
**Energieeffizienzsteigerung pflanzlicher In-
vitro-Kulturverfahren mit Hochleistungs-
LED-Belichtungssystemen**

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktor der Gartenbauwissenschaften
Dr. rer. hort.

genehmigte Dissertation
von

M. Sc. Thorsten Bornwaßer
geboren am 04.02.1980 in Berlin

2011

Referent: Prof. Dr. H.-J. Tantau

Korreferent: Prof. Dr. Poehling

Tag der Promotion: 22.11.2011

Kurzfassung

Energieeffizienzsteigerung pflanzenbaulicher In-vitro-Kulturverfahren mit Hochleistung-LED-Belichtungssystemen

Die Belichtung von In-vitro-Kulturen in Kulturräumen stellt einen hohen Anteil des Energiebedarfs in den Kulturräumen dar. Als Möglichkeit zur Energieeinsparung wurde die Energieeffizienz ($\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$) eines konstruierten Belichtungssystems mit Hochleistungs-LEDs (HL-LEDs) der Typen Royalblau, Rot und Kaltweiß, als Alternative zu der konventionell genutzten Leuchtstofflampe untersucht. Für die Umsetzung wurden zuvor die Photonenflussausbeute und der Wirkungsgrad der einzelnen HL-LED-Typen bei Betriebsbedingungen mit steigenden Betriebsstromstärken und Sperrschichttemperaturen auf Basis der PAR herausgearbeitet und die spektralen Veränderungen unter diesen Bedingungen untersucht. Gegenüber einer Leuchtstofflampenbelichtung konnte die Energieeffizienz eines HL-LED-Belichtungssystems bei gleicher durchschnittlicher PPFd auf der zu belichtenden Fläche und gleichem Etagenabstand (300 mm) von $0,43 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ bei einer einfachen Leuchtstofflampe und bis $0,68 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ bei einer Leuchtstofflampe mit integriertem Reflektor auf $0,83 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ gesteigert werden. Ein weiterer Vorteil entsteht durch den geringeren Bedarf an Kühlenergie zur Regulierung der Raumtemperatur im Kulturraum. Unter Berücksichtigung der generell bei LED-Belichtungssystemen möglichen Etagenabstandsänderung, aufgrund der kompakten Bauweise und der starken Reduzierung der zur Pflanze gerichteten Wärmestrahlung (Wu et al., 2003; Barta et al., 1992; Buta et al., 1991), konnte die Energieeffizienz auf $1,16 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$, bei einer gleichzeitig homogeneren PPFd-Verteilung gegenüber einer Leuchtstofflampenbelichtung, erhöht werden. Neben einer Energieeffizienzsteigerung bieten LEDs und HL-LEDs den Vorteil, dass das Emissionsspektrum dieser Belichtungssysteme, durch die dynamischen Einstellmöglichkeiten der Strahlungsqualitäten über eine entsprechende Ansteuerung der LEDs, den Pflanzenbedürfnissen angepasst werden kann (Nhut und Nam, 2010; Morrow, 2008). Mit dem entwickelten HL-LED-Belichtungssystem wurde die Pflanzenentwicklung mehrerer Kulturen unter unterschiedlichen Strahlungsqualitäten untersucht. Dabei konnte keine Präferenz der Kulturen auf eine einzige HL-LED-Variante festgestellt werden. Sie reagierten artspezifisch und teilweise sogar sortenspezifisch. Abgesehen von den derzeit sehr hohen Investitionskosten, welche einen ökonomisch sinnvollen Einsatz noch fragwürdig erscheinen lassen, sind HL-LED-Belichtungssysteme mit ihren Vorteilen gegenüber konventionellen Belichtungssystemen eine innovative und zukunftssträchtige Belichtungsmöglichkeit in der In-vitro-Kultur.

Keywords: LED-Belichtung, Energieeffizienz, In-vitro-Kultur

Abstract

Increase of energy efficiency in horticultural tissue culture with high-power-LED lighting systems

The lighting of tissue cultures is one of the main cost factors in growing rooms due to the high energy need. A lighting system with high-power light-emitting diodes (HP-LEDs) was tested as an alternative to the conventionally used fluorescent tubes. Therefore the HP-LED-types royal-blue, red, and cool white were used to create different spectral outputs. The photon flux yield, level of efficiency, and spectral shift of the single HP-LEDs were measured beforehand at different operating conditions (i.e. increasing current and junction temperature). The energy efficiency of the HP-LED lighting system was determined at $0.83 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ with the same shelf board distance (300 mm) and average PPFD on the exposed surface as compared to the control lighting system. The energy efficiency of the fluorescent lighting system could reach a maximum value of $0.68 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$. In addition to the reduced energy needs, HP-LED lighting systems reduce the need for cooling energy in culture rooms to regulate the room temperature. HP-LED lighting systems allow the reduction of the shelf board distance due to the small mass volume of LEDs and diminished radiant heat output towards the plants (Wu et al., 2003; Barta et al., 1992; Buta et al., 1991). The lower shelf board distance led to an additional increase of the energy efficiency up to $1.16 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ at a distance of 210 mm. Simultaneously the PPFD distribution was more regular than under the exposure with a fluorescent tube. Beside the increase of energy efficiency, HP-LEDs facilitate the control of the spectral composition. The spectral output can be adjusted to the plants' needs and thereby permit a more optimal production and influence the plant morphology (Nhut und Nam, 2010; Morrow, 2008). Various plant tissue cultures and their response to different spectral compositions were investigated with the developed HP-LED lighting system. For none of the tested cultures could a preference for one of the spectral compositions be determined. The reactions of the plants were species-specific and in some cases variety-specific. The high investment costs make a commercial use of HP-LED lighting systems debatable as an economical lighting solution for tissue cultures. Due to its advantages in comparison to commercial lighting systems, HP-LED lighting systems are an innovative and future-oriented lighting solution for tissue cultures.

Keywords: LED lighting, energy efficiency, tissue cultures

I Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung

Abstract

I	Inhaltsverzeichnis	I
II	Abkürzungsverzeichnis	V
III	Abbildungsverzeichnis	VII
IV	Tabellenverzeichnis	X

1 Einleitung **1**

2 Derzeitiger Kenntnisstand **4**

2.1	Begriffe und Definitionen	4
2.1.1	Wellenlängenbereiche elektromagnetischer Strahlung	4
2.1.2	Radiometrische Größen	4
2.1.3	Photometrische Größen	5
2.1.4	Leistungsbezogene Einheiten	6
2.2	Light Emitting Diode (LED)	7
2.2.1	Aufbau und Funktionsweise	7
2.2.1.1	Bauweisen	7
2.2.1.2	Funktionsweise	8
2.2.1.3	Schmalbandige HL-LEDs	9
2.2.1.4	Breitbandige Hochleistungs-LEDs	10
2.2.2	Eigenschaften von Hochleistungs-LEDs	11
2.2.3	Technische Daten	12
2.2.4	Radiometrische Bewertung von HL-LEDs	12
2.3	Konventionelle In-vitro-Kultur	14
2.3.1	Kommerzielle In-vitro-Kulturen	15
2.3.2	Kulturraum	15
2.3.3	Wachstumsfaktoren	16
2.3.4	Einflussfaktor Strahlung	18
2.3.5	Konventionelle Belichtungssysteme	19
2.4	Einfluss der Strahlung auf die Pflanze	21
2.4.1	Photosynthesepigmente	21
2.4.2	Photorezeptoren	22
2.4.3	Reaktionen auf unterschiedliche Strahlungsqualitäten	23
2.4.3.1	Spezifische spektrale Wellenlängenbereiche	24
2.4.3.2	Kombination spektraler Wellenlängenbereiche	28
2.5	Chancen des LED-Einsatzes im Gartenbau	30

3 Zielsetzung **34**

4 Material und Methoden	35
4.1 Radiometrische Bewertung von Hochleistungs-LEDs	35
4.1.1 Aufbau des Messsystems	35
4.1.1.1 Aufbau der Ulbrichtkugel	35
4.1.1.2 Hochleistungs-LED-Halterung	36
4.1.1.3 Hochleistungs-LED-Steuereinheit	36
4.1.1.4 Signalverarbeitende Einheit	37
4.1.2 Kalibrierung des Spektrometers	37
4.1.3 Kalibrierung der Ulbrichtkugel	37
4.1.4 Ermittlung des Wirkungsgrades und der Photonenflussausbeute	38
4.1.5 Bewertete HL-LEDs	39
4.1.6 Parameterstudien	40
4.1.6.1 Betriebsstromstärke	40
4.1.6.2 Platinentemperatur	40
4.1.7 Spektrale Veränderungen der HL-LEDs	41
4.1.8 Auswertung der Strahlungsspektren	42
4.2 Entwicklung und Bewertung eines HL-LED-Belichtungssystems	43
4.2.1 Aufbau des HL-LED-Belichtungssystems	43
4.2.1.1 HL-LED-Platinen	43
4.2.1.2 Temperaturmanagement	44
4.2.1.3 Aufbau der HL-LED-Belichtungseinheit	45
4.2.1.4 Ansteuerung der LED-Belichtungsanlage	46
4.2.2 Kontrollvariante	47
4.2.3 Methoden	48
4.2.3.1 Messung der PPFD-Verteilungsmuster	48
4.2.3.2 Messung der Stromaufnahme	48
4.2.4 Datenanalyse	49
4.2.4.1 Berechnung der durchschnittlichen PPFD	49
4.2.4.2 Berechnung der Energieeffizienz	49
4.2.4.3 Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung	49
4.2.4.4 Statistische Datenanalyse	50
4.2.5 Versuchsvariablen	50
4.2.5.1 HL-LED-Dichte	50
4.2.5.2 Etagenabstand	51
4.2.5.3 Durchschnittliche PPFD	51
4.2.5.4 Kombinationen spektraler Wellenlängenbereiche	52
4.3 Pflanzenbauliche Untersuchungen	52
4.3.1 Versuchsaufbau	52
4.3.2 Versuchspflanzen und Versuchsdurchführung	53
4.3.2.1 <i>Gentiana cruciata</i> × <i>scabra</i> 'Alpine Success BLUE 05'	54
4.3.2.2 <i>Canna indica</i>	55
4.3.2.3 <i>Kalmia latifolia</i>	56
4.3.2.4 <i>Phaenopsis</i> -Hybriden	56
4.3.2.5 <i>Helleborus niger</i> und <i>H. x ericsmithii</i> -Hybride 'St. Basilus'	57

4.3.3 Auswertungsparameter	58
4.3.4 Datenanalyse	59
5 Ergebnisse	60
5.1 Photonenflussausbeute der Hochleistungs-LEDs	60
5.1.1 Strahlungsspektren der Hochleistungs-LEDs	60
5.1.2 Photonenflussausbeute und Wirkungsgrad einzelner HL-LEDs	61
5.1.2.1 Einfluss der Betriebsstromstärke	63
5.1.2.2 Einfluss der Sperrschichttemperatur	66
5.1.3 Spektrale Veränderungen von Hochleistungs-LEDs	68
5.1.3.1 Einfluss der Betriebsstromstärke	68
5.1.3.2 Einfluss der Sperrschichttemperatur	69
5.1.3.3 Farbtemperaturveränderung breitbandiger Hochleistungs-LEDs	70
5.2 Energieeffizienz eines HL-LED-Belichtungssystems	72
5.2.1 PPF-D-Verteilung	72
5.2.1.1 Hochleistungs-LED-Dichte	72
5.2.1.2 Etagenabstand	75
5.2.2 Energieeffizienz	80
5.2.2.1 Hochleistungs-LED-Dichte	80
5.2.2.2 Etagenabstand	81
5.2.2.3 Durchschnittliche PPF-D	83
5.2.3 Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung	84
5.3 Ergebnisse der pflanzenphysiologischen Untersuchungen	87
5.3.1 Einfluss der Strahlungsqualität	87
5.3.1.1 <i>Gentiana cruciata</i> × <i>scabra</i> 'Alpine Success BLUE 05'	88
5.3.1.2 <i>Canna indica</i>	94
5.3.1.3 <i>Kalmia latifolia</i>	96
5.3.1.4 <i>Phalaenopsis</i> -Hybriden	99
5.3.1.5 <i>Helleborus niger</i> und <i>Helleborus</i> × <i>ericsmithii</i> -Hybride	101
5.3.2 Einfluss der Strahlungsintensität	103
5.3.2.1 <i>Gentiana cruciata</i> × <i>scabra</i> 'Alpine Success BLUE 05'	103
5.3.2.2 <i>Helleborus niger</i> und <i>H. x ericsmithii</i> -Hybride 'St. Basilius'	105
6 Diskussion	107
6.1 Systembewertung und Bewertung der Versuchsdurchführung	107
6.1.1 Effizienzermittlung einzelner HL-LEDs	107
6.1.1.1 Messsystem	107
6.1.1.2 Durchführung der Messungen	110
6.1.1.3 Fehlerbewertung des Messsystems	112
6.1.2 Konstruktionsbewertung des HL-LED-Belichtungssystems	113
6.1.3 Umsetzung der pflanzenbaulichen Untersuchungen	117
6.2 Energieeffizienz	122
6.2.1 Energieeffizienz und Photonenflussausbeute als Vergleichsmerkmal	122
6.2.1.1 Photonenflussausbeute	122

