



UNIVERSITÄT HOHENHEIM

Bachelorarbeit

Einfluss von Lichtqualität und Infrarotstrahlung auf die Nährstoffaufnahme 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

Betreuer: Hemanth Kumar Puppala

Marc Münt

Studiengang: Agrarwissenschaften B. Sc.

März 2024

Zusammenfassung

Das verfügbare Trinkwasser auf der Erde ist in vielen Regionen der Welt eine begrenzt verfügbare Ressource, insbesondere für die Landwirtschaft die erhebliche Mengen an Trinkwasser für ihre Produktion benötigt. Prognosen gehen von einem starken Rückgang der lokal verfügbaren Trinkwassermengen für die Landwirtschaft aus. Dies wird zu einem Rückgang des Anbaus von Kulturpflanzen auf Grenzertragsstandorten führen und damit die Nahrungsmittelverfügbarkeit in vielen, vor allem von klimatisch ungünstigen Bedingungen betroffenen Regionen einschränken und hohes Konfliktpotenzial mit sich bringen.

Das Verbundprojekt HypoWave+, das von der Technischen Universität Braunschweig koordiniert wird, in welchem die Universität Hohenheim beteiligt ist, untersucht die Möglichkeit der Nährstoffaufnahme von gereinigtem Wasser aus Kläranlagen, für Pflanzen in hydroponischen Systemen. Zusätzlich wird nach einer Alternative der momentan installierten Beleuchtung im Gewächshaus Phytotechnikum (PHT) der Universität Hohenheim gesucht.

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit den Wirkungen unterschiedlicher Lichtquellen und Infrarotstrahlung auf zwei verschiedene hydroponisch wachsende Tomatensorten im Gewächshaus Phytotechnikum (PHT) der Universität Hohenheim. Die Tomatensorten *Saluoso* und *Sweeterno* werden dabei auf ihre Morphologie, Nährstoffaufnahmearten von Ammonium, Nitrat und Phosphat und ihre Biomasse hin untersucht. Es wurden teilweise Wachstumsunterschiede der Sorten und der unterschiedlichen Behandlungen festgestellt. In dem Versuch wurden LED (4000 K), LED (4000 K) plus Infrarot und Keramik-Dampflampen (CMHL) miteinander verglichen.

Die Keramik-Dampflampen (CMHL) hatten einen Effekt auf das Längenwachstum der Tomatenpflanzen. Dieser Effekt konnte bei Zuschaltung von Infrarotlicht bei der LED (4000 K) nicht beobachtet werden. Insgesamt konnten teilweise Sortenunterschiede festgestellt werden, die Trockengewichte und Nährstoffaufnahmearten waren bei allen Behandlungen vergleichbar.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1 Einleitung.....	7
2 Theorie.....	9
2.1 Licht.....	9
2.2 Spektrale Zusammensetzung des Lichts für die Photosynthese.....	9
2.3 Leuchtmittel für Pflanzenwachstum.....	11
2.3.1 LED.....	11
2.3.2 Keramik-Metall-Halogen-Dampflampen (CMHL).....	12
2.3.3 Infrarotlampen.....	12
3 Material und Methoden.....	13
3.1 Aufbau des Versuchs.....	14
3.2 Beleuchtung.....	15
3.3 Nährstofflösung.....	17
3.4 Pflanzenmaterial.....	20
3.5 Versuchsbedingungen.....	20
3.6 Probennahmen und Ernte.....	22
3.7 Statistische Auswertung.....	23
4 Ergebnisse.....	23
4.1 Ergebnisse der Pflanzenmorphologie.....	24
4.2 Unterschiede in den Trockengewichten.....	26
4.2.1 Auswirkungen auf Evapotranspiration und Nährstoffaufnahme.....	30
5 Diskussion.....	37
5.1 Morphologische Unterschiede.....	37
5.2 Nährstoffaufnahme und Lichtquellen.....	39
5.3 Evapotranspiration.....	40
5.4 Optimierung des Versuchs.....	41
6 Fazit.....	43
7 Literaturverzeichnis.....	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gemessenes Lichtspektrum der Keramik-Metallhalogendampflampen (CMHL) mit dem Leuchtmittel CHD Agro 400	16
Abbildung 2:	Gemessenes Lichtspektrum der LED (4000 K), (LED Flutlichtstrahler 150 W, EVOLUTION IP65 Osram Chip 140 lm/W, MICRO SINE ELECTRIC SL, Spanien)	17
Abbildung 3:	Anordnung der Pflanzen und Mischboxen (Mix) in den Behandlungen LED (4000 K), LED (4000 K) plus Infrarot und Keramik-Dampflampen (CMHL)	20
Abbildung 4:	Durchschnittliche Temperatur [°C] im Tagesverlauf auf Boxenhöhe in den drei Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 4000 K + IR (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (▼)	21
Abbildung 5:	Sprosslänge [cm] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + IR und Keramik-Dampflampen (CMHL)	24
Abbildung 6:	Blattlängen [cm] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL)	25
Abbildung 7:	Blattflächen [cm ²] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL)	26
Abbildung 8:	Sprossgewicht [g] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL)	27
Abbildung 9:	Wurzelmasse [g] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL)	28
Abbildung 10:	Blattmasse [g] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL)	29
Abbildung 11:	Trockengewichte [g] der gesamten Pflanze der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL)	30
Abbildung 12:	Tägliche Nährstoffgehalte [%] von Ammonium (NH ₄ ⁺) in den hydroponischen Systemen unter der Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 4000 K + IR (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (▼)	32
Abbildung 13:	Tägliche Nährstoffgehalte [%] von Nitrat (NO ₃ ⁻) in den hydroponischen Systemen unter den Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 4000 K + IR (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (▼)	33
Abbildung 14:	Tägliche Nährstoffgehalte [%] von Phosphat (PO ₄ ³⁻) in den hydroponischen Systemen unter der Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 4000 K + IR (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (▼)	34
Abbildung 15:	Kumulierte Evapotranspiration von Tomatenpflanzen in den Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 4000 K + IR (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (▼)	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitlicher Ablauf des Versuchs	13
Tabelle 2: Verwendete Nährlösung	18
Tabelle 3: Mengen der einzelnen Nährstoffe [mg/L] in einer auf 40 % verdünnten Nährlösung	19

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
cm	Zentimeter
d	Tag
g	Gramm
K	Kelvin
L	Liter
lm	Lumen
m	Meter
m ²	Quadratmeter
ml	Milliliter
W	Watt
CMHL	Keramik-Metallhalogendampf-Hochdruckentladungs-Lampen
EC	electrical conductivity (elektrische Leitfähigkeit)
LED	light emitting diodes (lichtemittierende Dioden)
PAR	photosynthetically active radiation (photosynthetisch aktive Strahlung)
SA	<i>Saluso</i> (Tomatensorte)
SL	Stammlösung
SPAD	Sensitive Single Photon Avalanche Dioden
SW	<i>Sweeterno</i> (Tomatensorte)
TM	Trockenmasse

1 Einleitung

Das für die Landwirtschaft zur Verfügung stehende Frischwasser ist in vielen Regionen der Welt eine begrenzte Ressource. Die Weltbevölkerung ist den letzten 100 Jahren um das sechsfache gestiegen und soll sie in den nächsten 30-40 Jahren um weiter 2 bis 4 Milliarden steigen (Until, 2013). Prognosen der World Bank, im Bericht über „Wasser in der Landwirtschaft“, gehen von einem Anstieg bis zu 10 Milliarden Menschen im Jahr 2050 aus. Damit muss eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion von 70% einhergehen um weiterhin alle Menschen ausreichend mit Nahrung zu versorgen (World Bank, 2022). Der Umfang an anbaufähigen Land hat sich jedoch in den letzten 50 Jahren kaum verändert und ist nur leicht gestiegen (Cohen, 2003). Hinzu kommt, dass zunehmend anbaufähiges Land durch Urbanisation, Versalzung von Böden und Desertifikation verloren geht (Kopittke et al., 2019; FAO, 2023). Diese Entwicklungen weiten die landwirtschaftliche Produktion zunehmend auf aride Gebiete aus, und führen damit zu niedrigerer Produktivität (Ramankutty et al., 2008) sowie der Notwendigkeit von Bewässerung (Fernández-Cirelli et al., 2009).

Demographische Veränderungen und wirtschaftliche Entwicklung üben also einen erheblichen Druck auf erneuerbare und begrenzte Wasserressourcen aus. Betroffen sind vor allem aride Regionen (FAO, 2012). Es kommt beispielsweise in Latein Amerika zu unpassenden Wasserverbrauch durch Bewässerung, mit den Folgen zunehmender Versalzung, Erosion, und Staunässe landwirtschaftlich genutzter Flächen aber auch zu einem hohen Risiko der Desertifikation. In Argentinien sind beispielsweise knapp 60 % der Gesamtfläche von Desertifikation betroffen (Fernández-Cirelli et al., 2009). Steigende Durchschnittstemperaturen und der Rückgang an Frischwasser im Zuge des Klimawandels stellen weitere große Herausforderungen in diesen Regionen für die landwirtschaftliche Produktion dar (Federoff, 2015). Der Rückgang an verfügbarem Frischwasser wird zu einem verminderten Anbau an Kulturpflanzen auf diesen Grenzertragsstandorten führen, die Nahrungsmittelverfügbarkeit damit in vielen Regionen einschränken und ein hohes Konfliktpotenzial mit sich bringen (Unfried, 2021).

Eine Möglichkeit diesen Problemen zu entgegnen, ist das Konzept der Hydrokultur im geschlossenen Anbau. Es beschreibt den Anbau von Kulturpflanzen, insbesondere von Gemüsepflanzen in einem künstlichen System ohne Boden. Diese Systeme verwenden Wasserkammern oder künstliche Bodensubstrate, bei denen alle benötigten Komponenten für die ideale Entwicklung der Pflanzen hinzugegeben werden (Nalwade et al., 2017). Besonders wichtig könnte sich dieser Anbau für Regionen mit begrenztem Zugang zu Boden erweisen (Croft et al., 2017). Mit hydroponischen Systemen kann unabhängig von der Umwelt produziert werden (Alshrouf, 2017) und der Wasserverbrauch durch Wiederverwendung des benutzten Wassers in den Systemen reduziert werden. Unter den

kontrollierten Bedingungen des Anbaus können Verunreinigungen vermieden und damit Pestizideinsatz überflüssig und durch die Anpassung der Nährstoffgabe auf die Bedürfnisse der Pflanzen, Düngemittleinsatz reduziert werden (Pomoni et al., 2023).

Die Erträge in diesen Systemen sind meist signifikant höher als bei konventioneller Anbauweise auf Böden, da die Möglichkeit besteht, Pflanzen ideal zu versorgen und vertikal zu schichten. Damit kann sehr platzeffizient angebaut werden (Duston, 2017). Hydroponisch wachsende Pflanzen können somit in urbanen Gegenden in direkter Nähe zu Konsumentinnen und Konsumenten angebaut werden. Zudem besteht die Möglichkeit gereinigte Abwässer wieder zu verwenden. Die darin enthaltenen Nährstoffe können als Pflanzennährstoffe potenziell genutzt und Verluste dieser vermieden werden (Sutar et al., 2011). Nachteile dieser Systeme sind hohe Investitionskosten, ein hoher Energieverbrauch und notwendiges regelmäßiges Messen der verwendeten Nährstofflösung (Martínez, 2010).

Weitere Versuche zu hydroponischen Systemen werden im Zuge des Verbundprojekts HypoWave+ durchgeführt. Das Projekt wird von der Technischen Universität Braunschweig koordiniert und es wird untersucht, ob sich Nährstoffe aus gereinigtem Wasser aus Kläranlagen für die Lebensmittelproduktion eignen. Versuche zu diesem Thema an der Universität Hohenheim zeigten, dass die im Gewächshaus installierten Keramik-Metall-Halogen-Dampflampen (CMHL) eine erhebliche Wärmestrahlung und hohen Stromverbrauch aufweisen. Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich daher mit den Auswirkungen unterschiedlicher Beleuchtungsarten auf hydroponisch wachsende Tomaten im Gewächshaus. Es soll darüber Auskunft geben, ob LEDs in der zusätzlichen Assimilationsbeleuchtung vergleichbar mit der Leistung der Keramik-Metall-Halogen-Dampflampen (CMHL) sind.

Der Versuch wurde in drei Behandlungsmethoden unterteilt. Als Beleuchtung für das Experiment wurden LED (4000 K), LED (4000 K) plus Infrarot und Keramik-Metall-Halogen-Dampflampen (CMHL) verwendet. Die CMHL sind standardmäßig im Gewächshaus der Universität Hohenheim, im Phytotechnikum (PHT) installiert. Verwendet wurden für das Experiment die Tomatensorten *Saluoso* und *Sweeterno*, welche auf ihre Morphologie, Nährstoffaufnahme und Trockenmasse untersucht wurden.

Hypothesen

- Die Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung wirkt sich auf das Längenwachstum der Tomatenpflanzen aus.
- Insgesamt besteht kein signifikanter Unterschied in der Trockenmasse und den Nährstoffaufnahmeleistungen der verschiedenen Behandlungen.
- Es können Sortenunterschiede hinsichtlich der Morphologie und Trockenmasse festgestellt werden.

2 Theorie

2.1 Licht

Licht ist aus physikalischer Sicht elektromagnetische Strahlung, im für den Menschen sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums liegt. Der sichtbare Bereich umfasst dabei die Wellenlängen von 380 nm, bis 750 nm. Das sichtbare Licht stellt nur einen kleinen Teil der Bandbreite der elektromagnetischen Strahlung dar. Die kurzwelligere Strahlung wird als Ultraviolette Strahlung und die längerwellige Strahlung als Infrarotstrahlung zusammengefasst. (Giancoli et al. 2019). Die unterschiedlichen Wellenlängen verschiedener Strahlungstypen haben dabei unterschiedliche Energieniveaus. Die elektromagnetische Strahlung stammt aus der Fusion von Wasserstoffatomen zu Heliumatomen, dieser Prozess findet in der Kernfusion der Sonne statt (Kadereit, 2021). Die Wellenlängen unterscheiden sich in ihrer Energie, je kürzer die Wellenlänge der Strahlung, umso höher ist die Energie (Dallmann et al. 2019).

2.2 Spektrale Zusammensetzung des Lichts für die Photosynthese

Licht ist aus Sicht der Pflanzen ein besonders wichtiger Faktor, da er primär für die Photosynthese gebraucht wird und weitere Prozesse wie die Kontrolle physiologischer und morphologischer Antworten steuert (Kozai et al., 2019). Die Photosynthese ist der zentrale Energieumwandlungsprozess, der Lichtenergie in Stoffwechselenergie umsetzt. Damit stellen Pflanzen die Lebensgrundlage aller heterotrophen Organismen dar (Schopfer & Brennicke, 2010). Im Bereich der Wellenlängen von 400 nm bis 700 nm, können Pflanzen das Licht für die Photosynthese verwenden. Dieser Bereich des Lichts wird als fotosynthetisch aktive Strahlung (PAR) bezeichnet (Kadereit, 2021). Bei der PAR werden die Photonen, die in diesem Wellenlängenbereich in einer Sekunde auf einer Fläche von 1 m² auftreffen in μmol gemessen. Für Pflanzen ist jedoch nicht nur die Photonenflussdichte, sondern auch die spektrale Zusammensetzung der photosynthetisch aktiven Strahlung von Bedeutung (Dallmann et al. 2019), dies hängt mit den Eigenschaften der Photosynthesepigmente zusammen, welche die Lichtabsorption und – übertragung beeinflussen (Kadereit, 2021).

Die Lichtenergie wird durch Photosynthesepigmente in den Chloroplasten in chemische Energie umgewandelt. In der Lichtreaktion wird ATP und das Reduktionsmittel NADPH gebildet, diese Moleküle werden zur Assimilation von Kohlenstoff und in der Dunkelreaktion zur Synthese von Kohlenhydraten genutzt (Campbell, 2019). Chlorophyll a ist das primäre Photosynthesepigment, es hat eine besondere

Bedeutung, da es in den Reaktionszentren, den Orten der photosynthetischen Primärprozesse, hauptsächlich vorkommt (Kadereit, 2021). Die Reaktionszentren werden von Lichtsammelkomplexen umgeben, die für eine viel effektivere Lichtabsorption sorgen, hier befinden sich die meisten Chlorophyllmoleküle. In diesem Membran-Protein-Pigment Komplex (Reaktionszentrum, RC) findet eine Reihe von Photonen induzierten Protonentransfers statt (Suyanto et al., 2012). Das Reaktionszentrum ist Bestandteil eines Fotosystems. Es gibt zwei Hauptfotosysteme, die zusammenarbeiten, um Lichtenergie in chemische Energie umzuwandeln (Nultsch, 2012). Die Lichtreaktion der Photosynthese findet hauptsächlich in den Fotosystemen statt (Campbell, 2019).

Die Reaktionszentren und Photosynthesepigmente finden sich insbesondere in den Membranen der Thylakoide im Stroma der Chloroplasten. Dort wird die Lichtenergie in Form von Photonen absorbiert und in chemische Energie umgewandelt (Kadereit, 2021). Chlorophyll ist das wichtigste Photosynthesepigment und unterteilt sich in verschiedene Typen. Chlorophyll a absorbiert vor allem die Wellenlängen 400 - 500 nm, des blauen bis lila Lichts, sowie 650 – 700 nm des roten Lichts. Chlorophyll b hingegen absorbiert Licht der Wellenlängen 600 – 650 nm (Suyanto et al., 2012), diese Wellenlängen werden von Chlorophyll a nicht so effizient absorbiert und damit erweitert Chlorophyll b das Spektrum des für die Pflanzen nutzbaren Lichts (Kadereit, 2021). Beide Chlorophyllmoleküle absorbieren den dazwischenliegenden grünen Spektralbereich wenig und den außenliegenden dunkelroten gar nicht (Nultsch, 2012). Die Hauptfunktion von Chlorophyll b ist die Energieübertragung auf das Chlorophyll a und andere Photosynthesepigmente, die sich in den Reaktionszentren befinden (Campbell, 2019). Weitere Photosynthesepigmente sind Carotinoide, insbesondere Beta-Carotin, dieses Pigment kann ebenfalls Licht verschiedener Wellenlängen absorbieren und erweitert somit das Spektrum des von Pflanzen nutzbaren Lichts. Zudem dienen sie als Antioxidantien und schützen die Zellen vor schädlichen Auswirkungen durch Lichtstress (Kadereit, 2021).

