

Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau,  
Veitshöchheim & Hochschule Weihenstephan Triesdorf

# Abschlussbericht

"Energieeinsparung und Effizienzsteigerung in der gärtnerischen  
Produktion durch LED Belichtungssysteme" EW/13/55

LWG &HSWT  
9.4.2017

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	0
Einleitung.....	10
Grundlegendes zum Thema Licht .....	10
Wie nimmt der Mensch Licht wahr? .....	11
Wie nimmt die Pflanze Licht wahr? .....	11
Photosynthese .....	14
Versuchsteil der LWG.....	16
Versuch - Bewurzelung von Calibrachoa-Stecklingen .....	17
Einleitung.....	17
Material und Methoden .....	18
Messung der Lichtintensität und spektralen Verteilung .....	18
Pflanzenmaterial und Kulturmethode .....	20
Aufnahme der Auswertungsparameter.....	21
Pflanzenlänge .....	21
Blattfläche und Wurzellänge .....	21
Trockengewicht von Spross und Wurzel .....	22
Blatt- und Substrattemperatur .....	22
Kohlenhydratgehalt .....	22
Ergebnisse.....	23
Ergebnisse der Lichtintensität und spektralen Verteilung.....	23
Sprosslänge von Calibrachoa MiniFamous Neo Royal Blue .....	28
Trockensubstanz von Spross und Wurzel.....	30
Ergebnisse der Blattfläche und Wurzellänge .....	33
Ergebnisse der primären Inhaltsstoffe.....	37
Diskussion .....	44
Lichtintensität und der spektralen Verteilung .....	44
Diskussion Sprosslänge.....	45
Diskussion Trockenmasse von Spross und Wurzel .....	46
Diskussion Blattfläche .....	47
Diskussion Gesamtwurzellänge .....	48
Diskussion der Kohlenhydratanalyse .....	49
Versuch - Viola Cornuta.....	50
Einleitung .....	50

Material und Methoden .....	50
Ergebnisse .....	51
Diskussion.....	52
Versuch - kompaktes Wachstum durch hellrotes Licht bei Petunia und Calibrachoa	52
Einleitung .....	52
Material und Methoden .....	52
Ergebnisse Petunien .....	53
Ergebnisse der Calibrachoa:.....	55
Diskussion.....	58
Versuch - Kräuter .....	58
Einleitung .....	58
Material und Methoden .....	59
Ergebnisse des Kräuterversuches .....	60
Diskussion.....	63
Versuch - Tomaten und Gurken .....	64
Einleitung .....	64
Material und Methoden .....	64
Ergebnisse .....	65
Diskussion.....	67
Versuchsteil der HSWT: .....	69
Die Forschungsziele / Der Wechsel von herkömmlichen Leuchtmitteln zu LEDs	69
Der Einfluss des Lichts auf die Morphologie .....	69
Beeinflussung des Rosmarinsäuregehalts in Basilikum und Borretsch.....	71
Bewurzelung von Stecklingen .....	72
Material und Methoden .....	73
Kultur von Sonnenblumen und Beet- und Balkonpflanzen .....	73
Kultur von Basilikum und Borretsch .....	75
Kultur von Poinsettien-Stecklingen.....	76
Messungen .....	78
Statistische Auswertung.....	78
Ergebnisse.....	79
Einfluss verschiedener Wellenlängen auf das Wachstum von Zierpflanzen .....	79
Wachstum von Sonnenblumen unter verschiedenen Belichtungen .....	79
Einfluss des Lichtspektrums auf Beet- und Balkonpflanzen.....	86

Der Rosmarinsäuregehalt in Basilikum und Borretsch .....	90
Der Einfluss der Lichtqualität auf die Stecklingsbewurzelung .....	96
Diskussion .....	98
Morphologie von Zierpflanzen .....	98
Gehalt an Rosmarinsäure .....	100
Wurzelentwicklung .....	102
Literaturverzeichnis .....	103

Abbildung 1: Grafische Oberfläche des Programms VisuSpectrum .....	19
Abbildung 2: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Natriumdampf-Hochdrucklampe. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	25
Abbildung 3: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Natriumdampf-Hochdrucklampe. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	25
Abbildung 4: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit roten LEDs (660 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	25
Abbildung 5: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit roten LEDs (660 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	25
Abbildung 6: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit blauen LEDs (440 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	25
Abbildung 7: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit blauen LEDs (440 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	25
Abbildung 8: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit weißen LEDs (4000K Ra >80). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	25
Abbildung 9: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit weißen LEDs (4000K Ra >80). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	25
Abbildung 10: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Mischung aus LEDs (400 -700 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	25
Abbildung 11: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Mischung aus LEDs (400 -700 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	25
Abbildung 12: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit roten (660 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	26
Abbildung 13: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit roten (660 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	26
Abbildung 14: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit blauen (440 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	26
Abbildung 15: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit blauen (440 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	26
Abbildung 16: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit weißen (4000 K Ra >80) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	26
Abbildung 17: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit weißen (4000 K Ra >80) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	26
Abbildung 18: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Mischung aus LEDs (400-700 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	26
Abbildung 19: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Mischung aus LEDs (400-700 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .....	26
Abbildung 20: Spektrale Verteilung der Natriumdampf-Hochdrucklampe (Philips Agro 400) .....	27
Abbildung 21: Spektrale Verteilung des Tageslichtes zur Mittagszeit (13.02.2017) .....	27
Abbildung 22: Spektrale Verteilung der roten LEDs (Peak 660 nm, Bereich 600-700 nm) .....	27
Abbildung 23: Spektrale Verteilung der blauen LEDs (Peak 440 nm, Bereich 400-500 nm) .....	27
Abbildung 24: Spektrale Verteilung der weißen LEDs (4000 K Ra>80) .....	27
Abbildung 25: Spektrale Verteilung der roten, blauen und weißen LEDs inkl. Far red (730 nm) .....	27
Abbildung 26: Spektrale Verteilung der roten LEDs (Peak 660 nm, Bereich 600-700 nm) inkl. Far red (730 nm) .....	27
Abbildung 27: Spektrale Verteilung der blauen LEDs (Peak 440 nm, Bereich 400-500 nm) inkl. Far red (730 nm) .....	27
Abbildung 28: Spektrale Verteilung der weißen LEDs (4000 K Ra>80) inkl. Far red (730 nm) .....	27
Abbildung 29: Spektrale Verteilung der roten, blauen und weißen LEDs inkl. Far red (730 nm) .....	27
Abbildung 30: Mittelwerte und Standardfehler der Sprosslänge von jeweils 10 Calibrachoa-Jungpflanzen. 21 Tage nach dem Stecken in der Klimakammer. Lichtintensitäten: $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ) .....	29

Abbildung 31: Mittelwerte und Standardfehler der Sprosslänge von jeweils 10 Calibrachoa-Jungpflanzen. 21 Tage nach dem Stecken im Gewächshaus. Lichtintensitäten: 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	30
Abbildung 32: Mittelwerte und Standardfehler des Sprosstrockengewichtes aus jeweils 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen mit einer Kulturzeit von 21 Tagen in der Klimakammer. Lichtintensitäten von 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen. Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	32
Abbildung 33: Mittelwerte und Standardfehler des Sprosstrockengewichtes aus jeweils 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen mit einer Kulturzeit von 21 Tagen im Gewächshaus. Lichtintensitäten von 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen. Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	32
Abbildung 34: Mittelwerte und Standardfehler des Wurzeltrockengewichtes aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	33
Abbildung 35: Mittelwerte und Standardfehler des Wurzeltrockengewichtes aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	33
Abbildung 36: Mittelwerte und Standardfehler der Blattfläche aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	35
Abbildung 37: Mittelwerte und Standardfehler der Blattfläche aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	36
Abbildung 38: Mittelwerte und Standardfehler der Gesamtwurzellänge aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	36
Abbildung 39: Mittelwerte und Standardfehler der Gesamtwurzellänge aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	37
Abbildung 40: Mittelwerte und Standardfehler des Glukosegehaltes aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	38
Abbildung 41: Mittelwerte und Standardfehler des Glukosegehaltes aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	38
Abbildung 42: Mittelwerte und Standardfehler des Fruktosegehaltes aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	40
Abbildung 43: Mittelwerte und Standardfehler des Fruktosegehaltes aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).....	40

Abbildung 44: Mittelwerte und Standardfehler des Sachharosegehaltes aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD (p = 0,05).	41
Abbildung 45: Mittelwerte und Standardfehler des Sachharosegehaltes aus 10 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD (p = 0,05).	42
Abbildung 46: Mittelwerte und Standardfehler des Stärkegehaltes aus je 3 Mischproben von 3 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD (p = 0,05).	43
Abbildung 47: Mittelwerte und Standardfehler des Stärkegehaltes aus je 3 Mischproben von 3 Individuen der Calibrachoa-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD (p = 0,05).	43
Abbildung 48: Musterung und Ausfärbung der Blüten von Viola cornuta Admire® Maxi Mix Yellow Purple Wing (oben) und Viola cornuta Admire® Maxi Mix Orange Purple Wing (unten) unter unterschiedlichen Spektralbereichen.	51
Abbildung 49: Übersicht der Pflanzenhöhe in Abhängigkeit von Sorte und Belichtungsvariante bei Petunia – 13 Tage nach dem Stecken. Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD (p = 0,05).	53
Abbildung 50: Ansicht der Petuniensorten Petunia 'Night Sky' (A), Petunia Swirl 'Cherry Banana' (B), Petunia Deluxe 'Lilac Picotee evol', (C) und Petunia Famous 'Raspberry Star' (D) bei roter Belichtung (660 nm), Mix (400-700 nm), Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS) und einer Nullkontrolle (0) - 13 Tage nach dem Stecken.	55
Abbildung 51: Übersicht der Pflanzenhöhe in Abhängigkeit von Sorte und Belichtungsvariante bei Calibrachoa – 19 Tage nach dem Stecken. Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD (p = 0,05).	56
Abbildung 52: Ansicht der Calibrachoaarten MiniFamous 'Neo Royal Blue 16' (A), 'Neo True Yellow' (B), 'Double Blue' (C) und Rave 'Cherry' (D) bei roter Belichtung (660 nm), Mix (400-700 nm), Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS) und einer Nullkontrolle (0) - 19 Tage nach dem Stecken.	57
Abbildung 53: Sprosslänge der Kräuterstecklinge unter verschiedenen Lichtbehandlungen. Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD (p = 0,05).	60
Abbildung 54: Melissa officinalis 'Lemon Balm' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix.	61
Abbildung 55: Mentha avernensis 'Strawberry Mint' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix.	61
Abbildung 56: Ocimum Basilicum 'African Blue' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix.	61
Abbildung 57: Origanum vulgare 'Dolce Vita' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix.	62
Abbildung 58: Salvia elegans 'Ananas' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix.	62
Abbildung 59: Stevia rebaudiana 'compact' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix.	62
Abbildung 60: Wachstumskurve von Cucumis sativus 'Tanja' über einen Zeitraum von 13 Tagen nach der Aussaat.	65
Abbildung 61: Ansicht der Cucumis sativus 'Tanja' 13 Tage nach der Aussaat unter den unterschiedlichen Spektralbereichen. Von links nach rechts: HPS, rot, blau und mix.	66
Abbildung 62: Wachstumskurve von Lycopersicon esculentum L. 'Harzfeuer F1' über einen Zeitraum von 13 Tagen nach der Aussaat.	66
Abbildung 63: Ansicht der Lycopersicon esculentum L. 'Harzfeuer F1' 13 Tage nach der Aussaat unter den unterschiedlichen Spektralbereichen. Von links nach rechts: HPS, rot, blau und mix.	67
Abbildung 64: Belichtungsvarianten und Kulturschema von Poinsettenstecklingen.	77

Abbildung 65: Korrelation der Kompaktheit mit dem Anteil an rotem Licht. A, Kulturperiode 2012, B, Kulturperiode 2013. ....	80
Abbildung 66: Morphologie von Sonnenblumen kurz vor der Blüte. A, Kultur unter rotem Licht, B, Kultur unter blauem Licht.....	81
Abbildung 67: Iod-Safranin gefärbte Blattschnitte von Sonnenblumen. A, Kultur unter rotem Licht; B, Kultur unter blauem Licht.....	82
Abbildung 68: Turgordruckveränderung bei rotem und blauem Licht. ....	83
Abbildung 69: Relative Wasserverlust beim Trocknen von Sonnenblumenblättern. ■ rotes Licht; ♦ blaues Licht.....	83
Abbildung 70: Vergleich der Spektren unter den roten und blauen Folien mit den entsprechend farbigen LEDs. ....	86
Abbildung 71: Vergleich der Morphologie von Pelargonium (A, B), Calibrachoa `tutti frutti` (C, D) and Calibrachoa. `mille baci` (E, F) unter 30 % (A, C, E) und 87.5 % (B, D, F) rotem Licht.....	88
Abbildung 72: Kompaktheit der Beet- und Balkonpflanzen. Gelb, Natriumdampf Lampe; Blau, blau angereichertes Spektrum; rot, rot angereichertes Spektrum; Grün, Spektrum AP673. Die mit a gekennzeichnete Datensätze unterscheiden sich signifikant von der Kontrolle. ....	89
Abbildung 73: Verkürzung der Kulturzeit durch Belichtung. Gelb, Natriumdampf Lampe; Blau, blau angereichertes Spektrum; rot, rot angereichertes Spektrum; Grün, Spektrum AP673. Die mit a gekennzeichnete Datensätze unterscheiden sich signifikant von der Kontrolle. ....	90
Abbildung 74: Repräsentative Basilikum- (A) und Borretschpflanzen (B) aus dem Gewächshaus (Kontrolle) und aus der Kultur unter artifiziellem Licht (G2, AP673 und OF). ....	93
Abbildung 75: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahmen von Trichomen von Rosmarinus officinalis im Profil (A) und in der Draufsicht (B). ....	95
Abbildung 76: Blattoberseite eines Basilikumblatts. A, Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme, B Nach Färbung. T, Trichome; H, Hyphe; S, Spaltöffnung. ....	95
Abbildung 77: Jungpflanzenentwicklung aus belichteten Poinsettienstecklingen. A, Vergleich eines unbelichteten Stecklings mit einem belichteten. B, Vergleich eines Stecklings der die zweiten 10 Tage belichtet wurde mit belichteten Steckling. C, Vergleich eines Stecklings, der die ersten 10 Tage belichtet wurde mit einem unbelichteten Steckling. D, Vergleich eines Stecklings, der die ersten 10 Tage belichtet wurde mit einem belichteten Steckling .....	97

Tabelle 1: Spezifikationen des LED Produktionsmoduls III DR-B-W-FR .....	19
Tabelle 2: Verwendete Spektralbereiche .....	20
Tabelle 3: Boniturschema zur Auswertung der Bewurzelung unterschiedlicher Stecklings vermehrter Kräutersorten .....	60
Tabelle 4: Ergebnisse der Wurzelbonitur der unterschiedlichen Kräutergattungen (0 = unbewurzelt, 1 = schlecht bewurzelt, 2 = mittel bewurzelt, 3 = gut bewurzelt) .....	63
Tabelle 5: Spektrale Zusammensetzung der eingesetzten Lichtquellen. Die Wellenbänder sind wie folgt definiert: 420-480 nm blau (B), 620-680 nm rot (R) und 700-750 nm dunkelrot (FR). HPS, Natriumdampf Lampe. Pfr/P, geschätztes Phytochrome Photoequilibrium nach Smith (1982). .....	75
Tabelle 6: Prozentuale Anteile an blauem, rotem und dunkelrotem an den Spektren der einzelnen Lampen .....	76
Tabelle 7: Spektren der verschiedenen LEDs. Die Wellenbereiche sind wie folgt definiert, 420-480 nm, blau; 620-680 nm, rot; 700-750 nm, dunkelrot und 500-600 nm, grün .....	77
Tabelle 8: Morphologie von Sonnenblumen unter verschiedenen Lichtquellen. Angaben, die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind unterscheiden sich signifikant (post-hoc Tukey's test, $\alpha = 0.05$ ). .....	79
Tabelle 9: Photosynthese (A) und Transpiration (E) unter rotem und blauem Licht. ....	81
Tabelle 10: Die Zusammensetzung des Lichts unter den farbigen Folien .....	84
Tabelle 11: Höhe und Gewicht der Sonnenblumen unter den verschiedenen farbselektiven Folien. Wuchs mit (A) und ohne (B) Daminozide. ....	85
Tabelle 12: Spektren der Lampen. Prozentuelle Anteile von blauem, rotem und dunkelrotem Licht. Die Wellenbänder sind 420-480 nm (blau); 620-680 nm (rot); and 700-750 nm (dunkelrot). Das blau angereicherte Spektrum ist in Klammern dargestellt. ....	87
Tabelle 13: Frischgewicht $\pm$ SE der Beet- und Balkonpflanzen. Der Kruskal-Wallis Test wies signifikante Unterschiede für Pelargonium ( $p < 0.001$ ), Aspidistra ( $p < 0.001$ ), Calibrachoa `Tutti Frutti Orange` ( $p < 0.001$ ) und Calibrachoa `Mille Baci French Kiss` ( $p < 0.001$ ) auf. ....	87
Tabelle 14: Höhe $\pm$ SE der Beet- und Balkonpflanzen. Der Kruskal-Wallis Test wies signifikante Unterschiede für Argyranthemum ( $p < 0.001$ ), Aspidistra ( $p < 0.001$ ), Calibrachoa `Tutti Frutti Orange` ( $p$ $< 0.001$ ) und Calibrachoa `Mille Baci French Kiss` ( $p < 0.001$ ) auf. ....	87
Tabelle 15: Mittelwert $\pm$ Standardabweichung der Höhe, des Frischgewichts, und der Konzentration der Kaffee- und Rosmarinsäure im Basilikum unter Kunstlicht und im Gewächshaus (Kontrolle). Mittelwerte, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, sind statistisch signifikant unterschiedlich ( $p = 0.05$ , $n = 20$ ). ....	91
Tabelle 16: . Bonitur der Basilikumpflanzen. Die Kompaktheit wurde mit den Noten 1 = nicht kompakt bis 5 = sehr kompakt bewertet. Angaben, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, sind statistisch signifikant unterschiedlich (Kruskal-Wallis test, $p = 0.05$ , $n = 80$ ) .....	91
Tabelle 17: Rosmarinsäuregehalt von Basilikum nach 15 und 38 Tagen unter rotem und blauem Licht. Die statistische Analyse zeigte keine signifikanten Unterschiede für das Frischgewicht (ANOVA, $p =$ $0.665$ ) und den Rosmarinsäuregehalt auf (Kruskal-Wallis Test; $p$ am Tag 15 = $0.065$ und am Tag 38 = $0.154$ , $n$ pro Variante = 10). Die Höhe war signifikant unterschiedlich (ANOVA, $p = 0.002$ ). Angaben, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, sind statistisch signifikant unterschiedlich. .....	92
Tabelle 18: Mittelwert und SD der Höhe, des Gewichts und des RA Gehalts von Borage. Angaben mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant ( $p = 0.05$ , $n = 8$ ). ....	92
Tabelle 19: Bonitur der Infektion (Median und Interquartilsabstand) mit <i>P. belbahrii</i> . 1 = keine Infektion, 5 = letale Infektion. ....	94
Tabelle 20: Der Effekt von verschiedenen Lichtqualitäten auf die Bewurzelung von <i>Euphorbia</i> <i>pulcherrima</i> Stecklingen. Eine ANOVA Analyse der logarithmischen Daten zeigte einen statistisch signifikanten Unterschiedlichen für die Anzahl der Wurzeln ( $p = 0.001$ ), das Wurzelgewicht ( $p < 0.001$ ) und die Länge der Wurzeln ( $p = 0.001$ ). Werte, die mit dem gleichen Buchstaben markiert sind, sind nicht signifikant unterschiedlich (Tukey's test, $n = 18$ , $\alpha = 0.05$ ). ....	96

Tabelle 21: Mittelwerte und Standardabweichung der Anzahl und Länge der Wurzeln unter den vier Belichtungsvarianten. Der Kruskal-Wallis Test zeigt, dass die Unterschiede statistisch signifikant waren ( $p = 0.49$ (Anzahl) und $p = 0.01$ (Länge)). .....	97
Tabelle 22: Mediane (Interquartilsabstand) der Photosyntheserate (A) und Transpiration (E) von <i>Euphorbia pulcherrima</i> Stecklingen unter verschiedenen Spektren ( $n = 15$ ).....	98

# Einleitung

## Grundlegendes zum Thema Licht

Der Physiker Sir Isaac Newton (1642-1727) hat vor etwa 300 Jahren als erstes bewiesen, dass weißes Licht aus einer Reihe unterschiedlicher Farben besteht, indem er das Licht durch ein Prisma lenkte. Die unterschiedlich starke Beugung des Lichtes durch das Prisma zeigte, dass die Farben von violett über blau, grün, gelb, orange ins rote übergehen. Dieser farbige Bereich Speziell von 380 bis 750 nm Wellenlänge gilt als sichtbares Spektrum. James Clerk Maxwell (1831-1879) wies im 19. Jahrhundert nach, dass das für den Menschen sichtbare Spektrum nur einen extrem kleinen Ausschnitt, des im sonst so weitläufigen elektromagnetischen Strahlungsspektrum, darstellt (RAVEN ET AL., 2006).

Sämtliche Strahlung bewegt sich in Form von elektromagnetischen Wellen vorwärts. Je nach Wellenlänge, dem Abstand von Wellenmaximum zu Wellenmaximum wird die Strahlung klassifiziert. Sie reicht von weniger als einem Nanometer (Röntgenstrahlung) bis hin zu mehreren Kilometern (langwillige Radiowellen). Energetisch hat jede Wellenlänge einen eigenen Wert, dabei zu beachten ist, dass je kürzer die Wellenlänge umso höher ist die Energie und umgekehrt.

Das bisherige Wellenlängen Modell erwies sich jedoch um 1900 als unzureichend zur Beschreibung des Lichtes. Dies lag an der Entdeckung photoelektrischen Effektes. Dabei wurde nachgewiesen, dass wenn eine Zinkplatte mit Ultraviolettem (UV) Licht bestrahlt wird, sich die Platte positiv auflädt. Dies liegt daran, dass durch die Einstrahlung des UV-Lichts Elektronen aus dem Metall emittiert werden. Metalle besitzen für den photoelektrischen Effekt eine kritische maximale Grenzwellenlänge um den photoelektrischen Effekt auszulösen, dazu muss die Wellenlänge kleiner (energiereicher) oder gleich der Grenzwellenlänge sein.

Das Problem beim Wellenmodell des Lichtes resultiert daraus, dass man analog annehmen müsste, dass Licht hätte eine größere Kraft den photoelektrischen Effekt auszulösen, wenn es intensiver wäre. Dies ist jedoch nicht Fall, ob Elektronen aus einem Metall emittiert werden hängt nur von der Wellenlänge ab. Lediglich die Anzahl der abgespaltenen Elektronen nimmt mit zunehmender Lichtintensität zu, die Geschwindigkeit hingegen bleibt gleich.

Die Erklärung dieses Phänomens lieferte Albert Einstein 1905 in Form der Quantentheorie, die besagt, dass Licht aus energiereichen Teilchen besteht welche Photonen oder Lichtquanten genannt werden. Dabei ist die Energie eines Photons umgekehrt proportional zu seiner Wellenlänge. Dies bedeutet: Je größer die Wellenlänge ist, umso geringer ist die Energie. Beide Theorien, die Wellen- und die Quantentheorie lassen es zu das Phänomen Licht zu beschreiben. (RAVEN ET AL. 2006).

### **Wie nimmt der Mensch Licht wahr?**

Wirbeltiere, wie beispielsweise Menschen nehmen Licht über die Augen wahr. Der Aufbau des Auges ist wie folgt: Eine harte Bindegewebsschicht, die Sklera gefolgt von der Chorioidea, der Aderhaut, umgeben den Augapfel. Die Sklera ist an der Vorderseite durchsichtig und wird als Cornea, oder auch Hornhaut, bezeichnet und bildet eine Linse. Das Licht kann durch diesen Bereich in den Augapfel hinein gelangen. Die Chorioidea bildet die ringförmige Iris und kann das durch die Pupille eintretende Licht regulieren.

Die Retina, oder auch Netzhaut genannt, befindet sich im Inneren des Auges und bildet die innerste Schicht. In der Retina sind die Fotorezeptoren des Menschen lokalisiert. Von den Fotorezeptoren gibt es zwei Varianten, die nach Ihrem Aussehen benannt wurden, die Stäbchen und die Zapfen, die unterschiedliche Funktionen haben. Stäbchen sind lichtempfindlicher als Zapfen, können aber keine Farben wahrnehmen, sie ermöglichen es auch bei schlechten Lichtverhältnissen, beispielsweise nachts sehen zu können, jedoch lediglich in schwarz und weiß. Zapfen benötigen eine intensivere Lichtstrahlung um erregt zu werden und ermöglichen uns das Farbsehen (CAMPBELL, 2006).

### **Wie nimmt die Pflanze Licht wahr?**

Pflanzen benötigen Licht um Photosynthese zu betreiben und wachsen zu können. Aber wie genau nimmt die Pflanze das Licht wahr?

Eine der bekanntesten Reaktionen ist das Wachstum in Richtung des Lichtes und das drehen einiger Pflanzenteile zum Licht hin. In der Pflanze sind, ähnlich wie im menschlichen Auge bestimmte Bestandteile enthalten die Licht wahrnehmen beziehungsweise absorbieren können. Die Substanzen die Licht absorbieren,

werden Pigment genannt. Absorbiert ein Pigment sämtliche für den Menschen sichtbaren Wellenlängen, erscheint es für uns schwarz, da kein Licht reflektiert wird. Jedes Pigment hat ein bestimmtes Wirkungsspektrum. Das Chlorophyll beispielsweise absorbiert Licht im violett/blauen und rotem Bereich, Licht im grünen Bereich hingegen wird reflektiert, weshalb wir die Pflanzen als grün sehen. (RAVEN ET AL. 2006). Die Chlorophylle als wichtigste Photosynthesepigmente kommen in unterschiedlichen Strukturen vor. Sie gliedern sich in das Chlorophyll a und das Chlorophyll b. Beide haben ein ähnliches Absorptionsspektrum, jedoch ist das Chlorophyll b nicht direkt an der Energieübertragung beteiligt, sondern dient zur Erweiterung des Lichtabsorptionsspektrums (RAVEN ET AL., 2006).

Weitere wichtige Pigmente, die an der Lichtabsorption beteiligt sind, sind die Carotinoide und die Phycobiline. Diese beiden Pigmentgruppen sind ebenfalls nicht an der direkten Energieübertragung beteiligt und müssen die Energie zuerst an das Chlorophyll a übertragen. Somit kann Lichtenergie in chemische Energie umgewandelt und gleichzeitig Kohlenstoffdioxid fixiert werden.

Zusätzlich besitzen Pflanzen noch sogenannte Photorezeptoren.

In der Regel sind Photorezeptoren lichtsensitive Proteine. Die Absorption von Lichtquanten einer bestimmten Wellenlänge führt zu einer reversiblen Strukturänderung des Proteins, die dann als Signal an den Zellkern der Pflanzenzelle weitergegeben wird. Dort werden je nach der Art des eingehenden Signals, die Transkription der entsprechenden Geneabschnitte aktiviert. So kann ein Lichtsignal in eine physiologische Antwort übersetzt werden. Daneben gibt es auch schnelle Reaktionen, die wohl nicht über den Zellkern reguliert werden, sondern direkt in eine physiologische Antwort übersetzt werden. Die Druckregulation für das Öffnen und Schließen der Stomata in Abhängigkeit der Lichteinstrahlung ist eine dieser schnellen Reaktionen.

Die Photorezeptoren lassen sich je nach der Wellenlänge die sie detektieren in verschiedene Klassen eingruppiert. Als erste wurden die sogenannten Phytochrome entdeckt. Dies sind Photorezeptoren, die rotes und dunkelrotes Licht absorbieren. Daneben gibt es UV/blau Licht detektierende Rezeptoren. In dieser Klasse unterscheidet man wieder zwischen Cryptochromen und Phototropinen.

Die Klasse der Phytochrome umfasst mehrere individuelle Proteine. In *Arabidopsis* sind dies fünf verschiedene, die nach dem Zeitpunkt ihre Entdeckung als

Phytochrome A bis E bezeichnet werden. Am besten untersucht sind Phytochrome A und B. Beide können zwischen zwei Zuständen hin und herwechseln. Die Absorption eines Photons aus dem roten Wellenbereich überführt das Phytochrome in einen Zustand, in dem es nun mehr kein rotes, sondern dunkelrotes Licht absorbiert. Die Absorption von dunkelrotem Licht überführt das Protein wieder in den Ausgangszustand. Der Wechsel von einem in den anderen Zustand wird von der Zelle als Signal gedeutet. Man nimmt an, dass die Menge der Proteine in einem in Verhältnis zur Menge der Proteine im anderen Zustand die Reaktion der Pflanze diktiert. Zu den bekanntesten physiologischen Reaktionen, die durch Phytochrom reguliert wird gehört das Streckungswachstum unter dunkelrotem Licht. Da ein hoher Anteil an dunkelrotem Licht meist im Schatten von Bäumen und anderen Pflanzen auftritt, nimmt man an, dass das Streckungswachstum eine evolutionär bedingte Adaption an ungünstige Lichtbedingungen darstellt. Aus dieser Überlegung leitet sich der deutsche Name Schattenflucht für dieses Phänomen ab. Im Zierpflanzenbau ist die Schattenflucht meist unerwünscht, da sich das gesteigerte Streckungswachstum negativ auf die optische Qualität auswirkt. Daneben scheinen Phytochrome eine entscheidende Rolle in der Regulation der Blütenbildung einzunehmen.

Cryptochrome sind weit verbreitet im Pflanzenreich und wurden in den uns gängigen Nutzpflanzen nachgewiesen. Die am besten untersuchtesten Reaktionen, die durch Cryptochrome reguliert werden sind das Wurzelwachstum und die Blütenbildung. In der Wurzelentwicklung spielen sie sowohl eine hemmende als auch eine stimulierende Wirkung. Dieses paradoxe Verhalten wird dadurch erklärt, dass es zwei verschiedene Cryptochrome in Pflanzen gibt. Wahrscheinlich dient die Anwesenheit zweier konträr wirkender Rezeptoren der Feinabstimmung. Cryptochrome wirken dadurch, dass sie in den Blättern die Produktion von Auxinen steuern. Auxine sind Pflanzenhormonen, die das Wachstum der Wurzel fördern. Die schnelle Entwicklung von Wurzeln ist von fundamentaler Bedeutung für den Zierpflanzenbau. In Deutschland werden jedes Jahr mehr als 100 Mio. Pflanzen aus Stecklingen generiert. Stecklinge sind unbewurzelte Pflanzenteile, die erst durch geeignete Kulturmaßnahmen zur Bildung von Wurzeln angeregt werden müssen. Früher wurde die Wurzelbildung von Stecklingen oft noch durch die externe Zugabe von Auxinen angeregt. Inzwischen wird die Zugabe von Pflanzenhormonen als kritisch bewertet und ist in den meisten Ländern untersagt. Eine alternative Methode zur Förderung der Wurzelbildung ist daher von großem Interesse für die Praxis.

Aufgrund der natürlichen physiologischen Funktion könnte die Zugabe von blauem Licht für die Stecklingsbewurzelung von Interesse sein.

In der Blütenbildung wirken Cryptochrome als Inhibitoren des Proteins COP1, welches wiederum als Inhibitor der Blütenbildung bei Langtagpflanzen fungiert. Durch die Inhibierung von COP1 wird der inhibierende Einfluss aufgehoben und die Blütenentwicklung gefördert. Die Blütenbildung ist im Gartenbau von essentieller Bedeutung. Sie bildet die Grundlage des Fruchtertrags im Obst- und Gemüsebau. Im Zierpflanzenbau ist die Ausprägung der Blüte entscheidend für die Qualität. Der moderne Zierpflanzenbau ist ein Termingeschäft in dem Sinne, dass Pflanzen gezielt für einen Verkaufstermin kultiviert werden. In diesem Geschäft könnte die Induktion der Blüte mit Licht einen wichtigen Beitrag zur termingerechten Fertigstellung der Ware leisten.

Neben den Cryptochromen nehmen auch Phototropine blaues Licht wahr. Der Name Phototropin leitet sich vom Phototropismus, dem Wachstum einer Pflanze zum Licht hin, ab. Neben dem Phototropismus regulieren Phototropine aber auch die oben beschriebene lichtabhängige Bewegung der Chloroplasten und die Öffnung der Stomata. Beide Reaktionen nehmen direkt Einfluss auf die Photosyntheseleistung der Pflanzen.

### **Photosynthese**

Unsere Biosphäre nutzt die in der Sonne ablaufenden Kernfusionsprozesse als Energiequelle. Während der Kernfusion wird Materie in Energie umgewandelt und in Form von elektromagnetischer Strahlung abgegeben. Während die Energieverteilung der Sonnenstrahlung etwa dem Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 5800 K entspricht, wird ein Teil der Quanten in der Atmosphäre unseres Planeten absorbiert und damit das Spektrum verändert. Der Energiefluss ankommender Strahlung wird dabei von 1,4 kW/m<sup>2</sup> (Solarkonstante) auf  $\leq 0,9$  kW/m<sup>2</sup> auf Meeresniveau reduziert. Davon fällt die Hälfte auf den Spektralbereich 300 bis 800 nm. Dieser sogenannte „optische Bereich“ fällt mitten in die photochemisch wirksame Strahlung (100 bis 1000 nm) (SCHOPFER und BRENNICKE, 2010).

Die Photosynthese als zentraler Energiewandlungsprozess in der Biosphäre ist indirekt dafür zuständig dass alles Leben auf der Welt ernährt wird. Dazu wird die oben erwähnte sichtbare Strahlung verwendet. Benötigte Energie kann von den

Lebewesen durch autotrophe oder heterotrophe Ernährung gewonnen werden. Der Begriff autotroph leitet sich vom griechischen ab, autos= selbst und trophos = Nahrung ab. Pflanzen synthetisieren organische Moleküle aus anorganischem Material der Umwelt. Durch Assimilation (aus dem lateinischen „assimilare“ = angleichen, also das umwandeln körperfremder in körpereigene Stoffe) kann die Pflanze aus Kohlenstoffdioxid, Wasser, und Mineralstoffen aus der Umwelt unter der Einwirkung von Licht, organisches Material herstellen. Pflanzen sind somit autotrophe, um genauer zu sein, photoautotrophe Lebensformen. Um organische Substanzen zu produzieren nutzt die Pflanze die Energie des auf der Erde ankommenden Sonnenspektrums.

Sieht man vom reinen Streckungswachstum ab, so müssen Pflanzen für das Wachstum stets neue Biomasse aufbauen. Die Biomasse wird durch die Photosynthese erzeugt. Dabei wird die für die Assimilation von Kohlendioxid notwendige Energie aus den Photonen des sichtbaren Lichts gewonnen. Dieser erste Schritt wird durch das Photosystem gewährleistet. Das Photosystem ist ein in die Thylakoidmembran eingelagerter Proteinkomplex, der das Chlorophyll enthält. Durch die auftreffenden Photonen werden Elektronen im Chlorophyllmolekül angeregt. Nicht alle Wellenlängen eignen sich gleichmäßig gut zur Elektronenanregung. Unter Laborbedingungen hat sich gezeigt, dass blaues Licht von einer Wellenlänge von etwa 410 bis 440 nm und rotes Licht mit einer Wellenlänge von etwa 615 bis 660 nm am besten vom Chlorophyll absorbiert werden (PORRA ET AL. 1989). Zudem können Photonen von Carotinoiden absorbiert und auf das Photosystem übertragen werden. Dadurch erweitert sich das Spektrum der photosynthetisch aktiven Wellenbereiche von 440 nm auf etwa 550 nm (FRANK & COGDELL 1996). Betrachtet man das Absorptionsspektrum des Photosystems könnte man meinen, dass Pflanzen nur blaues und rotes Licht zur Photosynthese nutzen. Untersuchungen an intakten Pflanzen haben jedoch gezeigt, dass diese Folgerung nicht zutrifft. Vielmehr können Pflanzen nahezu alle Wellenlängen des sichtbaren Lichts zur Photosynthese nutzen. Die Diskrepanz zwischen dem Absorptionsspektrum des Photosystems und der Photosynthesemessung hängt unter anderen daran, die Absorption eben nur ein Schritt innerhalb einer langen Kette von Reaktionen ist. Wie gut die Assimilation funktioniert hängt ebenfalls davon ab wie gut die Pflanze mit Kohlendioxid versorgt wird. Dies hängt wiederum von der Öffnung der Stomata und damit vom Turgor ab.

Ebenso spielen langfristig natürlich auch morphologische Merkmale wie die Blattgröße und Blattstellung eine entscheidende Rolle.

Generell gilt, dass die Photosynthese umso schneller abläuft je höher die Lichtintensität ist. Bei geringen Lichtintensitäten ist dieses Verhältnis linear. Bei höheren Intensitäten treten jedoch pflanzenphysiologisch bedingte Verluste auf, die der weiteren Zunahme der Photosynthese entgegenstehen. Bei weiterer Steigerung der Intensität wird schließlich das Photosystem beschädigt und die Assimilationsrate nimmt ab. In diesem Falle wird von Photoinhibition gesprochen (PARK ET AL. 1995). Aufgrund der höheren Energie der Photonen im kurzwelligen Bereich des Spektrums tritt dieses Phänomen eher bei blauem Licht auf.

Im Laufe der Evolution haben Pflanzen Mechanismen entwickelt, die es ihnen ermöglichen die Photosynthese weiter zu regulieren. Die Regulation funktioniert jedoch meist nicht direkt, das heißt durch einen Eingriff in das Photosystem, sondern sekundär durch die Anpassung morphologischer Merkmale. Ein gutes Beispiel dafür ist die Blattgröße, die in der Regel bei Pflanzen, die an dunklen Standorten wachsen deutlich größer sind, um mehr Photonen einzufangen. Die Anpassung kann aber auch schnell und unscheinbar erfolgen. So wandern die Chloroplasten bei Dunkelheit ins Licht und bei zu hoher Einstrahlung aus dem Licht (KAGAWA ET AL. 2001); Stomata öffnen und schließen sich um die Menge an Kohlendioxid zu regulieren (KINOSHITA ET AL. 2001, WANG ET AL. 2010); die Sprossachse neigt sich zum Licht hin. Alle diese Reaktionen werden durch Licht gesteuert und dienen dazu die Versorgung mit Kohlenstoff und Energie zu optimieren.

## **Versuchsteil der LWG**

Licht als ein begrenzender Faktor im Bereich Gartenbau ist für den Erfolg einer qualitativ hochwertigen Kultur enorm wichtig. Mit fortschreitender Technik und immer effizienteren LEDs könnte der Einsatz der neuen Technik auch im Gartenbau interessant werden. Dabei werden an der LWG unterschiedliche Fragestellungen zum Einsatz von LEDs im Gartenbau thematisiert:

- Wie beeinflusst das Lichtspektrum den Habitus des Sprosses bei Zierpflanzenstecklingen?

- Wie beeinflusst das Lichtspektrum die Bildung von Adventivwurzeln bei Zierpflanzenstecklingen?
- Ist im Vergleich zum Einsatz von Natriumdampf-Lampen eine Qualitätssteigerung möglich?
- Ist im Vergleich zum Einsatz von Natriumdampflampen eine Energieeinsparung möglich?

Diese Fragestellungen werden im Folgenden anhand von unterschiedlichen Versuchsanstellungen untersucht.

## **Versuch - Bewurzelung von *Calibrachoa*-Stecklingen**

### **Einleitung**

Die Stecklingsbewurzelung für das Beet- und Balkonpflanzen-Sortiment im Frühjahr erfordert aufgrund der hiesigen Witterungsverhältnisse zwingend eine Zusatzbelichtung. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades in der Produktion und der Fertigung ist eine einheitliche Jungpflanzenqualität (RC) erforderlich. Dieses Ziel lässt sich oft nur durch den Einsatz von Wuchshemmstoffen erreichen. Jedoch kann auch eine andere Option Abhilfe schaffen.

Die Belichtung von Zier- und Nutzpflanzen ist eine gängige Möglichkeit um das Pflanzenwachstum zu beeinflussen. Insbesondere die Nutzung von Natriumdampf- und Metallhalogen-Leuchtmitteln dominierte in den letzten Jahrzehnten die Produktionsbetriebe und sorgte für einen raschen Zuwachs an Biomasse. In jüngster Zeit rückt jedoch immer mehr eine neue Generation von Leuchtmitteln in den Vordergrund – die Leuchtdiode kurz LED (Light-emitting diode) genannt.

Das Besondere an den LEDs ist die Möglichkeit das Spektrum und die Lichtintensität frei zu steuern. Diese Option gibt es bei den herkömmlichen Belichtungseinrichtungen nicht. Die neue Technik erlaubt dem Gärtner seinen Pflanzen genau die Lichtkomposition zur Verfügung zu stellen, die die Pflanzen benötigen. Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass die Leuchtdioden keine Wärmestrahlung in Richtung der Pflanzen abgeben. Dadurch eröffnen sich Einsatzbereiche - wie beispielsweise die In-Vitro- oder Mehrlagenkultur - in denen bisher Leuchtstoffröhren verwendet wurden.