6.2.1.2	Energieeffizienz	123
6.2.2	Effizienter Betrieb von HL-LEDs	126
6.2.2.1	Einflussfaktor Betriebsstromstärke	126
6.2.2.2	Einflussfaktor Sperrschichttemperatur	130
6.2.2.3	Ergebnisvergleich der Parameterstudien	131
6.2.3	Leuchtmittelvergleich	133
6.2.4	Effizienter Einsatz von HL-LED-Belichtungssystemen in der In-vitro-Kultur	135
6.3	Pflanzenbauliche Bewertung einer LED-Belichtung	142
6.3.1	Strahlungsqualität	144
6.3.1.1	Kombination roter und blauer LEDs	145
6.3.1.2	Kombination roter und kaltweißer HL-LEDs	151
6.3.2	Strahlungsintensität	153
7	Fazit und Ausblick	155
8	Zusammenfassung	159
9	Literaturverzeichnis	164
	Anhang	A 1
	Lebenslauf	
	Danksagung	
	Erklärung	

II Abkürzungsverzeichnis

A	Fläche	[m ²]
AC	Wechselstrom	[W]
A_H	Fläche der Hauptöffnung der Ulbrichtkugel	[m ²]
AlGaAs	Aluminiumgalliumarsenid	
AlInGaP	Aluminiumindiumgalliumphosphid	
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)	
BaSO ₄	Bariumsulfat	
C ₂ H ₄ =	Ethylen	
CMFs	Colour Matching Functions	
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	
DC	Gleichstrom	[W]
E_{in}	Bestrahlungsstärke in der Ulbrichtkugel	[W m ⁻²]
E_{out}	Bestrahlungsstärke der Kalibrierleuchte	[W m ⁻²]
E_{Phot}	Photonenfluss in der Ulbrichtkugel	[μmol m ⁻² s ⁻¹]
E_{spek}	durch das Spektrometer erfasste Strahlungsspektrum	[Counts]
E_{xl}	Bestrahlungsstärke eines Leuchtmittels in der Ulbrichtkugel	[W m ⁻²]
EVG	Elektronisches Vorschaltgerät	
f_{cal}	Kalibrierfaktor	[W s m ⁻² Counts ⁻¹]
GaAs	Galliumarsenid	
HL-LED	Hochleistungs-LEDs	
I	Stromstärke	[A]
InGaN	Indiumgalliumnitrid	
l_{pl}	Länge der Platte	[m]
l_{zyl}	Länge des Zylindermantels	[m]
k'	konstanter Faktor zur Bestimmung der Normfarbwerte	
Kf	Kugelfaktor	[m ²]
LED	Light Emitting Diode	
LOV	Light, Oxygen, Voltage	
LSL	Leuchtstofflampe	
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor	
n	reziproke Steigung zur Berechnung von Tcp	
NIR	Nahes Infrarot	
O ₂	Sauerstoff	
P	elektrische Leistung	[W]
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung	

<i>PPFA</i>	Photosynthetische Photonenflussausbeute	[$\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$]
p-n	Übergang einer Halbleiterdotierung von negativ (n) zu positiv (p)	
PPFD	Photosynthetische Photonenflussdichte	[$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
PPFD _Ø	durchschnittliche PPFD auf einer Fläche	[$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
PSII	Photosystem II	
PWM	Pulsweitenmodulation	
Q _{y_max}	maximale Photosystem II Quantenausbeute	
<i>r1</i>	Innenradius	[m]
<i>r2</i>	Außenradius	[m]
R ²	minimale Bestimmtheitsmaß	
rF	relative Luftfeuchtigkeit	[%]
<i>R_{th, ges}</i>	gesamter thermischer Widerstand	[K W ⁻¹]
<i>R_{th, JP}</i>	innerer thermischer Widerstand der HL-LED	[K W ⁻¹]
<i>R_{th, MT}</i>	thermischer Widerstand HL-LED-Platine und Thermoelement	[K W ⁻¹]
sr	Steradian (Raumwinkeleinheit)	[-]
SMD	Surface Mounted Device	
<i>T_{cp}</i>	ähnlichste Farbtemperatur	[K]
<i>T_J</i>	Sperrschichttemperatur	[°C]
<i>U</i>	Spannung	[V]
UV	Ultraviolette Strahlung	
VIS	für das menschliche Auge sichtbare Strahlung	
X, Y, Z	Normfarbwerte (Tristimulus)	
<i>x, y</i>	Normwertfarbanteile	
ZTL/ADO	Proteine der Familie Zeitlupe/Adagio	
ΔPPFD	Abweichung der PPFD-Ausbeute	[$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
Δ <i>T_{JP}</i>	Differenz zwischen Platinen- und Sperrschichttemperatur	[K]
ΔWatt	Abweichung des Wirkungsgrades	[W W ⁻¹]
<i>η</i>	Wirkungsgrad	[-]
<i>λ</i>	Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung	[nm]
<i>λ_{Alu}</i>	Wärmeleitfähigkeit von Aluminium	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
<i>λ_{WK}</i>	Wärmeleitfähigkeit des Wärmeleitklebers	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
Φ	gesamten Strahlungsflusses einer Strahlungsquelle	[W]
Φ _{in}	einstrahlender Strahlungsfluss der Kalibrierleuchte	[W]
Φ _{phot}	Photonenfluss im Bereich der PAR	[$\mu\text{mol s}^{-1}$]
Ω	Durchgangswiderstand	[V A ⁻¹]
Ø	Durchmesser	[m]

III Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.2.1	Beispiele unterschiedlicher Bauformen von LEDs mit Darstellungen von Standard-LEDs (a), SMD-LEDs (b) und Hochleistungs-LEDs (c).	7
Abb. 2.2.2	Schematischer Querschnitt durch eine Hochleistungs-LED am Beispiel einer InGaN-LED des Modells LUXEON® K2.	8
Abb. 2.2.3	Diese Beispielgraphik zeigt mögliche unterschiedliche Halbleitermaterialien und die daraus resultierenden Wellenlängenbereiche der emittierten Strahlung mit deren Lichtstärke.	9
Abb. 2.2.4	Aufbau unterschiedlicher weißer LEDs.	10
Abb. 2.2.5	Relative Strahlungsspektren unterschiedlicher HL-LED-Typen am Beispiel des Modells LUXEON® Rebel.	11
Abb. 4.1.1	Schematische Darstellung des Messsystems mit A) der Ulbrichtkugel, der signalverarbeitenden Einheit, der Halterung und B) einer schematischen Detailansicht der HL-LED mit Platine und Thermoelement (Bild siehe Anhang A.1).	35
Abb. 4.2.1	Bild einer HL-LED-Platine mit drei HL-LEDs.	43
Abb. 4.2.2	Schematische Darstellung zweier Kühlprofile mit HL-LED-Platinen im Querschnitt.	44
Abb. 4.2.3	Bild einer HL-LED-Belichtungseinheit mit 24 HL-LEDs pro HL-LED-Typ.	45
Abb. 4.2.4	Schaltplan eines HL-LED-Belichtungssystems mit 24 HL-LEDs pro HL-LED-Typ.	46
Abb. 4.2.5	Bild einer HL-LED-Steuerung mit einem Ringkerntransformator zwei großen Kondensatoren (rechts im Bild).	47
Abb. 4.2.6	Verteilungsmuster der Messpunkte über die Fläche eines Etagenbodens.	48
Abb. 4.2.7	Schematische Darstellung der HL-LED-Anordnung auf einem Gitterboden (1550 * 500 mm) mit a) 24 HL-LEDs, b) 18 HL-LEDs und c) 12 HL-LEDs.	51
Abb. 5.1.1	Relative Strahlungsspektren von HL-LEDs des Modells LUXEON Rebel der Typen Royalblau, Rot, Grün und Kaltweiß.	60
Abb. 5.1.2	Photosynthetische Photonenflussausbeute (PPFA) von vier unterschiedlichen HL-LED-Typen des Modells LUXEON® Rebel in Abhängigkeit von der Betriebsstromstärke.	64
Abb. 5.1.3	Wirkungsgrad von vier unterschiedlichen HL-LED-Typen des Modells LUXEON® Rebel in Abhängigkeit von der Betriebsstromstärke.	65
Abb. 5.1.4	Photosynthetische Photonenflussausbeute (PPFA) von vier unterschiedlichen HL-LED-Typen des Modells LUXEON® Rebel in Abhängigkeit von Sperrschichttemperatur.	66

Abb. 5.1.5	Wirkungsgrad von vier unterschiedlichen HL-LED-Typen des Modells LUXEON® Rebel in Abhängigkeit von der Sperrschichttemperatur.	67
Abb. 5.1.6	Spektrale Veränderung am Beispiel einer roten HL-LED bei unterschiedlichen Betriebsstromstärken.	69
Abb. 5.1.7	Spektrale Veränderung einer kaltweißen HL-LED bei unterschiedlichen Betriebsstromstärken.	71
Abb. 5.2.1	PPFD-Verteilungsmuster von HL-LED-Belichtungssystemen mit unterschiedlichen HL-LED-Dichten.	73
Abb. 5.2.2	Boxplots der quadrierten Abweichung der PPFD von der durchschnittlichen PPFD ($35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) dreier HL-LED-Belichtungssysteme mit unterschiedlichen HL-LED-Dichten.	74
Abb. 5.2.3	PPFD-Verteilungsmuster von HL-LED-Belichtungssystemen bei einem Etagenabstand von A) 300 mm, B) 270 mm und C) 240 mm.	76
Abb. 5.2.4	PPFD-Verteilungsmuster von HL-LED-Belichtungssystemen bei einem Etagenabstand von A) 210 mm und B) 180 mm.	77
Abb. 5.2.5	PPFD-Verteilungsmuster von Leuchtstofflampen-Belichtungssystemen bei einem Etagenabstand 300 mm.	78
Abb. 5.2.6	Boxplots der quadrierten Abweichung der PPFD von der durchschnittlichen PPFD ($35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) unterschiedlicher Belichtungssysteme.	79
Abb. 5.2.7	Einfluss der HL-LED-Dichte auf die Energieeffizienz verschiedener HL-LED-Belichtungssysteme bei unterschiedlicher Anzahl an HL-LEDs pro Belichtungssystem und HL-LED-Typ (HL-LED-Dichte).	80
Abb. 5.2.8	Energieeffizienz verschiedener Belichtungssysteme bei unterschiedlichen Etagenabständen.	82
Abb. 5.2.9	Energieeffizienz verschiedener Belichtungssysteme bei unterschiedlicher durchschnittlicher PPFD.	83
Abb. 5.3.1	Relative Strahlungsspektren einer Leuchtstofflampe (Philips Master TL-D 58W/840).	87
Abb. 5.3.2	Transmission der Kulturgefäße mit Folienüberzug.	88
Abb. 5.3.3	Raumtemperatur in der Kulturkammer am Beispiel von fünf Wochentagen (09.02.2010 bis 13.09.2010) bei einer Einstellung von 20 °C Raumtemperatur.	89
Abb. 5.3.4	Frischmassezuwachs (A), Vermehrungsrate (B) und Pflanzenhöhe (C) von <i>Gentiana cruciata</i> × <i>scabra</i> 'Alpine Success BLUE 05' in vier aufeinanderfolgenden Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten, bei einer durchschnittlichen PPFD von $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Werte dargestellt als Mittelwerte mit Standardabweichung (n = 6).	90

