

Universität Hohenheim

Institut für tropische Agrarwissenschaften (Hans-Ruthenberg-Institut)

Fachgebiet Wasserstress-Management bei Kulturpflanzen in den Tropen und Subtropen

(490g)



Effekte der Lichtqualität auf die Wachstumsphysiologie von zwei Tomatensorten

Bachelorarbeit im Studiengang Agrarwissenschaften

Eingereicht von: Ann Sophie Bernhard

Gutachter: Prof. Dr. Folkard Asch

Betreuer: Hemanth Kumar Puppala

Hohenheim, 16.10.2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Kurzfassung	V
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	2
2 Grundlagen	3
2.1 Leuchtmittel für den Pflanzenbau	3
2.1.1 Keramik-Metall-Halogen-Dampflampen (CMHL)	3
2.1.2 Licht emittierende Dioden (LED).....	3
2.2 Lichtbedürfnisse für Pflanzenwachstum.....	4
2.2.1 Lichtbedürfnisse von Tomaten	5
3 Material und Methoden	6
3.1 Versuchsaufbau.....	6
3.1.1 Beleuchtung	7
3.1.2 Nährstofflösung	9
3.1.3 Pflanzenmaterial	11
3.2 Versuchsbedingungen	11
3.3 Probenahmen und Ernte	12
3.4 Statistische Auswertung.....	13
4 Ergebnisse	14
4.1 Morphologische Auswirkungen.....	14
4.2 Unterschiede bei den Trockengewichten	16
4.3 Auswirkungen auf Evapotranspiration und Nährstoffaufnahme.....	19
5 Diskussion	24
5.1 Einfluss der Pflanzenleuchten auf Morphologie und Trockenmasse.....	24
5.2 Einfluss der Pflanzenleuchten auf die Nährstoffaufnahme.....	27
5.3 Mögliche Optimierungen des Versuchs.....	28
6 Fazit.....	30
Literaturverzeichnis	A
Danksagung	D
Eidesstattliche Erklärung	E

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Aufbau eines hydroponischen Systems in schematischer Darstellung (A) und Foto eines fertiggestellten Systems im Gewächshaus (B) 6
- Abbildung 2:** Relatives Emissionsspektrum aus dem Datenblatt für GWM JTLRSA.EM DURIS® E 283DURIS® E 2835 ($\Phi_{rel} = f(\lambda)$; IF = 150 mA; TJ = 25 °C) (OSRAM Opto Semiconductors, 2019) 8
- Abbildung 3:** Lichtspektrum des CHD Agro 400 in den verwendeten Keramik-Metallhalogen-dampflampen (DH Licht GmbH, 2023) 8
- Abbildung 4:** Randomisiertes Schema der Pflanzenverteilung in den Behandlungen mit LED 4000K, LED 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL), der Sorten Saluoso (SA) und Sweeterno (SW)..... 11
- Abbildung 5:** Durchschnittliche Temperatur [°C] im Tagesverlauf auf Boxenhöhe in den drei Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 6000 K (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (□), mit Beleuchtung zwischen 9:30 Uhr und 23:30 Uhr. 12
- Abbildung 6:** Mittlere Sprosslänge [cm] von den Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL) 14
- Abbildung 7:** Mittelwerte der Blattlängen [cm] von den Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit Farbtemperatur 4000 K und 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL) 15
- Abbildung 8:** Mittelwerte der Blattflächen [cm²] von den Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit Farbtemperatur 4000 K und 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL) 16
- Abbildung 9:** Mittelwerte der Trockengewichte [g] der Sprosse (A) und der Wurzeln (B) von den Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit Farbtemperatur 4000 K und 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL) 17
- Abbildung 10:** Mittelwerte der Trockengewichte [g] der gesamten Blattmasse (A) und der gesamten Pflanzen (B) von den Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit Farbtemperatur 4000 K und 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL)..... 18
- Abbildung 11:** Tägliche Aufnahme rate [%] von Ammonium (NH₄⁺) aus den hydroponischen Systemen mit LED 4000 K (●), LED 6000 K (○), Keramik-Dampflampe (CMHL) (□) als Beleuchtung, durch die Berechnung über die gemessenen Verluste aus der Nährstofflösung. 20

- Abbildung 12:** Tägliche Aufnahme­rate [%] von Nitrat (NO_3^-) aus den hydroponischen Systemen mit LED 4000 K (●), LED 6000 K (○), Keramik-Dampflampe (CMHL) (□) als Beleuchtung, durch die Berechnung über die gemessenen Verluste aus der Nährstofflösung..... 21
- Abbildung 13:** Tägliche Aufnahme­rate [%] von Phosphat (PO_4^{3-}) aus den hydroponischen Systemen mit LED 4000 K (●), LED 6000 K (○), Keramik-Dampflampe (CMHL) (□) als Beleuchtung, durch die Berechnung über die gemessenen Verluste aus der Nährstofflösung..... 22
- Abbildung 14:** Kumulierte Evapotranspiration von Tomatenpflanzen in den Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 6000 K (○), Keramik-Dampflampe (CMHL) (□), durch Berechnung über die gemessenen Wasserverluste aus den hydroponischen Systemen, mit entfernten Werten an Tag 8, 22 und 27 nach der Transplantation. 23
- Abbildung 15:** Morphologischer Vergleich hydroponisch wachsender Tomaten der Sorte Sweeterno unter drei verschiedenen Lichtquellen nach 31 Tagen. (Bilder haben nicht den exakt gleichen Maßstab) (A) LED 4000 K, 1.2, 69 cm. (B) LED 6000 K, 2.2, 60cm. (C) Keramik-Dampflampen, 3.2, 88 cm..... 25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Eckdaten der drei verschiedenen Lampen (LED 4000 K, LED 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL)) mit berechneten Werten (***).....	7
Tabelle 2: Zusammensetzung der Stammlösungen (STL) A bis H aus Chemikalien und deionisiertem Wasser für hydroponisch wachsende Pflanzen.....	9
Tabelle 3: Mengen der einzelnen Nährstoffe [mg/L] in einer auf 40 % verdünnten Nährlösung, die für hydroponisch wachsende Pflanzen aus acht Stammlösungen und deionisiertem Wasser hergestellt wurde.	10

Abkürzungsverzeichnis

K	Kelvin (hier bezogen auf die Farbtemperatur)
lm	Lumen
mS	Millisiemens
W	Watt
CMHL	Keramik-Metallhallogendampf- Hochdruckentladungs-Lampen
EC	electrical conductivity (elektrische Leitfähigkeit)
LED	light emitting diodes (lichtemittierende Dioden)
PAR	photosynthetically active radiation (photosynthetisch aktive Strahlung)
SA	Saluoso (Tomatensorte)
SPAD	Sensitive Single Photon Avalanche Dioden
SW	Sweeterno (Tomatensorte)

Kurzfassung

Der Klimawandel und die dadurch immer begrenzter werdenden nutzbaren Flächen für die Landwirtschaft erschweren die weltweite Nahrungsmittelversorgung. Um dieses Problem anzugehen, wird der Anbau in kontrollierten Gewächshausumgebungen, insbesondere in hydroponischen Systemen erforscht.

Das Verbundprojekt HypoWave+ befasst sich mit der Wasseraufbereitung von vorgereinigtem Wasser aus Kläranlagen mit Hilfe hydroponisch wachsender Nutzpflanzen. Die für die Versuche verwendeten Keramik-Dampflampen erzeugen eine hohe Wärmestrahlung, weshalb die Experimente an der Universität Hohenheim im Sommer nicht stattfinden können. Diese Bachelorarbeit untersucht die Lichtqualität und -quantität von weißen LEDs, um die Keramik-Dampflampen in zukünftigen Versuchen ersetzen zu können.

Hierfür wurden jeweils drei hydroponisch wachsende Tomatenpflanzen der Sorten Sweeterno und Saluso einmal mit 4000 K LEDs, mit 6000 K LEDs und mit Keramik-Dampflampen beleuchtet. Anschließend wurden die Morphologie, die Trockengewichte und die Nährstoffaufnahme von den Tomatenpflanzen betrachtet.

Die Keramik-Dampflampen hatten einen Effekt auf das Längenwachstum der Tomatenpflanzen. Weitere Ergebnisse zeigten zwischen den Behandlungen weder bei der Morphologie der Pflanzen noch bei der Untersuchung der Trockengewichte signifikante Unterschiede.

Es wurden die Nährstoffaufnahme von Ammonium, Nitrat und Phosphat gemessen, dabei wurden einige Ausreißer beobachtet, aber keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen festgestellt. Die kumulierte Evapotranspiration unterschied sich nicht signifikant zwischen den Lampentypen. Insgesamt ergaben sich keine deutlichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Lampen in Bezug auf die untersuchten Parameter.

1 Einleitung

Die Folgen des Klimawandels sowie die Corona-Pandemie und Kriege stellen eine zunehmende Herausforderung für eine weltweite Nahrungsmittelversorgung dar (FAO et al., 2022). Prognosen der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) zu Folge müssen für die 10 Billionen Menschen im Jahr 2050 etwa 60 % mehr kalorienreiche Nahrungsmittel produziert werden (Alexandratos & Bruinsma, 2012). Gleichzeitig werden die der Landwirtschaft zur Verfügung stehenden Flächen immer begrenzter. Die Expansion der Anbauflächen erfolgt vermehrt auf Grenzertragsflächen, welche eine geringe Bodenfruchtbarkeit aufweisen und klimatisch oder wirtschaftlich ungünstige Bedingungen haben (Van der Esch et al., 2017). Dementsprechend ist es notwendig, die Produktivität auf vorhandenen Flächen weiter zu steigern sowie zusätzlich alternative Anbaumethoden neben der traditionellen Landwirtschaft zu erforschen und umzusetzen (Garnett et al., 2013).

Ein vielversprechender Ansatz ist der Gemüseanbau in kontrollierten Gewächshausumgebungen, einschließlich der Verwendung von hydroponischen Systemen. Diese ermöglichen sogar auf für den traditionellen Anbau unbenutzbaren Flächen eine ganzjährige Nahrungsmittelerzeugung. Hierbei werden die Umweltbedingungen sowie die Nährstoffversorgung reguliert und auf die optimalen Wachstums- und Ertragsbedingungen für die jeweilige Nutzpflanze abgestimmt. Dies kann das Pflanzenwachstum beschleunigen und zu höheren Erträgen führen. Im Vergleich zum Feldanbau, bei dem große Mengen des Wassers durch Evaporation und Versickerung verloren gehen, kann in hydroponischen Systemen ein Großteil des Wassers wiederverwendet werden (Shrestha & Dunn, 2017; Majid et al., 2021). Hauptsächlich die für das Wachstum benötigte Wassermenge wird von den Pflanzen entnommen. Zudem wird verhindert, dass Dünge- und Pflanzenschutzmittel in die Umwelt und somit in das Grundwasser gelangen können.

In dem Verbundprojekt HypoWave+, das von der Technischen Universität Braunschweig koordiniert wird, untersucht die Universität Hohenheim, ob sich mit hydroponischen Systemen Nährstoffe aus dem gereinigten Wasser von Kläranlagen für die Lebensmittelproduktion nutzen lassen und gleichzeitig die Wasserqualität verbessert werden kann.

Ein bedeutsamer Nachteil von hydroponischen Systemen liegt in ihrem hohen Energiebedarf, der mit entsprechend hohen Kosten einhergeht (Ntinas et al., 2017). Eine Möglichkeit die Energiekosten zu senken, ist die Verwendung energiesparender Lampen, wie Licht emittierende Dioden (LED).

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Die Versuche im Rahmen des HypoWave+ Projekts an der Universität Hohenheim zeigten, dass die hohe Wärmestrahlung von Keramik-Metall-Halogen-Dampflampen (CMHL) einen Nachteil darstellt. Die Experimente können ausschließlich in den kühleren Monaten durchgeführt werden, da das passive Kühlsystem des Gewächshauses im Sommer nicht in der Lage ist, die niedrigen Temperaturen bei hoher Sonneneinstrahlung zu halten, insbesondere wenn die keramischen Dampflampen zusätzliche Wärme erzeugen.

Aufgrund dieses Problems ergeben sich für die vorliegende Bachelorarbeit folgende Fragestellungen, mit einer anschließenden Evaluierung, ob die Keramik-Dampflampen in zukünftigen Versuchen der Universität Hohenheim durch LEDs ersetzt werden können:

- (I) Hat die Lichtqualität und -quantität von weißen LEDs einen vergleichbaren Einfluss auf das Wachstum von zwei verschiedenen Tomatensorten in Hydrokultur wie Keramik-Dampflampen?
- (II) Gibt es Unterschiede in der Nährstoffaufnahme hydroponisch wachsender Tomatenpflanzen, wenn sie mit weißen LEDs im Vergleich zu Keramik-Dampflampen beleuchtet werden?