In der Fachliteratur gibt es eine Reihe von Hinweisen darauf, dass verschiedene Spektralbereiche zu morphologisch unterschiedlichen Wachstumstypen führen

können. Beispielsweise wird in der gängigen Literatur häufig von einem sehr kompakten Wachstum unter blauem Licht (430-490 nm) gesprochen (FOLTA und CHILDERS, 2008). Bisher gibt es jedoch wenig praktische Erfahrung hinsichtlich des Einsatzes von LED.

## **Material und Methoden**

Alle Versuche wurden in den Jahren 2014, 2015 und 2016 an Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau durchgeführt. Zur Durchführung der Versuche standen der Betrieb Zierpflanzenbau (Koordinaten einfügen) sowie das Fachzentrum Analytik zur Verfügung. Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Lichtquellen durchgeführt. Zur Erzeugung einzelner Spektralbereiche mittels Leuchtdioden, wurde eine speziell für Forschungseinrichtungen angefertigte Leuchte verwendet. Das Produktionsmodul III (DH Licht, Wülfrath, Deutschland). Die Programmierung der Module wurde mit Hilfe der Software VisuSpectrum (RAM GmbH Mess- und Regeltechnik, Herrsching, Deutschland) durchgeführt. Über eine grafische Oberfläche (Abbildung 1) wurde die entsprechende spektrale Zusammensetzung eingestellt und ausgewählt. Als Kontrolllichtquelle diente eine Natriumdampf-Hochdrucklampe (Gehäuse: MGR 400 SONT, Philips, Hamburg, Deutschland; Leuchtmittel: Master Agro 400 W, Philips, Hamburg, Germany).

### **Messung der Lichtintensität und spektralen Verteilung**

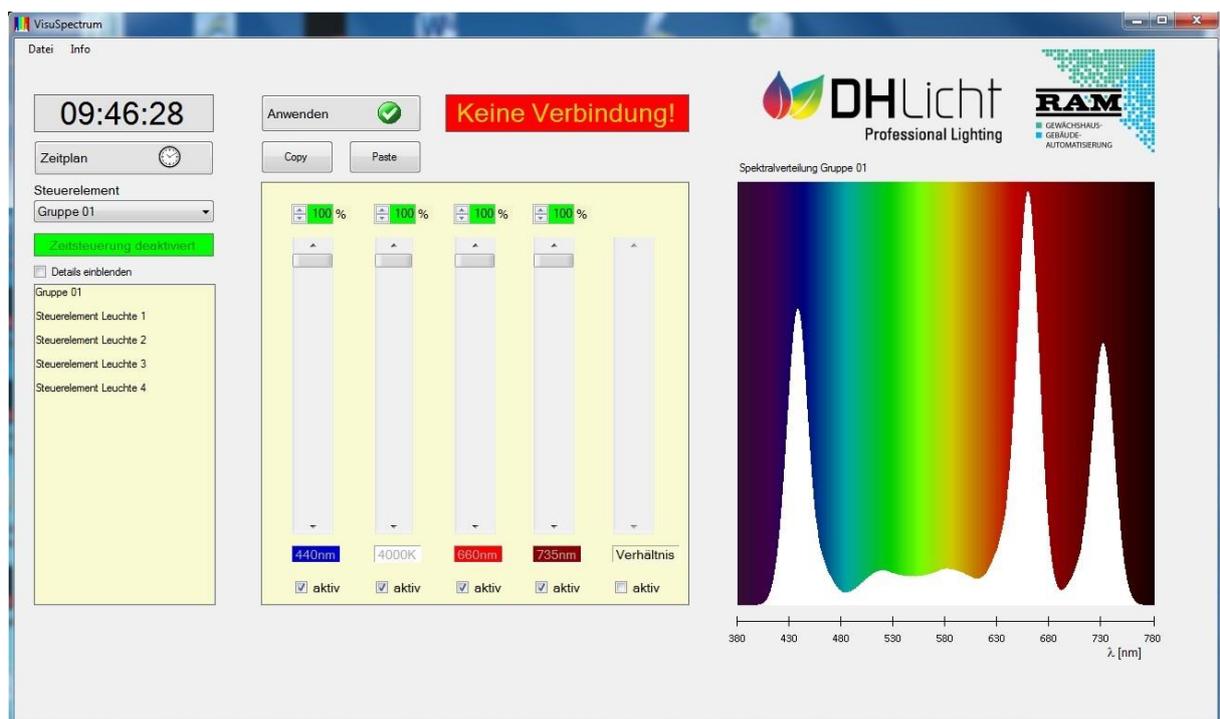
Zur Bestimmung der Lichtintensitäten, wurde ein Quantensensor (LI-190SA, LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, USA) in Kombination mit dem Light Meter (LI-250A, LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, USA) verwendet. Hierzu wurde jeder einzelne Pflanzplatz auf der Kulturfläche vermessen und dokumentiert. Der Quantumsensor wurde auf die entsprechende Messposition gesetzt und mit Hilfe von 3 Stellschrauben in Waage gebracht. Anschließend wurde die Messautomatik des Sensors aktiviert und der Mittelwert aus drei Messungen automatisch vom Gerät ermittelt. Die vermessene Fläche betrug eine Breite von 0,99 m x 1,10 m und beinhaltete 624 Pflanzplätze. Zur Überprüfung der Spektralbereiche wurde ein Spektrometer (JAZ Spectrometer, Ocean Optics, Dunedin, Florida, USA) angewendet. Mit der zugehörigen Software (Spectrasuite, Ocean Optics, Dunedin, Florida, USA) konnte der sie genaue spektrale Verteilung der verwendeten Leuchten festgehalten werden. Alle Messungen bezüglich der Lichtintensität und der

spektralen Verteilung wurden bei völliger Dunkelheit durchgeführt. Die Montagehöhe sowie der Abstand der Lampen zueinander wurde notiert, um die Ergebnisse an anderen Standorten reproduzieren zu können.

**Tabelle 1: Spezifikationen des LED Produktionsmoduls III DR-B-W-FR**

Bezeichnung	LED Produktionsmodul III DR-B-W-FR
Material	Aluminium
Maße	L: 1275 mm, B: 74 mm, H: 114 mm
Verbaute LED`s	440 nm (blau), 660 nm (rot), 4000 K Ra>80 (weiß), 730 nm (far red)
Leistung	180 W
Kühlung	passiv
Lebensdauer	25000 h (bei 25 °C Umgebungstemperatur und Lichtstromerhalt von 70 %)
Schutzart	IP 65

(DH Licht GmbH, 2016)



**Abbildung 1: Grafische Oberfläche des Programms VisuSpectrum**

Sämtliche Versuche wurden mit den zur Verfügung stehenden Spektralbereichen vorgenommen, die der Tabelle 2 zu entnehmen sind.

**Tabelle 2: Verwendete Spektralbereiche**

Farbe	Wellenlängenbereich [nm]	Peak [nm]
Rot	600-700	660
Blau	400-500	440
Weiß	400-700	400-700
Mix	400-700	440, 660
HPS	360-780	360-780
Far Red	650-780	730

Als Standorte für die Untersuchungen wurden die Klimakammer und eine Gewächshauskabine (7.1) der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau gewählt. Das Pflanzenmaterial wurde sowohl in der Klimakammer als auch im Gewächshaus mit den gleichen Lichtrezepten behandelt. Die Belichtung erfolgte in zwei unterschiedlichen Lichtintensitäten,  $40 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  und  $80 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Die Versuche wurden an zwei unterschiedlichen Standorten in Veitshöchheim durchgeführt. Zum einen in einer Klimakammer, unter Ausschluss von Tageslicht, zum anderen im Gewächshaus. Zusätzlich wurden die verwendeten Spektralbereiche in zwei unterschiedlichen Intensitäten auf das Pflanzenmaterial die Versuche jeweils mit den Lichtintensitäten  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  und  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  durchgeführt.

#### **Pflanzenmaterial und Kulturmethode**

Für diesen Versuchsteil wurde eine in Bayern sehr umsatzstarke Pflanze gewählt. Dabei handelt es sich um das Zauberglöckchen oder auch *Calibrachoa* 'MiniFamous Neo Royal Blue' von der Firma Selecta One (Stuttgart, Deutschland). Die Firma lieferte unbewurzelte Stecklinge aus dem Mutterpflanzenbetrieb auf den Kanarischen Inseln. Bei der Beschaffung des Pflanzenmaterials wurde darauf geachtet, dass die Stecklingsqualität möglichst einheitlich ist. Für alle Versuche wurden jeweils 30 Stecklinge aus 3 Wiederholungen ausgewertet.

Die unbewurzelten Stecklinge wurden in 104-er Trays (QuickPot® long life trays 104 R, Herkuplast GmbH, Kubern, Deutschland) gesteckt. Als Substrat diente Perlit (Perligran®, Knauf, Iphofen, Deutschland). Die Bewurzelung der Stecklinge erfolgte zum einen im Gewächshaus und zum anderen in einer Klimakammer unter Ausschluss von Tageslicht. Die sonstigen Umweltbedingungen wurden hierbei gleichermaßen eingestellt. Während der Bewurzelungszeit betrug die Temperatur

konstant 24 °C. Bis zur Bildung der ersten Adventivwurzeln herrschte eine Luftfeuchtigkeit von > 90 %. Die Belichtungszeit wurde auf 16 h /Tag festgelegt. Versorgt wurden die Pflanzen mit einer Düngelösung 1 g L<sup>-1</sup> Ferty® 1 (Ferty®1 Red, Planta Düngemittel, Regenstauf, Deutschland) und der pH-Wert der Düngelösung wurde auf 4,6 eingestellt. Während der Kulturzeit von 21 Tagen, wurden die Pflanzen den Lichtintensitäten von 40  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und 80  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ausgesetzt. Hierbei wurden jeweils unterschiedliche Spektralbereiche verwendet: Rotes Licht (600-700 nm – Peak bei 660 nm), blaues Licht (400-500 nm – Peak bei 440 nm), weißes Licht (400-700 nm – 4000 K > Ra 80) und eine Mischung aus diesen drei Farben. In einem weiteren Durchgang wurde jede Einzelfarbe zusätzlich mit Far Red (730 nm) ergänzt exakte spektrale Verteilung kann den Grafiken Abbildung 20 Abbildung 29 entnommen werden. Diese Lichtbehandlungen wurden alle durch das (Produktionsmodul III, DH Licht, Wülfrath, Deutschland) umgesetzt. Als Kontrollvariante diente die herkömmliche Belichtung mit einer 400 Watt Natriumdampf-Hochdrucklampe (Gehäuse: MGR 400 SONT, Philips, Hamburg, Germany; Leuchtmittel: Master Agro 400 W, Philips, Hamburg, Germany).

#### **Aufnahme der Auswertungsparameter**

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wurden unterschiedlichste Parameter herangezogen.

#### **Pflanzenlänge**

Vor Aufnahmebeginn der einzelnen Parameter wurden die bewurzelten Jungpflanzen vorsichtig aus dem Tray entfernt und das Perlite durch mehrmaliges Stippen in lauwarmem Wasser aus dem Wurzelraum entfernt. Hierbei wurde darauf geachtet kein Wurzelwerk zu verlieren. Zur Vermessung des Sprosses wurde mit einem Lineal die Länge von der Basis bis zur Vegetationspunkt vermessen und notiert.

#### **Blattfläche und Wurzellänge**

Die Blattfläche, Blattanzahl und Wurzellänge wurde mit Hilfe eines Wurzelscanners (Epson perfection V700 Photo, Suwa, Nagano, Japan) aufgezeichnet und mit den Softwarepaketen WinFolia und WinRhizo (WinFolia zur Blattanalyse und WinRhizo zur Wurzelanalyse, Regent Instruments Canada Inc., Québec, Canada) ausgewertet. Die Blätter wurden per Hand vorsichtig abgetrennt und zur Auswertung auf den Scanner gelegt. Die Wurzeln wurden vom Rest der Pflanze abgetrennt und in eine Schale mit 3 mm Wasser gelegt und ebenfalls eingescannt.

### **Trockengewicht von Spross und Wurzel**

Die ausgewaschenen Pflanzenteile wurden zur Bestimmung des Trockengewichtes in Wurzel und Spross getrennt. Bevor das Frischgewicht bestimmt wurde, wurden alle noch nassen Wurzeln auf ein frisches Küchenpapier gelegt und von sämtlichen Wasserrückständen befreit. Der Spross wurde von den Wurzeln abgetrennt und ebenfalls von sämtlichen Rückständen (Perlite und Wasser) befreit. Die präparierten Pflanzenteile wurden in ausgewogene Aluschalen gelegt und das Frischgewicht mit einer Feinwaage (Mettler AE160, Mettler-Toledo GmbH, Greifensee, Switzerland) bestimmt. Zur Bestimmung der Trockensubstanz wurden die Proben anschließend für 72 h bei 60 °C in einem Trockenschrank (MFE 800, Memmert GmbH & Co. KG, Schwabach, Germany) dehydratisiert. Durch anschließendes Rückwiegen der Proben wurde das Trockengewicht bestimmt.

### **Blatt- und Substrattemperatur**

Während der gesamten Versuche wurden die Blatt- und Substrattemperatur überwacht. Hierzu wurde mit Hilfe der MiniPam II (Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Germany) die Blatttemperatur über das enthaltene Kontaktthermometer aufgezeichnet. Dazu wurde jeweils das oberste Blatt, welches der Lichtquelle exponiert war gemessen. Die Substrattemperatur wurde mit Hilfe eines Einstich-Thermometers gemessen. (Profi Digital-Thermometer, STEP Systems GmbH, Nürnberg, Germany). Die Messungen der Blatt- und Substrattemperatur fanden jeweils eine Stunde nach Belichtungsbeginn statt.

### **Kohlenhydratgehalt**

Für die Bestimmung der Kohlenhydrate wurde jeweils 0,1 g Blattmaterial, von den dem Licht exponierten Blättern, eingewogen und mit flüssigem Stickstoff homogenisiert. Unter Zugabe von insgesamt 5 ml 80 %-iger Aceton Lösung und einer Stunde schütteln wurden die Kohlenhydrate aus dem homogenisierten Pflanzengewebe extrahiert. Der Überstand wurde abpipetiert und 1 ml in ein frisches 1,5 ml Eppendorf Gefäß überführt. Das Pellet verblieb im bisherigen Falcongefäß.

Der Überstand wurde bei 60 °C in einem Heizblock (HX-1, VWR International GmbH, Darmstadt, Deutschland) vollständig evaporisiert. Anschließend wurde der verbleibende Zucker in 1 ml Aqua dest. resuspendiert. Mit Hilfe der Enzykits von

Thermofischer (Glukose, Saccharose, Fruktose und Stärke) konnte er Gehalt an Kohlenhydraten gemessen werden.

## Ergebnisse

### Ergebnisse der Lichtintensität und spektralen Verteilung

In Abbildung 2 -Abbildung 19 ist Verteilung der Lichtintensität auf der Kulturfläche dargestellt. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die Ausleuchtung der Versuchsfläche mit der Natriumdampf-Hochdrucklampe bei einer Lichtintensität von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Die Natriumdampf-Hochdrucklampe erreichte bei beiden Lichtintensitäten eine sehr gleichmäßige Ausleuchtung der Versuchsfläche. Es sind keinerlei „Hot Spots“ zu erkennen. In der Belichtungsvariante mit rein rotem Licht (660 nm), wie in Abbildung 4 und Abbildung 5 zu erkennen ist, herrscht bei der  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  Variante in der Mitte der Versuchsfläche eine höhere Lichtintensität. Die Ausleuchtung ist nicht mehr so gleichmäßig wie mit der Natriumdampf-Hochdrucklampe. Bei der  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  Variante hingegen ist die Ausleuchtung etwas gleichmäßiger. Bei den übrigen Belichtungsvarianten, ausgenommen Abbildung 10 und Abbildung 11 kann der gleiche Sachverhalt festgestellt werden. Die Ausleuchtung mit einzelnen Spektralbereichen ist nicht optimal. Werden hingegen sämtliche verfügbaren Spektralbereiche parallel verwendet, lässt sich eine, der Natriumdampf-Hochdrucklampe, ähnliche Lichtverteilung auf der Kulturfläche erreichen. Die Abbildung 12 -Abbildung 17 zeigen die Ausleuchtung mit zusätzlichem Far Red (730 nm), auch in diesen Fällen ist die Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einzelnen Spektralfarben nicht optimal. Lediglich bei der Nutzung sämtlicher, zur Verfügung stehender, Leuchtdioden kann eine gleichmäßige Ausleuchtung wie in Abbildung 18 und Abbildung 19 zu sehen ist, erreicht werden.

Abbildung 20 -Abbildung 29 stellen die Spektrale Verteilung der verwendeten Leuchten und des Tageslichtes mit der relativen Photonenflussrate dar. Die Natriumdampf-Hochdrucklampe (Abbildung 20) hat eine einen Großteil ihrer Lichtemission im grüngelben Bereich (540 nm - 600 nm) vergleichend hierzu ist in Abbildung 21 die Spektrale Verteilung zur Mittagszeit in Veitshöchheim dargestellt. Der Bereich, der mit dem Messgerät erfasst werden kann, deckt die gesamte Breite von 300 - 900 nm ab. Das Spektrum der LED-Lichtquelle bewegt sich je nach eingestelltem Spektralbereich zwischen 600 - 700 nm mit einem Peak von 660 nm (Abbildung 22), 400 - 500 nm mit einem Peak von 440 nm (Abbildung 23) und im

Bereich von 400 - 700 nm (Abbildung 24) bei den weißen LEDs. Die Variante Mix (

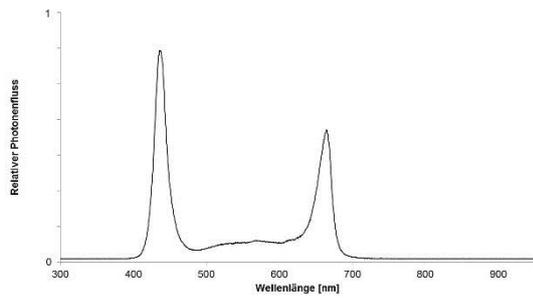


Abbildung 25) besteht ebenfalls aus dem gesamten PAR Bereich von 400 - 700 nm, enthält jedoch einen erhöhten Rot- sowie Blauanteil.

Abbildung 26 -Abbildung 29 zeigen dieselben Spektralbereiche wie in Abbildung 22 bis 25, jedoch um den Bereich Far Red mit einem Peak von 730 nm ergänzt.

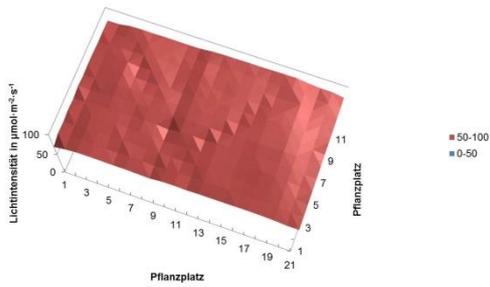


Abbildung 2: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Natriumdampf-Hochdrucklampe. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

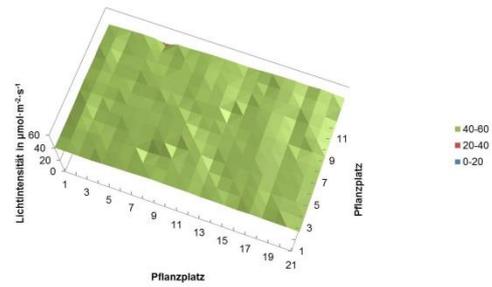


Abbildung 3: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Natriumdampf-Hochdrucklampe. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

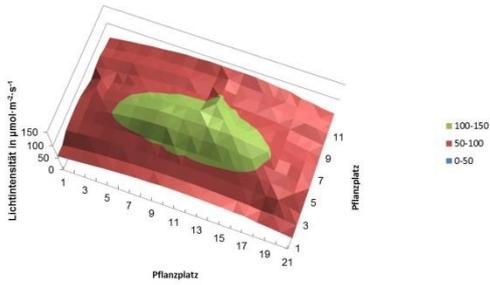


Abbildung 4: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit roten LEDs (660 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

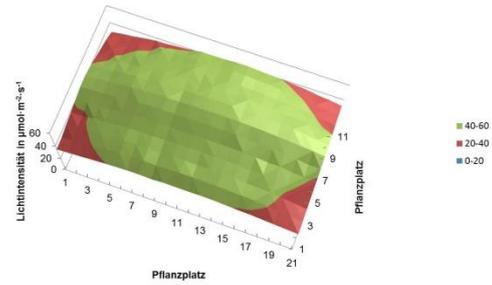


Abbildung 5: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit roten LEDs (660 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

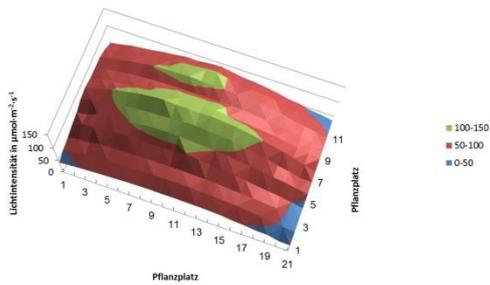


Abbildung 6: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit blauen LEDs (440 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

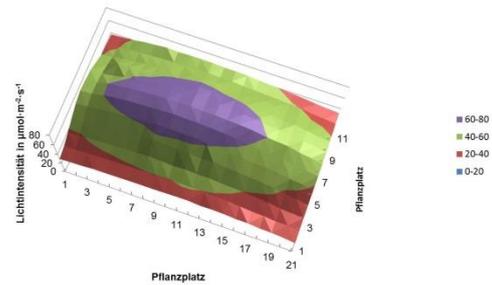


Abbildung 7: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit blauen LEDs (440 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

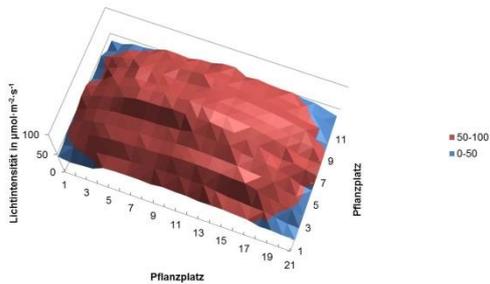


Abbildung 8: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit weißen LEDs (4000K Ra >80). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

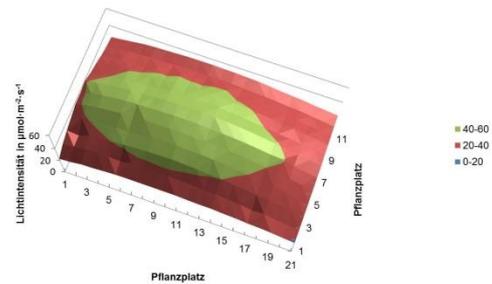


Abbildung 9: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit weißen LEDs (4000K Ra >80). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

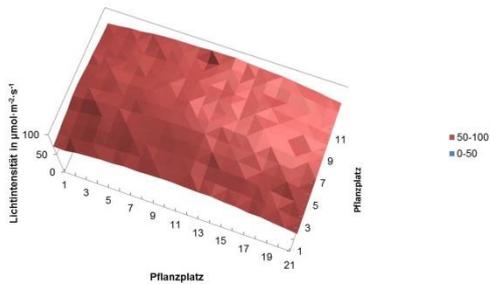


Abbildung 10: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Mischung aus LEDs (400 -700 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

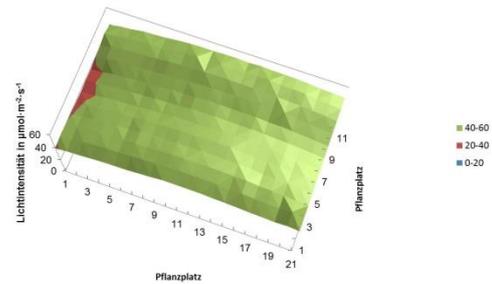


Abbildung 11: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Mischung aus LEDs (400 -700 nm). Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

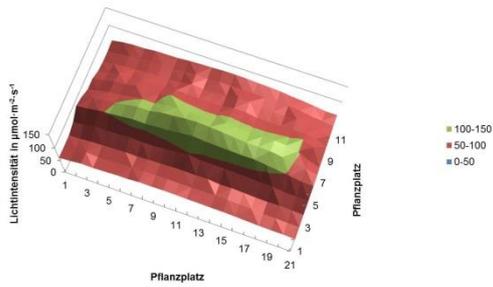


Abbildung 12: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit roten (660 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

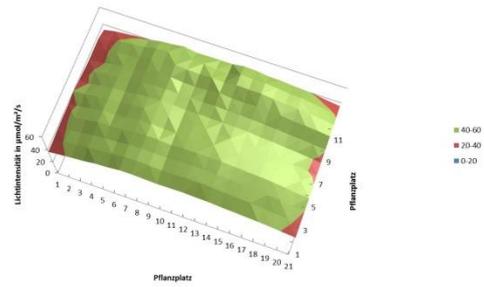


Abbildung 13: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit roten (660 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

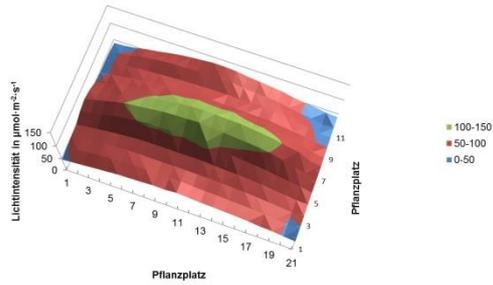


Abbildung 14: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit blauen (440 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

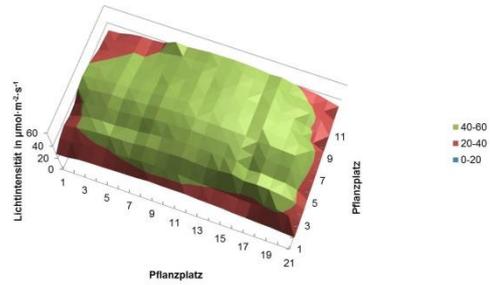


Abbildung 15: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit blauen (440 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

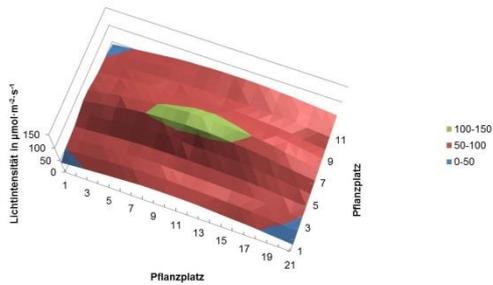


Abbildung 16: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit weißen (4000 K Ra >80) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

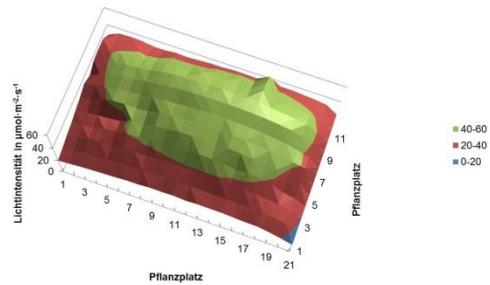


Abbildung 17: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit weißen (4000 K Ra >80) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

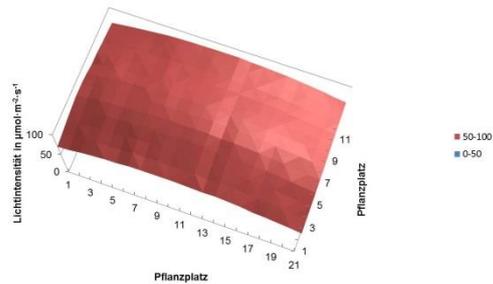


Abbildung 18: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Mischung aus LEDs (400-700 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

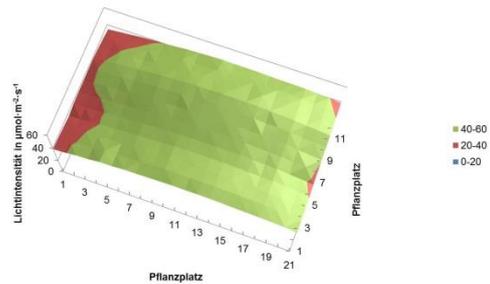


Abbildung 19: Ausleuchtung der Versuchsfläche mit einer Mischung aus LEDs (400-700 nm) und dunkelroten (730 nm) LED. Die durchschnittliche Lichtintensität beträgt  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

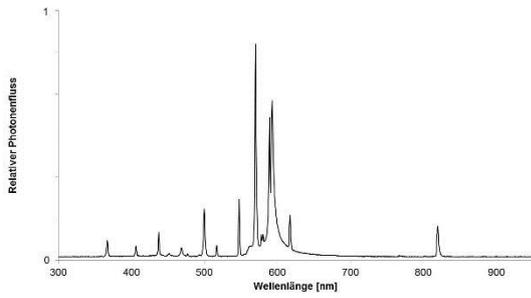


Abbildung 20: Spektrale Verteilung der Natriumdampf-Hochdrucklampe (Philips Agro 400)

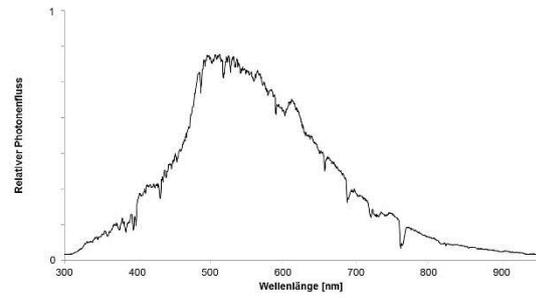


Abbildung 21: Spektrale Verteilung des Tageslichtes zur Mittagszeit (13.02.2017)

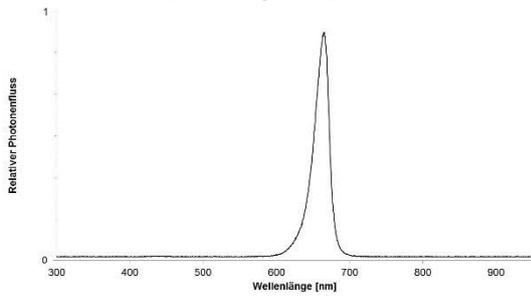


Abbildung 22: Spektrale Verteilung der roten LEDs (Peak 660 nm, Bereich 600-700 nm)

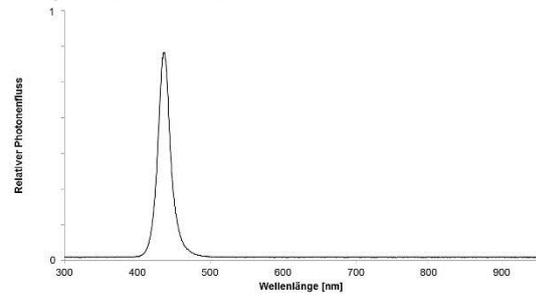


Abbildung 23: Spektrale Verteilung der blauen LEDs (Peak 440 nm, Bereich 400-500 nm)

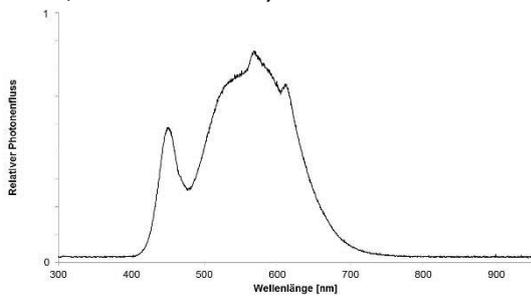


Abbildung 24: Spektrale Verteilung der weißen LEDs (4000 K Ra>80)

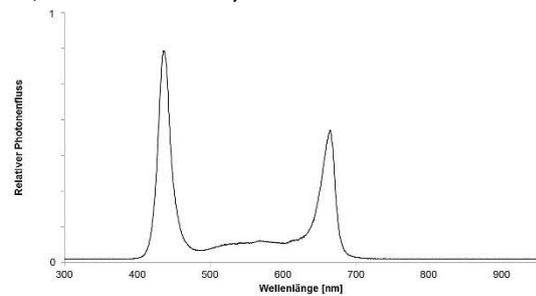


Abbildung 25: Spektrale Verteilung der roten, blauen und weißen LEDs inkl. Far red (730 nm)

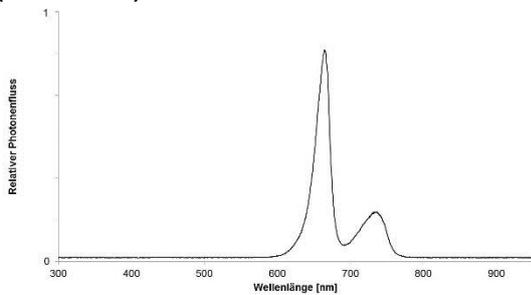


Abbildung 26: Spektrale Verteilung der roten LEDs (Peak 660 nm, Bereich 600-700 nm) inkl. Far red (730 nm)

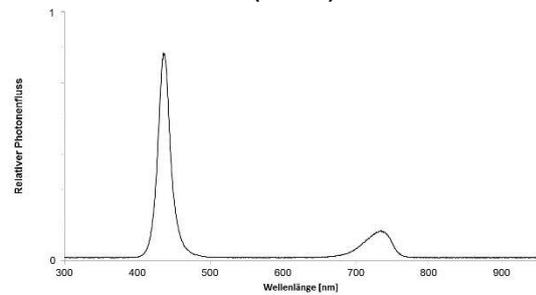


Abbildung 27: Spektrale Verteilung der blauen LEDs (Peak 440 nm, Bereich 400-500 nm) inkl. Far red (730 nm)

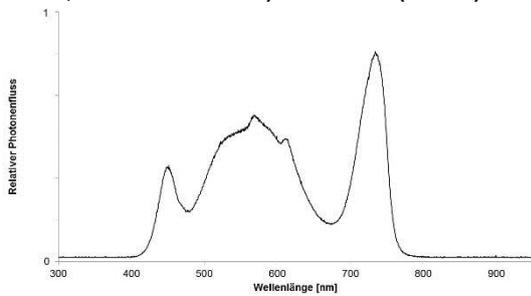


Abbildung 28: Spektrale Verteilung der weißen LEDs (4000 K Ra>80) inkl. Far red (730 nm)

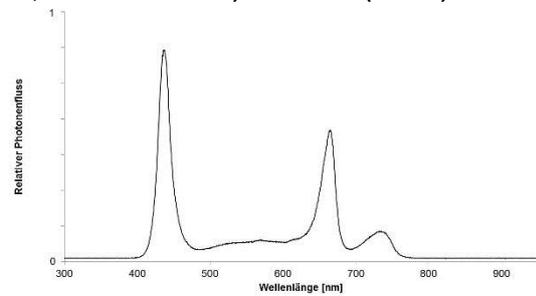


Abbildung 29: Spektrale Verteilung der roten, blauen und weißen LEDs inkl. Far red (730 nm)

### **Sprosslänge von Calibrachoa MiniFamous Neo Royal Blue**

Abbildung 30 zeigt vergleichend die Sprosslänge zwischen  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  mit den jeweiligen Belichtungsbehandlungen in der Klimakammer auf. Dargestellt sind die Mittelwerte inklusive Standardfehler aus jeweils 10 Individuen über drei Wiederholungen. Werte mit gleichen Buchstaben kennzeichnen keinen signifikanten Unterschied. Die statistische Auswertung ist jeweils für  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  getrennt zu betrachten.

Betrachtet man die verschiedenen Belichtungen mit  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  fällt auf, dass sich die Varianten HPS, rot, weiß und mix nicht signifikant voneinander unterscheiden. Lediglich die mit blauem Licht behandelten Pflanzen weisen mit durchschnittlich 10,94 cm Sprosslänge ein starkes Streckungswachstum auf. Die Varianten, in denen zusätzlich Far Red verwendet wurde, zeigten ein noch stärkeres Wachstum und unterscheiden sich signifikant von den Belichtungen ohne Far Red. Hierbei ist zwischen blau + FR und weiß + FR kein signifikanter Unterschied in der Sprosslänge nachweisbar. Die Varianten rot + FR und mix + FR sind signifikant kompakter, wobei in diesem Fall die Belichtung mix + FR, unter der Far Red Varianten, die kompaktesten Pflanzen aufzeigt.

Konzentriert man sich auf die Belichtungsintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ist festzustellen, dass unter den Belichtungsvarianten HPS, rot, blau, weiß und mix ebenfalls die blau belichteten Versuchspflanzen ein stärkeres Streckungswachstum aufzeigen. Sie zeigen zudem keinen signifikanten Unterschied zu den Far Red Varianten rot + FR und blau + FR. Innerhalb der Far Red Varianten besteht zwischen rot + FR und blau + FR kein Unterschied. Weiß + FR und mix + FR zeigen zudem ein kompakteres Wachstum als die übrigen Far Red varianten.

Ein Vergleich zwischen den beiden Lichtintensitäten mit  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  weist keine signifikanten Unterscheide auf.

Abbildung 31 zeigt die Versuchsergebnisse, die in den Gewächshäusern generiert wurden. Betrachtet man die Behandlungen HPS, Rot Blau, Weiß und Mix mit  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , fällt auf, dass die Sprosslänge der blau belichteten Pflanzen, erhöht ist. Die mit rotem Licht behandelten Pflanzen zeigen hingegen den kompaktesten Wuchs auf. Zwischen varianten HPS, weiß und mix besteht kein signifikanter Unterschied. Zieht man zusätzlich noch die Varianten bei denen ein erhöhter Far Red Anteil enthalten ist, ist die rot + FR Variante am kompaktesten geblieben, blau + FR,

weiß + FR und mix + FR hingegen haben während des versuchszeitraumes längere Sprossachsen ausgebildet. Dabei zeigt die Belichtung mit weiß + FR (17,56 cm) den größten Längenzuwachs bei der Kultur. Anschließend folgt die Belichtung mit blau + FR (15,8 cm) und dann mix + FR (12,82 cm).

Wird die Lichtintensität auf  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  reduziert, besteht zwischen den Belichtungsvarianten rot, weiß, mix und rot + FR kein signifikanter Unterschied. Die größte Sprosslänge wurde bei mix + FR, weiß + FR und blau + FR erreicht. Hierbei besteht zwischen blau + FR, weiß + FR und mix + FR kein signifikanter Unterschied. Die mit 440 nm belichteten Pflanzen erreichen eine durchschnittliche Höhe von 9,46 cm und sind somit signifikant länger, als die Belichtungsvarianten HPS, rot, und weiß, aber kleiner als mix + FR. Zu den übrigen Varianten besteht kein signifikanter Unterschied.

