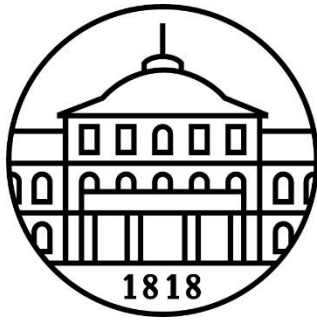




UNIVERSITÄT HOHENHEIM

Bachelorarbeit

**Einfluss der Lichtintensität bei gleichbleibender
Nitratgabe auf die Kalium- und Kalziumaufnahme von
hydroponisch-wachsenden Tomaten**

Fakultät Agrarwissenschaften

Institut für tropische Agrarwissenschaften (Hans-Ruthenberg-Institut)

Fachgebiet Wasserstress-Management bei Kulturpflanzen in den
Tropen und Subtropen (490g)

Prof. Dr. Folkard Asch

Emilia Maria Fischer

Studiengang: Agrarbiologie

März bis Juli 2022

Danksagung

Ich möchte mich vor allem bei meiner Betreuerin Theresa Detering für ihre gute Anleitung und Betreuung während meiner Bachelorarbeit bedanken. Ebenfalls gilt mein Dank Julia Asch für die Sicherheits- und Geräteeinweisung im Labor. Auch möchte ich Hemanth Kumar für die Messungen und die Unterstützung danken. Mein Dank gilt ebenso Prof. Dr. Folkard Asch für die Ermöglichung dieser Arbeit.

Zuletzt möchte ich noch meiner Familie und meinen Freunden danken, die mich während des Studiums stets ermutigten. Besonders möchte ich mich bei Franziska Fischer, Kai Schwaderer und Jan Schwaderer bedanken, die diese Arbeit gelesen und so manchen Formfehler korrigiert haben.

Zusammenfassung

Die Wasserknappheit auf der Erde nimmt durch langanhaltende Dürren zu, wodurch Ernteauffälle immer öfter auftreten. Um der Dürre entgegenzuwirken ist die Landwirtschaft auf eine intensivere Bewässerung angewiesen, was die Trinkwassermenge und den Grundwasserstand enorm senkt.

Das Projekt *HypoWave+* beschäftigt sich mit dem wassersparenden Anbau von Tomaten- und Paprikapflanzen durch recyceltes Abwasser. Diese Bachelorarbeit entstand aus dem Experiment der Doktorandin Theresa Detering, die mit dem Projekt *HypoWave+* zusammenarbeitet. Bei ihren Untersuchungen bezüglich den optimalen Wachstumsbedingungen von Tomatenpflanzen zeigte die Sorte *Moneymaker* Auffälligkeiten im Blattwachstum, da sich die Blätter einrollten.

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss von zwei unterschiedlichen Lichtintensitäten auf die Aufnahme von Kalium und Kalzium der Tomatensorte *Moneymaker*. Die beiden Nährstoffe erfüllen in den Blättern wichtige Aufgaben im Bereich der Zellstabilität und könnten für das auffällige Wachstum verantwortlich sein. Hierfür wurden je sechs hydroponisch wachsende Tomatenpflanzen einer hohen und einer niedrigen Lichtintensität ausgesetzt. Im Anschluss wurden aus den gesammelten Trockenproben der Pflanzen die Kalium- und Kalziumgehalte gemessen. Die Pflanzen zeigten je nach Lichtbehandlung Unterschiede im Wachstum. Außerdem wurden in dieser Arbeit die Nährstoffverteilungen zwischen den Pflanzenteilen (Blatt, Blattstiel und Stängel) und den Wachstumsabschnitten analysiert.

Die Ergebnisse zeigten zwischen der Behandlung mit viel und mit wenig Licht nur einen geringen Unterschied in der Wuchshöhe, der Frischmasse und der Blattfläche. Die Analyse der Trockenmasse zeigte erkennbar höhere Werte bei der Behandlung mit viel Licht. Ein Unterschied zwischen der Verteilung der beiden Nährstoffe Kalium und Kalzium in der Tomatenpflanze aufgrund der Lichtstärke konnte nicht festgestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

I.	Abbildungsverzeichnis.....	I
II.	Tabellenverzeichnis.....	II
III.	Abkürzungsverzeichnis.....	III
1.	Einleitung.....	1
2.	Theorie	3
2.1	Licht.....	3
2.2	Kalium	4
2.3	Kalzium.....	5
3.	Material und Methoden.....	6
3.1	Aufbau des Experiments.....	6
3.2	Pflanzenmaterialien	7
3.3	Nährlösung.....	8
3.4	Umwelteinflüsse	10
3.4.1	Lichtverhältnisse während des Versuchs.....	10
3.4.2	Temperaturverhältnisse während des Versuchs	11
3.5	Messungen.....	12
3.5.1	Tägliche Messungen.....	12
3.5.2	Probennahmen	13
3.5.3	Ermittlung des Kalium- und Kalziumgehaltes	13
3.5.1	Statistische Analyse und Grafiken.....	15
4.	Ergebnisse	15
4.1	Morphologische Unterschiede	15
4.1.1	Auswirkungen der Lichtintensität auf Höhe, Frischmasse und Blattfläche .	16
4.1.2	Auswirkungen der Lichtintensität auf die Trockenmasse.....	17
4.1.3	Verteilung der Trockenmasse innerhalb der Blattabschnitte.....	18
4.2	Verteilung des Kaliums innerhalb der Pflanze	19
4.3	Verteilung des Kalziums innerhalb der Pflanze	21
4.4	Kalium-Kalzium-Verhältnis.....	23
5.	Diskussion.....	25
5.1	Morphologische Unterschiede	25
5.2	Nährstoffgehalte von Kalium und Kalzium in der Pflanze	26
5.3	Verteilung von Kalium und Kalzium in der Pflanze.....	27
6.	Fazit	29
8.	Literaturverzeichnis.....	30

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufbau eines Sets	7
Abbildung 2:	Nitratkonzentration der Nährlösung	10
Abbildung 3:	Lichtverhältnisse	11
Abbildung 4:	Temperaturverlauf	12
Abbildung 5:	Blattflächenmessgerät mit Blatt	13
Abbildung 6:	Analyse im Labor	15
Abbildung 7:	Morphologische Unterschiede	16
Abbildung 8:	Trockenmasse und Trockenmasseanteile	17
Abbildung 9:	Trockenmasse der Blattabschnitte	18
Abbildung 10:	Kaliumgehalt pro Pflanzenteil	19
Abbildung 11:	Kaliumgehalt pro Blattabschnitt	20
Abbildung 12:	Kalziumgehalt pro Pflanzenteil	21
Abbildung 13:	Kalziumgehalt pro Blattabschnitt	22
Abbildung 14:	Verteilung und Verhältnis von Kalium und Kalzium	24

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitlicher Ablauf des Versuchs	6
Tabelle 2: Rezept der Nährlösung	8
Tabelle 3: Nährstoffkonzentrationen der Nährlösung	9
Tabelle 4: Tiny Tag Messwerte	11
Tabelle 5: Kaliumgehalte Literaturvergleich	26
Tabelle 6: Kalziumgehalte Literaturvergleich	26

III. Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
cm	Zentimeter
cm ²	Quadratzenimeter
DAT	Tage nach dem Transplantating (Days after Transplantating)
Ec	Elektrische Leitfähigkeit
g	Gramm
L	Liter
mg	Milligramm
min	Minuten
ml	Milliliter
NL	Nährlösung
SL	Stammlösung
TM	Trockenmasse

1. Einleitung

Der Klimawandel und die daraus folgende regionale Wasserknappheit in vielen Gebieten dieser Erde machen den Anbau von Kulturpflanzen immer schwieriger. Auch in Deutschland sind ertragreiche Ernten keine Selbstverständlichkeit mehr. Aufgrund von extremer, langanhaltender Hitze kommt es immer häufiger zu Ernteeinbußen. Die weltweite landwirtschaftliche Produktion ist dadurch auf eine intensivere Bewässerung angewiesen. Folgen des erhöhten Wasserverbrauchs zeigen sich vor allem in der Reduzierung der Grund- und Trinkwassermengen. Weltweit gehen 70 % des Wasserverbrauchs auf die landwirtschaftliche Produktion zurück. Auch werden unsere Gewässer durch die fortschreitende Urbanisierung und Verschmutzung mit z.B. Abwasser und Düngemittel immer weiter verunreinigt (Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH).

Das Verbundprojekt *HypoWave+* unter der Leitung der Technischen Universität Braunschweig untersucht neue landwirtschaftliche Anbauformen mit einem reduzierten Wasserverbrauch. Der Trinkwasserverbrauch soll bei den Anbauformen von *HypoWave+* durch die Verwendung von recyceltem Abwasser aus Kläranlagen reduziert werden. Bei der neuen Anbauform stehen die Kulturpflanzen in hydroponischen Gefäßen ohne Erde und werden kontinuierlich mit einer Nährlösung aus aufbereitetem Abwasser versorgt. Derzeit planen die Entwickler*innen des Projekts mit dieser Anbauform die Produktion von Tomaten und Paprikas. In Zeiten des Klimawandels eröffnet diese Anbaumethode Landwirt*innen eine neue Möglichkeit, Erntegüter wasserschonend zu produzieren. Die Pflanzen entnehmen nur Wasser aus dem System und es geht kein Wasser durch Versickerung oder Verdunstung verloren. Durch den Anbau von Nutzpflanzen in Gewächshäusern ist auch eine ganzjährige Kultivierung möglich. Zudem wird die Abwasserqualität verbessert, da die Pflanzen überschüssige Nährstoffe entziehen (Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH 2022).

Grundlage für diese Bachelorarbeit ist ein Experiment der Doktorandin Theresa Detering. Sie untersucht im Rahmen des Projekts *HypoWave+* optimale Wachstumsbedingungen verschiedener Gemüsepflanzen unter Verwendung niedrig konzentrierter Nährlösung. In ihrem Experiment erforschte sie vier Tomatensorten unter dem Einfluss verschiedener Luftfeuchtigkeiten. Die Sorte *Moneymaker* zeigte dabei Auffälligkeiten in der Ausbildung der Blätter, die sich nach unten eindrehen. Die Bachelorarbeit diente dazu, weitere Daten und Informationen über die Nährstoffaufnahmedynamiken von Kalium und Kalzium der Tomatensorte *Moneymaker* unter dem Einfluss zweier verschiedener Lichtintensitäten zu

sammeln. Kalzium ist maßgeblich an der Stabilisierung von Zellmembranen und dem Aufbau von Zellwänden, insbesondere in meristematischen Geweben, beteiligt (Kirkby und Pilbeam 1984, S. 400). Kalium nimmt hinsichtlich des mengenmäßigen Bedarfs der Pflanzen die Spitzenposition unter den Nährelementen ein (Pujos und Morard 1997, S. 189), weshalb diese zwei Nährstoffe untersucht wurden. Auffälligkeiten in der Kalium- und Kalziumdynamik könnten die Ursache für das auffällige Blattwachstum sein. Aufbauend auf den gesammelten Daten dieser Bachelorarbeit können neue Versuche zu diesem Thema entwickelt werden.

Die Tomate (*Solanum lycopersicum*) ist eine weltweit verbreitete Kulturpflanze und eine der wichtigsten Pflanzen aus der Familie der Nachtschattengewächse (*Solanaceae*), sowie eine der wichtigsten Gemüsearten der Welt. Sie wird in tropischen, subtropischen und gemäßigten Gebieten angebaut und ist als äußerst nahrhaftes Lebensmittel anerkannt (Zubeda et al. 2010, S. 155). Unter den verschiedenen Gemüsepflanzen, die als Gewächshauskulturen angebaut werden, steht die Tomate an erster Stelle (Porter 1937, S. 225). Tomaten gelten nicht nur als beliebteste Gemüsepflanze, sondern sind auch mit 4.7 Millionen Hektar das am meisten angebaute Gemüse weltweit. Darüber hinaus sind sie durch ihren einfachen Anbau eine der am meisten untersuchten fleischigen Früchte und werden häufig als Modellpflanze in der Forschung verwendet (Schwarz et al. 2014, S. 1).

2. Theorie

2.1 Licht

Licht gehört zu den wichtigsten Umweltfaktoren für die Entwicklung einer Pflanze. Dabei spielt die Intensität des Lichts für das Wachstum und die Entwicklung eine entscheidende Rolle. Eine steigende Lichtintensität korreliert bis zu einem bestimmten Optimum positiv mit der Netto-Fotosyntheserate (Fan et al. 2013, S. 50). Jede Steigerung über dieses Optimum hinaus führt zu einem Rückgang der Rate (Popp 1926, S. 310). Unbeschattete Pflanzen haben also bis zu diesem Optimum einen höheren Grundumsatz als Pflanzen, die einer geringeren Lichtintensität ausgesetzt sind (Porter 1937, S. 242). So beschleunigt eine hohe Lichtintensität die Bildung und das Wachstum der Blätter (Hussey 1963, S. 316) und führt außerdem zu einer größeren Menge an Trockenmasse (Porter 1937, S. 233).