Die Photosynthesepigmente der Pflanzen besitzen ein Aktionsspektrum, das die Effizienz der Lichtabsorption über den sichtbaren Bereich des Lichts beschreibt. Das Aktionsspektrum der verschiedenen Pigmente kennzeichnet sich durch unterschiedliche Maxima im roten und blauen Wellenlängenbereich (Nultsch, 2012). Dies führt zu unterschiedlichen Absorptionsmengen der Chlorophyllmoleküle in Abhängigkeit der Wellenlängen des Lichts (Campbell et al. 2019). Chlorophyll b reflektiert leicht gelbes bis grünes Licht (Suyanto et al., 2012). Daher ist nicht jede Strahlung des sichtbaren Lichts für die Pflanze von gleichem Nutzen (Kadereit, 2021). Die Aktionsspektren der Photosynthesepigmente erhält man durch Berechnung der eingestrahnten Quanten der verschiedenen Wellenlängen und ihre physiologischen Effekte auf die Pflanze (Nultsch, 2012).

2.3 Leuchtmittel für Pflanzenwachstum

2.3.1 LED

Licht emittierende Dioden hatten aufgrund ihres hohen Preises in der Vergangenheit nur eine geringe Bedeutung in der Assimilationsbeleuchtung in Gewächshäusern. Glüh-, Fluoreszenz- und Hochdruck-Entladungslampen wie Hochdruck-Natrium- (HPS) sowie Keramik-Dampflampen (CMHL), werden vermehrt durch LEDs ersetzt (Singh, 2015; Despommier, 2020). Im Gewächshaussektor werden diese zunehmend effizienter und wirtschaftlicher (Palitessa et al., 2021).

LEDs werden häufig nach ihrer emittierten Farbtemperatur in Kelvin (K) unterteilt, in kaltweiße, neutralweiße und warmweiße. Von den neutralen LEDs eignen sich kaltweiße aufgrund ihres Strahlenspektrums und den darin enthaltenen hohen Blauanteil, in ihrem Licht, am ehesten (Dallmann et al. 2019). Es gibt speziell für die Pflanzenbeleuchtung entwickelte LEDs, die auf das benötigte Lichtspektrum für die Photosynthese abgestimmt sind. Durch die Auswahl des Halbleitermaterials kann die Wellenlänge des emittierten Lichts bestimmt werden (Laber, 2020). Lampen die speziell auf die Photosynthese abgestimmt sind, enthalten einen höheren Blauanteil in ihrem Lichtspektrum. Pflanzen reagieren besonders stark auf blaues Licht für ein normales photosynthetisches Wachstum (Cope et al., 2013). Dieser Vorteil ist jedoch mit höheren Kosten verbunden und kann aufgrund der natürlichen Einstrahlung von Sonnenlicht nur begrenzt in Gewächshäusern mit unterstützender künstlicher Beleuchtung genutzt werden (Dallmann et al., 2019).

LEDs bieten gegenüber herkömmlichen zusätzlichen Beleuchtungsmethoden im Gewächshaus einige Vorteile. Sie haben eine höhere Quanteneffizienz als Gasentladungslampen, das heißt sie haben eine höhere Lichtemission pro Einheit eingesetzter elektrischer Energie. Weiter haben sie eine längere Lebenszeit, ein steuerbares Emissionsspektrum, sichere Handhabung und sichere Entsorgung (Singh et al., 2015). In Abhängigkeit der Wellenlänge des emittierten Lichts, lässt sich in Pflanzen die Photomorphogenese gezielt durch LEDs beeinflussen (Laber, 2020). Die Herstellungskosten für LEDs sind in den letzten Jahrzehnten stark gesunken und gleichzeitig kam es zu einer Steigerung ihrer Effizienz (Morrow 2008). LEDs weisen ein breites Spektrum an Farben auf, welches angepasst werden kann, sie benötigen bei ihrer Herstellung keine toxischen Substanzen und weisen eine kompakte Größe auf (Palitessa et al., 2021).

Ein weiterer Vorteil ist die geringe Wärmeabstrahlung im Vergleich zu herkömmlichen Beleuchtungsmethoden. LEDs können sehr dicht an die Kulturen gebracht werden und für Verfahren wie Interlighting verwendet werden (Laber, 2020). Dabei werden Lichtquellen unterhalb des Blattdachs der Pflanzen angebracht. Damit wird eine Beleuchtung der unteren Blätter und Stängel ermöglicht, dies führt zu einer verbesserten Lichtverteilung und damit erhöhten Produktivität (Resh, 2022).

2.3.2 Keramik-Metall-Halogen-Dampflampen (CMHL)

Metall-Halogenlampen weisen gegenüber klassischen Glühlampen eine höhere Lichtenergie auf. Ihr Einsatz in Gewächshäusern führt zu höheren Trockengewichten, dunklerer Farbe, größeren Blättern und dickeren Sprossen (Duke et al., 1975). Sie haben eine hohe Bedeutung für die Assimilationsbeleuchtung im Gartenbau, da sie ein sonnenähnliches Licht mit breitem Strahlungsspektrum erzeugen (Dallmann et al., 2019). Sie sind Nachfolger von Hochdruck-Natrium-Dampflampen (HPS) und haben eine sehr gleichmäßige Lichtverteilung über den gesamten PAR-Bereich und werden auch als „Vollspektrumlampen“ bezeichnet, da sie speziell an die Lichtbedürfnisse der Pflanzen angepasst sind (Palmitessa et al., 2021). Hochdruck-Natrium-Dampflampen (HPS) weisen ebenfalls eine hohe Lichtausbeute, hohe Emissionsspitzen und gute elektrische Effizienz von 30 – 40 % der elektrischen Energie in Lichtenergie auf. Aus diesem Grund sind sie im Gartenbau weit verbreitet (Palmitessa et al., 2021). Metall-Halogen-Dampflampen (MH) kennzeichnen sich durch eine Anpassung der Metallhalogenide, um das emittierte Spektrum auf die Pflanzenbedürfnisse anzupassen. Durch diese Anpassung ist jedoch die Energieeffizienz dieser Lampen um etwa 25 % vermindert (Gupta et al., 2017). Hochdruck-Natriumlampen (HPS) sind zwar weit verbreitet, energieeffizient und weisen moderate Investitionskosten auf (Van Ieperen & Trouwborst, 2007). Jedoch sind sie in ihrer spektralen Verteilung nicht optimal für das Pflanzenwachstum (Pinho, 2008) und haben eine starke Strahlungshitze (Van Ieperen & Trouwborst, 2007).

2.3.3 Infrarotlampen

Infrarotlampen strahlen langwellige Strahlung ab und Erhitzen die Oberflächen, von denen sie absorbiert werden (Kavga et al., 2012). Infrarotstrahlung ist eine Form elektromagnetischer Strahlung mit längeren Wellenlängen als sichtbares Licht, die von warmen Objekten emittiert wird (Giancoli et al., 2019). Der Einsatz von Infrarotstrahlung im Gewächshaus bietet die Möglichkeit mit hoher Richtungskontrolle, lokale Temperaturbedingungen in offenen Räumen zu erhöhen (Kavga et al. 2012). Infrarotstrahlung ermöglicht es, die Wachstumsbedingungen durch Steigerung der Temperatur für Pflanzen erhöhen ohne die Gesamttemperatur im Gewächshaus zu erhöhen. Dies kann Heizungskosten reduzieren und Wärmeverluste verringern (Kavga et al., 2012; 2015). Dies geschieht dadurch, dass Infrarotquellen nur die Oberfläche von Pflanzen erwärmen im Gegensatz zu herkömmlichen Heizsystemen, die die Gesamttemperatur in Gewächshäusern erhöhen. Infrarotlampen können schnell aktiviert werden und damit auf Temperaturänderungen gezielt reagieren (Kavga et al., 2015).

3 Material und Methoden

Auf der Suche nach einer Antwort auf die Frage der optimale Beleuchtungstechnik im Gewächshaus Phytotechnikum (PHT) der Universität Hohenheim wurden eine Reihe von Versuchen zu verschiedenen Lichtquellen in der Vergangenheit durchgeführt. Der Versuch dieser Bachelorarbeit fand im Zeitraum April bis Mai statt. Es wurden zwei Tomatensorten gleichmäßig auf drei Versuchsabschnitte in hydroponischen Systemen mit unterschiedlichen Lichtquellen verteilt und auf ihr Wachstum sowie ihre Nährstoffaufnahme untersucht. Insgesamt waren es 18 Pflanzen in drei verschiedenen Behandlungen. Im folgenden Abschnitt wird der Versuch und sein Aufbau näher erläutert. Für einen besseren Überblick des Versuchs ist der zeitliche Verlauf in der untenstehenden Tabelle 1 dargestellt. Das Experiment dauerte 25 Tage. Die Tage wurden ab dem Zeitpunkt gezählt, an dem die jungen Pflanzen in die Hydrokultur der verschiedenen Versuchsabschnitte eingesetzt wurden (Tage nach Transplantation).

Tabelle 1: Zeitlicher Ablauf des Versuchs

Für alle Aktivitäten ist das Datum und die Anzahl der Tage nach der Transplantation der Tomatenpflanzen in die Systeme angegeben (Start ab Tag 0)

Aktivität	Datum	Tage nach Transplantation
Keimung der Samen	14.03.2023	-
Aufbau der Systeme	02.04.2023	-
Einsetzen der Pflanzen	17.04.2023	0
Anpassung pH mit 3 mol/L HCl	01.05.2023	14
Wechsel der Nährlösung	03.05.2023	16
Wechsel der Nährlösung	08.05.2023	21
Ernte	12.05.2023	25
Letzte Messung Nährstoffgehalte	12.05.2023	25
Trockengewichte wiegen	24.05.2023	-
Nährstoffgehalt der Proben messen mit Autoanalyzer	25.05.2023	-

3.1 Aufbau des Versuchs

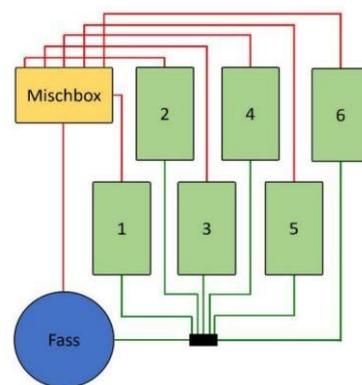
Der Versuch wurde im Gewächshaus Phytotechnikum der Universität Hohenheim durchgeführt. Es wurden drei Systeme unter verschiedenen Lichtquellen mit zwei Tomatensorten versehen. In einem System waren es sechs Pflanzen. Die insgesamt 18 Tomatenpflanzen des Versuchs waren in allen drei Abschnitten gleich angeordnet.

Das Wasser mit der Nährlösung bewegte sich in den Systemen über einen Gartenschlauch (13 mm, GARDENA DE GmbH) und PVC-Schläuchen (4/7 mm, PVC-Schlauch für Tropfberegnung), von einem 60 L Fass (Krüger GmbH, DE) mithilfe einer Pumpe zu den Boxen. Das gepumpte Wasser mit Nährlösung floss über einen Verteiler und wurde in sechs schmale PVC-Schläuche, die in die Boxen führten aufgeteilt. In den Boxen (Eurobehälter, (30 • 20 • 17 cm) Auer, Packaging, DE) durchfloss das Wasser den Wurzelraum, wodurch ein Nährstoffaustausch gewährleistet wurde und die Nährlösung stets in Bewegung war. Die Boxen waren mit Deckeln abgedeckt, welche durchbohrt waren, um die Pflanzen mit Ceaprenstopfen (36 mm) einzusetzen. Von den einzelnen Boxen floss die Nährlösung anschließend über geformte Wasserschläuche auf der Rückseite der Boxen in eine Mischbox. Hier sammelte sich das gesamte Wassergemisch der sechs Boxen, nachdem es durch den Wurzelraum der Pflanzen geflossen war.

Von der Mischbox aus wurde das Wassergemisch anschließend über einen Gartenschlauch (13 mm) in das 60 L Wasserfass entlang der Schwerkraft zurückgeleitet. Die verwendete Pumpe (EHEIM compactON 1000, EHEIM GmbH & Co. KG, DE) erreichte eine Fließgeschwindigkeit von $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Insgesamt fassten die Systeme jeweils 101,4 Liter Flüssigkeit.



a) Keimlinge am 02.04.2023



b) Aufbau des Systems nach Fischer (2022)



c) System nach Einsetzen der Pflanzen am 17.04.2023



d) Wurzelsystem (SA) am 13.04.2023

Über jedem System wurden zwei Lichtquellen angebracht, sowie ein Temperatursensor des „Tinytag“ Datenlogger (Tinytag Plus 2 TGP-4500, Gemini Data Loggers, GB) für die Temperatur- und Luftfeuchtmessung. Aufgrund unterschiedlicher Strahlungsstärken und Temperaturentwicklungen wurden die Beleuchtungsquellen über den Systemen nicht auf gleicher Höhe angebracht. Die Höhe wurde nicht genau gemessen, lediglich die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR), die im Mittel $310 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ betrug. In den System mit LED (4000 K) plus Infrarot wurde die Infrarotlampe so angebracht, dass ihre Wärmeentwicklung, bei der Installation dieselbe Temperatur auf Höhe der Boxen hatte, wie die Keramik-Metallhalogendampflampe (CMHL).

Auf der Rückseite und zur Seite hin wurde schwarze lichtundurchlässige Folie angebracht. Damit sollten Einflüsse der natürlichen Einstrahlung und Strahlung aus anderen Versuchen der Nebenräume des Gewächshauses reduziert werden.

3.2 Beleuchtung

Die Beleuchtung begann jeden Tag ab 9:30 Uhr bis abends 23:30 Uhr. Gemessen wurde jeden Tag zwischen 16 und 17 Uhr. Die Einstrahlung über jeder Box und Höhe von 60 cm über jeder Box, plus die Beleuchtung auf jeder Box und sobald die Boxen durch die Pflanzen beschattet wurden auf Blattdach-Höhe wurden in dieser Zeit gemessen. Die gemessenen Werte betragen zwischen den Beleuchtungsmethoden, 60 cm über den Boxen im Durchschnitt bei LED (4000 K) $388 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, bei LED (4000 K) plus Infrarot $384,8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ und bei der Keramik-Metall-Halogenlampe (CMHL) $336,7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Für die ersten beiden Behandlungen wurden LEDs (LED Flutlichtstrahler 150 W Evolution IP65 Osram Chip 140 lm/W, MICRO SINE ELECTRIC SL, Spanien) verwendet. Diese enthielten die OSRAM DURIS E 2835 (ams-OSRAM AG, Österreich) Chips. Für die zweite Behandlung kamen zusätzlich zwei Infrarotlampen zum Einsatz mit 75 W (Like Sun GmbH). Für die dritte Behandlung unter CMHL wurden Keramik-Metallhalogendampf-Hochdruckentladungs-Lampen (CMHL), der MGR-K Serie der DH Licht GmbH mit dem Leuchtmittel CHD Agro 400 verwendet.



a) LED (4000 K) + Infrarot



b) Keramik-Dampflampen (CMHL)

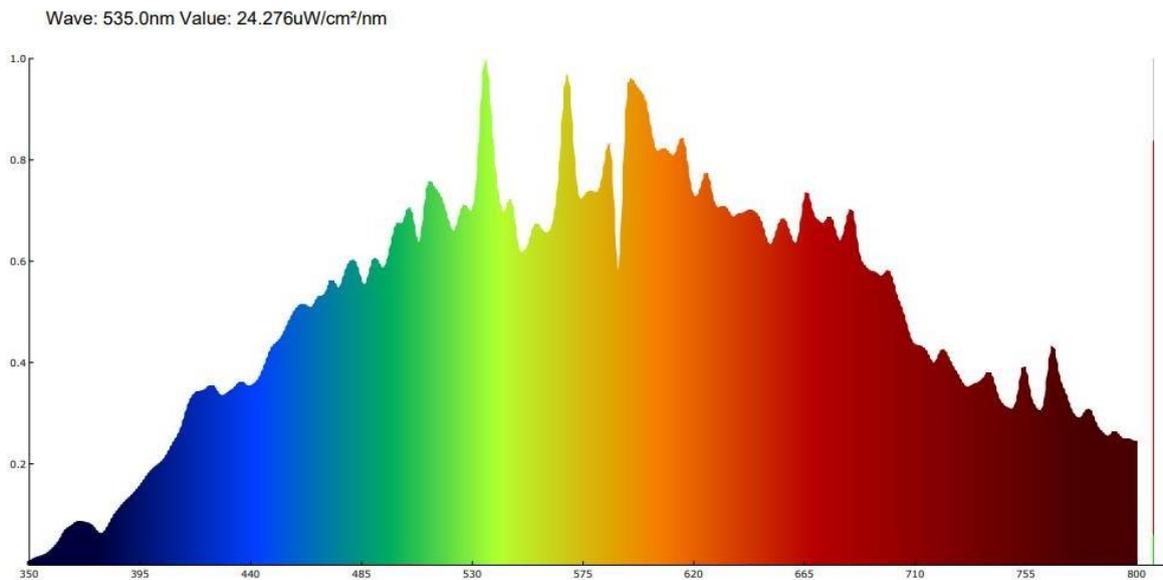


Abbildung 1: Gemessenes Lichtspektrum (05.01.2024, 19:40 Uhr) der Keramik-Metallhalogendampflampen (CMHL) mit dem Leuchtmittel CHD Agro 400. aus Messergebnissen des OHSP-350P Messgeräts (Spektrale Prüfmaschine für Durchlassgrad, Hangzhou HOPOO Light&Color technology Co. Ltd., CHN), Messhöhe 44 cm über den Boxen. Fig. 490g, Universität Hohenheim.