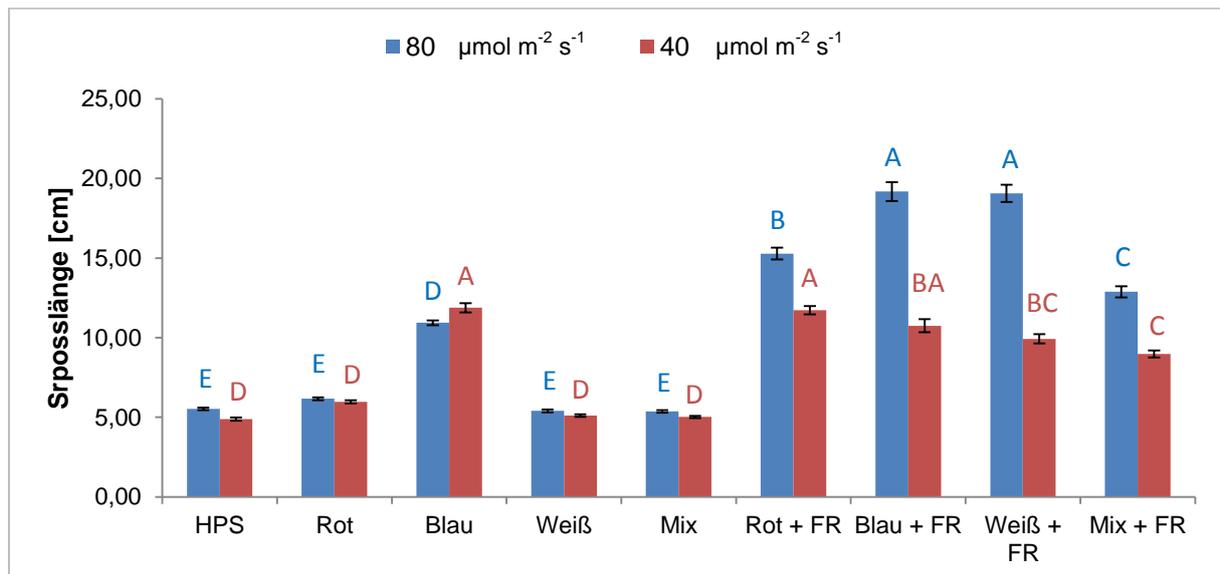


Abbildung 30: Mittelwerte und Standardfehler der Sprosslänge von jeweils 10 *Calibrachoa*-Jungpflanzen. 21 Tage nach dem Stecken in der Klimakammer. Lichtintensitäten:  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ )

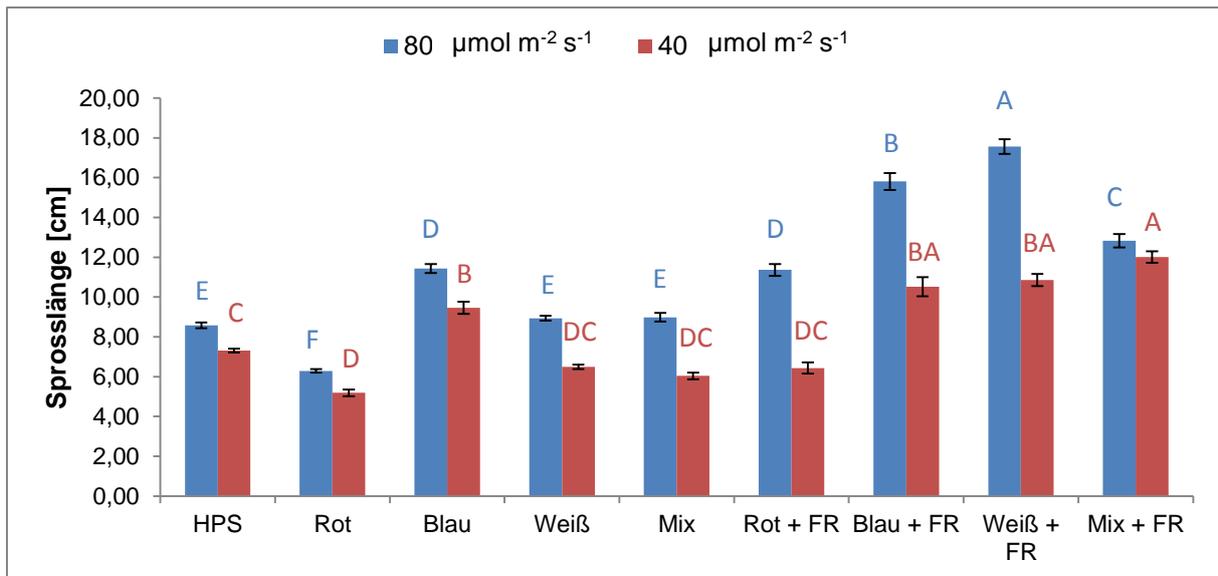


Abbildung 31: Mittelwerte und Standardfehler der Sprosslänge von jeweils 10 *Calibrachoa*-Jungpflanzen. 21 Tage nach dem Stecken im Gewächshaus. Lichtintensitäten: 80 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> und 40 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> unter verschiedenen Spektralbereichen (n=3) Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD (p = 0,05)

### Trockensubstanz von Spross und Wurzel

In Abbildung 32 ist die Sprosstrockenmasse der in der Klimakammer kultivierten Pflanzen dargestellt. Bei Betrachtung der 80 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ist zu erkennen, dass die Belichtungsvariante HPS mit durchschnittlich 0,084 g die höchste Trockenmasse aufweist. Vergleichbar hoch ist die Trockenmasse der Sprosse bei den Belichtungsvarianten rot +FR, weiß + FR und mix + FR. Die Belichtung mit blau + FR ist signifikant geringer als bei HPS und Mix + FR. Die Belichtungsvarianten rot, blau, weiß und mix unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

Vergleicht man die Ergebnisse mit einer Belichtungsintensität von 40 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ist zu erkennen, dass die Varianten HPS, rot, weiß, mix, blau + FR und mix + FR die geringsten Trockenmassenwerte aufzeigen, jedoch können keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die größte Trockenmasse wurde unter weiß + FR festgestellt. Ein signifikanter Unterschied der weiß + FR Variante besteht nur zur HPS und blau + FR Variante.

Abbildung 33 stellt die Versuchsergebnisse der Sprosstrockenmasse aus den Versuchen im Gewächshaus dar. Bei Betrachtung der Ergebnisse mit einer Lichtintensität von 80 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ist zu erkennen, dass die Belichtungsvarianten rot, rot + FR und blau + FR, vergleichend zu den übrigen Belichtungsvarianten, eine geringere Trockensubstanz aufweisen. Weitere signifikante Unterschiede sind nicht

feststellbar. Bei einer Belichtungsintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  hingegen, kann zwischen keiner der Belichtungsvarianten ein Unterschied in der Spross trockenmasse festgestellt werden.

Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse der Wurzel trockenmasse aus den Klimakammerversuchen. Bei Betrachtung Ergebnisse mit einer Belichtungsintensität von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  fällt auf, dass die Belichtungsvarianten blau und weiß eine signifikant geringere Wurzel trockenmasse aufweisen. Geringer, aber nicht signifikant liegt die Wurzel trockenmasse der Belichtungsvariante rot und rot + FR. Die höchsten Werte sind in den Belichtungsvarianten HPS, mix, blau + FR, weiß + FR und mix + FR zu erkennen. Bei einer Lichtintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ist die höchste Wurzel trockenmasse bei der Belichtungsvariante weiß + FR festzustellen, diese ist jedoch nur im Vergleich zu den Varianten HPS, und blau + FR höher, bei allen übrigen Varianten besteht kein signifikanter Unterschied.

Abbildung 35 stellt die Ergebnisse der Wurzel trockenmasse aus den Versuchen im Gewächshaus dar. Bei einer Belichtungsintensität von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ist deutlich zu erkennen, dass die Belichtungsvarianten weiß + FR und mix + FR die höchsten Trockenmasse bei den Wurzeln aufzeigen. Nicht signifikant, aber etwas geringer fällt die Trockenmasse bei der Belichtungsvariante rot + FR aus. Die übrigen Belichtungsvarianten weisen keine signifikanten Unterschiede auf. Die geringsten Werte bei der Trockensubstanzbestimmung sind bei der Belichtung mit rotem Licht zu erkennen. Bei  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  zeichnet sich ein ähnliches Bild ab. Die höchsten Trockenmassewerte wurden bei den Belichtungsvarianten weiß + Fr und mix + FR festgestellt, ein signifikant geringerer Wert ist allerdings nur im Vergleich zu den Varianten rot, blau und weiß zu erkennen. Zwischen den übrigen Varianten bestehen keine signifikanten Unterschiede.

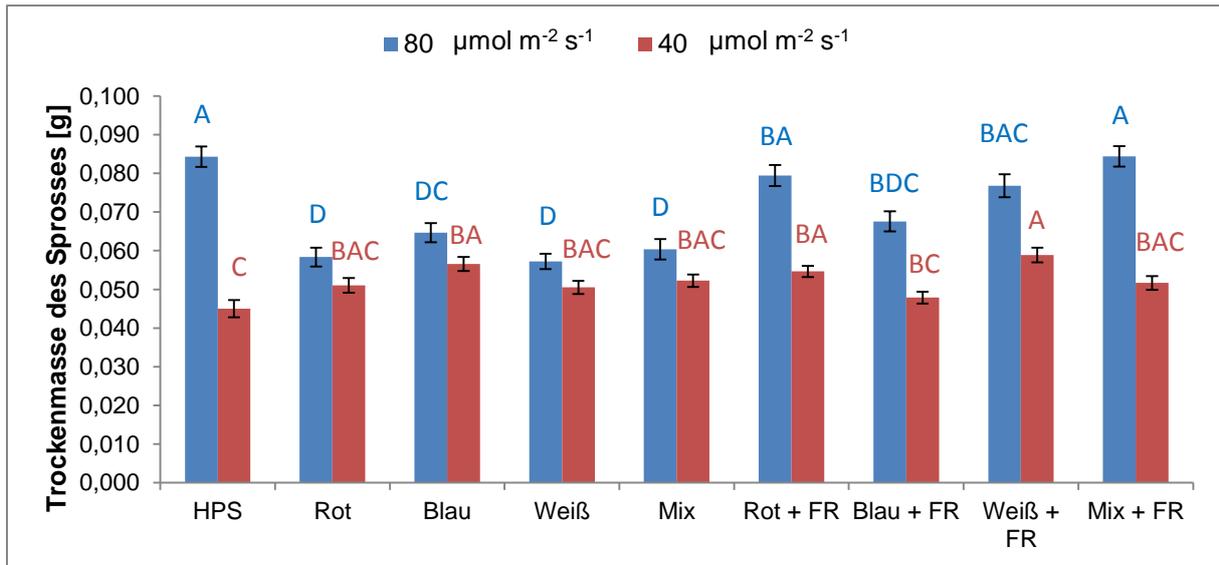


Abbildung 32: Mittelwerte und Standardfehler des Sprosstrockengewichtes aus jeweils 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen mit einer Kulturzeit von 21 Tagen in der Klimakammer. Lichtintensitäten von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen. Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ )

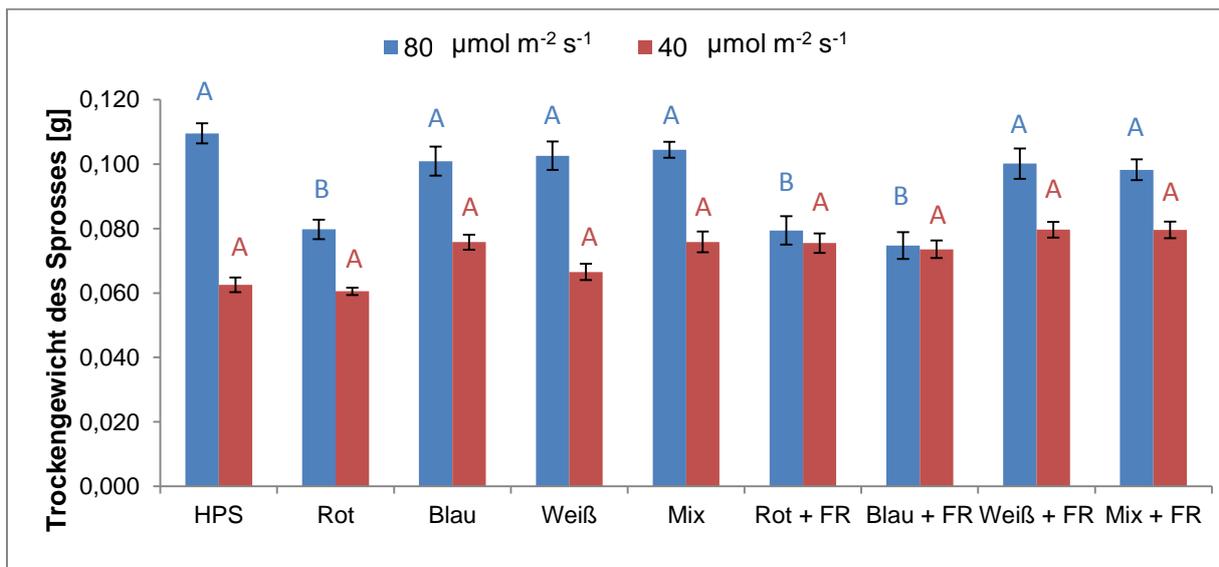


Abbildung 33: Mittelwerte und Standardfehler des Sprosstrockengewichtes aus jeweils 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen mit einer Kulturzeit von 21 Tagen im Gewächshaus. Lichtintensitäten von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen. Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ )

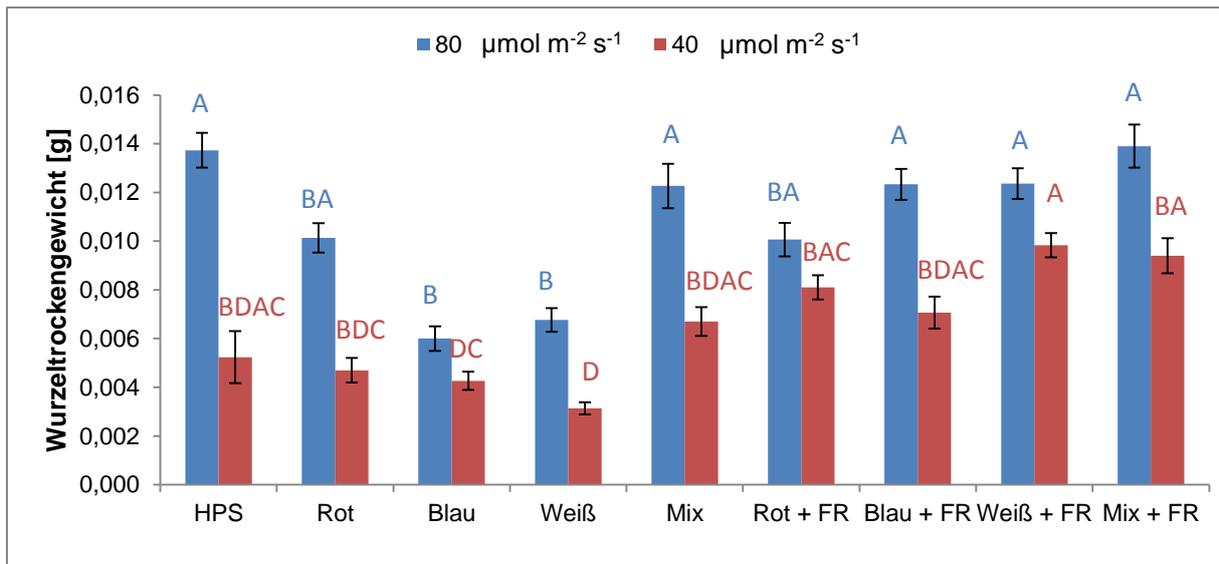


Abbildung 34: Mittelwerte und Standardfehler des Wurzelrockengewichtes aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer ( $n=3$ ). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ )

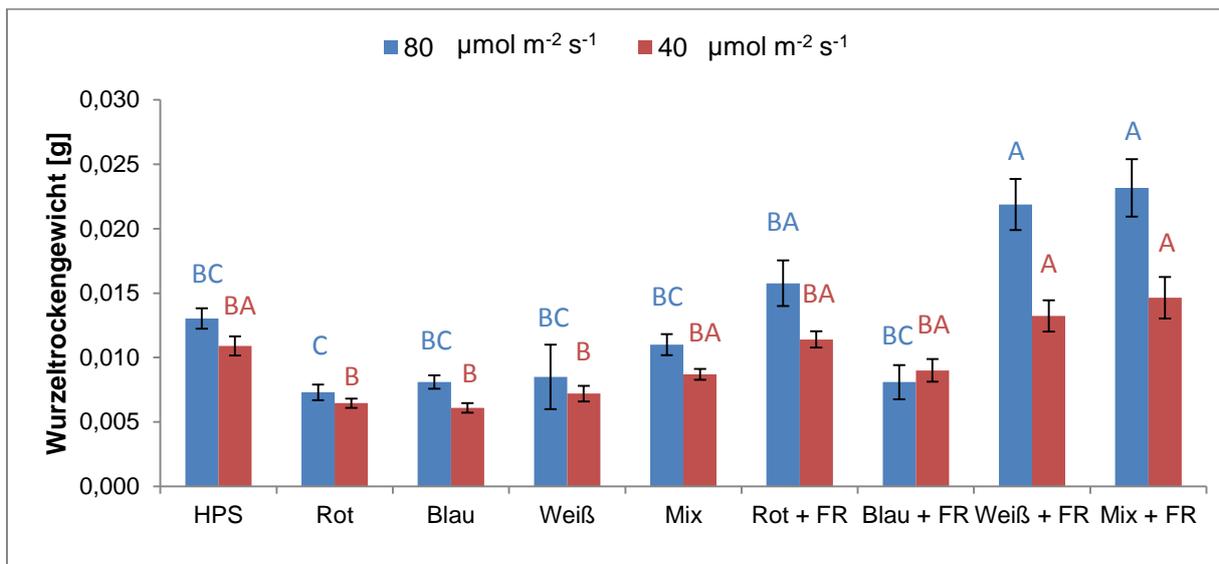


Abbildung 35: Mittelwerte und Standardfehler des Wurzelrockengewichtes aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus ( $n=3$ ). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ )

### Ergebnisse der Blattfläche und Wurzellänge

Abbildung 36 zeigt die ermittelte Blattfläche der Versuche aus der Klimakammer. Die höchste Blattfläche mit einer Lichtintensität von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  tritt bei Pflanzen aus den Belichtungsvarianten mix + FR, blau und rot + FR auf. Alle übrigen Belichtungsvarianten zeigen eine verminderte Blattfläche, wobei sich die Variante blau + FR nicht signifikant von den Belichtungsvarianten blau und rot + FR unterscheidet. Bei einer Belichtungsintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  weist die

Belichtungsvariante rot + FR die größte Blattfläche auf. Signifikant geringer sind alle übrigen Belichtungsvarianten, wobei die Belichtung mit der Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS) die geringste Blattfläche aufweist. Sie ist jedoch nur im Vergleich zu rot + FR, blau + FR, weiß + FR mix + FR und blau, signifikant geringer.

Die Versuche aus dem Gewächshaus sind in Abbildung 37 dargestellt. Die größte Blattfläche, bei einer Lichtintensität von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , kann mit der weißen Zusatzbelichtung erreicht werden, wobei es keinen signifikanten Unterschied zu den Belichtungsvarianten rot und mix gibt. Die geringste Blattfläche tritt unter der Belichtungsvariante blau + FR auf, jedoch gibt es zu den mit weiß + FR belichteten Pflanzen keinen signifikanten Unterschied in der Blattfläche, alle übrigen varianten zeigen eine signifikant höhere Blattfläche auf.

Bei einer Lichtintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ist ebenfalls bei der weiß belichteten Variante die höchste Blattfläche zu verzeichnen. Alle anderen Belichtungsvarianten zeigen eine geringe Blattfläche, wobei die Belichtung mit rotem Licht die geringsten Werte aufzeigt. Die Werte bei den Belichtungen HPS, blau, weiß mix und rot + FR sind signifikant geringer, zu den übrigen Belichtungsvarianten besteht kein signifikanter Unterschied.

Abbildung 38 zeigt die Gesamtwurzellänge der Klimakammerversuche. Bei der Lichtintensität von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ist die Gesamtwurzellänge bei der Belichtung HPS mit 101,09 cm und blau + FR mit 90,99 cm am größten. Die Belichtung mit weißem Licht, ist mit 79,16 cm Gesamtwurzellänge etwas geringer, wobei kein signifikanter Unterschied zur HPS und blau + FR Variante besteht. Die geringste Gesamtwurzellänge kann bei der rot belichteten Versuchsvariante beobachtet werden. Hier werden durchschnittlich lediglich 43,17 cm Gesamtwurzellänge erreicht. Es besteht nur zu den Belichtungsvarianten HPS, weiß und blau + FR ein signifikanter Unterschied. Alle übrigen Belichtungsvarianten zeigen keine signifikanten Unterscheide.

Bei der Belichtungsintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  weist die Belichtungsvariante rot + FR mit einer Gesamtwurzellänge von 46,76 cm den größten Wert auf. Etwas geringere Werte zeigen die Belichtungen weiß + FR und mix + FR, wobei in diesen beiden Fällen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden kann. Die geringste Gesamtwurzellänge kann bei der Variante HPS beobachtet werden. Eine Belichtung

mit rot, blau, weiß, mix, erbringt aus statistischer Sicht keine Erhöhung der Gesamtwurzellänge. Diese Varianten unterscheiden sich lediglich zu rot + FR und weiß + FR durch eine signifikant geringere Gesamtwurzellänge.

Die Gesamtwurzellänge der im Gewächshaus kultivierten Pflanzen ist in Abbildung 39 dargestellt. Bei einer Lichtintensität von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ist die Gesamtwurzellänge bei der Belichtungsvariante mix, mit 100,39 cm Länge am höchsten. Eine signifikant geringere Gesamtwurzellänge jedoch, konnte nur bei den Belichtungen blau (35,26 cm) und weiß (64,86 cm) festgestellt werden. Hierbei weist die blau belichtete Variante eine signifikant geringere Gesamtwurzellänge zu allen Belichtungsvarianten, außer weiß, auf.

Betrachtet man die Werte mit der Belichtungsintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  haben die Belichtungsvarianten Blau, mit 60,88 cm, und weiß, mit 53,65 cm, die höchste Gesamtwurzellänge erreicht. Signifikant geringere Werte zu der blau belichteten Variante sind bei allen übrigen Belichtungsvarianten zu erkennen. Hierbei haben rot (27,51 cm), mix + FR (31,57 cm) und blau + FR (33,58 cm) die geringsten Mittelwerte erreicht.

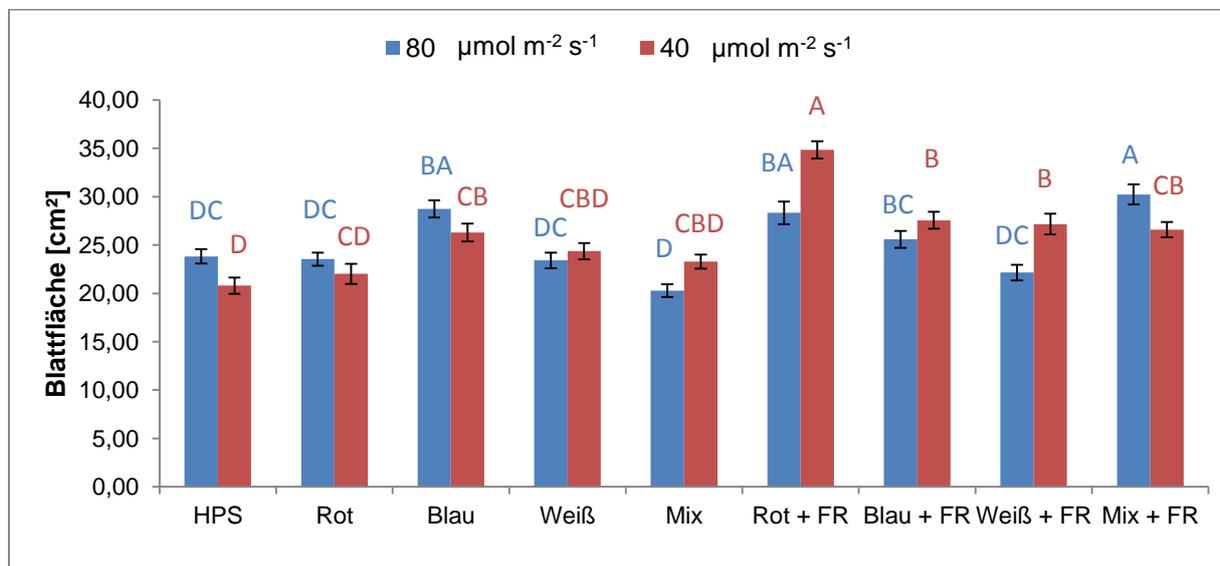


Abbildung 36: Mittelwerte und Standardfehler der Blattfläche aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ )

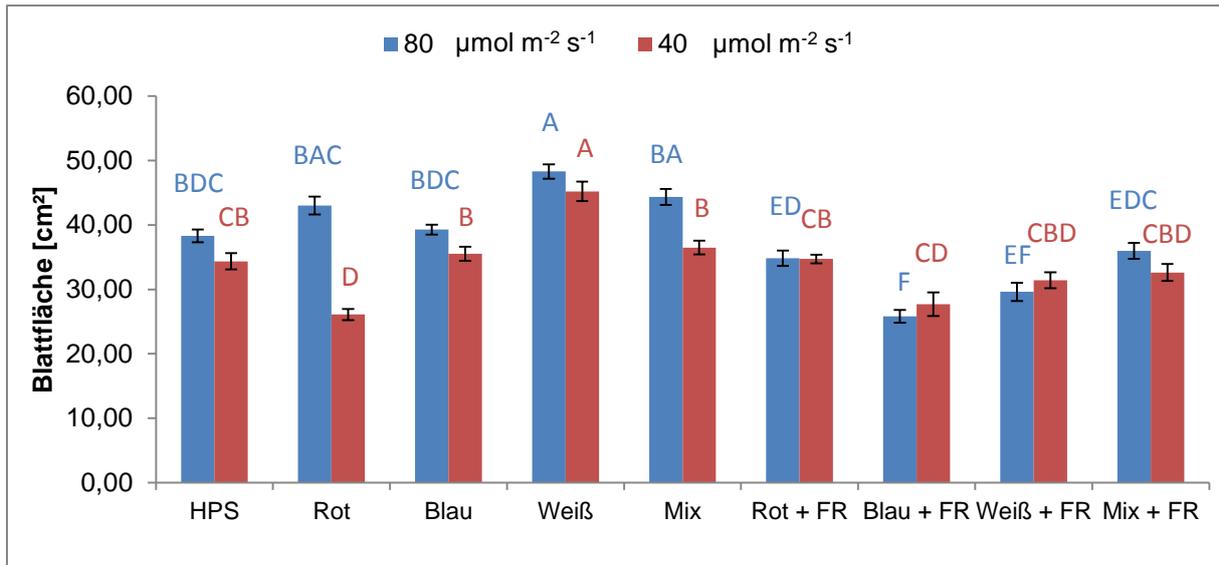


Abbildung 37: Mittelwerte und Standardfehler der Blattfläche aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und 40  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ )

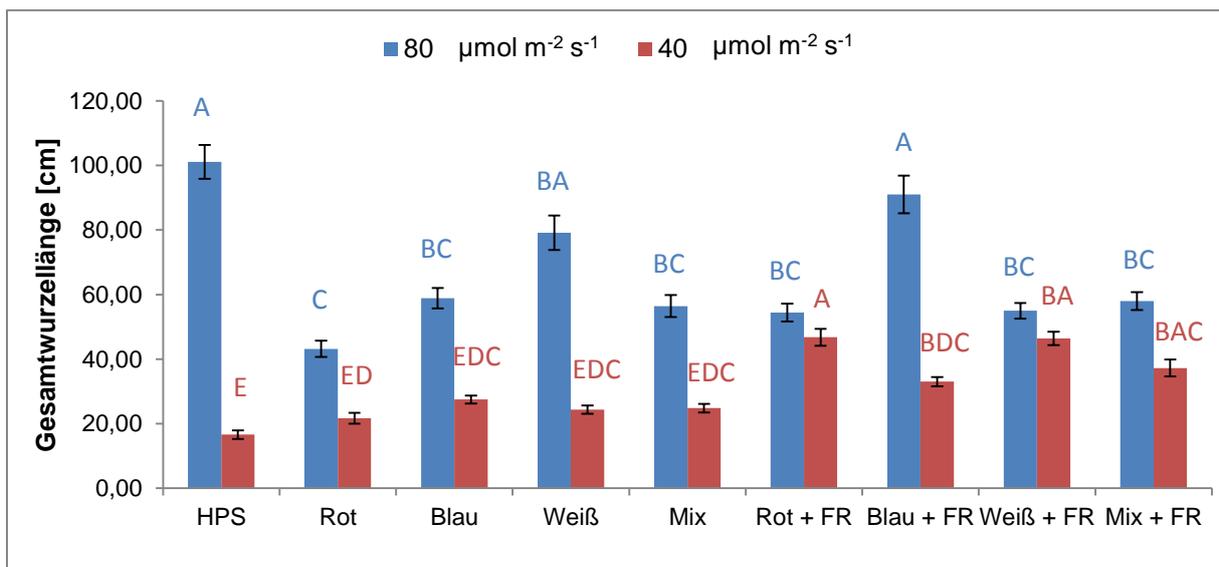


Abbildung 38: Mittelwerte und Standardfehler der Gesamtwurzellänge aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten 80  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und 40  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ )

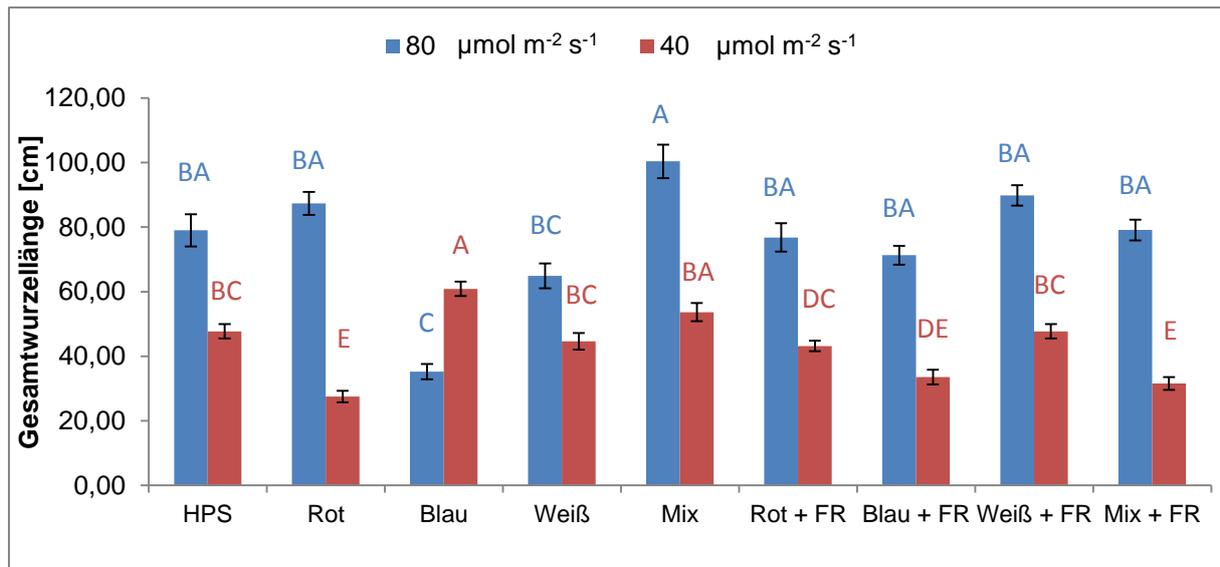


Abbildung 39: Mittelwerte und Standardfehler der Gesamtwurzellänge aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus ( $n=3$ ). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

### Ergebnisse der primären Inhaltsstoffe

Die Gesamtglukose für die Pflanzen aus der Klimakammer ist in Abbildung 40 dargestellt. Vergleicht man die Gesamtglukosegehalte für die Lichtintensität von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , zeigen die Belichtungsvarianten HPS ( $165,9 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), rot ( $153,73 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), weiß ( $148,43 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), und mix ( $129,87 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), keine signifikanten Unterschiede zueinander. Bei Betrachtung der Belichtungsvarianten mit Far Red, sind ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Vergleicht man die Far Red Varianten mit den übrigen Belichtungsvarianten, fällt auf, eine Belichtung mit zusätzlichem Far Red zu einem höheren Gesamtglukosegehalt führt, auch wenn dieser nicht signifikant ist. Bei einer Lichtintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ist der höchste Glukosegehalt bei der Belichtung mit blauem Licht zu erkennen ( $163,83 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), ebenfalls hoch, aber nicht signifikant unterschiedlich ist der Gehalt bei der Belichtungsvariante mix ( $135,20 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ). Die niedrigsten Werte sind in diesem Fall bei Varianten rot + FR, blau + FR, weiß + FR und mix + FR zu verzeichnen.

Abbildung 41 zeigt den Glukosegehalt aus den Versuchen im Gewächshaus. Bei hoher Lichtintensität mit  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , kann innerhalb der einzelnen Belichtungsvarianten kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Es ist jedoch eine Tendenz zu beobachten, in der die Varianten blau + FR, weiß + FR und

mix + FR geringere Werte aufzeigen. Bei einer Lichtintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , sind ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Lichtbehandlungen festzustellen.

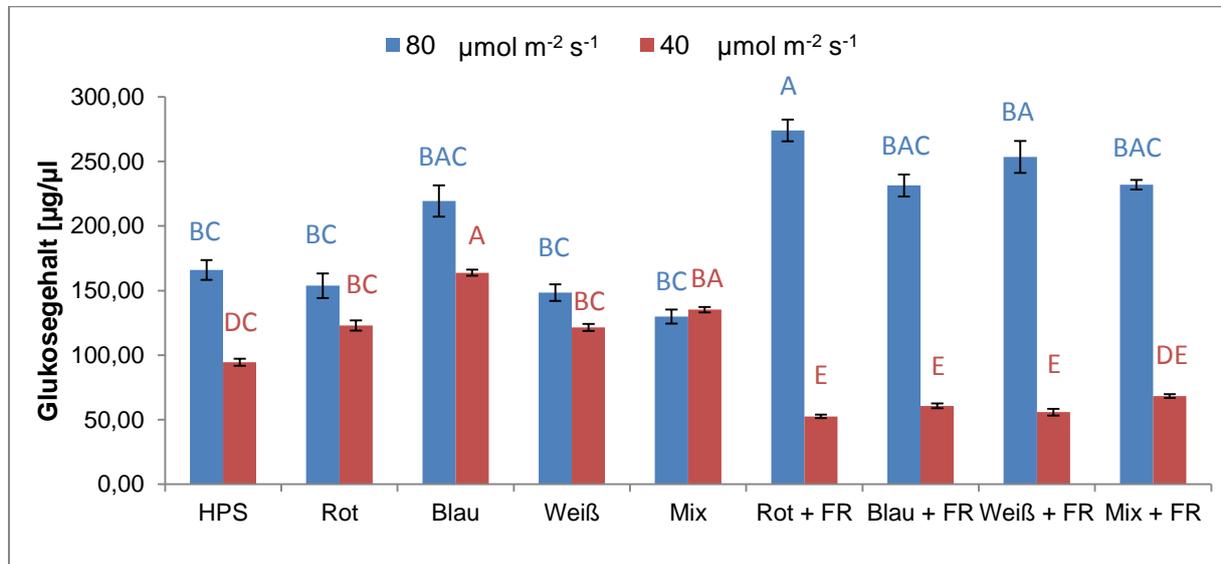


Abbildung 40: Mittelwerte und Standardfehler des Glukosegehaltes aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

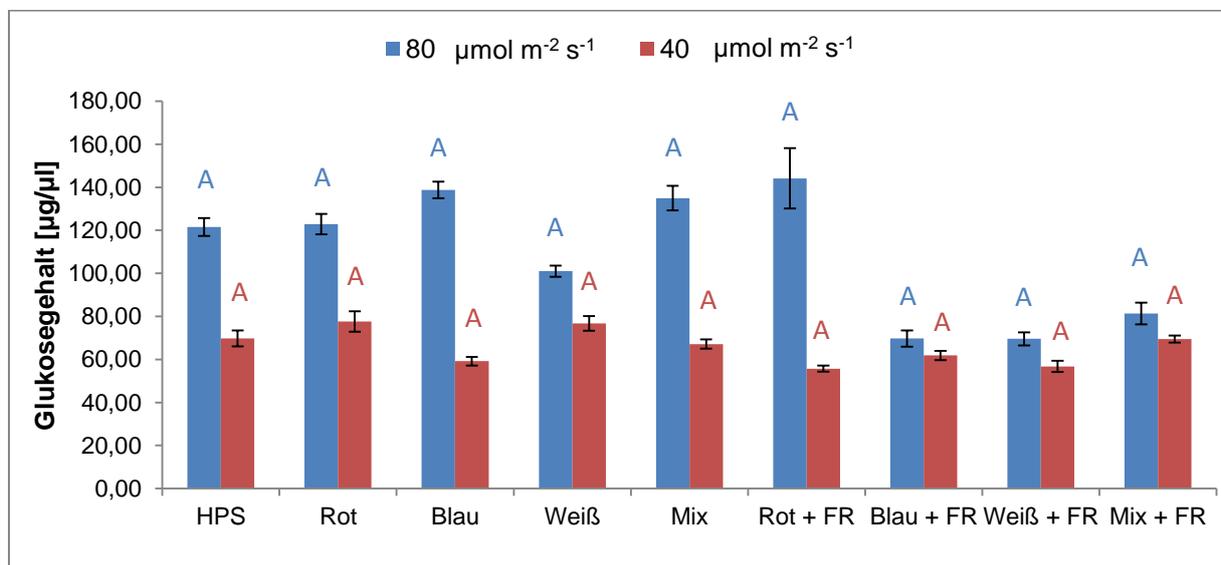


Abbildung 41: Mittelwerte und Standardfehler des Glukosegehaltes aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

In Abbildung 42 ist der Fruktosegehalt der Versuche aus der Klimakammer dargestellt. Die höchsten Fruktosewerte können bei einer Lichtintensität von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter den Belichtungsvarianten rot + FR ( $229,09 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), mix + FR ( $195,04 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), weiß + FR ( $181,53 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) und blau + FR ( $145,35 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) festgestellt werden. Bei den übrigen Belichtungsvarianten zeigen die Pflanzen einen sehr viel geringeren Fruktosegehalt, der bewegt zwischen  $20,17 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$  und  $94,53 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ .

Bei einer Lichtintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  kann der höchste Fruktosegehalt unter blauer Belichtung festgestellt werden ( $90,53 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ). Die Pflanzen, die den Belichtungsvarianten HPS, rot, weiß und mix ausgesetzt sind, zeigen im Vergleich zur blauen Belichtung einen signifikant geringeren Anteil an Fruktose, sind jedoch untereinander nicht signifikant voneinander verschieden. Ebenso zeigen die Varianten, die zusätzlich Far Red erhalten haben, einen geringeren Anteil an Fruktose.

Die Fruktosegehalte aus den Versuchen im Gewächshaus sind in Abbildung 43 dargestellt. Die beiden höchsten Werte sind bei  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in den Belichtungsvarianten rot + FR ( $108,61 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) und blau ( $105,32 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) festzustellen. Weitaus geringer, jedoch ohne signifikanten Unterschied sind die Fruktosegehalte aus den Belichtungsvarianten mix + FR ( $53,93 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), HPS ( $51,8 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) und weiß + FR ( $47,58 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ). Die geringsten Werte mit signifikantem Unterschied, im Vergleich zu den Belichtungsvarianten rot + FR und blau, sind unter den Belichtungsvarianten weiß ( $8,37 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), rot ( $15,19 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), mix ( $20,33 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) und blau + FR ( $25,59 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) zu erkennen.

Verringert sich die Lichtintensität auf  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , lässt sich der höchste Gehalt an Fruktose bei der Belichtungsvariante mix + FR ( $35,07 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) beobachten, jedoch gibt es zu den Belichtungsvarianten weiß ( $29,22 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), blau ( $26,63 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), HPS ( $25,02 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), mix ( $22,34 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) keinen signifikanten Unterschied. Signifikant weniger Fruktose kann lediglich bei Pflanzen unter den Belichtungsvarianten rot + FR ( $16,81 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), rot ( $16,75 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), blau + FR ( $14,88 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) und weiß + FR ( $10,98 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) festgestellt werden.