Wird das Optimum der Lichtintensität überschritten und die überschüssige Energie, die absorbiert wurde, kann nicht abgeleitet werden, verringert sich die Effizienz der Fotosynthese. Dies kann zur Photoinhibition und sogar zu Schädigungen des Fotosyntheseapparats führen (Fan et al. 2013, S. 54). Bei Lichtstress verringert die Pflanze daher die Blattfläche und vergrößert ihre Blattdicke. So kann sie sich vor hoher Bestrahlungsstärke und den daraus entstehenden Lichtschäden schützen und den Fortgang der Fotosynthese gewährleisten (Fan et al. 2013, S. 50).

Auch eine zu geringe Lichtintensität kann zu einer Vergrößerung der spezifischen Blattfläche (Magalhaes und Wilcox 1983, S. 859), einer starken Zunahme der Hypokotyllänge und somit der Pflanzenhöhe führen (Fan et al. 2013, S. 50). Die Steigerung der spezifischen Blattfläche maximiert die Nutzung des verfügbaren Lichts, um den Bedarf für die Photosynthese zu decken. Eine große spezifische Blattfläche bedeutet, dass Blätter mit einer großen Oberfläche im Verhältnis zur Biomasse gebildet werden (Steinger et al. 2003, S. 313).

2.2 Kalium

Kalium ist ein wichtiger Makronährstoff, der von den Pflanzen in beträchtlichen Mengen benötigt wird (Pujos und Morard 1997, S. 189). Kalium wird über die Wurzelzellen aus dem Boden aufgenommen und symplastisch bis zum Xylem transportiert. Dort wird es im Xylemstrom, angetrieben durch den Wurzeldruck und die Transpiration der Blätter, in den Spross transportiert. Dort angekommen, kann es entweder vor Ort in den Zellen Verwendung finden oder ins Phloem geladen werden. Das Phloem befördert das Kalium zu den apikalen Meristemen, wo es für das Wachstum benötigt wird (Schubert 2018, S. 68).

Kalium erfüllt in der Pflanze wichtige Aufgaben. Zu den osmotischen Funktionen gehören das Öffnen und Schließen der Stomata, wodurch der Wasserhaushalt in der Pflanze reguliert wird. Ein Einstrom von Kaliumionen führt zu einer Öffnung und ein Ausstrom von K^+ zum Schließen der Stomata (Amberger 1988, S. 203). Außerdem senkt es das osmotische Potential in den Wurzelzellen und im Xylem, was die Aufnahme von Wasser und den Aufbau des Wurzeldrucks ermöglicht. Kalium ist außerdem beteiligt an der Phloembeladung und dem massenflussgetriebenen Assimilationstransport im Phloem (Schubert 2018, S. 33). Des Weiteren übernimmt Kalium wichtige Aufgaben bei der Enzymaktivierung. Viele Enzyme, wie die der Translation bei der Proteinbiosynthese, sind auf die Aktivierung von Kalium angewiesen (Schubert 2018, S. 33–34).

Der Transport von Kalium innerhalb der Pflanze erfolgt aufgrund geringer Bindungsstärke und kleiner Hydrathülle des Ions sehr schnell. Kalium akkumuliert durch K^+ -spezifische Kanäle im Cytosol der Zelle, was den Zelldruck aufrecht hält. Eine wichtige Eigenschaft von Kalium ist die unbehinderte Bewegung in akropetaler und basipetaler Richtung. So kann bei einem Kaliummangel das Kalium in den älteren Blättern mobilisiert werden und durch die gute Verlagerung im Phloem in wachsende Blätter überführt werden. Die Folge davon sind oft Blattchlorosen an den älteren Blättern (Amberger 1988, S. 202–203). Weitere Symptome von Kaliummangel sind eine verringerte Wachstumsrate und das Welken von Blättern, was an einen Wassermangel erinnert (Pujos und Morard 1997, S. 189).

2.3 Kalzium

Kalzium, ebenfalls ein wichtiger Makronährstoff für Pflanzen, weist in der Bodenlösung eine zehnmal höhere Konzentration auf als Kalium (Kirkby und Pilbeam 1984, S. 397). Allerdings ist die Kaliumaufnahme deutlich effizienter als die Kalziumaufnahme, was die erheblich geringeren Kalziumgehalte in der Pflanze erklärt (Amberger 1988, S. 211). Anders als bei Kalium, das in hohen Konzentrationen im Cytosol vorkommt, wird der Kalziumgehalt im Cytosol durch Ca^{2+} -Pumpen geringgehalten. Hohe Konzentrationen dieses Nährstoffs finden sich im Apoplasten, in Vakuolen, Mitochondrien und im Endoplasmatischen Retikulum (ER). Dies ermöglicht in sehr kurzer Zeit eine große Änderung der freien Ca^{2+} -Konzentration, was zur Weitergabe von Informationen innerhalb der Zelle dient. Aufgrund dieser Funktion wird Kalzium auch als sekundärer Botenstoff bezeichnet (Schubert 2018, S. 35). Eine der wichtigsten Bedeutung von Kalzium ist die Stabilisierung von Zellmembranen und der Aufbau von Zellwänden (Röber 2008, S. 157). Kalzium vernetzt in der Zellwand freistehende Carboxylgruppen der Pektine, was die Porengröße der Zellwand bestimmt und auch bei der Abwehr von Pathogenen wichtig ist (Schubert 2018, S. 35). Einkeimblättrige Pflanzen haben einen viel geringeren Bedarf an Kalzium als Zweikeimblättrige, da ihre Zellwände aus sehr viel weniger Pektin bestehen. Weitere Prozesse, bei denen Kalzium eine wichtige Rolle spielt, sind das Wachstum meristematischer Gewebe und die Zellstreckung (Amberger 1988, S. 214).

Kalzium ist in der Pflanze schlecht beweglich. Der Transport erfolgt größtenteils in akropetaler Richtung im Xylem und nur zu einem sehr geringen Teil im Phloem (Kirkby und Pilbeam 1984, S. 397). Da die Bewegung des Xylemstroms von der Transpiration angetrieben wird, sind ältere Blätter reicher an Kalzium, bedingt dadurch, dass sie am meisten transpirieren. Außerdem kann das eingelagerte Kalzium in den älteren Blättern, im Gegensatz zu Kalium, nicht mehr mobilisiert werden, da es im Phloem nur sehr schlecht mobil ist. Aufgrund der schlechten Kalziummobilisierung und der geringen Transpiration von jungen Blättern und Früchten, ist der Kalziummangel dort zuerst erkennbar. Eine hohe Luftfeuchtigkeit im Gewächshaus führt ebenfalls zu einer geringen Transpiration und kann somit ebenfalls einen Kalziummangel auslösen (Amberger 1988, S. 112). Bei Kalzium tritt häufig ein physiologischer Mangel auf. Das bedeutet, dass die Nährstoffaufnahme ausreicht, aber die Verlagerung innerhalb der Pflanze nicht möglich ist (Schubert 2018, S. 36). Ein Kalziummangel führt zu undichten Membranen, wodurch gelöste Stoffe aus dem Cytoplasma verloren gehen (Kirkby und Pilbeam 1984, S. 400). Weitere typische Mangelsymptome sind das Absterben meristematischer Gewebe im Spross und die Fruchtfäule (Schubert 2018, S. 36).

3. Material und Methoden

Für einen besseren Überblick über den Versuch ist der zeitliche Verlauf in der untenstehenden Tabelle 1 dargestellt. Das Experiment dauerte 30 Tage. Die Tage werden immer in Tage nach dem Umsetzen der Pflanze in die Hydrokultur (Transplanting) gezählt (DAT).

Tabelle 1: Zeitlicher Ablauf des Versuchs

Für jede Aktivität ist das Datum und der Tag nach dem Transplanting (DAT) angegeben bis der Versuch zu Ende war (Tag 30)

Aktivität	Datum	DAT
Samen säen	15.02.2022	
Aufbau der Sets	10.03.2022	
Aufbau der Sets	13.03.2022	
Einrichten der Tinytags Transplanting Probennahme 0	14.03.2022	0
Lichtmessgeräte platziert	17.03.2022	3
Probennahme 1	19.03.2022	5
Probennahme 2	24.03.2022	10
Probennahme 3	29.03.2022	15
Probennahme 4 Nährlösung gewechselt	03.04.2022	20
Probennahme 5	08.04.2022	25
Probennahme 6 Abbau des Experiments	13.04.2022	30
Trockengewichte wiegen	25. - 26.04.2022	
Proben mahlen, filtrieren K-Gehalte mit Flammenphotometer ermitteln	16. – 20.05.2022	
Ca-Gehalte mit Flammenphotometer ermitteln	01.06.2022	

3.1 Aufbau des Experiments

Das Experiment wurde in dem Forschungsgewächshaus Phytotechnikum (PHT) der Universität Hohenheim durchgeführt.

Um für das Experiment zwei unterschiedliche Lichtintensitäten zu erhalten, wurden die Pflanzenlampen in verschiedene Höhen gehängt. Die beiden Bestrahlungsstärken wurden durch eine schwarze Plane voneinander getrennt. Das Experiment wurde insgesamt mit 12 Tomatenpflanzen durchgeführt. Ein Set mit jeweils sechs Pflanzen wurde einer hohen

Lichtintensität (Set 1) und das andere einer niedrigen Lichtintensität (Set 2) ausgesetzt. Der Unterschied der zwei Bestrahlungsstärken und die dazu gemessenen Werte werden im Abschnitt 3.4 Umwelteinflüsse näher erläutert. Ein Set, wie in Abbildung 1 zu sehen, bestand aus den sechs Tomaten, die in separaten Boxen stehen, einer Mischbox und einem 60 Liter Fass, das mit der Nährlösung gefüllt ist. Eine Pumpe im Fass befördert die Nährlösung in die Boxen mit den Tomatenpflanzen. Über einen, am Ende der Pflanzenboxen befindlichen Ablauf, gelangte die überschüssige Nährlösung in die Mischbox, welche wiederum mit dem Fass verbunden war. So entstand ein Kreislauf in welchem die Nährlösung mit einer Fließgeschwindigkeit von $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ zirkulierte. Insgesamt befinden sich ca. 104 Liter Flüssigkeit in einem System.

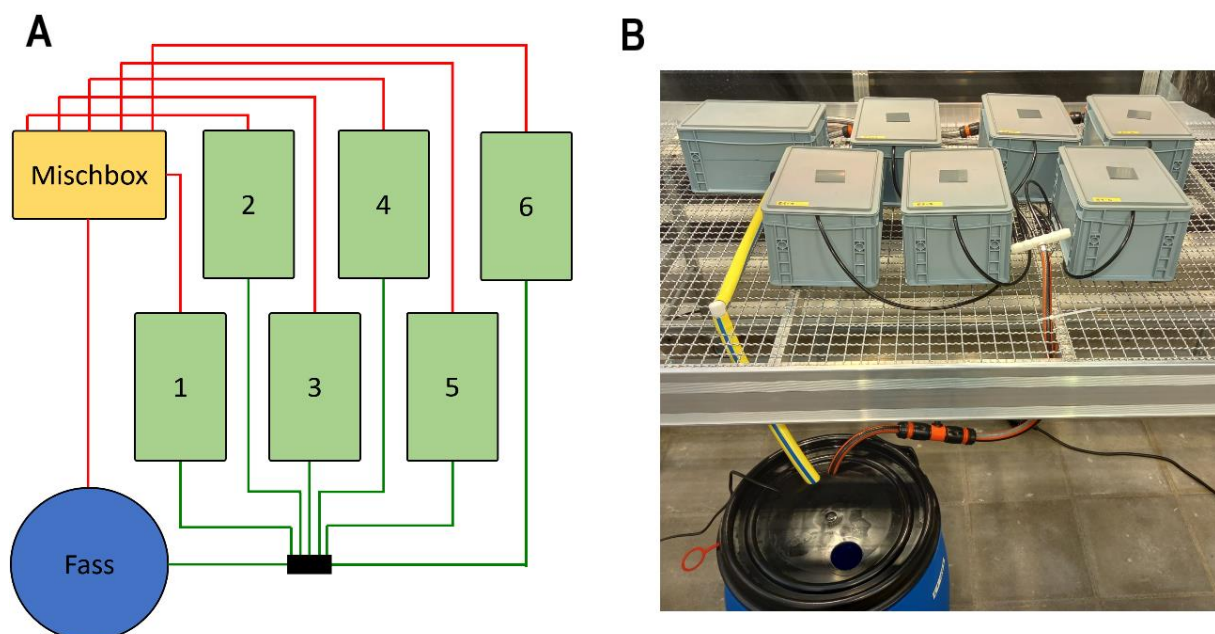


Abbildung 1: Aufbau eines Sets

Der Aufbau eines Sets als Schematische Darstellung (A) und der Aufbau im Gewächshaus (B)

3.2 Pflanzenmaterialien

Tomatensamen der Sorte *Moneymaker* wurden am 15. Februar 2022 in Plastikanzuchtöpfe gesät. Als Substrat diente hierbei Sand. Nach 27 Tagen wurden jeweils sechs homogene Pflanzen in ein System mit hoher und ein System mit niedriger Lichtintensität umgesetzt. Das Umsetzen der Pflanzen wird im Folgenden als Transplanting bezeichnet. Weitere drei Pflanzen wurden direkt beprobt.

