Hg.): *Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches*: InTech, S. 1–23. Online verfügbar unter <http://www.intechopen.com/books/hydroponics-a-standard-methodology-for-plant-biological-researches/nutrient-solutions-for-hydroponic-systems>.
- Tromp, J.; Webster, A. D.; Wertheim, S. J. (2005):** Fundamentals of temperate zone tree fruit production. Leiden: Backhuys.
- van Lune, P.; Van Goor, B. J. (1975):** A method of growing young fruiting apple trees in water culture. In: *Journal of Horticultural Science* (50), S. 129–133. Online verfügbar unter <http://edepot.wur.nl/218410>, zuletzt geprüft am 25.08.2014.

Van Nocker, S.; Gardiner, S. E. (2014): Breeding better cultivars, faster: applications of new technologies for the rapid deployment of superior horticultural tree crops. In: *Hortic. Res.* 1, S. 14022. DOI: 10.1038/hortres.2014.22.

Wada, K. C.; Takeno, K. (2010): Stress-induced flowering. In: *Plant Signaling & Behavior* 5 (8), S. 944–947. Online verfügbar unter http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3115168/pdf/psb0508_0944.pdf, zuletzt geprüft am 23.06.2015.

Zabel, P.; Bamsey, M.; Schubert, D.; Tajmar, M. (2014): Review and analysis of plant growth chambers and greenhouse modules for space. 44th International Conference on Environmental Systems. Tucson, Arizona.

Zabelpitz, C. v. (1986): Gewächshäuser. Planung und Bau. Stuttgart: Ulmer.

9 Bildquellenverzeichnis

- [1] **Waugh, F. A. (2011):** Dwarf Fruit Trees. Their propagation, pruning, and general management, adapted to the United States and Canada. Hg. v. The Project Gutenberg.
- [2] **Modifiziert nach: Eckart, P. (1996):** Spaceflight life support and biospherics. Torrance, Calif., Dordrecht, Boston: Microcosm Press; Kluwer Academic (Space technology library, v. 5).
- [3] **Klumpp, T.; Lubitz, L. (2005):** Künstliche Biosphären. Bausteine und Beispiele für autarke Lebensräume. Projektarbeit, Stuttgart. Fakultät für Architektur und Stadtplanung.
- [4] **Siehe Eckart, P. (1996)**
- [5] **Schubert, D.; Quantius, D.; Hauslage, J.; Glasgow, L.; Schröder, F.-G.; Dorn, M. (2011):** Advanced Greenhouse Modules for use within Planetary Habitats. 41st AIAA International Conference on Environmental Systems. Portland, Oregon, USA, 17.07.2011.
- [6] **li.: NASA – JSC;** Online verfügbar unter http://crgis.ndc.nasa.gov/historic/File:1962_FoodKit.jpg.
re.: NASA – JSC; Online verfügbar unter http://www.nasa.gov/audience/formedia/presskits/spacefood/gallery_jsc2003e63875.html.
- [7] **li.: NASA/Gioia Massa;** Online verfügbar unter <http://www.nasa.gov/sites/default/files/veg1.jpg>.
re.: NASA – JSC; Online verfügbar unter <http://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/iss039e019407.jpg>.
- [8] **li.: Wheeler, R. M.; Sager, J.C. (2006):** Crop Production for Advanced Life Support Systems. Purdue University (Technical Reports, Paper 1). Online verfügbar unter <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=nasatr>.
re.: https://volcania.files.wordpress.com/2011/07/si-biosphere.jpg?w=479
- [9] **li.: Sadler, P.; Giacomelli, G.; Furfaro, R.; Patterson, R.; Kacira, M. (2009):** Prototype BLSS Lunar Greenhouse. Warrendale, PA: SAE International.
re.: http://research.ufl.edu/publications/explore/past/spring2008/story_1/images/HMP-2004-ACMG-Pan_cmyk.jpg
- [10] **li.: http://terrano-agrar.de/a/terrano-agrar/s/image_plus/gx/ft_1-FT1.jpg**
re.: http://www.hydroponics.com.au/images/story_i58/10_Mars_Wheat.jpg
- [11] **Göhler, F.; Molitor, H.-D; Roth, K. (2002):** Erdelose Kulturverfahren im Gartenbau ; 111 Tabellen. Stuttgart: Ulmer.
- [12] **vgl. Göhler, F.; Molitor, H.-D; Roth, K. (2002);**
u.r.: Alexander, T.; Parker, D. (1994): The best of The growing edge. Corvallis, Or: New Moon Pub.
- [13] **Schorr, S. M.; Stoner, L. (1985):** Method and apparatus for aeroponic propagation of plants. Veröffentlichungsnr: 4514030.
- [14] http://academic.keystone.edu/jskinner/Limnology/Light_9.gif
- [15] **Tantau, H. J. (2014):** Ist LED-Belichtung wirtschaftlich? Steigerung der Effizienz notwendig. In: *Gemüse* 50, 2014 (1), S. 10–14.