2 Grundlagen

2.1 Leuchtmittel für den Pflanzenbau

Leuchtmittel für Pflanzen, insbesondere Keramik-Dampflampen (CMHL), spielen eine wesentliche Rolle bei der Pflanzenkultivierung in Gewächshäusern. Sie ersetzen oder ergänzen das natürliche Sonnenlicht und ermöglichen damit ein kontrolliertes Pflanzenwachstum. Die beiden in der vorliegenden Arbeit verwendeten Leuchtmittel nutzen unterschiedliche technische Ansätze, um Licht zu erzeugen, die jeweils Vor- und Nachteile mit sich bringen.

2.1.1 Keramik-Metall-Halogen-Dampflampen (CMHL)

Das Licht der CMHL wird mit Hilfe verdampfter Metallhalogenide erzeugt (Ganslandt & Hofmann, 1992). Verschiedene Metallionen im Gemisch sorgen für spezifische Wellenlängen und beeinflussen so die Farbe der Beleuchtung (Luijks et al., 2005). Dabei kann ein sonnenähnliches Lichtspektrum erzeugt werden, weshalb die Lampen im Gartenbau bevorzugt verwendet werden (Dallmann, 2019).

Neben der Lichterzeugung haben CMHL eine hohe Wärmestrahlung, was mit einem höheren Energieverbrauch verbunden ist und zu höheren Energiekosten führen kann (Dallmann, 2019).

2.1.2 Licht emittierende Dioden (LED)

LEDs erzeugen Licht auf energieeffiziente Weise, indem Photonen beim Durchleiten von elektrischem Strom durch ein Halbleitermaterial freigesetzt werden. Sie können monochromatisches Licht der Farben Rot, Grün, Blau, Orange und Gelb erzeugen (Weimar & Albrecht, 2010). Weißes Licht entsteht durch die Überlagerung der Grundfarben (Craford, 2000) oder einer Konversionsschicht auf blauen LEDs, welche die restlichen Farben für das sichtbare Spektrum adsorbiert und emittiert. Dabei können verschiedene Weißtöne von warm- bis kaltweiß erstellt werden (Weimar & Albrecht, 2010).

Im Vergleich zu anderen Lampen haben sie eine geringere Wärmestrahlung (Dallmann, 2019; Nederhoff, 2010) und eine hohe Lichtausbeute. Die Energieeffizienz und die lange Lebensdauer von LEDs lassen einen stromarmen und damit kostensparenden Einsatz zu (Weimar & Albrecht, 2010).

Die Nutzung von LEDs in Gewächshäusern ist bisher allerdings noch gering, da die Beleuchtungssysteme mit hohen Anschaffungskosten verbunden sind. Zudem benötigen

sie eine Kühlung (Dallmann, 2019), um das Optimum der Lampen ausnutzen zu können (Nederhoff, 2010). Im Winter hingegen führt ihre geringe Wärmestrahlung zu höheren Heizkosten (Dallmann, 2019).

Durch die präzise Steuerbarkeit von Lichtfarben und Helligkeit ermöglichen LEDs einen vielseitigen Einsatz für die verschiedenen Lichtanforderungen von Pflanzen. Ihre geringe Größe und die Wärmeableitung über die Rückseite, ermöglichen neben der Beleuchtung von oben auch eine Beleuchtung zwischen den Pflanzen, wodurch die Lichteffizienz zusätzlich gesteigert werden kann (Nederhoff, 2010).

2.2 Lichtbedürfnisse für Pflanzenwachstum

Licht ist einer der entscheidenden Einflussfaktoren, der die Pflanzenphysiologie während des gesamten Lebenszyklus stark beeinflusst. Es dient sowohl als Energiequelle für die Kohlenstoffbindung in der Photosynthese als auch als Signal zur Aktivierung und Regulierung von Pflanzenwachstum und Entwicklung (Schopfer & Brennike, 2010). Die Anforderungen an Licht variieren je nach Pflanzenart und Wachstumsstadium, was sich in unterschiedlichen Bedürfnissen hinsichtlich Lichtintensität, Photoperiode und spektraler Zusammensetzung zeigt (de Wit et al., 2016).

Für die Photosynthese ist nur ein bestimmter Wellenbereich von den Pflanzen nutzbar. Die photosynthetisch aktive Strahlung, kurz PAR, bezeichnet die Wellenlängen von 400 nm bis 700 nm. Durch die unterschiedlichen Adsorptionsraten sind allerdings nicht alle Wellenlängen gleich effizient. Blaues und rotes Licht sind die photosynthetisch wirkungsvollsten Wellenlängen. Auch grünes Licht wird von den Blättern adsorbiert, jedoch deutlich geringer (Schopfer & Brennike, 2010).

Der Lichtfluss, bei dem die Nettophotosynthese Null ist, wird als Lichtkompensationspunkt definiert und gibt Auskunft über die photosynthetische Leistungsfähigkeit einer Pflanze. Mit steigender Lichtintensität nimmt die Nettophotosynthese zu, bis sie ein Sättigungsniveau erreicht (Schopfer & Brennike, 2010). Wird der Lichtsättigungspunkt stark überschritten, vermindert sich die Photosyntheseleistung und es kann zur Photoinhibition bis hin zur Photodestruktion kommen (Schopfer & Brennike, 2010). Um sich vor überschüssiger Lichtenergie zu schützen, wird diese in Wärme umgewandelt und abgeleitet (Heldt & Piechulla, 2015). Sind Pflanzen über einen längeren Zeitraum einer hohen Beleuchtungsstärke ausgesetzt,

kann dies zu einer morphologischen Adaptation führen. Blätter unter hoher Lichteinstrahlung weisen eine reduzierte Blattfläche, verdickte Blätter und eine erhöhte Stomatazahl auf (Lizana et al., 2006; Morais et al., 2004).

Eine geringe Beleuchtungsstärke führt dagegen zu einer Vergrößerung der Assimilationsfläche und Streckung der Sprossachse. Dies wird vor allem durch ein hohes Verhältnis von photosynthetisch ineffektivem fernem roten Licht zu rotem Licht induziert (Park & Runkle, 2017), das für viele Pflanzen ein Schattenindikator ist (Smith, 1995).

Zur Anpassung an das gesamte Lichtspektrum der Sonne nehmen verschiedene Photorezeptoren Wellenlängen zwischen 280 nm bis 750 nm wahr, um verschiedene Funktionen in der Pflanze zu regulieren (de Wit et al., 2016). UV-A und blaues Licht werden von Phototropinen für die Steuerung des Phototropismus genutzt, Cryptochrome können das Längenwachstum inhibieren (Schopfer & Brenniker, 2010).

2.2.1 Lichtbedürfnisse von Tomaten

Die Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) ist eine aus Mittel- und Südamerika stammende Kulturpflanze, die der Familie der *Solanaceae* angehört. Sie zählt weltweit als eine der bedeutendsten Gemüsearten. In den nördlichen Breitengraden findet der Anbau überwiegend in Gewächshäusern statt (Lattauschke, 2020). Eine zusätzliche Lichtquelle zum Sonnenlicht kann das Wachstum und den Ertrag fördern (Demers et al., 1998).

Für ein optimales Wachstum benötigen Tomaten eine Photoperiode von etwa 14 h. Belichtungszeiten von mehr als 20 h ergeben keinen zusätzlichen Nutzen und können sich sogar negativ auf das Wachstum auswirken und zu Blattchlorosen führen (Demers et al., 1998). In einer Ertragskultur benötigen die Tomaten pro Tag eine Lichtsumme von mindestens 30 mol/m². Geringere Lichtverhältnisse zeigen sich in einer reduzierten Blütenentwicklung und steigern die Blattbildung (Heuvelink & Dorais, 2005).

Neben dem hohen Lichtbedürfnis von Tomaten, hat die Temperatur bei der Entwicklung ebenfalls eine große Bedeutung. Sie wirkt sich stark auf das Wachstum sowie verschiedene Prozesse in der Pflanze aus und hat somit einen bedeutenden Einfluss auf die Produktion. Für das optimale vegetative Wachstum werden Temperaturen zwischen 18 °C und 25 °C benötigt. Steigt die Temperatur für einen längeren Zeitraum über 26 °C, kann sich der Ertrag mindern (Heuvelink & Dorais, 2005).

3 Material und Methoden

Um die Fragestellungen zu beantworten und zu evaluieren, ob LEDs die Keramik-Dampflampen ersetzen können, wurde an der Universität Hohenheim ein Versuch im Phytotechnikum durchgeführt. Der Versuch fand vom 09.11.2022 bis zum 09.12.2022 statt. Dabei wurden jeweils zwei Tomatensorten in drei verschiedenen Behandlungen mit unterschiedlichen Lichtquellen untersucht. Im folgenden Abschnitt werden der Aufbau und Ablauf des Versuchs sowie die Messungen und Analysen an den Tomatenpflanzen beschrieben.

3.1 Versuchsaufbau

Ein hydroponisches System im vorliegenden Versuch bestand aus sechs Eurobehältern mit 5,3 L (30 x 20 x 17 cm, Auer Packaging, Deutschland), in denen jeweils eine Tomatenpflanze in ein gebohrtes Loch mit 3 cm Durchmesser im Auflagedeckel (30 x 20 cm, Auer Packaging, Deutschland) eingesetzt werden konnte. Eine weitere Box gleicher Größe wurde als Zulaufbox (Mix-Box) verwendet. Verbunden wurden die Boxen mit schwarzen PVC-Schläuchen (4/7 mm, HT CONNECT GmbH & Co. KG, Deutschland) als Zulauf. Diese wurden durch gebohrte Löcher in die Seitenwand der Boxen gesteckt. Für die Abläufe zwischen den Pflanzenboxen und der Mix-Box wurde ein Gartenschlauch (13 mm (1/2), GARDENA Deutschland GmbH, Deutschland) verwendet. Aus der Mix-Box führte ein weiterer Gartenschlauch zu einem 60 L Vorratsfass (Krüger GmbH, Deutschland) mit Pumpe (EHEIM compactON 1000, EHEIM GmbH & Co. KG, Deutschland). Diese beförderte die Nährlösung wieder in die kleinen Kisten (Abb. 1).

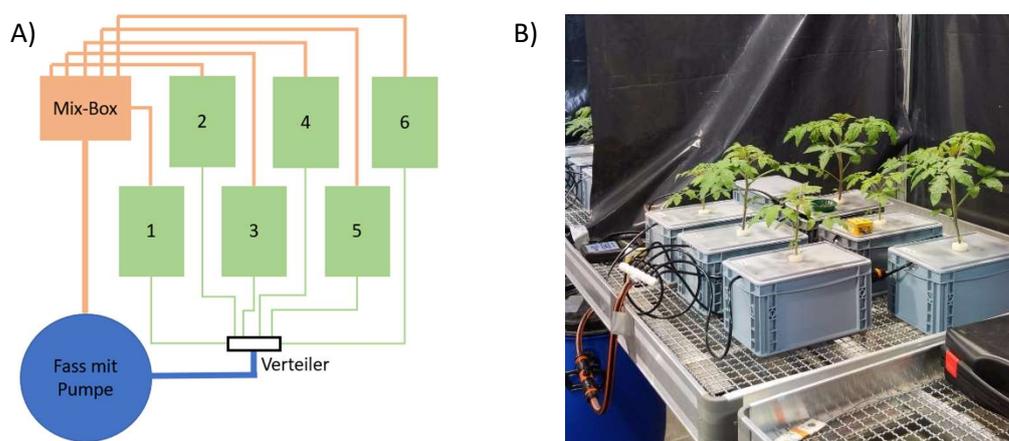


Abbildung 1: Aufbau eines hydroponischen Systems in schematischer Darstellung (A) und Foto eines fertiggestellten Systems im Gewächshaus (B)

Über jedem System wurden für die unterschiedlichen Behandlungen (Tab. 1) zwei Lampen mittig angebracht, sodass auf dem Referenzniveau von 30 cm über den Boxen in allen Behandlungen die gleichen PAR-Werte von etwa 280 W/m^2 erreicht wurden. In 50 cm Höhe über den Boxen betrug der durchschnittliche PAR-Wert über die Dauer des Versuchs 263 W/m^2 . Zwischen den Behandlungen und an den Seiten zu den anliegenden Gewächshauskammern wurde schwarze Folie angebracht, damit die Behandlungen nicht von äußeren Lichtquellen beeinflusst wurden.