3.3 Nährlösung

Die Nährlösung wurde im Vorhinein im Labor hergestellt. Hierfür diente das Rezept von De Kreij et al. als Vorlage, das jedoch im weiteren Verlauf modifiziert wurde (Kreij et al. 2003). Wie in Tabelle 2 zu sehen, wurden für die Nährlösung mehrere Stammlösungen (A bis H) verschiedener Salze und Mikronährstoffe hergestellt. Die Reagenzien wurden entsprechend der fünften Tabellenspalte in einen Messkolben eingewogen und anschließend mit deionisiertem Wasser auf einen Liter aufgefüllt.

Tabelle 2: Rezept der Nährlösung

Zusammensetzung der Nährlösung mit den Stammlösungen (SL) A-H, den Reagenzien mit der Summenformel, dem Nährstoff, der bei diesem Reagenz interessant war und das Gewicht, das für einen Liter Stammlösung (SL) eingewogen wurde

SL	Reagenz	Summenformel	Nährstoff	SL [g/L]
A	Di-Ammoniumhydrogenphosphat	$(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$	NH ₄ , P	21
B	Kalziumnitrattetrahydrat	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$	Ca, NO ₃	490
C	Kaliumnitrat	KNO ₃	K, NO ₃	271
D	Kaliumsulfat	K ₂ SO ₄	K, S	60
E	Kaliumdihydrogenphosphat	KH ₂ PO ₄	K, P	90
F	Magnesiumsulfatheptahydrat	$\text{MgSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$	Mg, Cl	170
G	Calciumchloriddihydrat	$\text{CaCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$	Ca, Cl	21.5
	Kaliumchlorid	KCl	K, Cl	10
H	EDTA, Eisen-Natriumsalz Trihydrat	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{FeN}_2\text{NaO}_8$	Fe	5.3
	Mangansulfatmonohydrat	$\text{MnSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$	Mn	1.9
	Zinksulfat-7-hydrat	$\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	Zn	1.3
	Kupfersulfatpentahydrat	$\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$	Cu, S	0.25
	Ammoniumheptamolybdäntetrahydrat	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \times 4\text{H}_2\text{O}$	Mo, NH ₄	0.09
	Borsäure	H ₃ BO ₄	B	2.9

In Tabelle 3 sind die Konzentrationen der einzelnen Elemente und Ionen aufgelistet, die in einer 100-prozentigen Nährlösung vorkommen. Für das Experiment sollte eine 20-prozentige Nährlösung im 60 Liter Fass hergestellt werden, weshalb von jeder Stammlösung 12 mL in das Fass pipettiert wurden. Die daraus folgenden Konzentrationen der einzelnen Elemente sind in der dritten Spalte von Tabelle 3 veranschaulicht. Um den pH-Wert etwas anzusäuern, wurden außerdem circa 1,5 mL einer einmolaren Salzsäure hinzugegeben.

Tabelle 3: Nährstoffkonzentrationen der Nährlösung

Menge der Nährstoffe für eine 100-prozentige und eine 20-prozentige Nährlösung (NL)

Nährstoff	100% NL [mg/L]	20% NL [mg/L]
NO ₃	95.5	19.1
NH ₄	4.5	0.9
P	25.8	5.16
K	162.7	32.54
Ca	89	17.8
Mg	16.9	3.38
S	33.3	6.66
Cl	10	2
Fe	0.8	0.16
Mn	0.6	0.12
Zn	0.3	0.06
Cu	0.05	0.01
Mo	0.05	0.01
B	0.5	0.1

Um die verbleibende Nitratkonzentration in der Nährlösung der Systeme zu bestimmen, wurde jeden Tag eine 20 mL-Probe entnommen und mit dem *Technicon AutoAnalyzer II* im Labor analysiert. Sank die Nitratkonzentration von einem Set unter einen Wert von $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, wurde die gesamte Flüssigkeit aus allen Systemen gepumpt und wieder mit neuer Nährlösung befüllt. Dieser Vorgang wurde während des Experiments einmal nach 20 Tagen durchgeführt, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Der Nitratkonzentration des Systems, das unter hoher Bestrahlung stand (Set 1), sank nochmals am Tag 29 von 30 unter die Grenze von $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, jedoch wurde die Nährlösung nicht mehr ausgetauscht, da das Experiment fast abgeschlossen war. Die hydroponischen Systeme sollen als letzter Schritt in der Klärwasseraufbereitung genutzt werden, um die überschüssigen Nährstoffe zu entziehen. Die Nährlösung wurde deshalb so lange zirkuliert geführt bis der Nährstoff Nitrat den Grenzwert von $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ erreichte und die Nährlösung verarmt ist.

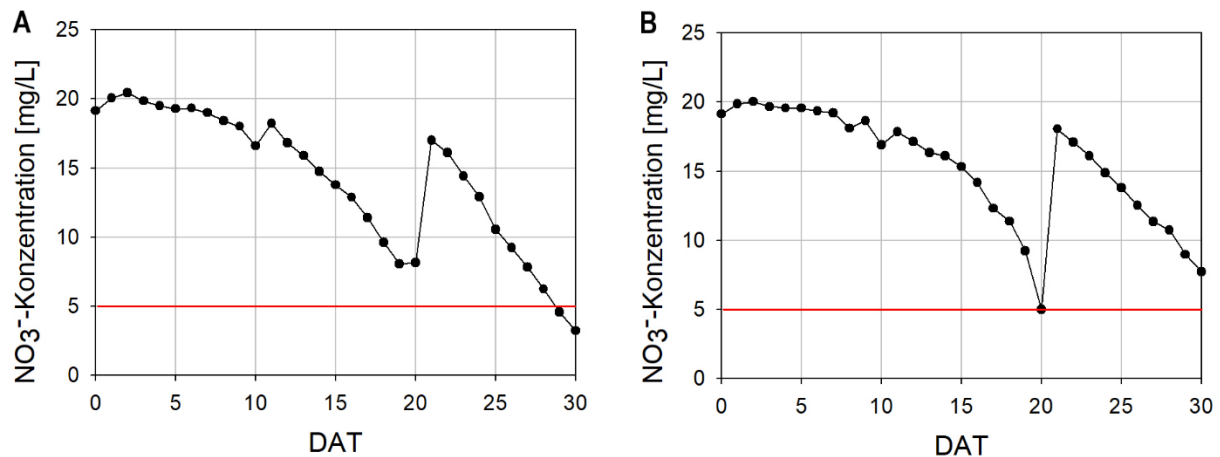


Abbildung 2: Nitratkonzentration der Nährlösung

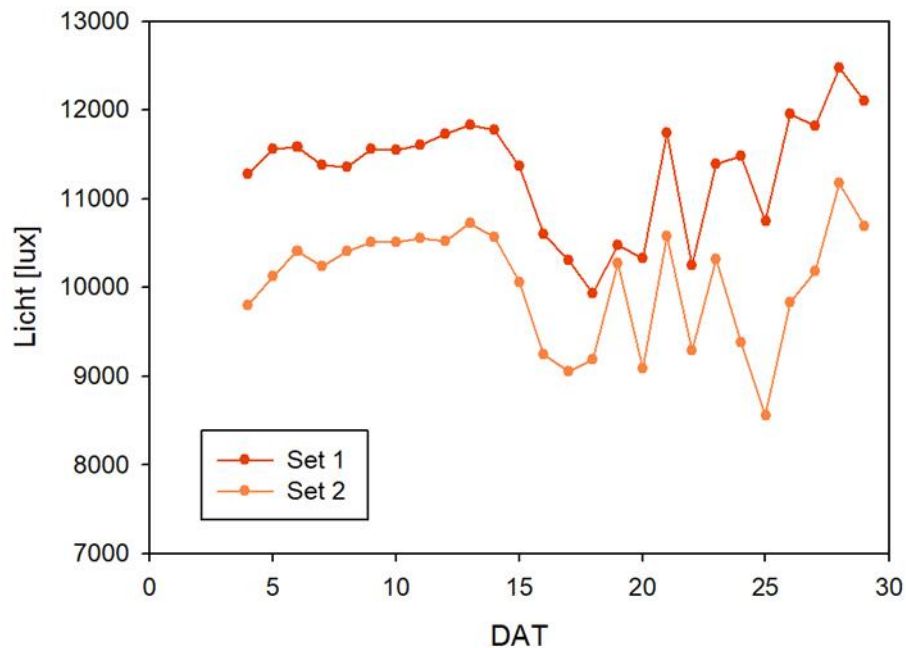
Nitratkonzentration der Nährlösung von Set 1 (A) und Set 2 (B) im zeitlichen Verlauf des Versuchs in Tage nach dem Transplant (DAT); die Grenze von $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Nitrat ist mit einer roten Linie gekennzeichnet

3.4 Umwelteinflüsse

3.4.1 Lichtverhältnisse während des Versuchs

Die Tomatenpflanzen wurden jeden Tag von 8:00 Uhr bis 22:00 Uhr von den Lampen beleuchtet. Bei den Lampen handelte es sich um Keramik-Metallhalogendampflampen mit sonnenähnlichem Lichtspektrum. Die Höhen der Lampen wurden den Gegebenheiten des Gewächshauses und der Wuchshöhe der Pflanzen angepasst. Sie wurden auf der Seite mit hoher Lichtintensität auf ungefähr 80 cm oberhalb der Kisten aufgehängt und auf der Seite mit niedriger Lichtintensität auf ca. 120 cm.

Die Lichtintensität wurde während des Experiments in einem Zeitintervall von fünf Minuten mit dem Datenlogger *HOBO Pendant MX Temp/Licht (MX2202)* aufgezeichnet. Da das Licht je nach Messstelle sehr unterschiedlich war, wurden bei jedem Set zwei HOBO Logger platziert, die jeweils links und rechts der Pflanzen auf Boxen lagen. Abbildung 3 zeigt das Tagesmittel der Lichtintensitäten für jedes Set. Da die Messgeräte erst am 17. März 2022 installiert und am letzten Tag des Experiments (Tag 30) früh ausgelesen wurden, werden in der Abbildung nur die Lichtintensitäten der Tage vier bis 29 dargestellt. Für die Mittelwerte wurden ausschließlich die Daten von 8:00 Uhr bis 22:00 Uhr verwendet. Set 1 zeichnet sich durch eine ca. 11 % höhere Lichtintensität aus. Aufgrund der unterschiedlichen Lichteinstrahlung innerhalb eines Sets wurden die Pflanzen jeden dritten Tag rotiert.

**Abbildung 3: Lichtverhältnisse**

Lichtverhältnisse von Set 1 und 2 im zeitlichen Verlauf in Tage nach dem Tansplanting (DAT)

3.4.2 Temperaturverhältnisse während des Versuchs

Die Temperatur wurde während des gesamten Experiments mit Datenloggern aufgezeichnet. Hierzu diente der *Tinytag Plus 2 TGP-4500*, der über seine integrierten Messfühler die Temperatur in einem Zeitintervall von fünf Minuten ermittelte. Um die Unterschiede zwischen den beiden Sets bezüglich der Umgebungstemperatur aufzunehmen, wurde je ein Tinytag über jedes Set im gleichen Abstand zu den untenstehenden Boxen gehängt. Ein weiterer Tinytag war in der Mitte des Gewächshauses aufgehängt. In der untenstehenden Tabelle 4 ist von jedem der drei Tinytags der minimale, der maximale und der durchschnittliche Messwert über die gesamte Zeit des Experiments zu sehen. In Abbildung 4 werden für die Höchst-, Durchschnitts- und Tiefsttemperatur die Tageswerte für Set 1 und Set 2 dargestellt. Die Temperaturverläufe von Set 1 und Set 2 unterscheiden sich nur geringfügig voneinander.