Abb. 5.3.5	Blattfarbe (A) und Maximale PSII Quantenausbeute (B) von <i>Gentiana cruciata</i> × <i>scabra</i> 'Alpine Success BLUE 05' in vier aufeinanderfolgenden Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten, bei einer durchschnittlichen PPFD von 26 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Werte dargestellt als Mittelwerte mit Standardabweichung (n = 6).	91
Abb. 5.3.6	Normierter mittlerer Frischmassezuwachs (A), normierte Vermehrungsrate (B), Absolutwerte der Pflanzenhöhe (C), Blattfarbe (D; aus Boniturnoten von 1 bis 3) und maximale PSII- Quantenausbeute (E) von <i>Gentiana cruciata</i> × <i>scabra</i> 'Alpine Success BLUE 05' über vier Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 24).	93
Abb. 5.3.7	Seitenansicht und Aufsicht der Kulturgefäße mit <i>Gentiana cruciata</i> × <i>scabra</i> 'Alpine Success BLUE 05' aus der Kulturpassage 1 bei 26 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.	94
Abb. 5.3.8	Normierter mittlerer Frischmassezuwachs (A), normierte Vermehrungsrate (B), Absolutwerte der Pflanzenhöhe (C), Blattfarbe (D; aus Boniturnoten von 1 bis 3) und maximale PSII- Quantenausbeute (E) von <i>Canna indica</i> über vier Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 24).	95
Abb. 5.3.9	Normierter mittlerer Frischmassezuwachs (A), normierte Vermehrungsrate (B), Absolutwerte der Pflanzenhöhe (C), Blattfarbe (D; aus Boniturnoten von 1 bis 3) und maximale PSII- Quantenausbeute (E) von <i>Kalmia latifolia</i> 'Corona' über vier Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 18).	97
Abb. 5.3.10	Normierter mittlerer Frischmassezuwachs (A), normierte Vermehrungsrate (B), Absolutwerte der Pflanzenhöhe (C), Blattfarbe (D; aus Boniturnoten von 1 bis 3) und maximale PSII- Quantenausbeute (E) von <i>Kalmia latifolia</i> 'Ginkona' über vier Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 18).	98
Abb. 5.3.11	Normierter mittlerer Frischmassezuwachs (A), normierte Vermehrungsrate (B), Absolutwerte der Pflanzenhöhe (C), Blattfarbe (D; aus Boniturnoten von 1 bis 3) und maximale PSII- Quantenausbeute (E) von <i>Gentiana cruciata</i> × <i>scabra</i> 'Alpine Success BLUE 05' über vier Kulturpassagen mit sechs unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 18).	104
Abb. 6.3.1	Absorptionsspektren der Blätter von fünf unterschiedlichen Pflanzen.	144

IV Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1.1	Auflistung der bei den Ulbrichtkugelmessungen verwendeten HL-LEDs. Angaben nach Philips Datenblatt (2008).	40
Tab. 4.3.1	Versuchsvarianten der Versuche mit <i>Gentiana cruciata</i> × <i>scabra</i> 'Alpine Success BLUE 05'.	55
Tab. 4.3.2	Versuchsvarianten der Versuche mit <i>Gentiana cruciata</i> × <i>scabra</i> 'Alpine Success BLUE 05' bei geringerer durchschnittlicher PPFD.	55
Tab. 4.3.3	Versuchsvarianten der Versuche mit <i>Phalaenopsis</i> -Hybriden.	57
Tab. 4.3.4	Versuchsvarianten der <i>Helleborus</i> -Versuche. Der relative Anteil der roten, blauen oder kaltweißen HL-LEDs an der durchschnittlichen PPFD ist mit angegeben.	58
Tab. 5.1.1	Sperrschichttemperaturen der HL-LED-Typen bei einer Betriebsstromstärke von 50 mA ($T_{j, \text{min}}$) und 700 mA ($T_{j, \text{max}}$) und die dabei entstehende maximale, temperaturbedingte Änderung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute ($\Delta PPFA$).	63
Tab. 5.1.2	Verschiebung der Peakwellenlänge bei variabler Betriebsstromstärke zwischen 50 mA und 700 mA.	68
Tab. 5.1.3	Verschiebung der Peakwellenlänge bei variabler Sperrschichttemperatur zwischen 5 °C und 80 °C.	70
Tab. 5.1.4	Veränderung der Farbtemperatur kaltweißer HL-LEDs bei steigender Betriebsstromstärke (50 mA bis 700 mA; konstant 25 °C) und Sperrschichttemperatur (20 °C bis 90 °C; konstante 350 mA).	70
Tab. 5.2.1:	Beschreibung der Abhängigkeit der Betriebsstromstärke von der durchschnittlichen PPFD einzelner HL-LED-Typen.	84
Tab. 5.2.2	Beschreibung der benötigten elektrischen Leistung der HL-LED-Typen im Belichtungssystem von der durchschnittlichen PPFD.	85
Tab. 5.2.3	Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung bei unterschiedlichen Varianten der Belichtung und der PPFD (35, 30, 25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).	85
Tab. 5.3.1	Normierter Frischmassezuwachs und Vermehrungsrate von der <i>Phalaenopsis</i> -Hybriden 'Don Giovanni' (A, D), 'Paulina' (B, E) und 'Don Giovanni' (C, F) kultiviert auf Vermehrungsmedium (A bis C) und auf Stockmedium (D bis E) über je zwei Kulturpassagen mit fünf unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 16).	100
Tab. 5.3.2	Normierter Frischmassezuwachs und Vermehrungsrate des <i>Helleborus niger</i> Klons I (A, D), des <i>Helleborus</i> × <i>ericsmithii</i> -Hybride 'St. Basilius' (B, E) und des <i>H. niger</i> Klons II (C, F) kultiviert auf Vermehrungsmedium (A bis C; n = 16) über zwei Kulturpassagen und auf Zwischenmedium (D	

	bis E; n= 8) über eine Kulturpassage mit sechs unterschiedlichen Belichtungsvarianten.	102
Tab. 5.3.3	Normierter mittlerer Frischmassezuwachs und Vermehrungsrate des <i>Helleborus niger</i> Klons I (A, D), der <i>Helleborus x ericsmithii</i> -Hybride 'St. Basilius' (B, E) und des <i>H. niger</i> Klons II (C, F) kultiviert auf Vermehrungsmedium (A bis C; n = 16) über zwei Kulturpassagen und auf Stockmedium (D bis E; n= 8) über eine Kulturpassage mit sechs unterschiedlichen Belichtungsvarianten Durchschnittliche PPFD: 13 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.	106
Tab. 6.1.1	Messfehlerquellen des Messsystems zur Quantifizierung der möglichen Abweichung des Photonenflusses.	112
Tab. 6.2.1	Vergleich der Photosynthetischen Photonenflussausbeute unterschiedlicher Leuchtmittel.	133

1 Einleitung

Sowohl das Pflanzenwachstum als auch die Pflanzenentwicklung werden durch die Belichtungsdauer, die Bestrahlungsstärke und die Strahlungsqualität beeinflusst (Pierik, 1997; Dewir et al., 2006). In den von natürlicher Sonneneinstrahlung abgeschirmten Kulturräumen kann die Entwicklung der Pflanzen durch die Belichtung besonders effektiv beeinflusst werden. In der konventionellen In-vitro-Kultur erfolgt diese ausschließlich mit künstlichen Lichtquellen, überwiegend mit Leuchtstofflampen, wobei einige wenige Labore für das Erreichen hoher PPFD Metall-Halogen-, Natriumdampf- oder Glühlampen einsetzen (George et al., 2008; Kim et al., 2004b). Bei Leuchtstofflampen gibt es qualitative Unterschiede, zum Beispiel warmweiße und kaltweiße Leuchtstofflampen, die bereits unterschiedliche Auswirkungen auf die Pflanzen haben können und je nach Kultur entsprechend ausgewählt werden müssen (Pierik, 1997).

Leuchtstofflampen weisen kein kontinuierliches Strahlungsspektrum auf und emittieren Strahlung in mehreren Bereichen des sichtbaren Teils des Strahlungsspektrums (VIS) und somit auch im Bereich der PAR (Dohlus, 2010). LEDs bieten, mit ihren schmalbandigen Strahlungsspektren (Abb. 2.5.2) eine gute Möglichkeit die Strahlungsqualität zu definieren und, durch die Zusammenstellung der LED-Typen in unterschiedlichen Verhältnissen zueinander, zu beeinflussen. Somit sind LEDs ein sehr gutes Mittel für Studien der Wirkung von Strahlungsqualitäten und Bestrahlungsstärken auf die Morphologie und die Physiologie von Pflanzen. Die Strahlungsqualität kann an die Pflanzenbedürfnisse hinsichtlich eines optimalen Wachstums angepasst werden (Nhut und Nam, 2010; Nhut et al., 2003 a, b; Tenessen et al., 1994; Bula et al., 1991).

Vor allem das geringe Gewicht und Volumen der LEDs war Auslöser der seit Ende der 80er Jahre unternommenen Untersuchungen in der Weltraumforschung mit LED-Systemen zur direkten Pflanzenbelichtung für eine Pflanzenproduktion im Weltraum, welche bis heute erweitert und verbessert wurden (zum Beispiel Wheeler und Tibbitts, 1987; Barta, 1992; Cuello, 2002; Massa et al., 2006; Zyablova, 2010). Aus den anfänglichen Studien in der Weltraumforschung entwickelten sich schnell LED-Belichtungssysteme für Experimente in der Pflanzenphysiologie, zur Samenkeimung, zur Bewurzelung und in der In-vitro-Kultur (Morrow, 2008). Die meisten in vitro kultivierten Pflanzen werden bei geringer PPFD kultiviert (Lee et al., 2007; Ali et al., 2005), weshalb dieses Anwendungsgebiet für den Einsatz von LEDs geeignet scheint, da der Strahlungsfluss einzelner LEDs meist sehr gering ist und somit das Erzielen höherer PPFD mit diesem Leuchtmittel aufwendig ist. Die dynamischen Einstellmöglichkeiten der

Strahlungsqualitäten können auch für bestimmte Kulturprotokolle mit unterschiedlichen Anforderungen an die Strahlungsqualität während der Bewurzelungs-, Vermehrungs- und Wachstumsphase in der In-vitro-Kultur genutzt werden (Morrow, 2008).

Bei der Auswahl der in den Versuchen eingesetzten LEDs zum Erzielen einer bestimmten Strahlungsqualität, wird sich oft am Absorptionsspektrum des Chlorophylls orientiert, mit den Absorptionsmaxima bei 430 nm und 660 nm (Abb. 2.4.1), weshalb ein überwiegend in Versuchen eingesetzter Teil der LED-Belichtungssysteme eine Kombination aus roten und blauen LEDs verwendete. Dabei scheint das optimale Verhältnis von Wellenlängen im roten und blauen Bereich des Strahlungsspektrums zur Verbesserung des Pflanzenwachstums zwischen den unterschiedlichen Pflanzenarten zu variieren, so dass keine eindeutigen Aussagen gemacht werden können (Nhut und Nam, 2010; Nhut et al., 2006). Nicht nur der Einsatz von roten und blauen LEDs wurde in die Untersuchungen mit einbezogen, sondern teilweise auch weiße LEDs, ebenso wie zusätzliche grüne LEDs. Auch dabei zeigten verschiedene Pflanzenarten, wie zum Beispiel *Lactuca sativa* und *Cucumis sativus*, teils unterschiedliche Reaktionen auf eine zusätzliche Belichtung mit grünen LEDs (Dougher und Bugbee, 2001; Kim et al., 2004a; Brazaityte et al., 2009).

Die In-vitro-Kultur nimmt bei der Vermehrung von Pflanzen im Gartenbau einen hohen Stellenwert ein. Allein in Deutschland stieg die Anzahl in vitro vermehrte Pflanzen, darunter Stauden, Gehölze, andere mehrjährige Pflanzen und Aquariumpflanzen, zwischen 1985 und 2004 von circa fünf Millionen auf über 48 Millionen Pflanzen an, wobei die Vermehrung der Gattung *Phalaenopsis* mit über 31 Millionen Pflanzen den mit Abstand größten Anteil darstellt (Winkelmann et al., 2006). Sämtliche Pflanzen müssen bis zur Akklimatisierung, also bis zur Überführung in ein Gewächshaus, künstlich belichtet werden. Dabei stellt die Belichtung, abgesehen von den Lohnkosten, mit dem damit verbundenen Energieaufwand zur Abfuhr der Verlustleistung in Form von Wärme durch eine Kühlung, den höchsten Kostenfaktor im Kulturraum dar (Jao und Fang, 2004).