3.1.1 Beleuchtung

Die Tomatenpflanzen wurden jeden Tag von 9:30 Uhr bis 23:30 Uhr beleuchtet. 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 Behandlung 3 wurden Keramik-Metallhallogendampf-Hochdruckentladungs-Lampen (CMHL) aus der MGR-K Serie der DH Licht GmbH mit dem verwendeten Leuchtmittel CHD Agro 400 angebracht. Die Eckdaten der drei Lampen sind, wie sie FactorLED* (Micro Sine Electric, 2023) und DH Licht GmbH** (DH Licht Katalog, 2023) angeben, zum Direktvergleich in Tab. 1 aufgeführt. Die mit *** gekennzeichneten Werte wurden zur Vervollständigung aus den vorgegebenen Daten berechnet.

Tabelle 1: Übersicht über die Eckdaten der drei verschiedenen Lampen (LED 4000 K, LED 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL)) mit berechneten Werten (***)

Behandlung	1	2	3
Lampen	LED*	LED*	CMHL**
Lichtfarbe	4000 K (neutralweiß)	6000 K (kaltweiß)	4200 K (neutralweiß)
Lichtstrom [lm]	21.000	21.000	40.000
Lichtausbeute [lm/W]	140	140	100***
Leistung [W]	150	150	400
Lebensdauer [h]	30.000	30.000	15.000
Photonenfluss [$\mu\text{mol/s}$]	k. A.	k. A.	665
Photonenflussausbeute [$\mu\text{mol/sW}$]	k. A.	k. A.	1,66***

Für die erste Behandlung wurden zwei Lampen mit der Lichtfarbe 4000 K (neutralweiß) und für die zweite mit 6000 K (kaltweiß) angeschlossen. Ihre photometrischen Daten können der Abb. 2 entnommen werden. Die emittierte Strahlung der verwendeten LEDs liegt überwiegend in den Bereichen von 440-470 nm und 500-670 nm.

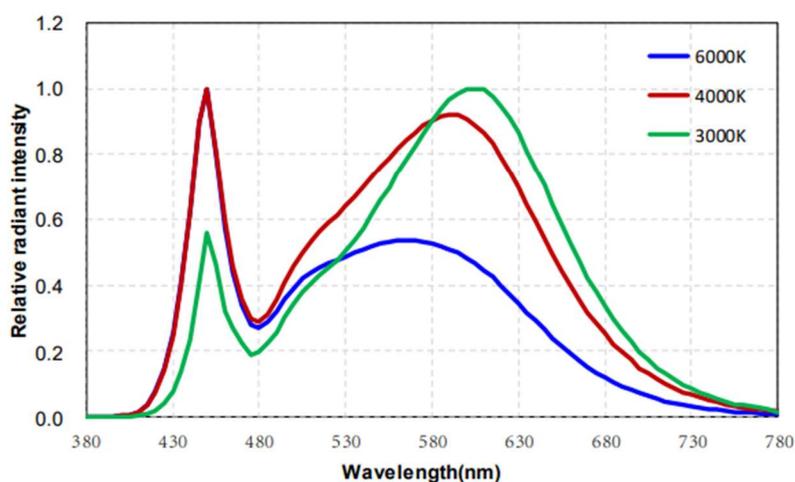


Abbildung 2: Relatives Emissionsspektrum aus dem Datenblatt für GWM JTLRSA.EM DURIS® E 283DURIS® E 2835 ($\Phi_{rel} = f(\lambda)$; IF = 150 mA; TJ = 25 °C) (OSRAM Opto Semiconductors, 2019)

Das in den Keramik-Dampflampen verwendete Leuchtmittel CHD Agro 400 der dritten Behandlung emittiert über das Lichtspektrum von 380-780 nm. Die höchste relative Intensität liegt dabei im grün bis gelben Bereich bei ca. 530 nm und zwischen 570-620 nm (Abb. 3).

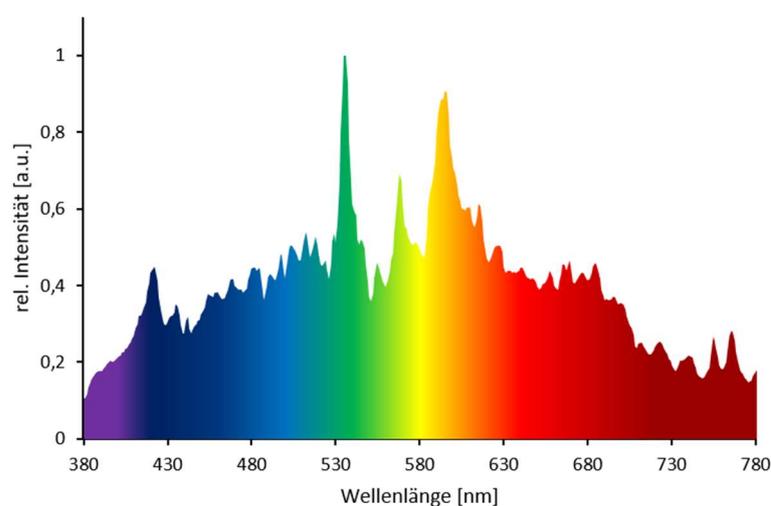


Abbildung 3: Lichtspektrum des CHD Agro 400 in den verwendeten Keramik-Metallhalogen-dampflampen (DH Licht GmbH, 2023)

3.1.2 Nährstofflösung

Für den Versuch wurde eine auf 40 % verdünnte Nährstofflösung in den hydroponischen Systemen verwendet. Zunächst wurden die einzelnen Stammlösungen nach de Kreij et al. (2003), mit Veränderungen von Theresa Detering (Daten bis jetzt noch nicht veröffentlicht), vorbereitet. Hierfür wurde jeweils 1 L Stammlösung (A bis H) im Labor aus Chemikalien der Firma Roth (Deutschland) mit deionisiertem Wasser hergestellt (Tab. 2).

Tabelle 2: Zusammensetzung der Stammlösungen (STL) A bis H aus Chemikalien und deionisiertem Wasser für hydroponisch wachsende Pflanzen

	Chemikalien	Summenformel	STL [g/L]
A	Diammoniumhydrogenphosphat	$(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$	21
B	Kalziumnitratettrahydrat	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$	490
C	Kaliumnitrat	KNO_3	271
D	Kaliumsulfat	K_2SO_4	60
E	Kaliumdihydrogenphosphat	KH_2PO_4	90
F	Magnesiumsulfatheptahydrat	$\text{MgSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$	170
G	Calciumchloriddihydrat	$\text{CaCl}_2 \times 2 \text{H}_2\text{O}$	21.5
	Kaliumchlorid	KCl	10
H	Eisen(III)-Natriumethylendiamintetraacetat	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{FeN}_2\text{NaO}_8$	5.3
	Mangansulfatmonohydrat	$\text{MnSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$	1.9
	Zinksulfat-7-hydrat	$\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	1.3
	Kupfersulfatpentahydrat	$\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$	0.25
	Ammoniumheptamolybdäntetrahydrat	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \times 4\text{H}_2\text{O}$	0.09
	Borsäure	H_3BO_4	2.9

Zur Herstellung der Nährlösung wurden die Fässer mit 60 L deionisiertem Wasser gefüllt und jeweils 40,72 mL jeder Stammlösung dazu pipettiert. Die Nährlösung wurde anschließend durch die Systeme gepumpt und im Fass das fehlende Volumen durch deionisiertes Wasser aufgefüllt. Das Gesamtvolumen im System betrug 101,4 L und die Nährlösung jedes Systems enthielt die in Tab. 3 dargestellten Konzentrationen der einzelnen Nährstoffe.

Tabelle 3: Mengen der einzelnen Nährstoffe [mg/L] in einer auf 40 % verdünnten Nährlösung, die für hydroponisch wachsende Pflanzen aus acht Stammlösungen und deionisiertem Wasser hergestellt wurde.

Nährstoff	40 % Nährlösung [mg/L]
N aus NO ₃	38,28
N aus NH ₄	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

Mit täglichen Messungen der pH- und EC-Werte (pH-Messgerät, WTW, Deutschland) wurde die Nährlösung überprüft. Der EC-Wert gibt an, wie gut eine Flüssigkeit elektrischen Strom leitet und kann somit Rückschlüsse auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen geben (Klaassen, 2012). Mit dem Technicon Autoanalyser II (Seal Analytical) wurde der Ammoniumgehalt in den hydroponischen Systemen geprüft. Bei einem Wert von unter 5 % wurden die Nährlösungen am 29.11.2022 und 04.12.2022 in allen Systemen erneuert. Am 08.12.2022 betrug die Ammoniumkonzentrationen in den Systemen ebenfalls geringere Werte. Die Nährlösungen wurden nicht mehr erneuert, da die Pflanzen zwei Tage später geerntet wurden. Die Nährlösung wurde am 15.11.2022 in allen drei hydroponischen Systemen erneuert, nachdem sich im System der zweiten Behandlung ein Schlauch gelöst und es leer gepumpt hatte.

Der optimale pH-Wert in hydroponischen Systemen liegt zwischen 5,5 und 6,5. In diesem Bereich liegen die meisten Nährstoffe pflanzenverfügbar vor (Singh & Dunn, 2016). Bei jedem Wechsel der Nährlösung wurde der pH-Wert mit Salzsäure (3 mol/L) oder Natriumhydroxidlösung (1 mol/L) eingestellt und wöchentlich nachjustiert.

3.1.3 Pflanzenmaterial

Es wurden die zwei Tomatensorten Saluoso (SA) und Sweeterno (SW) (Rijk Zwaan Welver GmbH, Niederlande) verwendet. Die Pflanzen wurden am 30.09.2022 für diesen und weitere Versuche vorgekeimt und anschließend in Sand gepflanzt. Am 08.11.2022 wurden für das Experiment jeweils drei SA und drei SW für jede Behandlung eingesetzt. Hierfür wurden die Wurzeln der Tomaten ausgewaschen, mit Ceaprenstopfen (36 mm, Greiner Bio-One GmbH, Deutschland) versehen und in die Deckel der Kisten gesetzt. Die Pflanzen wurden randomisiert angeordnet, um systematische Fehler zu vermeiden (Abb. 4).

Die Pflanzen innerhalb einer Sorte wurden homogen gewählt. Zwischen Saluoso und Sweeterno gab es beim Einsetzen Unterschiede in der Größe. Die Pflanzen der Sorte Saluoso waren mit durchschnittlich 7,1 cm etwa halb so hoch wie die der Sweeterno-Pflanzen mit 16,3 cm und hatten ein Blatt weniger.

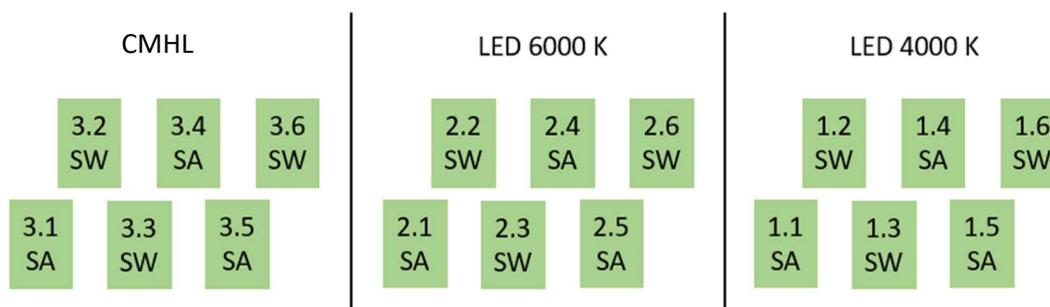


Abbildung 4: Randomisiertes Schema der Pflanzenverteilung in den Behandlungen mit LED 4000K, LED 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL), der Sorten Saluoso (SA) und Sweeterno (SW)

3.2 Versuchsbedingungen

Temperaturbedingungen können einen direkten Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen haben. Daher wurde zwischen Tag 2 und Tag 28 nach der Transplantation die Temperatur mit den Tinytag Plus 2 TGP-4500 (Gemini Data Loggers, Großbritannien) aufgenommen, die die Umgebungstemperatur in einem Abstand von 10 Minuten erfassen. Hieraus wurde der stündliche Temperaturverlauf im Tagesgang in jeder Behandlung ermittelt (Abb. 5).