Tabelle 4: Tiny Tag Messwerte

Minimale, maximale und durchschnittliche Temperatur der Tiny Tags während des Versuchs

	Set 1	Set 2	Gewächshaus
Minimaler Messwert	15.8 °C	15.8 °C	15.2 °C
Maximaler Messwert	39.5 °C	37.4 °C	36.1 °C
Durchschnittlicher Messwert	23.6 °C	21.9 °C	20.9 °C

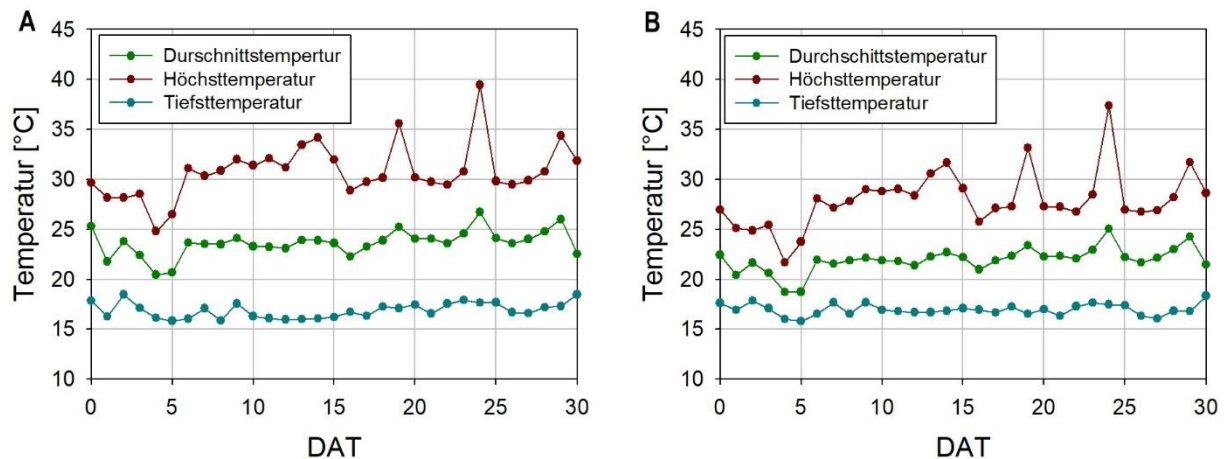


Abbildung 4: Temperaturverlauf

Durchschnitts-, Höchst- und Tiefsttemperatur im zeitlichen Verlauf in Tage nach dem Transplantieren (DAT) von Set 1 (A) und Set 2 (B)

3.5 Messungen

Die Messungen, die während des Experiments im Gewächshaus durchgeführt wurden, lassen sich in die täglichen Messungen und die Probennahmen unterteilen.

3.5.1 Tägliche Messungen

Jeden Tag wurde der Zustand der Tomatenpflanzen überprüft und vorhandene Triebe wurden ausgegeizt. Zu den täglichen Messungen gehörten die Entnahme von 20 mL Nährlösung aus der Mischbox und die Messung des Wasserstandes im Fass. Mit dem Taschengerät *ProfiLine pH/Cond 3320* wurde der pH-Wert, die Wassertemperatur und die elektrische Leitfähigkeit (Ec) in der Mischbox gemessen. Die Proben der Nährlösung wurden im Labor filtriert und mit dem *Technicon AutoAnalyzer II* konnte der Gehalt an Nitrat, Ammonium und Phosphat bestimmt werden. Für diese Arbeit ist nur der Nitratkonzentration in der Nährlösung von Interesse, um den Zeitpunkt des Nährlösungswechsels zu bestimmen, wie es in dem Abschnitt 3.3 Nährlösung beschrieben ist.

3.5.2 Probennahmen

Bei den Probennahmen wurde alle fünf Tage aus jedem Set eine Pflanze entnommen und vermessen. Dabei wurde die Pflanzenhöhe, das Frischegewicht von Spross und Wurzel und die Blattfläche gemessen. Zur Bestimmung der Blattfläche wurde der *LI-COR 3100 Area Meter* verwendet, der in Abbildung 5A dargestellt ist. Die Wurzel ist für diese Arbeit nicht von Interesse. Die Blätter mit den dazugehörigen Blattstielen sowie die Stängel wurden bei jeder Probennahme in Wachstumsabschnitte unterteilt. Die Blattstiele wurden wie in Abbildung 5B zu sehen vom Blatt abgetrennt. Das Experiment besteht aus den Probennahmen null bis sechs, also aus insgesamt sieben Wachstumsabschnitten. Die Tage, an denen eine Probennahme stattfand, sind in Tabelle 1 nachzulesen. Alle Blätter und Stängel, die zu einem Wachstumsabschnitt gehören, wurden in separate Tüten gepackt. Die Pflanzenteile wurden nach jeder Ernte für 48 Stunden im Trockenschrank bei einer Temperatur von 65 °C getrocknet. Insgesamt wurden bei den Probennahmen eins bis sechs zwölf Tomatenpflanzen aus beiden Sets beprobt. Drei weitere Pflanzen wurden am Tag des Transplanting (Probennahme 0) vermessen. Aus den Daten dieser drei Pflanzen konnte für jeden Wachstumsparameter ein Mittelwert für den ersten Wachstumsabschnitt gebildet werden.

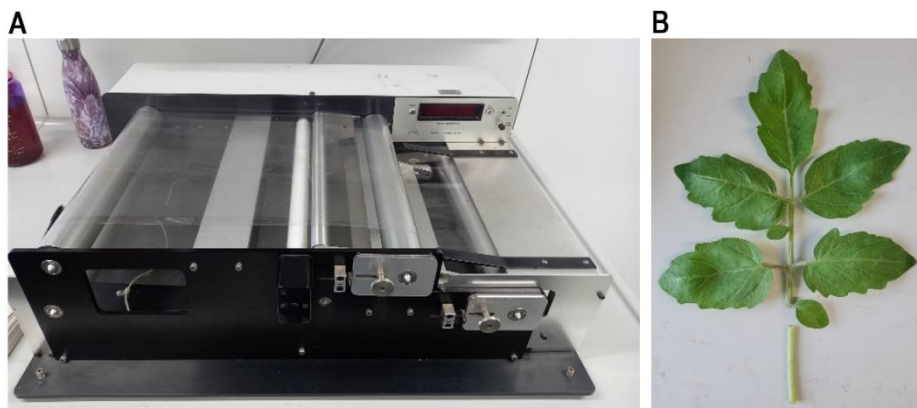


Abbildung 5: Blattflächenmessgerät mit Blatt

Blattflächenmessgerät (A), Blatt einer Tomate mit abgetrenntem Blattstiel (B)

3.5.3 Ermittlung des Kalium- und Kalziumgehaltes

Die weiteren Analysen fanden nach Beendigung des Experiments im Labor statt. Bevor die Trockenproben gewogen werden konnten, wurden diese über Nacht in den Trockenschrank bei 65 °C gelegt und anschließend in einem Exsikkator abgekühlt. Nach dem Wiegen wurden die Proben nach ihrem Gewicht in unterschiedliche Kategorien eingeteilt. Pflanzenteile, die unter 0.05 g wogen, waren für die Extraktion zu klein und wurden deshalb für die weiteren Analysen

aussortiert. Da die meisten Proben der Probennahmen 0 bis 2 zu wenig Gewicht hatten, wurden diese Ernten für die weitere Analyse nicht betrachtet. Die übrigen Proben wurden in große Proben (größer als 0.3 g) und kleine Proben (kleiner als 0.3 g) unterteilt.

Aus den großen Proben wurde im weiteren Verlauf der Analyse eine Mischprobe hergestellt, nachdem die Pflanzenteile mit einer Schere grob zerteilt wurden. Mit Hilfe eines Papiertrichters wurde die Probe anschließend in Szinties gefüllt und dann für zehn Minuten gemahlen. Szinties sind kleine Fläschchen aus Plastik, die ein Fassungsvermögen von 20 mL besitzen. Zum Mahlen wurden pro Szintie drei mittlere und sechs kleine Metallkugeln verwendet. Nach dem Mahlen wurden die Metallkugeln entfernt und ein Gewicht zwischen 0.15 g und 0.2 g eingewogen.

Bei den kleinen Proben wurde für das Mahlen und Wiegen dasselbe Szintie benutzt, da beim Mahlen immer mit einem kleinen Verlust der Probe zu rechnen ist. Es wurde also für jede kleine Probe das entsprechende Leergewicht der Szinties gewogen und das Gewicht notiert. Dann wurde die gesamte Probe in das Szintie gefüllt und mit drei mittleren und sechs kleinen Metallkugeln gemahlen. Nach dem Entfernen der Metallkugeln wurde das Gewicht des Szinties mit der darin enthaltenen Probe gewogen. Aus der Differenz der beiden Gewichte konnte das Gewicht der kleinen Proben ermittelt werden. Da sich die Stängel und Blattstiele nur schlecht mahlen ließen, wurden diese sowohl von den kleinen als auch von den großen Proben in kleinere Szinties mit einem Fassungsvermögen von 5 mL gefüllt und mit einer großen, zwei mittleren und einer kleinen Metallkugel gemahlen.

Zur Bestimmung des Gehaltes an Kalium und Kalzium in den Stielen, Blattstielen und Blättern wurde im nächsten Schritt eine Säureextraktion durchgeführt (Asch et al. 2022). Hierfür wurden die Proben in den großen Szinties mit 10 mL und in den kleinen Szinties mit 5 mL einer einmolaren Salzsäure befüllt und über Nacht auf den Schüttler, wie in Abbildung 6A gezeigt, gestellt. Danach wurden die Proben gefiltert. Für die Proben in großen Szinties wurden 100 mL Kolben verwendet, für die Proben in kleinen Szinties 50 mL Kolben. Jedes Szintie und jeder Filter wurde zweimal mit deionisiertem Wasser ausgespült. Dann wurden die Kolben auf 100 mL bzw. 50 mL mit deionisiertem Wasser aufgefüllt und geschüttelt. Der Prozess der Filtration ist in Abbildung 6B zu sehen. Für die weitere Messung und zur besseren Lagerung mussten die Proben wieder in Szinties gefüllt werden. Der Gehalt an Kalium und Kalzium wurde dann mit einem Flammenphotometer (Abbildung 6C) gemessen.

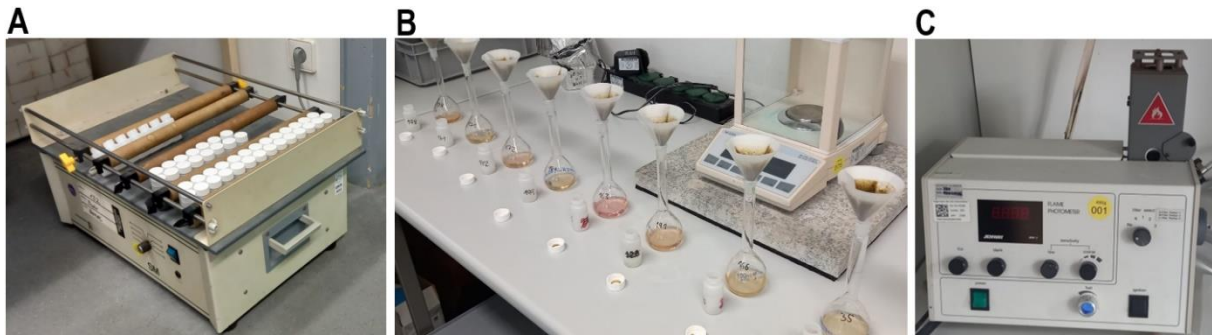


Abbildung 6: Analyse im Labor

Filtrieren der Proben mit den Szinties, Schüttler mit befestigten Szinties und den darin enthaltenen Proben (A); Kolben und Filter (B); Flammenphotometer (C)

3.5.1 Statistische Analyse und Grafiken

Die Ergebnisse der Experimente wurden in *Microsoft Excel 365 Version 2205* dokumentiert. Die Kalium- und Kalziumwerte wurden mithilfe von Regressionskurven aus den Messpunkten der Standardlösungen mit dem Flammenphotometer ebenfalls mit Excel berechnet. Alle Grafiken wurden mit dem Programm *SigmaPlot Version 10, Systa Software GmbH* erstellt.