Nach den bisherigen Angaben der LED-Hersteller, welche überwiegend photometrische Einheiten verwenden, können LEDs beim Vergleich der Lichtausbeute eine energiesparende Alternative zu den Leuchtstofflampen darstellen. Hingegen sind für den Gartenbau relevante Angaben über den Photonenfluss oder die Strahlungsleistung im Bereich des PAR eine Seltenheit. Der mögliche Einsatz von HL-LEDs als Alternative zur Leuchtstofflampe wird durch eine sehr kleine Bauform der HL-LEDs begünstigt, welche die kompakte Bauweise einer Leuchte erlaubt (Wu et al., 2007; Barta et al., 1992; Bula et al., 1991), wodurch eine Verbesserung der

Raumausnutzung als möglich erscheint. Die photometrischen Messungen werden unter bestimmten Bedingungen, meist mit 350 mA Betriebsstromstärke und 25 °C Sperrschichttemperatur, durchgeführt (zum Beispiel Philips Datenblatt, 2008). Die Lichtausbeute und die Energieeffizienz sind abhängig von der Betriebsstromstärke sowie der Sperrschichttemperatur und nehmen beim Anstieg bereits einer der beiden Faktoren ab. Die beim Betrieb überschüssige, am LED-Chip produzierte Wärme, also die Verlustleistung, wird nicht mit der Strahlung abgegeben, sondern über das Gehäuse abgeleitet und muss dann durch ein geeignetes Temperaturmanagement abgeführt werden (Poikonen et al., 2010; Krückeberg, 2007).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Bewertung von Hochleistungs-LEDs nach dem aktuellen Stand der Technik für den effizienten Einsatz bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen in der pflanzlichen In-vitro-Kultur. Neben den radiometrischen Messungen der einzelnen HL-LEDs stand die Entwicklung eines HL-LED-Belichtungssystems mit unterschiedlichen LED-Typen im Vordergrund, anhand dessen die Energieeffizienz und der Wirkungsgrad des Systems untersucht werden sollten. Eine Optimierung des Pflanzenwachstums unter einer HL-LED-Belichtung, nicht durch die Zusammenstellung der HL-LED-Typen in unterschiedlichen Verhältnissen zueinander, sondern durch die Ansteuerungsmöglichkeiten der HL-LEDs und der dadurch variabel einstellbaren Strahlungsspektren des Belichtungssystems, wurde anhand mehrerer Pflanzenarten untersucht. Neben einer möglichen Energieeinsparung durch die Belichtung der Kulturen mit HL-LEDs, sollte im Hinblick auf die Pflanzen untersucht werden, ob ähnliche Ergebnisse, wie mit einer konventionell etablierten Leuchtstofflampe erzielt werden können, oder ob diese sogar eine Verbesserung der Pflanzenentwicklung verursachen.

2 Derzeitiger Kenntnisstand

2.1 Begriffe und Definitionen

2.1.1 Wellenlängenbereiche elektromagnetischer Strahlung

Die Ultraviolette Strahlung (**UV**) ist über den Wellenlängenbereich zwischen 280 nm und 380 nm definiert. Unterteilt wird dieser Wellenlängenbereich in UV-B (280 nm bis 320 nm) und UV-A (320 nm bis 380 nm) (DIN 5031-7).

Die für das menschliche Auge sichtbare Strahlung (Licht oder **VIS**) reicht von 360 nm bis 760 nm und wird wie folgt in Farben eingeteilt: Violett (360 nm bis 424 nm), Blau (424 nm bis 492 nm), Grün (492 nm bis 535 nm), Gelb (535 nm bis 586 nm), Orange (586 nm bis 647 nm), Rot (647 nm bis 760 nm) (DIN 5031 - 7).

Das Nahe Infrarot (**NIR**) beschreibt den Wellenlängenbereich über 760 nm und reicht bis zu einer Wellenlänge von 3000 nm (DIN 5031 - 7).

Die Photosynthetisch aktive Strahlung (**PAR**; Photosynthetically Active Radiation) beschreibt den für die Photosynthese wichtigen Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Strahlung und wurde international gebräuchlich zwischen 400 nm und 700 nm festgelegt (CIE 106/8). Für die quantitative Bewertung der Strahlung, die zur Photosynthese genutzt werden kann, kann der photosynthetisch aktive Anteil der Strahlung nach der auf einem Blatt einfallenden Energie oder nach der Anzahl der von einem Blatt absorbierten Photonen pro Wellenlänge im PAR-Bereich normalisiert werden. Als die geeignete Einheit zur Quantifizierung der PAR wurde von McCree (1972b) die Photosynthetische Photonenflussdichte (siehe Kapitel 2.1.2) befunden (McCree, 1972a; Monteith und Unsworth, 1990).

2.1.2 Radiometrische Größen

Die Radiometrie beschäftigt sich mit Messungen der Energie pro Zeiteinheit, also der Strahlungsleistung, die durch eine Strahlungsquelle emittiert wird oder von dieser auf einer Fläche auftrifft. Die radiometrischen Größen basieren auf der Einheit Watt (W), mit Ausnahme der auf Photonen bezogenen Größen. Die radiometrischen Größen sind physikalische Größen zur quantitativen Beschreibung der von einer Strahlungsquelle ausgehenden elektromagnetischen Strahlung. Zu den meisten Strahlungsgrößen gibt es ein photometrisches Äquivalent (Ohno, 1999; Hering et al, 2005; Nolting und Dittmar, 2005; Gigahertz-Optik, 2008).

Der **Strahlungsfluss** ist die gesamte von einer Strahlungsquelle ausgehende Energie der Strahlung pro Zeiteinheit und wird in Watt (W) gemessen. Das photometrische Äquivalent ist der Lichtstrom.

Die **Bestrahlungsstärke** beschreibt den Strahlungsfluss, der auf einer Fläche einfällt und gibt diesen im Verhältnis zur bestrahlten Fläche an und wird in $W_{\text{Strahlung}} \text{ m}^{-2}$ gemessen. Entsprechende photometrische Größe ist die Beleuchtungsstärke.

Die **PAR-Bestrahlungsstärke**, gemessen in $W_{\text{PAR}} \text{ m}^{-2}$ ist der auf einer Fläche einfallende Strahlungsfluss im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 700 nm.

Der **Photonenfluss** gibt die gesamte Anzahl an Photonen an, die innerhalb einer Sekunde von einer Strahlungsquelle ausgehen. Der Photonenfluss wird in $\mu\text{mol s}^{-1}$ angegeben.

Die **Photosynthetische Photonflussdichte** (PPFD; Photosynthetic Photon Flux Density) beschreibt die Anzahl an Photonen im Wellenlängenbereich der PAR, die innerhalb einer Sekunde auf einer Fläche auftreten und von einem Blatt absorbiert werden können. Die PPFD wird in der Einheit $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ gemessen.

2.1.3 Photometrische Größen

In der Photometrie wird zur Bewertung photometrischer Größen, wie zum Beispiel des Lichtstroms und der Beleuchtungsstärke, die $V(\lambda)$ -Kurve herangezogen. Sie beschreibt, abhängig von der Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung, den spektralen Helligkeitsempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges. Danach erkennt der Mensch, mit seinen Rezeptoren im blauen, grünen und roten Bereich des Strahlungsspektrums, die elektromagnetische Strahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen 360 nm und 760 nm, mit einer maximalen Empfindlichkeit bei 555 nm für das Tagsehen (DIN 5031 – 7; Ohno, 1999; Nolting und Dittmar, 2005; Eichler, 2007). Fast sämtliche Leuchtmittel und somit auch LEDs werden mit photometrischen Größen beschrieben.

Die **Lichtstärke** wird in Candela (cd) gemessen. Ein Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle in einer bestimmten Richtung, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz, entsprechend einer Wellenlänge von 555 nm, mit einer Strahlstärke von 1/683 Watt pro Steradian (sr; Raumwinkeleinheit) aussendet.

Der **Lichtstrom**, gemessen in Lumen (lm), ist die nach der $V(\lambda)$ Kurve (Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges) bewertete Strahlungsleistung (siehe unten) einer Strahlungsquelle.

Der Maximalwert vom photometrischen Äquivalent des Strahlungsflusses für Tagsehen liegt bei einer Wellenlänge von 555 nm mit einem Wert von 683 lm. Ein monochromatischer Lichtstrom von 683 lm bei der maximalen Augenempfindlichkeit entspricht also einem Strahlungsfluss von 1 W. Für den Zusammenhang zwischen Lumen und Candela gilt, dass 1 lm gleich $1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$ ist.

Die **Beleuchtungsstärke** gibt den auf einer Fläche auffallenden Lichtstrom im Verhältnis zur bestrahlten Fläche an und wird in Lux (lx) gemessen. Ein lx entspricht einem lm m^{-2} .

2.1.4 Leistungsbezogene Einheiten

Die **Energieeffizienz** eines Belichtungssystems beschreibt den Anteil der unter einem Belichtungssystem gemessenen durchschnittlichen Photosynthetischen Photonenflussdichte ($\text{PPFD}_{\text{Ø}}$, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) an der dem Belichtungssystem zugeführten elektrischen Leistung (W_{el}) bezogen auf einen Quadratmeter. Die Energieeffizienz eines Belichtungssystems wird in $\mu\text{mol W}^{-1} \text{ s}^{-1}$ angegeben.

Die **Photosynthetische Photonenflussausbeute** eines Leuchtmittels beschreibt die Umwandlung der elektrischen Leistung (W_{el}) einer Strahlungsquelle in den Photonenfluss im Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Strahlung zwischen 400 nm und 700 nm. Die Ausbeute des Photonenflusses im Bereich der PAR aus einem Watt zugeführter elektrischer Leistung wird in der Einheit $\mu\text{mol W}^{-1} \text{ s}^{-1}$ angegeben.

Der **Wirkungsgrad** ist der Anteil an abgegebener nutzbarer Leistung an der zugeführten Leistung. Der Wirkungsgrad einer Strahlungsquelle ist der Quotient aus abgegebener Leistung, im Folgenden der Strahlungsfluss ($W_{\text{Strahlung}}$), und zugeführter Leistung, also die elektrische Leistung (W_{el}). Die Ausbeute des Strahlungsflusses aus einem Watt zugeführter elektrischer Leistung wird in $W_{\text{Strahlung}} W_{\text{el}}^{-1}$ ausgedrückt.

Die **Lichtausbeute** beschreibt den Anteil der elektrischen Leistung einer Strahlungsquelle, der in den Lichtstrom umgewandelt wird. Die Lichtausbeute wird in lm W^{-1} ausgedrückt und oft als Maß für einen Effizienzvergleich von Leuchtmitteln eingesetzt.

2.2 Light Emitting Diode (LED)

2.2.1 Aufbau und Funktionsweise

LEDs sind elektronische Halbleiterbauelemente mit einem p-n Übergang. Durch das Anlegen einer Spannung und eines Stromflusses in Durchlassrichtung entsteht Elektrolumineszenz, bei der die Strahlung in einer vom Halbleitermaterial abhängigen Wellenlänge emittiert wird. Diese kann im Wellenlängenbereich der UV-Strahlung, des sichtbaren Bereichs (VIS) oder im Bereich des Nahen Infrarots (NIR) liegen (Yeh und Chung, 2009; www.ledshift.com/Funktion20German.html, Stand 17.12.2010; <http://www.led-info.de/grundlagen.html>, Stand 17.12.2010).

2.2.1.1 Bauweisen

Die Bauweise von LEDs, vor allem von Hochleistungs-LEDs (HL-LEDs), ist nicht einheitlich, da fast jeder LED-Hersteller die LEDs in einer eigenen Bauform produziert. Bei der bekanntesten Bauform, den Standard-LEDs (Abb. 2.2.1a), wird je nach Strahlungsfluss zwischen der Standard-, Superbright- und Ultrabright-LED unterschieden. Die Standard-LEDs sind in den Größen 3, 5, 8 und 10 mm erhältlich. Diese LEDs werden meist mit einer Betriebsstromstärke von 20 mA bis 80 mA betrieben. Bei Stromstärke bis 80 mA werden sie auch als „High brightness LEDs“ bezeichnet.

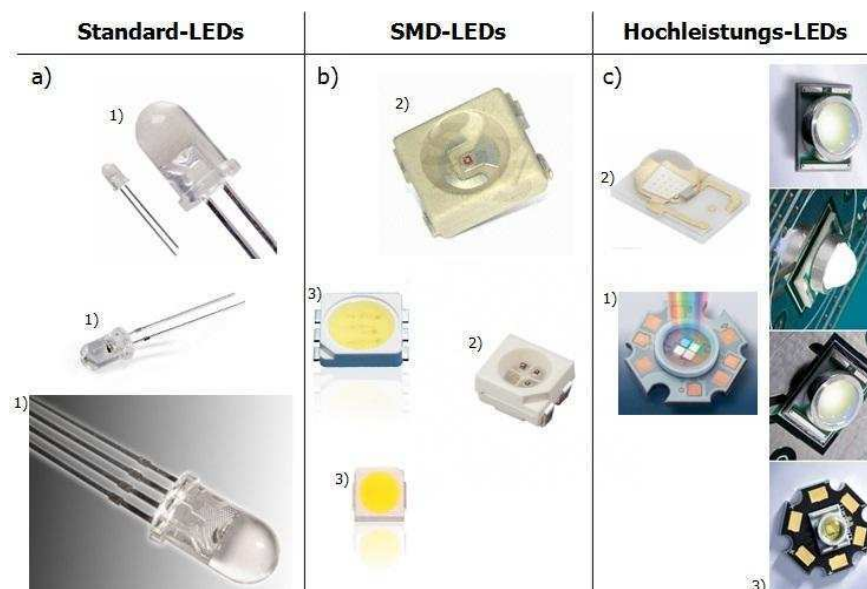


Abb. 2.2.1 Beispiele unterschiedlicher Bauformen von LEDs mit Darstellungen von Standard-LEDs (a), SMD-LEDs (b) und Hochleistungs-LEDs (c).

Bildquellen: 1) www.pur-led.de, 2) www.led-tech.de, 3) www.lumitronix.de.