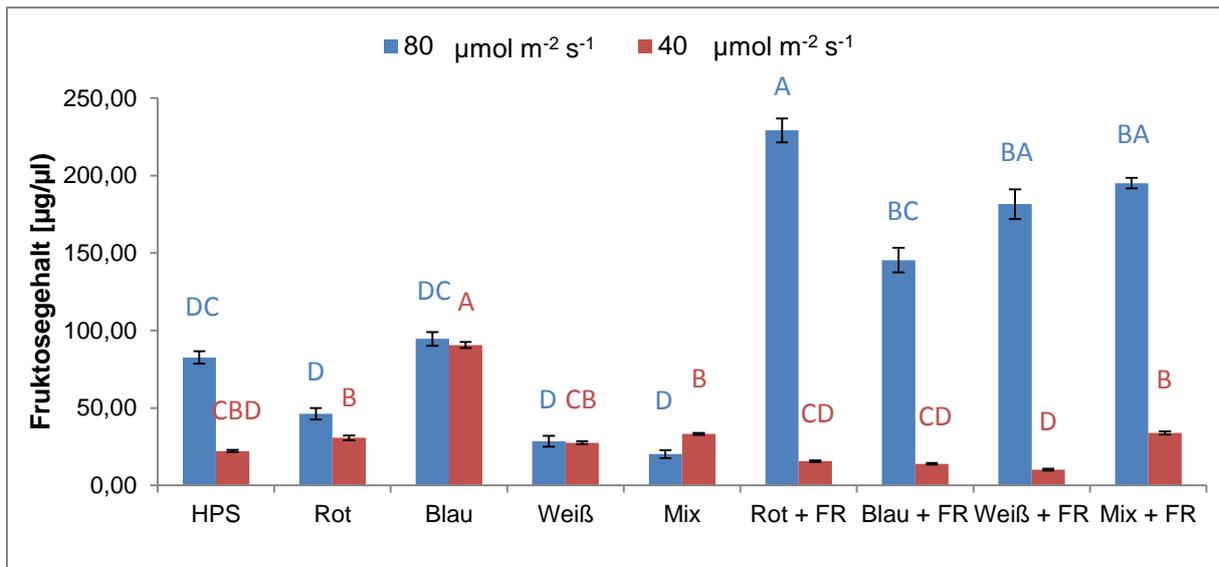


Abbildung 42: Mittelwerte und Standardfehler des Fructosegehaltes aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

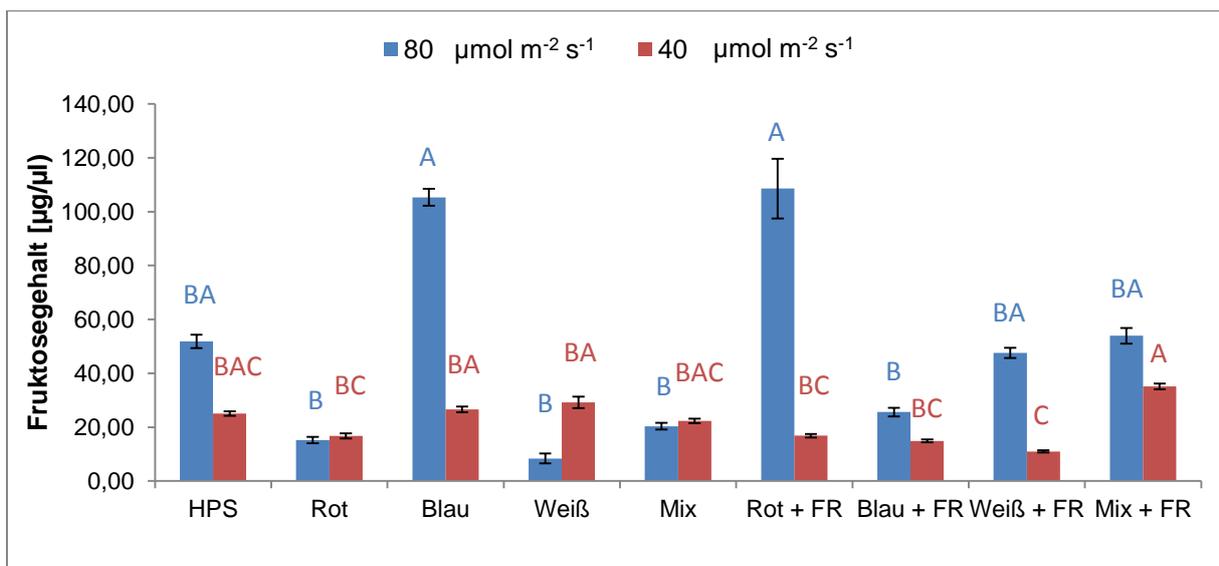


Abbildung 43: Mittelwerte und Standardfehler des Fructosegehaltes aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

Abbildung 44 stellt die Saccharosegehalte aus den Versuchen in der Klimakammer dar. Mit einem Gehalt von  $268,20 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$  haben Pflanzen unter der Belichtungsvariante rot + FR, bei  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , den höchsten Saccharosegehalt erreicht. Etwas geringer, jedoch ohne Signifikanz sind die Gehalte aus den Belichtungsvarianten weiß + FR ( $245,57 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), blau ( $238,2 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), blau + FR ( $223,90 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), mix + FR ( $223,40 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), HPS ( $175,77 \mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) und rot

(173,13  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ). Signifikant geringer sind lediglich die Sachharosegehalte bei den Belichtungsvarianten weiß (147,0  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) und mix (130,8  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ).

Bei einer Lichtintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  wird der höchste Sachharosegehalt bei blauer Belichtung erreicht (148,7  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ). Vergleichbar hoch, also ohne signifikanten Unterschied, ist der Gehalt aus der Belichtungsvariante mix (118,4  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ). Die übrigen Werte aus den Belichtungsvarianten weiß (107,33  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), rot (100,20  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), HPS (81,83  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), mix + FR (63,57  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), blau + FR (55,87  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), weiß + FR (51,57  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) und rot + FR (47,17  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), unterscheiden sich signifikant von den Belichtungsvarianten blau und mix. Hierbei unterscheiden sich zusätzlich auch die Werte der Belichtungsvarianten rot + FR, blau + FR, weiß + FR und mix + FR signifikant von den Sachharoseregehalten aus den Belichtungsvarianten weiß und rot, und zwischen rot + FR und HPS.

Die Abbildung 49Abbildung 45 stellt die Sachharosegehalte aus den Versuchen im Gewächshaus dar. Bei  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  sind trotz der erhöhten Sachharosewerte bei den Belichtungsvarianten rot + FR (135,67  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), blau (131,97  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), mix (126,70  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ), rot (110,03  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) und HPS (109,97  $\mu\text{g } \mu\text{l}^{-1}$ ) besteht keine signifikanten Unterschiede zu den zusätzlich mit FR behandelten Varianten zu erkennen. Ebenfalls bei  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  kann kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Belichtungsvarianten festgestellt werden.

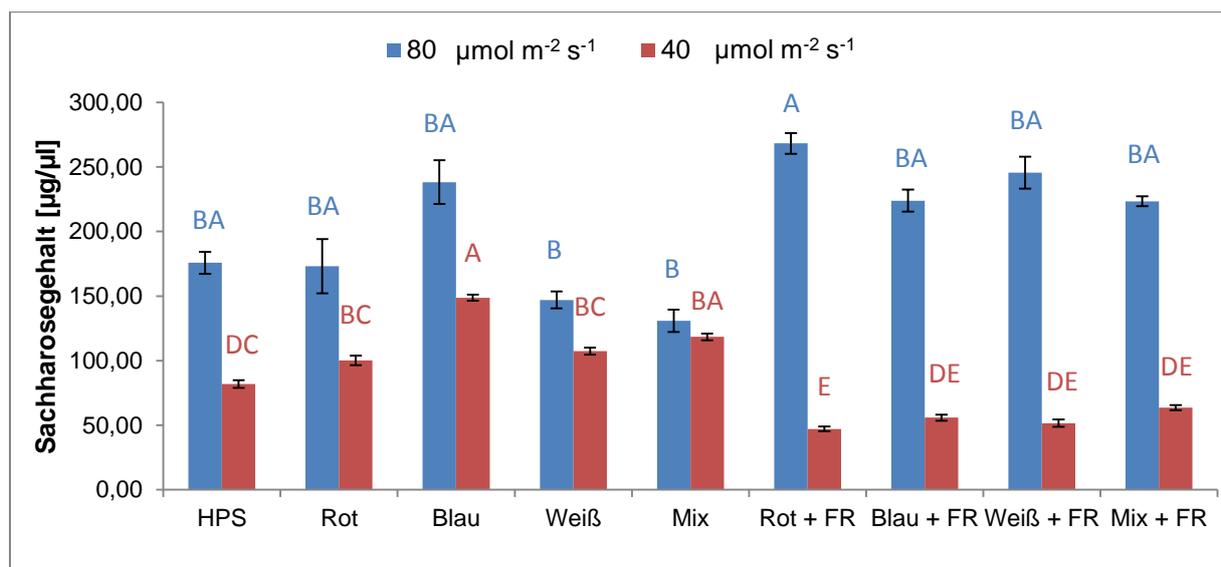


Abbildung 44: Mittelwerte und Standardfehler des Sachharosegehaltes aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer ( $n=3$ ). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

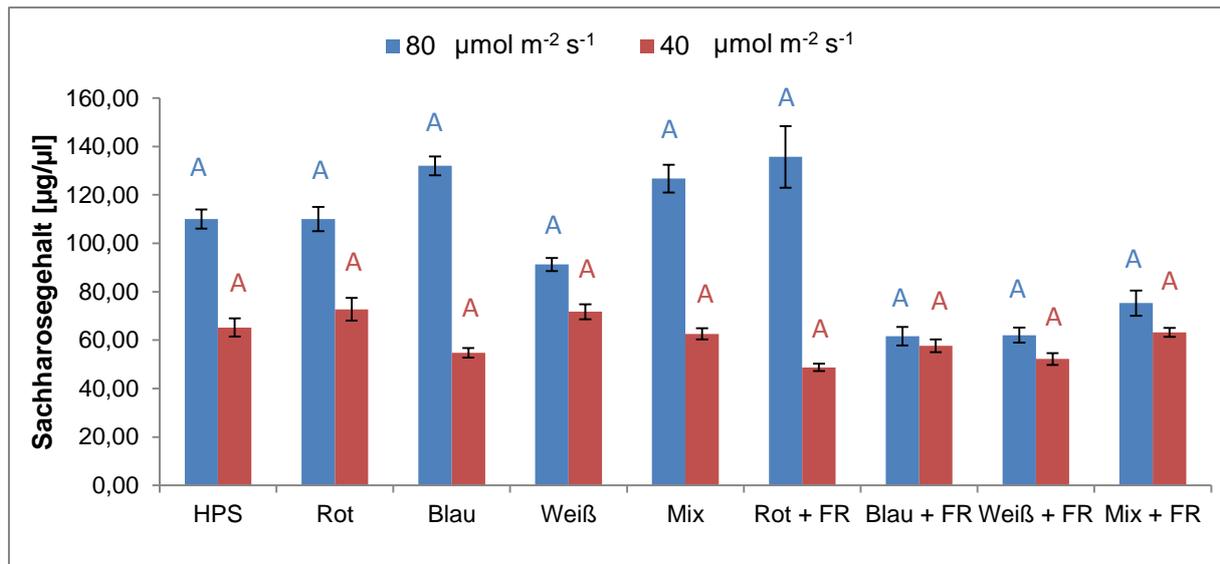


Abbildung 45: Mittelwerte und Standardfehler des Sachharosegehaltes aus 10 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus ( $n=3$ ). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

Der Stärkegehalt der Versuche in den Klimakammern ist in Abbildung 46 dargestellt. Bei Betrachtung der  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ist der höchste Stärkegehalt bei der Belichtungsvariante mix ( $0,022 \text{ g L}^{-1}$ ) festzustellen. Ein signifikanter Unterschied besteht nur zu den Belichtungsvarianten blau ( $0,009 \text{ g L}^{-1}$ ) und blau + FR ( $0,006 \text{ g L}^{-1}$ ). Die Stärkeeinlagerung ist unter blauem Licht mit  $660 \text{ nm}$ , im Vergleich zu den übrigen Belichtungsvarianten, signifikant geringer. Wird die Belichtungsintensität auf  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  verringert, lässt sich der höchste Stärkegehalt bei roter Belichtung feststellen ( $0,019 \text{ g L}^{-1}$ ). Ein signifikanter Unterschied besteht nur zu den Belichtungsvarianten mix ( $0,007 \text{ g L}^{-1}$ ), blau + FR ( $0,007 \text{ g L}^{-1}$ ) und weiß + FR ( $0,007 \text{ g L}^{-1}$ ). Weitere Unterschiede können nicht festgestellt werden.

Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse der quantitativen Stärkeanalyse aus den Versuchen im Gewächshaus. Bei Betrachtung der Versuche mit hoher Lichtintensität ( $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ist deutlich zu erkennen, dass die Belichtungsvariante HPS mit  $0,252 \text{ g L}^{-1}$  den höchsten Stärkegehalt aufweist. Signifikant geringer ist der Stärkegehalt bei den Varianten weiß + FR ( $0,019 \text{ g L}^{-1}$ ) und mix + FR ( $0,019 \text{ g L}^{-1}$ ). Wiederum signifikant geringer und damit am geringsten ist der Stärkegehalt bei den Belichtungsvarianten blau ( $0,009 \text{ g L}^{-1}$ ) und blau + FR ( $0,008 \text{ g L}^{-1}$ ). Legt man das Augenmerk auf die Versuche mit einer Belichtungsintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  zeigt sich, dass die höchsten Stärkegehalte unter den Belichtungsvarianten mix ( $0,018 \text{ g L}^{-1}$ ) und HPS ( $0,018 \text{ g L}^{-1}$ ) auftreten. Signifikant weniger Stärke eingelagert haben die

Die Pflanzen unter den Belichtungsvarianten rot + FR ( $0,112 \text{ g L}^{-1}$ ), mix + FR ( $0,011 \text{ g L}^{-1}$ ), blau + FR ( $0,010 \text{ g L}^{-1}$ ) und blau + FR ( $0,010 \text{ g L}^{-1}$ ). Der geringste Stärkegehalt kann unter rein blauem Licht mit 440 nm festgestellt werden ( $0,008 \text{ g L}^{-1}$ ).

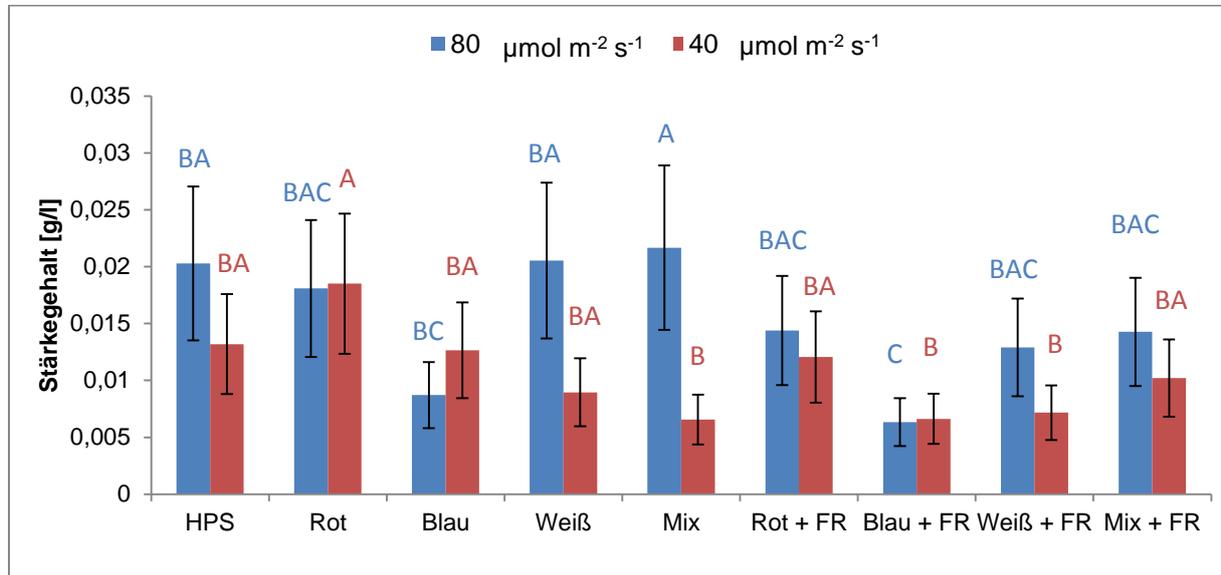


Abbildung 46: Mittelwerte und Standardfehler des Stärkegehaltes aus je 3 Mischproben von 3 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen in der Klimakammer (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

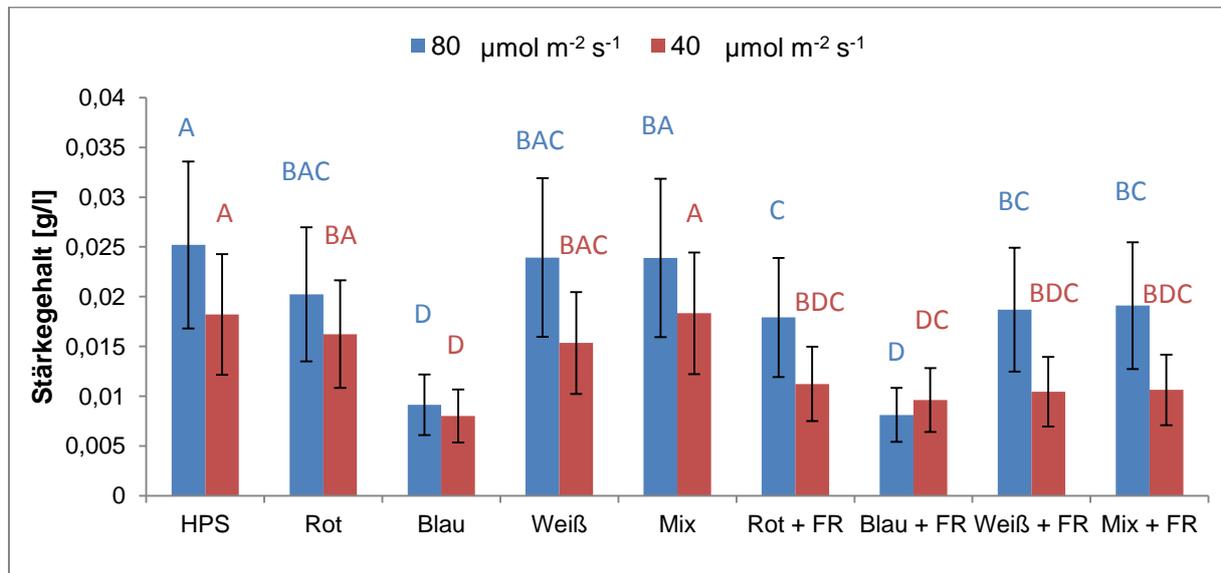


Abbildung 47: Mittelwerte und Standardfehler des Stärkegehaltes aus je 3 Mischproben von 3 Individuen der *Calibrachoa*-Jungpflanzen, 21 Tage nach dem Stecken für die Lichtintensitäten  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter verschiedenen Spektralbereichen im Gewächshaus (n=3). Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

## Diskussion

### Lichtintensität und der spektralen Verteilung

Die Lichtverteilung auf der Versuchsfläche ist mit den herkömmlichen natriumdampf-Hochdrucklampen wenig problematisch. Wie in Abbildung 2 Abbildung 3 zu erkennen ist, kann eine sehr gleichmäßige Ausleuchtung der Fläche erfolgen. Dies ist sowohl bei hohen ( $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) als auch bei geringen Lichtintensitäten ( $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) gut möglich. Die gute Ausleuchtung liegt zum einen an der starken Leistung von 400 Watt, zum anderen auch an dem, im Lampengehäuse verbauten, Reflektor. Dieser ermöglicht es, die Photonen gleichmäßig über die Versuchsfläche zu verteilen (DAS ET AL., 2015). Wenn man die Lichtverteilung der verwendeten LED-Module vergleicht, fällt auf, dass die Ausleuchtung sowohl mit  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  als auch mit  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , schlechter ausfällt. Dies ist vor allem der Fall, wenn nur eine einzige Lichtfarbe verwendet wird (Abbildung 4 - Abbildung 9 und Abbildung 12 Abbildung 17). Gründe für eine schlechtere Lichtverteilung auf der Versuchsfläche gibt es mehrere. Eine Leuchtdiode ist bauartbedingt nur dazu in der Lage ihr Licht sehr gerichtet abzugeben, es gibt eine nur sehr geringe Streuung (DAS ET AL., 2015). Sollen die erzeugten Photonen über eine größere Fläche verteilt werden, werden spezielle Linsensysteme notwendig (SINGH ET AL., 2015). Ein weiterer Grund für die suboptimale Lichtverteilung ist die Tatsache, dass sich um ein Forschungsmodul handelt. Darin sind mehrere LED-Chips verbaut, die sich über Kanäle separat ansteuern lassen. Wird nur ein einziger Kanal, also eine Farbe, genutzt, verringert sich die Anzahl der genutzten LEDs und somit auch die Lichtintensität. Schlussendlich wird damit einhergehend auch die Ausleuchtung schlechter. Verwendet man hingegen alle verfügbaren Kanäle gleichzeitig, kann eine sehr gleichmäßige Ausleuchtung der Versuchsfläche erreicht werden (Abbildung 10 Abbildung 11 und Abbildung 18 Abbildung 19). Die in Abbildung 20 Abbildung 29 dargestellten Spektralverteilungen wurden aufgenommen, um die Lichtqualität zu überprüfen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Peakwellenlängen für rot (660 nm), blau (440 nm), weiß (400-700 nm) und Far red (730 nm) liegen. Mit den einheitlichen Werten können genaue Lichtrezepte jederzeit reproduziert werden. Hierdurch wird zugleich gewährleistet, dass alle Versuche miteinander vergleichbar sind. Ein weiterer Grund für eine schlechtere Ausleuchtung ist die im Vergleich zur natriumdampf-Hochdrucklampe, geringere Leistung von nur 180 Watt pro Modul. Diese 180 Watt teilen sich zudem auf vier unterschiedliche Spektren auf.

## Diskussion Sprosslänge

Viele Untersuchungen beschäftigten sich bisher mit der morphologischen Auswirkung auf das Pflanzenwachstum durch unterschiedliche Spektralbereiche. Häufig wurde hierbei angenommen, dass durch eine „blaue“ Belichtung kompaktes Pflanzenwachstum und durch eine rote Belichtung Streckungswachstum gefördert werden kann (ISLAM ET AL., 2012;).

Die Versuche der Bayerischen Landesanstalt mit der *Calibrachoa* 'Neo Royal Blue' hingegen zeigten widersprüchliche Ergebnisse. Wie in Abbildung 30 Abbildung 31 zu erkennen ist, zeigte die Modelpflanze bei blauem Licht, sowohl im Gewächshaus, als auch in der Klimakammer ein sehr starkes Streckungswachstum auf. Dieses verstärkte Streckungswachstum wurde in der Literatur bisher kaum nachgewiesen. Lediglich die Kooperationspartner von der Hochschule Weihenstephan Triesdorf und die Forschergruppe von HERNÁNDEZ UND KUBOTA (2015) konnten ähnliche Ergebnisse an Sonnenblumen generieren.

Ein Grund für die widersprüchlichen Ergebnisse könnte sein, dass in früheren Studien kein monochromatisches Licht zur Verfügung stand. Die Studien wurden in den meisten Fällen mit Natriumdampfhochdrucklampen, oder speziellen Farbfolien durchgeführt. Somit waren die Pflanzen einem anderen Spektrum ausgesetzt, welches durchaus zu unterschiedlichen Wuchsformen führen kann. Weiterhin auffällig ist die Auswirkung des Spektralbereiches Far Red (730 nm). Durch einen zusätzlichen Anteil dieses Spektralbereiches fand ebenfalls eine extrem starke Streckung der Pflanzen statt.

Bei den Versuchen in der Klimakammer Abbildung 30 ist zudem auffällig, dass die Sprosslänge bei den Belichtungsvarianten HPS, rot, blau, weiß und mix zwischen der hohen und der geringen Lichtintensität keine Unterscheide aufzeigen. Mit zusätzlichem Anteil von Far Red jedoch, sind zwischen den Lichtintensitäten deutliche Unterschiede erkennbar. Daraus lässt sich schließen, dass die verwendeten Spektralfarben in den unterschiedlichen Intensitäten keinen nennenswerten Einfluss auf das Längenwachstum haben. Wird jedoch dem Spektralbereich die Komponente Far Red hinzugefügt, hat sie Lichtintensität eine Auswirkung auf das Streckungswachstum. Je geringer die Lichtintensität des Far Red, umso geringer ist auch das Streckungswachstum. Die Ergebnisse lassen sich auch anderen Pflanzen beobachten (DEMOTES-MAINARD ET AL., 2016).

Die Gewächshausversuche Abbildung 31 zeigen eine ähnliche Tendenz wie die Klimakammerversuche. Trotz der zusätzlichen Globalstrahlung ist mit zusätzlicher blauer Belichtung ein sehr starkes Streckungswachstum zu verzeichnen. Ebenso ist bei den Belichtungsvarianten mit zusätzlichem Far Red.

### **Diskussion Trockenmasse von Spross und Wurzel**

Die in Abbildung 32 dargestellten Ergebnisse des Sprosstrockengewichtes zeigen deutlich eine erhöhte Trockenmasse bei der Belichtungsvariante HPS mit  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Zugleich konnte eine um mehr als  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  erhöhte Blatttemperatur (Daten nicht aufgeführt) bei dieser Belichtungsvariante festgestellt werden. Vermutlich ist die erhöhte Blatttemperatur ein Faktor, der zu einer höheren Trockenmasse geführt hat. Ähnliche Ergebnisse konnten im Versuch von DREESEN und LANGHANS (1992) nachgewiesen werden. Statistisch ähnlich hohe Trockenmassewerte wurden bei den Belichtungsvarianten rot + FR, weiß + FR und mix + FR. festgestellt. Jedoch ist in diesen Fällen die Blatttemperatur lediglich um ca.  $1 - 2 \text{ }^\circ\text{C}$  höher gewesen, als bei den übrigen Belichtungsvarianten. Somit könnte zum einen schon eine geringe Erhöhung der Blatttemperatur für einen signifikanten Anstieg der Trockenmasse verantwortlich sein, oder auch die zusätzliche Belichtung mit Far red. Diese ist in der Natriumdampflampe (Abbildung 20) nachweislich nicht vorhanden. Bei einer Lichtintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  fallen die Unterschiede viel geringer aus. Neben der verminderten Lichtintensität sind auch die Blatttemperaturunterschiede sehr gering. Temperatur und Lichtintensität sind die größten Einflussfaktoren. In den Veröffentlichungen von GRAVES ET AL. (1989) und LOPEZ and RUNKLE (2008) konnte ebenfalls festgestellt werden, dass sowohl die Lichtintensität, als auch die Blatttemperatur zu einer erhöhten Trockenmasse führen kann.

Die Trockenmasse des Sprosses in den Versuchen aus dem Gewächshaus unterscheidet sich weitaus weniger stark voneinander. Eine signifikant geringere Trockenmasse konnte nur bei  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in den Belichtungsvarianten rot, rot + FR und blau + FR festgestellt werden. Nennenswerte Temperaturunterschiede der Blätter konnten nicht beobachtet werden. Dies lässt sich durch die zusätzliche Globalstrahlung erklären. Durch die zusätzliche Einstrahlung wird zum einen das Spektrum verändert, zum anderen enthält die Globalstrahlung auch Wärmestrahlung, wodurch sich eventuelle Temperaturunterschiede wieder ausgleichen könnten. Wird die Lichtintensität des Zusatzlichtes auf  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  reduziert, zeigten sich im

Gewächshaus keinerlei signifikante Unterschiede des Sprosstrockengewichtes. Hier wird vermutlich der Fall eingetreten sein, dass die natürliche Globalstrahlung und die verminderte Zusatzbelichtung zu gering waren, um einen stärkeren Trockenmassezuwachs hervorzurufen.

In Abbildung 34 ist die Trockenmasse der Wurzeln aus den Klimakammerversuchen aufgeführt. Bei einer Lichtintensität von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  zeigt sich, dass die Belichtungen blau und weiß ein signifikant geringeres Wurzelrockengewicht erreichen als die übrigen Belichtungsvarianten. Zwar konnte unter diesen beiden Belichtungen eine akzeptable Wurzellänge festgestellt werden (Abbildung 38), jedoch nicht so hoch wie bei der Belichtungsvariante HPS.

Bei einer Lichtintensität von  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  zeigen die Belichtungsvarianten die Far Red enthalten teilweise eine erhöhte Wurzelrockenmasse auf. Auch wenn diese nicht immer Signifikant sind, lässt sich eine gewisse Tendenz erkennen. Hierbei ist bekannt, dass durch Far Red das Wurzelwachstum gefördert werden kann (DEMOTES-MAINARD ET AL., 2016), Widersprüchlich dazu sind jedoch die erhobenen Daten von SCHWEND Et al. hierbei wurde anhand von Poinsettien nachgewiesen, dass Far Red keine Auswirkung auf das Wurzelwachstum hat.

Ähnliche Ergebnisse sind bei den Versuchen im Gewächshaus festgestellt worden (Abbildung 35). Auch hier wurde die höchste Wurzelrockenmasse bei  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in dem Belichtungsvarianten weiß + FR und mix + FR festgestellt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen aus den Klimakammerversuchen und spricht dafür, dass ein erhöhter Far Red Anteil für ein besseres Wurzelwachstum spricht.

### **Diskussion Blattfläche**

Dem dunkelroten Wellenlängenbereich wird zudem nachgesagt, zu einer Streckung der Zellen zu führen (DEMOTES-MAINARD ET AL., 2016; BERGSTRAND ET AL., 2016). Demnach sollten sich nicht nur der Spross, wie im oberen Teil beschrieben, sondern auch die Blätter unter Far Red vergrößern. In Abbildung 36 ist gut zu erkennen, dass die Far Red-Varianten mix + FR und rot + FR eine vergrößerte Blattfläche im Vergleich zu den Varianten ohne Far Red aufweisen. Lediglich die blau belichteten Pflanzen weisen eine statistisch ähnliche Blattfläche auf. Dieses Phänomen ist auch bei der Streckung der Sprosse aufgetaucht und lässt vermuten, dass in diesem Fall ähnliche Mechanismen in der Pflanze ausgelöst werden. Die

Veränderung des Phytohormonspiegels Gibberellin, welches für das Streckungswachstum verantwortlich ist, sorgt für das verstärkte Wachstum.

Eventuell ist es möglich, dass auch blaues Licht, welches üblicherweise nicht von den rotempfindlichen Phytochromen wahrgenommen wird einen ähnlichen Mechanismus auslöst.

Bei den Versuchen im Gewächshaus hingegen konnte lediglich bei der Sprosslänge eine starke Streckung nachgewiesen werden, die Blattfläche hingegen blieb trotz des zusätzlichen Far Reds kompakter. Dies könnte damit zusammenhängen, dass das Verhältnis von rot zu Far Red durch die zusätzliche Globalstrahlung erhöht wurde und somit der starke Effekt, der in der Klimakammer beobachtet wurde, wieder aufgehoben wurde.

### **Diskussion Gesamtwurzellänge**

Bei der Gesamtwurzellänge in der Klimakammer (Abbildung 38) lässt sich, entgegengesetzt zur Blattfläche, keine pauschale Aussage über einen Zusammenhang mit zusätzlichem FR treffen. Die Wurzellänge der HPS Variante bei  $80 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  hat dennoch die höchste Gesamtwurzellänge, was vermutlich auf die erhöhte Temperatur zurück zu führen ist. Dieses Verhalten wurde auch bei anderen Pflanzen schon beobachtet und korreliert sehr gut mit der ebenfalls gesteigerten Trockenmasse und der gesteigerten Sprosstrockenmasse. Ein höheres Sprosswachstum führt demnach auch zu einem besseren Wurzelwachstum. Trotz geringerer Temperatur sind aus statistischer Sicht die Belichtungsvarianten weiß und blau + FR von der Gesamtwurzellänge der HPS Variante, nicht zu unterscheiden. Bei der  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  hingegen hat die Belichtungsvarianten rot + FR die höchsten Werte erreicht. Statistisch nicht signifikant geringer sind die Werte der Belichtungsvarianten weiß + FR und mix + FR. Dies lässt darauf schließen, dass das Spektrum von 730 nm in geringen Dosen einen positiven Einfluss auf die Wurzelbildung haben könnte.

Eindeutig zu erkennen sind die Unterschiede zwischen den Lichtintensitäten von  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Lichtversuche von CURREY and LOPEZ (2013), zeigten ebenfalls, dass die Lichtintensität einen entscheidenden Einfluss auf die Adventivwurzelbildung hat. Je weniger Licht zur Verfügung gestellt wird, umso schlechter ist die Adventivwurzelbildung. Spektrale Einflüsse sind hier jedoch nicht eindeutig zu erkennen.

Die Versuche im Gewächshaus Abbildung 39 lassen ebenfalls keine eindeutige Abhängigkeit der Bewurzelung von der Spektralfarbe zu. Hierbei könnte die Globalstrahlung eine Rolle spielen. Diese enthält den Spektralbereich um 730 nm, was zu einer ausgeglichenen Bewurzelung geführt haben könnte. Bei  $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und blauer Belichtung jedoch ist die Gesamtwurzellänge deutlich geringer, zur  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  jedoch am höchsten. Diese gegensätzlichen Beobachtungen können zum einen auf die Unterschiedliche Lichtintensität zurückgeführt werden, wahrscheinlicher jedoch sind eventuelle Messfehler oder der Einfluss der Mutterpflanzen.

Die Werte weichen teils sehr stark voneinander ab, eine Erklärung hierfür konnte sein, dass durch die mechanische Belastung beim auswaschen des Wurzelballens unterschiedlich viel Wurzelmaterial verloren gegangen ist. Trotz der Kultur in Perlite und vorsichtigem ins Wasser stippen, löst sich Wurzelmasse, die nicht mehr in der Auswertbar ist.

Eine andere Möglichkeit kann der Einfluss der Mutterpflanze oder die Nährstoffversorgung sein. Untersuchungen haben sich mit der Adventivwurzelbildung von Stecklingen befasst (DRÜGE ET AL., 2000; DRÜGE ET AL., 2004) und dabei festgestellt, dass die Nährstoffversorgung der Mutterpflanzen, sowie die Position an der die Stecklinge entnommen werden einen entscheidenden Einfluss auf die Adventivwurzelbildung haben. Da für die Versuche monatlich mehrere Tausend Stecklinge benötigt wurden, ist es durchaus denkbar, dass die Einflüsse der Mutterpflanzen zu den Unterschieden geführt haben.

### **Diskussion der Kohlenhydratanalyse**

Zwar sind in vielen Fällen der Untersuchung keine signifikanten Unterschiede erkennbar, jedoch gibt es eindeutige Tendenzen. Die Kooperationspartner dieser Studie von Hochschule Weihenstephan Triesdorf zeigen eindeutig eine verminderte Stärkeeinlagerung unter blauer Belichtung. Dies wurde jedoch nur visuell über eine Jodfärbung bestimmt. Die Versuche an der LWG haben dieses Phänomen auf quantitativer Ebene näher beleuchtet und bei den Versuchen festgestellt, dass der Stärkegehalt bei blauer Belichtung tatsächlich geringer ausfällt. In den Versuchen in der Klimakammer konnte zwar keine Signifikanz nachgewiesen werden, jedoch ist dies eventuell auf die Erstellung von Mischproben zurück zu führen. Aufgrund der hohen Kosten und des Aufwandes wurden aus 9 vorhandenen Proben jeweils 3 zu

einer Mischprobe zusammengeführt und analysiert. Ebenso konnte nachgewiesen werden, dass der Saccharoseanteil bei den übrigen Belichtungsvarianten angestiegen ist. Saccharose ist zudem der wichtigste sofort verfügbare Zuckere in den Pflanzen und kommt in höheren Konzentrationen als Glukose und Fruktose vor. Auch die Tatsache, dass der Sachharoseanteil durch Far Red scheinbar gesteigert wird lässt sich beobachten.

## Versuch - Viola Cornuta

### Einleitung

Aktuelle Ergebnisse aus der Pflanzenforschung mit LED- Belichtung geben Hinweise auf erhöhte Blütenanzahl, veränderten Habitus, veränderte Farbgebung und sogar verändertem Geschmack von Pflanzen durch Belichtung mit verschiedenen Lichtintensitäten und Spektralbereichen. Dieser Tastversuch soll klären ob unterschiedliche Spektralbereiche die Farbgebung von Blättern und vor allem den essbaren Blüten sowie den Habitus der Viola beeinflusst. Aufgrund der technischen Möglichkeiten bietet sich vor allem die bei uns vorhandene LED-Technik an. Als Testpflanzen werden folgende verwendet: *Viola cornuta* Admire® Maxi Mix, *Viola wittrockiana* Inspire® DeluXXe Maxi Mix, *Viola wittrockiana* Inspire® Plus Maxi Mix, *Viola wittrockiana* Inspire® Mix und *Viola wittrockiana* Joker® Mix.

### Material und Methoden

Als Pflanzenmaterial wurden *Viola cornuta* Admire® Maxi Mix, *Viola wittrockiana* Inspire® DeluXXe Maxi Mix, *Viola wittrockiana* Inspire® Plus Maxi Mix, *Viola wittrockiana* Inspire® Mix und *Viola wittrockiana* Joker® Mix verwendet. Das Saatgut wurde in Aussaaterde ausgesät und in der Klimakammer bei einer Keimtemperatur von 16 °C und anschließender Kulturtemperatur von 22 °C bis zur Blütenbildung kultiviert. Zur Düngung wurde Osmocote 250 mg·L<sup>-1</sup> verwendet.

Die Lichtintensität während der Kulturzeit wurde auf 80 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> mit einer Photoperiode von 16-h eingestellt. Dabei wurden folgende Lichtfarben verwendet: (rot mit 600 nm, blau mit 440 nm, weiß mit 4000 K und Mix mit 400-700 nm).

In Voller Blüte wurden gleich alte Blüten aus den unterschiedlichen Farbkombinationen anschließend auf Unterschiede in der Farbgebung miteinander verglichen.

## Ergebnisse

Aufgrund eines extrem starken Blattlausbefalls musste die Variante mix vollständig aus dem Versuch genommen werden. Zudem konnten aufgrund der hohen Schäden nur die Sorten *Viola cornuta* Admire® Maxi Mix Yellow Purple Wing und *Viola cornuta* Admire® Maxi Mix Orange Purple Wing ausgewertet werden.

Abbildung 48 zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher Spektralbereiche auf die Ausfärbung von den Blüten von *Viola cornuta* Admire® Maxi Mix Yellow Purple Wing (oben) und *Viola cornuta* Admire® Maxi Mix Orange Purple Wing (unten). Bei der Sorte Yellow Purple Wing ist auffällig, dass die violettfarbene Zeichnung der Petalen unter rotem und blauem Licht nicht vorhanden ist. Zudem kann man deutlich erkennen, dass die beiden mittleren Petalen bei roter Belichtung eine weniger stark ausgeprägte Gelbfärbung aufweisen, als die übrigen Belichtungsvarianten. Bei der Sorte *Viola cornuta* Admire® Maxi Mix Orange Purple Wing ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Zeichnung der Petalen am äusseren Rand, bei roter Belichtung sehr stark ausgeprägt ist, die blaue Belichtung hingegen hat nur eine sehr schwach ausgeprägte Zeichnung und erscheint generell weniger farbintensiv. Bei weißer Belichtung ist die Zeichnung der Petalen etwas schwächer, als bei der rot belichteten Blüte und wirkt zudem etwas weniger farbintensiv.

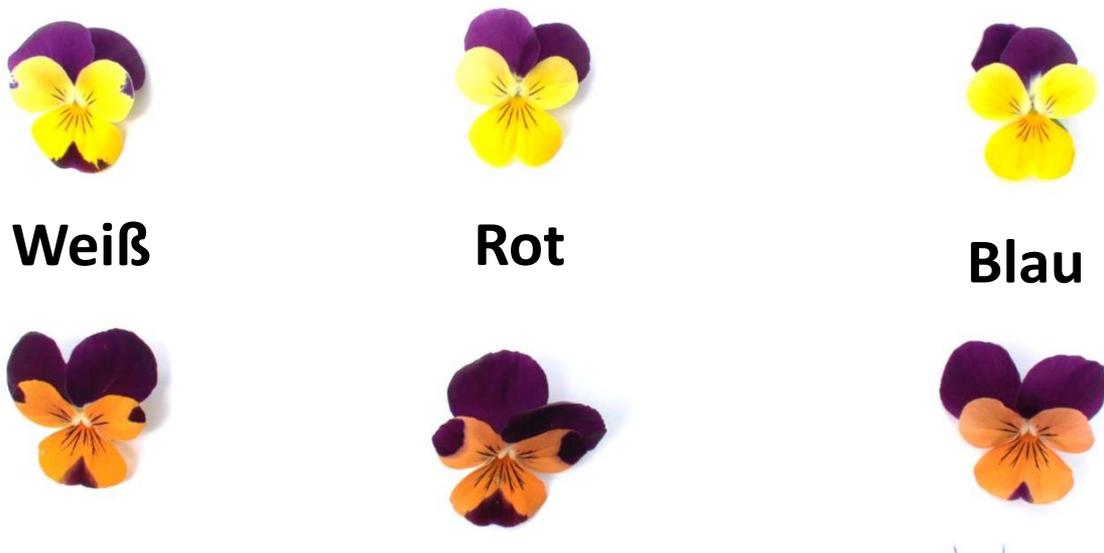


Abbildung 48: Musterung und Ausfärbung der Blüten von *Viola cornuta* Admire® Maxi Mix Yellow Purple Wing (oben) und *Viola cornuta* Admire® Maxi Mix Orange Purple Wing (unten) unter unterschiedlichen Spektralbereichen.

## **Diskussion**

Bislang gibt es zur Ausfärbung von Blütenplättern durch unterschiedliche Spektralbereiche nur sehr begrenzt, bis gar keine offizielle Literatur. Bekannt ist, dass sich die Farbintensität mit Hilfe von unterschiedlichen Belichtungsintensitäten beeinflussen lässt (CURREY and LOPEZ, 2013). In diesem ersten Tastversuch konnte nun nachgewiesen werden, dass auch die Lichtfarbe einen Einfluss auf die Blütenzeichnung sowie die Farbintensität haben kann. Aufgrund des hohen Schädlingsdruckes konnten leider nicht alle Pflanzen ausgewertet werden. Der Versuch sollte im besten Fall nochmals durchgeführt werden, um die Ergebnisse zu festigen und auf weitere Kulturen auszuweiten.

## **Versuch - kompaktes Wachstum durch hellrotes Licht bei *Petunia* und *Calibrachoa***

### **Einleitung**

Die Stecklingsbewurzelung für das Beet- und Balkonpflanzen-Sortiment im Frühjahr erfordert aufgrund der hiesigen Witterungsverhältnisse zwingend eine Zusatzbelichtung. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades in der Produktion und der Fertigung ist eine einheitliche Jungpflanzenqualität (RC) erforderlich. Dieses Ziel lässt sich oft nur durch den Einsatz von Wuchshemmstoffen erreichen. Versuche an der LWG haben ergeben, dass durch eine Assimilationsbelichtung mit hellrotem Licht (660 nm) eine kompaktere Pflanze produziert werden kann. Aufgrund dieses Phänomens soll in diesem versuch getestet werden, ob der Hemmstoffeinsatz durch die Belichtung mit hellrotem Licht vermindert oder gar ganz eingestellt werden kann.