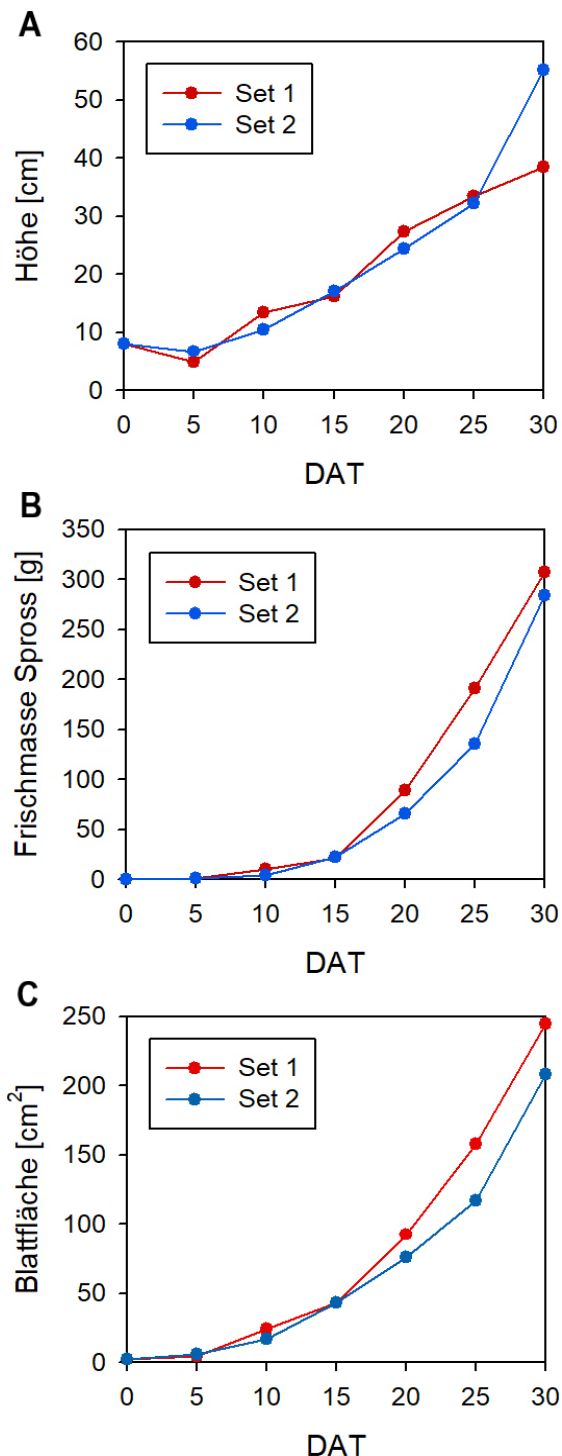
4. Ergebnisse

Die Wirkung der unterschiedlichen Lichtintensitäten auf die Tomatenpflanzen und die Aufnahme von Kalium und Kalzium werden im Folgenden graphisch dargestellt.

4.1 Morphologische Unterschiede

Bei den Tomatenpflanzen, die einer hohen Lichtintensität ausgesetzt waren (Set 1), ist ein leichter Effekt des Lichts auf das Wachstum zu erkennen. Im Folgenden werden die Auswirkungen auf die Wachstumshöhe, die Frischmasse, die Blattfläche und das Trockengewicht veranschaulicht.

4.1.1 Auswirkungen der Lichtintensität auf Höhe, Frischmasse und Blattfläche



Die Grafiken A-C in Abbildung 7 zeigen die Auswirkungen der Lichtintensität auf die Wuchshöhe, Frischmasse und Blattfläche der Tomatenpflanzen. Die Probennahmen sind auf der x-Achse als zeitlicher Verlauf in Tagen nach dem Transplantieren (DAT) dargestellt. Bei der Interpretation der Grafiken muss berücksichtigt werden, dass der siebte Wachstumsabschnitt bei Set 1 fehlt. Hier war der Vegetationspunkt, evtl. durch falsches Ausgeizen, nicht mehr vorhanden. Dies macht sich vor allem in der Wuchshöhe (Abbildung 7A) bemerkbar. Dennoch ist in den Probennahmen 1 bis 5 kein großer Unterschied zwischen der Behandlung mit viel (Set 1) und wenig (Set 2) Licht zu erkennen.

In Abbildung 7B ist zu erkennen, dass die Frischmasse des Sprosses von Set 1 im zeitlichen Verlauf mehr ansteigt als bei Set 2. Der fehlende Wachstumsabschnitt der sechsten Probennahme müsste außerdem noch höher liegen.

Auch in Abbildung 7C ist die durchschnittliche Blattfläche pro Blatt aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass im zeitlichen Verlauf die Tomaten mit stärkerer Beleuchtung durchschnittlich größere Blätter entwickeln als die Blätter mit geringer Beleuchtung.

Abbildung 7: Morphologische Unterschiede

Wachstumshöhe (A), Frischmasse des Sprosses (B) und durchschnittliche Blattfläche pro Blatt (C) im zeitlichen Verlauf in Tage nach dem Transplantieren (DAT)

4.1.2 Auswirkungen der Lichtintensität auf die Trockenmasse

Abbildung 8A zeigt die Trockenmassen der einzelnen Pflanzenteile (Wurzeln, Stängel, Blatt und Blattstiel) im zeitlichen Verlauf (Probennahme 3 bis 6) in Abhängigkeit von der Behandlung mit einer hohen (Set 1) und einer niedrigen (Set 2) Lichtintensität.

Gut sichtbar ist die steigende Trockenmasse aller Pflanzenteile mit zunehmendem Alter der Tomatenpflanzen. Die Blätter hatten sowohl bei hoher als auch bei niedriger Bestrahlung in jeder Probennahme die größte Trockenmasse. Sie machten somit den größten Anteil der Trockenmasse einer Tomate aus, was in den Tortendiagrammen (Abbildung 8B-C) zu erkennen ist. Deutlich zu sehen ist die Auswirkung der hohen Lichtintensität auf das Trockengewicht der Pflanzen bei Set 1. Vergleicht man die Probennahmen miteinander, ist zu sehen, dass Set 1 bei jedem Pflanzenteil eine größere Trockenmasse aufweist als Set 2. Die Tortendiagramme zeigen beispielhaft nur die sechste Probennahme, da dort die Pflanzen schon am weitesten entwickelt waren. Sie zeigen aber auch, dass obwohl sich die Tomaten in ihrer Trockenmasse pro Pflanzenteil je nach Lichtintensität unterscheiden, es keine großen Unterschiede zwischen den Anteilen der Pflanzenteile am Gesamttrockengewicht gibt.

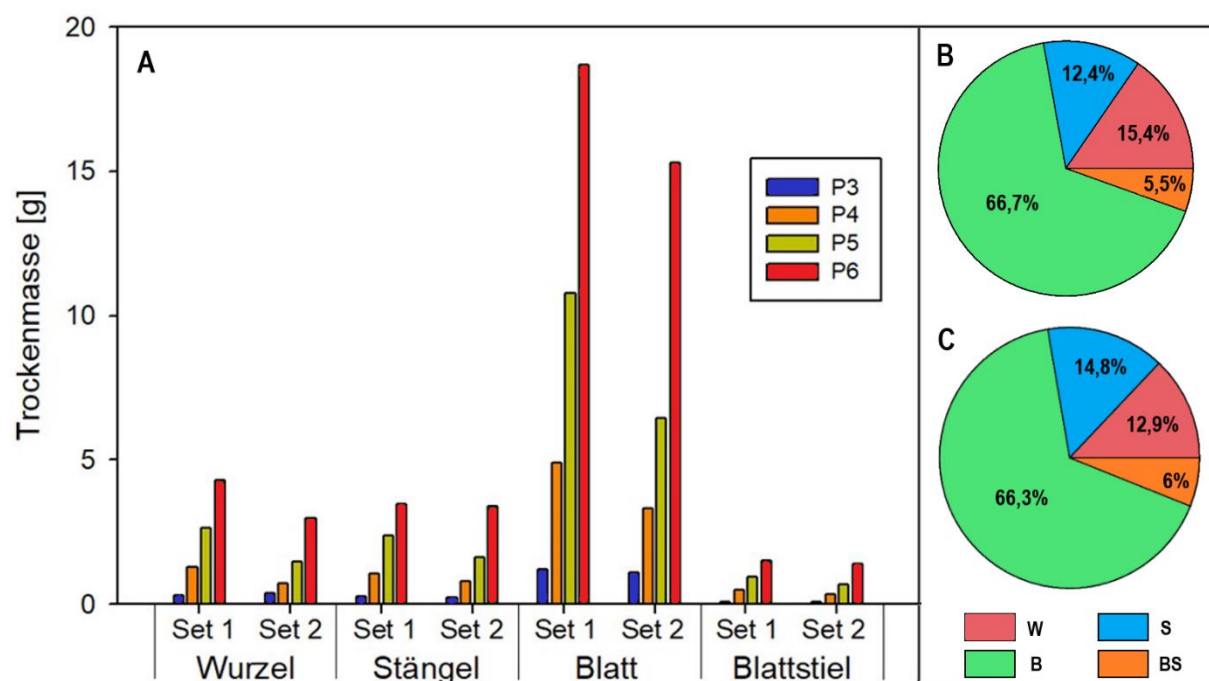


Abbildung 8: Trockenmasse und Trockenmasseanteile

Trockenmasse pro Pflanzenteil (Wurzel, Stängel, Blatt, Blattstiel) von Set 1 und 2 für die Probennahmen 3-6 (A); Anteile der Trockenmassen der Pflanzenteile Wurzel (W), Stängel (S), Blatt (B) und Blattstiel (BS) an der Gesamttrockenmasse der Tomatenpflanze aus Probennahme 6 von Set 1 (B) und Set 2 (C)

4.1.3 Verteilung der Trockenmasse innerhalb der Blattabschnitte

Abbildung 9 veranschaulicht die Verteilung der Trockenmasse auf die Blattabschnitte 1 bis 7. Beim Betrachten der Grafik muss darauf geachtet werden, dass bei der zweiten Probennahme kein neuer Blattabschnitt hinzugekommen ist, weshalb Blattabschnitt 2 bei Set 2 immer fehlt. Unabhängig von der Beleuchtungsstärke macht der dritte Blattabschnitt über alle Probennahmen hinweg den größten Trockenmasseanteil aus. Jedoch ist auch hier zu sehen, dass die Tomatenpflanzen, die einer höheren Lichtintensität ausgesetzt waren (Set 1), bei jeder Probennahme immer eine höhere Trockenmasse hatten. Dies ist vor allem bei Blattabschnitt 3 zu erkennen.

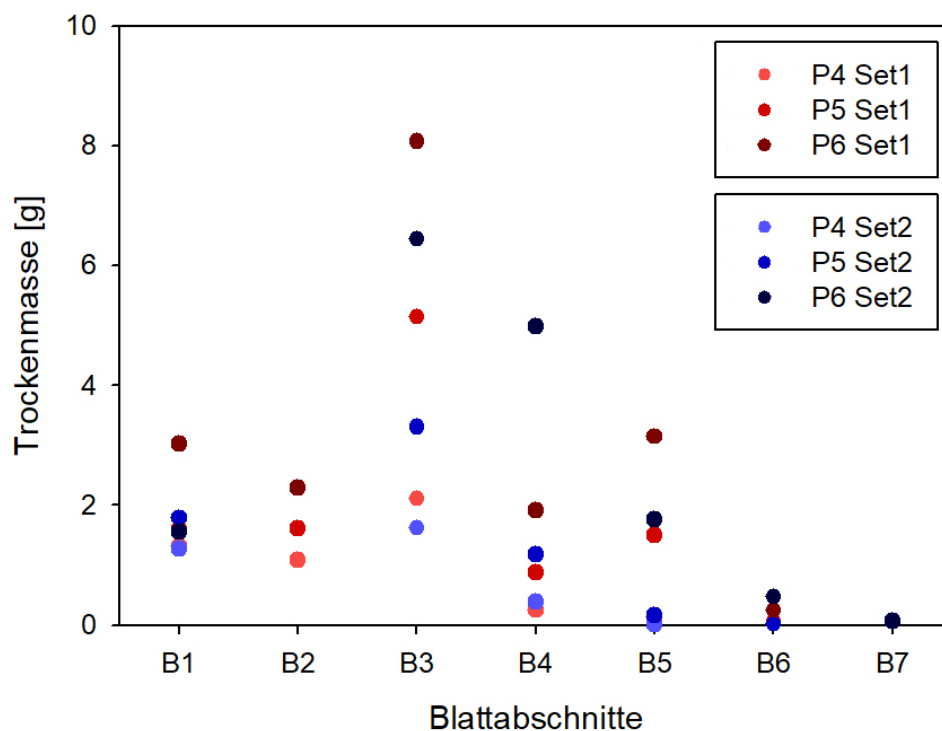


Abbildung 9: Trockenmasse der Blattabschnitte

Trockenmasse der Blattabschnitte (B1-B7) der Probennahmen 4-6 von Set 1 und Set 2

4.2 Verteilung des Kaliums innerhalb der Pflanze

In Abbildung 10 ist die Verteilung von Kalium für die Pflanzenteile Stiel, Blatt und Blattstiel graphisch gezeigt. Dargestellt sind die Tomatenpflanzen von Set 1 und 2 der sechsten Probennahme. Die Probennahmen 3 bis 5 zeigten eine ähnliche Verteilung an Kalium. Während die Stängel und Blattstiele ungefähr gleiche Kaliumgehalte aufweisen, ist der Kaliumgehalt der Blätter am geringsten. Dies war bei allen untersuchten Probennahmen zu beobachten. Der Kaliumgehalt war der Behandlung mit geringer Lichtintensität immer etwas höher als bei hoher Lichtintensität.