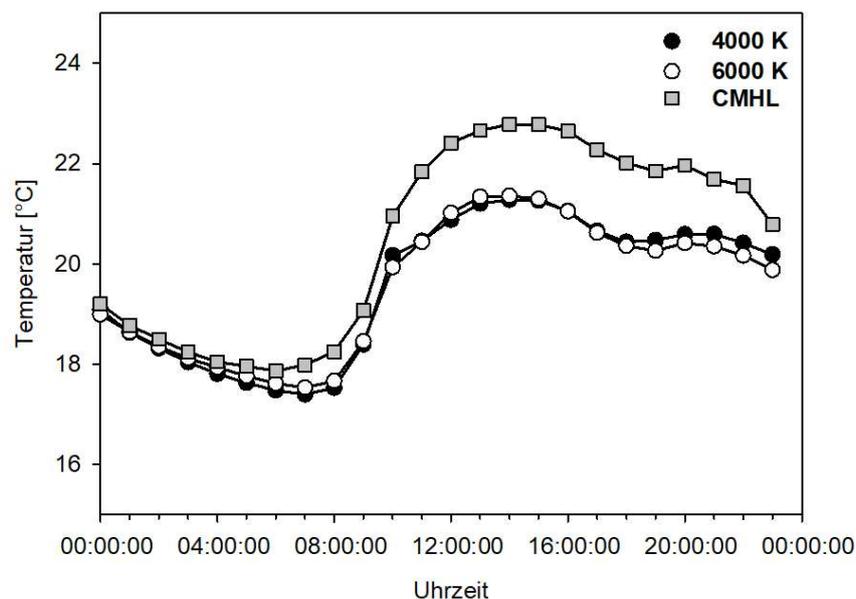


Abbildung 5: Durchschnittliche Temperatur [°C] im Tagesverlauf auf Boxenhöhe in den drei Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 6000 K (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (□), mit Beleuchtung zwischen 9:30 Uhr und 23:30 Uhr.

3.3 Probenahmen und Ernte

Die täglichen Messungen fanden zwischen 10:00 Uhr und 11:30 Uhr statt. Es wurden die Pflanzhöhe und Blattzahl sowie der SPAD (SPAD-502 Plus, Konica Minolta, Japan) jeder Pflanze aufgenommen. Des Weiteren wurden die PAR-Werte in 50 cm Höhe über den Boxen und auf der Höhe der jeweils größten Pflanze in den Behandlungen gemessen. Ab Tag 22 nach der Transplantation wurde der PAR-Wert zusätzlich auf den Boxen bestimmt. Alle drei Tage wurde der Sauerstoffgehalt in den Pflanzenboxen überprüft.

Am 09.12.2022, 30 Tage nach der Transplantation, wurden die Tomatenpflanzen geerntet. Hierbei wurden die Blattlängen aller vollentwickelten Blätter mit und ohne Blattstiel (Petiole) gemessen, sowie die Sprosslänge und -dicke erfasst. Die Blättchen (leaflets) wurden von der Rachis und den Petiolulen getrennt und mit dem Blattflächenmessgerät (LI-3100 C Area Meter, LI-COR, USA) erfasst. Für das Bestimmen der Trockengewichte wurden die Pflanzenteile (Petiole, Rachis + Petiolulen, Blättchen, Spross und Wurzel) separat verpackt und bei einer Temperatur von 65°C für 48 Stunden im Trockenschrank getrocknet.

Die Nährstoffaufnahmearten der Tomatenpflanzen wurden anhand der prozentualen Abnahme des ursprünglichen Nährstoffgehalts in der Lösung pro Tag ermittelt. Dazu

wurden täglich jeweils 20 ml Nährstofflösung aus den Mix-Boxen entnommen. Zur Messung von Nitrat, Ammonium und Phosphat wurde von jeder Nährstoffprobe 1 mL Lösung mit 1 mL deionisiertem Wasser verdünnt und anschließend im Technicon Autoanalyser II (Seal Analytical) ausgewertet. An den Tagen 7, 21 und 26 nach der Transplantation wurden die Nährstofflösungen in allen hydroponischen Systemen erneuert, wobei stets die gleiche Konzentration verwendet wurde.

Um die Evapotranspiration in den Behandlungen zu ermitteln, wurden täglich die Wasserverluste gemessen, indem die Menge an deionisiertem Wasser vermerkt wurde, mit der die Fässer der hydroponischen Systeme bis zum Maximum aufgefüllt wurden.

3.4 Statistische Auswertung

Die Daten wurden in Microsoft Excel 365 erfasst und ausgewertet. Dafür wurden die Mittelwerte der Daten berechnet und mit einem zweiseitigen t-Test auf signifikante Unterschiede untersucht. Die Graphen wurden mit SigmaPlot Version 12.5 (Systat Software GmbH) erstellt. Sie enthalten die Mittelwerte und Fehlerindikatoren ($SE=STAB/\sqrt{3}$) und sind mit den Buchstaben a - d als Zeichen signifikanter Unterschiede ($p\leq 0,05$) gekennzeichnet.

4 Ergebnisse

Zunächst werden die Auswirkungen der drei Lampentypen auf die Morphologie und die Trockengewichte dargestellt. Da jede der drei Behandlungen nur einmal vorhanden war, wurden die drei Pflanzen der Sorten Saluoso und Sweeterno in einem hydroponischen System einer Behandlung als individuelle Wiederholung betrachtet.

4.1 Morphologische Auswirkungen

In Abb. 6 ist die mittlere Sprosslänge, die nach der Ernte der Tomatenpflanzen erfasst wurde, dargestellt. Die Pflanzen der Sorte Sweeterno bildeten unter den Keramik-Dampflampen mit einem Durchschnitt von 88,3 cm die längsten Sprosse. Bei der Beleuchtung durch die LEDs mit 4000 K wurden die Sprosse im Mittel 68 cm und bei jenen mit 6000 K 64,3 cm hoch. Auch die Saluosopflanzen waren bei der Behandlung mit den Keramik-Dampflampen mit 65,5 cm länger als die der Pflanzen unter den LEDs. Bei der Behandlung mit LEDs wurden die Sprosse 56 cm (4000 K) bzw. 55 cm (6000 K) hoch. Beide Sorten waren unter den Keramik-Dampflampen signifikant höher als die Pflanzen aus den beiden Behandlungen mit LEDs. Dies war der einzige signifikante Unterschied, der in der Morphologie der Pflanzen zwischen den verschiedenen Behandlungen gefunden werden konnte.

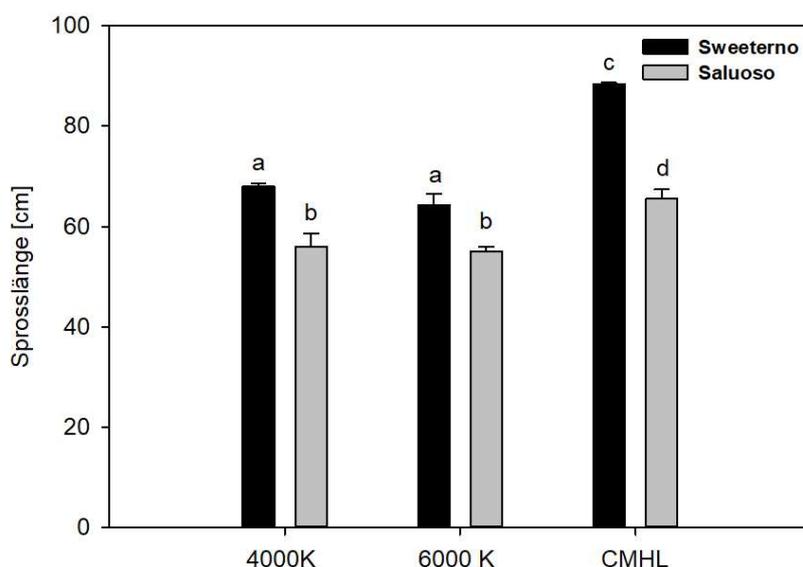


Abbildung 6: Sprosslänge [cm] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten ($n=3$) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie zwischen den Beleuchtungen 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. 7). Es zeigte sich nur ein signifikanter Unterschied zwischen den zwei Sorten. Der Mittelwert der Blattlänge der Sorte Sweeterno betrug unter den LEDs mit 4000 K 35 cm, unter denen mit 6000 K 34,4 cm und unter den Keramik-Dampflampen 35,8 cm. Dabei zeigte sich, dass die Blätter der Saluoso im Durchschnitt mit 29,6 cm (LED 4000 K), 30,6 cm (LED 6000 K) und 31 cm (CMHL) deutlich kürzer waren.

Die Daten der Gesamtfläche der Blätter zeigten ähnliche Resultate (Abb. 8). Für die Sorte Sweeterno betrug der Mittelwert der Blattfläche der Pflanzen, die unter den LEDs mit 4000 K wuchsen, 6533 cm² und bei denen mit 6000 K 5829 cm². Tomatenpflanzen, die unter den Keramik-Dampflampen wuchsen, hatten eine durchschnittliche Blattfläche von 6932 cm². Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei verschiedenen Beleuchtungen. Die beiden Sorten sind allerdings signifikant verschieden. Saluosopflanzen hatten bei der Behandlung mit LEDs mit 4000 K im Mittel 3236 cm² Blattfläche, mit 6000 K 3771 cm² und unter Keramik-Dampflampen 4379 cm².

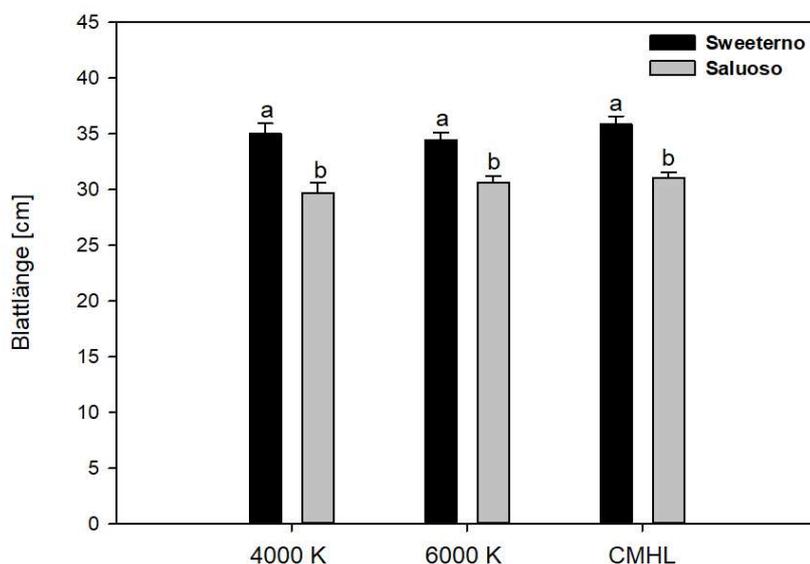


Abbildung 7: Blattlängen [cm] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten (n=3) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie zwischen den Beleuchtungen überprüft. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

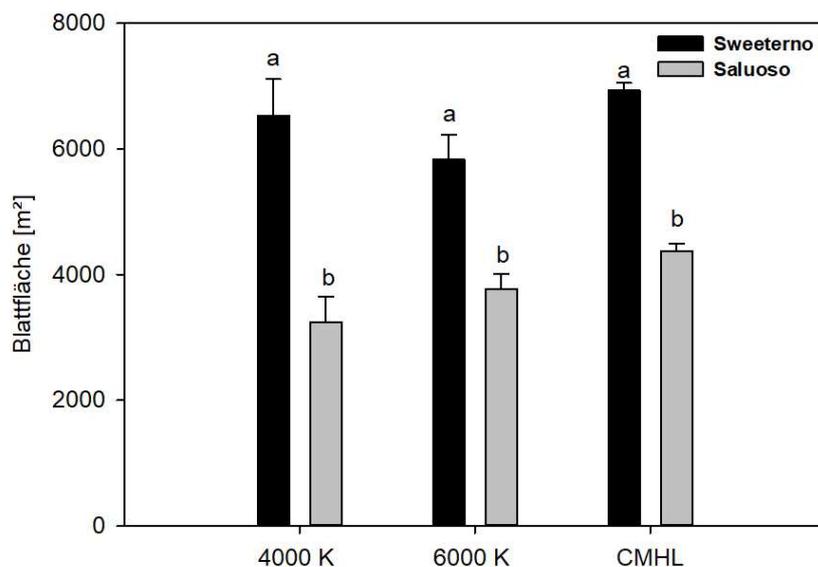


Abbildung 8: Blattflächen [cm²] der Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit Farbtemperatur 4000 K und 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten (n=3) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie zwischen den Beleuchtungen überprüft. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

4.2 Unterschiede bei den Trockengewichten

In Abb. 9 werden die Trockengewichte der Sprosse (A) und Wurzeln (B) dargestellt. Für die mittlere Trockenmasse der Sweeterno-Sprosse ergab sich für die Pflanzen unter den LEDs mit 4000 K 6,1 g und denen mit 6000 K 5,8 g. Unter den Keramik-Dampflampen hatten sie die höchste durchschnittliche Trockenmasse mit 8,9 g. Dennoch konnte nur ein signifikanter Unterschied zwischen den zwei Sorten festgestellt werden. Die Gewichte der Saluoso-Sprosse betragen 2,9 g bei der Behandlung mit 4000 K LEDs, 3,3 g bei der mit 6000 K LEDs und 4,1 g bei den Keramik-Dampflampen. Die unterschiedlichen Behandlungen waren nicht signifikant verschieden.