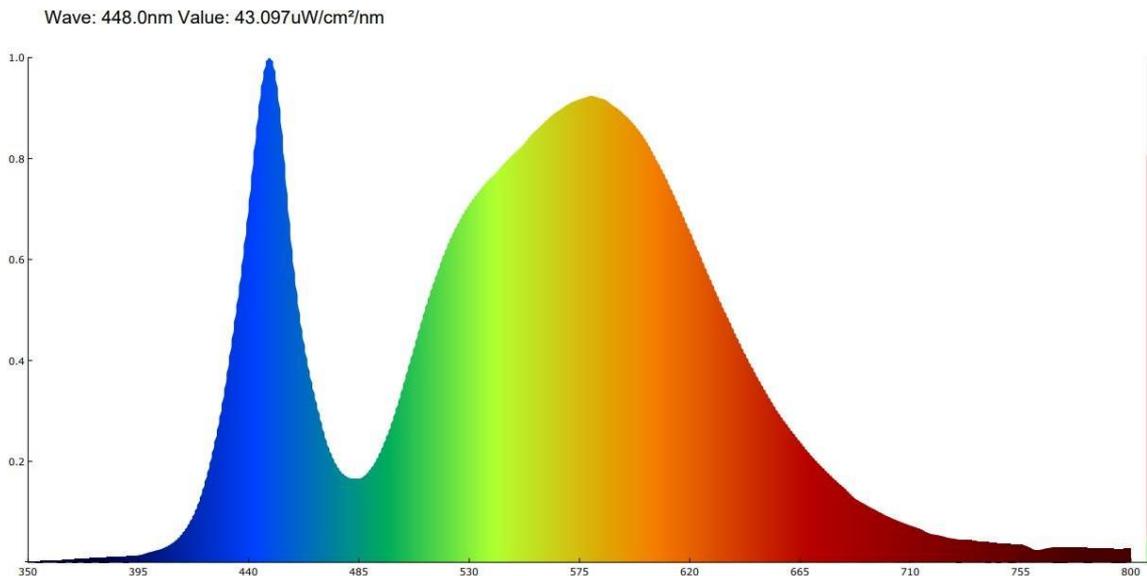


Abbildung 2: Gemessenes Lichtspektrum (05.01.2024, 19:52 Uhr) der LED (4000 K), (LED Flutlichtstrahler 150 W, EVOLUTION IP65 Osram Chip 140 lm/W, MICRO SINE ELECTRIC SL, Spanien) aus Messergebnissen des OHSP-350P Messgeräts (Spektrale Prüfmaschine für Durchlassgrad, Hangzhou HOPOO Light&Color technology Co. Ltd., CHN) Messhöhe 44 cm über den Boxen. Fig. 490g, Universität Hohenheim.

Für die LED (4000 K) Behandlungen wurden zwei Lampen mit der Lichtfarbe 4000 K (neutralweiß) verwendet. Die emittierte Strahlung der LEDs liegt im überwiegend im Bereich von 430 – 455 nm und 550 – 620 nm. Damit haben die LEDs Höhepunkte im blauen und gelb-orangen Bereich der Wellenlängen.

Das der Keramik-Dampflampen (CMHL) verwendete Leuchtmittel CHD Agro 400 der dritten Behandlung emittiert über das Lichtspektrum von 400 – 780 nm. Die höchste gemessene relative Intensität liegt dabei im grün bis gelb-orangen Bereich, bei 530 – 620 nm.

3.3 Nährstofflösung

Für den Versuch wurde eine 40 % verdünnte Nährstofflösung verwendet. Diese wurde aus einzelnen Stammlösungen nach Kreij et al (2003), mit Veränderungen durch das Fachgebiet (490g) der Universität Hohenheim vorbereitet. Die Stammlösungen wurden im Labor aus Chemikalien der Firma Roth (Deutschland) mit deionisiertem Wasser hergestellt und mit den Buchstaben (A – H) unterteilt.

Tabelle 2: Verwendete Nährlösung Zusammensetzung der Nährlösung jeweils aus 24 mL jeder Stammlösung (SL) für ein 60L Fass. Aufgelistet sind die Stammlösungen (A-H), jeweils dazugehöriger Nährstoff, Reagenz, Summenformel und das Gewicht, das für einen Liter Stammlösung (SL) eingewogen wurde.

SL	Nährstoff	Reagenz	Summenformel	SL [g/L]
A	NH ₄ , P	Diammoniumhydrogenphosphat	(NH ₄) ₂ H ₂ PO ₄	21
B	Ca, NO ₃	Kalziumnitrattetrahydrat	Ca(NO ₃) ₂ x 4H ₂ O	490
C	K, NO ₃	Kaliumnitrat	KNO ₃	271
D	K, S	Kaliumsulfat	K ₂ SO ₄	60
E	K, P	Kaliumdihydrogenphosphat	KH ₂ PO ₄	90
F	Mg, Cl	Magnesiumsulfatheptahydrat	MgSO ₄ x 7 H ₂ O	170
G	Ca, Cl	Calciumchloridhydrat	CaCl ₂ x 2H ₂ O	21.5
	K, Cl	Kaliumchlorid	KCl	10
H	Fe	EDTA, Eisen-Natriumsalz Trihydrat	C ₁₀ H ₁₂ FeN ₂ NaO ₈	5.3
	Mn	Mangansulfatmonohydrat	MnSO ₄ x H ₂ O	1.9
	Zn	Zinksulfat-7-hydrat	ZnSO ₄ x 7H ₂ O	1.3
	Cu, S	Kupfersulfatpentahydrat	CuSO ₄ x 5H ₂ O	0.25
	Mo, NH ₄	Ammoniumheptamolybdäntetrahydrat	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ x4H ₂ O	0.09
	B	Borsäure	H ₃ BO ₄	2.9

In Tabelle 2 sind die Konzentrationen der einzelnen Elemente und Ionen aufgelistet, die in einer 100-prozentigen Nährlösung vorkommen. Für den Versuch wurde eine 40-prozentige Nährlösung in einem 60 L Fass hergestellt. Dafür wurde von jeder Stammlösung (SL) 24 mL pro Fass pipettiert. Zuerst wurde jedes Fass mit circa 20 L deionisiertem Wasser gefüllt, anschließend jede SL hinein pipettiert und nach Füllen mit deionisiertem Wasser mit einem Rührstab mechanisch vermischt. Im Anschluss wurden die Fässer mit Nährlösung an die Systeme angeschlossen. Über die Pumpe wurden die Boxen wieder mit Nährlösung aufgefüllt. Da ein System insgesamt 101,4 L Volumen fasste, musste die noch fehlende Wassermenge mit Nährstofflösung in einem weiteren Fass zubereitet werden und mit Messbechern in die Systeme nachgefüllt werden.

Tabelle 3: Mengen der einzelnen Nährstoffe [mg/L] in einer auf 40 % verdünnten Nährlösung, die aus den acht Stammlösungen (A – H) und deionisiertem Wasser hergestellt wurde.

Nährstoff	40 % Nährlösung [mg/L]
N aus NO₃	38,28
N aus NH₄	1,8
P	10,16
K	65,12
Ca	35,6
Mg	6,72
S	13,28
Cl	3,96
Fe	0,324
Mn	0,248
Zn	0,12
Cu	0,024
Mo	0,02
B	0,2

Täglich wurde der pH- und die EC-Werte (pH-Messgerät, WTW, Deutschland) der in den Systemen vorhandenen Nährlösungen geprüft. Der EC-Wert ist der Wert, der die elektrische Leitfähigkeit Nährlösung wiedergab. Die Anzahl an gelösten Stoffen in [mg/L] ist direkt proportional zur elektrischen Leitfähigkeit in [millimhos • Einheit⁻¹ • Volumen⁻¹], jedoch unterscheidet sich der EC nicht nur durch die Menge sondern auch durch die vorhandenen Stoffe in der Lösung und ihrer spezifischen elektrischen Leitfähigkeit. So leitet Magnesiumsulfat beispielsweise nur ein Drittel so viel wie Ammoniumsulfat (Resh, 2022). Aus diesem Grund wurde die elektrische Leitfähigkeit der zubereiteten Nährlösung im Verlauf des Versuchs nur als Orientierungswert für die noch verbleibende Nährstoffkonzentration in der Lösung genommen. Der EC lässt Rückschlüsse auf die Abnahme und verminderte Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe in der Nährlösung zu.

Mit dem Autoanalyzer 2 (Seal Analytical) des Fachgebiets (490g) wurde der Ammoniumgehalt, der Nitratgehalt und der Phosphatgehalt der Nährlösung anhand täglicher Proben aller Systeme bestimmt und in den Ergebnissen graphisch dargestellt. Die Nährlösung wurde bei Unterschreiten kritischer Grenzen zweimal ausgewechselt. Dies geschah nach dem Start des Versuchs am 17.04.2023, an Tag 16, dem 03.05.2023 und an Tag 21, dem 08.05.2023.

Der optimale pH-Wert in hydroponischen Systemen liegt zwischen 5,5 und 6,5. In diesem Bereich liegen die meisten Pflanzennährstoffe in verfügbarer Form vor und die Pflanzen können dadurch normal wachsen (Meselmani et al. 2021). Der optimale pH für hydroponisch wachsende Tomaten befindet sich in der Bandbreite von pH 6,0 – 6,5 (Sharma et al. 2018). Am 01.05.2023 wurde der pH-Wert mit

Salzsäure (3 mol/L) korrigiert, da an diesen und den darauf folgenden Tag kein Wasserwechsel mehr möglich war.

3.4 Pflanzenmaterial

Für den Versuch wurden die Tomatensorten *Saluoso* (SA) und *Sweeterno* (SW) (Rijk Zwaan Welver GmbH, Niederlande) verwendet. Die Pflanzen wurden am 14.03.2023 in feuchtem Filterpapier vorgekeimt und anschließend am 17.04.2023 mit Ceaprenstopfen (36 mm, Greiner Bio-One GmbH, DE) versehen und in die ausgebohrten Deckel (30 mm) der Kisten, knapp zur Hälfte der Stopfengröße eingesetzt. Für jede Behandlung geschah dies je dreimal für die Sorte *Saluoso* (SA) und dreimal für die Sorte *Sweeterno* (SW). Es konnte kein deutlicher Größenunterschied der Sorten beim Einsetzen am 17.04.2023 beobachtet werden.

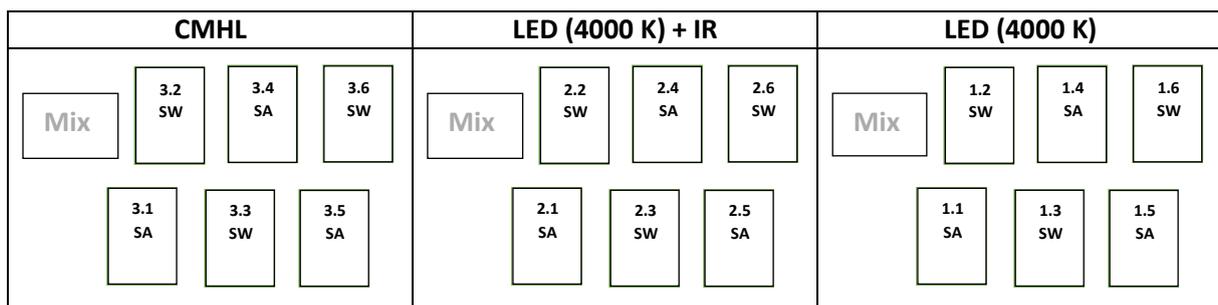


Abbildung 3: Anordnung der Pflanzen und Mischboxen (Mix) in den Behandlungen LED (4000 K), LED (4000 K) plus Infrarot und Keramik-Dampflampen (CMHL), der Sorten *Saluoso* (SA) und *Sweeterno* (SW). Randomisiertes Schema der Verteilung jeweils gleich in den unterschiedlichen Behandlungen um möglichst gleiche Bedingungen der unterschiedlichen Einflüsse auf die Pflanzen zu haben.

3.5 Versuchsbedingungen

Um den Verlauf der Temperaturbedingungen nachvollziehen zu können, sowie die Transpiration der Pflanzen, wurden Messgeräte an Tag 1 bis Tag 25 angebracht. Dafür wurden Tinytag Plus 2 TGP-4500 (Gemini Data Loggers, GB) verwendet. Diese wurden in der Mitte des Versuchs angebracht. Die Umgebungstemperatur wurde automatisch alle 15 Minuten gemessen. Aus den gesamten Daten des Versuchs wurde der mittlere stündliche Temperaturverlauf jeder Behandlung berechnet (Abb. 4).

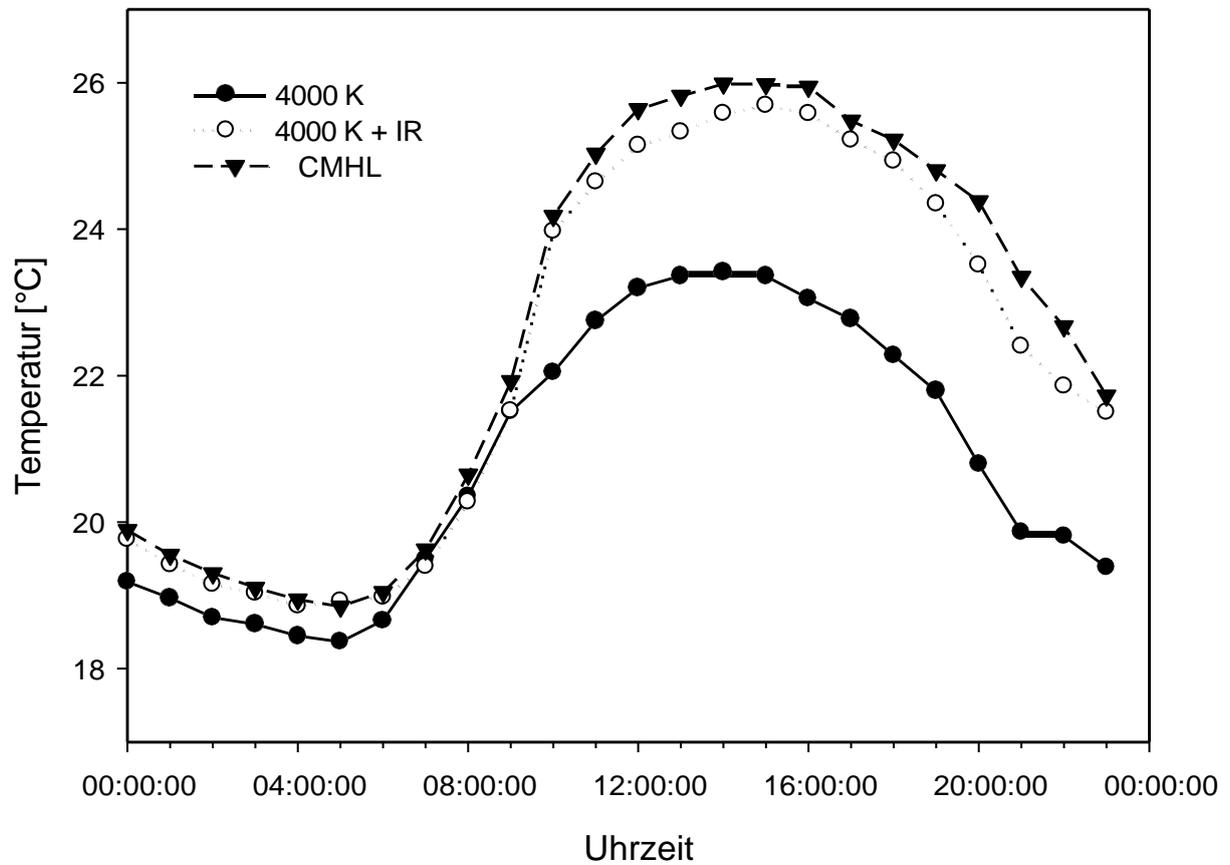


Abbildung 4: Durchschnittliche Temperatur [°C] im Tagesverlauf auf Boxenhöhe in den drei Behandlungen mit LED 4000 K (•), LED 4000 K + IR (o) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (▼; mit Beleuchtung zwischen 9:30 Uhr und 23:30 Uhr.



a) LED (4000 K) + IR Behandlung am 23.04.2023



b) Tinytag-Messgerät (Gemini Data Loggers, GB)

3.6 Probennahmen und Ernte

Die täglichen Proben fanden zwischen 16:00 Uhr und 17:00 Uhr statt. Es wurde die Pflanzenhöhe und der SPAD (SPAD-502 Plus, Konica Minolta, JPN) jeder Pflanze aufgenommen. Weiter wurde die photosynthetisch aktive Strahlung mit dem PAR-Meter gemessen. Zuerst auf Höhe der Boxen und dann in der 20 cm Referenzhöhe über den Boxen sowie auf der Höhe der höchsten Pflanze gemessen.