Die SMD-LEDs (Surface Mounted Device; Abb. 2.2.1b) arbeiten überwiegend im selben Bereich der Betriebsstromstärke, können aber teilweise auch mit einer maximalen Stromstärke von über 100 mA betrieben werden. Der höchste Strahlungsfluss kann mit einer Hochleistungs-LED (HL-LED) erzielt werden, deren Betriebsstromstärke in höheren Bereichen von bis zu 1 A liegen kann. Der überwiegende Teil der produzierten HL-LEDs (Abb. 2.2.1c) hat eine Leistungsaufnahme von circa 1 W, aber auch Modelle mit 3 W oder 5 W sind auf dem Markt zu finden. HL-LEDs haben im Vergleich zu den anderen Bauformen größere LED-Chips (Abb. 2.2.2) oder weisen mehrere LED-Chips in einem Gehäuse auf, bei denen das Temperaturmanagement optimiert wurde (<http://www.led-info.de/grundlagen.html>, <http://www.pur-led.de/LED-Einzel-Highpower/>, http://www.led-tech.de/de/Leuchtdioden-c_1_0.html, Stand 17.12.2010).

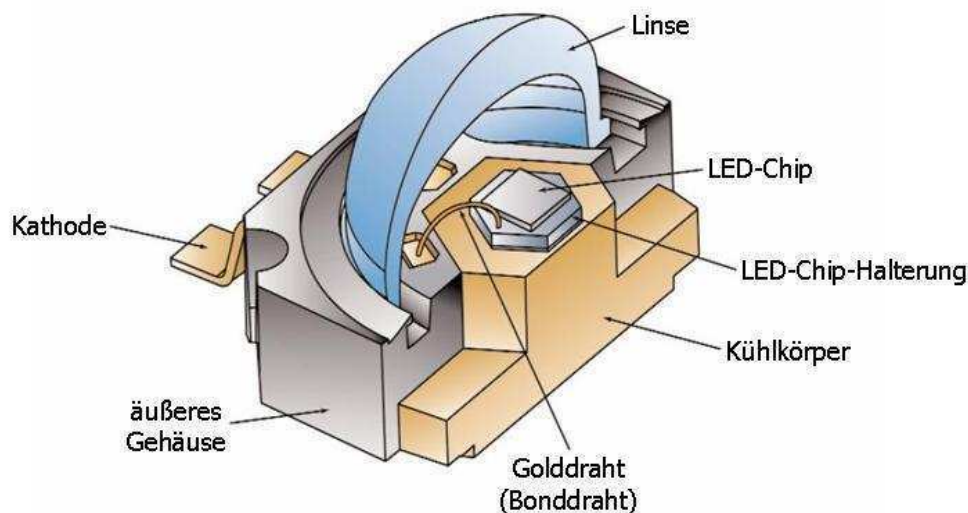


Abb. 2.2.2 Schematischer Querschnitt durch eine Hochleistungs-LED am Beispiel einer InGaN-LED des Modells LUXEON® K2.

Der LED-Chip ist auf einer Halterung aus Silizium befestigt, diese wiederum auf einem Kühlkörper, der aus stark wärmeleitendem Material zum Beispiel Aluminium besteht und die Wärme über die Rückseite der LED abführt. Eine kuppelförmige Linse aus Epoxid gewährleistet einen gewissen Berührungsschutz und sorgt für die jeweiligen Abstrahlcharakteristika der HL-LEDs. Der feine Golddraht verbindet den LED-Chip mit der Anode, nicht mit der hier dargestellten Kathode. Bildquelle: verändert nach LUXEON® K2 Application Brief AB29 (Philips Application Brief, 2007).

2.2.1.2 Funktionsweise

LEDs sind spezielle Halbleiterdioden, bei denen der Chip (Abb. 2.2.2) aus Halbleitermaterialien bestehen, die mit Fremdatomen als Störquellen im Halbleitermaterial dotiert sind, um einen p-n-Übergang herzustellen und gezielt die Eigenschaften des Ausgangsmaterials zu verändern. Nach dem Anlegen einer Spannung fließt der Strom in Durchlassrichtung der Diode von der p-Seite

(Anode) zur n-Seite (Kathode), kann aber nicht in entgegengesetzter Richtung (Sperrrichtung) fließen. Die zur n-Seite wandernden Elektronen rekombinieren mit den Elektronenlöchern der n-Seite. Die Elektronen werden von den Löchern eingefangen, wodurch sie auf ein geringeres Energieniveau fallen und Energie in Form von Photonen emittieren. Die Wellenlänge der emittierten Strahlung hängt von den Halbleitermaterialien und deren Dotierung ab (Abb. 2.2.3) (Yeh und Chung, 2009; Krückeberg, 2007; <http://www.ledshift.com/Funktion%20German.html>, Stand 17.12.2010).

2.2.1.3 Schmalbandige HL-LEDs

Die Materialien der LED-Chips bestehen meist aus Elementen der 3. und 5. Hauptgruppe (III/V-Halbleitern). Die HL-LEDs basieren überwiegend auf den Halbleitermaterialien Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) für Wellenlängen im roten Bereich des VIS, Aluminiumindiumgalliumphosphid (AlInGaP) für Grün, Gelb und Orange, sowie Indiumgalliumnitrid (InGaN) für Blau (Kovac et al., 2003) (Abb. 2.2.3).

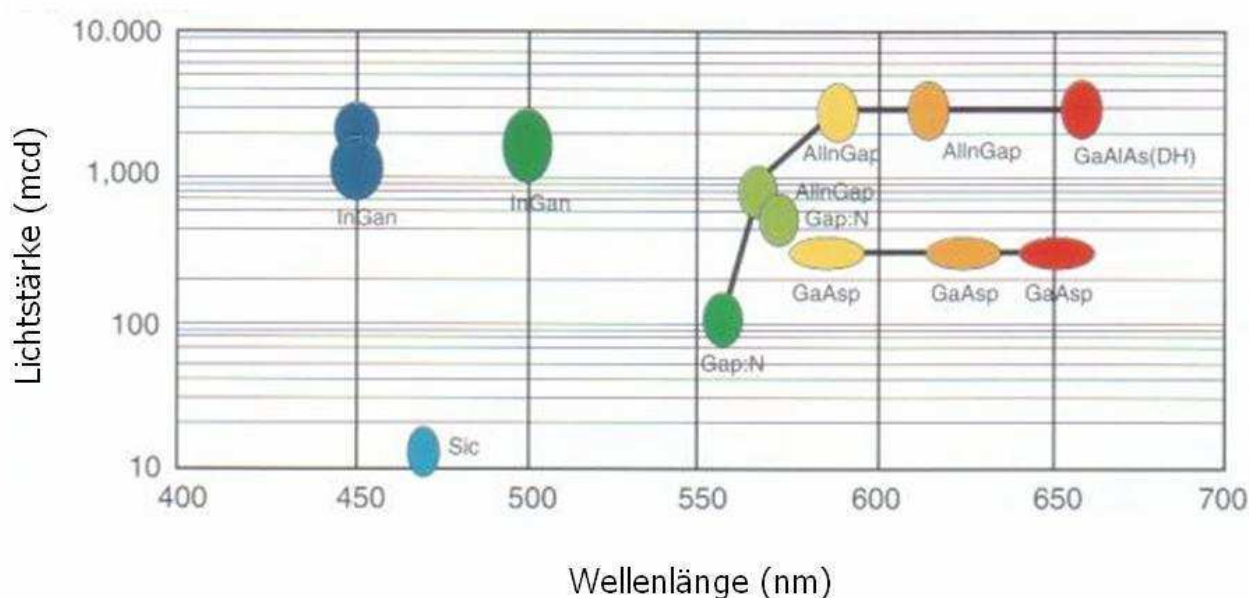


Abb. 2.2.3 Diese Beispielgraphik zeigt mögliche unterschiedliche Halbleitermaterialien und die daraus resultierenden Wellenlängenbereiche der emittierten Strahlung mit deren Lichtstärke. Auch andere Halbleitermaterialien für die entsprechenden Wellenlängenbereiche sind möglich. (Grafik verändert nach: <http://www.omarshauntedtrail.com/Props/Prop%20Idea%20Files/Lighting/Lighting%20-%20LEDs/Light%20Emitting%20Diodes.pdf>; Stand, 28.12.2010)

2.2.1.4 Breitbandige Hochleistungs-LEDs

Weißer Strahlung aus LEDs kann grundsätzlich auf zwei unterschiedliche Arten generiert werden. Zum einen können drei LEDs der Farben Rot, Grün und Blau durch Farbmischung weiße Strahlung erzeugen (Abb. 2.2.4a), zum anderen können blaue oder UV-LEDs mit einer Phosphorschicht kombiniert werden. Blaue LEDs werden mit gelb fluoreszierenden Phosphor beschichtet (Abb. 2.2.4b) und UV-LEDs mit einer kombinierten Schicht aus rot, grün und blau fluoreszierendem Phosphor (Abb. 2.2.4c). Letztere werden meist für die Herstellung von HL-LEDs mit hoher Strahlungsflussausbeute verwendet (Taguchi, 2008, Krückeberg, 2007, Steigerwald et al., 2002).

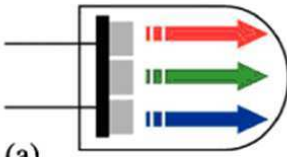
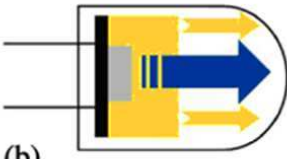
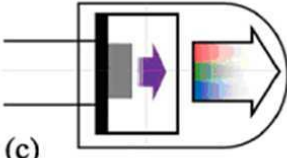
Aufbau von weißen LEDs	Charakteristiken
 <p>(a)</p>	<p><u>Multichip-Typ</u></p> <p>Kombination aus roten, grünen und roten LEDs (RGB-LEDs)</p>
 <p>(b)</p>	<p><u>Einzelchip-Typ</u></p> <p>Blaue LEDs + gelb fluoreszierenden Phosphor</p>
 <p>(c)</p>	<p><u>Einzelchip-Typ</u></p> <p>UV-LEDs + kombinierte Schicht aus rot, grün und blau fluoreszierenden Phosphor</p>

Abb. 2.2.4 Aufbau unterschiedlicher weißer LEDs. Abbildung verändert nach Taguchi, 2008.

Das Prinzip der UV-LEDs mit drei verschiedenen Phosphortypen ähnelt dem einer Leuchtstofflampe mit der Strahlungsemission in drei verschiedenen Wellenlängenbereichen. Die ultraviolette Strahlung wird in Strahlung im Wellenlängenbereich des VIS, durch die Lumineszenz der fluoreszierenden Substanzen, umgewandelt. Diese Technik ermöglicht weiße LEDs von höherer Qualität als die blauen LEDs mit gelb fluoreszierendem Phosphor (Blau/GFP-

Typ). Beide Einzelchip-Typen unterscheiden sich in ihrem physikalischen Prinzip, weiße Strahlung zu produzieren. Bei den Blau/GFP-Typen wird der Weißton jedoch sehr stark von Temperatur und Betriebsstromstärke beeinflusst. Die Charakteristika der Farbmischung, der LEDs, die durch UV-Strahlung weiße Strahlung produzieren (Abb. 2.2.4c), sind hingegen gleichmäßiger und stabiler (Taguchi, 2008).

2.2.2 Eigenschaften von Hochleistungs-LEDs

Ein großer Unterschied zu anderen Leuchtmitteln ist die spektrale Emissionscharakteristik (Abb. 2.2.5) farbiger HL-LEDs. Sie zeichnen sich durch ein schmalbandiges Strahlungsspektrum in Form einer Gauß-Verteilungskurve aus, mit einem Maximum bei einer bestimmten Wellenlänge (Peakwellenlänge).

Für den Betrieb von HL-LEDs in der Praxis sind weitere, zu berücksichtigende Eigenschaften zu nennen. HL-LEDs werden mit einer hohen Stromstärke betrieben, die bis zu 1 A betragen kann. Die für den Betrieb nötige Durchlassspannung liegt, je nach Halbleitermaterial, zwischen 1,2 V bei GaAs und bis zu 4 V bei InGaN. Der Strahlungsfluss einer LED wird über die Stromaufnahme, also über die Spannung und ihre Stromstärke, geregelt und ist durch die Maximaltemperatur des Halbleiters begrenzt (Krückeberg, 2007).