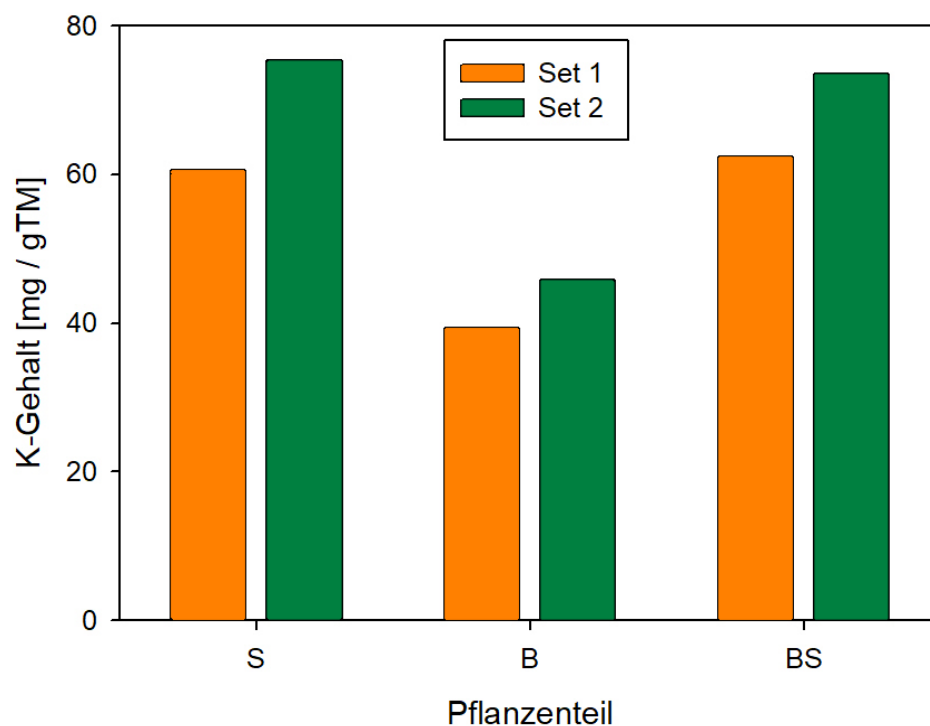


Abbildung 10: Kaliumgehalt pro Pflanzenteil

Kaliumgehalt in den Pflanzenteilen Stängel (S), Blatt (B) und Blattstiel (BS) von Set 1 und Set 2 der sechsten Probennahme

In Abbildung 11 ist die Kaliumverteilung im zeitlichen Verlauf von den ältesten Blättern (Blattabschnitt 1) zu den jüngsten Blättern (Blattabschnitt 7) abgebildet. Auch hier muss beachtet werden, dass bei der Pflanze, die einer hohen Bestrahlung ausgesetzt war, in der sechsten Probennahme kein neuer Wachstumsabschnitt vorhanden war. Set 1 hat also keinen siebten Blattabschnitt. Beide Behandlungen zeigen bis Blattabschnitt 5 (Set 1) bzw. 6 (Set 2) eine annähernde Gleichverteilung von Kalium. Nur der Kaliumgehalt in den Blattabschnitten sechs (Set 1) und sieben (Set 2) scheinen zu sinken. Der schnelle Abfall zu den letzten Blättern kann dadurch erklärt werden, dass die jüngsten Blätter noch nicht vollständig entwickelt waren und noch sehr klein waren.

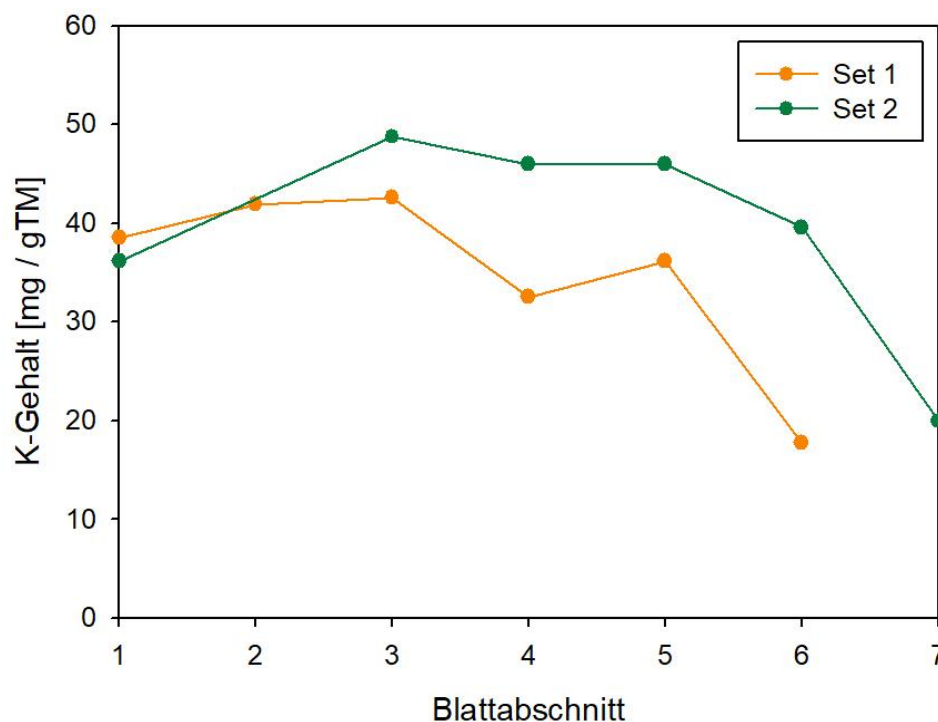


Abbildung 11: Kaliumgehalt pro Blattabschnitt

Kaliumgehalte in den Blattabschnitten 1-7 von Set 1 und Set 2 aus der sechsten Probennahme

4.3 Verteilung des Kalziums innerhalb der Pflanze

Die Abbildung 12 zeigt den Gehalt an Kalzium für die Pflanzenteile Stiel, Blatt und Blattstiel. Dargestellt sind die beiden Tomatenpflanzen aus der sechsten Probennahme, da diese schon am weitesten entwickelt waren. Die Daten aus den Probennahmen 3 bis 5 zeigten eine ähnliche Kalziumverteilung. Die Grafik macht die unterschiedliche Nährstoffverteilung in den einzelnen Pflanzenteilen deutlich. Der Kalziumgehalt war in den Blättern bei allen Probennahmen immer am größten und in den Stängeln am geringsten. Dazwischen lagen die Werte der Blattstiele, die jedoch nur etwas höher als die der Stängel waren. Zwischen den beiden Lichtbehandlungen war kein großer Unterschied zu erkennen. Zwar ist der Kalziumgehalt der Tomaten, die einer geringeren Bestrahlung ausgesetzt waren, bei den Stängeln und Blattstielen höher, jedoch unterscheiden sie sich nicht stark.

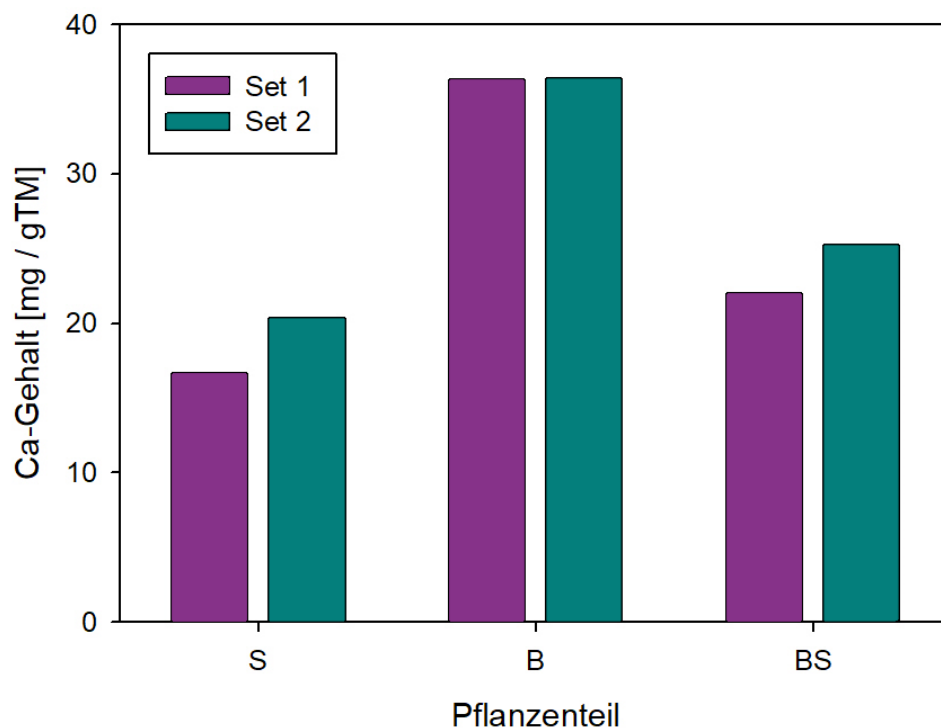


Abbildung 12: Kalziumgehalt pro Pflanzenteil

Kalziumgehalt in den Pflanzenteilen Stängel (S), Blatt (B) und Blattstiel (BS) von Set 1 und Set 2 der sechsten Probennahme

Abbildung 13 zeigt den Kalziumgehalt im zeitlichen Verlauf der einzelnen Blattabschnitte. Blattabschnitt 1 steht hier für die ältesten und Blattabschnitt 7 für die jüngsten Blätter. Auch hier werden die Werte der sechsten Probennahme dargestellt, die beispielhaft für alle anderen Probennahmen stehen soll. Auch fehlt wiederum der letzte Blattabschnitt der Tomate von Set 1. Deutlich zu sehen ist der stetige Abfall des Kalziumgehaltes von den älteren zu den jüngeren Blättern. Dieser Verlauf ist bei beiden Behandlungen erkennbar. Die Kalziumgehalte der Stängel und Blattstiele zeigten einen ähnlichen Trend.

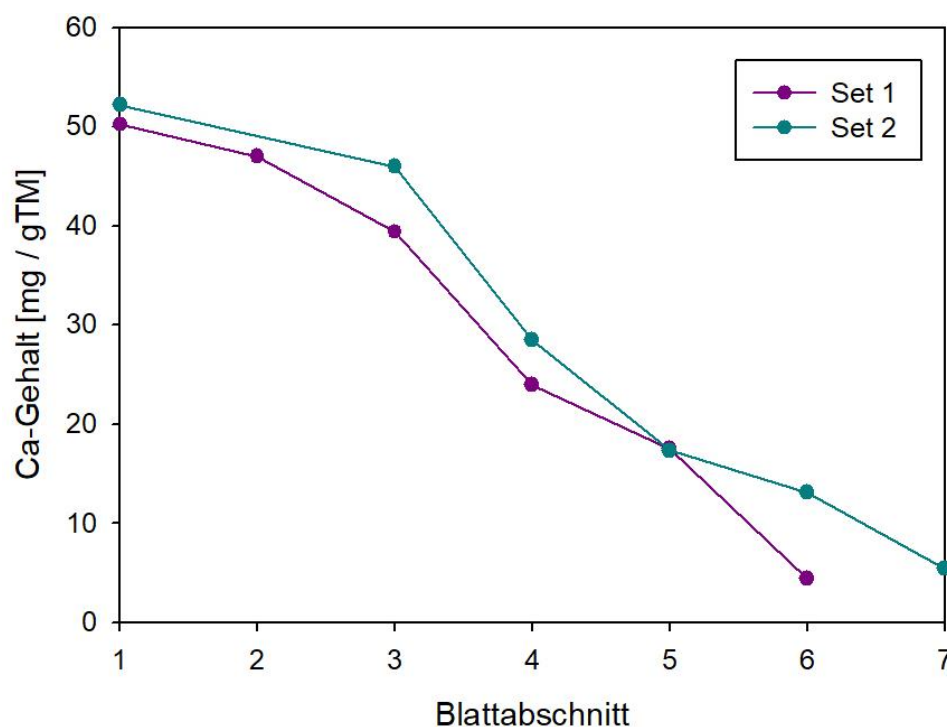


Abbildung 13: Kalziumgehalt pro Blattabschnitt

Kalziumgehalte für die Blattabschnitte 1-7 von Set 1 und Set 2 aus der sechsten Probennahme

4.4 Kalium-Kalzium-Verhältnis

Die in Abbildung 14 dargestellte Tomatenpflanze soll die Verteilung und das Verhältnis von Kalium (rot) zu Kalzium (blau) noch etwas besser veranschaulichen. Die zwei Balken auf der linken Seite stellen die Kalium- und Kalziumverteilung von den älteren Pflanzenteilen (unten) bis hin zu den jüngeren Teilen (oben) dar. Die Balken am unteren Rand der Abbildung erklären die Verteilung zwischen dem Stängel in der Mitte, über die Blattstiele hin zu den Blättern nach außen. Je stärker die Farbintensität der Balken ist, umso höher ist der Gehalt des entsprechenden Nährstoffs.