An Tag 26 wurden die Tomatenpflanzen geerntet. Dabei wurden alle Blattlängen, die Sprosslängen und Sprossdicken sowie die Länge der Blätter mit und ohne Blattstiele (Petiole) gemessen. Dabei wurden die Blätter (mit Blattstil) vom Spross getrennt, gemessen, anschließend separiert und einzeln abgepackt. Die Blattflächen wurden bevor sie zum Trocknen abgepackt wurden in ein Blattflächenmessgerät gegeben (LI-COR 3100 Area Meter, USA). Für das Bestimmen der Trockenmasse (TM) der Pflanzenteile wurde die Blattstiele, Blätter, Blüten, Sprosse, und Wurzeln abgetrennt und einzeln verpackt. Alle unterschiedlich verpackten Pflanzenteile wurden dann in einen Trockenschrank (BINDER GmbH, DE) gegeben und bei 65°C für 48 Stunden getrocknet. Danach wurden sie einzeln mit einer Grammwaage (KERN & Sohn GmbH, Analysenwaage ABS-N/ABJ-NM, DE) gewogen

Die Nährstoffaufnahme der Pflanzen wurde mit Proben der Nährlösung ermittelt. Täglich wurden aus jeder Mischbox eine 20 mL Probe entnommen, diese wurde im Anschluss gefiltert und in einen Probebehälter gegeben. Die Proben wurden bis zur Auswertung mit dem Technicon Autoanalyzer II (Seal Analytical) nach Versuchsende eingefroren und anschließend analysiert. Der Autoanalyzer II arbeitet mit 1 mL Nährstoffproben, die mit 1 ml deionisiertem Wasser verdünnt werden. Analysiert wurde die Nährlösung aus dem Versuch auf ihren Nitrat-, Ammonium und Phosphatgehalt. Es wurde die Differenz zum Nährstoffwechsel in Prozent berechnet, um die Abnahme der Nährstoffkonzentration grafisch zu veranschaulichen. Der Nährstoffwechsel fand an den Tagen 0, 16 und 21 in allen drei Systemen zeitgleich statt. Bei dem Wechsel wurde das System zuerst leerpumpt, eine neue Nährlösung angeschlossen und die noch zusätzlich benötigte Nährlösung mit Messbechern in die Systeme gefüllt.



a) Pflanzenteile im Trockenschrank



b) Wiegen der Pflanzenteile

3.7 Statistische Auswertung

Die Daten wurden mittels Microsoft Excel 365 erfasst und ausgewertet. Es wurden hierfür die Mittelwerte der Daten berechnet und ein zweiseitiger t-Test zur Ermittlung signifikanter Unterschiede verwendet. Anschließend wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen ($SE = STAB/(Wurzel)^3$) mit SigmaPlot Version 12.5 (Systat Software GmbH) in Graphiken umgewandelt. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Sorten und Behandlungen sind mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

4 Ergebnisse

Es werden die Ergebnisse der drei unterschiedlichen Beleuchtungsarten und deren Auswirkungen auf die Morphologie und der Trockengewichte und deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt. Jede der drei Behandlungen wurde jeweils nur einmal angewandt, dabei die je drei jeweiligen Pflanzen, der Sorten *Saluoso* (SA) und *Sweeterno* (SW) in einem hydroponischen System einer Behandlung als individuelle Wiederholung betrachtet.

4.1 Ergebnisse der Pflanzenmorphologie

In Abb. 5 ist die mittlere Sprosslänge, die nach der Ernte der Tomatenpflanzen erfasst wurde, dargestellt. Die Pflanzen der Sorte *Sweeterno* (SW) bildeten unter den Keramik-Dampflampen mit einem Durchschnitt von 107,3 cm die längsten Sprosse. Bei der Beleuchtung durch die LED mit 4000 K wurden die Sprosse im Mittel 95,0 cm groß und bei der LED mit 4000 K und Infrarotlampe kam es zu einer Größe von 95,7 cm. Die *Saluoso*-Pflanzen (SA) waren im Mittel der Keramik-Dampflampen (CMHL) mit 84,7 cm nicht größer als die der LED (4000 K) mit Unterstützung von Infrarot, diese waren mit 87,8 cm größer als mit Keramik-Dampflampen, jedoch kam es hier aufgrund der Varianz zu keinem signifikanten Unterschied zwischen den zwei Behandlungen. Nur die Behandlung mit LED (4000 K) bei den *Saluoso*-Pflanzen führte zu signifikant unterschiedlichen Sprossgrößen zwischen den Behandlungen, dass im Mittel der Sprossgrößen betrug 72,9 cm.

Ein signifikanter Unterschied in allen Behandlungen konnte zwischen den Sorten *Saluoso* und *Sweeterno* nachgewiesen werden. Es gab keine Unterschiede zwischen den *Sweeterno*-Pflanzen der Behandlungen unter LED (4000 K). Die *Saluoso*-Pflanzen unterschieden sich zwischen LED (4000 K) plus Infrarot und der Keramik-Dampflampe (CMHL) nicht signifikant.

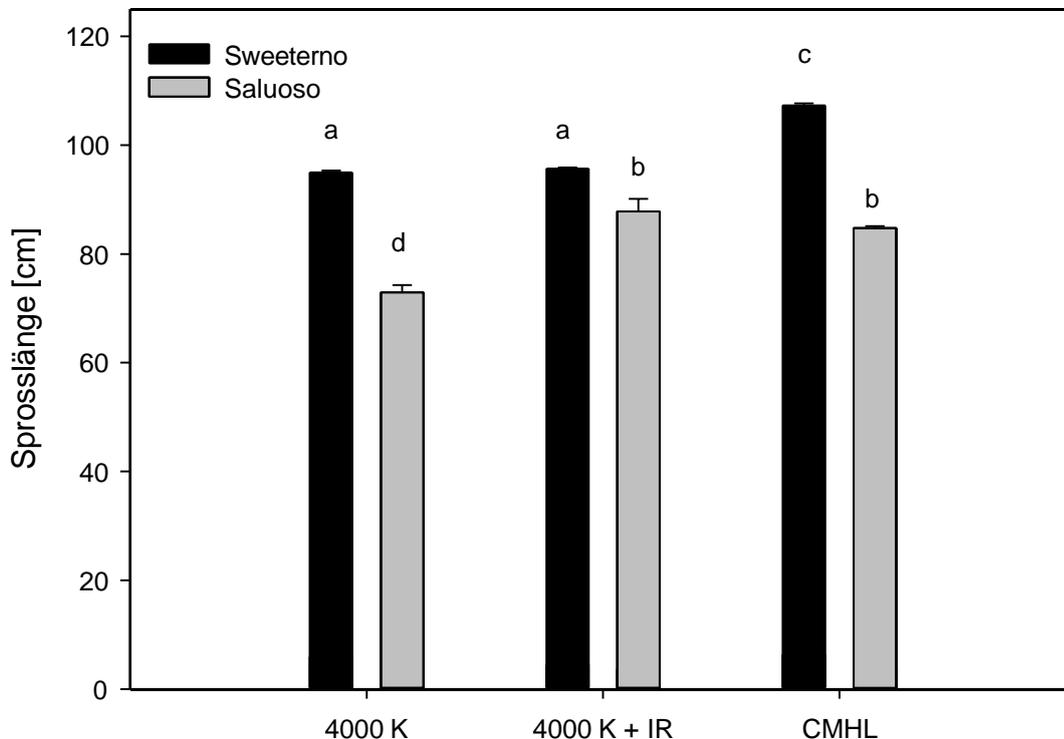


Abbildung 5: Sprosslänge [cm] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + IR und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten (n=3) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie zwischen den Beleuchtungen der gleichen Sorte überprüft. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Die unterschiedlichen Beleuchtungsarten führten zu keinen signifikanten Unterschieden bei den Mittelwerten der Blattlängen einer Sorte (Abb. 6). Es zeigte sich daher kein signifikanter Unterschied zwischen den Sorten der Behandlung Keramik-Dampflampe (CMHL).

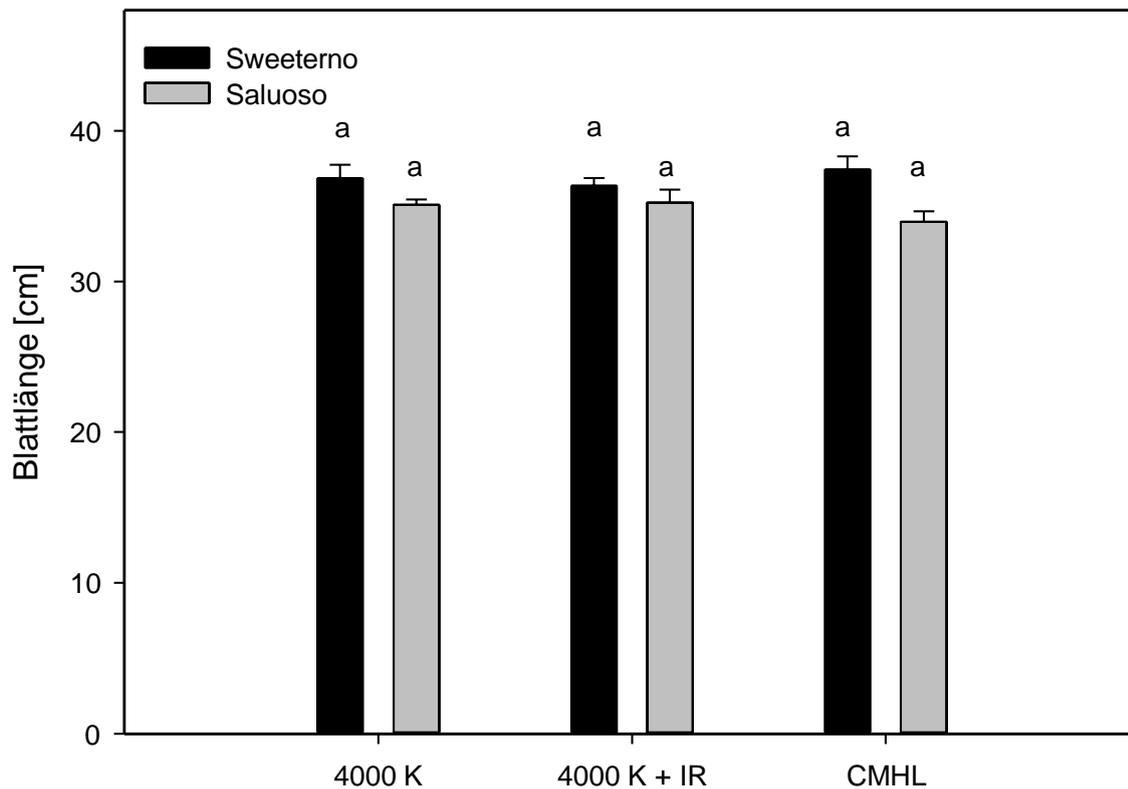


Abbildung 6: Blattlängen [cm] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten ($n=3$) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie den Beleuchtungen überprüft. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) wurden mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Im Unterschied zu den Blattlängen der Tomatensorten zeigten sich bei der Blattfläche (Abb. 7) im Mittel größere Differenzen. Es wurden aufgrund der hohen Varianz durch den zweiseitigen t-Test keine signifikanten Unterschiede gefunden, jedoch lassen sich Unterschiede in der mittleren Blattfläche zwischen den Tomatensorten anhand der Daten erkennen. Am größten sind die Unterschiede zwischen der reinen LED (4000 K) Behandlung und der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung aber der Trend, dass die Sorte *Sweeterno* im Schnitt eine höhere Blattfläche aufweist ist auch in der Behandlung mit zugeschalteter Infrarotlampe erkennbar.

Bei der Behandlung mit 4000 K LED Lampen weist die Sorte *Sweeterno* eine mittlere Blattfläche von 0,69 m² und die Sorte *Saluoso* von 0,55 m² auf. Die der LED (4000 K) plus Infrarot Behandlung der Sorte *Sweeterno* hatte eine mittlere Blattfläche von 0,62m² und die Sorte *Saluoso* von 0,59 m². In der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung weist die Sorte *Sweeterno* eine mittlere Blattfläche von 0,67 m² und die *Saluoso*-Pflanzen eine Fläche von 0,48 m².

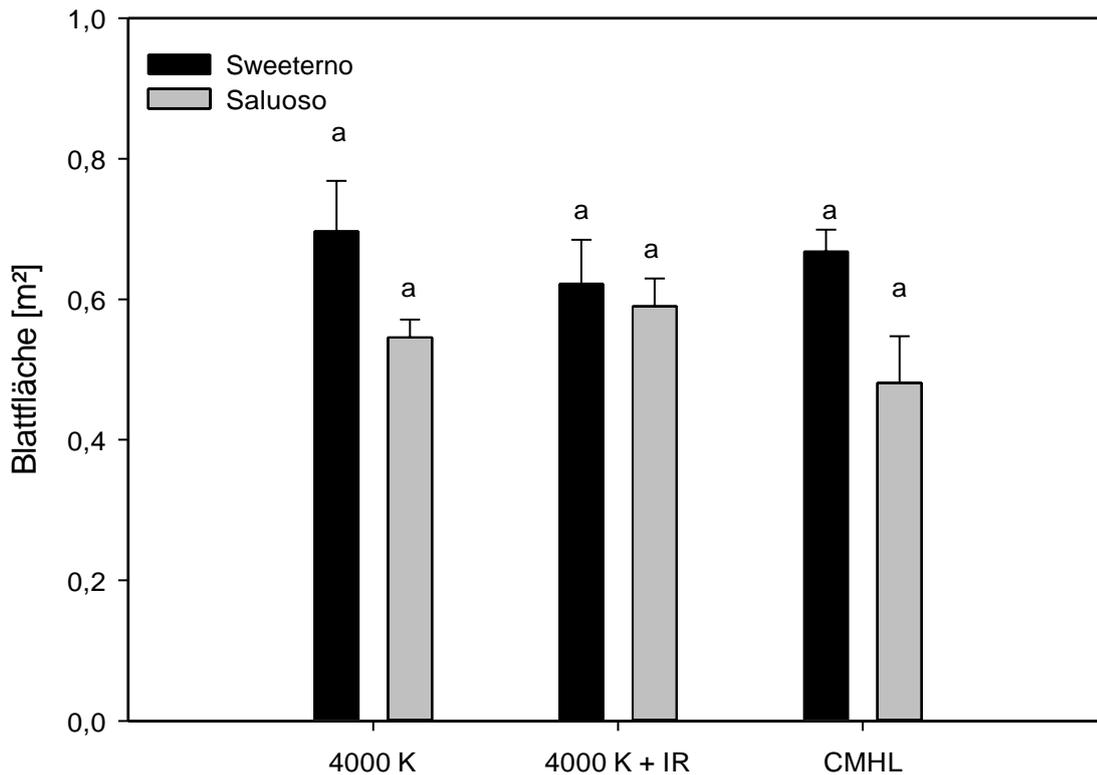


Abbildung 7: Blattflächen [cm²] der Tomatensorten *Sweeterno* (schwarz) und *Saluoso* (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten (n=3) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie den Beleuchtungen überprüft. Signifikante Unterschiede (p≤0,05) wurden mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

4.2 Unterschiede in den Trockengewichten

Die Trockengewichte der Sprosse sind in Abb. 8 dargestellt. Die der *Sweeterno*-Pflanzen sind im Mittel etwas größer als die der *Saluoso*-Pflanzen mit Ausnahme der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung, hier liegt ein signifikanter Unterschied zwischen den Pflanzen der Tomatensorte *Saluoso* und *Sweeterno* vor. Das mittlere Sprossgewicht ist bei der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung der Sorte *Sweeterno* signifikant höher als bei der Sorte *Saluoso*. Zwischen den Sorten der LED (4000 K) Behandlungen lässt sich das auch beobachten, ist aber nicht statistisch signifikant.

Unter der LED (4000 K) Behandlung ergab sich für die Sorte *Sweeterno* im Mittel eine Trockenmasse des Sprosses von 6,9 g und bei den *Sweeterno*-Pflanzen 5,6 g. Bei der Behandlung mit LED (4000 K) und Zuschaltung von Infrarot ergaben sich mittlere Trockengewichte von 7,7 g bei der Sorte *Sweeterno* und 6,5 g bei *Saluoso*. Die Pflanzen mit der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung erreichten bei der Sorte *Sweeterno* im Durchschnitt ein Trockengewicht von 12,0 g, die der Sorte *Saluoso* nur 7,2 g.

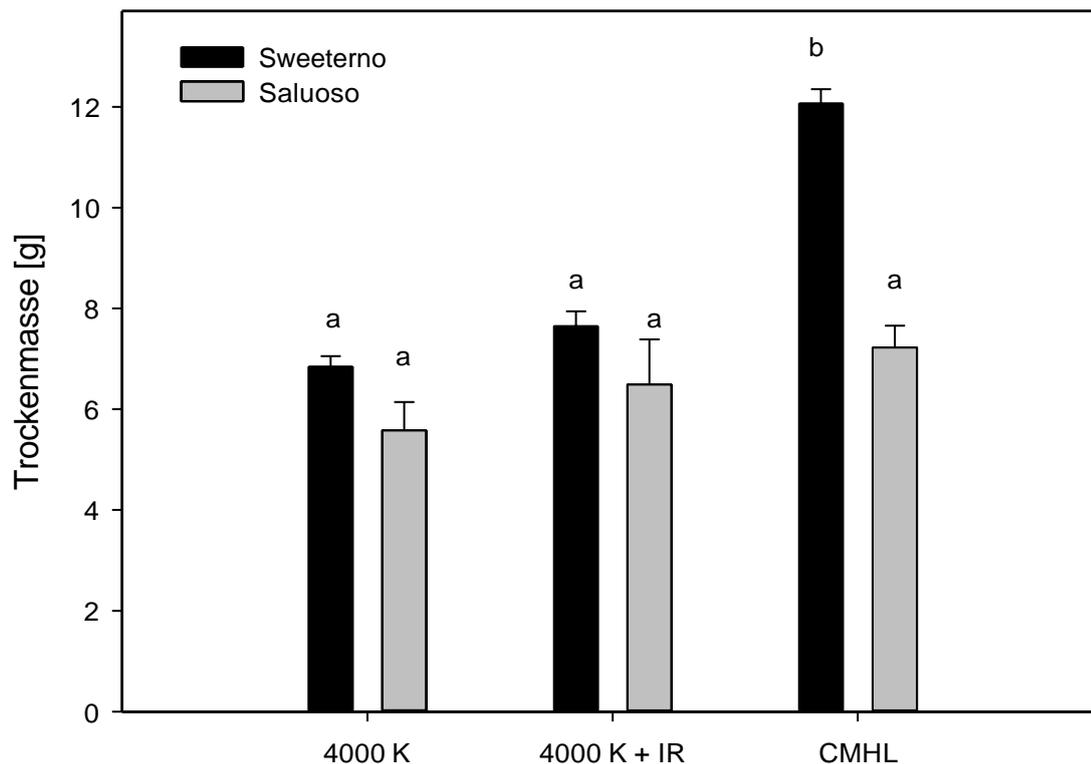


Abbildung 8: Sprossgewicht [g] der Tomatensorten *Sweeterno* (schwarz) und *Saluoso* (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten (n=3) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie den Beleuchtungen der Sorten überprüft. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) wurden mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Die Wurzelmasse (Abb. 9) der LED (4000 K) Behandlung betrug im Mittel 6,0 g bei den *Sweeterno*-Pflanzen und 3,5 g bei den Pflanzen der Sorte *Saluoso*. Es liegt bei der LED (4000 K) Behandlung ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Sorten in der Trockenmasse vor. Unter der LED (4000 K) plus Infrarot Behandlung kam es zu größeren Unterschieden der Pflanzen der Sorte *Sweeterno* und somit auch größerer Varianz, weswegen hier kein signifikanter Unterschied zwischen der Sorte *Sweeterno*, mit mittleren Trockengewicht von 4,5 g und der Sorte *Saluoso* mit 3,57 g festgestellt werden konnte. In der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung kam es bei der Sorte *Sweeterno* zu einer mittleren

Wurzelmasse von 6,3 g mit niedriger Varianz und bei *Saluoso* zu 4,0 g. Die Sorten unterscheiden sich in der Behandlung LED (4000 K) und Keramik-Dampflampe (CMHL) jeweils signifikant.