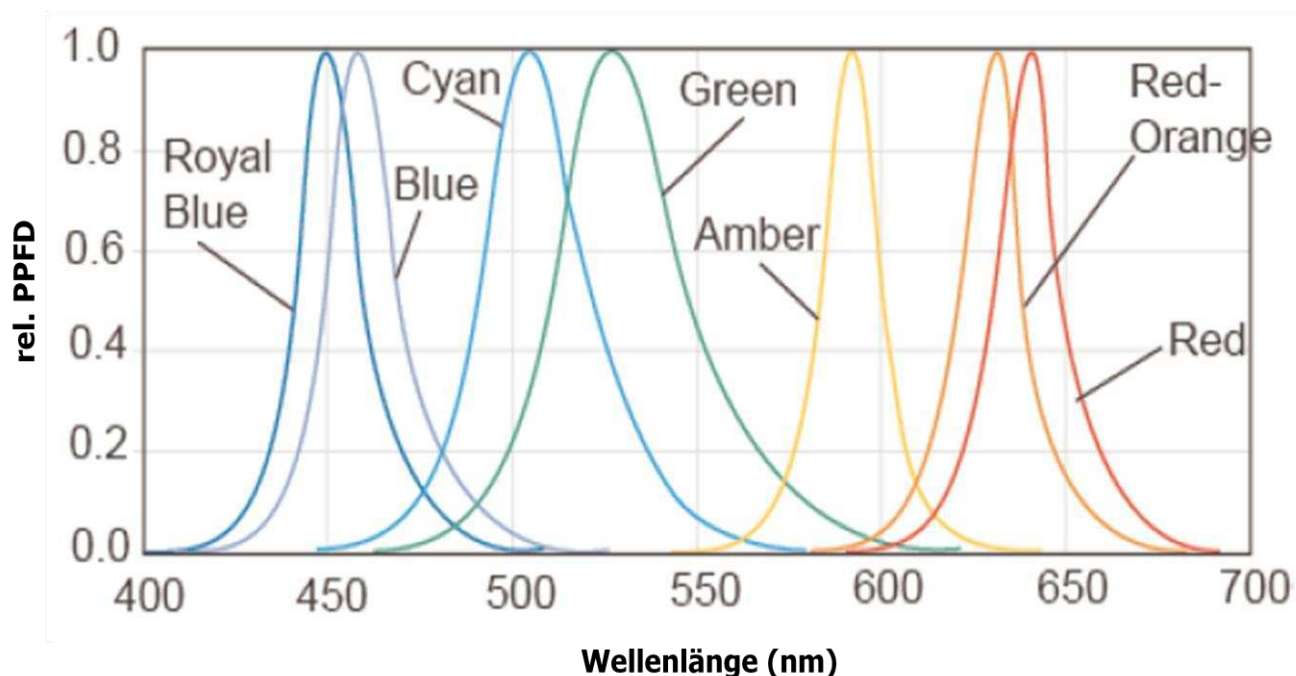


Abb. 2.2.5 Relative Strahlungsspektren unterschiedlicher HL-LED-Typen am Beispiel des Modells LUXEON® Rebel. Abbildung verändert nach Philips Datenblatt, 2008.

Die Temperatur des LED-Chips und die Betriebsstromstärke haben einen Einfluss auf den Strahlungsfluss einer HL-LED, was unter anderem den Datenblättern unterschiedlicher HL-LED Typen entnommen werden kann. Mit steigender Betriebsstromstärke nimmt der Strahlungsfluss zu. Dieser Zusammenhang ist unterproportional (Barta, 1992). Auch mit steigender Chiptemperatur nimmt der Strahlungsfluss von HL-LEDs ab. Der Einfluss der Betriebsstromstärke und der Chiptemperatur kann je nach LED-Modell und Typ unterschiedlich stark ausfallen (Arik et al., 2002; Philips Datenblatt, 2008). HL-LEDs zeigen beim Betrieb eine hohe Wärmentwicklung. Die überschüssige, am LED-Chip produzierte Wärme, also die Verlustleistung, wird nicht mit der Strahlung abgegeben, sondern an das Gehäuse übertragen und muss dann durch ein angepasstes Temperaturmanagement abgeführt werden (Krückeberg, 2007; Poikonen et al., 2010).

2.2.3 Technische Daten

Die Hersteller von HL-LEDs spezifizieren für ihre Produkte als Hauptcharakteristika den typischen Lichtstrom bei einer Betriebsstromstärke von 350 mA, den Abstrahlwinkel und die dominante Wellenlänge (Peak) oder bei weißen LEDs die Farbtemperatur (Agaphonov et al., 2000). In den Datenblättern der Hersteller sind teilweise auch Angaben über den minimalen und maximalen Lichtstrom, die Strahlungsspektren, den Einfluss der Chiptemperatur und der Betriebsstromstärke auf die Lichtausbeute (lm W^{-1}) zu finden (Agaphonov et al., 2000; Philips Datenblatt, 2008).

Die Angaben in den Datenblättern beziehen sich allerdings meist auf photometrische Größen, die nach der Empfindlichkeit des menschlichen Auges bewertet und nicht auf die radiometrischen Einheiten der Strahlungsphysik bezogen sind. Taguchi (2008) stuft die Lichtausbeute einer kaltweißen HL-LED, mit denen die höchsten Werte erreicht werden, bei 100 lm W^{-1} ein. Diese Angabe entspricht denen einiger LED-Hersteller von kommerziell erhältlichen, kaltweißen HL-LEDs (Philips Datenblatt, 2008; Cree Datenblatt, 2008).

2.2.4 Radiometrische Bewertung von HL-LEDs

Für die Erfassung einiger radiometrischer Größen, wie zum Beispiel des gesamten Strahlungsflusses einer Strahlungsquelle, ist ein Messsystem nötig, welches aus einem optischen System, einem Detektor und einer signalverarbeitenden Einheit (zum Beispiel einem Spektrometer) besteht. Die Ulbrichtkugel, auch „Integrationskugel“ oder „integrating sphere“ genannt, stellt solch ein optisches System dar und fungiert als optischer Diffuser. Sie erlaubt schnelle Messungen und wird üblicherweise, auch von LED-Herstellern, zur Bewertung von LEDs

verwendet. Die Messung mit einer Ulbrichtkugel ist ein integratives Verfahren, das die gesamte emittierte Strahlung einer Quelle gleichzeitig und winkelunabhängig erfassen kann (Poikonen et al., 2010; Hanselaer et al., 2009; Liu, 2008; Zong und Miller, 2004). Zur Gewährleistung einer guten Integrationsfähigkeit darf der Anteil der Öffnungsflächen in seiner Summe maximal 5 % an der Gesamtoberfläche ausmachen, um zunehmende Messfehler zu vermeiden (Goebel, 1967; Gigahertz-Optik, 2010).

Die Ulbrichtkugel ist eine Hohlkugel, die mit einer möglichst hoch diffus reflektierenden, inneren Beschichtung versehen ist (siehe dazu Abb. 4.1.1). Abhängig von den zu messenden Wellenlängenbereichen gibt es unterschiedliche Materialien für die innere Beschichtung. Für den Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 1100 nm (UV-VIS-NIR) eignet sich eine BaSO₄ Beschichtung, die einen Reflexionsgrad von über 96 % aufweisen kann und somit gut für Messungen im Bereich der PAR geeignet ist (Poikonen et al., 2010; Carr, 1997; Lot-Oriel, 2010a, 2010b). Die eintreffende Strahlung einer Strahlungsquelle wird in der Kugel durch diffuse Mehrfachreflexion gleichmäßig in der Kugel verteilt und es ergibt sich überall auf der Kugelinnenfläche die gleiche mittlere Bestrahlungsstärke, wenn eine direkte Bestrahlung der Kugelinnenfläche durch die Strahlungsquelle ausgeschlossen werden kann (Singer, C. et al., 2007; Nolting, 2006; Hovila et al., 2004).

2.3 Konventionelle In-vitro-Kultur

In der konventionellen In-vitro-Kultur wachsen die Pflanzen unter heterotrophen und photomixotrophen Bedingungen mit einer künstlich zugeführten Kohlenstoffquelle, meist Saccharose. Andere Methoden erlauben auch das Wachstum unter photomixotrophen Bedingungen, unter denen neben einer künstlich zugeführten Kohlenstoffquelle die Pflanze auch photosynthetisch aktiv ist. Bei der photoautotrophen Kultur wird auf jegliche Addition von Zucker verzichtet (Kozai et al., 1997; Roitsch und Sinha, 2002). Im Folgenden wird nur die Kultivierung unter photomixotrophen Bedingungen berücksichtigt.

Die In-vitro-Kultivierung ist in unterschiedliche Wachstumsphasen eingeteilt. Nach der Präparation einer Mutterpflanze unter sterilen Bedingungen (Phase 0) wird eine sterile Kultur etabliert (Phase 1). Die folgende Wachstumsphase beinhaltet die Induktion von Meristemen, die Knospenentwicklung und eine schnelle Pflanzenvermehrung (Phase 2). Die Entwicklung des Sprosses und die Produktion uniformer Pflanzen (Phase 3a) folgen vor der Bewurzelung und der Akklimatisierung ex vitro, also im Gewächshaus und meistens als Substratkultur (Phase 3b) (Debergh und Maene, 1981; Fuljahn, 2010). Die allgemein eingesetzte und bewährte Methode der vegetativen Vermehrung genetisch identischer Pflanzen in vitro ist die Vermehrung über Sprosse oder Achselknospen auf festem Medium (Debergh und Vanderschaeghe, 1996). Bei der Sprossvermehrung dienen neu gebildete Sprosse als Basis für die erneute Vermehrung (George et al., 2008). Die vermehrten Sprosse werden im letzten Schritt bewurzelt und akklimatisiert, wobei die Bewurzelung je nach Kultur in vitro, meist durch Anpassung der Medienkomposition, durchgeführt wird, oder erst während der Akklimatisierung im Gewächshaus mit Substratkultur.

Als Voraussetzungen für eine kommerzielle Nutzbarkeit der In-vitro-Vermehrung gelten unter anderem eine hohe Vermehrungsrate, die einfache Handhabbarkeit der Pflanzen und hohe Überlebensraten bei der Akklimatisierung. Auch die Produktionskosten, welche zum größten Teil durch die Arbeitskosten und die Energiekosten zur Belichtung der Kulturen entstehen, sind für eine lohnenswerte Vermehrung gegenüber der konventionellen vegetativen Vermehrung zu berücksichtigen.

Die photomixotroph wachsenden Pflanzen werden unter konstanten Bedingungen in Kulturgefäßen kultiviert und entwickeln sich dadurch in einer unnatürlichen und dauerhaft nachteiligen Umgebung, wodurch sie trotz konstanter Bedingungen permanentem Stress ausgesetzt sind, welche zur Bildung einer abnormen Morphologie und Physiologie der Pflanzen führen kann (Aitken-Christie et al., 1995; Desjardins, 2009). Die Pflanzen bilden dabei negative

Charakteristika aus, die unter Gewächshausbedingungen nicht auftreten würden. Dies kann sich zum Beispiel in einer niedrigen Photosyntheseeffizienz, einer Fehlfunktion der Stomata und einer deutlichen Reduktion des kutikulären Wachses, Hyperhydrizität und Bildung volatiler Stoffe wie Ethylen in den Kulturgefäßen äußern. Die Akklimatisierung der Pflanzen mit dem Transfer ins Gewächshaus ist ein kritischer Schritt bei der In-vitro-Kultur, von dem letztendlich auch eine mögliche kommerzielle Nutzung abhängt (Hazarika, 2006).

2.3.1 Kommerzielle In-vitro-Kulturen

Die In-vitro-Kultur nimmt in der Vermehrung von Pflanzen im Gartenbau einen hohen Stellenwert ein. Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, stieg die Anzahl in vitro vermehrter Pflanzen in den letzten Jahren stark an, wobei die Vermehrung der Gattung *Phalaenopsis* mit Abstand den größten Anteil darstellt. Unter den weiteren Kulturen befinden sich Stauden, Gehölze, andere mehrjährige Pflanzen, sowie Aquarienpflanzen (Winkelmann et al., 2006). Eine genaue aktuelle Anzahl vermehrter *Phalaenopsis* in Deutschland ist nicht bekannt, da in den Statistiken nicht aus allen Betrieben die Zahlen beinhaltet sind. Es kann also von einer wesentlich höheren Anzahl vermehrter *Phalaenopsis* in Deutschland ausgegangen werden.

Neben der Gattung *Phalaenopsis* werden noch *Gentiana*, *Fragaria*, *Rubus*, *Anthurium* und *Helleborus* mit über einer Millionen Pflanzen pro Jahr produziert. Vor allen bei den Zierpflanzen aus der Gattung *Gentiana* und *Helleborus* konnte ein starker Anstieg der produzierten Pflanzen erst in den letzten Jahren beobachtet werden. Unter den Gehölzen wurde nur die Gattung *Prunus* im Jahr 2008 noch mit einer Anzahl von über einer halben Millionen Pflanzen produziert. Ansonsten sind bei den Gehölzen rückläufige Zahlen vermerkt. Ein sehr starker Anstieg produzierter Pflanzen konnte bei der Pflanzenkategorie Beerenobst mit der Gattung *Rubus*, zu denen die Brombeeren und Himbeeren gehören, beobachtet werden. Dabei stieg die Pflanzenanzahl im Jahr 2008 alleine gegenüber dem Vorjahr um 67,8 % (ADIVK Aktuell, 2009).