### **Material und Methoden**

Die unterschiedlichen Petunien- und Calibrachoa-Sorten wurden von der Firma Selecta One (Stuttgart, Deutschland) bezogen und in Woche 44 gesteckt. Dazu wurde das Jungpflanzensystem Aero NT 104 (Omni Solutions GmbH, Straelen, Deutschland) verwendet. In den ersten 5 Tagen wurden die Stecklinge unter einer Folie kultiviert, um eine möglichst hohe Luftfeuchtigkeit zu erreichen (~90 %). Die Temperatur während der Versuchsdauer betrug 22 °C. Die Pflanzen wurden im Langtag von 05:00 bis 22:00 Uhr mit durchgehender Belichtung mit  $\sim 120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  kultiviert. Als Versuchsvarianten wurden eine unbelichtete Variante, eine rot belichtete (660 nm) Variante, und eine Mix-Variante (Rot mit 660 nm, Blau mit 440 nm und Weiß mit 4000 K) verwendet. Diese Lichtfarben wurden mit Hilfe einer

programmierbaren LED-Leuchte, dem Produktionsmodul III umgesetzt (DH Licht, Wülfrath, Deutschland). Zum Vergleich mit der herkömmlichen Belichtung diente eine Natriumdampf-Hochdrucklampe (Gehäuse: MGR 400 SONT, Philips, Hamburg, Deutschland; Leuchtmittel: Master Agro 400 W, Philips, Hamburg, Germany). Zur Düngung wurde zwei Mal wöchentlich  $1 \text{ g L}^{-1}$  Wuxal Super (Manna, Ammerbuch-Pfäffingen, Deutschland) eingesetzt.

Insgesamt wurden drei Wiederholungen je Behandlung durchgeführt. Pro Wiederholung wurden 24 Pflanzen zur Versuchsauswertung vermessen. Die Länge der Pflanzen wurde von der Basis (oberer Rand des Erdpressballens) bis zur Vegetationsspitze gemessen.

### Ergebnisse Petunien

In Abbildung 49 sind die Ergebnisse des Streckungswachstums der verwendeten Petuniensorten dargestellt.

Gut zu erkennen bei den Sorten *Petunia* 'Night Sky', *Petunia* 'Swirl Cherry Banana' und *Petunia* 'Deluxe Lilac Picotee evol', ist die im Vergleich zur Behandlung mit der Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS) und der LED-Variante - Mix, kompaktere Wuchsform unter rotem Licht. Bei der Sorte 'Famous Raspberry Star' war dieser Effekt etwas geringer ausgeprägt. Die unbelichtete Variante ist am kompaktesten, zeigt jedoch auch kaum Wurzel oder Sprosswachstum.

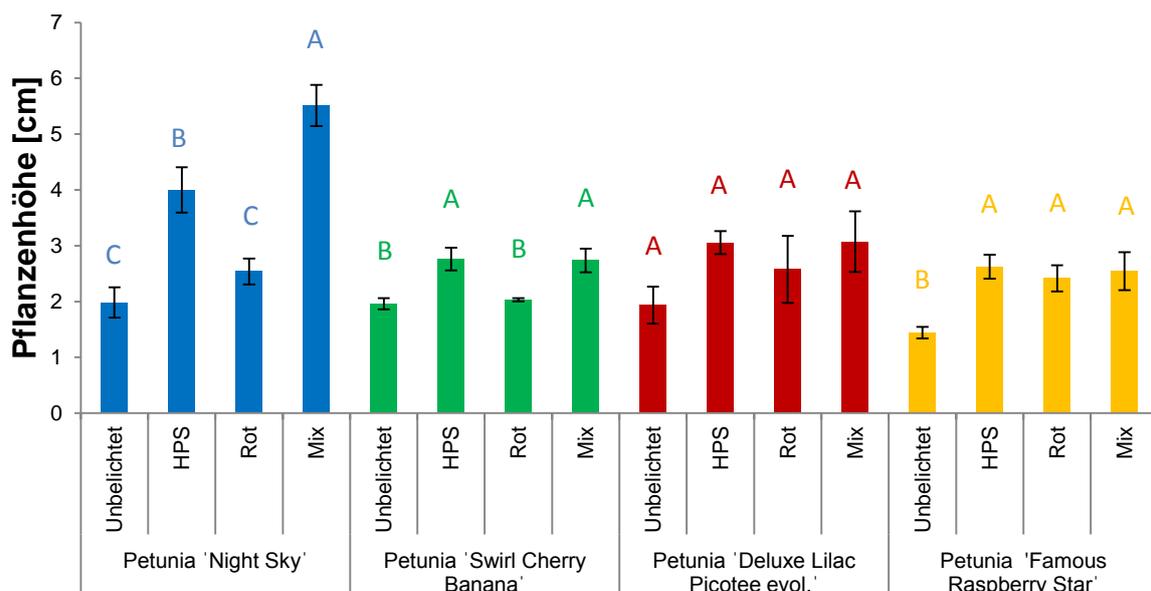


Abbildung 49: Übersicht der Pflanzenhöhe in Abhängigkeit von Sorte und Belichtungsvariante bei *Petunia* – 13 Tage nach dem Stecken. Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

Abbildung 50 (A, B, C, und D) zeigt exemplarisch den Sprossaufbau und die Wurzelbildung der Sorten. Gut zu erkennen ist, dass das Wurzelwachstum durch die Belichtung gefördert wird. Bereits nach 13 Tagen sind die belichteten Pflanzen gut bewurzelt und beginnen mit dem Sprossaufbau, zudem bilden die Wurzeln aller belichteten Sorten im Unteren Bereich bereits die Form des Trays nach. Die unbelichteten Pflanzen hingegen zeigen kaum Sprosszuwachs oder Wurzelwachstum. Der Vergleich zwischen der LED Variante „Mix“ und der Natriumdampf-Hochdrucklampe zeigt kaum Unterschiede hinsichtlich des Wurzel- und Sprosswachstums auf. Die rot belichtete Variante hingegen ist weniger stark bewurzelt als die „Mix“- oder „HPS“-Variante, jedoch angemessen genug, insbesondere im Hinblick auf die kompaktere Wuchsform des Sprosses.

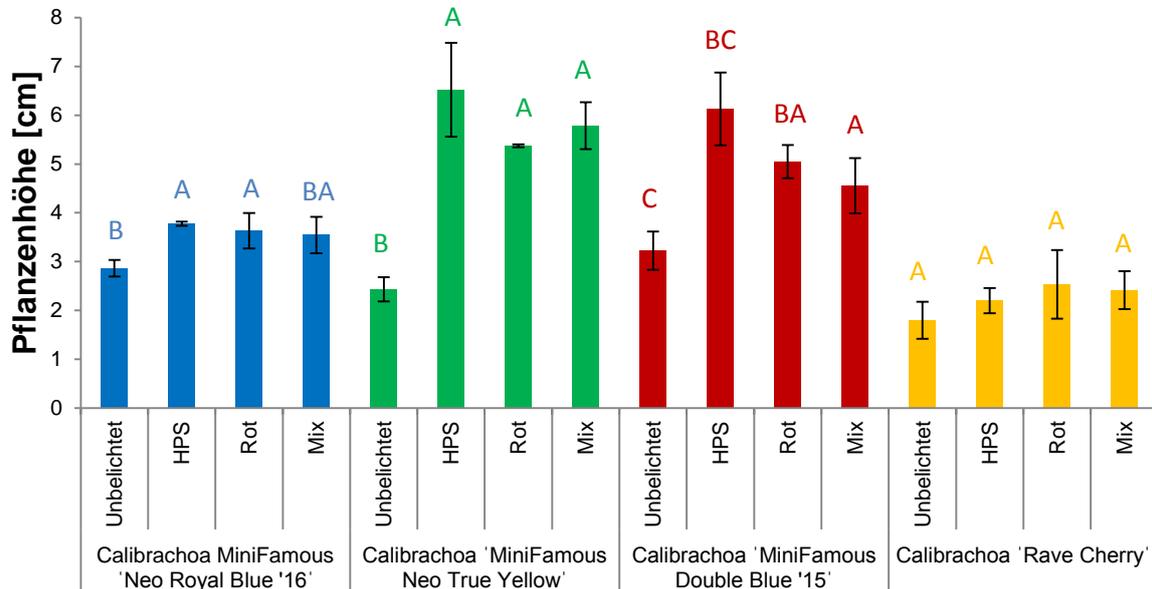


Abbildung 50: Ansicht der Petuniensorten Petunia 'Night Sky' (A), Petunia Swirl 'Cherry Banana' (B), Petunia Deluxe 'Lilac Picotee evol', (C) und Petunia Famous 'Raspberry Star' (D) bei roter Belichtung (660 nm), Mix (400-700 nm), Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS) und einer Nullkontrolle (0) - 13 Tage nach dem Stecken.

#### Ergebnisse der *Calibrachoa*:

Abbildung 51 stellt die Pflanzenhöhe der *Calibrachoa* dar. Die Sorten 'MiniFamous Neo True Yellow' und 'MiniFamous Double Blue' zeigen unter rotem Licht eine ähnliche Reaktion wie die Petunien, sie blieben etwas kompakter. Die Sorten 'MiniFamous Neo Royal Blue 16' und 'Rave Cherry' hingegen zeigen kaum einen

Unterschied zur Natriumdampf-Hochdrucklampe. Lediglich die unbelichtete Variante bleibt kompakt, zeigt aber ebenfalls wie die Petunien keinen Sprosszuwachs und kaum Wurzelwachstum.



**Abbildung 51: Übersicht der Pflanzenhöhe in Abhängigkeit von Sorte und Belichtungsvariante bei *Calibrachoa* – 19 Tage nach dem Stecken. Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).**

Abbildung 52 (A, B, C und D) zeigt den Sprossaufbau und die Bewurzelung der *Calibrachoa*-Sorten. Alle Sorten, die einer zusätzlichen Belichtung ausgesetzt waren, haben, sowohl im Aufbau des Sprosses, als auch in der Bewurzelung einen wesentlichen Vorsprung gegenüber den unbelichteten Pflanzen. Die Bewurzelung war unter allen Belichtungsvarianten vergleichbar gut. Nach 19 Tagen Kulturzeit kann eine angemessene Jungpflanzenqualität erreicht werden. Lediglich die unbelichtete Variante ist mit der Wurzelbildung und dem Sprosswachstum langsamer. Auch bei den *Calibrachoa*-Sorten konnte beobachtet werden, dass die Wurzeln im unteren Bereich begannen die Form des Trays anzunehmen.

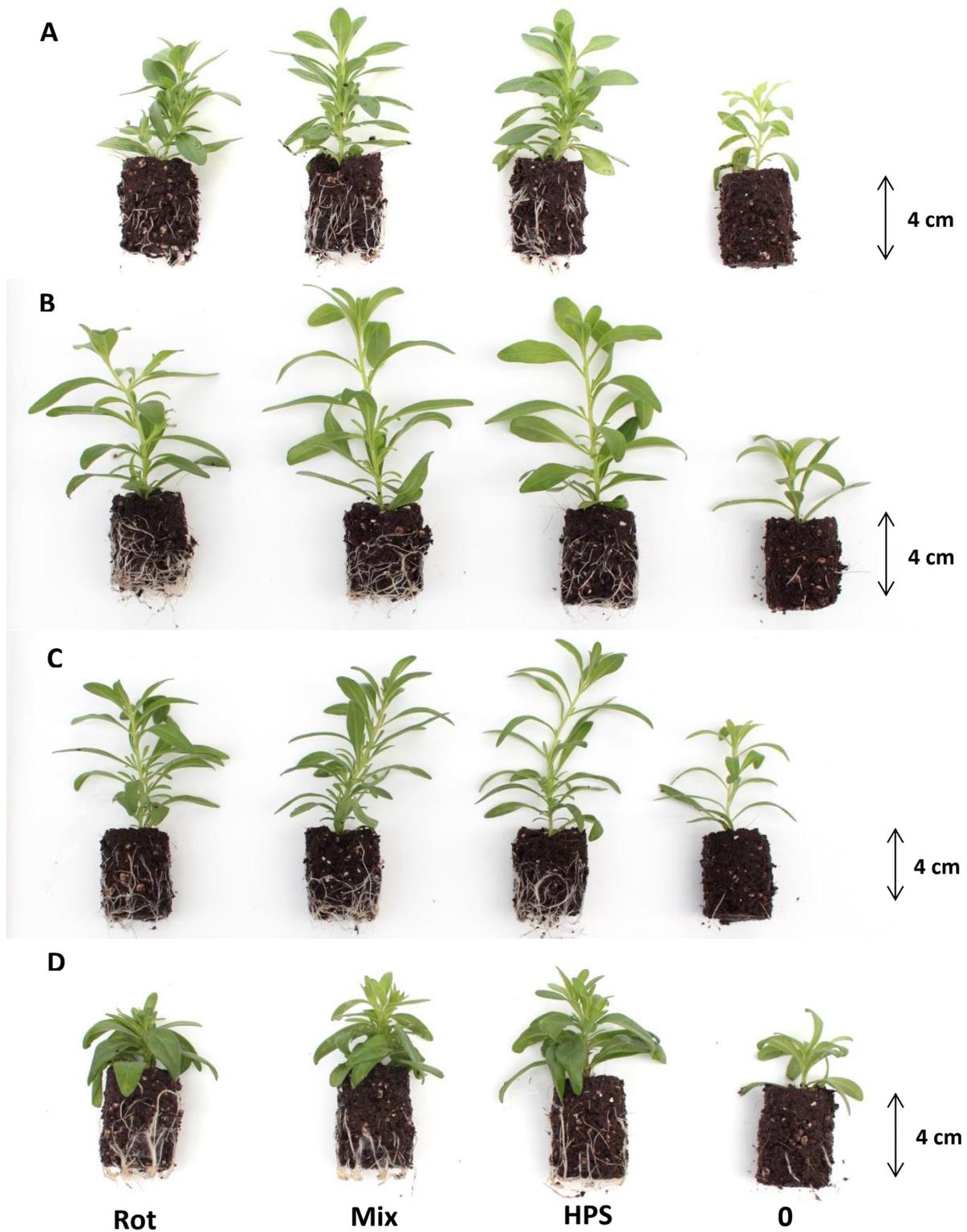


Abbildung 52: Ansicht der Calibrachoaarten MiniFamous 'Neo Royal Blue 16' (A), 'Neo True Yellow' (B), 'Double Blue' (C) und Rave 'Cherry' (D) bei roter Belichtung (660 nm), Mix (400-700 nm), Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS) und einer Nullkontrolle (0) - 19 Tage nach dem Stecken.

## **Diskussion**

Bei den Versuchen ist deutlich zu erkennen, dass zusätzliches Assimilationslicht die Entwicklung der Adventivwurzeln und des Sprossaufbaus fördert. CURREY and LOPEZ, 2013) sagten zeigten ebenfalls, dass zusätzliches Licht bei Petunien zu einer beschleunigten Entwicklung führt. Aus den Ergebnissen der eigenen Studie zur Bewurzelung von *Calibrachoa*- Stecklingen lag der Verdacht nahe, dass durch einen erhöhten Anteil an rotem Licht, eine kompaktere Wuchsform bei Pflanzen hervorgerufen werden kann. Somit wäre es möglich den Hemmstoffeinsatz im Zierpflanzenbau zu reduzieren. Diese Studie konnte diesen Verdacht bestätigen. Bei *Petunia* 'Night Sky' und *Petunia* 'Swirl Cherry Banana' konnte durch rotes Licht eine signifikant kompaktere Pflanze produziert werden, die zusätzlich eine gute Wurzelbildung förderten. Weiterhin ist konnte durch die Zusatzbelichtung eine kurze Kulturzeit erreicht werden. Dies kann zum einen die Flächenproduktivität erhöhen, zum anderen sinkt durch die verkürzte Kulturzeit die Gefahr, dass sich Pflanzenpathogene ausbreiten.

Jedoch ist zu beachten, dass Sortenunterschiede auftreten. Eine einheitliche Kulturmethode für alle Pflanzen einer Gattung ist somit auszuschließen.

Bei den verwendeten *Calibrachoa*-Sorten konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden.

## **Versuch - Kräuter**

### **Einleitung**

Die Stecklingsbewurzelung des Kräutersortimentes im Frühjahr erfordert aufgrund der hiesigen Witterungsverhältnisse zwingend eine Zusatzbelichtung. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades in der Produktion und der Fertigung ist eine einheitliche Jungpflanzenqualität (RC) erforderlich. Um diese zu erreichen ist enormer Energieaufwand notwendig. Mit Hilfe der LED-Technik könnte der Energieeinsatz verringert und durch spezielle Lichtrezepte die Pflanzenqualität verbessert werden. Ziel des Versuches ist es eine möglichst optimale Pflanzenqualität zu erlangen und gleichzeitig den Energieeinsatz zu senken.

## Material und Methoden

Die Kräutersorten wurden von Florensis Deutschland (Weeze, Deutschland) zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurden sechs unterschiedliche Kräuter (*Melissa officinalis* 'Lemon Balm', *Mentha avertensis* 'Strawberry Mint', *Ocimum basilicum* 'African Blue', *Origanum vulgare* 'Dolce Vita', *Salvia eleganz* 'Ananas' und *Stevia rebaudiana* 'Compact') hinsichtlich der Sprossmorphologie unter verschiedenen Lichtbedingungen getestet. Als Versuchsvarianten wurde, eine rot (660 nm) belichtete Variante, eine blau (440 nm) belichtete Variante und eine Mix-Variante (Rot mit 660 nm, Blau mit 440 nm und Weiß mit 4000 K) verwendet. Diese Lichtfarben wurden mit Hilfe einer programmierbaren LED-Leuchte, dem Produktionsmodul III erzeugt (DH Licht, Wülfrath, Deutschland). Als Kontrolle diente eine herkömmliche Natriumdampf-Hochdrucklampe (Gehäuse: MGR 400 SONT, Philips, Hamburg, Deutschland; Leuchtmittel: Master Agro 400 W, Philips, Hamburg, Germany).

Der versuch startete in Woche 4. Die gelieferten Stecklinge wurden dazu in das Jungpflanzensystem Aero NT 104 (Omni Solutions GmbH, Straelen, Deutschland) gesteckt. Und in den ersten fünf Tagen unter einer Folie kultiviert, um eine möglichst hohe Luftfeuchtigkeit zu erreichen (~90 %). Die Temperatur während der Versuchsdauer betrug 22 °C. Die Pflanzen wurden im Langtag von 05:00 bis 22:00 Uhr mit durchgehender Belichtung mit  $\sim 120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  kultiviert. Zur Düngung wurde zwei Mal wöchentlich 1 g L<sup>-1</sup> Wuxal Super (Manna, Ammerbuch-Pfäffingen, Deutschland) eingesetzt.

Insgesamt wurden drei Wiederholungen je Behandlung durchgeführt. Pro Wiederholung wurden 24 Pflanzen zur Versuchsauswertung vermessen. Die Länge der Pflanzen wurde von der Basis (oberer Rand des Erdpressballens) bis zur Vegetationsspitze gemessen. Zur Bewertung der Bewurzelung wurde ein Boniturschema entworfen:

Tabelle 3: Boniturschema zur Auswertung der Bewurzelung unterschiedlicher Stecklings vermehrter Kräutersorten

Boniturnote	Beschreibung
0 = nicht bewurzelt	Keine sichtbaren Wurzeln am Erdpressballen
1 = schwach bewurzelt	0-7 sichtbare Wurzeln am Erdpressballen
2 = mittel bewurzelt	8-15 sichtbare Wurzeln am Erdpressballen
3 = stark bewurzelt	> 15 sichtbare Wurzeln am Erdpressballen

### Ergebnisse des Kräuterversuches

Im Folgenden werden Die Ergebnisse aus dem Teilversuch mit Kräutern vorgestellt. Wie in Abbildung 53 zu erkennen ist, besteht zwischen den einzelnen LED-Belichtungsvarianten innerhalb der jeweiligen Sorte kein Unterschied in der Sprosslänge. Die Sprosslänge unter der Kontrollvariante (HPS) jedoch ist bei allen Kräuterstecklingen signifikant höher.

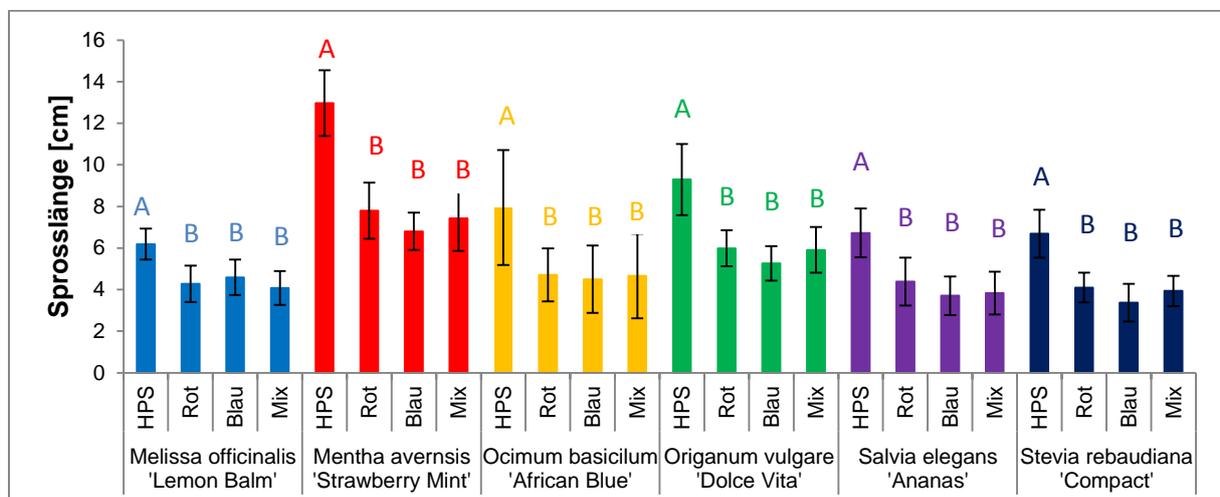


Abbildung 53: Sprosslänge der Kräuterstecklinge unter verschiedenen Lichtbehandlungen. Statistische Auswertung: ANOVA Tukey HSD ( $p = 0,05$ ).

Die Abbildung 54/Abbildung 59 zeigen zusätzlich den Sprossaufbau und die Bewurzelung der Kräuterstecklinge. Gut zu erkennen auf den Bildern ist, dass die Variante mit der Natriumdampfhochdrucklampe im Vergleich zu den LED-Belichteten Varianten ein wesentlich stärkeres Streckungswachstum aufzeigte. Die Bewurzelung der Stecklinge kann in allen Belichtungsvarianten als vergleichbar angesehen

werden. Dies ist einerseits auf den Bildern zu erkennen, zum anderen kann es der Tabelle 4 entnommen werden.



Abbildung 54: *Melissa officinalis* 'Lemon Balm' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix



Abbildung 55: *Mentha avernsis* 'Strawberry Mint' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix



Abbildung 56: *Ocimum Basilicum* 'African Blue' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix



Abbildung 57: *Origanum vulgare* 'Dolce Vita' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix



Abbildung 58: *Salvia elegans* 'Ananas' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix



Abbildung 59: *Stevia rebaudiana* 'compact' 14 Tage nach dem Stecken. Von links nach rechts: HPS, rot, blau, mix

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Wurzelbonitur. Die Bewurzelung von *Melissa officinalis* 'Lemon Balm' war bei den Varianten Mix und HPS sehr gut, bei Rot und Blau im mittleren Bereich. Die Kräuter *Mentha avertensis* 'Strawberry Mint' und *Ocimum basilicum* 'African Blue' zeigten bei allen Lichtbehandlungen eine sehr gute Bewurzelung. Bei *Origanum vulgare* 'Dolce Vita' hingegen blieb die Bewurzelung bei allen Belichtungsvarianten nur im mittleren Bereich. *Salvia elegans* erreichte nur bei der Belichtung mit der Natriumdampf Lampe sehr gute Bewurzelungsergebnisse, die Bewurzelung unter den übrigen Belichtungsvarianten

erreichten lediglich die Boniturnote 2 welche einer mittleren Bewurzelung entspricht. Am unterschiedlichsten waren die Ergebnisse bei *Stevia rebaudiana* 'Compact'. Die Natriumdampflampe sowie die Belichtungsvariante Mix zeigten bei der Wurzelbildung die besten Ergebnisse, die rote Belichtung eine mittlere Bewurzelung und die blaue Belichtung mit weniger als 8 Wurzeln eine eher schlechte Bewurzelung.

Tabelle 4: Ergebnisse der Wurzelbonitur der unterschiedlichen Kräutergattungen (0 = unbewurzelt, 1 = schlecht bewurzelt, 2 = mittel bewurzelt, 3 = gut bewurzelt)

Gattung	Belichtung	Boniturnote
<b><i>Melissa officinalis</i></b> <b>'Lemon Balm'</b>	HPS	3
	Rot	2
	Blau	2
	Mix	3
<b><i>Mentha avernensis</i></b> <b>'Strawberry Mint'</b>	HPS	3
	Rot	3
	Blau	3
<b><i>Ocimum basilicum</i></b> <b>'African Blue'</b>	HPS	3
	Rot	3
	Blau	3
	Mix	3
<b><i>Origanum vulgare</i></b> <b>'Dolce Vita'</b>	HPS	2
	Rot	2
	Blau	2
	Mix	2
<b><i>Salvia elegans</i></b> <b>'Ananas'</b>	HPS	3
	Rot	2
	Blau	2
	Mix	2
<b><i>Stevia rebaudiana</i></b> <b>'Compact'</b>	HPS	3
	Rot	2
	Blau	1
	Mix	3

## Diskussion

Die Ergebnisse des Kräuterversuches zeigten beim Sprosswachstum zwischen einzelnen LED-Behandlungen keine signifikanten Unterschiede. Innerhalb der jeweiligen Gattung konnten alle Pflanzen als gleich kompakt angesehen werden. Die aus den Calibrachoa-Versuchen bekannte wuchhemmende Wirkung des roten Lichtes sowie die Wuchsfördernde Wirkung des blauen Lichtes konnte bei den verwendeten Kräutern nicht festgestellt werden. Da jedoch aus weiteren Versuchen bekannt ist, dass Sorten unterschiedlich auf die gleichen Spektralbereiche reagieren können, kann dies ein möglicher Grund hierfür sein. Die Behandlungsvariante mit der

Natriumdampf-Hochdrucklampe hingegen, zeigte eine signifikante Steigerung des Sprosswachstums. Dies konnte bereits bei Versuchen an der Kultur von *Calibrachoa* festgestellt werden. In beiden Versuchen, sowohl bei den *Calibrachoa*, als auch bei den Kräutern, konnte eine erhöhte Blatt- und Substrattemperatur festgestellt werden. Es ist bekannt, dass höhere Temperaturen zu einem stärkeren Streckungswachstum führen (GRAVES ET AL., 1989). Eine bessere Bewurzelung konnte in diesem Versuch, entgegengesetzt zum *Calibrachoa*-Sorten, nicht nachgewiesen werden.

## Versuch - Tomaten und Gurken

### Einleitung

Bei der Produktion und während der Lagerung von Tomaten- und Gurkenjungpflanzen können bereits nach kurzer Zeit Qualitätsminderungen in Form von starkem Längenwachstum auftreten. Um dem entgegenzuwirken soll mit einer zusätzlichen Belichtung (rotes Licht 660 nm) die Pflanze kompakt gehalten werden. Der Versuchsansatz beruht auf den Erfahrungen mit Petunien und *Calibrachoa*, bei denen rotes Licht kompaktes Wachstum förderte. In diesem Versuch wird die Auswirkung unterschiedlicher Spektralbereiche Tomaten/Gurkensämlinge getestet. Der Zuwachs der Jungpflanzen wird über einen Zeitraum von 5-12 Tagen täglich dokumentiert.

### Material und Methoden

Das Saatgut der Tomate *Lycopersicon esculentum* L. 'Harzfeuer F1' und der Gurke *Cucumis sativus* 'Tanja' wurden von Grainesvoltz, Colmar, Frankreich zur Verfügung gestellt. Als Versuchsvarianten wurde, eine rot (660 nm) belichtete Variante, eine blau (440 nm) belichtete Variante und eine Mix-Variante (Rot mit 660 nm, Blau mit 440 nm und Weiß mit 4000 K) verwendet. Diese Lichtfarben wurden mit Hilfe einer programmierbaren LED-Leuchte, dem Produktionsmodul III erzeugt (DH Licht, Wülfrath, Deutschland). Als Kontrolle diente eine herkömmliche Natriumdampf-Hochdrucklampe (Gehäuse: MGR 400 SONT, Philips, Hamburg, Deutschland; Leuchtmittel: Master Agro 400 W, Philips, Hamburg, Germany).

Der versuch startete in Woche 8. Das Saatgut wurde in Aussaaterde (P) ausgebracht und bei 22 °C zur Keimung gebracht. Die Temperatur während der Versuchsdauer betrug 22 °C und die Lichtexposition mit  $\sim 120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  16 Stunden täglich.

Insgesamt wurden drei Wiederholungen je Behandlung durchgeführt. Pro Wiederholung wurden 12 Pflanzen zur Versuchsauswertung vermessen. Die Länge der Pflanzen wurde von der Basis (oberer Rand des Erdpressballens) bis zur Vegetationsspitze gemessen. Mit Hilfe von Microsoft Excel wurde eine Wachstumskurve über die Kulturzeit erstellt.

## Ergebnisse

Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen die Ergebnisse der Versuche mit *Cucumis sativus* 'Tanja'. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Belichtungsvariante mit der Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS) durchgehend eine größere Sprosslänge aufweist. Die Sprosslänge der LED-Belichtungsvarianten sind zu Beginn der Versuchszeit nahezu identisch. Ab etwa der Hälfte der Kulturzeit steigt die Sprosslänge bei den blau belichteten Pflanzen jedoch stark an und erreicht die selbe Pflanzenhöhe wie die Pflanzen unter der Natriumdampf-Hochdrucklampe. Die rot und mix belichteten Pflanzen strecken sich weniger stark und haben eine um ca. 2 cm reduzierte Höhe im Vergleich zu den anderen Belichtungsvarianten.

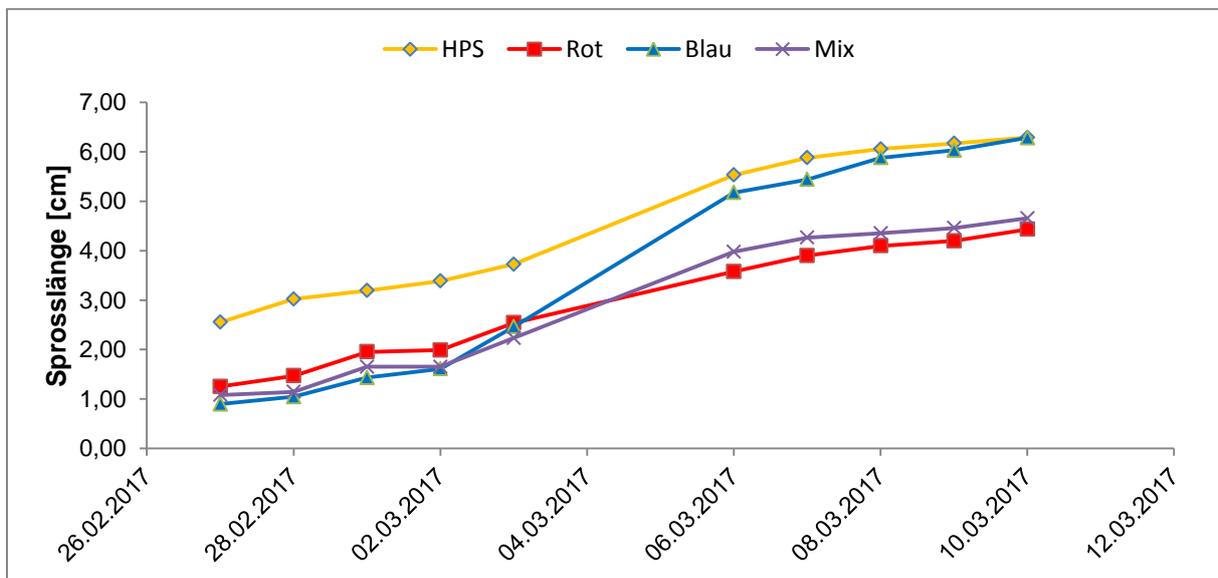


Abbildung 60: Wachstumskurve von *Cucumis sativus* 'Tanja' über einen Zeitraum von 13 Tagen nach der Aussaat.



Abbildung 61: Ansicht der *Cucumis sativus* 'Tanja' 13 Tage nach der Aussaat unter den unterschiedlichen Spektralbereichen. Von links nach rechts: HPS, rot, blau und mix.

Abbildung 62 Abbildung 63 zeigen die Entwicklung der Tomate *Lycopersicon esculentum* L. 'Harzfeuer F1' über einen Zeitraum von 13 Tagen nach der Aussaat. Wie in Abbildung 62 zu erkennen ist, führt die Belichtung mit der Natriumdampf-Hochdrucklampe zu einem stärkeren Streckungswachstum des Sprosses. Eine Belichtung mit rotem Licht zeigt eine sehr ähnliche Entwicklung. Die Belichtung mit blau oder einer Mischung aus verschiedenen Spektralbereichen hingegen führt zu etwas kompakteren Pflanzen.

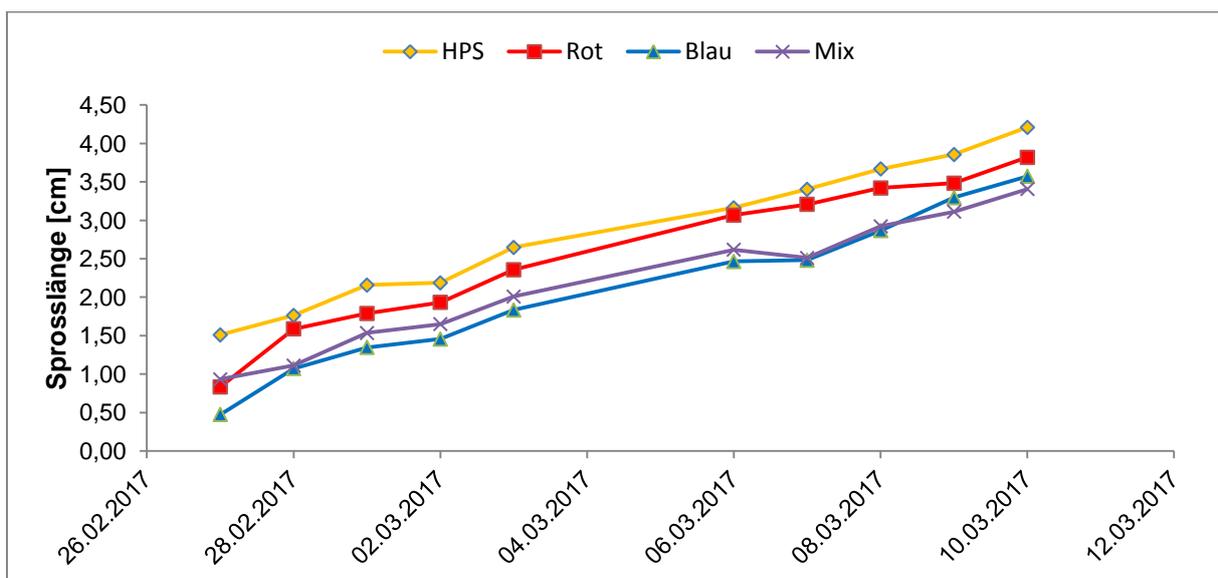


Abbildung 62: Wachstumskurve von *Lycopersicon esculentum* L. 'Harzfeuer F1' über einen Zeitraum von 13 Tagen nach der Aussaat.



Abbildung 63: Ansicht der *Lycopersicon esculentum* L. 'Harzfeuer F1' 13 Tage nach der Aussaat unter den unterschiedlichen Spektralbereichen. Von links nach rechts: HPS, rot, blau und mix.

### Diskussion

Die Versuche mit den Kräutern haben gezeigt, dass die Bewurzelung nach der Aussaat von *Cucumis sativus* 'Tanja' und *Lycopersicon esculentum* L. 'Harzfeuer F1' sowohl unter der Natriumdampf-Hochdrucklampe, als auch unter den LED-Belichtungen gut funktioniert. Wie bereits in den Versuchen der LWG beschrieben, konnte bei *Calibrachoa*-Stecklingen unter rotem Licht ein kompakteres Wachstum erzielt werden. Bei der Produktion von Gemüsejungpflanzen, insbesondere von Gurken und Tomaten, kommt es aufgrund von zeitweiser Lagerung der Jungpflanzen zu Qualitätsverlusten. Diese äussern sich in Form von starker Streckung des Sprosses. Mit Hilfe von angepassten Lichtrezepten, könnte somit dem Qualitätsverlust entgegengewirkt werden. Wie die Ergebnisse zeigen, könnte bei der Gurke *Cucumis sativus* 'Tanja' eine Belichtung mit rotem Licht (660 nm), im Vergleich nur Natriumdampfhochdrucklampe zu einer kompakteren Pflanze führen und somit den Lagerzeitraum eventuell verlängern. Bei der Tomate *Lycopersicon esculentum* L. 'Harzfeuer F1' hingegen, konnte gegensätzliches beobachtet werden. In diesem Fall begünstigte die Belichtung mit blauem Licht eine kompaktere Wuchsform. Eine Kombination aus optimaler (kühle Kultur und Lagerung) und einer zusätzlichen Lichtbehandlung könnte damit die Lagerzeit erhöhen, ohne einen gravierenden Qualitätsverlust einzufahren. Damit wären die Produzenten von Gemüsejungpflanzen flexibler, um auf übersättigte Märkte oder unvorhergesehene Witterungsbedingungen zu reagieren.



## **Versuchsteil der HSWT:**

### **Die Forschungsziele / Der Wechsel von herkömmlichen Leuchtmitteln zu LEDs**

Licht ist ein entscheidender Produktionsfaktor im Gartenbau. Bis zur Entwicklung der LED Technologie war es jedoch nur sehr in begrenztem Umfang möglich das Lichtspektrum auf die Bedürfnisse der Pflanzen hin zu optimieren. Nun ergeben sich neue Möglichkeiten Licht besser und effizienter einzusetzen. Für den Praxiseinsatz der LED Technologie fehlen aber noch die notwendigen Erfahrungen. Dringende Fragen wie das richtige Verhältnis der Wellenlängen und die optimale Intensität sind noch unbeantwortet. Ebenso sind die Grenzen dieser Technologie noch unerforscht. Ziel dieser Arbeit war es daher diese Lücken zu schließen. Der besondere Fokus lag dabei auf folgenden Fragen:

Wie beeinflusst die Zusammensetzung des Spektrums die Morphologie?

Wie verändern sich die Inhaltsstoffe von Pflanzen unter verschiedenen Spektren?

Wie kann durch Licht die Bewurzelung verbessert werden?

### **Der Einfluss des Lichts auf die Morphologie**

Zierpflanzen müssen für den Kunden optisch ansprechend sein. In Deutschland gelten Zierpflanzen als qualitativ hochwertig, wenn sie einen kompakten Wuchs aufweisen und mindestens eine ansprechende Blüte aufweisen. In der Praxis wird der kompakte Wuchs oftmals dadurch erreicht, dass das Längenwachstum künstlich unterdrückt wird. Dazu wird die Biosynthese des für das Längenwachstum notwendigen Pflanzenhormons Gibberrelinsäure durch die Zugabe von chemischen Inhibitoren unterbunden. Diese sogenannten Stauchungsmittel gehören formell zu den Pestiziden und sind daher nicht unumstritten. In den letzten Jahren nahm die Forderung nach einer pestizidfreien Kultur auch im Bereich der Zierpflanzen zu. Derzeit werden verschiedene Alternativen für das Inhibieren des Längenwachstum von Zierpflanzen in getestet. Dazu gehören mechanische Verfahren wie die Verwendung von Schütteltischen, Restriktion von Nährstoffen und Wasser und eine Temperaturabsenkung in den Morgenstunden. Letzteres wird in Weihenstephan seit vielen Jahren getestet und unter dem Namen „Weihenstephaner Modell“ in der gärtnerischen Praxis vorgestellt. Obwohl alle diese Methoden mehr oder weniger

zielfördern sind kann keine der Methoden den Einsatz von Stauchungsmitteln vollständig ersetzen.