Es ist der Trend erkennbar, dass die *Sweeterno*-Pflanzen bei allen Behandlungen eine größere Wurzelmasse haben. Dies trifft auch auf die zweite Behandlung zu, bei dieser konnte durch größere Varianz keine statistische Signifikanz ermittelt werden.

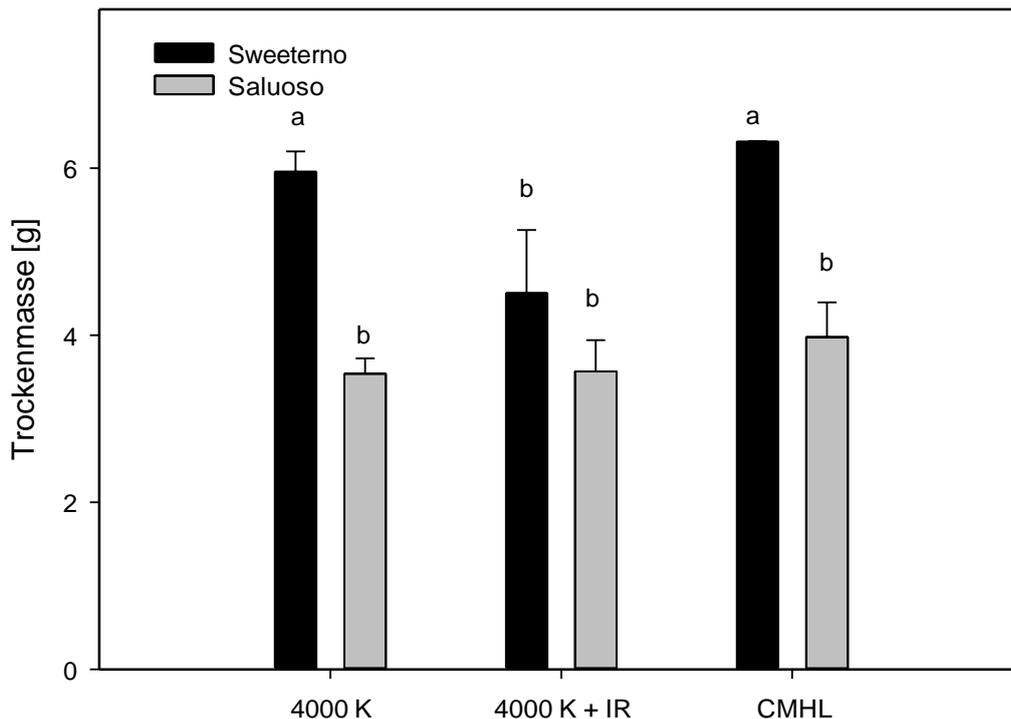


Abbildung 9: Wurzelmasse [g] der Tomatensorten *Sweeterno* (schwarz) und *Saluoso* (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten ($n=3$) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie den Beleuchtungen überprüft. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) wurden mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

In Abb. 10 ist das Trockengewicht der gesamten Blattmasse dargestellt. In der LED (4000 K) Behandlung ergaben sich im Mittel bei den *Sweeterno*-Pflanzen 15,1 g und bei den *Saluoso*-Pflanzen 15,6 g. Bei den *Sweeterno*-Pflanzen der LED (4000 K) Behandlung gab es einen Ausreißer der für die hohe Varianz verantwortlich ist. Die Pflanze 1.2 SW wurde von den Nachbarpflanzen beschattet und wies eine deutlich geringere Größe auf. In der zweiten Behandlung mit LED (4000 K) plus Infrarot waren es bei *Sweeterno* 16,3 g und bei *Saluoso* 15,6 g. Im dritten Versuch unter Keramik-Dampflampen (CMHL) ergaben sich für *Sweeterno* 14,8 g und für *Saluoso* 15,8 g. Bei den unterschiedlichen Behandlungen konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede in Blattmasse der unterschiedlichen Behandlungen gefunden werden und auch keine Unterschiede zwischen den Sorten.

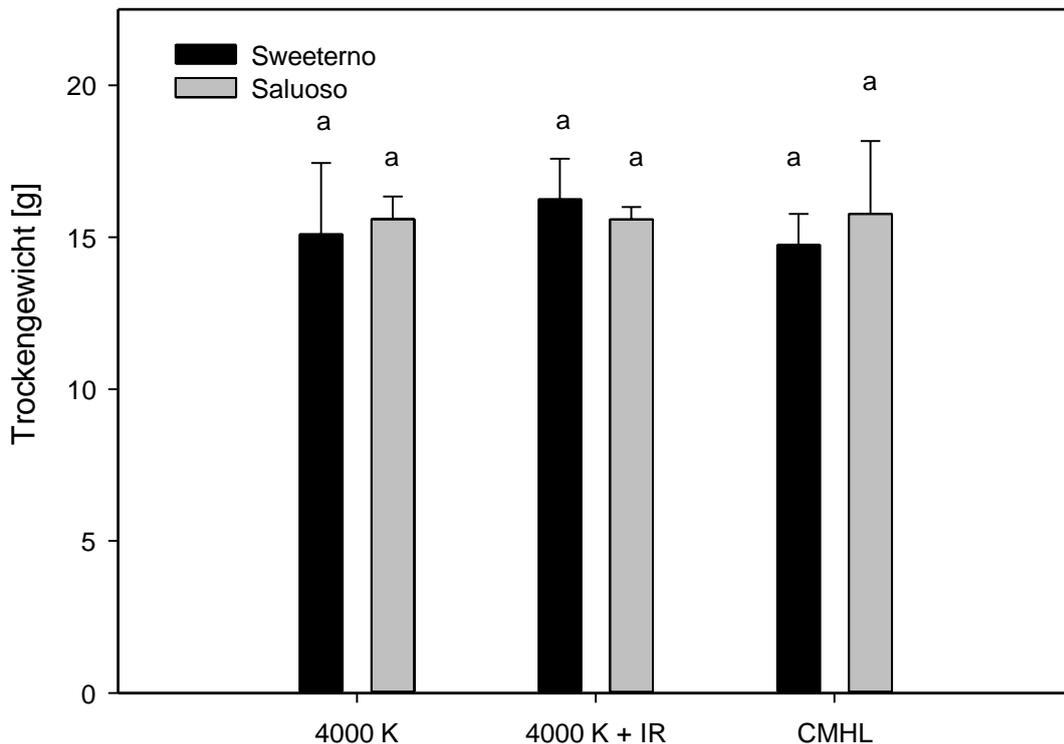


Abbildung 10: Blattmasse [g] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten (n=3) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie den Beleuchtungen überprüft. Es ergaben signifikanten Unterschiede ($p \leq 0,05$) wurden mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Bei den Trockengewichten der gesamten Pflanze (Abb. 11) ist der durchschnittliche Wert mit 45,5 g Trockenmasse der Sorte *Sweeterno* in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung am höchsten. Die Sorte *Saluoso* erreichte in der gleichen Behandlung einen Wert von 41,1 g. Unter der LED (4000 K) ergaben sich für die Pflanzen der Sorte *Sweeterno* mit 37,9 g und *Saluoso* mit 34,7 g die geringsten Werte. Bei der LED (4000 K) plus Infrarot Behandlung ergab sich für *Sweeterno*-Pflanzen ein Wert von 41,3 g und für die *Saluoso*-Pflanzen ein Wert von 39,6 g. Es waren größere Unterschiede zwischen den Pflanzen der Behandlungen und Sorten zu beobachten, dies ergab höhere Varianzen und dadurch konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen gefunden werden. Die Sorten zeigen unterschiedlich starkes Wachstum. Bei den *Sweeterno*-Pflanzen ist das Trockengewicht im Mittel höher als bei den *Saluoso*-Pflanzen, unabhängig von der jeweiligen Behandlung. Sortenunterschiede konnten durch die hohen Varianzen statistisch nicht belegt werden. Die Daten und Grafiken geben den Trend wieder, dass Sortenunterschiede in der gebildeten Pflanzenmasse zwischen *Saluoso*- und *Sweeterno*-Pflanzen bestehen und die gebildete Pflanzenmasse unter LED (4000 K), LED (4000 K) plus Infrarot und Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung im Mittel größer sind.

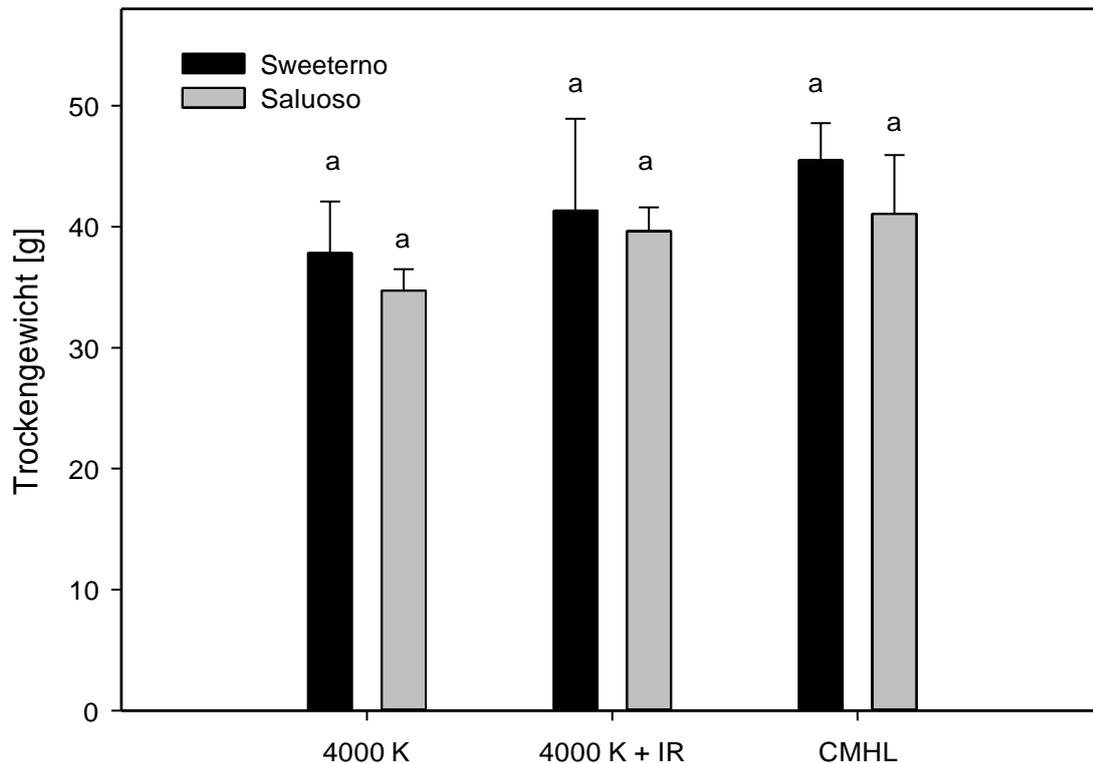


Abbildung 11: Trockengewichte [g] der gesamten Pflanze der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 4000 K + Infrarotlampe (IR) und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten ($n=3$) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie den Beleuchtungen überprüft. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede ($p \leq 0,05$).

4.2.1 Auswirkungen auf Evapotranspiration und Nährstoffaufnahme

Im Folgenden sind die Nährstoffaufnahme der verschiedenen Behandlungen dargestellt. Sie wurden an den täglichen Konzentrationen von Ammonium, Nitrat und Phosphat in der Nährlösung gemessen und anschließend berechnet. Die prozentuale Abnahme über den Versuchszeitraum hinweg wurde über die Abnahme der Nährstoffkonzentration in der Nährlösung ermittelt und grafisch dargestellt. Die kumulierte Evapotranspiration über den Versuchszeitraum wurde anhand der Wassermengen, die aus den Systemen transpiriert wurden summiert. Die Nährlösung in den hydroponischen Systemen wurde an drei Terminen erneuert, um eine ausreichende Nährstoffversorgung für die Pflanzen zu gewährleisten. Die Entnahme der alten Nährlösung erfolgte an den Tagen 0, 16 und 21. Die erste Zubereitung der Nährlösung erfolgte am 18.04.2023, die nächste am 03.05.2023 und nochmal am 08.05.2023. Die Abnahme der Nährstoffkonzentration in der Nährlösung sowie die Menge an transpiriertem Wasser wurde ab dem 19.04.2023 gemessen.

In Abb. 12 ist die tägliche Nährstoffaufnahme von Ammonium (NH_4^+) graphisch dargestellt. Berechnet in Prozent des gemessenen Nährstoffgehalts in der Nährlösung, im Verhältnis des Nährstoffgehalts der Nährlösung am Tag des Wechsels mit neuer Nährstofflösung. Die Konzentration des Nährstoffs der neu zubereiteten Nährlösung wurde zu jedem Wechsel als Referenzwert, als 100 % gewählt.

An Tag 2 weist die gemessene Konzentration deutlich niedriger als an Tag 1, an Tag 3 war sie deutlich höher als an Tag 2. Diese Verringerung konnte der gemessenen Konzentration konnte in allen Behandlungen erfasst werden. Dadurch lässt sich ein Trend in der Reduktion erkennen, der in der ersten LED (4000 K) Behandlung geringer ausfällt als in den anderen beiden. Es zeigt sich, dass die Pflanzen aller Behandlungen, der Nährlösung Ammonium (NH_4^+) kontinuierlich entnehmen, bis sie ein Plateau erreichen. Dieser Bereich ist bei der LED (4000 K) plus Infrarot Behandlung bei 25 % Ammoniumkonzentration erreicht. Bei den Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung bei 28% und bei der LED (4000 K) Behandlung etwas höher, nämlich bei 34 %. Die unterschiedlichen Konzentrationen folgen dem gleichen Trend, sie bleiben nach Tag 8 im Bereich der niedrigsten Werte und können nicht mehr Ammonium (NH_4^+) aus der Nährlösung entnehmen. Sie sind in ihrer Entnahme nicht deutlich verschieden und es kommt nach Tag 8 zu einer Erhöhung der Nährstoffkonzentration von Ammonium (NH_4^+). Diese Entwicklung wurde auch durch Kontrollmessungen der EC-Werte (electrical conductivity) bestätigt. Der EC-Wert verringerte sich bis zum ersten Wechsel an Tag 16, in vergleichbarer Weise wie der gemessene Rückgang der Nährstoffe. Dasselbe wurde auch bei den Austauschen nach Tag 16 und 21 beobachtet und folgt den gemessenen Werten (NH_4^+) im Autoanalyzer.

In der LED (4000 K) Behandlung fällt die Ammonium (NH_4^+) Konzentration von 100% auf 50% am nächsten Tag, bei LED (4000 K) plus Infrarot auf 53% und bei der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung auf 48%. Auch hier waren kleinere Unterschiede zwischen Behandlungen erkennbar. Nach dem zweiten Wasserwechsel mit neuer Nährlösung an Tag 21 lässt sich eine sehr schnelle Entnahme von Ammonium (NH_4^+) beobachten. Bei LED (4000 K) eine Reduktion von 100 % auf 41 %, bei LED (4000 K) plus Infrarot auf 40 % und bei Keramik-Dampflampen (CMHL) auf 53 %.

Die Werte der in der Nährlösung verbleibenden Ammonium (NH_4^+) Mengen aller Behandlungen ändern sich nach Tag 7 kaum, die Nährlösung bewegte sich auf konstanten Niveau von 40 – 47 % und die Behandlungen weisen keine klaren Unterschiede in ihrer weiteren Nährstoffaufnahme auf. Ähnlich ist dies auch nach den weiteren Wechseln von Tag 17 auf 18 und Tag 22 auf 23 mit der neuen Nährlösung, bei etwas höher verbleibenden Ammonium (NH_4^+) Konzentration zu beobachten.