Die Wurzel trockenmasse einer Sweeterno-Pflanze die unter den 4000 K LEDs wuchs, lag im Durchschnitt bei 5 g und unter den LEDs mit 6000 K bei 4,6 g. Der Mittelwert bei der Behandlung mit den Keramik-Dampflampen betrug 5,7 g. Die Sorte Sweeterno war zu Saluoso signifikant verschieden. Ihre Wurzelmasse betrug 2,5 g bei der Behandlung mit 4000 K LEDs, 2,8 g bei der mit 6000 K LEDs und 3,1 g bei der Behandlung mit Keramik-Dampflampen. Zwischen den Behandlungen wurde bei den durchschnittlichen Trockengewichten der Wurzeln kein signifikanter Unterschied festgestellt.

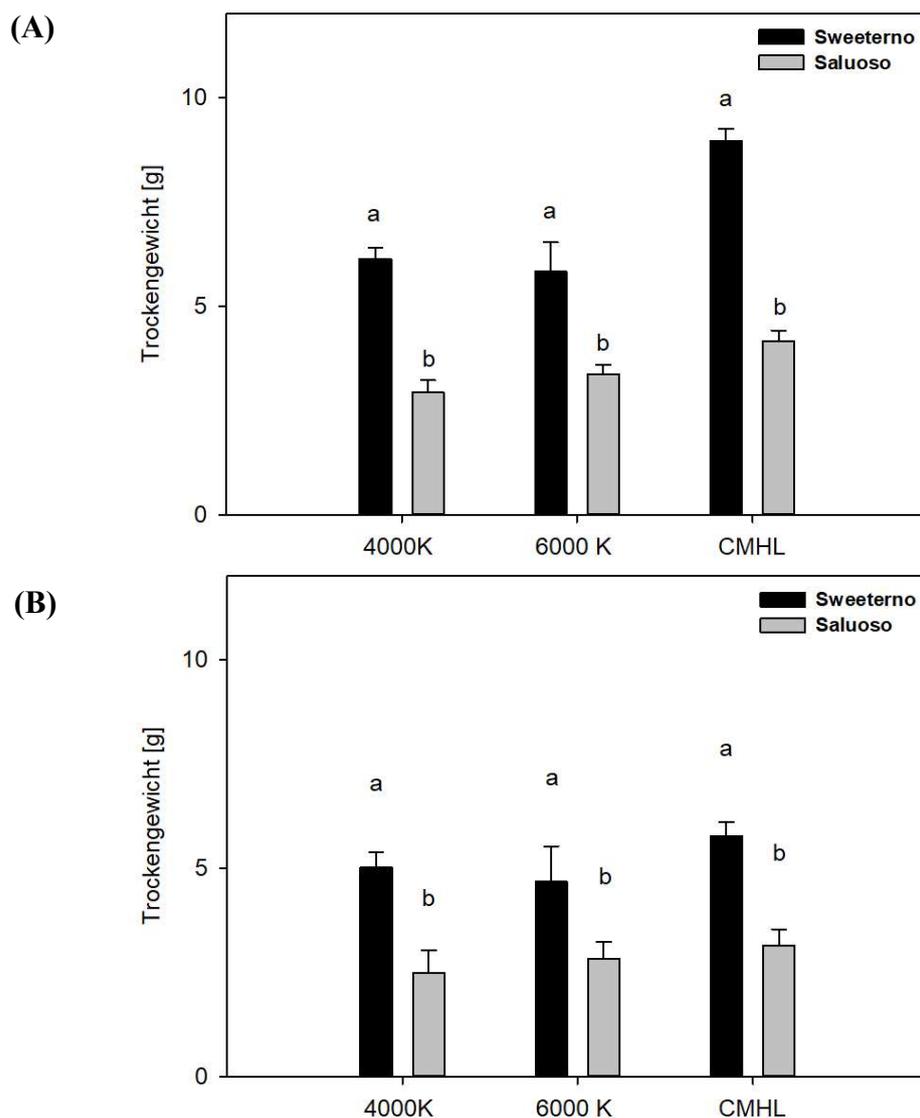


Abbildung 9: Trockengewichte [g] der Sprosse (A) und der Wurzeln (B) von den Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit 4000 K und 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten ($n=3$) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie zwischen den Beleuchtungen überprüft. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Bei den Trockengewichten der gesamten Blattmasse (Abb. 10 (A)) ist der durchschnittliche Wert mit 31 g bei den Sweeterno-Pflanzen aus der Behandlung mit Keramik-Dampflampen leicht höher als bei den Behandlungen mit LEDs mit 26 g (4000 K) und 24 g (6000 K). Die Blatttrockenmasse der Saluosopflanzen betrug im Mittel 10 g bei denen, die unter den LEDs mit 4000 K wuchsen, 12 g bei denen unter den 6000 K LEDs und 14 g unter den Keramik-Dampflampen. Die Sorten Saluoso und Sweeterno waren zueinander signifikant verschieden, die unterschiedlichen Behandlungen jedoch nicht.

In Abb. 10 (B) sind die Mittelwerte der Trockengewichte der gesamten Pflanzen abgebildet. Die Werte betragen bei den Sweeternopflanzen bei der Behandlung mit 4000 K LEDs 37 g, bei der mit 6000 K LEDs 34 g und bei der mit Keramik-Dampflampen 45 g. Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen Beleuchtungen, nur zwischen den beiden Sorten. Die Trockenmasse der Saluosopflanzen betrug in allen Behandlungen etwa die Hälfte des Gewichts der Sweeternopflanzen. Für die Sorte Saluoso betrug der Mittelwert der Pflanzentrockenmasse 16 g bei der Behandlung mit 4000 K LEDs, 18 g bei der mit 6000 K LEDs und 21 g bei der mit Keramik-Dampflampen.

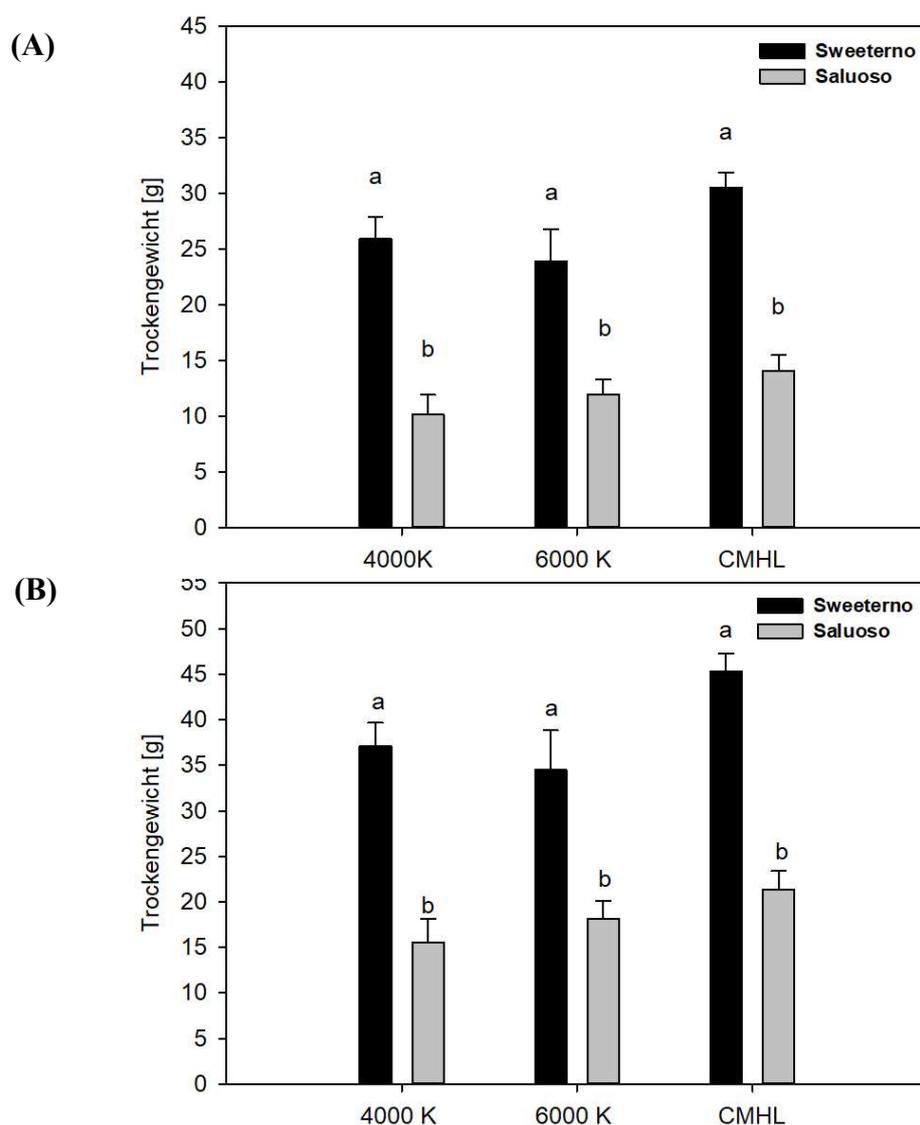


Abbildung 10: Trockengewichte [g] der gesamten Blattmasse (A) und der gesamten Pflanze (B) von den Tomatensorten Sweeterno (schwarz) und Saluoso (grau) unter Beleuchtung durch LEDs mit Farbtemperatur 4000 K und 6000 K und Keramik-Dampflampen (CMHL). Die Ergebnisse entsprechen den Mittelwerten ($n=3$) + Standardfehler. Die Signifikanz wurde mit einem zweiseitigen t-Test zwischen den Sorten, sowie zwischen den Beleuchtungen überprüft. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

4.3 Auswirkungen auf Evapotranspiration und Nährstoffaufnahme

Im folgenden Abschnitt werden die kumulierte Evapotranspiration sowie die Ammonium-, Nitrat- und Phosphataufnahme der Tomatenpflanzen in den Behandlungen dargestellt. Die Nährstoffaufnahme wurde dabei durch die prozentuale Abnahme des ursprünglichen Nährstoffgehalts in der Lösung pro Tag abgebildet. Nach dem Wechseln der Nährstofflösung an den Tagen 7, 21 und 26 nach der Transplantation wurde jedes Mal von 100 % Nährstoffen in der Lösung ausgegangen, um die Berechnung und Darstellung zu vereinfachen.

In Abb. 11 ist zu erkennen, dass die Aufnahme von Ammonium durch die Pflanzen in den ersten Tagen nach der Transplantation langsamer stattfand. An Tag 7 des Versuchs verblieben bei der Behandlung mit LEDs (4000 K) 40 % des Ammoniums (NH_4^+) im hydroponischen System. Die Pflanzen unter den LEDs mit 6000 K entnahmen der Nährlösung mit 63 % Rückstand am wenigsten und bei der Behandlung mit Keramik-Dampflampen verblieben 49 %. Nach dem ersten Wechsel der Nährstofflösung nahm der NH_4^+ -Wert zunächst konstant ab und verblieb ab Tag 14 bei allen Behandlungen zwischen 20 und 30 %. Jeweils nach den letzten beiden Lösungswechseln wurde bereits am ersten Tag das meiste NH_4^+ aus der Lösung aufgenommen. Von Tag 21 auf 22 verblieben somit 53 % im System mit der 4000 K LED Behandlung, 74 % in dem mit der 6000 K LED Behandlung und 47 % bei der Behandlung mit Keramik-Dampflampen. Die Werte der Behandlung mit den 6000 K LEDs glichen sich in den folgenden Tagen an die Kurven der beiden anderen Behandlungen an und der Ammoniumgehalt sank bis Tag 26 nach der Transplantation bei allen drei Behandlungen auf etwa 26 %. Nach dem letzten Wechsel der Nährstofflösung verblieb bereits nach dem ersten Tag bei allen Behandlungen ein Rest von 20 bis 30 % in den Systemen, der bis zum Tag der Ernte auf 10 bis 14 % absank.