In den letzten Jahren verdichten sich die Hinweise darauf, dass Licht einen entscheidenden Einfluss auf das Längenwachstum von Zierpflanzen hat. Zum einen beeinflusst Licht das Streckungswachstum dadurch, dass es die Energie für die Synthese der notwendigen Biomasse liefert. Dazu nehmen spezielle Photorezeptoren auch die Qualität des Lichtes wahr. Das heißt, sie detektieren die spektrale Zusammensetzung. Aus dieser kann die Pflanze Informationen über ihren Standort und ihre unmittelbare Nachbarschaft extrahieren. Da das Chlorophyll rotes und blaues Licht absorbiert weist ein hoher Anteil an dunkelrotem Licht darauf hin, dass eine Beschattung durch andere Pflanzen stattfindet. Ein hoher Anteil an blauem Licht dagegen weist auf einen freien Stand hin. Versuche haben gezeigt, dass Pflanzen, die von anderen Pflanzen beschattet werden ein verstärktes Streckungswachstums aufweisen und dass dies mit dem Anteil an dunkelrotem Licht in Verhältnis zum hellroten Licht korreliert. Physiologisch wird dieses Verhalten so gedeutet, dass das Beschattungssignal die Pflanze dazu anregt aus dem Schatten der anderen herauszuwachsen. Daneben gilt blaues Licht als wachstumshemmend.

Diese Daten legen nahe, dass durch ein geeignetes Spektrum Einfluss auf das Streckungswachstum von Zierpflanzen genommen werden kann. Der Einsatz von Licht von geeigneter Qualität könnte daher ein weiterer wichtiger Schritt in die Richtung einer pestizidfreien Kultur von Zierpflanzen sein. Obwohl dieses Phänomen in der Pflanzenphysiologie gut bekannt ist, gab es aufgrund der geringen Flexibilität herkömmlicher Gewächshausbelichtungen kaum Ansätze dieses Wissen in die gärtnerische Praxis zu übersetzen. Mit der Entwicklung der LEDs hat sich die Situation geändert. Nun können die Spektren der Leuchtmittel leicht verändert werden.

Um zu testen ob Licht geeignet ist das Wachstum von Pflanzen im Gewächshaus zu beeinflussen wurden Sonnenblumen (*Helianthus annuus*) unter 12 verschiedenen Lampen kultiviert. Sonnenblumen sind typische Modellpflanzen in der Landwirtschaft und im Gartenbau, da sie klar getrennte Wachstumsphasen aufweisen. Das heißt, Sonnenblumen blühen nicht während der Wachstumsphase und wachsen kaum während der Blüte. Dies erlaubt es den Einfluss des Lichts auf diese zwei Phasen

getrennt zu untersuchen. Außerdem sind Sonnenblumen aufgrund ihrer Größe gut für das Studium des Streckungswachstums geeignet.

### **Beeinflussung des Rosmarinsäuregehalts in Basilikum und Borretsch**

Kräuter und Gewürze stellen eine wichtige Nahrungsquelle von Polyphenolen dar. Polyphenole sind pflanzliche Sekundärmetabolite. Aufgrund ihrer chemischen Struktur adsorbieren viele Polyphenole sichtbares Licht und verleihen somit den Pflanzen ihre Farbe. Diese Klasse der Polyphenole wird oft als Flavonoide und Anthocyanine bezeichnet. Einige Flavonoide adsorbieren auch UV Licht und schützen damit die Deoxyribonukleinsäure (DNA) vor Schädigungen (KOOTSTRA 1994). Alle Polyphenole sind auch Antioxidantien. Antioxidantien neutralisieren reaktive Sauerstoffradikale bevor sie die DNA nachhaltig schädigen können. Als besonders aktiv haben sich die Polyphenole aus der dem Phenylpropanoid Biosyntheseweg herausgestellt. Die wichtigsten Vertreter dieser Klasse in Kräutern sind die Kaffee- und die Rosmarinsäure.

Im Tiermodellen hat sich gezeigt, dass die Kaffee- und Rosmarinsäure auch eine antidepressive (TAKEDA ET AL. 2002) und entzündungshemmende Wirkung entfaltet (SANBONGI ET AL. 2004). Daneben wird auch eine antikanzerogene Wirkung diskutiert (NGO ET AL. 2011). Im Gegensatz zu vielen anderen pflanzlichen Sekundärmetaboliten wird die Rosmarinsäure im menschlichen Darm teilweise aufgenommen, so dass ein positiver Effekt beim täglichen Verzehr durchaus realistisch ist (BABA ET AL. 2005).

Für beide Substanzen wurden auch antimikrobielle Eigenschaften *in vitro* beschrieben (WIDMER & LAURENT 2006). Für die gärtnerische Praxis könnten ins Besondere die Aktivität gegen pflanzenpathologische Pilze von großem Interesse sein. So konnte gezeigt werden, dass Rosmarinsäure das Wachstum von *Aspergillus* und *Pseudomonas* inhibiert (BAIS ET AL. 2002). In der Literatur finden sich auch Hinweise darauf, dass die Rosmarinsäure die Resistenz gegen das Ulmensterben vermittelt (MARTÍN ET AL. 2013). Die genaue Wirkungsweise ist jedoch bisher unbekannt. Ebenso gibt es keine Untersuchungen die zeigen, dass der positive Effekt der Rosmarinsäure außerhalb einer Petrischale, also an der tatsächlichen Kultur realisiert werden kann.

In den letzten Jahren häuften sich die Hinweise, dass die Biosynthese von Polyphenolen des Phenylpropanoid Biosynthesewegs durch Licht geregelt wird. Untersuchungen des Biosyntheseweges im Senf (*Sinapis alba*) haben gezeigt, dass die Aktivität das Enzym, dass die erste Reaktion katalysiert durch den Photorezeptor Phytochrom geregelt wird (BEGGS ET AL. 1987, LANGE ET AL. 1971). Da dasselbe Enzym auch die Vorstufen der Kaffee- und Rosmarinsäure synthetisiert ist es naheliegend, dass die deren Konzentration ebenfalls von Phytochrom reguliert wird. Hinweise darauf finden sich in der Arbeit von Shiga (SHIGA ET AL. 2009). In dieser Arbeit wird gezeigt, dass rotes Licht die Menge an Rosmarinsäure in Basilikum (*Ocimum basilicum*) beeinflusst. Allerdings konnte Shiga weder den Mechanismus noch statistisch gesicherte Daten vorweisen.

Basilikum ist ein Vertreter der Familie der Lamiaceae, einer Familie aus der die meisten Topfkräuter entstammen. Untersuchungen haben gezeigt, dass viele Arten dieser Familie Rosmarinsäure bilden (SHEKARCHI ET AL. 2012). Allerdings findet sich die Rosmarinsäure auch in Vertretern anderer Pflanzenfamilien. Die Fähigkeit Rosmarinsäure zu bilden lässt sich sogar bis zu den evolutionär sehr alten Hornmoosen zurückverfolgen (PETERSEN ET AL. 2009). Dies lässt darauf schließen, dass der Biosyntheseweg, der zur Bildung der Rosmarinsäure führt im Pflanzenreich weit verbreitet ist. Ebenso kann man vermuten, dass die Art wie die Konzentration der Rosmarinsäure geregelt wird sehr ähnlich ist.

In dieser Arbeit wurde daher die Hypothese verfolgt, dass der Rosmarinsäuregehalt durch rotes und dunkelrotes Licht geregelt werden kann. Um dies experimentell zu verifizieren wurden Basilikumpflanzen unter LEDs, die unterschiedliche Verhältnisse von rotem zu dunkelrotem Licht emittieren kultiviert. Die Analyse des Rosmarinsäuregehalts erfolgte mittel Massenspektrometrie.

Um zu testen ob unsere Ergebnisse auch auf andere Pflanzenarten übertragbar ist wurde neben Basilikum auch Borretsch (*Borago officinalis*, Familie der Boraginaceae) unter den gleichen Bedingungen angebaut und untersucht.

### **Bewurzelung von Stecklingen**

In Deutschland werden jedes Jahr mehr als 1,5 Mrd. Jungpflanzen produziert. Jungpflanzen werden entweder aus Saatgut (generativ) oder aus Stecklingen

(vegetative) gewonnen. Letzteres gewinnt zunehmend an Popularität. Allein die zehn größten deutschen Zierpflanzenzüchter produzieren in etwa 3 Mrd. Stecklinge jedes Jahr.

Stecklinge sind unbewurzelte Pflanzenteile, die durch geeignete Maßnahmen zur Wurzelbildung angeregt werden. Während der Bewurzelungsphase ist der Steckling äußerst fragil. Aufgrund des Fehlens der Wurzeln kann der Steckling kaum Wasser und Nährstoffe aufnehmen und tendiert daher zum Auszutrocknen. Ebenso findet nur sehr begrenzt Photosynthese statt, so dass kaum Baustoffe für das Wachstum gebildet werden können. Untersuchungen von Svenson (SVENSON & DAVIES 1990) haben gezeigt, dass bei Poinsettien (*Euphorbia pulcherrima*) nahezu vollständig aussetzt, bis die ersten Wurzelansätze zu erkennen sind. Das sind in der Regel 7 bis 10 Tage. Da die Bewurzelung der Stecklinge somit eine der kritischsten Phasen in der Kultur von Zierpflanzen darstellt, ist jede Methode, die die Bewurzelungsphase verkürzt von großem Interesse für die Industrie.

Es ist seit langem bekannt, dass die Bildung der Adventivwurzel durch das Pflanzenhormon Auxin angeregt wird. In der Vergangenheit war es daher üblich Stecklinge in synthetisch hergestelltes Auxin zu tauchen um die Bewurzelung zu fördern. Das Ausbringen von Auxin für die Bewurzelung wird seit langem kritisch gesehen und ist in Deutschland nicht mehr zugelassen. Studien an *Arabidopsis* Keimlingen haben gezeigt, dass der pflanzeigene Auxingehalt von der Lichtqualität abhängt. Blaues Licht fördert durch die Stimulierung von Cryptochromen im Blatt die Bildung von Auxinen. Auf der anderen Seite gibt es auch Hinweise, dass blaues Licht die Wurzelbildung hemmt. Gleichzeitig ist es unklar welche Rolle die Photosynthese während der Bewurzelungsphase spielt. Im letzten Teil der Arbeit wurde daher die Bewurzelung von Stecklingen unter verschiedenen LED Leuchten untersucht. Dabei wurde auch die These von Svenson et al getestet.

## **Material und Methoden**

### **Kultur von Sonnenblumen und Beet- und Balkonpflanzen**

Die Versuche fanden in den Jahren 2012 und 2013 im Gewächshaus der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf statt. Die Kulturzeit lag zwischen den Monaten Oktober bis Januar statt. Die Sonnenblumen Sorten `Pacino gold` und `Pacino cola`

wurden aus Samen im Gewächshaus gezogen. Als Substrat diente Einheitserde. Die Bewässerung erfolgte durch ein Ebbe-Flut System. Als Dünger wurde Fertyl 1 eingesetzt. Nach einem Monat wurden die Sonnenblumen mit Daminozid (1%) gestaucht um ein gleiches Wachstum zu Beginn der Kultur zu garantieren.

Die getopften Jungpflanzen wurden randomisiert unter die einzelnen Lichtquellen auf den Kulturtischen verteilt. Die Zusatzbelichtung erfolgte von 1 bis 23 Uhr (22 Stunden/Tag) und die Lichtintensität war  $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Die Temperatur im Gewächshaus lag bei 20 °C. Die spektrale Zusammensetzung unter den Lampen wurde an zwei Tagen zu Beginn der Kulturzeit mit einem Spektrometer (Jazz, Ocean Optics, Dunedin, USA) gemessen. Die Wellenbänder, die den Farben blau (420-480 nm), rot (620-680 nm) und dunkelrot (700-750 nm) entsprechen, wurden gemäß der Publikation von SELLARO (2010) gewählt. Die photosynthetische aktive Strahlung (400-700 nm) wurde mit einem Quantensensor (LiCOR Bioscience, Huddleston, England) gemessen.

Am Ende der Kulturzeit wurden die Höhe, das Gewicht, die Fläche und die Anzahl der Blätter, die Anzahl der Blüten, der Blütendurchmesser und die Zeit bis zur ersten Blüte (Anthesis) gemessen. Die Blüte galt als geöffnet sobald der Blütenboden sichtbar war. Aus dem Quotienten des Gewichts und der Höhe wurde die Kompaktheit berechnet. Je schwerer und kleiner eine Pflanze war, desto größer ist der Wert Kompaktheit.

Die klassischen Beet- und Balkonpflanzen *Agryranthemum*, *Aspilia*, *Calibrachoa*, *Pelargonium*, *Verbena* und *Xerochrysum* wurden als Jungpflanzen von Lazzeri (Italien) bezogen. Die Pflanzen wurden nach der Anlieferung getopft und im Gewächshaus weiterkultiviert. Die Bewässerung erfolgte durch ein Ebbe-Flut System. Als Dünger wurde Fertyl1 eingesetzt. Die Pflanzen wurden mit Daminizide (0.1 %) gestaucht. Die Belichtungen bestanden aus LEDs von Valoya (AP673), DHLicht (mit demselben Spektrum wie AP673, aber mit höherem Blauanteil), Osram (rote LEDs) und einer Natriumdampflampe (Philips).

**Tabelle 5: Spektrale Zusammensetzung der eingesetzten Lichtquellen. Die Wellenbänder sind wie folgt definiert: 420-480 nm blau (B), 620-680 nm rot (R) und 700-750 nm dunkelrot (FR). HPS, Natriumdampflampe. Pfr/P, geschätztes Phytochrome Photoequilibrium nach SMITH (1982).**

Lampe	Lichtquelle	Hersteller und Spektrum	Anteil der Photonen pro Wellenband (%)			ratio R:FR	ratio B/R	Pfr/P
			blau	rot	dunkelrot			
1	LED	Osram	2	86	2	1	0.0	0.54
2	LED	Optogan	6	57	35	0.2	0.1	0.16
3	HPS	Philips	7	30	12	0.6	0.2	0.43
4	LED	Valoya G2	12	53	25	0.5	0.2	0.40
5	LED	Valoya AP673	13	40	19	0.7	0.3	0.48
6	MH	Philips	14	16	7	2.0	0.9	0.62
7	LED	Valoya AP67	14	35	9	1.6	0.4	0.60
8	LED	Valoya NS2	18	25	4	4.5	0.7	0.69
9	LED	Osram	87	2	2	43.5	43.5	> 0.8

### Kultur von Basilikum und Borretsch

Die Versuche fanden in den Monaten April und Mai (Basilikum) und Oktober und November (Borretsch) 2013 statt. Basilikum und Borretsch wurden im Gewächshaus aus Saatgut in Töpfen gezogen. Nachdem die Pflanzen das Keimblattstadium überschritten hatten wurden sie auf die verschiedenen Lichtvarianten verteilt. Variante 1 wurde im Gewächshaus weiterkultiviert. Das Gewächshaus befand sich auf dem Campus der Hochschule (geographische Breite 48°, 24', 6'' und geographische Länge 11°, 43', 53''). Die Varianten 2 bis 4 wurden ausschließlich unter Kunstlicht im Institut für Gartenbau der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf weiterkultiviert. Die Belichtungsvarianten waren LEDs von Valoya (Spektrum AP673 und G2), Fluoreszenzlampen (Osram Fluora) und eine Kontrolle im Gewächshaus. Die Lampen wurden so angebracht, dass eine Lichtintensität von  $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  gegeben war. Belichtet wurde für 22 Stunden am Tag. Nach der Wachstumsphase wurden die Pflanzen geerntet und gefriergetrocknet. Die Höhe und das Frischgewicht wurden festgehalten. Das getrocknete Material wurde in eine Kugelmühle gemahlen und anschließend in Methanol gelöst. Die Extrakte wurden mittels LC-MS/MS

analysiert. Als Standards für die Quantifizierung dienten reine Rosmarin- und Kaffeesäure (beide von Sigma-Aldrich, Deutschland).

Für die Belichtung wurden zwei LEDs von Valoya Oy (Helsinki, Finnland) mit den Spektren G2 und AP673 und die Fluora Fluoreszenzlampe von Osram (OF) ausgewählt. Wie aus Tabelle 2 zu ersehen ist, unterscheiden sich die Lampen deutlich in den versuchsrelevanten Spektralbereichen blau, rot und dunkelrot. Die Lampen wurden so angebracht, dass sie eine Photonenflußdichte von  $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  aufwiesen. Die Belichtungszeit betrug 16 h pro Tag. In einem weiteren Versuch wurden Basilikumpflanzen nur unter blauem und rotem Licht kultiviert. Dazu wurden Prototyp LEDs von Osram verwendet, die nur rotes und blaues Licht aussenden. Aus technischen Gründen konnten dort nur eine Photonenflußdichte von  $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  eingestellt werden. In diesem Versuch wurden die rot blau Verhältnisses von 0% rot, 25% rot, 50% rot, 75 % rot und 100% rot getestet.

**Tabelle 6: Prozentualer Anteile an blauem, rotem und dunkelrotem an den Spektren der einzelnen Lampen.**

Light regime	blue (400-500 nm)	red (620-690 nm)	far-red (720-740 nm)
OF	28.6	40.8	3.9
G2	7.3	67.0	25.7
AP673	13.1	56.5	6.8

### **Kultur von Poinsettien-Stecklingen**

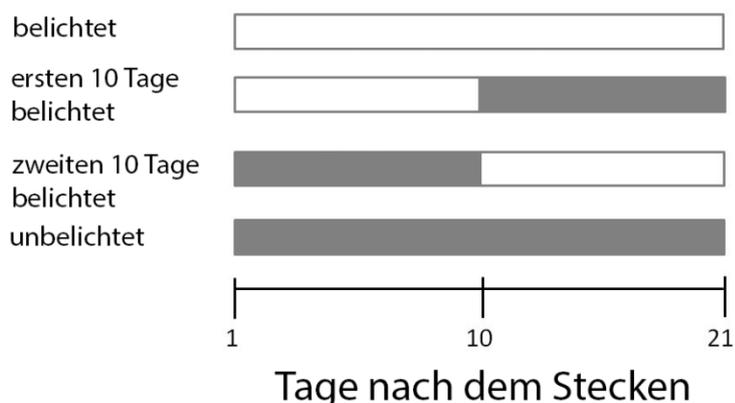
Die Stecklinge wurden von Selecta Klemm (Stuttgart) bezogen und in einer in das Gewächshaus integrierten Glaskabine bewurzelt. Durch die doppelte Glasschicht und die Einbauten war die Intensität des Außenlichts in der Kabine um 2/3 reduziert. Die Bewurzelung erfolgte in Substrat. Um das Austrocknen zu verhindern wurde zunächst unter Vlies bei einer nahezu gesättigten Atmosphäre kultiviert. Die Temperatur in den Kabinen war von °C und. In die Kabinen wurden LEDs und andere Lampen verschiedener Hersteller aufgehängt. Während der Bewurzelungsphase wurden die Stecklinge für 16h mit einer PAR-Intensität von  $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PAR belichtet. Die verwendeten Leuchtmittel und die dazugehörigen Spektren sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

**Tabelle 7: Spektren der verschiedenen LEDs. Die Wellenbereiche sind wie folgt definiert, 420-480 nm, blau; 620-680 nm, rot; 700-750 nm, dunkelrot und 500-600 nm, grün.**

LEDs	blau (%)	rot (%)	dunkelrot (%)	grün (%)
blau	100	-	-	-
rot	-	100	-	-
blau + rot	50	50	-	-
blau + rot + dunkelrot	15	75	10	-
AP673	12	61	8	19
G2	8	65	25	2

Nach der Kulturphase wurden die Wurzeln gewaschen und gewogen. Die Anzahl und Länge der einzelnen Wurzeln wurde festgehalten.

Um die These von Svenson, dass eine Belichtung in der ersten Woche nach dem Stecken keinen Einfluss auf die Bewurzelung von Poinsettienstecklingen hat, zu testen wurden die Stecklinge in vier Gruppen eingeteilt. Variante 1 wurde über den gesamten Bewurzelungszeitraum hinweg belichtet. Variante 2 wurde nicht belichtet. Variante 3 wurde nur während der ersten 10 Tage der Bewurzelung belichtet und Variante 4 nur in der zweiten 10 Tage. Die vier Varianten sind schematisch in Abbildung dargestellt.



**Abbildung 64: Belichtungsvarianten und Kulturschema von Poinsettienstecklingen.**

Nach der Bewurzelungsphase wurde das Substrat entfernt und die Anzahl, die Länge und die Masse der Wurzeln festgehalten. Zudem wurden mehrere Jungpflanzen getopft um deren weitere Entwicklung zu verfolgen.

## **Messungen**

Die Photosynthese wurde mit einem Gaswechsellanalysator gemessen (Bioscientific, London, UK). Die Chlorophyllfluoreszenz mit einem Fluorometer gemessen (Walz, Deutschland). Für die Messung des Turgordrucks wurden ZIM-Sonden verwendet.

Die histologischen Schnitte wurden im Labor von Prof. Treutter (TUM München) durchgeführt. Dazu wurden Blätter in Harz eingebettet, mit einem Microtom geschnitten und anschließend mit Toloidin und Safranin gefärbt. Die Schnitte wurden mit einem Mikroskop der Firma Zeiss (Jena, Deutschland) vermessen.

Zur Messung des Wassergehalts wurden Blätter von der Pflanze entnommen, gewogen und anschließend im Trockenschrank getrocknet. Aus der Differenz des Trocken- zum Feuchtgewicht ergibt sich der Wassergehalt.

## **Statistische Auswertung**

Alle Daten wurden auf Normalverteilung mit dem Kolmogorow-Smirnow Test untersucht. Nicht normalverteilte Daten wurden logarithmiert. Daten, die nach der logarithmischen Transformation eine Normalverteilung aufwiesen wurden mittels ANOVA auf signifikante Unterschiede untersucht. Die Standardabweichung der logarithmierten Daten wurde nach Rücktransformation mit den Zeichen  $\cdot/$  anstelle von  $\pm$  angegeben (LIMPERT ET AL. 2001). Für den Test auf gleiche Varianz (Homoskedastizität) wurde die Methode von Bartlett oder Levene verwendet. Alle Daten die nicht normalverteilt waren oder keine Homoskedastizität aufwiesen wurden mittels des Kruskal-Wallis Testes ausgewertet. Diese Daten wurden als Median mit dem dazugehörigen Interquartilsabstand angegeben. Die statistischen Auswertungen, einschließlich der Regressionsanalysen, wurden mit Minitab (Version 16, London, UK) vorgenommen.

# Ergebnisse

## Einfluss verschiedener Wellenlängen auf das Wachstum von Zierpflanzen

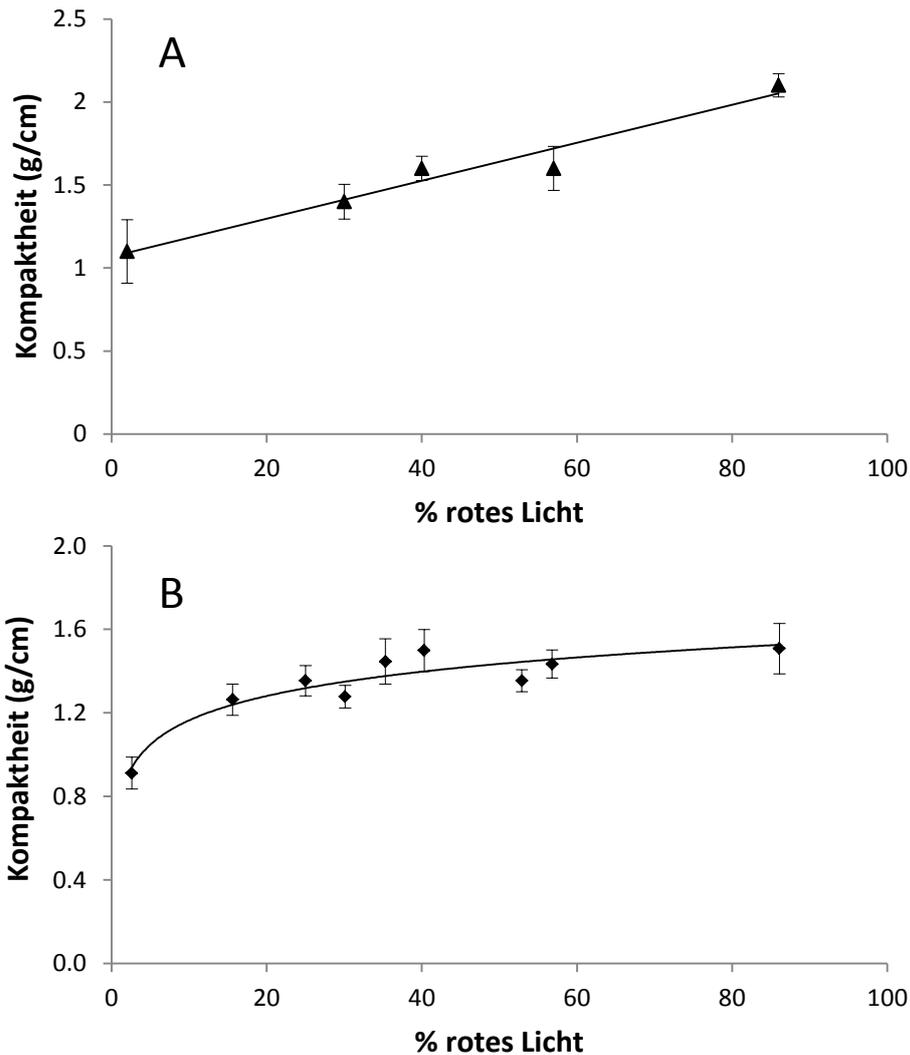
### Wachstum von Sonnenblumen unter verschiedenen Belichtungen

In Tabelle 8 sind Höhe, Gewicht, Kompaktheit und Blattfläche der Sonnenblumen, die mit unterschiedlichen Lichtquellen kultiviert wurden, zusammengefasst. Die statistische Analyse zeigt, dass die Sonnenblumen sich signifikant in der Höhe ( $p < 0.001$ ), Gewicht ( $p < 0.001$ ), Kompaktheit ( $p = 0.002$ ) und Blattfläche ( $p < 0.001$ ) unterscheiden (Kruskal-Wallis Test,  $n = 10$ ,  $\alpha = 0.05$ ).

**Tabelle 8: Morphologie von Sonnenblumen unter verschiedenen Lichtquellen. Angaben, die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind unterscheiden sich signifikant (post-hoc Tukey's test,  $\alpha = 0.05$ ).**

	Höhe (cm)		Gewicht (g)		Kompaktheit (g/cm)		Blattfläche (cm <sup>2</sup> )
	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013
1	44.5 <i>cd</i>	61.1 <i>d</i>	67.1 <i>abc</i>	127.4 <i>a</i>	1.51 <i>a</i>	2.10 <i>a</i>	1174 <i>ab</i>
2	47.7 <i>bcd</i>	61.9 <i>d</i>	68.4 <i>abc</i>	97.5 <i>c</i>	1.43 <i>a</i>	1.57 <i>b</i>	1268 <i>ab</i>
3	57.5 <i>a</i>	75.5 <i>ab</i>	72.2 <i>abc</i>	107.5 <i>bc</i>	1.28 <i>ab</i>	1.42 <i>bc</i>	1215 <i>ab</i>
4	57.6 <i>a</i>		78.0 <i>ab</i>		1.35 <i>a</i>		1156 <i>ab</i>
5	56.8 <i>a</i>	73.8 <i>abc</i>	85.1 <i>a</i>	115.2 <i>ab</i>	1.50 <i>a</i>	1.56 <i>b</i>	1487 <i>a</i>
6	48.1 <i>bcd</i>		60.8 <i>bc</i>		1.26 <i>ab</i>		1066 <i>bc</i>
7	51.3 <i>ab</i>		74.2 <i>abc</i>		1.45 <i>a</i>		1230 <i>ab</i>
8	42.5 <i>d</i>		57.6 <i>cd</i>		1.35 <i>a</i>		998 <i>bc</i>
9	43.7 <i>cd</i>	69.6 <i>c</i>	39.8 <i>d</i>	78.0 <i>d</i>	0.91 <i>b</i>	1.14 <i>d</i>	713 <i>c</i>

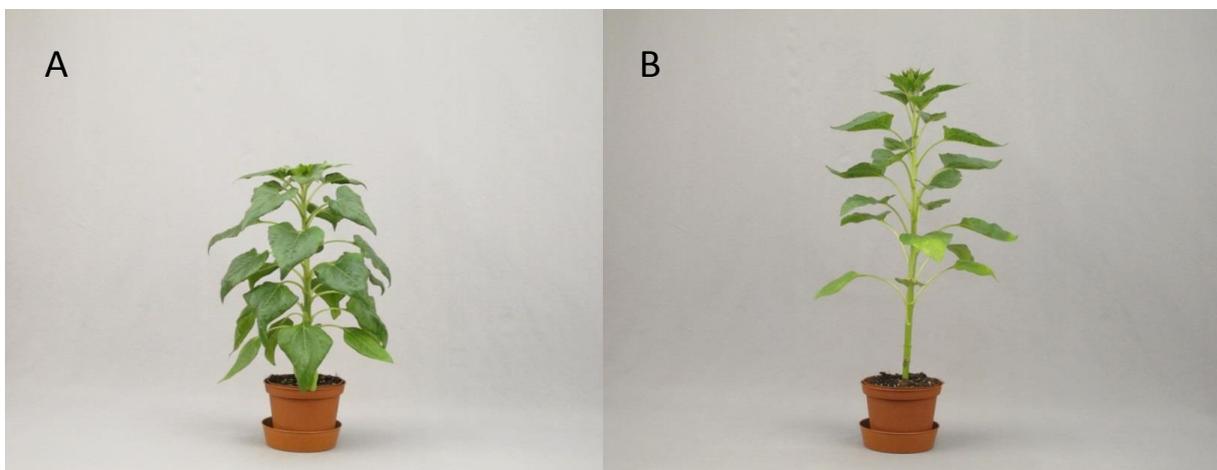
Um den Einfluss der einzelnen Wellenlängen zu errechnen wurden die Korrelation der morphologischen Daten mit den prozentuellen Anteilen an rotem, blauem und dunkelrotem Licht untersucht. Die Korrelationsanalyse zeigte, dass keines der morphologischen Merkmale direkt mit einer Wellenlänge korrelierte. Allerdings korrelierte die Kompaktheit signifikant mit dem Anteil an rotem Licht (Abbildung 655).



**Abbildung 65: Korrelation der Kompaktheit mit dem Anteil an rotem Licht. A, Kulturperiode 2012, B, Kulturperiode 2013.**

Die Restriktionsanalyse ergab einen Korrelationskoeffizienten der Mittelwerte von  $R^2 = 0.96$  (2012) und  $R^2 = 0.8$  (2013). Auch visuell ist der Unterschied in der Kompaktheit zwischen Sonnenblumen, die mit rotem und blauem Licht kultiviert wurden deutlich zu sehen (Abbildung 66). Die Kultur von Sonnenblumen unter rotem Licht führt zu einer gleichmäßigen Verteilung der Blattmasse über die gesamte Länge der Sprossachse. Der Eindruck der Kompaktheit wird zusätzlich durch die Größe und Ausrichtung der Blätter verstärkt. Im Gegensatz dazu erschienen Sonnenblumen, die unter blauem Licht kultiviert wurden, gestreckt mit wenig dichtem Blattwerk. Auch hier wurde der optische Effekt durch die geringe Blattfläche und die horizontale Blattstellung verstärkt. In Arabidopsis wird die horizontale Blattstellung durch Stimulation Blaulichtrezeptoren der Phototropin-Familie hervorgerufen (INOUE ET AL. 2008). Es ist daher anzunehmen, dass auch in Sonnenblumen die horizontale

Blattstellung auf eine Stimulation des Phototropins zurückzuführen ist. Man nimmt an, dass diese Reaktion evolutionäre begünstigt ist, da in der Natur die Photosyntheseleistung bei senkrecht einfallendem, mit blau angereichertem Licht am höchsten ist. Rotes Licht tritt dagegen in den frühen Morgen- und späten Abendstunden auf, wenn das Licht in einem flachen Winkel auf die Erdoberfläche auftrifft. Ebenso ist reflektiertes und gestreutes Licht in der Regel mit rotem Licht angereichert. Daher stellen große, hängende Blätter in der Natur bei einem hohen Rotlichtanteil einen Vorteil dar.



**Abbildung 66: Morphologie von Sonnenblumen kurz vor der Blüte. A, Kultur unter rotem Licht, B, Kultur unter blauem Licht.**

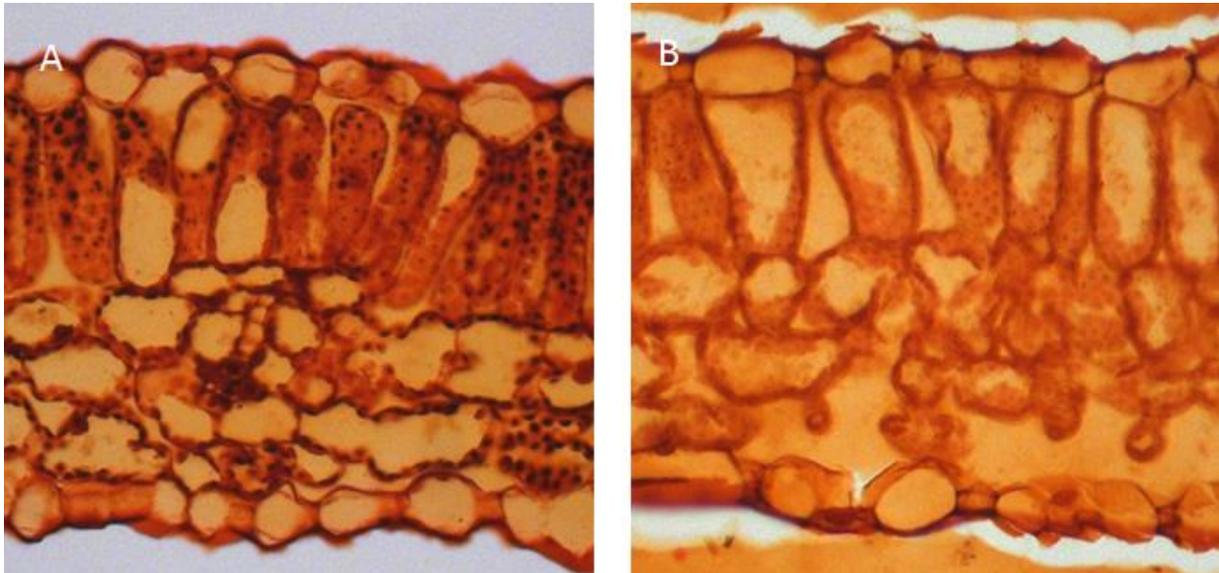
Messungen unter Ausschluss des Sonnenlichts ergaben, dass bei rotem Licht die Photosyntheseleistung höher und die Transpiration geringer ist. Während der Kultur zeigte sich auch, dass Pflanzen, die unter blauem Licht kultiviert wurden schneller zur Welken tendierten und häufiger gegossen werden mussten.

**Tabelle 9: Photosynthese (A) und Transpiration (E) unter rotem und blauem Licht.**

Wellenlänge	A ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	E ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
rot	5.5	0.8
blau	4.2	1.3

Es ist bekannt, dass blaues Licht die Öffnung der Stomata und damit die Transpiration fördert. Dieser Effekt wird durch die Phototropine Phot1 und Phot 2 in den Spaltzellen geregelt (KINOSHITA ET AL. 2001). Trotz einer höheren

Transpirationsrate sollte jedoch der Gesamtwasserverlust aufgrund der deutlich geringeren Blattfläche unter blauem Licht kleiner sein. Die rasche Welke unter blauem Licht ist daher überraschend. Um dieses Phänomen genauer zu untersuchen wurden histologische Schnitte der Blätter angefertigt.

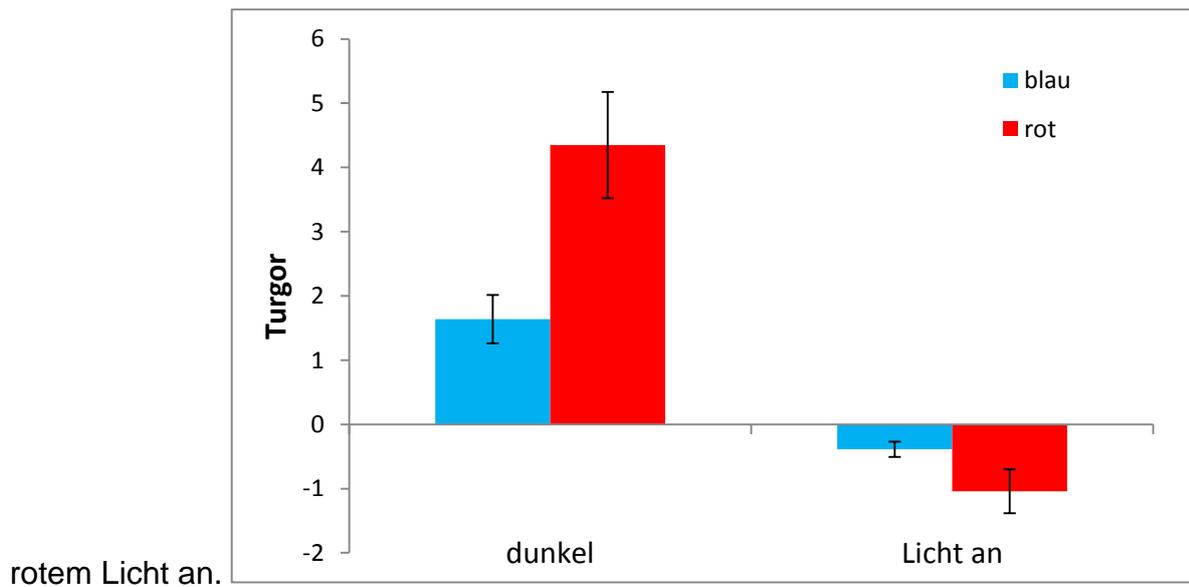


**Abbildung 67: Iod-Safranin gefärbte Blattsschnitte von Sonnenblumen. A, Kultur unter rotem Licht; B, Kultur unter blauem Licht.**

Die histologische Untersuchung zeigte, dass Sonnenblumen unter blauem und rotem Licht weder in der Zahl der Stomata noch der Dicke der Epidermis oder des Parenchyms unterschieden (Tabelle 9). Auffällig war jedoch das Fehlen jeglicher Stärkeablagerungen in den Chloroplasten. Diese zeigen sich wie in Abbildung 67 A dargestellt durch Iod schwarz gefärbt.

Gleichzeitig mit der Photosynthesemessung wurden auch Messungen des Turgors mit ZIM Sonden durchgeführt. Der Turgor zeigt gewöhnlich lichtabhängige Schwankungen. Diese werden durch das Öffnen der Stomata unter Licht (Druckabfall) und dem Schließen im Dunkeln (Druckanstieg) verursacht (ACHE ET AL. 2010). Wie sich zeigte, waren die Schwankungen des Turgors unter rotem Licht deutlich stärker ausgeprägt wie unter blauem Licht (Abbildung 68). Wurden die Pflanzen vom blauen Licht ins rote Licht gestellt, so änderte sich der Turgor und

passte sich an den Turgor der passte sich an den Turgor der anderen Pflanzen unter



rotem Licht an.

Abbildung 68: Turgordruckveränderung bei rotem und blauem Licht.

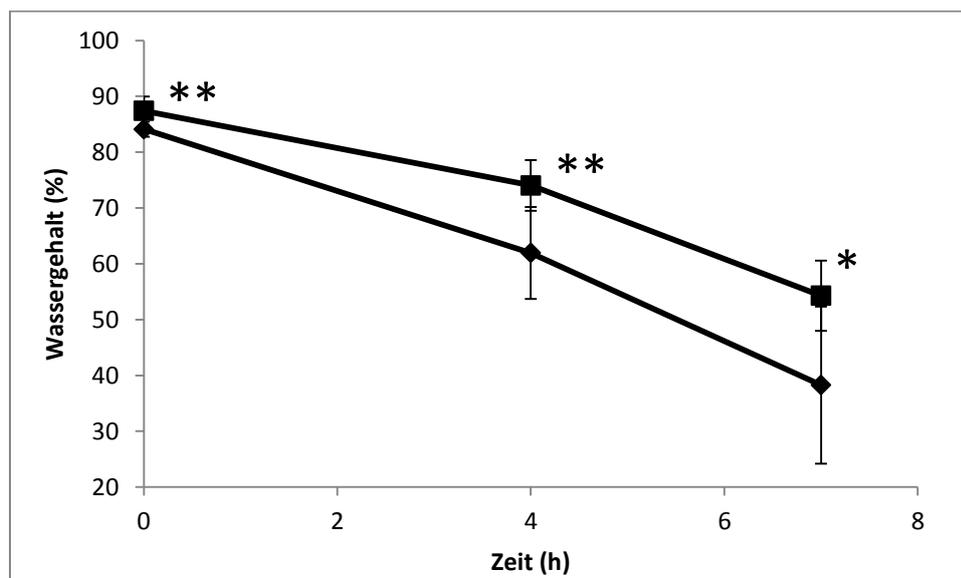


Abbildung 69: Relative Wasserverlust beim Trocknen von Sonnenblumenblättern. ■ rotes Licht; ◆ blaues Licht.

Um zu testen, ob das Wasserspeichervermögen durch die Belichtung mit blauem und rotem Licht beeinflusst wird wurden die Blätter getrocknet und der prozentuale Wasserverlust gravimetrisch gemessen. Wie in Abbildung 69 zu sehen ist, ist der Wassergehalt in den Blättern der Sonnenblumen unter blauem Licht zum Zeitpunkt der Ernte signifikant geringer. Während des Trocknens fällt er zudem signifikant schneller ab.