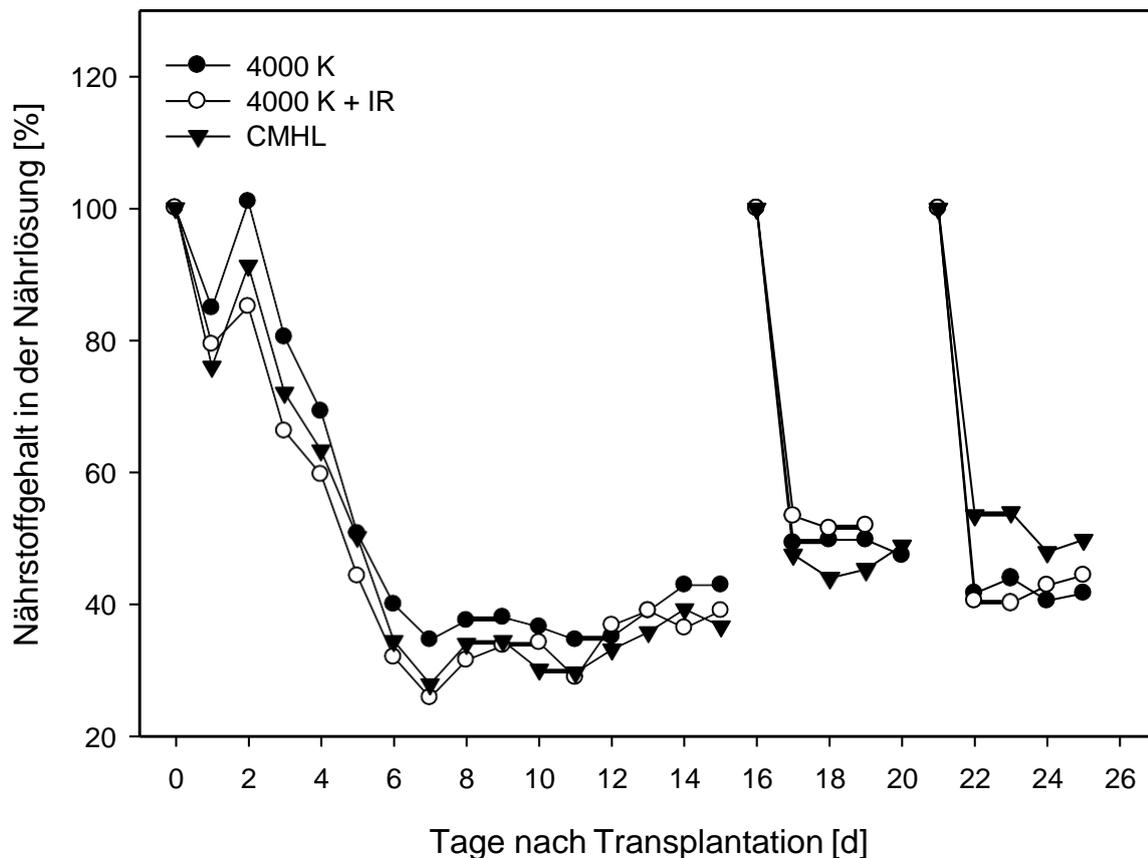


Abbildung 12: Tägliche Nährstoffgehalte [%] von Ammonium (NH₄⁺) in den hydroponischen Systemen unter der Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 4000 K + IR (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (▼). Für eine vereinfachte Berechnung und Darstellung wurde nach jedem Wechsel der Nährlösungen von 100% Nährstoffen in der Lösung ausgegangen. Für den Versuch wurde eine 40 Prozent Nährstofflösung verwendet.

Bei dem Nährstoff Nitrat (NO₃⁻) (Abb. 13) erfolgte die Aufnahme durch die Pflanzen zu Beginn des Versuchs an Tag 1, bei allen Behandlungen langsamer als beim Nährstoff Ammonium (NH₄⁺). Die Behandlung LED (4000 K) plus Infrarot zeigte deutlich geringere gemessene Nährstoffgehalte von Nitrat (NO₃⁻) in den ersten Tagen nach der Transplantation auf. An Tag 2 ist die gemessene Nährstoffkonzentration von Nitrat (NO₃⁻) der LED (4000 K) plus Infrarot Behandlung auf 78 % der ursprünglichen Konzentration gefallen. Die anderen Behandlungen LED (4000 K) und Keramik-Dampflampen (CMHL) weisen höhere Konzentrationen zu Beginn auf. Bei diesen steigen sie an Tag 3 auf 109 % bei LED (4000 K) und 101 % bei Keramik-Dampflampen (CMHL). Danach ist eine ähnliche Abnahme der Nährstoffkonzentration von Nitrat (NO₃⁻) zwischen den beiden Behandlungen zu beobachten. Alle Behandlungen folgen einem ähnlichen Trend in der Abnahme der Nährstoffkonzentration von Nitrat (NO₃⁻).

Ab Tag 12 nähern sich die Werte einander an und sinken bei der LED (4000 K) Behandlung auf 3,8 %, LED (4000 K) plus Infrarot auf 3,5 % und Keramik-Dampflampen (CMHL) auf 5,7 %. Nach dem ersten Wechsel der Nährlösung folgen die Konzentrationen einer sehr starken Reduktion und sanken innerhalb von vier Tagen auf 3 – 5 %. Eine ähnliche Abnahme ist bei Keramik-Dampflampen (CMHL) aufgetreten. Bei der LED (4000 K) plus Infrarot Behandlung kam es an Tag 21 zu einem konfundiertem Wert, da die Probe verunreinigt wurde, der Wert wurde nicht in die Abbildung aufgenommen. Ab Tag 22 wurden in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung erhöhte Konzentrationen an Nitrat (NO_3^-), nämlich von 118 % an Tag 23 festgestellt.

Bei allen Behandlungen sinkt die Nährstoffkonzentration innerhalb weniger Tage und zunehmend schneller mit zunehmender Größe der Pflanzen. Die Nitrat (NO_3^-) Konzentration sank bei allen Behandlung nahe an 0 %. Die beobachteten Unterschiede waren zwischen den Behandlungen bis auf einzelne Ausreißer vergleichbar, es ergeben sich in der Gesamtheit der Daten keine aussagekräftigen Unterschiede in der Nährstoffaufnahme von Nitrat (NO_3^-) in den unterschiedlichen Behandlungen.

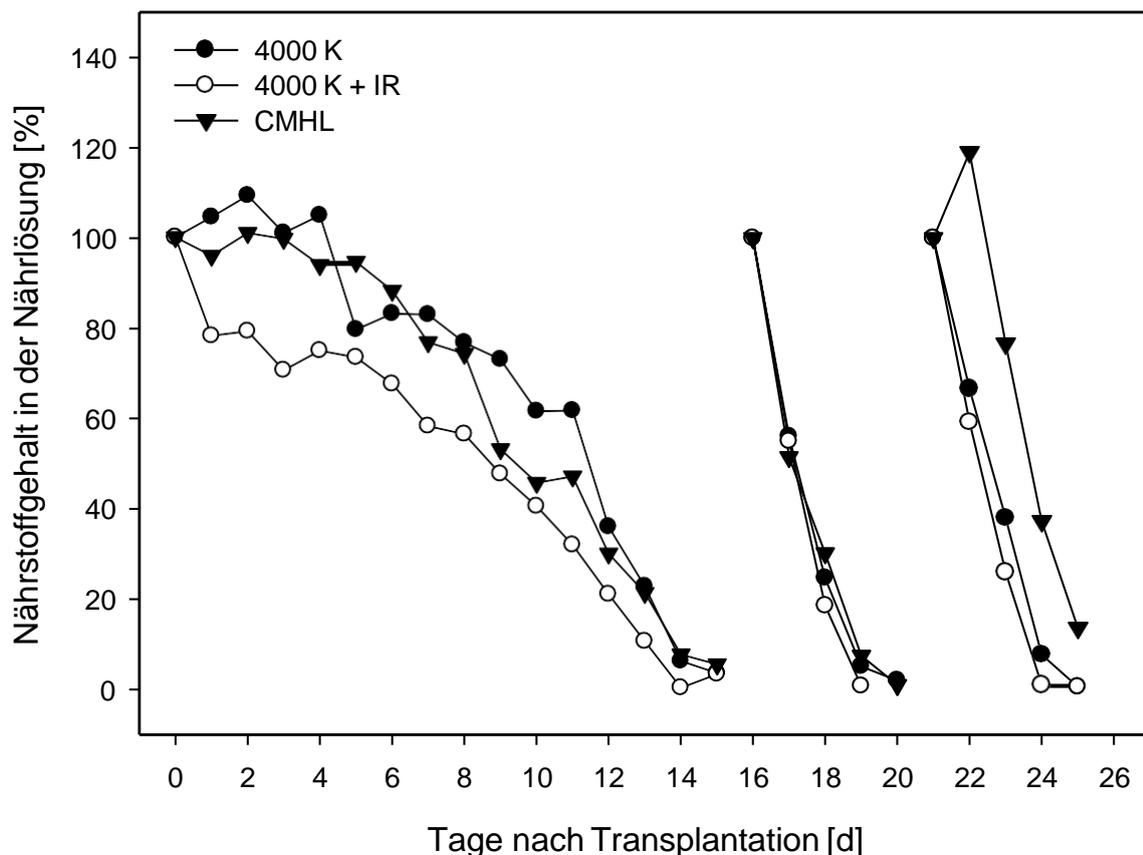


Abbildung 13: Tägliche Nährstoffgehalte [%] von Nitrat (NO_3^-) in den hydroponischen Systemen unter den Behandlungen mit LED 4000 K (•), LED 4000 K + IR (o) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (▼). Für eine vereinfachte Berechnung und Darstellung wurde nach jedem Wechsel der Nährlösungen von 100% Nährstoffen in der Lösung ausgegangen. Für den Versuch wurde eine 40 Prozent Nährstofflösung verwendet.

Bei den Daten zur täglichen Aufnahme von Phosphat (PO_4^{3-}) (Abb. 14) kam es vermehrt zu Ausreißern. Einige Werte betragen mehr als 100 %. Dies war bei LED (4000 K) in der ersten Nährlösung und bei Keramik-Dampflampen (CMHL) nach dem zweiten Wechsel der Nährlösung zu beobachten. An Tag 10 kam es in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung zu einem weiteren Ausreißer mit einem relativen Wert von 56 %, welcher am nächsten Tag auf 72 % sprang. Insgesamt folgen die Daten in der Phosphataufnahmerate einem ähnlichen Trend wie bei Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-), nämlich einer verlangsamten Abnahme der Nährstoffkonzentration zu Beginn des Experiments und einer Zunahme dieser Aufnahmeraten im weiteren Verlauf und insbesondere nach dem ersten und zweiten Wechsel der Nährlösung an Tag 16 und 21.

Bei dem Nährstoff Phosphat kam es nicht zu einer so schnellen Nährstoffabnahme in der Nährlösung wie bei Ammonium (NH_4^+) und die Konzentration sank nicht niedriger als 30 % der relativen Konzentration von Phosphat (PO_4^{3-}) in der Nährlösung der Systeme.

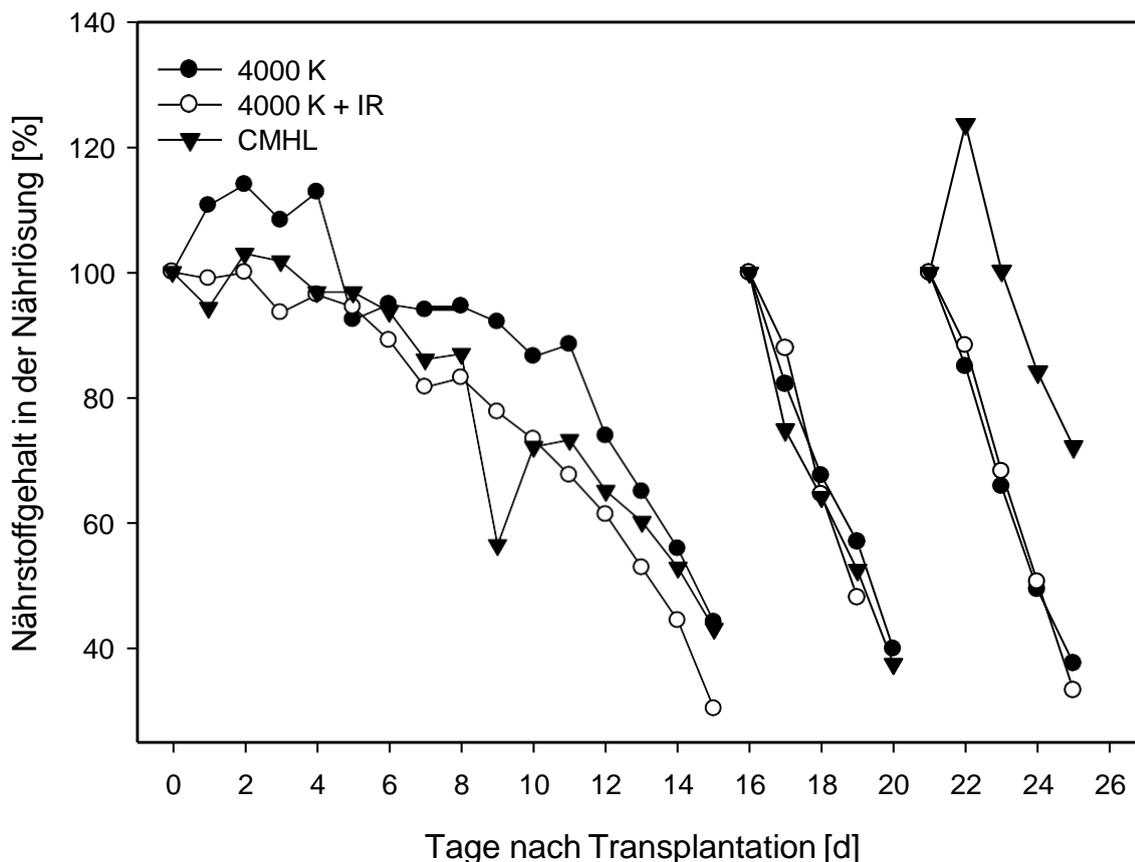


Abbildung 14: Tägliche Nährstoffgehalte [%] von Phosphat (PO_4^{3-}) in den hydroponischen Systemen unter der Behandlungen mit LED 4000 K (•), LED 4000 K + IR (o) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (▼). Für eine vereinfachte Berechnung und Darstellung wurde nach jedem Wechsel der Nährlösungen von 100% Nährstoffen in der Lösung ausgegangen. Für den Versuch wurde eine 40 Prozent Nährstofflösung verwendet.

Die Evapotranspiration über den Versuchszeitraum der unterschiedlichen Behandlungen (Abb. 15) wurde anhand der summierten Werte der täglich nachgefüllten Wassermenge grafisch dargestellt. Es zeigt sich eine starke Zunahme der Evapotranspiration an Tag 17. Bei LED (4000 K) steigt die Evapotranspiration von 2,85 L an Tag 16, auf 6 L am nächsten Tag, bei LED (4000 K) + IR von 2,85 L auf 7 L und bei Keramik-Dampflampen (CMHL) von 2,9 L auf 6,5 L. Dieser Anstieg tritt bei allen Behandlungen auf und ist auf Ungenauigkeiten beim Wechsel der Nährlösungen zurückzuführen. Dasselbe war nach dem zweiten Wechsel der Nährlösungen an Tag 22 nicht zu beobachten.

Bis zu Tag 11 wurde in allen Behandlungen im Durchschnitt 100 mL pro Tag evapotranspiriert. Der kumulierte Wert betrug an Tag 11 für LED (4000 K) Behandlung 10,0 L, bei der LED (4000 K) plus Infrarot Behandlung 12,0 L und bei der Behandlung mit Keramik-Dampflampen (CMHL) 10,7 L. An Tag 19 lagen die Behandlungen LED (4000 K) plus Infrarot mit 38,1 L und Keramik-Dampflampen (CMHL) mit 39,0 L nah beieinander, während in der LED (4000 K) Behandlung nur 33,1 L akkumuliert evapotranspiriert wurden.

An Tag 20 sprang der Wert der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung auf 45,9 L, während die LED (4000 K) plus Infrarot auf 39,9 L nur gering anstieg. Derselbe Trend mit der höchsten Evapotranspiration bei der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung, der LED (4000 K) plus Infrarot zwischen Keramik-Dampflampen (CMHL) und LED (4000 K) mit niedrigster Evapotranspiration setzte sich bis zum Versuchsende fort.

Bis zum Versuchsende wurde bei der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung 6 L mehr als bei LED (4000 K) plus Infrarot mit 61,7 L und 11,8 L mehr als bei LED (4000 K) mit 55,9 L evapotranspiriert. Die Zuschaltung von Infrarot in der zweiten Behandlung stellte eine Annäherung an die Wärmeproduktion der Keramik-Dampflampen dar und zeigt sich in einer höheren Evapotranspiration als bei reinen LED (4000 K) Behandlung. Die Evapotranspiration der einzelnen Behandlungen gleicht den gemessenen Temperaturen unter den verschiedenen Lichtquellen auf Versuchshöhe.