2.3.2 Kulturraum

Sowohl für die wissenschaftliche als auch für die kommerzielle Nutzung von In-vitro-Kulturen ist ein Kulturraum, in dem unter anderem Temperatur und PAR reguliert werden können, notwendig. Kulturräume werden üblicherweise genutzt, um die Variation der Umweltbedingungen zu minimieren. Die Kammer ist von äußerlichen Einflüssen weitestgehend unbeeinflusst. In ihr befinden sich Regale in einer Anordnung hoher Raumausnutzung. Die Etagenabstände in den Regalen werden möglichst gering gehalten und liegen meist zwischen

30 cm und 50 cm. Je nach Regalsystem stehen unterschiedliche Kulturflächen in den einzelnen Etagen zur Verfügung (Pierik, 1997; Cummings et al., 2007).

Die relative Luftfeuchtigkeit in Kulturräumen liegt ohne Kühlung bei circa 70 %. Durch eine Kühlanlage kann sie auf ein niedrigeres Niveau gesenkt werden. Eine niedrige relative Luftfeuchtigkeit im Kulturraum kann zum Austrocknen des Mediums in den Kulturgefäßen führen, weshalb teilweise Luftbefeuchter in den Kulturräumen eingesetzt werden (George et al., 2008, pp. 439). Dabei kann nach Pierik (1997) eine zu hohe relative Luftfeuchtigkeit in der Kulturkammer zu einer erhöhten Anzahl an Infektionen führen. Auch die relative Luftfeuchtigkeit in den Kulturgefäßen wird durch räumliche Unterschiede des Wasserpotentials innerhalb und außerhalb der Kulturgefäße beeinflusst (Kozai, 1997).

2.3.3 Wachstumsfaktoren

Die photomixotrophe In-vitro-Kultur wird durch unterschiedliche Wachstumsfaktoren beeinflusst. Wichtige Faktoren sind zum Beispiel Strahlung, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Medienkomposition und die Atmosphäre im Kulturgefäß. Der Einfluss der Strahlung wird in einem separaten Kapitel behandelt (Kapitel 2.3.4)

Die **Temperatur** in den Kulturräumen zur In-vitro-Vermehrung wird üblicherweise konstant gehalten und ist meist 3 °C bis 4 °C höher als die optimale Temperatur der jeweiligen In-vivo-Kultur im Gewächshaus. (Pierik, 1997). Je nach Kultur liegen die Temperaturansprüche zwischen 16 °C für *Helleborus niger* (Seyring, 2002) und bis 32 °C für tropische und subtropische Kulturen, wobei die mittlere konstante Raumtemperatur bei dem überwiegenden Teil wissenschaftlicher Veröffentlichungen bei 25 °C liegt (George et al., 2008).

Die **relative Luftfeuchtigkeit** (rF) in den Kulturgefäßen ist abhängig von der Lufttemperatur und der Temperatur des Mediums. Bei gleicher Temperatur der Luft und des Mediums in einem geschlossenen Kulturgefäß, kann von einer rF von 98-99,5 % ausgegangen werden, wodurch es auch zu einer erhöhten Kondensation an den Gefäßwänden und -deckelunterseiten kommen kann (George et al., 2008). Eine schlechte Pflanzenentwicklung und eine Störung physiologischer und morphologischer Strukturen sind teilweise auf die sehr hohe rF zurückzuführen (Hazarika, 2006; Kozai, 1997; Schloupf et al., 1995; Sciutti und Morini, 1995).

Die geschlossenen Kulturgefäße wurden hauptsächlich konzipiert, um Kontaminierungen vorzubeugen, wodurch der Gasaustausch zwischen dem Kulturgefäß und Kulturraum stark eingeschränkt wird und so eine annähernd geschlossene Atmosphäre entsteht. Die

Atmosphäre im Kulturgefäß ist nur schwer zu beeinflussen. Der überwiegende Teil des Austausches von Gasen, wie Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf entsteht durch Diffusion durch das Bechermaterial (Jackson et al., 1991; Nguyen und Kozai, 1998). Die Hauptquelle für den Kohlenstoff stellt der Zucker im Medium dar, der durch die Pflanze aufgenommen und unter Sauerstoffverbrauch veratmet wird (Nguyen und Kozai, 1998). Eine hohe CO₂-Konzentration kann zu einer unterdrückten CO₂-Fixierung führen (Van Huylbroeck et al., 1998). Die starken Schwankungen der CO₂-Konzentration beeinflussen auch die O₂-Konzentration in den Gefäßen, so dass diese im Bereich von 18 bis 23 % liegen können (Fujiwara und Kozai, 1995). Dabei wurde gerade eine stark reduzierte O₂-Konzentration von 21 % auf 3 % am Beispiel *Solanum tuberosum* L. 'Bintje' als förderlich beschrieben (Buddendorf-Joosten und Woltering, 1996). Es wird vermutet, dass Ethylen (C₂H₄) auf alle Aspekte des Wachstum und der Entwicklung in Pflanzen, auch auf das Wachstum und die Entwicklung von Geweben in In-vitro-Kultursystemen, als einziges gasförmiges Phytohormon einen Einfluss ausübt. Ethylen, welches durch Pflanzen produziert wird, akkumuliert je nach Pflanzenart in unterschiedlichen und teils hohen Konzentrationen in den Kulturgefäßen und kann zu nachteiligen Effekten für die Pflanzen führen (Buddendorf-Joosten und Woltering, 1996; Biddington, 1992).

Ein **Medium** für die In-vitro-Kultur kann nach George et al. (2008) im Wesentlichen aus folgenden Komponenten bestehen: Makro- und Mikronährstoffe, Zucker, Pflanzenwachstumsregulatoren (Phytohormone), Vitamine und einem Festigungsmittel sowie Aminosäuren und Stickstoffzusätzen oder undefinierten Zusätzen (zum Beispiel Kokosnusmilch oder Bananenmus) (Roitsch und Sinha, 2002; Ebrahim und Ibrahim, 2000; Pierik, 1997; George und Sherrington, 1984). Bei der Sprossvermehrung wird die optimale Wachstumsrate durch die Wahl des Mediums bestimmt, das für die jeweils verwendete Pflanzenart geeignet ist. Durch die Verwendung von Medium wird eine Kultivierung unter aseptischen Bedingungen notwendig, da es auch als Nährboden für pflanzenpathogene Pilze und Bakterien dienen kann (Debergh und Vanderschaeghe, 1990). Eben genannte Faktoren, wie Licht, Temperatur, CO₂, etc. können einen Effekt auf bestimmte Medienbestandteile, wie zum Beispiel die Konzentrationen an Phytohormonen haben. Der pH-Wert hingegen kann die Verfügbarkeit der Nährstoffe beeinflussen (Ebrahim und Ibrahim, 2000; Nguyen und Kozai, 1998; Williams et al., 1990). Im Gegensatz zum photoautotrophen Wachstum benötigt das photomixotrophe Wachstum im Medium Zucker als Kohlenstoffquelle im Medium. Als gängigste Kohlenstoffquelle wird Saccharose verwendet, deren hohe Konzentrationen im Medium auch zu Problemen führen können (Desjardins, 2009; George et al., 2008; Debergh und Vanderschaeghe, 1990).

2.3.4 Einflussfaktor Strahlung

Das Pflanzenwachstum und die Entwicklung der Pflanze wird durch die Dauer der Belichtung, die Photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD) und die Strahlungsqualität beeinflusst (Dewir et al., 2006; Taiz und Zeiger, 2002; Pierik, 1997).

Im Prinzip ist die **Belichtungsdauer** (Photoperiode) von In-vitro-Kulturen in etwa dieselbe wie die von intakten Pflanzen derselben Kultur (Pierik, 1997). Da die konventionelle Belichtung mit Leuchtstofflampen einen hohen Kostenfaktor in einem In-vitro-Labor darstellt, kann die Verkürzung der Belichtungsdauer einen hohen Beitrag zur Kostenreduzierung leisten (Jao und Fang, 2004). Unabhängig von der Energieeinsparung beeinflusst die Photoperiode diverse Entwicklungsprozesse der Pflanze, wie zum Beispiel die Bewurzelung, die Sprossstreckung, die Knollenbildung, die Keimung, die Blüteninduktion und die Stomataregulierung (Jo et al., 2008; Heo et al., 2003). Bei zahlreichen Untersuchungen zeigte sich eine artspezifische Reaktion auf veränderte Photoperioden. Einige Pflanzenarten profitieren von längeren, andere Arten von kürzeren Perioden, weitere Arten sind hingegen indifferent (Jo et al., 2008; Morini und Perrone, 2006). Auch die Änderung des Belichtungszyklus kann zu einer Förderung des Pflanzenwachstums beitragen. Morini et al. berichteten bereits 1991 über eine erhöhte Biomasseakkumulation in vitro kultivierter Wurzelstöcke einiger Obstbäume bei einem 4/2 Belichtungszyklus (4 Stunden Belichtung gefolgt von 2 Stunden Dunkelheit) gegenüber der gewöhnlich genutzten 16/8. Auch konnten kürzere Licht-Dunkel-Perioden bei Wurzelstöcken von Obstbäumen zu einer höheren Wurzelanzahl und Wurzellänge führen (Morini und Perrone, 2006). Die Sprossvermehrung konnte ebenfalls bei *Prunus persica* durch eine verkürzte Licht-Dunkel-Periode verbessert werden (Zimmerman und Scorza, 1994).

Die Einheiten, die für die Intensität der Belichtung in der Literatur zu finden sind, variieren stark. Es werden Beleuchtungsstärke, Bestrahlungsstärke und **Photosynthetische Photonenflussdichte** (PPFD) (Kapitel 2.1) angegeben, wobei aktuellere Veröffentlichungen die PPFD, immer seltener die Bestrahlungsstärke und die Beleuchtungsstärke nicht mehr verwenden. Viele Kulturen reagieren, gerade in der In-vitro-Kultur, empfindlich auf eine hohe PPFD. Über einen generell empfohlenen Wert kann nur schwer eine Aussage getroffen werden. Die Angaben für eine optimale Pflanzenentwicklung sind artspezifisch und können abhängig von der Wachstumsphase sein. Für In-vitro-Kulturen mit niedrigen benötigten PPFD liegen die Werte für die Vermehrung und die Sprossbildung oft zwischen $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Jo et al., 2008; Lee et al., 2007; Pierik, 1997). Eine niedrigere PPFD mit Werten von $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ werden für die Lagerung von Kulturen bei sehr geringen Temperaturen

angegeben (George et al., 2008; Kubota und Kozai, 1995). In vitro kultivierte Pflanzen wachsen unter einer viel niedrigeren PPFD als dieselben Kulturen unter Gewächshausbedingungen. Dies kann teilweise zu negativen Charakteristika der Pflanzen führen und auch die Akklimatisierungsphase erschweren. Dabei kann ein PPFD-Überschuss in der In-vitro-Kultur zu einer Depression der photosynthetischen Effizienz führen. An hohe PPFD adaptierte Pflanzen sind zum Beispiel nicht so anfällig für eine Photoinhibition wie solche, die unter niedrigen PPFD gewachsen sind (Osmond, 1994; Lee et al., 2007). Eine geringe PPFD führt zu einer qualitativen und quantitativen Veränderung der Stomata, bei der die Stomataanzahl abnimmt und die Länge und Breite der Stomata zunehmen kann (Lee et al., 2007).

Neben anderen Wachstumsfaktoren kann die **Strahlungsqualität** die Physiologie und die Morphologie beeinflussen, wie zum Beispiel das Streckungswachstum, die Bildung von Achselsprossen, die Blattanatomie, die Chlorophyll- und Photosynthese, aber auch die Wurzelinduktion (Nhut und Nam, 2010; Lee et al., 2007; Tennessen et al, 1994). Inwiefern die Pflanzen beeinflusst werden, ist wiederum artspezifisch und nicht zu verallgemeinern (Morrow, 2008; Kim et al., 2004a). Die Wahl des Leuchtmittels zur Belichtung der Kulturen hat einen Einfluss auf die Entwicklung der Pflanzen. Überwiegend werden in der konventionellen In-vitro-Kultur Leuchtstofflampen eingesetzt (Kapitel 2.3.5), einige Labore arbeiten mit Metallhalogendampf-, Natriumdampf- oder Glühlampen (Shin et al., 2008). Bei Leuchtstofflampen gibt es qualitative Unterschiede. Es werden unter anderem warmweiße und kaltweiße Leuchtstofflampen unterschieden, die bereits verschiedene Auswirkungen auf das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen haben können und der Kultur entsprechend ausgewählt werden müssen (Pierik, 1997). Es sind auch spezielle Leuchtstofflampen für das Pflanzenwachstum auf dem Markt, welche im Vergleich zu herkömmlichen kaltweißen Leuchtstofflampen gesündere und hochwertigere Pflanzen hervorbringen können, was laut Somsri et al. (2010) auf eine höhere Vermehrungsrate und eine kräftigere Blattfarbe zurückzuführen ist.