Auffällig ist, dass die beiden Nährstoffe in der Tomatenpflanze nicht gleich verteilt sind. Die Daten des Flammenphotometers haben deutlich gemacht, dass Kalium von unten nach oben relativ gleich verteilt war, wie bereits in Abbildung 11 zu sehen war. Im Gegenteil dazu nahm der Gehalt an Kalzium nach oben hin ab, wie Abbildung 13 ebenfalls zeigt. Auch sind die Nährstoffe zwischen den einzelnen Pflanzenteilen nicht gleichverteilt. Während der größte Kaliumgehalt im Stängel zu finden war und der kleinste im Blatt (siehe auch Abbildung 10), zeigten die Ergebnisse der Kalziumverteilung genau umgekehrte Werte. Der größte Gehalt an Kalzium konnte in den Blättern und der kleinste im Stängel ausfindig gemacht werden (Abbildung 12). Die Blattstiele hatten immer einen mittleren Gehalt bei beiden Nährstoffen. Allgemein lässt sich sagen, dass der Kaliumgehalt im Stängel am größten war und er sich in der Höhe der Pflanze nicht sonderlich unterschied. Der kleinste Gehalt an Kalium war in den Blättern zu finden. Auch hier hatte das Alter der Blätter keine Auswirkung auf den Gehalt. Die älteren Tomatenblätter weiter unten am Stängel hatten den größten Kalziumgehalt, während der Kleinste im oberen Teil der Pflanze zu finden war. Diese Verteilung wurde bei allen untersuchten Probennahmen analysiert. Bei der Nährstoffverteilung innerhalb der Pflanze konnte kein Unterschied zwischen den Pflanzen mit hoher Lichtintensität und den Pflanzen mit geringer Lichtintensität festgestellt werden.

Die Kästchen auf der Pflanze zeigen das Verhältnis von Kalium zu Kalzium in den Blättern (1:1), im Stängel (4:1) und in den Blattstielen (3:1). Dieses Ergebnis konnte bei allen analysierten Probennahmen festgestellt werden. Ein Unterschied war zwischen den Behandlungen mit viel und wenig Licht auch hier nicht zu erkennen.

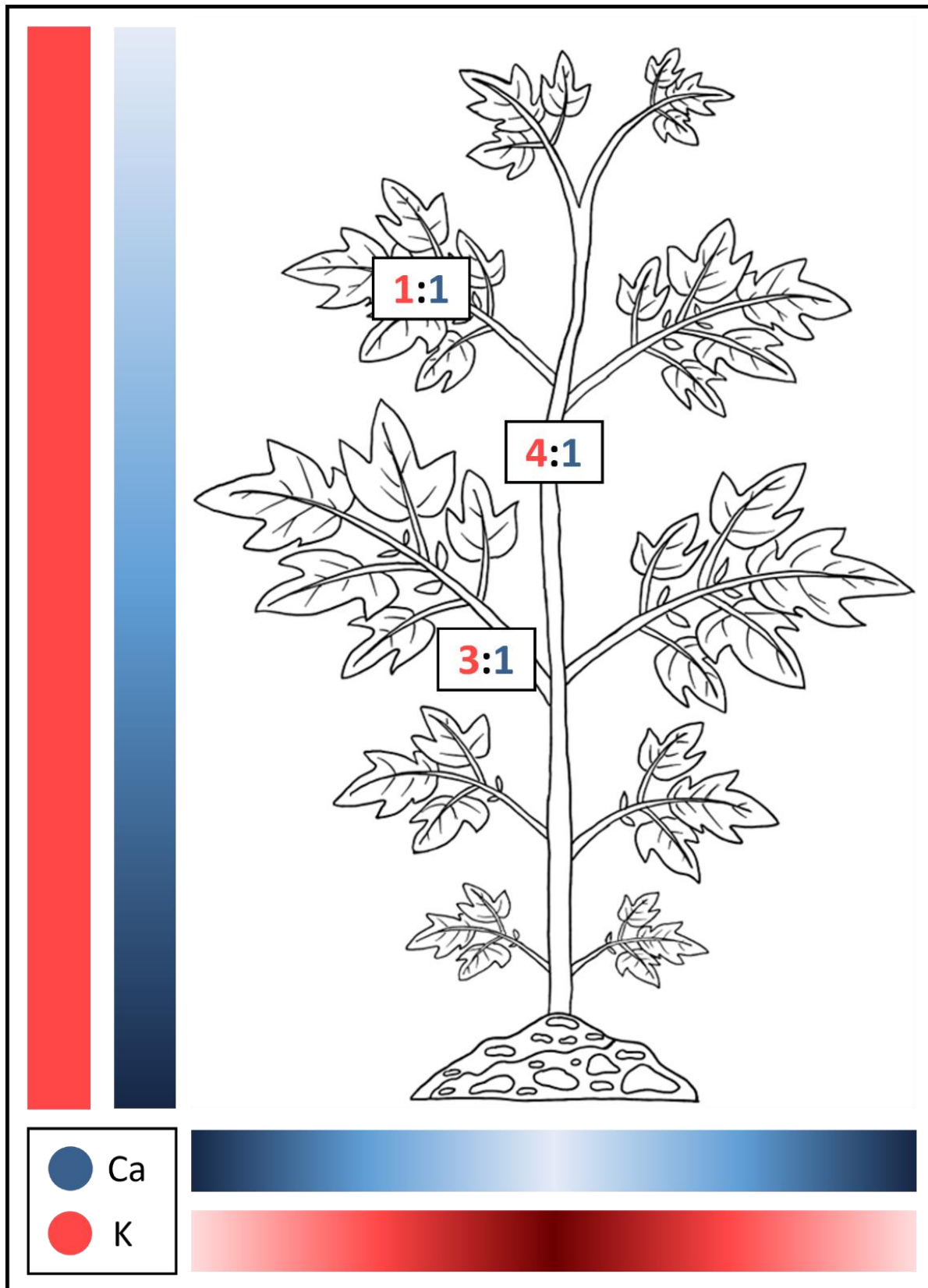


Abbildung 14: Verteilung und Verhältnis von Kalium und Kalzium

Verteilung von Kalium (rot) und Kalzium (blau) innerhalb der Tomatenpflanze; je höher die Farbintensität, desto höher der Gehalt des Nährstoffs; Verhältnis von Kalium zu Kalzium in denselben Farben für das Blatt, den Stängel und den Blattstiel

5. Diskussion

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses der Lichtintensität als Umwelteinfluss auf die Aufnahme der Nährstoffe Kalium und Kalzium bei hydroponisch wachsenden Tomatenpflanzen. Auch sollte nach möglichen Ursachen für das Einrollen der Blätter der Sorte *Moneymaker* gesucht werden. Die Analyse ergab erkennbar höhere Trockengewichte bei den Tomaten, die unter viel Licht gewachsen sind. Ein Unterschied zwischen der Verteilung von Kalium und Kalzium in den Tomatenpflanzen bezüglich den beiden Behandlungen konnte nicht festgestellt werden.

5.1 Morphologische Unterschiede

Sowohl die Wachstumshöhe, die Frischmasse des Sprosses als auch die Blattfläche pro Blatt zeigten in dem Versuch keine großen Unterschiede zwischen der Behandlung mit viel und mit wenig Licht. Die Frischmasse und Blattfläche pro Blatt zeigten jedoch bei Set 1 (viel Licht) höhere Werte als bei Set 2 (wenig Licht). Auch die Wachstumshöhe wäre vermutlich bei der Pflanze mit intensiver Bestrahlung höher gewesen, hätte der letzte Wachstumsabschnitt nicht gefehlt. Obwohl es nur geringe Unterschiede gab, zeigen die Werte die gleichen Tendenzen, wie in der Literatur beschrieben. Eine hohe Lichtintensität beschleunigt das Wachstum allgemein und insbesondere das der Blätter einer Pflanze (Hussey 1963, S. 316) und führt zu einer größeren Menge an Biomasse (Porter 1937, S. 233). Die Pflanzen, die einer hohen Lichtintensität ausgesetzt waren, standen nicht unter Lichtstress, was das Wachstum ebenfalls bezeugt. Leidet eine Pflanze unter Lichtstress verringert sie ihre Blattfläche (Fan et al. 2013, S. 50). Dies war in dem Versuch nicht der Fall. Hat eine Pflanze zu wenig Licht vergrößert sie ihre Blattfläche (Magalhaes und Wilcox 1983, S. 859) und ihre Pflanzenhöhe (Fan et al. 2013, S. 50), wofür es ebenfalls keine Anhaltspunkte gibt. Es ist davon auszugehen, dass die gemessenen pflanzenphysiologischen Parameter und die Nährstoffaufnahme unter einem größeren Lichtunterschied stärker variiert hätten. Das Trockengewicht der Tomatenpflanzen, die unter intensiver Bestrahlung standen, war bei jeder Probennahme höher. Auch das bestätigen die Ergebnisse anderer Versuche (Porter 1937, S. 233). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Pflanzen, die mit mehr Licht bestrahlt werden, eine höhere Fotosyntheserate haben und so schneller wachsen.

5.2 Nährstoffgehalte von Kalium und Kalzium in der Pflanze

Tabelle 5: Kaliumgehalte Literaturvergleich

Vergleich des durchschnittlichen Kaliumgehaltes aller Pflanzenteile und aller Probennahmen (3-6) der Ergebnisse dieser Arbeit mit Kaliumwerten aus verschiedenen Literaturquellen

Kaliumgehalt [mg/g TM]		
Ergebnis dieser Bachelorarbeit	Tomate (<i>Moneymaker</i>)	50

Werte in der Literatur		
Amberger 1988, S. 207	Pflanzen allgemein	5 – 50
Mengel 2007, S. 104	Tomate	10 – 40
Pujos und Morard 1997, S. 191	Tomate Blätter	12 – 47
Humphries und Devonald 1977, S. 438	Tomate	3 – 106
Besford und Maw 1974, S. 604	Tomate (<i>Moneymaker</i>)	28 – 52
Kirkby und Pilbeam 1984, S. 401	Paprika	bis 75
Schubert 2018, S. 21	grüne Pflanzenteile	30

Tabelle 6: Kalziumgehalte Literaturvergleich

Vergleich des durchschnittlichen Kalziumgehaltes aller Pflanzenteile und aller Probennahmen (3-6) der Ergebnisse dieser Arbeit mit Kalziumwerten aus verschiedenen Literaturquellen

Kalziumgehalt [mg/g TM]		
Ergebnis dieser Bachelorarbeit	Tomate (<i>Moneymaker</i>)	33

Werte in der Literatur		
Pilbeam und Morley 2007, S. 134	Tomate	6 – 38
White 2015, S. 177	Tomate	16 – 32
Pujos und Morard 1997, S. 191	Tomate Blätter	12 – 50
Humphries und Devonald 1977, S. 439	Tomate	2 – 63
Amberger 1988, S. 211	Dykotyledone	10 – 30
Amberger 1988, S. 212	Kraut der Kartoffel	26
Kirkby und Pilbeam 1984, S. 397	höhere Pflanzen	1 – 50
Schubert 2018, S. 21	grüne Pflanzenteile	3

Die zwei oberen Tabellen 5 und 6 vergleichen den gemessenen Gehalt an Kalium und Kalzium in der Pflanze mit mehreren Literaturquellen. Der angegebene Wert für die Ergebnisse dieser Arbeit ist ein Mittelwert aus allen Kalium- bzw. Kalziumgehalten. Er bezieht alle untersuchten Probennahmen und alle Pflanzenteile (Blatt, Blattstiel, Stängel) mit ein. Deutlich wird, dass die Nährstoffgehalte aus den Ergebnissen und die Werte aus der Literatur in der gleichen Größenordnung liegen. Man kann daher davon ausgehen, dass das Experiment verlässliche Ergebnisse geliefert hat.