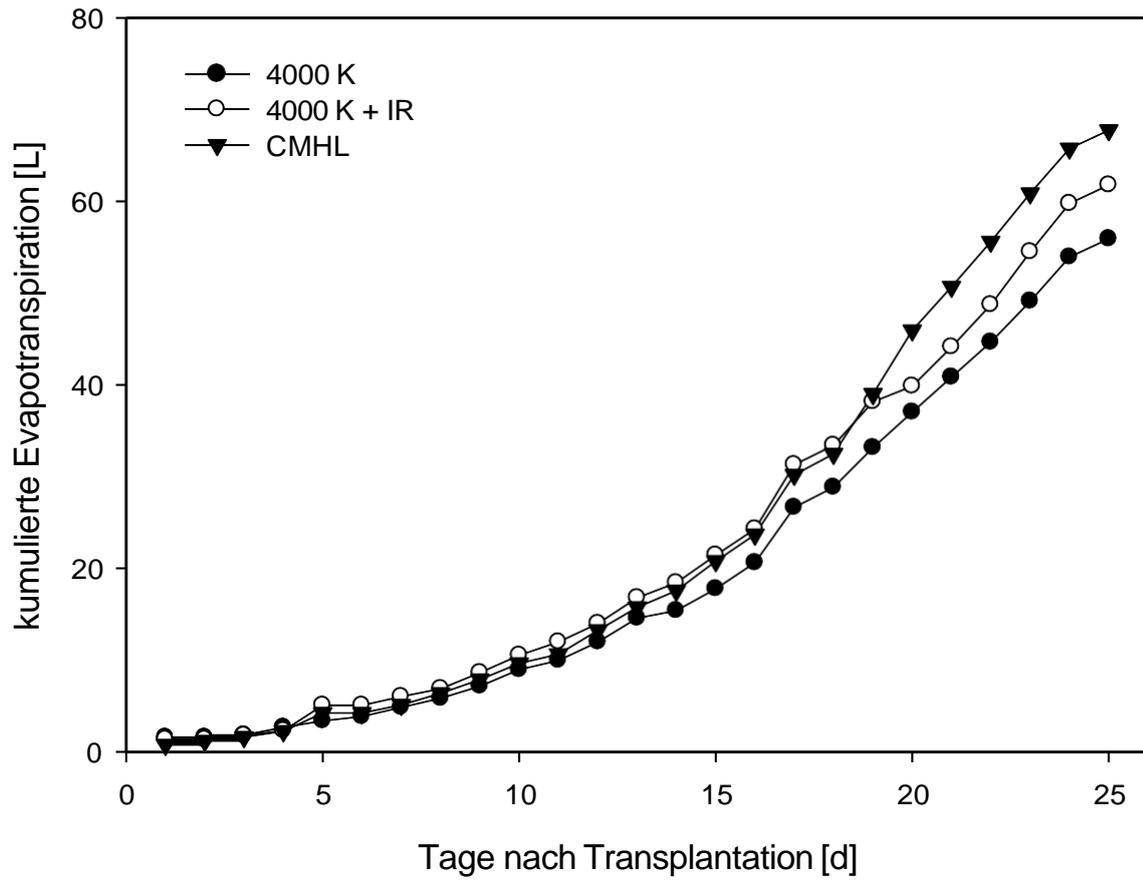


Abbildung 15: Kumulierte Evapotranspiration von Tomatenpflanzen in den Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 4000 K + IR (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (▼), ermittelt durch Summieren der gemessenen und nachgefüllten Wasserverluste aus den hydroponischen Systemen nach der Transplantation an Tag 1 bis 25.

5 Diskussion

Ziel des Versuchs war es Wachstumsunterschiede und Unterschiede in der Morphologie der verwendeten Tomatensorten *Saluoso* und *Sweeterno* unter verschiedenen Lichtquellen festzustellen. Anhand der Morphologie, Blattflächen, Trockenmassen und Nährstoffaufnahmearten der Pflanzen sollten Wachstumsunterschiede festgestellt werden. Die Analyse ergab ein längeres Sprosswachstum der Sorte *Sweeterno* in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung im Vergleich zu den LED (4000 K) Behandlungen. Sortenunterschiede konnten teilweise festgestellt werden, waren aber nicht so stark wie in anderen Versuchen zu beobachten (Bernhard, 2023). Deutliche Unterschiede in den Nährstoffaufnahmearten der Tomatenpflanzen, die auf Bestrahlung durch die verschiedenen Lichtquellen zurückzuführen sind, konnten nicht beobachtet werden. Potenziell verringerter Stromverbrauch machen die Einführung von LEDs in die Gewächshäuser als Assimilationsbeleuchtung dennoch interessant. Bei den Energiekosten sind ökonomische Vergleiche schwierig zu ermitteln (Mitchell et al., 2015). Die Energiepreise in Deutschland stiegen jedoch bis zum Februar 2022 im Vergleich zum Februar des Vorjahres um 68 %, für die im Inland produzierte Energie (Statistisches Bundesamt, 2022). Es sind geringere Kosten bei reduziertem Stromverbrauch naheliegend, da die verwendeten Keramik-Metall-Halogendampflampen (CMHL) einen sehr hohen Energieverbrauch aufweisen. Der Energieverbrauch der Keramik-Metall-Halogendampflampen (CMHL) liegt somit über dem Verbrauch der weiter verbreiteten Natrium-Dampflampen (HPS) und nochmals höher als bei den üblich genutzten LEDs (Palmitessa et al., 2021).

Aus Kostengründen, bei der Beschaffung kamen neutrale LEDs (4000 K) zum Einsatz. Diese weisen ein relatives Emissionsspektrum mit Höhepunkten im blauen (430 – 470 nm) und orange-roten (550 - 620 nm) Wellenlängenbereich auf. Nach Stanghellini (2019) sollten LEDs mindestens bi-chromatisch sein, um dieselbe Produktivität wie Natrium-Dampflampen (HPS) zu erreichen. Dies konnte in dieser Untersuchung gewährleistet werden.

5.1 Morphologische Unterschiede

Die ermittelten Sprosslängen in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung waren bei der Sorte *Sweeterno* signifikant höher als bei den LED (4000 K) Behandlungen. Dasselbe konnte bei der Sorte *Saluoso*, in derselben Behandlung, nicht beobachtet werden. Grund hierfür könnte das unterschiedlich starke Wachstum der Sorten sein. Die Sorte *Sweeterno* wird im Gegensatz zu *Saluoso* von Rijk Zwaan Welver (2023), als Tomatensorte mit starker Wuchskraft beschrieben. Laut Gomez und Mitchell (2016)

kann eine hohe Bestrahlungsstärke auf das Blattdach zu einer Sprossstreckung der Pflanze führen. Dies kann in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung bei den *Sweeterno*-Pflanzen, durch die Keramik-Dampflampen selbst oder äußere Einflüsse, der Fall gewesen sein. Es stellt sich jedoch die Frage, warum dies bei den *Saluoso*-Pflanzen nicht passiert ist.

Werden Natrium-Dampflampen (HPS) und Fluoreszenz-Lampen mit LEDs verglichen, lassen sich Unterschiede in der Morphologie der behandelten Pflanzen feststellen. Reduzierte Blattausstreckung und Sprossstreckung in Tomaten, wenn diese unter roten oder blauen LEDs statt Natrium-Dampflampen (HPS) als zusätzliche Beleuchtung gepflanzt werden (Gislerod et al., 2012). Die Sprosslängen unter den LED-Behandlungen sind in diesem Versuch gegenüber der *Sweeterno*-Pflanzen der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung reduziert, jedoch nicht signifikant unterschiedlich. Die Sorte *Saluoso* in der LED (4000 K) plus Infrarot Behandlung weist wiederum eine mittlere Sprosslänge auf, die größer als die der Sorte *Saluoso* in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung ist. Es wurden auch keine Unterschiede in den Blattlängen der Behandlungen beobachtet. Dies kann auf schlechtere Lichtverhältnisse für die *Saluoso*-Pflanzen in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung deuten, die durch die Größe der *Sweeterno*-Pflanzen möglicherweise etwas schlechter beleuchtet wurden. Die Trockenmasse der Pflanzen unterscheidet sich nur geringfügig und nicht signifikant.

Die Beschattung von Pflanzen ist durch das shade avoidance syndrome (SAS) charakterisiert, bei dem die Pflanzen durch schnelle Spross- und Blattstilzunahme zum Licht wachsen. Folgen dieses Syndroms sind eine reduzierte Blattfläche, sowie ein reduzierter Chlorophyllgehalt der Blätter und eine reduzierte Sprossmasse (Franklin & Whitelam, 2005; Kim et al., 2019). Die Sprosslänge der *Sweeterno*-Pflanzen, in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung, war größer und es konnte eine verminderte, jedoch nicht signifikant unterschiedliche Blattmasse im Vergleich zu den LED (4000 K) Behandlungen gemessen werden. Der Chlorophyllgehalt in den Blättern zeigte im Mittel keine Auffälligkeit und die Masse der *Sweeterno*-Sprosse in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung fiel größer aus. Damit kann eine zu Beginn des Versuchs vorherrschende Beschattung der *Sweeterno*-Pflanzen der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung und der damit bewirkten Sprossstreckung ausgeschlossen werden.

Die verwendeten neutralen LEDs (4000 K) weisen in ihrem Spektrum höhere Anteile an roten und blauen Wellenlängen auf. Die verwendeten Keramik-Dampflampen (CMHL) kennzeichnen sich durch ein breites sonnenähnliches Spektrum (Dallmann et al., 2019) mit höheren Anteilen im roten und fernroten Licht (Abb. 1). Nach Laber (2020) reduziert ein hohe Blauanteil des Lichts in der Regel den Internodienabstand, während dunkelrotes Licht das Streckungswachstum fördert. Nach Yorio (1995) ist es möglich, dass ein Blaulichtanteil existiert, bei welchem die Sprossstreckung vermindert wird

Die spektrale Verteilung des Lichts zwischen den LEDs (4000 K) (Abb. 2) und den Keramik-Dampflampen (CMHL) (Abb. 1) belegt Unterschiede im blauen und fernroten Lichtanteil der Lampen. Die spektralen Unterschiede in den Lampen können der Grund für das signifikant höhere Sprosswachstum in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung, der Sorte *Sweeterno*, sein. Warum dies für die *Saluoso*-Pflanzen der Keramik-Dampflampen (Behandlung) nicht beobachtet werden konnte, könnte an einer verminderten Bestrahlung der Pflanzen liegen. Weiter wird diese Vermutung, durch die verminderte Blattfläche der *Saluoso*-Pflanzen der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung im Vergleich zu den LED (4000 K) Behandlungen, gestützt. Die Unterschiede in den Blattmassen zwischen den Behandlungen sind jedoch nicht signifikant unterschiedlich.

Wiederum fördern, laut Kim (2019) LEDs eine höhere Biomasseproduktion unabhängig ihrer spektralen Eigenschaften. Dies konnte in diesem Versuch nicht belegt werden. Die gebildete Blattmassen der LED (4000 K) Behandlungen unterschieden sich nicht signifikant im Vergleich zu den Blattmassen der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung, des Weiteren konnten keine signifikanten Unterschiede der Trockengewichte, aller Pflanzen, zwischen den Behandlungen festgestellt werden.

5.2 Nährstoffaufnahme und Lichtquellen

Im vorliegenden Versuch konnten keine deutlichen Unterschiede der Nährstoffaufnahme der unterschiedlichen Behandlungen, die auf das Wachstum und Entwicklung der Pflanzen zurückzuführen wären, beobachtet werden. Daher ist davon auszugehen, dass die LED (4000 K) Behandlungen die Tomatenpflanzen ausreichend mit Licht versorgten. Pinho (2017) stellte in einem Versuch zu Salat fest, dass die Aufnahme von Nährstoffen effektiv durch LEDs beeinflusst werden kann. Er betont, die Bedeutung von spektral an die Pflanzenbedürfnisse angepasster LEDs für den Anbau in geschlossenen Räumen. In dem Versuch dieser Bachelorarbeit erhielten die Pflanzen bereits ein breites Spektrum an Licht durch die natürliche Strahlung, die in das Gewächshaus eindrang. Es muss weiter beachtet werden, dass der Versuch im Frühjahr bei höherer natürlicher Einstrahlung als in den Wintermonaten stattgefunden hat. Die über den Tag hinweg eingestrahelte natürliche Strahlung, weist einen bedeutsamen Anteil an blauer Strahlung auf. Dies könnte bereits ausreichend für ein normales Wachstum und Entwicklung der Pflanzen sein (Mitchell et al., 2015).

Bei den Nährstoffen Ammonium, Nitrat und Phosphat kam es in den Nährstoffaufnahme jeweils zu Abnahmen an Tag zwei und Zunahmen an Tag drei, bei unterschiedlichen Behandlungen. Dies kann nicht auf eine verstärkte Nährstoffaufnahme der Pflanzen, in den verschiedenen Behandlungen zurückgeführt werden. Vielmehr muss es sich hier um unzureichende Mischung der Nährlösung und damit um einen Messfehler handeln. Die Entwicklung der Nährstoffaufnahme ist zwischen den

verschiedenen Behandlungen ähnlich. Es sind vergleichbare Abnahmen der Nährstoffkonzentrationen zu beobachten und somit können keine Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Lichtqualitäten, zwischen den einzelnen Behandlungen, gemacht werden. Die stärkere Abnahme von Nitrat (NO_3^-) in der LED (4000 K) plus Infrarot Behandlung und der verlangsamten Abnahme der Nitratkonzentration in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung, kann möglicherweise auf fehlerhafte Nährstoffverhältnisse der unterschiedlichen Systeme zurückgeführt werden. Eine weitere Erklärung könnten Messfehler des Autoanalyzers sein, da die Proben nur einmal getestet wurden und auch hier eine unzureichende Mischung der Proben stattgefunden haben könnte.

5.3 Evapotranspiration

Natrium-Dampflampen (HPS) emittieren mehr langwellige Strahlung, zusammen mit der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR), als LEDs. Dies gilt auch für Keramik-Dampflampen (CMHL), da aufgrund der höheren Betriebshitze potenziell die Blatttemperatur erhöht wird (Nelson & Bugbee, 2015; Kim et al., 2019). Bei der Evapotranspiration sind thermale Unterschiede in den Behandlungen zu erkennen. Die gemessenen Temperaturen der LED (4000 K) Behandlung plus Infrarot und der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung liegen nah beieinander. Die erhöhte Evapotranspiration ist vermutlich auf die größere Sprosstreckung der Pflanzen in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung zurückzuführen. Das Wachstum der Pflanzen in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung war nicht überlegen, wie die Ergebnisse der Biomasse und Nährstoffaufnahmearten darlegen. Die Transpiration des oberen Blattdachs der *Sweeteno*-Pflanzen in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung war vermutlich durch die größere Sprosstreckung der Pflanzen und die damit verbundene höhere Erwärmung der Blätter, letztlich erhöht.

Vorangegangene Versuchen, nach Mitchell (2015), legen nahe, dass rein rotes Licht von LEDs zu deformierten Pflanzen führen kann, und dies unabhängig davon, ob sich das rote Licht im Bereich der photosynthetisch aktiven Strahlung befindet. Aus diesem Grund werden LEDs verwendet, die zusätzlich eine blaue Komponente aufweisen. Damit sind die LEDs erwiesenermaßen so produktiv wie Hochdruck-Natrium-Dampflampen (HPS), solange die PAR-Intensität dieselbe ist (Singh et al., 2015). Wenn die Gewächshäuser allerdings beheizt werden, sind die LEDs durch verminderte Wärmestrahlung, im Vergleich zu den HPS im Nachteil. Dies muss kompensiert werden (Dieleman et al., 2016; Stanghellini et al., 2019). In dem Versuch wurde Infrarot zusammen mit LED (4000 K) angewendet, um die Wärmestrahlung der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung zu imitieren (Abb. 4). Es ergaben sich keine morphologischen Veränderungen, die auf die Infrarotstrahlung zurückzuführen sind. Gewächshäuser mit unterstützender Beleuchtung stellen meist mehr Wärme zur

Verfügung als von den Pflanzen für ein normales Niveau benötigt wird. Das trifft selbst auf LEDs mit typischen Intensitäten von $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ zu (Katzin et al., 2023). In den Sommermonaten wird an dem Standort der Universität Hohenheim keine Wärmestrahlung durch die Beleuchtung benötigt. Die erhöhte Wärmeproduktion der Keramik-Dampflampen (CMHL), im Vergleich zu LEDs (Kim et al., 2019), könnte über die Wintermonate effektiv und energiesparend über Infrarotstrahlung als alternative Wärmequelle für die Pflanzen eingesetzt werden. Damit könnte die Gesamttemperatur im Gewächshaus niedriger gehalten werden und somit Energie gespart werden (Kavga et al., 2015).

5.4 Optimierung des Versuchs

Aufgrund von Platzmangel wurden in diesem Versuch die einzelnen Pflanzen einer Sorte unter einer Behandlung als individuelle Wiederholungen betrachtet. Dies führt zu einer geringeren Aussagekraft der Ergebnisse, welche mit Vorsicht zu interpretieren sind, da die Daten durch einen geringen Umfang sehr anfällig auf äußere Faktoren reagieren können. Um die generierten Daten mehr zu festigen, wären drei oder mehr Wiederholungen jeder Behandlung und wirkliche Randomisation der einzelnen Pflanzen in jedem System notwendig. Dies konnte in dieser Bachelorarbeit jedoch nicht umgesetzt werden.

Es wurde versucht durch lichtundurchlässige schwarze Folie die Verhältnisse zwischen den einzelnen Behandlungen möglichst vergleichbar zu gestalten. Jedoch konnte eine Seite bei der LED (4000 K) Behandlung nicht nach außen hin abgeschirmt werden und bei allen Behandlungen wurde die Vorderseite nicht abgeschirmt. Auf die Vorderseite wirkte passive Beleuchtung durch Keramik-Dampflampen (CMHL) eines anderen Versuchs ein. Dies deckt sich mit der Beobachtung, dass die vorderen Pflanzen sich besser entwickelten, während die hinteren weniger Strahlung ausgesetzt waren. Wären alle Seiten abgeschirmt gewesen, würde dies den Einfluss der täglichen natürlichen Sonneneinstrahlung auf den Versuch reduzieren und die Aussagekraft durch die Ergebnisse der verwendeten Beleuchtungen erhöhen.

Der Wechsel der Nährlösung fand zweimal während der Versuchszeit statt. Das erste Mal an Tag 16, hier wurde bereits zwei Tage vorher Salzsäure (HCl , $3 \text{ Mol} \cdot \text{L}^{-1}$) hinzugegeben, um die Nährstoffverfügbarkeit kurzfristig durch verminderten pH zu erhöhen, da ein früherer Wechsel aus arbeitstechnischen Gründen nicht möglich war. Die Nährstoffe waren in allen drei Behandlungen zu diesem Zeitpunkt weitgehend ausgeschöpft, die einzelnen Behandlungen hatten somit Zeit sich einander mehr anzupassen, dies macht Unterschiede in den Nährstoffaufnahme schwer erkennbar. Ein häufigerer Wechsel der Nährlösung in den Systemen, hätte Unterschiede in der Nährstoffaufnahme

besser quantifizierbar gemacht. Bei mehreren Systemen und damit Wiederholungen der einzelnen Behandlungen, wäre Statistik auf die Nährstoffaufnahme rate anwendbar gewesen.