Die Beobachtung, dass rotes, aber nicht blaues Licht zu einem kompakten Wachstum führt widerspricht der langläufigen Lehrmeinung im Gartenbau. Tatsächlich haben Untersuchungen des Hypocotylwachstums bei *Arabidopsis* gezeigt, dass blaues Licht das Streckungswachstum inhibiert (AHMAD ET AL. 2002, COSGROVE 1981). Ebenso konnte in der Vergangenheit gezeigt werden, dass durch dem Einsatz von CuSO<sub>4</sub> Filtern, die durch die Eliminierung von roten und dunkelroten blaues Licht erzeugen, das Streckungswachstum von Chrysanthemen reduziert (RAJAPAKSE & KELLY 1995). Das Licht unter CuSO<sub>4</sub> Filtern ist mit blauem und grünem Licht angereichert. Bei hohen Einstrahlungen tritt jedoch auch rotes und dunkelrotes Licht durch die Filter. Das bedeutet, dass sich das Licht hinter einem Filter in der Zusammensetzung der Wellenlängen fundamental vom schmalbandigem LED Licht unterscheidet. Um den Einfluss von gefiltertem Licht auf das Wachstum von Sonnenblumen zu testen wurden Gewächshaustische mit farbigen Folien schattiert. Die Folien erzeugten rotes, oranges, grünes und blaues Licht. Die Zusammensetzung des Lichts unter den Folien ist in Tabelle 10 zusammengefasst. Wie die Zusammenstellung zeigt, reduzieren die Folien die photosynthetisch aktive Strahlung im Bestand um 70 bis 80%. Damit sind die Lichtverhältnisse im Versuch denen von Rajapakse (1994) sehr ähnlich.

**Tabelle 10: Die Zusammensetzung des Lichts unter den farbigen Folien**

Folie	Transmission (%)	Rot (%)	Blau (%)	Dunkelrot (%)	Rot/Dunkelrot	Rot/Blau
Kontrolle	100	15.0	15.4	5.5	2.6	1.0
Orange	30	30.3	7.2	11.5	2.3	4.2
Blau	25	7.2	26.8	4.0	1.7	0.3
Grün	21	11.8	15.4	6.4	1.7	0.8
Rot	20	34.0	11.8	12.2	2.4	2.9

Durch die farbselektive Lichtdurchlässigkeit der Folien verschiebt sich das rot zu blau und das rot zu dunkelrot Verhältnis im Vergleich zur nicht beschatteten Kontrolle. Wie in Abbildung 70 gezeigt, umfasst das Spektrum unter den blauen und roten Folien im Gegensatz zu den LEDs aber auch Wellenlängen aus dem grünen beziehungsweise gelben Spektralbereich (500-600 nm). Unter den roten Folien tritt zudem blaues und unter den blauen auch rotes Licht in geringen Intensitäten auf. Die maximale Wellenlänge  $\lambda_{\max}$  ist im Vergleich zu den LEDs unter den roten Folien zu kleineren und unter den blauen Folien zu größeren Wellenlängen hin verschoben. Unter den grünen Folien nahm die Intensität aller Wellenlänge nahezu identisch ab. Einzige

Ausnahme bildete rotes Licht, das in etwas geringen Prozentanteilen als in der Kontrolle anwesend war. Daher kann das Wachstum unter den grünen Folien als Kontrolle mit reduzierter Lichtintensität angesehen werden.

**Tabelle 11: Höhe und Gewicht der Sonnenblumen unter den verschiedenen farbselektiven Folien. Wuchs mit (A) und ohne (B) Daminozide.**

A Folie	<u>Sprossachse</u>		<u>Blüte</u>		
	Gewicht (g)	Höhe (cm)	Gewicht (g)	Durchmesser (cm)	Zeit zur Blüte (d)
Kontrolle	142 ± 15 a	45 ± 3 a	35 ± 5 a	13 ± 3 a	40 ± 2 a
Grün	69 ± 10 b	46 ± 3 a	16 ± 2 b	11 ± 1 cd	43 ± 1 b
Blau	65 ± 4 b	46 ± 2 a	15 ± 2 b	10 ± 1 d	40 ± 2 a
Orange	91 ± 11 c	51 ± 3 b	19 ± 3 c	12 ± 1 bc	43 ± 1 b
Rot	102 ± 9 d	54 ± 3 b	22 ± 4 c	12 ± 1 ab	42 ± 1 b

B Folie	<u>Sprossachse</u>		<u>Blüte</u>		
	Gewicht (g)	Höhe (cm)	Gewicht (g)	Durchmesser (cm)	Zeit zur Blüte (d)
Kontrolle	123 ± 6 a	48 ± 3 a	28 ± 3 a	12 ± 1 a	37 ± 1 a
Grün	75 ± 10 b	58 ± 2 b	16 ± 2 cd	11 ± 1 abc	43 ± 1 b
Blau	64 ± 6 c	54 ± 3 c	14 ± 4 d	10 ± 2 c	39 ± 2 c
Orange	86 ± 10 d	58 ± 4 b	18 ± 3 bc	11 ± 2 bc	40 ± 2 cd
Rot	96 ± 10 e	63 ± 4 d	19 ± 3 b	12 ± 1 ab	41 ± 2 bd

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die geringere Lichtintensität unter den Folien zu einer deutlichen Reduktion der Biomasse führt. Dies gilt auch für die Masse der Blüte. Bezüglich der Höhe zeigt sich, dass das Streckungswachstum unter roten Folien am größten war. Unter den orangenen, blauen und grünen Folien war die Wuchshöhe im Vergleich zur Kontrolle (unbehandelt) größer aber auch signifikant kleiner als unter den roten. Der Blütendurchmesser der Pflanzen unter den blauen Folien war am kleinsten. Die Zeit bis zur Blüteninduktion wurde durch die Folien verlängert. Die Ausnahme waren die Sonnenblumen unter den blauen Folien, die nahezu gleichzeitig mit der Kontrolle blühten.

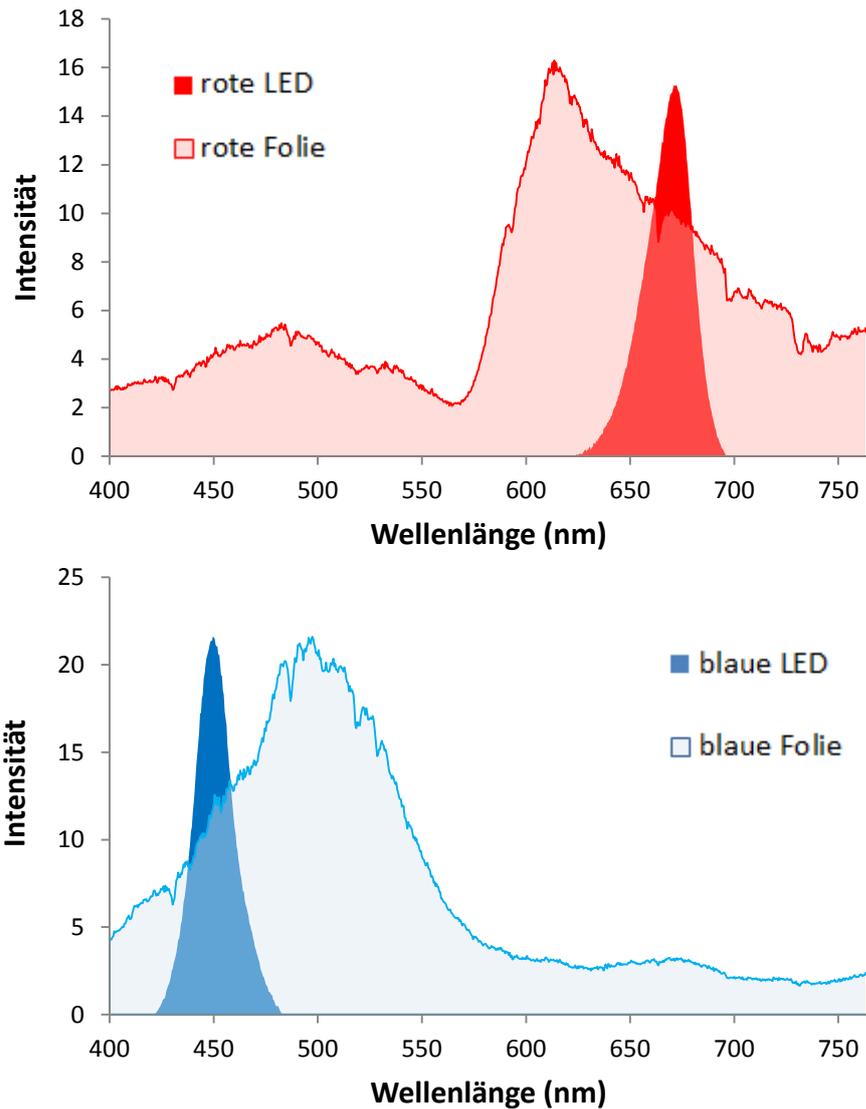


Abbildung 70: Vergleich der Spektren unter den roten und blauen Folien mit den entsprechend farbigen LEDs.

### **Einfluss des Lichtspektrums auf Beet- und Balkonpflanzen**

Die Vorversuche mit Sonnenblumen haben gezeigt, dass das Lichtspektrum die Morphologie von Zierpflanzen steuert. Die Sonnenblume ist eine Modellpflanze, die ausgewählt wurde, weil sie aufgrund ihrer Größe die morphologischen Details gut sichtbar sind und weil sie eine klare Trennung von vegetativem und generativem Wachstum aufweist. Sie spielt aber im Produktionsgartenbau nur eine untergeordnete Rolle. Deshalb wurden im nächsten Versuch typische Beet- und Balkonpflanzen getestet.

**Tabelle 12: Spektren der Lampen. Prozentuelle Anteile von blauem, rotem und dunkelrotem Licht. Die Wellenbänder sind 420-480 nm (blau); 620-680 nm (rot); and 700-750 nm (dunkelrot). Das blau angereicherte Spektrum ist in Klammern dargestellt.**

Variante	Lampe	Wellenbänder (%)		
		Blau	Rot	Dunkelrot
1	Philips HPS	7	30	12
2	Osram	12.5	87.5	-
3	Valoya AP673	13	40	19
4	Blau angereichert AP673	13 (32)	40	19 (-)

**Tabelle 13: Frischgewicht  $\pm$  SE der Beet- und Balkonpflanzen. Der Kruskal-Wallis Test wies signifikante Unterschiede für *Pelargonium* ( $p < 0.001$ ), *Aspilia* ( $p < 0.001$ ), *Calibrachoa* `Tutti Frutti Orange` ( $p < 0.001$ ) und *Calibrachoa* `Mille Baci French Kiss` ( $p < 0.001$ ) auf.**

Variante	<i>Xerochrysum</i>	<i>Argyranthemum</i>	<i>Pelargonium</i>	<i>Aspilia</i>	<i>Portulaca</i>	<i>Verbena</i>	C. `Tutti Frutti`	C. `Mille Baci`
Kontrolle	146.7 $\pm$ 17.5	58.0 $\pm$ 6.4	126.2 $\pm$ 13.8 b	27.4 $\pm$ 6.3 c	121.7 $\pm$ 8.1	42.6 $\pm$ 5.5	41.5 $\pm$ 4.0 b	34.6 $\pm$ 3.5 b
1	129.6 $\pm$ 35.9	60.5 $\pm$ 7.4	129.7 $\pm$ 30.1 ab	34.8 $\pm$ 4.7 b	116.8 $\pm$ 7.2	53.0 $\pm$ 7.0	45.3 $\pm$ 1.6 ab	40.2 $\pm$ 0.7 a
2	139.9 $\pm$ 20.5	59.7 $\pm$ 7.5	144.8 $\pm$ 17.2 a	36.3 $\pm$ 5.6 ab	118.9 $\pm$ 11.7	53.5 $\pm$ 9.7	48.4 $\pm$ 4.7 a	42.6 $\pm$ 4.9 a
3	141.2 $\pm$ 35.6	59.6 $\pm$ 9.6	141.0 $\pm$ 22.1 ab	40.4 $\pm$ 4.7 a	121.8 $\pm$ 11.6	56.5 $\pm$ 5.7	48.9 $\pm$ 4.4 a	46.5 $\pm$ 5.7 a
4	165.6 $\pm$ 9.8	61.6 $\pm$ 4.6	132.4 $\pm$ 10.9 ab	39.0 $\pm$ 5.3 ab	126.5 $\pm$ 10.2	57.2 $\pm$ 7.8	50.9 $\pm$ 7.4 a	43.1 $\pm$ 5.9 a

**Tabelle 14: Höhe  $\pm$  SE der Beet- und Balkonpflanzen. Der Kruskal-Wallis Test wies signifikante Unterschiede für *Argyranthemum* ( $p < 0.001$ ), *Aspilia* ( $p < 0.001$ ), *Calibrachoa* `Tutti Frutti Orange` ( $p < 0.001$ ) und *Calibrachoa* `Mille Baci French Kiss` ( $p < 0.001$ ) auf.**

Variante	<i>Xerochrysum</i>	<i>Argyranthemum</i>	<i>Pelargonium</i>	<i>Aspilia</i>	<i>Portulaca</i>	<i>Verbena</i>	C. `Tutti Frutti`	C. `Mille Baci`
Kontrolle	19.6 $\pm$ 3.8	25.9 $\pm$ 1.7 ab	25.3 $\pm$ 2.2	10.7 $\pm$ 1.3 b	4.5 $\pm$ 0.9	23.2 $\pm$ 4.0	14.6 $\pm$ 1.6 b	10.3 $\pm$ 2.2 b
1	20.0 $\pm$ 5.1	25.3 $\pm$ 1.9 ab	26.6 $\pm$ 2.9	11.8 $\pm$ 2.3 bc	4.7 $\pm$ 0.8	24.8 $\pm$ 2.9	16.7 $\pm$ 1.6 b	12.8 $\pm$ 2.1 a
2	20.8 $\pm$ 2.6	25.1 $\pm$ 2.4 b	27.5 $\pm$ 3.2	11.3 $\pm$ 1.5 b	4.7 $\pm$ 0.8	22.7 $\pm$ 3.8	14.4 $\pm$ 1.7 b	11.6 $\pm$ 3.2 ab
3	23.4 $\pm$ 4.1	27.0 $\pm$ 2.5 a	26.9 $\pm$ 2.7	12.8 $\pm$ 1.2 ab	6.2 $\pm$ 6.8	26.9 $\pm$ 3.1	17.1 $\pm$ 1.6 b	13.5 $\pm$ 2.7 a
4	22.9 $\pm$ 3.0	24.7 $\pm$ 0.8 b	27.8 $\pm$ 2.1	13.9 $\pm$ 2.1 a	5.1 $\pm$ 0.9	27.8 $\pm$ 2.7	20.4 $\pm$ 1.5 a	13.2 $\pm$ 2.1 a

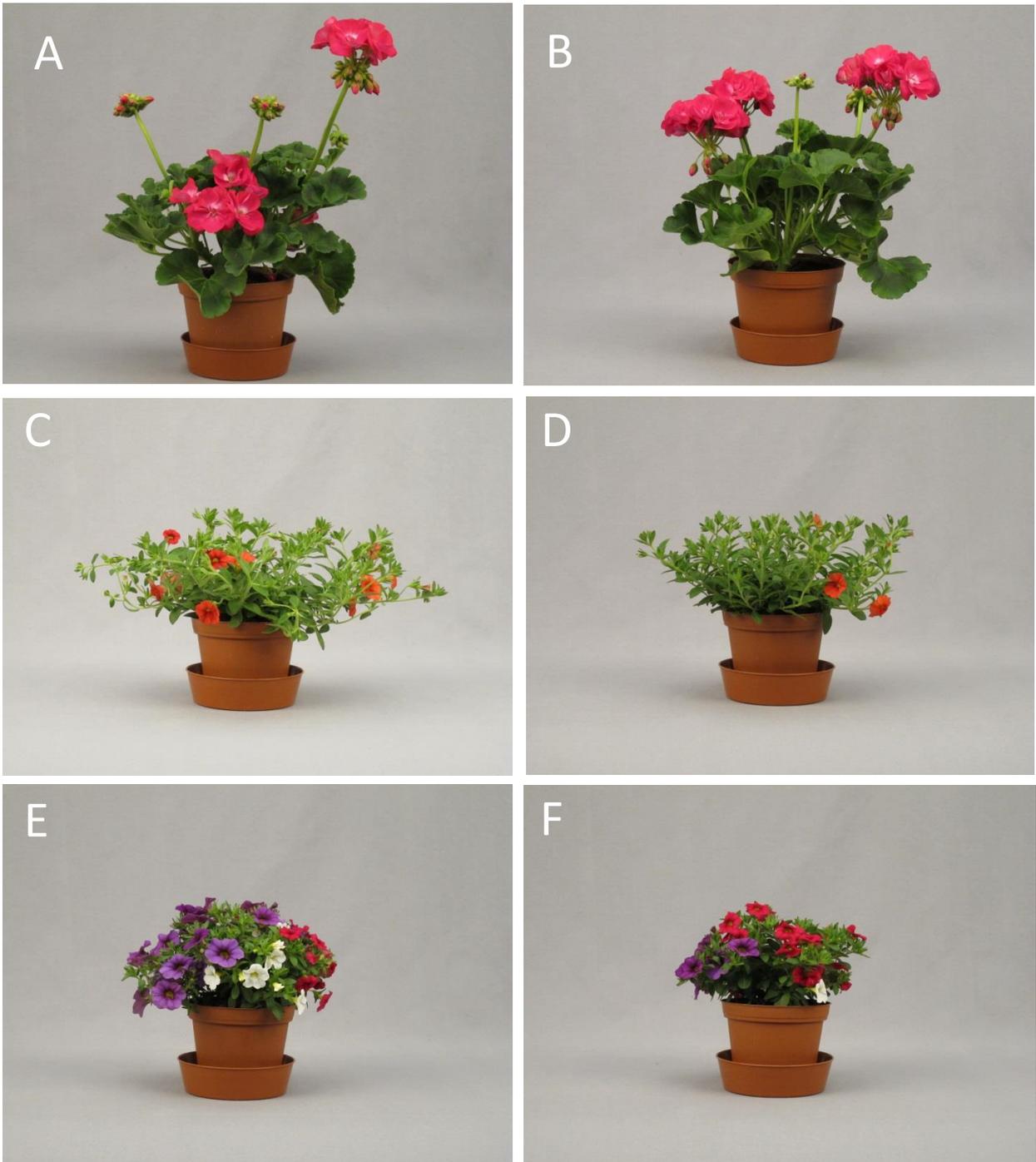


Abbildung 71: Vergleich der Morphologie von *Pelargonium* (A, B), *Calibrachoa* 'tutti frutti' (C, D) and *Calibrachoa*. 'mille baci' (E, F) unter 30 % (A, C, E) und 87.5 % (B, D, F) rotem Licht.

Wie die Sonnenblumen zuvor wiesen einige Arten signifikante Unterschiede bezüglich der Höhe und des Frischgewichts unter den verschiedenen Lichtspektren auf. Deutliche Unterschiede im Frischgewicht zeigten *Pelargonium*, *Aspilia* und *Calibrachoa*. Bezüglich der Höhe war dies *Argyranthemum*, *Aspilia* und *Calibrachoa*. Abermals wiesen die Pflanzen die unter einem höheren Anteil rotem Licht (> 30%,

Varianten 2, 3 und 4) kultiviert wurden tendenziell einen größere Frischgewicht auf. Ebenso waren die Pflanzen, die unter dem höchsten Anteil rotem Licht (87.5 %, Variante 2) tendenziell die kleinsten. Die Anreicherung des Spektrums mit blauem Licht hatte meist keinen Effekt. Nur im Falle von *Agryranthemum* war die Höhe reduziert, bei *Calibrachoa* `Tutti frutti` dagegen größer. Die Berechnung der Kompaktheit zeigte, dass die Unterschiede unter den einzelnen Belichtungen im Rahmen der Messungenaugigkeit lagen. Lediglich bei *Calibrachoa* `Tutti frutti` waren die Pflanzen unter dem roten Licht deutlich kompakter als unter dem blau angereichertem.

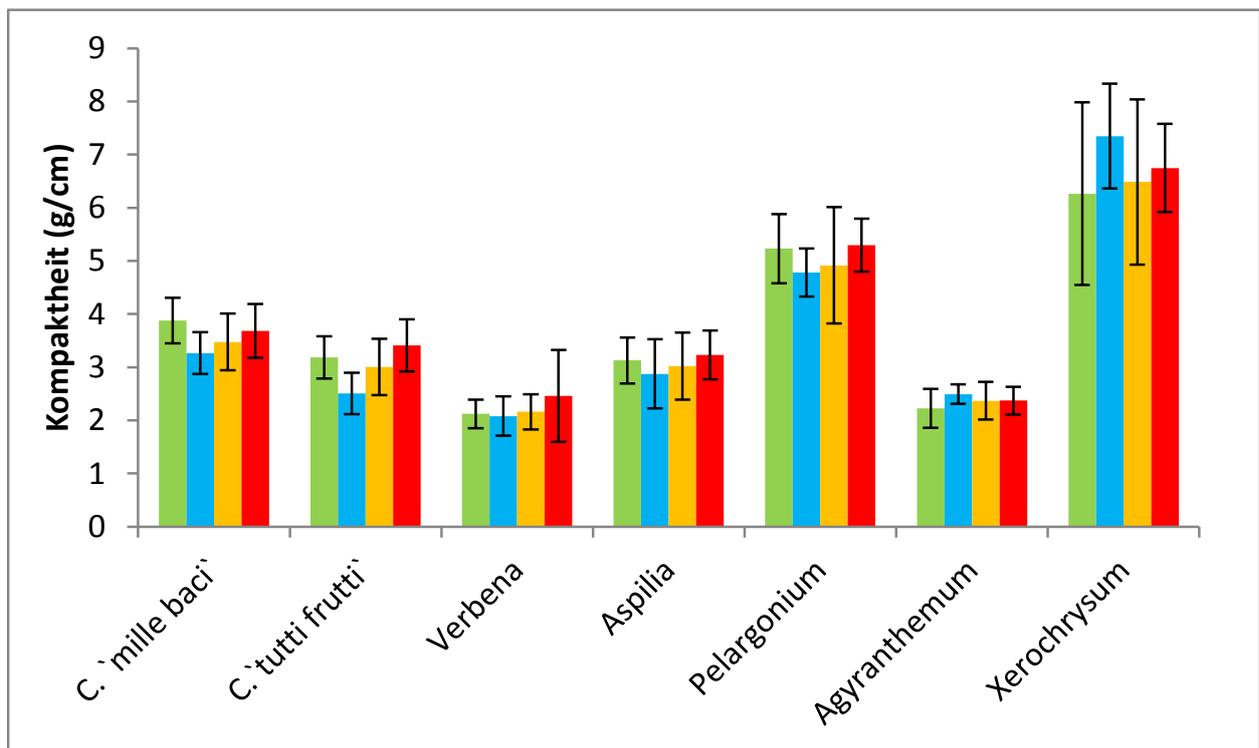


Abbildung 72: Kompaktheit der Beet- und Balkonpflanzen. Gelb, Natriumdampflampe; Blau, blau angereichertes Spektrum; rot, rot angereichertes Spektrum; Grün, Spektrum AP673. Die mit a gekennzeichnete Datensätze unterscheiden sich signifikant von der Kontrolle.

Durch die Zusatzbelichtung konnte die Kulturzeit von *Agryranthemum*, *Asplia* und *Verbena* signifikant verkürzt werden. Dabei wiesen die Unterschiede in der Kulturzeitverkürzung zwischen den einzelnen Spektren bei den meisten Spezies keine signifikanten Unterschiede auf. Nur bei *Verbena* war die Kulturzeit unter der Natriumdampflampe signifikant kürzer als unter den anderen.

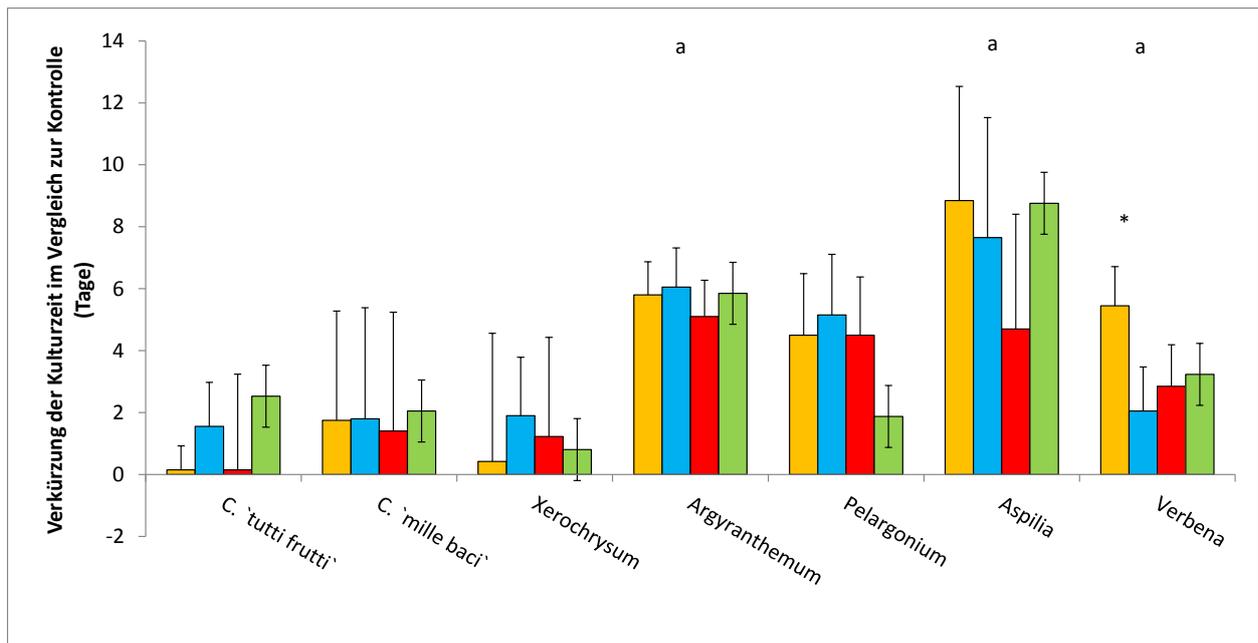


Abbildung 73: Verkürzung der Kulturzeit durch Belichtung. Gelb, Natriumdampf; Blau, blau angereichertes Spektrum; rot, rot angereichertes Spektrum; Grün, Spektrum AP673. Die mit a gekennzeichnete Datensätze unterscheiden sich signifikant von der Kontrolle.

### Der Rosmarinsäuregehalt in Basilikum und Borretsch

Im Versuchszeitraum April 2013 wurde am Standort Weihenstephan eine durchschnittliche photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) von  $422 \text{ Jcm}^{-2}$  gemessen. Im Oktober 2013 wies die PAR einen Durchschnittswert von  $192 \text{ Jcm}^{-2}$  auf. Im Vergleich dazu gaben die Lampen eine berechnete photosynthetisch aktive Strahlung von  $297 \text{ Jcm}^{-2}$  ab. Die optische Begutachtung ergab, dass keine der Basilikumpflanzen Schädigungen, Nekrosen oder andere Anzeichen von Zellstress aufwies (Abb. 1). Dasselbe galt auch für Borretsch. Wie in Tabelle 6 dargestellt wiesen die Basilikumpflanzen aus dem Gewächshaus (Kontrolle) ein signifikant größeres Frischgewicht und Höhe auf. Bei den unter Kunstlicht kultivierten Pflanzen stieg das Frischgewicht und die Höhe in der Reihenfolge  $\text{OF} < \text{AP673} < \text{G2}$  an. Ebenso war auch der Internodienabstand bei den Pflanzen unter Kunstlicht größer und die subjektive Boniturnote dementsprechend schlechter.

Im Gegensatz dazu war der Gehalt an Kaffee- und Rosmarinsäure unter Kunstlicht signifikant größer als bei den Gewächshauspflanzen. Der Gehalt an Kaffeesäure war unter allen Kunstlichtvarianten gleich. Im Gegensatz dazu unterschied sich der Gehalt an Rosmarinsäure signifikant. Den höchsten Gehalt wiesen Pflanzen auf, die unter der LED mit dem Spektrum G2 wuchsen, gefolgt vom Spektrum AP673 und der

Fluoreszenzlampe. Um die erste Hypothese, nämlich, dass der Biosyntheseweg durch Phytochrome geregelt wird, zu testen wurde der Gehalt an Rosmarinsäure gegen das Verhältnis von rotem zu dunkelrotem Licht aufgetragen. Die Regressionsanalyse zeigte, dass eine signifikante inverse Korrelation zwischen den beiden Größen existiert.

Die drei Lampen emittieren unterschiedliche Anteile an blauem, rotem und dunkelrotem Licht. Um auszuschließen, dass das blaue Licht einen Einfluss auf den Rosmarinsäuregehalt ausübt wurden Basilikumpflanzen nur unter rotem und blauem Licht kultiviert. Es zeigt sich, dass es keinen signifikanten Unterschied im Rosmarinsäuregehalt von Basilikumpflanzen, die unter verschiedenen Verhältnissen von blauem zu rotem Licht wuchsen, gab (Tabelle 17).

Das Frischgewicht und die Höhe von Borretsch, der mit denselben Bedingungen kultiviert wurde, war unter Kunstlicht signifikant größer als im Gewächshaus. Übereinstimmend mit den Ergebnissen vom Basilikumversuch wuchs das Gewicht, die Höhe und der Rosmarinsäuregehalt in der Reihenfolge OF < AP673 < G2 an (Tabelle 18). Auch hier ergab die Regressionsanalyse, dass der Gehalt an Rosmarinsäure signifikant invers mit dem Verhältnis von rotem zu dunkelrotem Licht korreliert.

**Tabelle 15: Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung der Höhe, des Frischgewichts, und der Konzentration der Kaffee- und Rosmarinsäure im Basilikum unter Kunstlicht und im Gewächshaus (Kontrolle). Mittelwerte, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, sind statistisch signifikant unterschiedlich ( $p = 0.05$ ,  $n = 20$ ).**

Lichtvariante	Frischgewicht (g)	Höhe (cm)	KS (%)	RS (%)
Kontrolle	48.9 $\pm$ 2.5 a	21.4 $\pm$ 1.4 a	0.03 $\pm$ 0.02 b	1.4 $\pm$ 0.3 a
OF	20.7 $\pm$ 1.4 d	16.8 $\pm$ 1.2 c	0.05 $\pm$ 0.01 a	2.2 $\pm$ 0.2 b
AP673	24.6 $\pm$ 3.1 c	19.9 $\pm$ 1.1 b	0.05 $\pm$ 0.01 a	2.3 $\pm$ 0.3 b
G2	29.7 $\pm$ 4.0 b	21.6 $\pm$ 1.6 a	0.04 $\pm$ 0.01 a	2.6 $\pm$ 0.3 c

**Tabelle 16: . Bonitur der Basilikumpflanzen. Die Kompaktheit wurde mit den Noten 1 = nicht kompakt bis 5 = sehr kompakt bewertet. Angaben, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, sind statistisch signifikant unterschiedlich (Kruskal-Wallis test,  $p = 0.05$ ,  $n = 80$ )**

Lichtvariante	Kompaktheit	Internodienabstand (cm)
Kontrolle	5 (1) c	5.0 (6.0) b
OF	3 (1) a	14.0 (3.5) a
AP673	4 (2) bc	11.0 (7.5) b

G2

3 (2) ab

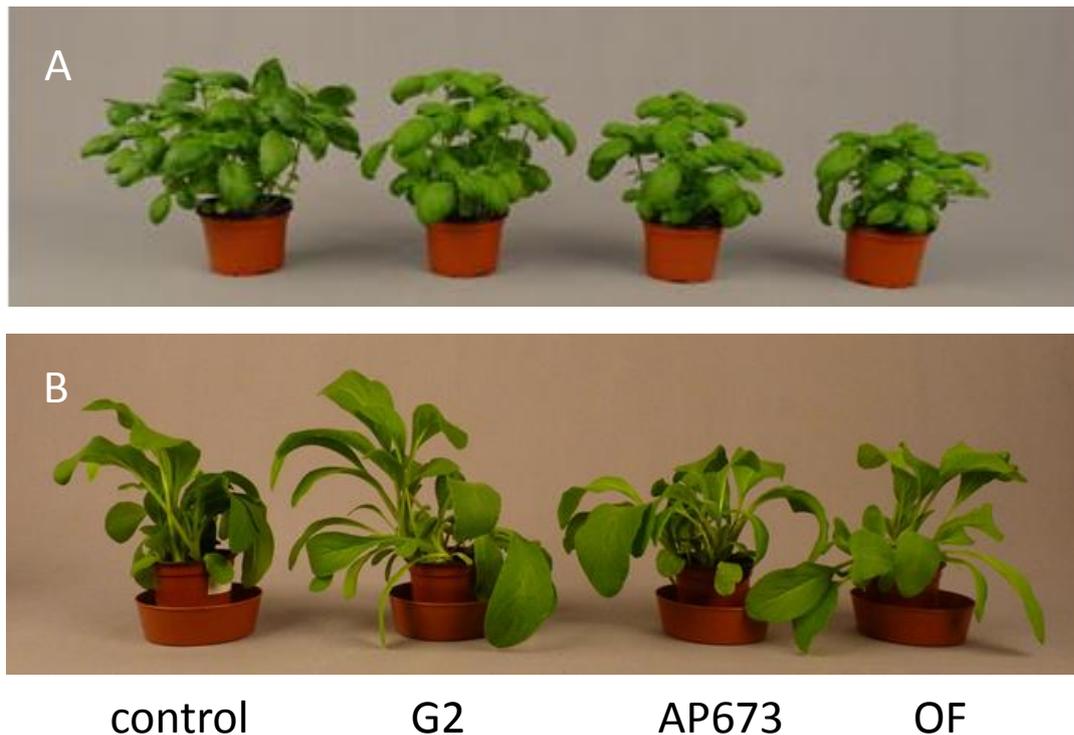
16.9 (3.8) a

**Tabelle 17: Rosmarinsäuregehalt von Basilium nach 15 und 38 Tagen unter rotem und blauen Licht. Die statistische Analyse zeigte keine signifikanten Unterschiede für das Frischgewicht (ANOVA,  $p = 0.665$ ) und den Rosmarinsäuregehalt auf (Kruskal-Wallis Test;  $p$  am Tag15 = 0.065 und am Tag 38 = 0.154,  $n$  pro Variante = 10). Die Höhe war signifikant unterschiedlich (ANOVA,  $p = 0.002$ ). Angaben, die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet sind, sind statistisch signifikant unterschiedlich.**

% Rotlicht	Rosmarinsäuregehalt		Höhe	Frischgewicht
	15 d	38 d		
0	1.1 ± 0.3	3.0 ± 1.3	13.2 ± 3.0 a	17.0 ± 3.7
25	1.0 ± 0.2	2.5 ± 1.0	13.5 ± 2.7 b	16.6 ± 3.6
50	1.0 ± 0.2	2.5 ± 0.8	13.6 ± 3.7 a	16.7 ± 4.7
75	1.1 ± 0.1	3.4 ± 1.0	11.0 ± 1.5 ab	17.7 ± 3.6
100	1.2 ± 0.2	3.6 ± 1.2	14.0 ± 3.0 ab	19.4 ± 7.7

**Tabelle 18: Mittelwert und SD der Höhe, des Gewichts und des RA Gehalts von Borage. Angaben mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant ( $p = 0.05$ ,  $n = 8$ ).**

	fresh weight (g)	height (cm)	RA content (%)
control	21 ± 1.5 a	19.3 ± 1.5 a	-
Osram Fluora	29 ± 3.7 a	20.7 ± 1.7 a	1.1 ± 0.1 a
AP673	35 ± 2.5 b	21.4 ± 1.9 b	1.3 ± 0.3 a
G2	39 ± 3.7 b	26.0 ± 2.2 b	1.6 ± 0.2 b



**Abbildung 74:** Repräsentative Basilikum- (A) und Borretschpflanzen (B) aus dem Gewächshaus (Kontrolle) und aus der Kultur unter artifiziellem Licht (G2, AP673 und OF).

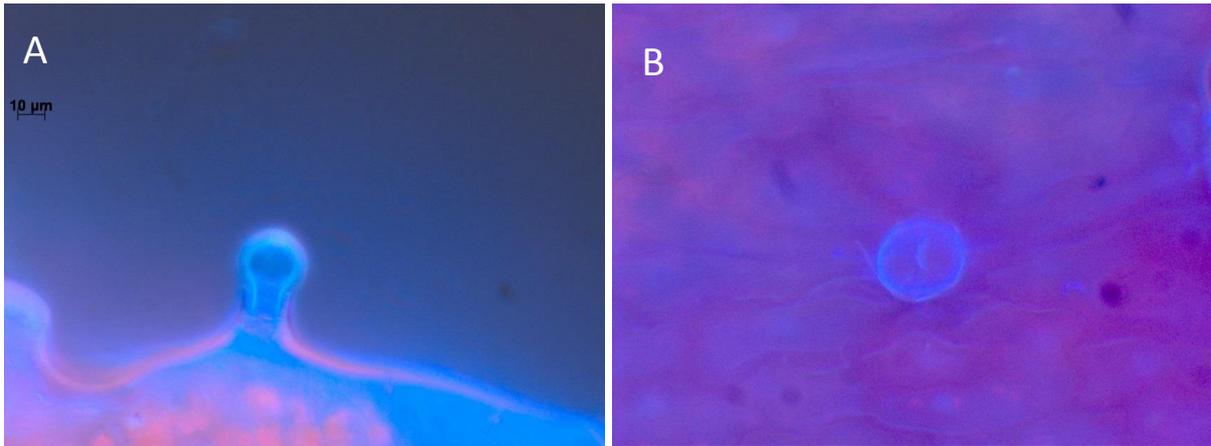
In der Literatur gibt es deutlich Hinweise darauf, dass die Kaffee- und Rosmarinsäure antimikrobielle Eigenschaften aufweisen. So inhibieren Pflanzenextrakte, die die Kaffee- und Rosmarinsäure enthalten, das Wachstum von *Phytophthora* (WIDMER & LAURENT 2006). Bais (2002) zeigte, dass Rosmarinsäure aus Wurzelkulturen von Basilikum das Wachstum von *Pseudomonas aeruginosa* und *Aspergillus niger* inhibiert (BAIS ET AL. 2002). Untersuchungen zur Resistenz von Ulmen gegen den pathogenen Pilz *Ophiostoma* (Ulmensterben) lieferten Hinweise darauf, dass die Rosmarinsäure dabei eine wichtige Rolle spielen könnte (MARTÍN ET AL. 2013). Diese Daten legen nahe, dass eine Anreicherung mit Rosmarinsäure den Pflanzen einen zusätzlichen Schutz gegen pathogene Mikroorganismen verleihen könnte. Interessant wäre diese Methode insbesondere für die Bekämpfung von *Peronospora belbahrii*. *P. belbahrii* ist eine Art des falschen Mehltaus, die besonders Basilikumpflanzen befällt. Der Oomycet breitet sich seit einigen Jahren rapide aus und führt zu enormen Ernteaussfällen (GARIBALDI ET AL. 2005, ROBERTS ET AL. 2009). Ein Befall lässt sich nur schwer bekämpfen (MERSHA ET AL. 2013). Daher ist die Prävention derzeit das beste Mittel gegen *P. belbahrii* (GILARDI ET AL. 2013). Im Rahmen der Prävention könnte die Rosmarinsäure möglicherweise ebenfalls eine Rolle spielen. Dies zu testen ist aber mit einigen experimentellen Schwierigkeiten

verknüpft. Zum einen ist *P. belbahrii* ein obligater Parasit. Das heißt ein Test kann nur *in vivo* erfolgen. Zum anderen gibt es Hinweise darauf, dass das Licht *per se* einen Einfluss auf das Wachstum pflanzenpathologischer Pilze ausübt. Tan zeigte bereits in den 1970er Jahren, dass blaues und rotes Licht die sexuelle Vermehrung von Pilzen beeinflusst. Blaues Licht inhibiert die Ausbildung von Sporen des Pilzes *Botrytis cinerea* (TAN 1974). Rotes und dunkelrotes Licht hob die Inhibierung auf (TAN 1973). Cohen (2013), dass rotes Licht die Keimung von *Peronospora belbahrii* hemmt (COHEN ET AL. 2013). Da in den zuvor durchgeführten Versuchen gezeigt werden konnte, dass die Konzentration der Rosmarinsäure durch die Intensität des roten Lichts beeinflusst werden kann, sind diese beiden Effekte *in vivo* schwer voneinander zu trennen. Daher wurden die Versuchspflanzen in zwei Gruppen eingeteilt. Die erste wurde zunächst belichtet und dann mit *P. belbahrii* infiziert, die andere zunächst infiziert und dann belichtet. Wie sich bei der Auswertung der Pflanzen ergab, hatte die Belichtung keinen Einfluss auf die Ausbreitung des Oomycetes. Alle Pflanzen waren gleichstark befallen und wiesen bereits enorme Schädigungen auf. Auch der prozentuale Anteil an rotem Licht hatte keinen Einfluss auf die Ausbreitung (Tabelle 19).