Es gab geringe Unterschiede zwischen der Behandlung mit 6000 K LEDs und den anderen beiden Behandlungen. Jedoch zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der Aufnahme von Ammonium zwischen den drei Behandlungen.

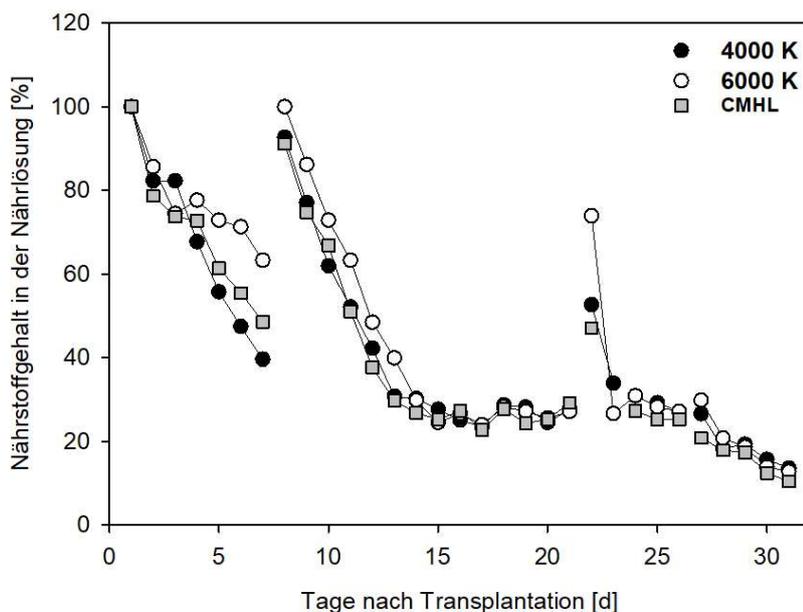


Abbildung 11: Tägliche Nährstoffgehalte [%] von Ammonium (NH_4^+) in den hydroponischen Systemen unter der Beleuchtung mit LED 4000 K (●), LED 6000 K (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (□). Für eine vereinfachte Berechnung und Darstellung wurde nach jedem Wechsel der Nährlösungen von 100% Nährstoffen in der Lösung ausgegangen. Für den Versuch wurde jedoch eine 40 %ige Nährstofflösung verwendet.

Bei Nitrat (NO_3^-) (Abb. 12) ging die Aufnahme in den ersten Tagen ebenfalls langsamer vonstatten. Bis zu Tag 7 schwankten die Werte mit einigen Ausreißern stark. Die in der Nährlösung verbliebenen Gehalte betragen an Tag 7 nach der Transplantation 95 % bei der Behandlung mit den 4000 K LEDs und 98 % bei denen mit 6000 K. Die niedrigsten Gehalte mit 87 % verblieben bei der Behandlung mit Keramik-Dampflampen. Nach dem ersten Lösungswechsel nahmen die Gehalte weitestgehend konstant ab. An Tag 21 nach der Transplantation verblieben 29 % des Nitrats bei der Behandlung mit 4000 K LEDs, 34 % bei der mit 6000 K LEDs und 20 % bei der Behandlung mit Keramik-Dampflampen. Nach dem zweiten Austausch der Nährstofflösung sank der Gehalt innerhalb eines Tages bei der Behandlung mit LEDs mit 4000 K auf 92 % und bei den Keramik-Dampflampen auf 53 %. Der Wert aus der Behandlung mit den 6000 K LEDs wurde als Ausreißer entfernt. Bis zu Tag 26 verringerten sich bei allen drei Behandlungen die Nitrat-Werte auf etwa 10 bis 18 %. Am Tag nach dem dritten Wechsel der Nährlösung betrug der NO_3^- -Wert bei allen Behandlungen bereits unter 40 % und sank bis zum Tag der Ernte auf etwa 3 % ab.

Es ist zu erkennen, dass die Pflanzen unter den Keramik-Dampflampen der Nährstofflösung vor allem in den ersten Tagen nach der Transplantation mehr Nitrat entzogen haben. Die Unterschiede, betrachtet auf den gesamten Zeitraum, waren zwischen den Behandlungen jedoch nicht signifikant.

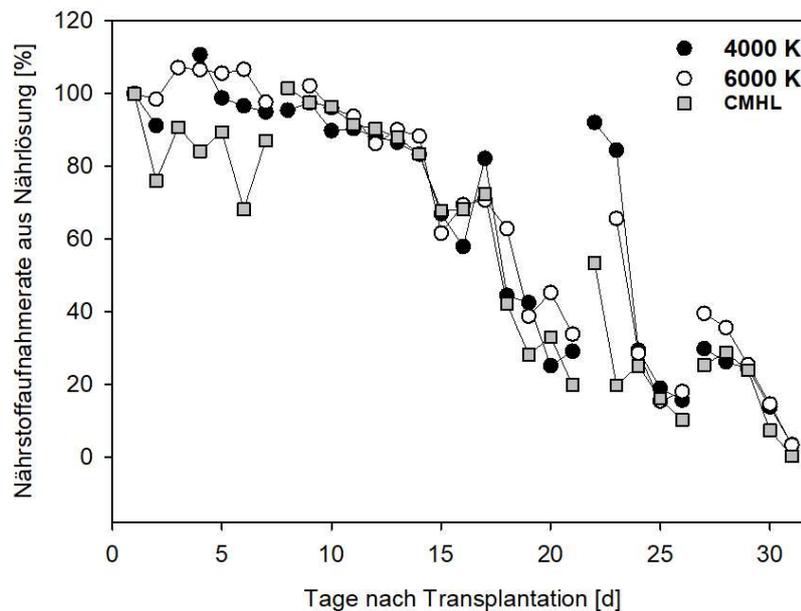


Abbildung 12: Tägliche Nährstoffgehalte [%] von Nitrat (NO_3^-) in den hydroponischen Systemen unter der Beleuchtung mit LED 4000 K (●), LED 6000 K (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (□). Für eine vereinfachte Berechnung und Darstellung wurde nach jedem Wechsel der Nährlösungen von 100% Nährstoffen in der Lösung ausgegangen. Für den Versuch wurde jedoch immer eine 40 %ige Nährstofflösung verwendet.

Bei den Daten der Messungen zur täglichen Aufnahme von Phosphat (Abb. 13) gab es einige Ausreißer, vor allem zu Beginn des Versuches. Daher sind diese Ergebnisse nur eingeschränkt aussagekräftig.

Bis zu Tag 7 verblieben in der Nährlösung 97 % des Phosphats (PO_4^{3-}) bei der Behandlung mit 4000 K LEDs, 99 % bei der mit 6000 K LEDs und 81 % bei der Behandlung mit Keramikdampflampen. Nach dem Wechsel der Nährstofflösung sank der PO_4^{3-} -Gehalt zunächst konstant und nach Tag 15 mit einigen Ausreißern ab. An Tag 21 war der Phosphatgehalt mit 43 % bei der Behandlung mit Keramik-Dampflampen am geringsten. Bei den beiden Behandlungen mit LEDs verblieb ein Rest von etwa 53 % in der Lösung. Nach dem zweiten Wechsel der Nährstofflösung verblieben nach fünf Tagen etwa 20 % PO_4^{3-} bei den Behandlungen mit den 4000 K LEDs und den Keramik-Dampflampen. Bei der Behandlung mit den 6000 K LEDs verblieben hingegen 32 %. Am Tag nach dem

letzten Auswechseln der Nährstofflösung sanken die Gehalte bei den Behandlungen mit den 4000 K LEDs und den Keramik-Dampflampen auf etwa 23 % und bei der Behandlung mit 6000 K LEDs auf 42 %. Bis zum letzten Versuchstag sanken die Gehalte der beiden Behandlungen mit LEDs auf 21 %. Bei der Behandlung mit Keramik-Dampflampen verblieb der niedrigste Gehalt in der Nährstofflösung mit 12 %.

Es wurde kein signifikanter Unterschied in der Phosphataufnahme zwischen den Behandlungen festgestellt.

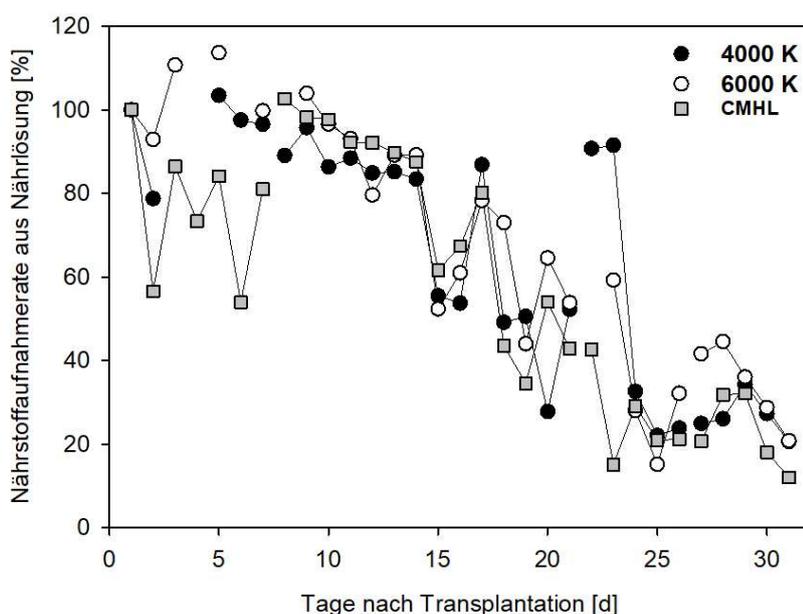


Abbildung 13: Tägliche Nährstoffgehalte [%] von Phosphat (PO_4^{3-}) in den hydroponischen Systemen unter der Beleuchtung mit LED 4000 K (●), LED 6000 K (○) und Keramik-Dampflampen (CMHL) (□). Für eine vereinfachte Berechnung und Darstellung wurde nach jedem Wechsel der Nährlösungen von 100% Nährstoffen in der Lösung ausgegangen. Für den Versuch wurde jedoch immer eine 40 %ige Nährstofflösung verwendet.

Die kumulierte Evapotranspiration (Abb. 14) wurde über die täglich gemessenen Wasserverluste aus den Vorratsfässern berechnet. Die Werte an den Tagen nach dem Wechseln der Nährstofflösung wurden entfernt, um mögliche Abweichungen durch das Befüllen der Fässer auszuschließen.

Bis zu Tag 14 wurde in allen Behandlungen im Durchschnitt 300 mL pro Tag evapotranspiriert. Die Werte für die kumulierte Evapotranspiration betrug an Tag 14 nach der Transplantation 4,3 L bei den LED-Behandlungen und 4,4 L bei der Behandlung mit Keramik-Dampflampen. Bis Tag 21 nahm die tägliche Evapotranspiration bei allen

Behandlungen gleichmäßig zu. Ab Tag 23 nach der Transplantation zeigten sich bei der Behandlung mit Keramik-Dampflampen höhere Werte als bei den beiden Behandlungen mit LEDs. Obwohl es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Behandlungen gab, wurden in der Behandlung mit CMHL über den gesamten Zeitraum des Versuchs 9 L mehr evapotranspiriert als in den Behandlungen mit LEDs.

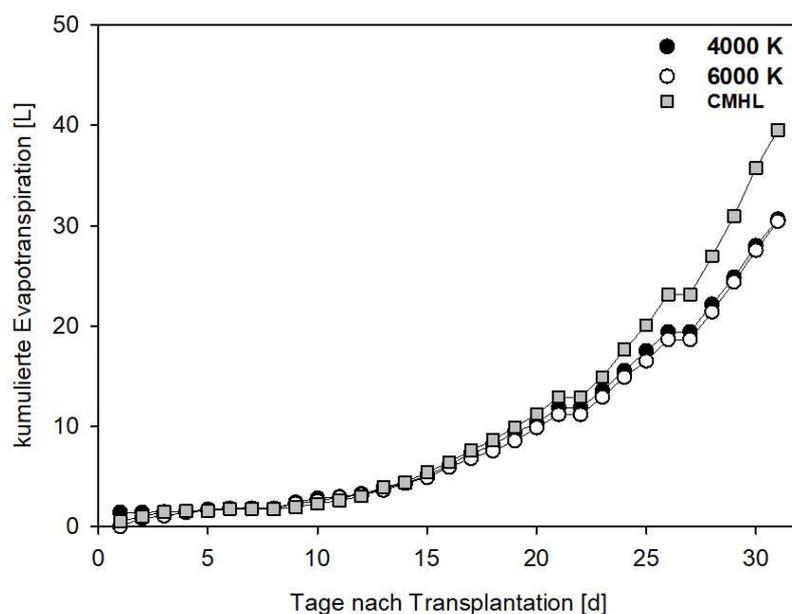


Abbildung 14: Kumulierte Evapotranspiration von Tomatenpflanzen in den Behandlungen mit LED 4000 K (●), LED 6000 K (○), Keramik-Dampflampe (CMHL) (□), durch Berechnung über die gemessenen Wasserverluste aus den hydroponischen Systemen, mit entfernten Werten an Tag 8, 22 und 27 nach der Transplantation.