[16] Roach, W. A.; Neve, R.; Vanstone, F. H.; Philcox, H. J.; Delap, A. V.; Ford, E. M. (1957): A Method of Growing Apple Trees by Spraying their Roots with Nutrient Solution. In: *Journal of Horticultural Science* (32), S. 85–98.

[17] re.: http://www.ecat.lighting.philips.de/l/oem/led-systems/led-horticulture/greenpower-led/929000487403_eu/

IV Anhang

Experimentelle Forschungseinrichtungen

Projekt/ Testanlage	Schwerpunkt	Ort	Jahr
University of Logan Institute of Biomedical Problems	Sortenzüchtung für kontrollierte Umweltbedingungen; Untersuchung zu Gravitropismus und Mikrogravitation	USA (Utah) Russland (Moskau)	1995 – 1997 1996 – 1997
NASA Ames Research Center	Forschungseinrichtung für Astrobiologie; Entwicklung und Test von Modulen für ISS	USA	1990
Kennedy Space Center (KSC) [BLSS]	Biomass Production Chamber (BPC): Pflanzenkammer mit geschlossener Atmosphäre für Test versch. Nutzpflanzen	USA	seit 1985
Johnson Space Center (JSC) [ALS] - Lunar-Mars Life Support Test Projekt - BIO-plex	Forschung und Entwicklung von Transit- und planetaren Nahrungssystemen	USA	1995 – 1997 1999
Institute of Physics (Krasnoyarsk) - Ground Experimental Complex - BIOS 2 - BIOS 3	Geschlossenes Ökosystem mit Testpersonen und Pflanzen; Test von Lebenserhaltungssystemen	Russland	1968 1968 – 1969 1974 – 1985
MIR Space Station (Russische Weltraumagentur) Svet	Weltraumstation (3te-Generation) Pflanzen-Experimente in Mikrogravitation	Russland	1995 – 1997
MELISSA - ESA	Technologieentwicklg. für künstl. Ökosysteme in bemannten Raumfahrtmissionen; Test von Mikroorganismen und Höheren Pflanzen	EU und Kanada	
Closed Ecology Experiment Facility (CEEF)	Halb geschlossenes Habitat mit kontrollierten Umweltbedingungen für Studien zu Gemüsearten und Reis	Japan	1977
Biosphere 2	Geschlossenes System/ Habitat mit repräsentativen Organismenkombinationen aus Mensch, Pflanze und Tier	USA	1984

*Arthur Clarke Mars Greenhouse	Experimentelle Testeinrichtung/ Gewächshaus für Pflanzenexperimente unter marsähnlichen Bedingungen	Kanada (Devon Island)	seit 2002
*Canadian Space Agency Development Greenhouse	Versuchsgewächshaus für das Arthur Clarke Mars Gewächshaus	Kanada (Quebec)	seit 2007
McMurdo Greenhouse	Gewächshaus in Antarktis für zusätzliche Nahrungsversorgung der Forschungsstation	Antarktis	seit 1988
DLR - EDEN Initiative	Entwicklung von Strategien für Bioregenerative Lebenserhaltungssysteme; Testlabor mit Höheren Pflanzen	Deutschland	seit 2011

Quelle: vgl. Horneck und Schauer, 2001;*vgl. Bamsey et al. 2009, modifiziert

Tab. 11 – Auflistung verschiedener Testanlagen für extraterrestrische Habitate