**Tabelle 19: Bonitur der Infektion (Median und Interquartilsabstand) mit *P. belbahrii*. 1 = keine Infektion, 5 = letale Infektion.**

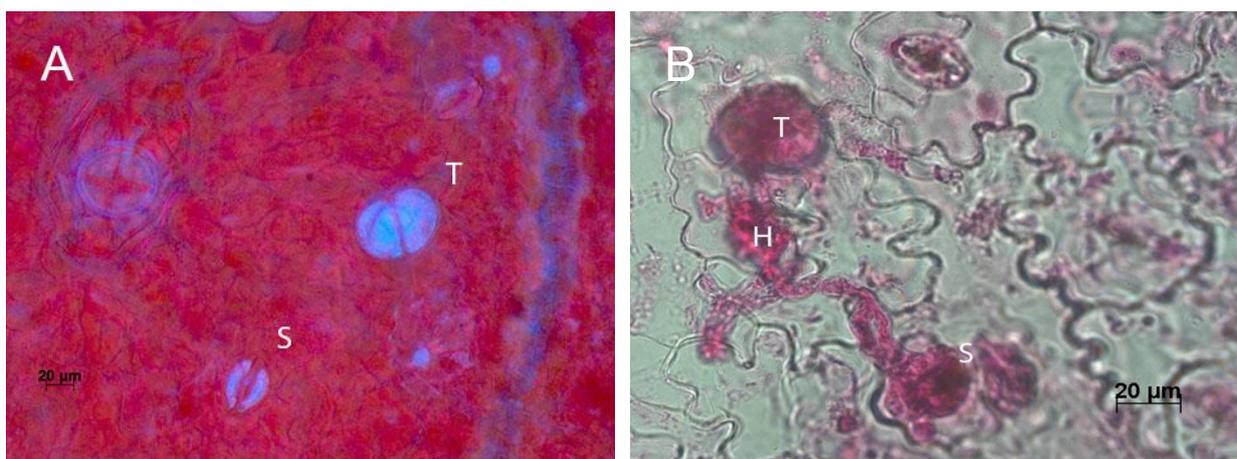
Rotlicht (%)	Boniturnote
0	5.0 (0.3)
25	4.5 (1.0)
50	4.0 (0.3)
75	4.0 (0.0)
100	4.5 (1.0)

Die Rosmarinsäure wird in der Regel in sogenannten Trichomen gespeichert. Das sind glanduläre Zellen, die meist aus der Blattoberfläche herausragen (GANG ET AL. 2002, GANG ET AL. 2001). Aufgrund des hohen Gehalts an Polyphenolen leuchten diese Zellen im Fluoreszenzlicht blau (LICHTENTHALER ET AL. 1981). Wie die Fluoreszenzmikroskopischen Aufnahmen zeigten, sind die Trichome aufgrund ihrer Form gut erkennbar (Abbildung 12).



**Abbildung 75: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahmen von Trichomen von *Rosmarinus officinalis* im Profil (A) und in der Draufsicht (B).**

Trichome haben vermutlich die Aufgabe Abwehrstoffe für einen Befall vorzuhalten. Durch eine mechanische Beschädigung werden dann die Abwehrstoffe freigesetzt. Es ist denkbar, dass die Rosmarnisäure keinen Einfluss auf das Wachstum von *P. belbahrii* hat, da es zu keinem Kontakt mit den Trichomen kommt. Um dies zu testen, wurden befallene Blätter lichtmikroskopisch untersucht. Wie in Abbildung 76A gezeigt, haben die Trichome bei Basilikum eine ähnliche Gestalt wie bei *Rosmarinus officinalis*. Durch Färbung können die Hyphen des Oomyceten sichtbar gemacht werden (KOROCH ET AL. 2013). In Abbildung 13B ist zu sehen, dass die Hyphen zu den Spaltöffnungen hin wachsen. Dort treten sie in das Blattinnere ein. Man kann ebenfalls gut erkennen, dass die Hyphen auch direkt neben und auf den Trichomen wachsen.



**Abbildung 76: Blattoberseite eines Basilikumblatts. A, Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme, B Nach Färbung. T, Trichome; H, Hyphe; S, Spaltöffnung.**

### Der Einfluss der Lichtqualität auf die Stecklingsbewurzelung

Die Auswertung der Bewurzelung nach 21 Tagen zeigt, dass die Mehrheit der nicht belichteten Stecklinge noch keine Wurzeln gebildet hatten (Tabelle 20). Die Stecklinge, die unter einer Zusatzbelichtung kultiviert wurden wiesen zum überwiegenden Teil sichtbare Wurzeln auf. Der meisten Stecklinge bewurzelten unter der LED AP673, gefolgt von roten LEDs > blauen > mehrfarbigen LEDs. Die Natriumdampflampe war gleichwertig. Bezüglich der Anzahl und dem Gewicht der Wurzeln zeigte sich, dass Stecklinge unter rot-blauen LEDs und der LED mit dem Spektrum AP673 besonders gut bewurzelten. Stecklinge unter rein blauen LEDs bewurzelten nur geringfügig besser als nicht belichtete Stecklinge. Bezüglich der Länge der Wurzeln waren die Ergebnisse weniger deutlich. Hier wiesen nur die unbelichteten Stecklinge eine signifikant geringere Länge auf.

**Tabelle 20: Der Effekt von verschiedenen Lichtqualitäten auf die Bewurzelung von *Euphorbia pulcherrima* Stecklingen. Eine ANOVA Analyse der logarithmischen Daten zeigte einen statistisch signifikanten Unterschiedlichen für die Anzahl der Wurzeln ( $p = 0.001$ ), das Wurzelgewicht ( $p < 0.001$ ) und die Länge der Wurzeln ( $p = 0.001$ ). Werte, die mit dem gleichen Buchstaben markiert sind, sind nicht signifikant unterschiedlich (Tukey's test,  $n = 18$ ,  $\alpha = 0.05$ ).**

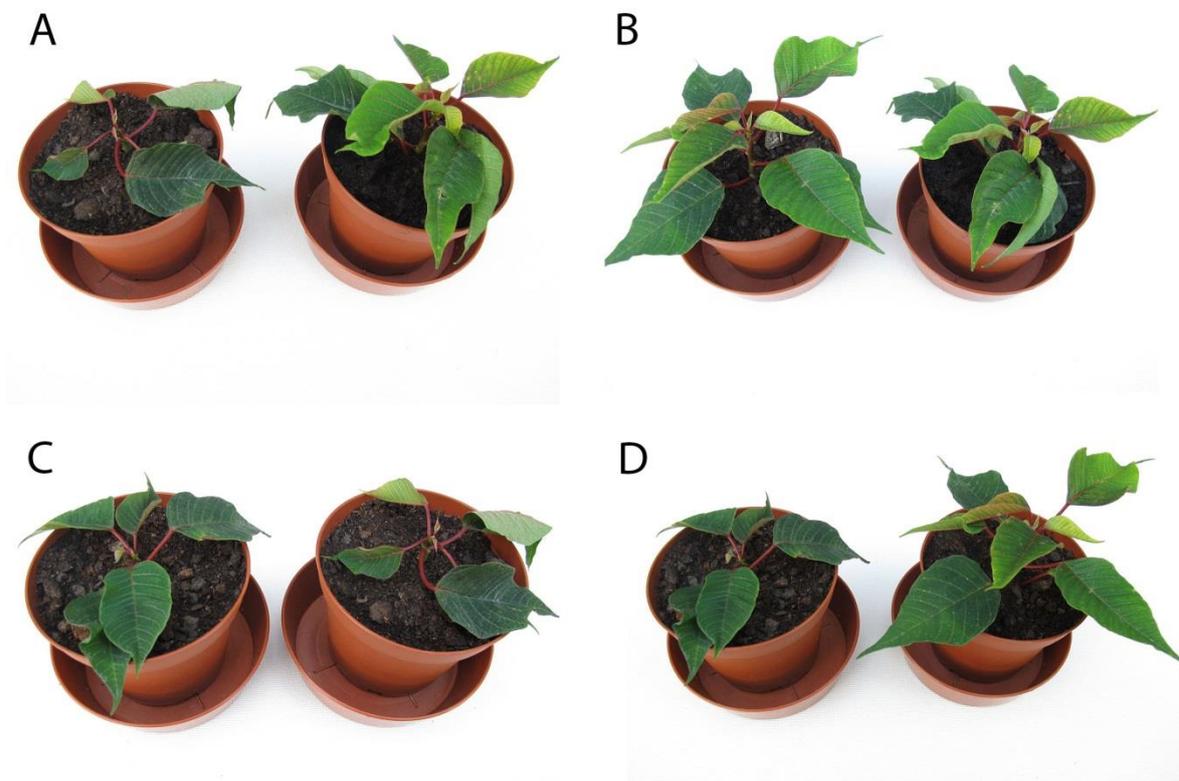
Lichtquelle	Bewurzelte Stecklinge	Wurzelanzahl	Gewicht (g)	Länge (cm)
Kontrolle	7	3.6 ·/· 2.3 b	0.1 ·/· 3.0 c	1.2 ·/· 1.2 b
Natriumdampflampe	15	7.5 ·/· 2.3 ab	0.3 ·/· 2.1 abc	2.2 ·/· 1.3 a
LED blau	15	4.7 ·/· 2.8 b	0.2 ·/· 1.9 bc	1.7 ·/· 1.3 ab
LED rot	17	5.9 ·/· 3.0 ab	0.4 ·/· 2.4 ab	2.2 ·/· 1.5 a
LED rot, blau	15	11.7 ·/· 1.5 a	0.5 ·/· 1.7 a	2.0 ·/· 1.3 a
LED rot, blau, dunkelrot	15	10.9 ·/· 2.4 ab	0.4 ·/· 2.5 ab	1.8 ·/· 1.4 ab
G2	15	8.2 ·/· 1.8 ab	0.4 ·/· 1.9 ab	2.1 ·/· 1.4 a
AP673	18	12.4 ·/· 1.6 a	0.6 ·/· 1.7 a	2.1 ·/· 1.4 a

Die Auswertung der Bewurzelung der vier Testvarianten aus dem zweiten Experiment (belichtet, unbelichtet, belichtet für die ersten 10 Tage und belichtet für die zweiten 10 Tage) zeigte, dass wiederum die belichtete Variante deutliche besser bewurzelte als die unbelichtete (Tabelle 21). Die Daten zeigen auch, dass die Anzahl und Länge der Stecklinge, die nur während der ersten 10 Tage belichtet wurden, mit denen der unbelichteten Variante übereinstimmen. Ebenso gleichen die Daten der Stecklinge, die während der zweiten 10 Tage belichtet wurden den belichteten Stecklingen.

**Tabelle 21: Mittelwerte und Standardabweichung der Anzahl und Länge der Wurzeln unter den vier Belichtungsvarianten. Der Kruskal-Wallis Test zeigt, dass die Unterschiede statistisch signifikant waren ( $p = 0.49$  (Anzahl) und  $p = 0.01$  (Länge)).**

Variante	Wurzelanzahl	Wurzellänge
unbelichtet	3.9 $\pm$ 2.2 a	1.8 $\pm$ 1.4 b
belichtet	5.5 $\pm$ 2.5 a	3.0 $\pm$ 1.2 a
ersten 10 Tage belichtet	3.9 $\pm$ 1.9 a	1.9 $\pm$ 1.4 ab
zweiten 10 Tage belichtet	4.7 $\pm$ 2.1 a	2.3 $\pm$ 1.6 ab

Um zu testen, ob die verzögerte Entwicklung der unbelichteten Stecklinge sich auf die Qualität der Jungpflanzen auswirkt wurden die bewurzelten Stecklinge getopft und im Gewächshaus ohne Belichtung weiterkultiviert. Nach einem Monat zeigte sich, dass die Jungpflanzen, die bereits während der Wurzelbildung belichtet wurden deutlich besser entwickelt waren (Abbildung 77). Ebenso entwickelten sich Stecklinge, die während der zweiten 10 Tage belichtet wurden besser als jene, die während der ersten 10 Tage belichtet wurden.



**Abbildung 77: Jungpflanzenentwicklung aus belichteten Poinsettienstecklingen. A, Vergleich eines unbelichteten Stecklings mit einem belichteten. B, Vergleich eines Stecklings der die zweiten 10 Tage belichtet wurde mit belichteten Steckling. C, Vergleich eines Stecklings, der die ersten 10 Tage belichtet wurde mit einem unbelichteten Steckling. D, Vergleich eines Stecklings, der die ersten 10 Tage belichtet wurde mit einem belichteten Steckling**

Svenson et al. führten den Effekt des Zusatzlichts auf die Photosynthese zurück. Allerdings unternahmen die Autoren keine Messungen um ihre Vermutung zu bestätigen. Um diese These zu testen wurde die Photosyntheserate der Stecklinge täglich gemessen. Die Messungen bestätigten, dass die Photosyntheserate während nach den ersten 10 Tagen deutlich anstieg (Tabelle 18). Es zeigte sich auch, dass keine Unterschiede in der Photosyntheserate bei Belichtung mit unterschiedlichen Spektren, aber gleicher PAR Strahlung auftraten

**Tabelle 22: Mediane (Interquartilsabstand) der Photosyntheserate (A) und Transpiration (E) von *Euphorbia pulcherrima* Stecklingen unter verschiedenen Spektren (n = 15).**

Spektrum	A ( $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ )	E ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
Kontrolle	0.8 (0.5 - 1.2)	0.2 (0.1 – 0.3)
Blau	1.1 (0.7 - 1.6)	0.2 (0.1 – 0.2)
G2	1.3 (0.8 - 2.3)	0.2 (0.1 – 0.2)
AP673	1.0 (0.2 - 1.8)	0.1 (0.1 – 0.2)
Variante 3	0.6 (0.4 - 1.0)	0.2 (0.1 – 0.3)
Variante 4	0.7 (0.2 - 1.6)	0.1 (0.1 – 0.2)

## Diskussion

### Morphologie von Zierpflanzen

Unsere Versuche zeigen dass unter Belichtung rotes Licht die Kompaktheit steigert, blaues Licht dagegen keinen oder einen negativen Einfluss auf die Kompaktheit hat. Seit langem ist bekannt, dass rotes Licht die streckungswachstumsfördernde Wirkung des dunkelroten Lichts aufhebt. Allerdings zeigen unsere Versuche auch, dass der Effekt des roten Lichts darüber hinaus geht. Zum einen, da die Regressionsanalyse keinen Zusammenhang des Verhältnisses von rotem zu dunkelrotem Licht feststellte, zum anderen weil die Kompaktheit und nicht die Höhe mit dem Anteil an rotem Licht korreliert. Letzteres deutet darauf hin, dass die Zunahme an Biomasse einen entscheidenden Einfluss auf die Zunahme der Kompaktheit darstellt. Diese Vermutung wird durch die höhere Photosyntheserate unter rotem Licht untermauert.

Das Ergebnis der Untersuchung widerspricht den bisherigen Untersuchungen, die eine wachstumsinhibierende Wirkung des blaues Lichts beschreiben. Es ist bemerkenswert, dass die Mehrheit der Studien in dem eine wachstumsinhibierende Wirkung des blauen Lichts beschrieben wurde wurden an *Arabidopsis thaliana* durchgeführt (COSGROVE 1981, FOLTA & SPALDING 2001, AHMAD ET AL. 2002, SELLARO

ET AL. 2010). *A. thaliana* ist eine Rosettenpflanze, das heißt die Blätter treten aus einem nahe am Wurzelhals liegenden Nodium aus. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen betreffen also nicht den Internodienabstand sondern die kurze, aus dem Hypokotyl entstandene Sprossachse. Es ist als fraglich, ob diese Ergebnisse auf Pflanzen die keine Rosetten bilden überhaupt übertragbar sind. Inzwischen mehren sich die Publikationen, die ebenfalls keine wachstumsinhibierende Wirkung von blauem Licht in Zierpflanzen finden können. Es ist auch erwähnenswert, dass in der Publikation von Cosgrove (1981)  $\text{CuSO}_4$  Filter zur Erzeugung des blauen Lichts verwendet. Das in der Publikation gezeigte Spektrum stimmt mit den bei Rajapakse (1999) gezeigten überein. Im Gegensatz zu LEDs erzeugen Filter breitbandige Spektren. So filtert ein  $\text{CuSO}_4$  Filter zwar dunkelrotes Licht heraus. Grünes und etwas rotes Licht sind aber im Spektrum weiterhin vertreten. Um zu testen, ob es einen Unterschied macht, ob man mit blau belichtet oder rot herausfiltert wurden Sonnenblumen unter farbigen Folien kultiviert. Wie die Daten zeigen erhalten wir im Sommer unter den Folien genau den gegenteiligen Effekt. Das heißt Pflanzen unter den roten Filtern sind größer. Sie sind jedoch auch kompakter. Das liegt daran, dass sie eine deutlich höhere Biomasse aufweisen. Die Messungen zeigen auch, dass sie eine höhere Photosyntheseleistung erbringen. Dadurch könne wir mit relativer Sicherheit davon ausgehen, dass rotes Licht die Photosynthese tatsächlich besser stimuliert als blaues. Darüber hinaus zeigen diese Daten wiederum, dass der Effekt des roten Lichts weniger die Hemmung des Streckungswachstums sondern die Zunahme der Biomasse betrifft.

Sonnenblumen sind Modellpflanzen. Um auch andere Pflanzen zu testen wurden Beet- und Balkonpflanzen unter LEDs kultiviert. Die Daten bezüglich des Kompaktheit sind weniger vielversprechend als die der Sonnenblumen. Dies liegt natürlich unter anderem daran, dass Sonnenblumen ausgewählt wurden Effekte, die das Streckungswachstum betreffen besser zu detektieren zu können. Wiederum konnte kein positiver Effekt von zusätzlichem blauem Licht beobachtet werden. Allerdings zeigte sich, dass unter LED Licht, die Beet- und Balkonpflanzen eher blühten. Wie der Vergleich der einzelnen Spektren zeigt, dürfte der Entwicklungsvorsprung dem zusätzlichen Lichtangebot als der einzelnen Wellenlängen zuzurechnen sein. So konnte die Natriumhochdruckdampfampe bei fast jeder Pflanze genauso gut abschneiden wie alle anderen Leuchten.

### **Gehalt an Rosmarinsäure**

Die Ergebnisse der Versuche zeigen klar, dass der Rosmarinsäuregehalt in Basilikum und Borretsch mit dem Verhältnis von dunkelrotem zu rotem Licht ansteigt. Dasselbe gilt auch für das Streckungswachstum (Höhe). Es gilt als etabliert, dass das Streckungswachstum von Phytochromen reguliert wird und mit dem Verhältnis von dunkelrotem zu rotem Licht zunimmt. In der Literatur finden sich ebenfalls zahlreiche Hinweise, dass das Phytochrome das Verhältnis von dunkelrotem zu rotem Licht nutzt um damit andere Zellstoffwechselfvorgängen zu regulieren. Ein alternativer Mechanismus ist derzeit nicht bekannt. Es ist daher davon auszugehen, dass die Zunahme des Rosmarinsäuregehalts mit dem Verhältnis von dunkelrotem zu rotem Licht ebenfalls auf Phytochrome zurückzuführen ist.

Erstaunlicherweise bleibt der Gehalt an Kaffeesäure stabil obwohl sie über den gleichen Biosyntheseweg gebildet wird. Im Gegensatz zur Rosmarinsäure, die in Trichomen auf der Blattoberfläche gelagert wird, wird die Kaffeesäure als Vorstufe für die Synthese von Ferulasäure genutzt (GANG ET AL. 2002). Die Ferulasäure ist wiederum ein Ausgangsstoff für weitere Biosynthesewege. Die Analyse der Basilikumblätter zeigte, dass die Konzentration an Kaffeesäure sehr gering war und keine Ferulasäure detektiert werden konnte. Es ist daher wahrscheinlich, dass die Kaffeesäure weiter umgesetzt wurde und somit keine Anreicherung in den Blättern stattfand. Daher konnte auch kein Unterschied zwischen den Belichtungsvarianten festgestellt werden.

Da Phytochrome zu den am besten Verstandenen Photorezeptoren gehören ist es verhältnismäßig einfach eine Belichtungsstrategie zu entwerfen, die dieses Regulationssystem anspricht. Allerdings zeigen die Versuche auch, dass die Aktivierung der Phytochrome bei Basilikum und Borretsch, wie bei vielen anderen Arten auch, zu einem verstärkten Streckungswachstum führt. Diese geht einher mit einem großen Internodienabstand, der der Pflanze eine unansehnliche Gestalt verleitet. In der gärtnerischen Praxis gilt, dass Topfkräuter, ähnlich wie Zierpflanzen eine gewisse Größe nicht überschreiten und eine gewisse Kompaktheit nicht unterschreiten sollten. Folglich geht die vermehrte Bildung von Rosmarinsäure durch die Aktivierung von Phytochrom immer mit einem gewissen optischen Qualitätsverlust einher. Noch ist unklar, wie diese beiden Prozesse getrennt werden

können. In der Vergangenheit konnte gezeigt werden, dass es eine kurzfristige Aktivierung von Phytochrom ausreicht um die Bildung des Enzyms PAL zu stimulieren. Es ist daher denkbar, dass durch kurze Intervalle mit einem hohen Anteil an dunkelrotem Licht zwar die Biosynthese gestartet wird, die Länge des Intervalls aber nicht ausreicht um das Streckungswachstum zu fördern.

Borretsch ist ein Vertreter der Familie der Boraginaceae. Die Boraginaceae und die Lamiaceae sind entfernte Verwandte, die den Euasteriden I zugerechnet werden. Phylogenetische Studien haben gezeigt, dass sich die Boraginaceae von den Lamiales in der Unterkreide (vor 145 bis 100 Mio. Jahre) getrennt haben (BREMER ET AL. 2004). Diese Studie legt nahe, dass sich die Boraginaceae lange vor der Entstehung der eigentlichen Familie der Lamiaceae separat weiterentwickelt haben. Das Ergebnis, dass Borretsch denselben Regulationsmechanismus aufweisen wie Basilikum legt daher nahe, dass dieser auch innerhalb der Familie der Lamiaceae konserviert ist. Dies bedeutet, dass eine Strategie zur Vermehrung der Rosmarinsäure mit Licht auch in anderen Topfkräutern der Familie der Laminaceae funktionieren würde.

Die aktuellen Richtlinien der Europäischen Union und der USA lassen eine Werbung mit einer gesundheitsfördernden Wirkung nur dann zu, wenn diese durch ausgiebige wissenschaftliche Studien belegt ist. Im Falle der Rosmarinsäure sollte daher, trotz zahlreichen Publikationen, die eine gesundheitsfördernde Wirkung nahelegen (NGO ET AL. 2011), ebenfalls auf den Verweis einer gesundheitsfördernden Wirkung verzichtet werden. Dennoch könnte sich eine Verbesserung der Pflanzenqualität durch eine Erhöhung des Rosmarinsäuregehalts im kompetitiven Markt der Topfkräuter für den Produzenten langfristig lohnen. Dies gilt ins Besondere, wenn die Belichtungsstrategie in ein mehrlagiges Produktionssystem integriert wird. Mehrlagige Kulturen sind derzeit noch selten. Es ist aber abzusehen, dass bei steigenden Grundstückspreisen und Abnahmemengen die Produktion in der Höhe, aber auf kleinerer Fläche rentabel wird. In diesen Systemen wird oft mit LEDs gearbeitet um die durch Beschattung fehlende Lichtsumme auszugleichen. Sollte sich ein Produzent dazu entscheiden in ein modernes Mehrlagensystem mit LEDs zu investieren so wird er versuchen dieses System in alle Richtungen zu optimieren. In diesem Falle könnte es sich für den Anbauer lohnen kurze Phasen dunkelroten Lichts zu verwenden, um den Rosmarinsäuregehalt zu erhöhen.

## **Wurzelentwicklung**

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass eine Zusatzbelichtung einen positiven Effekt auf die Bewurzelung von Stecklingen hat. Der Effekt ist statistisch signifikant und führt bei der weiteren Kultur zu einer deutlich schnelleren Entwicklung. Ebenso zeigen die Ergebnisse dass Stecklinge das Zusatzlicht während der ersten 10 Tage der Bewurzelungsphase kaum nutzen können. Damit bestätigen diese Daten die These von Svenson et al. (1990). Auf der anderen Seite zeigen die Daten auch, dass der Bewurzelungserfolg -trotz gleicher Photosyntheseleistung- vom Spektrum der Zusatzbelichtung abhängt. Ins Besondere zeigte sich, dass blaues Licht die Bewurzelung weniger förderte als rotes Licht. Dunkelrotes Licht hatte keinen Einfluss. Dies deutet darauf hin, dass Photorezeptoren einen wichtigen Beitrag zur Bewurzelung liefern. Untersuchungen haben gezeigt, dass die rot/dunkelrote Rezeptoren PhyA und PhyB das Wurzelwachstum bei *Arabidopsis* fördern (SALISBURY ET AL. 2007). Dabei fördern beide Phytochrome das Wurzelwachstum unter rotem Licht aber nur PhyA unter dunkelrotem (DE SIMONE ET AL. 2000). Im Gegensatz zum Wurzelwachstum bei *Arabidopsis* zeigten unsere Versuche keinen positiven Effekt von dunkelrotem Licht. Dieses Ergebnis ist insofern von praktischer Bedeutung, da dunkelrotes Licht das Streckungswachstum des Stecklings anregt. Da dunkelrotes Licht aber nicht zur Bewurzelung beiträgt kann bei einer zukünftigen Belichtung darauf verzichtet werden und somit der Steckling klein und kompakt gehalten werden.

Die Rezeptoren für blaues Licht, die Cryptochrome, scheinen eine antagonistische Wirkung in der Wurzelentwicklung zu spielen. So haben Untersuchungen von *Arabidopsis* Cryptochrome-Mutanten gezeigt, dass Cry1 das Wurzelwachstum inhibiert während Cry2 das Wurzelwachstum fördert (CANAMERO ET AL. 2006). Die inhibierende Rolle von Cry1 wurde durch andere Untersuchungen bestätigt (ZENG ET AL. 2010). Unser Ergebnis, dass blaues Licht zwar das Wurzelwachstum fördert aber bei weitem nicht so gut wie rotes Licht, lässt sich daher so interpretieren, dass es zwar die Photosynthese stimuliert aber gleichzeitig das Wurzelwachstum über Cryptochrome inhibiert.

## Literaturverzeichnis

ACHE, P., H. BAUER, H. KOLLIST, K. AL-RASHEID, S. LAUTNER, W. HARTUNG und R. HEDRICH 2010: Stomatal action directly feeds back on leaf turgor: new insights into the regulation of the plant water status from non-invasive pressure probe measurements. *The Plant journal* 62: 1072–82.

AHMAD, M., N. GRANCHER, M. HEIL, R.C. BLACK, B. GIOVANI, P. GALLAND und D. LARDEMER 2002: Action spectrum for cryptochrome-dependent hypocotyl growth inhibition in *Arabidopsis*. *Plant Physiology* 129: 774–785.

BABA, S., N. OSAKABE, M. NATSUME, A. YASUDA, Y. MUTO, K. HIYOSHI, H. TAKANO, T. YOSHIKAWA und J. TERAO 2005: Absorption, metabolism, degradation and urinary excretion of rosmarinic acid after intake of *Perilla frutescens* extract in humans. *European journal of nutrition* 44: 1–9.

BAIS, H.P., T.S. WALKER, H.P. SCHWEIZER und J.M. VIVANCO 2002: Root specific elicitation and antimicrobial activity of rosmarinic acid in hairy root cultures of *Ocimum basilicum*. *Plant Physiology and Biochemistry* 40: 983–995.

BEGGS, C.J., K. KUHN, R. BÖCKER und E. WELLMANN 1987: Phytochrome-induced flavonoid biosynthesis in mustard (*Sinapis alba* L.) cotyledons. Enzymic control and differential regulation of anthocyanin and quercetin formation. *Planta* 172: 121–126.

BERGSTRAND, K.-J., H. ASP and H.K. SCHÜSSLER 2016: Growth control of ornamental and bedding plants by manipulation of photoperiod and light quality. *Acta Hort.* 1134, 33-39

BREMER, K., E.M. FRIIS und B. BREMER 2004: Molecular phylogenetic dating of asterid flowering plants shows early Cretaceous diversification. *Systematic biology* 53: 496–505.

CAMPBELL, N.A., und J.B.REECE 2006: *Biologie*. Pearson Studium

- CANAMERO, R.C., N. BAKRIM, J.-P. BOULY, A. GARAY, E.E. DUDKIN, Y. HABRICOT und M. AHMAD 2006: Cryptochrome photoreceptors cry1 and cry2 antagonistically regulate primary root elongation in *Arabidopsis thaliana*. *Planta* 224: 995–1003.
- COHEN, Y., M. VAKNIN, Y. BEN-NAIM und A.E. RUBIN 2013: Light suppresses sporulation and epidemics of *Peronospora belbahrii*. *PLoS one* 8: e81282.
- COSGROVE, D.J. 1981: Rapid suppression of growth by blue light. *Plant physiology* 67: 584–590.
- CURREY, C.J., and R.G. LOPEZ 2013: Cuttings of *Impatiens*, *Pelargonium*, and *Petunia* Propagated under Light-emitting Diodes and High-pressure Sodium Lamps Have Comparable Growth, Morphology, Gas Exchange, and Post-transplant Performance. *Hort. Sci.* 48(4), 428-434
- DAS, N., N. PAL und S.K. PRADIP 2015: Economic cost analysis of LED over HPS flood lights for an efficient exterior design using solar PV. *Building and Environment* 89: 380-392
- DEMOTES-MAINARD, S., T. PERON, A. COROT, J. BERTHELOOT, J. LE GOURRIEREC, S. PELLESCI-TRAVIER, L. CREPEL, P. MOREL, L. HUCHE-THELIER, R. BOUMAZA, A. VIAN, V. GUERIN, N.LEDUC und S. SAKR 2016: Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany* 121: 4-21
- DRESEN, D.R., und R.W. LANGHANS: 1992. Temperature Effects on Growth of *Impatiens* Plug Seedlings in Controlled Environments. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117(2), 209-215
- DRÜGE, U., S. ZERCHE, R. KADNER und M. ERNST 2000: Relation between nitrogen status, carbohydrate distribution and subsequent rooting of chrysanthemum cuttings as affected by pre-harvest nitrogen supply and cold storage. *Annals of Botany* 85: 687-701
- DRÜGE, U., S. ZERCHE, R. und KADNER 2004: Nitrogen-and storage affected carbohydrate partitioning in high-light -adapted *Pelargonium* cuttings in relation to survival and adventitious root formation under low light. *Annals of Botany* 94: 831-842
- FOLTA, K.M. und K.S.CHILDERS 2008. Light as a growth regulator: Controlling plant biologie with narrow-bandwidth solid-stage lighting systems. *Hort Science* 43: 1957-1964
- FOLTA, K.M. und E.P. SPALDING 2001: Unexpected roles for cryptochrome 2 and phototropin revealed by high-resolution analysis of blue light-mediated hypocotyl growth inhibition. *The Plant journal* 26: 471–8.
- FRANK, H.A. und R.J. COGDELL 1996: Carotenoids in Photosynthesis. *Photochemistry and Photobiology* 63: 257–264.
- GANG, D.R., T. BEUERLE, P. ULLMANN und E. PICHERSKY 2002: Differential production of meta hydroxylated phenylpropanoids in sweet basil peltate glandular trichomes and leaves is controlled by the activities of specific acyltransferases and hydroxylases. *Plant physiology* 130: 1536–1544.
- GANG, D.R., J. WANG, N. DUDAREVA, K.H. NAM, J.E. SIMON, E. LEWINSOHN und E. PICHERSKY 2001: An investigation of the storage and biosynthesis of phenylpropenes in sweet basil. *Plant physiology* 125: 539–55.
- GARIBALDI, A., A. MINUTO und M.L. GULLINO 2005: First Report of Downy Mildew Caused by *Peronospora* sp. on Basil (*Ocimum basilicum*) in France. *Plant Disease* 89: 683.
- GILARDI, G., S. DEMARCHI, A. GARIBALDI und M.L. GULLINO 2013: Management of downy mildew of sweet basil (*Ocimum basilicum*) caused by *Peronospora belbahrii* by means of resistance inducers, fungicides, biocontrol agents and natural products. *Phytoparasitica* 41: 59–72.
- GRAVES, W.R., M.N. DANA, and R.J. JOLY 1989: Influence of Root-zone Temperature on Growth of *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle. *J. Environ. Hort.* 7(2), 79-82.
- HERNANDEZ, R. and KUBOTA, C. (2016). Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environ. Exp. Bot.* 121, 66-74

- INOUE, S., T. KINOSHITA, A. TAKEMIYA, M. DOI und K. SHIMAZAKI 2008: Leaf positioning of *Arabidopsis* in response to blue light. *Molecular plant* 1: 15–26.
- ISLAM, M.A., G. GOUTAM, J.L. CLARKE, D.-R. BLYSTAD, H.R. GISLROD, J.E. OHLSEN und S. TORRE 2012: Artificial light from light emitting diodes (LEDs) with a high portion of blue light results in shorter *Poinsettias* compared to high pressure sodium (HPS) lamps. *Scientia Horticulturae* 147: 136-143
- KAGAWA, T., T. SAKAI, N. SUETSUGU, K. OIKAWA, S. ISHIGURO, T. KATO, S. TABATA, K. OKADA und M. WADA 2001: *Arabidopsis* NPL1: a phototropin homolog controlling the chloroplast high-light avoidance response. *Science* 291: 2138–41.
- KINOSHITA, T., M. DOI und N. SUETSUGU 2001: phot1 and phot2 mediate blue light regulation of stomatal opening. *Nature* 414: 656–659.
- KOOTSTRA, a 1994: Protection from UV-B-induced DNA damage by flavonoids. *Plant molecular biology* 26: 771–4.
- KOROCH, A.R., T.S. VILLANI, R.M. PYNE und J.E. SIMON 2013: Rapid Staining Method to Detect and Identify Downy Mildew (*Peronospora belbahrii*) in Basil. *Applications in Plant Sciences* 1: 1300032.
- LANGE, H., W. SHROPSHIRE und H. MOHR 1971: An Analysis of Phytochrome-mediated Anthocyanin Synthesis. *Plant physiology* 47: 649–655.
- LICHTENTHALER, H.K., C. BUSCHMANN, M. DÖLL, H.J. FIETZ, T. BACH, U. KOZEL, D. MEIER und U. RAHMSDORF 1981: Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves. *Photosynthesis research* 2: 115–41.
- LIMPERT, E., W.A. STAHEL und M. ABBT 2001: Log-normal distributions across the sciences: Keys and clues. *BioScience* 51: 341–352.
- LOPEZ, R.G., and E.S. RUNKLE 2008: Photosynthetic Daily Light Integral during Propagation Influences Rooting and Growth of Cuttings and Subsequent Development of New Guinea Impatiens and Petunia. *Hort. Sci.* 43(7), 2052-2059
- MARTÍN, J. a, J. WITZELL, K. BLUMENSTEIN, E. ROZPEDOWSKA, M. HELANDER, T.N. SIEBER und L. GIL 2013: Resistance to Dutch elm disease reduces presence of xylem endophytic fungi in Elms (*Ulmus* spp.). *PloS one* 8: e56987.
- MERSHA, Z., S. ZHANG, Y. FU, X. MO, R.N.R. AND und B. HAU 2013: Efficacy of acibenzolar-S-methyl and  $\beta$ -aminobutyric acid for control of downy mildew in greenhouse grown basil and peroxidase activity in response to treatment with these Compounds. *Journal of Phytopathology* 161: 154–164.
- NGO, S.N.T., D.B. WILLIAMS und R.J. HEAD 2011: Rosemary and cancer prevention: preclinical perspectives. *Critical reviews in food science and nutrition* 51: 946–54.
- PARK, Y.-I., W. CHOW und J. ANDERSON 1995: Light inactivation of functional photosystem II in leaves of peas grown in moderate light depends on photon exposure. *Planta* 196: 401–411.
- PETERSEN, M., Y. ABDULLAH, J. BENNER, D. EBERLE, K. GEHLEN, S. HÜCHERIG, V. JANIÁK, K.H. KIM, M. SANDER, C. WEITZEL und S. WOLTERS 2009: Evolution of rosmarinic acid biosynthesis. *Phytochemistry* 70: 1663–79.
- PORRA, R.J., W. a. THOMPSON und P.E. KRIEDEMANN 1989: Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics* 975: 384–394.
- RAJAPAKSE, N.C. und J.W. KELLY 1995: Spectral filters and growing season influence growth and carbohydrate status of chrysanthemum. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 120: 78–83.

- RAVEN, P.H., R.F. EVERT und S.E. Eichhorn 2006: *Biologie der Pflanzen*. De Gruyter
- ROBERTS, P.D., R.N. RAID, P.F. HARMON, S.A. JORDAN und A.J. PALMATEER 2009: First Report of Downy Mildew Caused by a *Peronospora* sp. on Basil in Florida and the United States. *Plant Disease* 93: 199.
- SALISBURY, F.J., A. HALL, C.S. GRIERSON und K.J. HALLIDAY 2007: Phytochrome coordinates *Arabidopsis* shoot and root development. *The Plant journal: for cell and molecular biology* 50: 429–38.
- SANBONGI, C., H. TAKANO, N. OSAKABE, N. SASA, M. NATSUME, R. YANAGISAWA, K.-I. INOUE, K. SADAKANE, T. ICHINOSE und T. YOSHIKAWA 2004: Rosmarinic acid in perilla extract inhibits allergic inflammation induced by mite allergen, in a mouse model. *Clinical and experimental allergy: journal of the British Society for Allergy and Clinical Immunology* 34: 971–7.
- SCHOPFER, P. und A. BRENNICKE 2010: *Pflanzenphysiologie*. Spektrum akademischer Verlag
- SELLARO, R., M. CREPY, S.A. TRUPKIN, E. KARAYEKOV, A.S. BUCHOVSKY, C. ROSSI und J.J. CASAL 2010: Cryptochrome as a sensor of the blue / green ratio of natural radiation in *Arabidopsis*. *Plant physiology* 154: 401–409.
- SHEKARCHI, M., H. HAJIMEHDIPOOR, S. SAEIDNIA, A. GOHARI und M. HAMEDANI 2012: Comparative study of rosmarinic acid content in some plants of Labiatae family. *Pharmacognosy Magazine* 8: 37–41.
- SHIGA, T., SHOJI, K., SHIMADA, H., HASHIDA, S., F.G. und T.Y. 2009: Effect of light quality on rosmarinic acid content and antioxidant activity of sweet basil, *Ocimum basilicum* L. *Plant Biotechnology* 26: 255–259.
- DE SIMONE, S., Y. OKA und Y. INOUE 2000: Effect of Light on Root Hair formation in *Arabidopsis thaliana* phytochrome-deficient mutants. *Journal of Plant Research* 113: 63–69.
- SINGH, D., C. BASU, M. MEINHARDT-WOLLWEBER und B. ROTH 2015: LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49: 139-147
- SMITH, H. 1982: Light quality, photoperception, and plant Strategy. *Annual Review of Plant Physiology* 33: 481–518.
- SVENSON, S. und F.T. DAVIES 1990: Relation of photosynthesis, growth and rooting during *Poinsettia* propagation. *Proc. Fl. State Hort. Soc* 103: 174–176.
- TAKEDA, H., M. TSUJI, M. INAZU, T. EGASHIRA und T. MATSUMIYA 2002: Rosmarinic acid and caffeic acid produce antidepressive-like effect in the forced swimming test in mice. *European Journal of Pharmacology* 449: 261–267.
- TAN, K.K. 1973: Red-Far-red Reversible Photoreaction in the Recovery from Blue-light Inhibition of Sporulation in *Botrytis cinerea*. *Journal of General Microbiology* 82: 201–202.
- TAN, K.K. 1974: Blue-light Inhibition of Sporulation in *Botrytis cinerea*. *Journal of General Microbiology* 82: 191–200.
- WANG, F.-F., H.-L. LIAN, C.-Y. KANG und H.-Q. YANG 2010: Phytochrome B is involved in mediating red light-induced stomatal opening in *Arabidopsis thaliana*. *Molecular plant* 3: 246–59.
- WIDMER, T.L. und N. LAURENT 2006: Plant extracts containing caffeic acid and rosmarinic acid inhibit zoospore germination of *Phytophthora* spp. pathogenic to *Theobroma cacao*. *European Journal of Plant Pathology* 115: 377–388.
- ZENG, J., Q. WANG, J. LIN, K. DENG, X. ZHAO, D. TANG und X. LIU 2010: *Arabidopsis* cryptochrome-1 restrains lateral roots growth by inhibiting auxin transport. *Journal of Plant Physiology* 167: 670–673.