5 Diskussion

LEDs wandeln elektrische Energie effektiv in Licht um und haben eine geringe radiale Wärmestrahlung (Nederhoff, 2010). Das macht sie in Gewächshäusern zu einer energiesparenden, flexiblen Alternative zu Keramik-Halogendampflampen, die aufgrund ihres sonnenähnlichen Lichtspektrums häufig bevorzugt werden.

Um zu evaluieren, ob LEDs die Keramik-Dampflampen in zukünftigen Versuchen des Hypowave+ Projekts ersetzen können, wurde in der vorliegenden Arbeit der Einfluss von drei verschiedenen Pflanzenleuchten auf zwei hydroponisch wachsende Tomatensorten untersucht. Als Leuchtmittel wurden zwei LEDs mit der Lichtfarbe 4000 K bzw. 6000 K mit Keramik-Dampflampen verglichen. Um den Einfluss der Beleuchtung auf die Tomatenpflanzen systematisch auszuwerten, wurden die Nährstoffaufnahmeleistungen von Nitrat, Ammonium und Phosphat untersucht sowie morphologische Merkmale und Trockenmassen verglichen.

5.1 Einfluss der Pflanzenleuchten auf Morphologie und Trockenmasse

Bei den morphologischen Merkmalen, die in dieser Arbeit betrachtet wurden, gab es über alle Behandlungen hinweg signifikante Unterschiede zwischen den zwei verwendeten Sorten Sweeterno und Saluoso. Die Spross- und Blattlänge, die gesamte Blattfläche sowie die Trockengewichte der Tomatenpflanzen der Sorte Saluoso waren bei allen Behandlungen geringer als die der Sorte Sweeterno. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass bereits beim Einsetzen in die hydroponischen Systeme ein Unterschied zwischen den Sorten bestand. Die Sweeterno Pflanzen waren deutlich höher und hatten eine größere Assimilationsfläche. Dies führte im Verlauf des Versuchs auch dazu, dass die Saluoso Pflanzen stärker verschattet wurden. Das Sortenmerkmal der Sweeterno, über eine sehr starke Wuchskraft zu verfügen (Rijk Zwaan Welter, 2023), könnte die Wachstumsunterschiede zusätzlich verstärkt haben.

Bei der Länge der Sprosse zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Pflanzen unter den Keramik-Dampflampen (CMHL) und denen unter LEDs. Die Sorte Sweeterno wuchs unter den CMHL im Durchschnitt 20 cm höher und die Tomatenpflanzen der Sorte Saluoso wurden etwa 10 cm höher als die bei den beiden Behandlungen mit LEDs. Abb. 15 zeigt das Erscheinungsbild von je einer Tomatenpflanze der Sorte Sweeterno aus jeder Behandlung. Es ist deutlich erkennbar, dass die Tomaten unter den LEDs kompakter

als die Pflanze unter den Keramik-Dampflampen wuchsen, welche schmal und gestreckt war.



Abbildung 15: Morphologischer Vergleich hydroponisch wachsender Tomaten der Sorte Sweeterno unter drei verschiedenen Lichtquellen nach 31 Tagen. (Bilder sind nicht im exakt gleichen Maßstab) (A) LED 4000 K, 1.2, 69 cm. (B) LED 6000 K, 2.2, 60cm. (C) Keramik-Dampflampen, 3.2, 88 cm

Die Morphologie von Pflanzen kann durch verschiedene Lichtsignale, das heißt unterschiedliche Wellenlängen beeinflusst werden. Die beiden verwendeten LEDs haben eine hohe Intensität an blauem Licht (Abb. 2), das neben dem Signal für Phototropismus auch ein gehemmtes Sprosswachstum induzieren kann und so ein stabiles Wachstum der Pflanzen begünstigt (Heldt & Piechulla, 2015).

Die Streckung einer Pflanze hingegen kann ein Hinweis auf Lichtmangel sein. Tomatenpflanzen unter geringer Lichtintensität wurden laut Fan et al. (2013) signifikant höher. Dies kann in der vorliegenden Arbeit allerdings ausgeschlossen werden, da sonst die Biomasse stark reduziert wäre (Fan et al., 2013) und bei den Ergebnissen der Trockengewichte kein signifikanter Unterschied zwischen den Behandlungen festgestellt werden konnte (Abb. 9 & 10).

Lichtmangel wird von Pflanzen durch ein hohes Verhältnis von fernem Rot (700-780 nm) zu rotem Licht (650 nm) identifiziert und fördert so das Längenwachstum (Park & Runkle, 2017). Kalaitzoglou et al. (2019) zeigte dies in einem Versuch mit Tomaten. Wuchsen die Pflanzen unter einer Lichtquelle mit einer hohen Intensität an fernem roten Licht,

verlängerte sich ihre Sprossachse und die Blattfläche vergrößerte sich, wodurch auch der Ertrag gesteigert werden konnte. Im vorliegenden Versuch zeigten sich jedoch weder in der Blattlänge noch in der Gesamtfläche der Blätter signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen.

Die CMHL haben neben dem breiten Rotspektrum eine besonders hohe Intensität an grünem Licht (Abb. 3), das energieärmer ist und nur zu einem geringen Anteil für die Photosynthese genutzt wird (Schopfer & Brennike, 2010). Laut einer Studie von Zhang et al. (2011) kann grünes Licht ebenfalls ein Schattensignal in Pflanzen auslösen. Kaiser et al. (2019) zeigte, dass die Biomasse und der Ertrag von Tomaten durch eine Lichtquelle mit hohem Grünanteil gesteigert werden können. Die Sprosslänge nahm tendenziell zu, eine vergrößerte Blattfläche konnte zwischen den Behandlungen nicht festgestellt werden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass sowohl das ferne Rot als auch der hohe Grünlichtanteil der CMHL (Abb. 3) ein Schattensignal bei den Pflanzen ausgelöst haben, auf welches die Tomaten mit einem erhöhten Streckenwachstum reagierten.

Obwohl die Sprosse der Pflanzen unter CMHL deutlich länger waren als die in den Behandlungen mit LEDs, zeigte sich kein Unterschied bei der durchschnittlichen Trockenmasse. Die Trockengewichte der einzelnen Pflanzenorgane sowie die der gesamten Pflanzen zeigten in dem Versuch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen.

In einem Experiment von Dyśko und Kaniszewski (2021) zeigten Tomatenpflanzen, die unter Natrium-Hochdrucklampen und rot-blauen LEDs wuchsen, ähnliche Ergebnisse wie in der vorliegenden Arbeit. Die Pflanzen, die unter Natrium-Hochdrucklampen wuchsen, wurden im Durchschnitt 1,1 cm höher. Allerdings wurden weder bei der Pflanzenhöhe noch bei der Trockenmasse zwischen den Behandlungen signifikante Unterschiede festgestellt. Die verwendeten Lichtquellen unterschieden sich von den Beleuchtungsmitteln für die vorliegende Arbeit, jedoch hatten sie vergleichbare Lichtqualitäten.

Für eine LED-Beleuchtung im Gewächshaus wird häufig eine Kombination aus roten und blauen LEDs genutzt, da blaues und rotes Licht die photosynthetisch aktivsten Wellenlängen sind (Schopfer & Brennike, 2010). Unter dem Aspekt, dass sowohl fernes rotes als auch grünes Licht Vorteile für das Pflanzenwachstum und den Ertrag bringen

kann, sollte dies bei LEDs weiter untersucht werden, um eine optimale Beleuchtung für Nutzpflanzen zu entwickeln.

Auch die Temperatur ist ein wichtiger Faktor für die Entwicklung von Tomatenpflanzen (Heuvelink & Dorais, 2005). In diesem Versuch kann ein Effekt der Temperatur auf das Wachstum der Tomaten ausgeschlossen werden, da die Temperaturen zwischen den Behandlungen nicht signifikant verschieden waren (Abb. 5).

5.2 Einfluss der Pflanzenleuchten auf die Nährstoffaufnahme

Die Lichtqualität beeinflusst nicht nur die Morphologie und die Entwicklung von Pflanzen, sondern auch ihre Fähigkeit, Nährstoffe aufzunehmen und zu assimilieren. Die Photosynthese stellt die Energie bereit, die für die Aufnahme und den Transport von Nährstoffen in der Pflanze benötigt wird. Bei hoher Lichtintensität oder einer Zuckerakkumulation in den Wurzeln wird die Stickstoffaufnahme gefördert (Delhon et al., 1996). Zudem können spezifische Lichtspektren hormonelle Reaktionen auslösen, die das Wurzelwachstum, die Aufnahme der Mineralien und die Nährstoffverteilung beeinflussen (de Wit et al., 2016). Eine optimale Lichtversorgung kann daher die Effizienz der Nährstoffaufnahme und -verarbeitung verbessern. Da in der vorliegenden Arbeit für die Aufnahme von Ammonium, Nitrat und Phosphat keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen festgestellt werden konnte, ist davon auszugehen, dass die LEDs eine ausreichende Lichtversorgung für die Tomatensorten darstellen.

Für die untersuchten Nährstoffe NH_4^+ , NO_3^- und PO_4^{3-} konnte ein einheitlicher Trend erkannt werden. Zu Beginn des Versuchs wurden bei allen Behandlungen nur langsam Nährstoffe aus der Lösung entnommen. Mit zunehmender Größe der Pflanzen wurden bereits in den ersten Tagen nach dem Wechseln der Nährlösung ein Großteil des Ammoniums, Nitrats und Phosphats aufgenommen. Anschließend nahmen die Werte in allen Behandlungen mit wenigen Ausreißern bei Nitrat und Phosphat weitestgehend konstant ab.

Stickstoff ist ein Bestandteil von Aminosäuren, Proteinen, Chlorophyll und Nukleinsäuren, während Phosphor als Energieträger und -speicher benötigt wird. Die zwei Makronährstoffe sind daher wesentliche Elemente für die Entwicklung einer Pflanze (Tripathi et al., 2014). Die Daten der Nährstoffaufnahmearten der drei Behandlungen stimmen mit den morphologischen Betrachtungen überein. Weder bei den

Nährstoffaufnahmeleistungen noch bei den Trockenmassen sowie der Blattlänge und -fläche der Tomatenpflanzen konnten signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen festgestellt werden.

Pinho et al. (2016) zeigte, dass Salatpflanzen unter blau-roten LEDs mit einem hohen Anteil an fernem roten Licht höhere Stickstoff- und Phosphorgehalte aufwiesen als die Pflanzen die unter Natrium-Hochdrucklampen wuchsen, die einen vergleichbar hohen Anteil an fernem Rot aufwiesen. Es ist davon auszugehen, dass LEDs die auf die Lichtbedürfnisse von Pflanzen angepasst wurden durch ihre geringe Intensität an grünem Licht eine bessere Lichtausbeute für die Pflanzen ermöglichen als Pflanzenlampen wie Natrium-Hochdrucklampen oder Keramik-Dampflampen.

Die gesamte kumulierte Evapotranspiration wies keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen auf. Daher ist davon auszugehen, dass die Lichtqualität und -quantität der LEDs keinen Einfluss auf die Evapotranspiration im Vergleich zu den Keramik-Dampflampen hatte.

5.3 Mögliche Optimierungen des Versuchs

Es muss berücksichtigt werden, dass für den Versuch jede Behandlung nur einmal vorhanden war und die drei Pflanzen einer Sorte in einer Behandlung je als Wiederholung angesehen wurden. Um eine höhere Aussagekraft zu generieren, wären zwei Wiederholungen für jede unterschiedliche Lichtquelle günstiger gewesen. Dies war im Rahmen dieser Bachelorarbeit aufgrund von Platz- und Zeitmangel nicht umsetzbar.