Die ersten Proben wurden an Tag 0 mit der neu zubereiten Nährlösung genommen, beziehungsweise nach dem Wechsel (Tag 0, 17, 22). Hier zeigte sich in den gemessenen Daten mehrfach ein sprunghafter Anstieg, der auf unzureichende Durchmischung der Nährlösung bei der ersten Probenahme zurückzuführen ist. Die Nährlösung war anfangs nicht homogen. Bei Phosphat, nach dem zweiten Wechsel der Nährlösung an Tag 23, kam es auch zu einem starken Anstieg im Vergleich zur ersten Messung an Tag 22. Dafür ist entweder eine fehlerhafte Messung durch den Autoanalyzer oder eine falsche Dosierung des Nährstoffs Phosphat (PO_4^{3-}) in der Nährlösung der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung verantwortlich.

Die Analyse im Autoanalyzer fand nur einmal statt und wurde nicht wiederholt, damit sind auch die Messungen der Nährstoffproben stark fehleranfällig. Es kann auch hier zu einer unzureichenden Durchmischung der Proben beim Testen auf die Nährstoffgehalte gekommen sein kann. Die dargestellten Nährstoffaufnahme rate der Behandlungen sind durch Messfehler nur begrenzt aussagefähig.

6 Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurde der Einfluss der Lichtqualität und -intensität sowie die Wärmestrahlung unterschiedlicher Beleuchtungsarten, auf das Wachstum und die Nährstoffaufnahme von zwei hydroponisch wachsenden Tomatensorten untersucht. Die aus dem Versuch gewonnenen Daten lassen keine Beurteilung auf unzureichende zusätzliche Beleuchtung, der im Versuch verwendeten neutralen LEDs (4000 K), auf die Entwicklung der hydroponisch wachsenden Tomatensorten zu.

Es ergaben sich statistisch signifikante morphologische Veränderungen in der Sprosslänge und Sprosstrockenmasse der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung der Sorte *Sweeterno*. Für die Sorte *Saluso* konnte diese Entwicklung derselben Behandlung nicht beobachtet werden. Die Evapotranspiration war unter der LED (4000 K) Behandlung am geringsten und bei der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung am höchsten. Insgesamt konnten die Unterschiede in der Evapotranspiration und der Nährstoffaufnahme von Ammonium (NH_4^+), Nitrat (NO_3^-) und Phosphat (PO_4^{3-}) nicht deutlich voneinander unterschieden werden.

Aus den Ergebnissen des Versuchs kann nicht geschlossen werden, dass die Beleuchtung mit LEDs (4000 K) der Beleuchtung mit Keramik-Dampflampen (CMHL) zu bevorzugen ist. Die Ergebnisse unterscheiden sich bis auf die Sprosstreckung und das Sprossgewicht der Sorte *Sweeterno* in der Keramik-Dampflampen (CMHL) Behandlung, unerheblich. Für konkretere Aussagen wären mehrere Wiederholungen der einzelnen Behandlungen und sensiblere Messungen erforderlich gewesen. Umweltfaktoren wie die natürliche Einstrahlung müssten berücksichtigt werden, da sie sich saisonal am Standort unterscheidet und damit die Wirkung der zusätzlichen Beleuchtung beeinflusst. Sollte in weiteren Versuchen geklärt werden, dass die Strahlungsqualität und -quantität den verschiedenen zu Versuchszwecken angebauten Pflanzen im Gewächshaus ausreicht, so sollten die Keramik-Dampflampen (CMHL), aus energietechnischer und damit langfristig ökonomischer Sicht mit LEDs ersetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit ist das Testen von an das Spektrum der Pflanzen, für die Photosynthese angepassten LEDs im Vergleich zu neutralen LEDs. Die spektral angepassten LEDs können hinsichtlich ihres Strahlungsspektrums an die Keramik-Dampflampen (CMHL) angepasst werden. Die Preise neutraler und photosynthetisch angepasster LEDs sind in den vergangenen Jahren stark gesunken und rentieren sich damit zunehmend mehr als die Keramik-Dampflampen (CMHL).

7 Literaturverzeichnis

- Al Meselmani, Moaed Ali. "Nutrient solution for hydroponics." *Recent Research and Advances in Soilless Culture*. IntechOpen, 2022.
- AlShrouf, Ali. "Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming." *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci* 27.1 (2017): 247-255.
- An, Jae Uk, et al. "Effect of heating by infrared heating lamps on growth of strawberry and heating cost." *Journal of Bio-Environment Control* 22.4 (2013): 355-360.
- Bernhard, Ann Sophie: Effekte der Lichtqualität auf die Wachstumsphysiologie von zwei Tomatensorten, *Universität Hohenheim Fg. (490g)* (2023): 1-41.
- Campbell, Neil A.; Urry, Lisa A; Cain, Michael L.; Wasserman, Steven A.; Minorsky, Peter V.; Reece, Jane B.; Paululat, Achim; Heinisch, Jürgen J.; "Campbell Biologie 11. Auflage" *Pearson Benelux B.V.* (2019): 1057-1205.
- Cohen, Joel E. "Human population: the next half century." *science* 302.5648 (2003): 1172-1175.
- Cope, Kevin R., and Bruce Bugbee. "Spectral effects of three types of white light-emitting diodes on plant growth and development: absolute versus relative amounts of blue light." *Horticulture Science* 48.4 (2013): 504-509.
- Croft, Marcia M., Steven G. Hallett, and Maria I. Marshall. "Hydroponic production of vegetable Amaranth (*Amaranthus cruentus*) for improving nutritional security and economic viability in Kenya." *Renewable Agriculture and Food Systems* 32.6 (2017): 552-561.
- Dallmann, M.. *Energieeffiziente Assimilationsbelichtung* (1. Aufl.). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (2019). *Schriftenreihe, Heft 13/2019*.
- De Kreij, C., Wim Voogt, and Robert Baas. *Nutrient solutions and water quality for soilless cultures*. No. 191. Applied Plant Research, Division Glasshouse (2003).
- Deram, Paul, Mark G. Lefsrud, and Valérie Orsat. "Supplemental lighting orientation and red-to-blue ratio of light-emitting diodes for greenhouse tomato production." *Horticulture Science* 49.4 (2014): 448-452.
- Despommier, Dickson: "Instant Insights. Vertical farming in horticulture. Burleigh Dodds Science Publishing Limited (2020): 1-144.
- Dieleman, J. A., P. H. B. De Visser, and P. C. M. Vermeulen. "Reducing the carbon footprint of greenhouse grown crops: Re-designing LED-based production systems." *VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134*. 2016.
- Duke, William B., et al. "Metal Halide Lamps for Supplemental Lighting in Greenhouses: Crop Response and Spectral Distribution 1." *Agronomy Journal* 67.1 (1975): 49-53.
- Duston, Jessica. *Assessing the potential environmental impacts of controlled environment agriculture in Detroit and the future of this industry based on local food trends*. Diss. (2017).
- Dutta Gupta, S., and A. Agarwal. "Artificial lighting system for plant growth and development: Chronological advancement, working principles, and comparative assessment." *Light emitting diodes for agriculture: smart lighting* (2017): 1-25.

- FAO, Water scarcity: Water Scarcity | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations | Land & Water | Food and Agriculture Organization of the United Nations (fao.org) (2008).
- FAO. Water Reports. Coping with water scarcity. An action framework for agriculture and food security. <https://www.fao.org/3/i3015e/i3015e.pdf>. (2012). Abruf März 2024.
- Fedoroff, Nina V. "Food in a future of 10 billion." *Agriculture & Food Security* 4 (2015): 1-10.
- Fernández-Cirelli, Alicia, et al. "Environmental effects of irrigation in arid and semi-arid regions." *Chilean Journal of Agricultural Research* 69, Nr. SUPPL. 1 69.SUPPL. 1 (2009): 27-40.
- Fischer, Maria Emilia: „Einfluss der Lichtintensität bei gleichbleibender Nitratgabe auf die Kalium- und Kalziumaufnahme von hydroponisch-wachsenden Tomaten“. *Universität Hohenheim Fg. (490g)* (2022): 1-38.
- Franklin, Keara A., and Garry C. Whitelam. "Phytochromes and shade-avoidance responses in plants." *Annals of botany* 96.2 (2005): 169-175.
- Giancoli, Douglas C. „Physik – 4., aktualisierte Auflage“. *Hallbergmoos: Pearson Studium ein Imprint von Pearson Deutschland* (2019): 547-583.
- Gislerød, Hans R., et al. "Light and energy saving in modern greenhouse production." *VII International Symposium on Light in Horticultural Systems* 956. (2012).
- Gómez, Celina, and Cary A. Mitchell. "Physiological and productivity responses of high-wire tomato as affected by supplemental light source and distribution within the canopy." *Journal of the American Society for Horticultural Science* 141.2 (2016): 196-208.
- Heuvelink, E., & Dorais, M. Crop Growth and Yield. In E. Heuvelink (Hrsg.), *Tomatoes (Crop Production Science in Horticulture 13)*. Wallingford UK: Cabi Publishing (2005): 85-144.
- Javanmardi, Jamal, and Shandiz Emami. "Response of tomato and pepper transplants to light spectra provided by light emitting diodes." *International Journal of Vegetable Science* 19.2 (2013): 138-149.
- Kadereit, Joachim W.; Körner, Christian; Nick, Peter; Sonnewald, Uwe; Lay, Martin. *Strasburger – „Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften“*; Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (2021): 451-579.
- Katzin, David, et al. "Heating greenhouses by light: A novel concept for intensive greenhouse production." *Biosystems Engineering* 230 (2023): 242-276.
- Katzin, David, Leo FM Marcelis, and Simon van Mourik. "Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting." *Applied Energy* 281 (2021): 116019.
- Kavga, A., et al. "Infrared heating of greenhouses revisited: An experimental and modeling study." *Transactions of the ASABE* 52.6 (2009): 2055-2065.
- Kavga, Angeliki, Ioannis Konstas, and Thrassos Panidis. "Assessment of Infrared Heating Benefits in a Production Greenhouse." *Applied Engineering in Agriculture* 31.1 (2015): 143-151.
- Kim, Hye-Ji, Meng-Yang Lin, and Cary A. Mitchell. "Light spectral and thermal properties govern biomass allocation in tomato through morphological and physiological changes." *Environmental and experimental botany* 157 (2019): 228-240.

- Kopittke, Peter M., et al. "Soil and the intensification of agriculture for global food security." *Environment international* 132 (2019): 105078.
- Kozai, Toyoki, Genhua Niu, and Michiko Takagaki, eds. *Plant factory: "An indoor vertical farming system for efficient quality food production"*. Academic press (2019).
- Kozai, Toyoki. "Why LED lighting for urban agriculture?" . *Springer Singapore* (2016): 3-18.
- Laber, Hermann; Lattauschke, Gerald; Geyer, Martin; Jaksch, Thomas; Katroschan, Kai-Uwe. *Gemüsebau – 3., erweiterte Auflage*. Ulmer-Verlag, Stuttgart (2020): 1-582.
- Marcelis, L. F. M., et al. "Quantification of the growth response to light quantity of greenhouse grown crops." *V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture* 711. (2005).
- Martínez, Hernan Eduardo Ocaña, N. Muñoz, and J. A. Encarnación. "Evaluación de niveles de forraje hidropónico de maíz en vacas doble propósito en piedemonte Amazónico." *Revista Facultad De Ciencias Agropecuarias-FAGROPEC* 2.2 (2010): 19-23.
- Mitchell, Cary A., et al. "Light-emitting diodes in horticulture." *Horticultural Reviews: Volume 43* (2015): 1-88.
- Morgan, Lynette. "Hydroponic tomatoes." *The Growing Edge* 14.6 (2003).
- Morrow, Robert C. "LED lighting in horticulture." *Horticulture Science* 43.7 (2008): 1947-1950.
- Nalwade, Rahul, and Tushar Mote. "Hydroponics farming." *International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*. IEEE (2017).
- Nelson, Jacob A., and Bruce Bugbee. "Analysis of environmental effects on leaf temperature under sunlight, high pressure sodium and light emitting diodes." *PloS one* 10.10 (2015): e0138930.
- Nexus „Wasser und Ernährungssicherheit“. *Fraunhofer-Institut*, <https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/wasser-abwasser/wassermanagement/nexus-wasser-ernaehrung-hydroponik-und-naehstoffaufbereitung-fuer-eine-resiliente-landwirtschaft.html> (2024) Abruf: März 2024
- Nultsch, W., „Allgemeine Botanik“ (12. unveränderte Auflage). *Georg Thieme Verlag*. (2012): 307-349.
- Palmitessa, Onofrio Davide, Marco Antonio Pantaleo, and Pietro Santamaria. "Applications and development of LEDs as supplementary lighting for tomato at different latitudes." *Agronomy* 11.5 (2021): 835.
- Pinho, P., Kari Jokinen, and L. Halonen. "The influence of the LED light spectrum on the growth and nutrient uptake of hydroponically grown lettuce." *Lighting Research & Technology* 49.7 (2017): 866-881.
- Pomoni, Dimitra I., et al. "A review of hydroponics and conventional agriculture based on energy and water consumption, environmental impact, and land use." *Energies* 16.4 (2023): 1690.
- Ramankutty, Navin, Jonathan A. Foley, and Nicholas J. Olejniczak. "Land-use change and global food production." *Land use and soil resources* (2008): 23-40.
- Resh, Howard M. *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC press (2022).

- Rijk Zwaan Welver. "SWEETERNO F1 (72-733)". *Rijk Zwaan Zaadteelt en Zaadhandel B.V.* (2023) www.rijkszwaan.de/Tomate/SWEETERNO-F1-72-733-prdSL11339-ctgCrops.tomato
- Schopfer, P., & Brennike, A.. „Pflanzenpyhsologie - 7. Auflage“ . *Springer-Verlag GmbH, Deutschland* (2010): 167-183.
- Sharma, Nisha, et al. "Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview." *Journal of Soil and Water Conservation* 17.4 (2018): 364-371.
- Singh, Devesh, et al. "LEDs for energy efficient greenhouse lighting." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (2015): 139-147.
- Singh, Hardeep, and Bruce Dunn. *Electrical conductivity and pH guide for hydroponics*. Oklahoma Cooperative Extension Service (2016).
- Sonnewald, U., Kadereit, W., Körner, C., Nick, P. „Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften“. *Springer-Verlag GmbH, Deutschland* (2021). 451-579.
- Stanghellini, Cecilia, Bert Van't Ooster, and Ep Heuvelink. "Greenhouse horticulture: Technology for optimal crop production." *Greenhouse horticulture*. Wageningen Academic (2019).
- Statistisches Bundesamt „Energiepreise: Hohe Steigerungen auf allen Wirtschaftsstufen“. Pressemitteilung Nr. N 016 vom 29. März 2022. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/03/PD22_N016_61.html#:~:text=Wie%20das%20Statistische%20Bundesamt%20\(Destatis,zahlen%20als%20im%20Februar%202021. \(2022\). Abrufdatum 10.03.2024.](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/03/PD22_N016_61.html#:~:text=Wie%20das%20Statistische%20Bundesamt%20(Destatis,zahlen%20als%20im%20Februar%202021. (2022). Abrufdatum 10.03.2024.)
- Sutar, K. A., et al. "Study on use of waste water in hydroponic system instead of nutrient solution." *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 6.3 (2018): 2035-2039.
- Suyanto, Hery, Ni Nyoman Rupiasih, and Dewi Handayani. "Influence of light wavelengths on growth of tomato." *Jurnal Bumi Lestari (Journal of Environment)* 12.2 (2012): 338-344.
- Unfried, Kerstin, Krisztina Kis-Katos, and Tilman Poser. "Water scarcity and social conflict." *Journal of Environmental Economics and Management* 113 (2022): 102633.
- Until, E.. *World Population Prospects: 2012 Revision*. United Nations Department of Economic and Social Affairs: New York, NY, USA (2013).
- Van Ieperen, W., and G. Trouwborst. "The application of LEDs as assimilation light source in greenhouse horticulture: a simulation study." *International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys2007* 801. (2007).
- Whitelam, Garry C., and Karen J. Halliday, eds. *Annual plant reviews, light and plant development*. Vol. 30. John Wiley & Sons (2008).
- World Bank "Water in Agriculture". <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-> (2022). *World Bank*. Abruf März 2024.
- Xu, Yingchao, et al. "The research on LED supplementary lighting system for plants." *Optik* 127.18 (2016): 7193-7201.
- Yang, Xiaolong, et al. "Response of photosynthetic capacity of tomato leaves to different LED light wavelength." *Environmental and Experimental Botany* 150 (2018): 161-171.
- Yorio, N. C., et al. "Vegetative growth of potato under high-pressure sodium, high-pressure sodium SON-Agro, and metal halide lamps." *Horticulture Science* 30.2 (1995): 374-376.

Die Bilder wurden selbst an den angegebenen Tagen gemacht.

Die Abbildung zum Versuchsaufbau wurde aus der Bachelorarbeit von Maria Fischer (2022) entnommen und die Abbildungen zum Lichtspektrum der Keramik-Dampf lampen und LED (4000 K) wurden vom Fg. (490g) erstellt.

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Folkard Asch für die Möglichkeit bedanken, meine Abschlussarbeit im Fachgebiet Wasserstress-Management bei Kulturpflanzen in den Tropen und Subtropen (490g) schreiben zu dürfen.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinem Betreuer Hemanth Kumar Puppala für die Unterstützung, Einführung und Durchführung des Experiments sowie bei seiner Geduld bedanken. Ebenfalls möchte ich mich bei Ann-Sophie Bernhard und Julia Asch als Anlaufstelle für die Beantwortung meiner Fragen im Zuge des Schreibprozesses und Korrekturlesen bedanken.

Mein weiterer Dank gilt allen, die mir bei der Ernte des Experiments geholfen und korrekturgelesen haben.