5.3 Verteilung von Kalium und Kalzium in der Pflanze

Die Verteilung der beiden Nährstoffe konnte in der Analyse der Trockenmassen gut veranschaulicht werden. Auch konnte gezeigt werden, dass die beiden Nährstoffe in der Pflanze nicht die gleiche Verteilung haben. Der größte Gehalt an Kalium war in den Stängeln und Blattstielen zu finden, der niedrigste in den Blättern. Bei Kalzium war es genau umgekehrt. Der höchste Kalziumgehalt war in den Blättern und der niedrigste im Stängel und den Blattstielen. Auch die Verteilung in der Höhe der Pflanzen war nicht gleich. Kalium war in jeden Wachstumsabschnitt etwa gleich vertreten, während der Kalziumgehalt von unten nach oben hin abnahm. Die unterschiedliche Verteilung kann dadurch erklärt werden, dass Kalium und Kalzium in der Pflanze unterschiedlich mobil sind. Kalium kann sich fast ungehindert in der gesamten Pflanze bewegen, sowohl in akropetaler als auch in basipetaler Richtung. Dies liegt daran, dass Kalium im Xylem und im Phloem mobil ist. Dies ermöglicht die Versorgung von noch wachsenden Geweben am oberen Teil der Pflanze mit Kalium (Amberger 1988, S. 202-203). Die ständige Bewegung von Kalium in der Pflanze erklärt den hohen Gehalt im Stängel der Tomate und auch die konstante Verteilung in jedem Wachstumsabschnitt. Kalzium hingegen ist in der Pflanze eher schlecht beweglich. Aufgrund der fehlenden Mobilität im Phloem, ist nur die akropetale Bewegung im Xylem möglich (Kirkby und Pilbeam 1984, S. 397). Da der Xylemstrom von der Transpiration angetrieben wird, sind ältere Blätter reicher an Kalzium als jüngere, denn sie transpirieren mehr. Auch kann das eingelagerte Kalzium in den älteren Blättern nicht mehr in jüngere Blätter transportiert werden (Amberger 1988, S. 112). Dies erklärt zum einen den hohen Gehalt an Kalzium in den Blättern, da diese mehr transpirieren als Blattstiele und Stängel. Zum anderen erklärt die schlechte Phloemmobilität und die geringe Transpiration, der sich noch entwickelten Blätter im oberen Bereich der Pflanze, den absteigenden Kalziumgehalt von unten nach oben. In der Verteilung der beiden Nährstoffe zwischen den Wachstumsabschnitten konnte kein Unterschied zwischen der

Behandlung mit einer hohen und der mit einer niedrigen Lichtintensität festgestellt werden. Dies kann daran liegen, dass sich die Lichtintensitäten nicht ausreichend voneinander unterscheiden. Allerdings hatte das Licht einen Effekt auf die Verteilung von Kalium und Kalzium zwischen den einzelnen Pflanzenteilen, wie in den Abbildungen 10 und 12 zu sehen war. Tomaten, die einer geringeren Lichtintensität ausgesetzt waren, wiesen sowohl bei Kalium als auch bei Kalzium in jeder Probennahme einen etwas höheren Gehalt pro Gramm Trockenmasse in den Blättern, Blattstielen und Stängeln auf. Aufgrund der höheren Trockenmasse der Pflanzen mit intensiver Bestrahlung, ist der absolute Kalium- und Kalziumgehalt dieser Pflanzen höher. Die hohe Fotosyntheserate, das schnellere Wachstum und die größere Blattfläche dieser Pflanzen lassen vermuten, dass in den Pflanzenteilen mit mehr Aktivität folglich auch ein höherer Gehalt an Kalium und Kalzium vorliegt. Es ist zu erwarten, dass sich ein größerer Unterschied in den Ergebnissen bei einem höheren Kontrast der beiden Bestrahlungsstärken zeigen würde.

In Abbildung 14 war das Verhältnis von Kalium zu Kalzium in den einzelnen Pflanzenteilen dargestellt. Die Blätter zeigten ein Verhältnis von 1:1. Obwohl also der höchste Kalziumgehalt in den Blättern vorhanden war, wiesen die Blätter trotzdem genau so viel Kalium wie Kalzium auf. Dies kann daran liegen, dass der Kalziumbedarf einer Pflanze um einiges geringer ist als der von Kalium. Im Stängel kam viermal mehr Kalium als Kalzium vor, was die geringe Mobilität von Kalzium und die hohe Mobilität von Kalium erklärt. Die Blattstiele zeigten ein Verhältnis von 3:1, da Kalium hier fast in der gleichen Menge vorkam wie im Stängel. Diese Verhältnisse konnten in allen analysierten Probennahmen festgestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Tomatenpflanzen die Nährstoffverteilung von Kalium und Kalzium in den ersten 30 Tagen nicht ändern. Eventuell ist eine Veränderung mit zunehmendem Alter erkennbar.

Das Einrollen der Blätter der Sorte *Moneymaker* konnte auch in diesem Versuch beobachtet werden. Allerdings zeigen die Verteilung und die Gehalte der Nährstoffe keine Auffälligkeiten. Daraus kann also keine Erklärung für das Blattrollen abgeleitet werden. Bei den Versuchen anderer Forscher konnte ein unnormales Blattwachstum beobachtet werden. Ein Beispiel hierfür ist der Versuch von Magalhaes und Wilcox, die sich mit dem Wachstum und der Mineralstoffzusammensetzung von Tomatenpflanzen unter dem Einfluss der Lichtintensität beschäftigten. Die dort untersuchten Pflanzen erschienen im Schatten normal, während die Pflanzen bei voller Sonneneinstrahlung Blattsymptome wie Verkümmern, Blattrollen, Welken und Chlorosen zeigten (Magalhaes und Wilcox 1983, S. 851).

6. Fazit

Nach eingehender Untersuchung hatte die Lichtintensität keinen Effekt auf die Nährstoffverteilung von Kalium und Kalzium zwischen den Wachstumsabschnitten in den Tomatenpflanzen. Jedoch konnte ein kleiner Unterschied in der Verteilung der Pflanzenteile (Blatt, Blattstiel und Stängel) beobachtet werden. Auf die Wachstumshöhe, die Frischmasse und die Blattfläche pro Blatt hatte der Umweltfaktor Licht einen kleinen Effekt. Ein großer Unterschied konnte bei den Trockengewichten beobachtet werden. Die Tomatenpflanzen, die einer hohen Lichtintensität ausgesetzt waren, zeigten in jeder Probennahme und jedem Pflanzenteil höhere Trockengewichte.

Es ist davon auszugehen, dass der Unterschied in den Lichtintensitäten nicht ausreicht hat, um eine deutlichere Differenzierung der Ergebnisse zu erkennen. Weder in der Lichtintensität noch in der Verteilung der Nährstoffe konnten in diesem Experiment eindeutige Ursachen für das auffällige Blattwachstum der Tomatensorte *Moneymaker* gefunden werden. Zu beachten ist auch, dass das Experiment in seinem Ausmaße mit zwölf untersuchten Pflanzen nur eine anfängliche Betrachtung der Thematik darstellen kann. Die vorliegenden Ergebnisse bezüglich der Blattsymptomatik ähneln denen früherer Forschung. Ob es sich bei diesen Symptomen allerdings um die gleichen handelt, bedarf weiterer Untersuchung.

Festzuhalten bleibt, dass weitere Forschung nötig ist, um die optimalen Wachstumsbedingungen für Tomatenpflanzen in dieser Anbauform zu finden. Außerdem wäre es interessant die Nährstoffaufnahme von Kalium und Kalzium von anderen Gemüsepflanzen unter dem Einfluss von zwei unterschiedlichen Lichtintensitäten zu untersuchen. Hierfür würde sich die Paprika anbieten, da mit diesem Gemüse auch in dem Projekt *HypoWave+* gearbeitet wird. Auch kann noch der Effekt von weiteren Umweltfaktoren untersucht werden. Das Projekt *HypoWave+* eröffnet eine neue Perspektive hinsichtlich wassersparender Anbaumethoden. Unter dem Aspekt des voranschreitenden Klimawandels ist es wichtig weiter nach solchen alternativen Anbaumethoden zu forschen, um Kulturpflanzen mit einem geringeren Wasserverbrauch anbauen zu können.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Amberger, Anton **(1988)**: Pflanzenernährung. Ökologische und physiologische Grundlagen, Dynamik und Stoffwechsel der Nährelemente. 4. Aufl. Stuttgart: Ulmer.
- [2] Asch, Julia; Johnson, Kristian; Mondal, Shimul; Asch, Folkard **(2022)**: Comprehensive assessment of extraction methods for plant tissue samples for determining sodium and potassium via flame photometer and chloride via automated flow analysis. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 185, S. 308-316.
- [3] Barker, Allen V.; Pilbeam, David J. (Hg.) **(2007)**: Handbook of plant nutrition. Boca Raton: CRC.
- [4] Barker, Allen V.; Pilbeam, David J. (Hg.) **(2015)**: Handbook of plant nutrition. 2. Aufl. Boca Raton, London, New York: CRC Press.
- [5] Besford, R. T.; Maw, G. A. **(1974)**: Uptake and distribution of potassium in tomato plants. In: *Plant and Soil* 41 (3), S. 601–618.
- [6] Fan, Xiao-Xue; Xu, Zhi-Gang; Liu, Xiao-Ying; Tang, Can-Ming; Wang, Li-Wen; Han, Xue-lin **(2013)**: Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. In: *Scientia Horticulturae* 153, S. 50–55.
- [7] Humphries, P. D.; Devonald, V. G. **(1977)**: The distribution of potassium, calcium and magnesium in young tomato plants grown in water culture. In: *Plant and Soil* 48, S. 435-445.
- [8] Hussey, G. **(1963)**: Growth and Development in the Young Tomato. I. The Effect of Temperature and Light Intensity on Growth of the Shoot Apex and Leaf Primordia. In: *Journal of Experimental Botany* 14 (41), S. 316–325.
- [9] Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH: Großtechnische Umsetzung von Gemüseproduktion mit Wasserwiederverwendung. www.wunderware.de | Agentur für neue Medien. Online verfügbar unter <https://www.hypowave.de/ergebnisse/news/detail/23-grosstechnische-umsetzung-von-gemueseproduktion-mit-wasserwiederverwendung/>, zuletzt geprüft am 19.06.2022.
- [10] Kirkby, E. A.; Pilbeam, David J. **(1984)**: Calcium as a plant nutrient. In: *Plant, Cell and Environment* 7 (6), S. 397–405.
- [11] Kreij, C. de; Voogt, W.; Baas, R. **(2003)**: Nutrien Solutions and Water Quality for soilless Cultures (Applied Plant Research, Division Glasshouse, 191).
- [12] Magalhaes, Jose R.; Wilcox, G. E. **(1983)**: Tomato growth and mineral composition as influenced by nitrogen form and light intensity. In: *Journal of Plant Nutrition* 6 (10), S. 847–862.

- [13] Mengel, Konrad **(2007)**: Potassium. In: Allen V. Barker und David J. Pilbeam (Hg.): Handbook of plant nutrition. Boca Raton: CRC (Books in soils, plants, and the environment, 117), S. 91–120.
- [14] Pilbeam, David J.; Morley, Philip S. (2007): Calcium. In: Allen V. Barker und David J. Pilbeam (Hg.): Handbook of plant nutrition. Boca Raton: CRC (Books in soils, plants, and the environment, 117), S. 121–144.
- [15] Popp, Henry W. **(1926)**: Effect of Light Intensity on Growth of Soy Beans and Its Relation to the Autocatalyst Theory of Growth. In: *Botanical Gazette* 82 (3), S. 306–319.
- [16] Porter, A. M. **(1937)**: Effect of Light Intensity on the Photosynthetic Efficiency of Tomato Plants. In: *Plant physiology* 12 (2), S. 225–252.
- [17] Pujos, A.; Morard, P. **(1997)**: Effects of potassium deficiency on tomato growth and mineral nutrition at the early production stage. In: *Plant and Soil* 189, S. 189–196.
- [18] Röber, Rolf (2008): Nährelemente. In: Rolf Röber (Hg.): Pflanzenernährung im Gartenbau. 4. Aufl. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer, S. 156–169.
- [19] Röber, Rolf (Hg.) **(2008)**: Pflanzenernährung im Gartenbau. 4. Aufl. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- [20] Schubert, Sven **(2018)**: Pflanzenernährung. 3. Aufl. Stuttgart: Ulmer.
- [21] Schwarz, Dietmar; Thompson, Andrew J.; Kläring, Hans-Peter **(2014)**: Guidelines to use tomato in experiments with a controlled environment. In: *Frontiers in plant science* 5, S. 1–17.
- [22] Steinger, T.; Roy, B. A.; Stanton, M. L. **(2003)**: Evolution in stressful environments II: adaptive value and costs of plasticity in response to low light in *Sinapis arvensis*. In: *Journal of evolutionary biology* 16 (2), S. 313–323.
- [23] White, Philip J. **(2015)**: Calcium. In: Allen V. Barker und David J. Pilbeam (Hg.): Handbook of plant nutrition. 2. Aufl. Boca Raton, London, New York: CRC Press, S. 165–198.
- [24] Zubeda, Chaudhry; Sidra, Abbas; Azra, Yasmin; Hamid, Rashid; Habib, Ahmed; Muhammad, Akbar Anjum **(2010)**: Tissue culture studies in tomato (*Lycopersicon esculentum*) var. Moneymaker. In: *Pakistan Journal of Botany* 42 (1), S. 155–163.