Neben der individuellen Beleuchtung der verschiedenen Lampen fiel in die Behandlungen auch Tageslicht von oben ein. Von der Vorderseite gab es eine zusätzliche Beleuchtung von Keramik-Dampflampen aus einem weiteren Versuch. Um die Effekte der unterschiedlichen Lampen wissenschaftlich quantifizieren zu können, wäre eine komplette Verdunkelung der Behandlungen oder zumindest eine zusätzliche Abschirmung der Vorderseite von Vorteil gewesen. Hier könnte allerdings die Wärmeerzeugung der Dampflampen die Ergebnisse beeinflussen und es müsste ein temperaturgeregeltes Kühlsystem in den Versuchsaufbau integriert werden.

Die Verdünnung der Nährstoffproben (1:1) für die Auswertungen von Ammonium, Nitrat und Phosphat im Autoanalyser, könnte zu ungenauen Werten geführt haben. Außerdem gab es an den Tagen nach dem Wechseln der Nährlösungen häufig Ausreißer in den Daten,

da sich die Nährlösung vermutlich noch nicht vollständig durchmischt hatte und akkumulierte Nährstoffe in den Proben vorhanden waren. Eine zweite Probenahme und eine mehrfache Auswertung der untersuchten Nährstoffe könnten genauere Ergebnisse liefern.

6 Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurde der Einfluss der Lichtqualität und -quantität von weißen LEDs im Vergleich zu Keramik-Dampflampen auf zwei hydroponisch wachsende Tomatensorten untersucht.

Die gesammelten Messdaten lieferten keine Hinweise darauf, dass die verwendeten LEDs, die Lichtanforderungen der untersuchten Tomatensorten nicht erfüllen. Die Lichtqualität und -quantität der unterschiedlichen Lampen hatte keinen Einfluss auf die Aufnahmearten von Ammonium, Nitrat und Phosphat sowie die Evapotranspiration. Zwischen den Behandlungen konnten bis auf die verlängerten Sprossachsen der Tomatenpflanzen, die unter Keramik-Dampflampen wuchsen, keine signifikanten Unterschiede im Wachstum und der Morphologie der Tomatenpflanzen gefunden werden. Das Lichtspektrum der Keramik-Dampflampen wirkte sich auf das Längenwachstum aus, nicht aber auf die Blattlänge und -fläche. Auch bei den Trockengewichten konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen festgestellt werden. Bei den Behandlungen mit LEDs wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den LEDs mit 4000 K und denen mit 6000 K festgestellt. Zwischen den Sorten Sweeterno und Saluoso gab es hingegen über alle Behandlungen hinweg signifikante Unterschiede im Wachstum. Die Tomatenpflanzen der Sorte Sweeterno wurden deutlich größer als die der Sorte Saluoso.

Da es keine Wiederholungen für die Behandlungen gab wäre es sinnvoll diesen Versuch so oder ähnlich erneut durchzuführen. Zudem wäre es interessant eine weitere Behandlung mit weißen LEDs zusammen mit einer Fernrot-Lichtquelle durchzuführen, um die Effekte von rotem und insbesondere fernem rotem Licht bei der Nutzung von LEDs näher zu untersuchen.

Aus diesem Versuch kann nicht geschlossen werden, dass die weißen LEDs die Keramik-Dampflampen in kommerziellen Gewächshäusern ersetzen können. Mit Blick auf den Klimawandel sind LEDs jedoch ein effizientes und energiesparendes Leuchtmittel, an dem für die optimale Beleuchtung in Gewächshäusern weiter geforscht werden sollte. Für weitere Versuche des HypoWave+ Projekts stellen die LEDs eine gute Alternative dar, da ihre Lichtqualität und -quantität für den Rahmen der Versuche ausreichen und sie kaum Wärme in den Bestand ausstrahlen.

Literaturverzeichnis

- Alexandratos, N. & J. Bruinsma. (2012). *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision*. ESA Working paper No. 12-03. Rome, FAO.
- Craford, M. G. (2000). Visible Light-Emitting Diodes: Past, Present, and Very Bright Future. *MRS Bulletin*, 25(10), 27–31. doi:10.1557/mrs2000.200
- Dallmann, M. (2019). *Energieeffiziente Assimilationsbelichtung* (1. Aufl.). Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Schriftenreihe, Heft 13/2019.
- De Kreijl, C., Voogt, W. & Baas, R. (2003). *Nutrient Solutions and Water Quality for Soilless Cultures* (191). Applied Plant Research - Division Glasshouse.
- Delhon, P., Gojon, A., Tillard, P., & Passama, L. (1996). Diurnal regulation of NO₃⁻ uptake in soybean plants IV. Dependence on current photosynthesis and sugar availability to the roots. *Journal of Experimental Botany*. 47(7), 893-900. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.7.893>
- Demers, D. A., Dorais, M., Wien, C. H., & Gosselin, A. (1998). Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants and fruit yields. *Scientia Horticulturae*, 74(4), 295-306. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00097-1)
- De Wit, M., Galvão, V. C., & Fankhauser, C. (2016). Light-Mediated Hormonal Regulation of Plant Growth and Development. *Annual Review of Plant Biology*, 67, 513–537. doi:10.1146/annurev-arplant-043015-112252
- DH Licht GmbH (2023). DH Licht Katalog 2023. DH Licht GmbH. <https://www.dhlicht.de/wp-content/uploads/2023/01/DHLicht-Katalog-2023.pdf>
- Dyśko, J., & Kaniszewski, S. (2021). Effects of LED and HPS lighting on the growth, seedling morphology and yield of greenhouse tomatoes and cucumbers. *Horticultural Science*, 48(1), 22-29. <https://doi.org/10.17221/4/2020-HORTSCI>
- Fan, X. X., Xu, Z. G., Liu, X. Y., Tang, C. M., Wang, L. W., & Han, X. L. (2013). Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia horticulturae*, 153, 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.01.017>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO (2022). The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0639en>
- Ganslandt, R., & Hofmann, H. (1992). *Handbuch der Lichtplanung*. Vieweg.
- Garnett, T., Appleby, M. C., Balmford, A., Bateman, I. J., Benton, T. G., Bloomer, P., Burlingame, B., Dawkins, M., Dolan, L., Fraser, D., Herrero, M., Hoffmann, I., Smith, P., Thornton, P. K., Toulmin, C., Vermeulen, S. J., & Godfray, H. C. J. (2013). Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies. *Science*, 341(6141), 33–34. doi:10.1126/science.1234485
- Heldt, W., & Piechulla, B. (2015). *Pflanzenbiochemie* (5. Aufl.). Springer Spektrum.

- Heuvelink, E., & Dorais, M. (2005). Crop Growth and Yield. In E. Heuvelink (Hrsg.), *Tomatoes (Crop Production Science in Horticulture 13)*. CABI Publishing. https://doi.org/10.1079/9780851993966.0000open_in_new
- Kaiser, E., Weerheim, K., Schipper, R., & Dieleman, J. A. (2019). Partial replacement of red and blue by green light increases biomass and yield in tomato. *Scientia Horticulturae*, 249, 271–279. doi:10.1016/j.scienta.2019.02.005
- Kalaitzoglou, P., van Ieperen, W., Harbinson, J., van der Meer, M., Martinakos, S., Weerheim, K., Nicole, C. C. S., & Marcelis, L. F. M. (2019). Effects of Continuous or End-of-Day Far-Red Light on Tomato Plant Growth, Morphology, Light Absorption, and Fruit Production. *Frontiers in Plant Science*. 10, 322. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00322>
- Klaassen, P. (2012). Electrical Conductivity, why it matters. CANNA. <https://www.canna-uk.com/electrical-conductivity>
- Lattauschke, G. (2020). Nachtschattengewächse – Solanaceae. In H. Laber & G. Lattauschke (Hrsg.), *Gemüsebau* (3. Aufl.). Ulmer.
- Luijks G. M. J. F., Nijdam S., & v Esveld H. (2005). Electrode diagnostics and modelling for ceramic metal halide lamps. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 38(17), 17. doi:10.1088/0022-3727/38/17/s17
- Majid, M., Khan, J. N., Shah, Q. M. A., Masoodi, K. Z., Afroza, B., & Parvaze, S. (2021). Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (*Lactuca sativa* L., var. Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. *Agricultural Water Management*, 245, 106572. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106572>
- Micro Sine Electric, SL (FactorLED) (2023): LED Flutlichtstrahler 150W EVOLUTION IP65 Osram Chip 150Lm/W (Datenblatt product_2290). <https://www.tucaled.com/projector-serie-evolution/2149-foco-projector-exterior-led-150w-evolution-ip65-osram-8435612917118.html>
- Morais, H., Medri, M. E., Marur, C. J., Caramori, P. H., Ribeiro, A. M. D. A., & Gomes, J. C. (2004). Modifications on leaf anatomy of *Coffea arabica* caused by shade of pigeonpea (*Cajanus cajan*). *Brazilian archives of biology and technology*, 47, 863-871.
- Ntinias, G. K., Neumair, M., Tsadilas, C. D., & Meyer, J. (2017). Carbon footprint and cumulative energy demand of greenhouse and open-field tomato cultivation systems under Southern and Central European climatic conditions. *Journal of cleaner production*, 142, 3617-3626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.106>
- Nederhoff, E. (2010). LEDs for Greenhouse Lighting. *Practical Hydroponics and Greenhouses*, (110), 32–40. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.656669840885639>
- Osram Opto Semiconductors GmbH (2019). GWM JTLRSA.EM DURIS® E 2835. Micro Sine Electric SL (FactorLED). https://www.factorled.com/es/index.php?controller=attachment&id_attachment=656

- Park, Y., & Runkle, E. S. (2017). Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation. *Environmental and Experimental Botany*, 136, 41–49. doi:10.1016/j.envexpbot.2016.12.013
- Pinho, P., Jokinen, K., & Halonen, L. (2017). The influence of the LED light spectrum on the growth and nutrient uptake of hydroponically grown lettuce. *Lighting Research & Technology*, 49(7), 866-881. doi:10.1177/1477153516642269
- Rijk Zwaan Welver (2023). *SWEETERNO F1 (72-733)*. Rijk Zwaan.
<https://www.rijkszwaan.de/Tomate/SWEETERNO-F1-72-733-prdSL11339-ctgCrops.tomato>
- Schopfer, P., & Brenniker, A. (2010). *Pflanzenphysiologie* (7. Aufl.). Springer Spektrum
- Shrestha, A., & Dunn, B. (2010). Hydroponics. Oklahoma Cooperative Extension Service. HLA-6442-4.
- Singh, H., & Dunn, B. (2016). *Electrical conductivity and pH guide for hydroponics*. Oklahoma Cooperative Extension Service. DOI:10.13140/RG.2.2.20271.94885
- Smith, H. (1995). Physiological and Ecological Function within the Phytochrome Family. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 46(1), 289–315. doi:10.1146/annurev.pp.46.060195.001445
- Tripathi, D. K., Singh, V. P., Chauhan, D. K., Prasad, S. M., & Dubey, N. K. (2014). Role of macronutrients in plant growth and acclimation: recent advances and future prospective. *Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes: Volume 2*, 197-216. doi:10.1007/978-1-4614-8824-8_8
- Van der Esch, S., ten Brink, B., Stehfest, E., Bakkenes, M., Sewell, A., Bouwman, A., Meijer, J., Westhoek, H. & van den Berg, M. (2017). *Exploring future changes in land use and land condition and the impacts on food, water, climate change and biodiversity: Scenarios for the Global Land Outlook*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.
- Weimar A. & Albrecht T. (2010). Leuchtdioden erobern den Alltag. *Optik & Photonik*, 5(3), 24-27. <https://doi.org/10.1002/opph.201190115>
- Lizana, C., Wentworth, M., Martinez, J. P., Villegas, D., Meneses, R., Murchie, E. H., Pastenes, C., Lercari, B., Vernieri, P., Horton, P., & Pinto, M. (2006). Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. I. Effects of drought on yield and photosynthesis. *Journal of Experimental botany*, 57(3), 685-697
- Zhang, T., Maruhnich, S. A., & Folta, K. M. (2011). Green light induces shade avoidance symptoms. *Plant physiology*, 157(3), 1528-1536. <https://doi.org/10.1104/pp.111.180661>

Danksagung

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

Des Weiteren bedanke ich mich besonders bei meinem Betreuer Hemanth Kumar Puppala für die gute Anleitung und Unterstützung bei meiner Bachelorarbeit. Ebenfalls gilt mein Dank Julia Asch für das Korrekturlesen und Dr. Jörn Germer für das Überprüfen und Bereitstellen von Daten und seine Unterstützung.

Mein weiterer Dank gilt allen Mitarbeiter*innen und Helfer*innen, besonders Theresa Detering, die mir bei der Ernte geholfen haben und bei Fragen stets halfen. Sowie meiner Familie, die mich während der Bachelorarbeit stets ermutigte und unterstützte.