2.3.5 Konventionelle Belichtungssysteme

Die Belichtung ist, im Gegensatz zu beispielsweise der Temperatur, ein Wachstumsfaktor, der in einer relativ kleinen Einheit im Kulturraum (Regal oder Regaletage) gesteuert werden kann. Konventionell werden überwiegend Leuchtstofflampen zur Belichtung der In-vitro-Kulturen in Kulturkammern verwendet (George et al., 2008). Dabei sollten die Vorschaltgeräte außerhalb der Kammer angebracht werden. Jede überschüssige Wärme, die im Raum entsteht, muss aus der Kulturkammer über eine Kühlung abgeführt werden. Ein hoher Energieaufwand ist dafür

notwendig. Daher wurden zum Beispiel Regelstrategien für die Belichtung entwickelt, welche den Energiebedarf für das Heizen und Kühlen auf ein Minimum reduzieren. Eine Möglichkeit besteht darin abwechselnd immer nur eine Hälfte des Kulturraums zu belichten (Pierik, 1997). Um höhere PPFD zu erzielen werden teilweise auch Metallhalogen-, Natriumhochdruckdampflampen und Glühlampen in den Kulturräumen eingesetzt (Kim et al., 2004b).

Die Leuchten werden meist unter den Regalböden, also über der Kultur angebracht. Dies erfordert eine gute Ventilation, um eine lokal starke Temperaturerhöhung und einen großen Temperaturgradienten in den Regalen zu verhindern. Eine weitere Methode der Installation der Leuchten ist eine zentrale Anordnung zwischen den Regaletagen. Der Vorteil liegt in einer guten Abfuhr der durch die Belichtung entstehenden Verlustleistung in Form von Wärme, da die Leuchten nicht direkt über den Kulturen angeordnet sind. Dabei werden die äußeren Randzonen der Regaletagen stärker belichtet als die innere Etagenfläche. Eine gleichmäßigere Verteilung der Strahlung auf der zu belichtenden Fläche ist gewährleistet, wenn die Leuchten unter den Regalböden angebracht sind. In beiden Varianten weisen die Kulturgefäße mit dem geringsten Abstand zur Strahlungsquelle die höchsten Gefäßinnentemperaturen auf (Pierik, 1997).

Die Anordnung der Leuchten unter der Regaletage führt zusätzlich zu einer Temperaturerhöhung des Etagenbodens auf dem die Kulturgefäße stehen. Dadurch entstehen hohe relative Luftfeuchten in den Gefäßen und eine starke Kondensation an den Gefäßdeckeln und -seiten. Eine reduzierte relative Luftfeuchte kann durch das Kühlen der Etagenböden, dem sogenannten „Bottom Cooling“ erreicht werden. Dazu befinden sich in oder unter den Etagenböden Wasserkühlsysteme, welche zu einer Abkühlung des Gefäßbodens führen. Durch die Verlustwärme der meist unter den Etagenböden angebrachten Leuchten überschreitet die Temperatur des Mediums die Lufttemperatur im Gefäß und es kommt fast zu einer vollständigen Sättigung. Unter solchen Bedingungen erreicht der obere Teil der Kulturgefäße die Taupunkttemperatur und der Wasserdampf kondensiert an den Gefäßwänden und -deckelunterseiten. Dadurch kann auch eine Austrocknung des Mediums verhindert werden (George et al., 2008, Saher et al., 2005; Vanderschaeghe und Debergh, 1987).

2.4 Einfluss der Strahlung auf die Pflanze

Die Strahlung im Wellenlängenbereich der Photosynthetisch Aktiven Strahlung (PAR) ist für die Pflanzen als Energielieferant für die Photosynthese wichtig. Zur Aufnahme der für die Photosynthese benötigten Strahlungsenergie verwenden die Pflanzen Photosynthesepigmente. Neben der wichtigen Funktion als Energiequelle beeinflusst die Strahlung auch viele Aspekte der Pflanzenentwicklung und des Pflanzenwachstums (Nishio, 2000). Strahlung fungiert als wichtiger Signalgeber, kann die Pflanzenentwicklung stimulieren und die Biosynthese von Zellkomponenten und die Genexpression über den gesamten Lebenszyklus der Pflanze hinweg beeinflussen (Wu et al., 2007; Batschauer, 1998).

2.4.1 Photosynthesepigmente

Photosynthesepigmente sind Farbstoffe, die elektromagnetische Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich absorbieren (Hine und Martin, 2004). Die wichtigsten Pigmentgruppen höherer Pflanzen, die an der Absorption der Strahlung beteiligt sind, bilden die Chlorophylle und Karotinoide. Beide Pigmentgruppen sind in der Thylakoidmembran der Chloroplasten angesiedelt (Nishio, 2000; Raven et al., 2000).

Das Hauptpigment bei höheren Pflanzen ist das Chlorophyll *a*. „Chlorophyllmoleküle haben die Fähigkeit, absorbierte Strahlungsenergie auf andere Moleküle zu übertragen sowie andererseits von anderen Molekülen die durch Strahlung vermittelte Anregungsenergie zu übernehmen.“ (Sitte et al., 1998, S. 230). Das Chlorophyll *b* ist nicht direkt an der photosynthetischen Energieübertragung beteiligt, sondern überträgt seine Anregungsenergie auf das Chlorophyll *a* und wird deshalb auch als akzessorisches Pigment bezeichnet. Die akzessorischen Pigmente erweitern das Absorptionsspektrum des Chlorophyll *a* und somit auch das Wirkungsspektrum der Photosynthese. Damit verengen sie die Grünlücke im Absorptionsspektrum des Chlorophyll *a*. Das Wirkungsspektrum der Photosynthese erstreckt sich über den roten Wellenlängenbereich, mit einem Peak bei circa 660 nm, und über den blauen Bereich, mit einem Peak bei circa 430 nm (Sitte et al., 1998; Raven et al., 2000). Nach Angaben von Rajapakse und Shahak (2007) können die Photosyntheseleistung und die gesamte Produktivität von gartenbaulich genutzten Kulturen, durch eine Steigerung des Strahlungsanteils im roten und blauen Wellenlängenbereich, erhöht werden.

Karotinoide sind gelb, orange oder rot gefärbte lipophile Farbstoffe. Zu ihnen zählen unter anderen Karotine und Xanthophylle (Sitte et al., 1998). Auch Karotinoide sind akzessorische Pigmente, welche ihre Anregungsenergie erst auf das Chlorophyll *a* übertragen. Sie fungieren

darüber hinaus als Antioxidantien und schützen die Chlorophyllmoleküle vor einer photooxidativen Schädigung, wodurch sie die Photosynthese in Anwesenheit von Sauerstoff ermöglichen (Raven et al., 2000).

2.4.2 Photorezeptoren

Pflanzen besitzen eine Reihe an Photorezeptoren, die der Pflanze zur Wahrnehmung der Strahlungsqualität und -intensität sowie der temporären und räumlichen Variation der auf sie eintreffenden Strahlung über einen großen Wellenlängenbereich dienen (Whitelam und Halliday, 2007). Die durch Strahlung regulierte Signaltransduktion wird durch ein komplexes molekulares Netzwerk vermittelt. Dabei können einzelne oder mehrere Photorezeptoren unterschiedliche Signalkaskaden einleiten, die sich teilweise, wie auch die Aktionsspektren der Photorezeptoren, überschneiden. Die bekannten Klassen an Photorezeptoren sind die Phytochrome, Cryptochrome, Phototropine und andere LOV enthaltende Proteine. LOV-Domänen sind spezifische photosensorische Module in den Proteinen (Christie, 2007). Des Weiteren sind bisher nicht identifizierte Photorezeptoren bekannt, die elektromagnetische Strahlung im UV-B und grünem Wellenlängenbereich absorbieren. Die strahleninduzierte Signaltransduktion beginnt mit der Perzeption der Strahlung durch die Photorezeptoren und endet mit der Regulierung einer Genexpression. In der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* wird den Photorezeptoren die Regulierung von über 2500 Genen zugeschrieben (Gyula et al., 2003; Devlin et al., 2007).

Bei den **Phytochromen** gibt es mehrere Formen, die sich in ihren maximalen Absorptionswellenlängen unterscheiden. Sie sind fähig Strahlung im Bereich von 300 bis 800 nm zu detektieren. Dieses Pigmentsystem besteht aus zwei ineinander konvertierbaren Formen. Die maximale Empfindlichkeit liegt bei einer der Formen des Phytochroms (Pr) im roten Wellenlängenbereich zwischen 600 nm bis 700 nm und bei der zweiten Form (Pfr) im dunkelroten Wellenlängenbereich zwischen 700 nm und 800 nm (Rajapakse und Shahak, 2007). Weiterhin dienen Phytochrome den Pflanzen zur Wahrnehmung der Tageslänge und zur Steuerung der Internodienstreckung bei Sämlingen (Devlin et al., 1998; Lin, 2000). Es wird auch vermutet, dass Phytochrome in Pflanzen unter anderem als Proteinkinasen wirken können (Batschauer, 1998).

Cryptochrome absorbieren die Strahlung im blauen Wellenlängenbereich und im Bereich des UV-A (Devlin et al., 2007). Zusammen mit den Phytochromen regulieren Cryptochrome die Blütezeit, registrieren die Dauer der Strahlung und gewährleisten die Feinabstimmung der inneren Uhr (Somers et al., 1998). Somit tragen sie zum tageslängenabhängigen Blühen bei

(Lin and Shalitin, 2003). Außerdem sind sie auch in die Regulation der Zellstreckung involviert (Briggs und Huala, 1999).

Phototropine sind ebenfalls blausensitive Rezeptoren. Ihnen wird eine regulierende Funktion bei der Blattpositionierung, dem Öffnen der Stomata und beim Wachstum von Sämlingen zugesprochen (Devlin et al., 2007). Generell wirken sie an der Kontrolle und Regulierung einer Reihe von Prozessen mit, die zur Optimierung der Photosyntheseeffizienz beitragen und das Pflanzenwachstum fördern (Christie, 2007). Dazu werden unter anderem die Kontrolle des Tropismus von Spross und Wurzel und die Bewegung der Chloroplasten gezählt (Gyula et al., 2003).

Eine weitere Klasse an Photorezeptoren bilden Proteine der Familie ZTL/ADO (Zeitlupe/Adagio) mit einer LOV-Domäne (**LOV-enthaltende Proteine**), also Proteine mit spezifischen photosensorischen Modulen. Die Proteine der ZTL/ADO Familie spielen eine Rolle beim gezielten Abbau von Komponenten, welche die Funktion der inneren Uhr und die Blütezeit regulieren (Christie, 2007).

Es gibt ebenfalls Photorezeptoren im grün-gelben Wellenlängenbereich (500 nm bis 600 nm), die bisher auf molekularer Ebene noch nicht identifiziert werden konnten. Bis heute wurde den Grünrezeptoren nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt, da Pflanzen grüne Strahlung zu einem großen Teil reflektieren oder durch Transmission durchlassen. Ihnen wurde deshalb wenig Bedeutung bei der Kontrolle des Pflanzenwachstums zugemessen. Durch sich überschneidende Absorptionsbereiche auch im grünen Wellenlängenbereich ist eine differenzierte Betrachtung der Wirkungen von Grünrezeptoren nur anhand von Photorezeptormutanten oder durch sehr schmalbandige Strahlungsquellen zu erreichen (Devlin et al., 2007). Ein regulierender Einfluss auf diverse Pflanzenreaktionen durch grüne Strahlung konnte bereits aufgezeigt werden (Bouly et al., 2007). Weiterhin ist bekannt, dass ein Photorezeptor zur Absorption im Wellenlängenbereich des UV-B vorhanden ist, auch wenn dieses Molekül ebenfalls bisher nicht identifiziert werden konnte (Gyula et al., 2003). Dieser reguliert beispielsweise die Bildung von Pigmenten, welche die Pflanzen vor der UV-Strahlung schützen (Batschauer, 1998).

2.4.3 Reaktionen auf unterschiedliche Strahlungsqualitäten

Schon seit Längerem werden Versuche mit unterschiedlichen Strahlungsqualitäten durchgeführt, früher allerdings nur mit breitbandigen Leuchtmitteln, die mit Filtern oder Farbfolien kombiniert wurden. Deswegen konnten Effekte durch andere Wellenlängenbereiche als den zu untersuchenden nicht immer ausgeschlossen werden. LEDs bieten die Möglichkeit der

Belichtung mit schmalbandigen Strahlungsspektren und eignen sich daher gut für pflanzenbauliche Untersuchungen. In Kombination mit gentechnischen Methoden können mit Hilfe von LEDs die Reaktionen auf unterschiedliche Strahlungsqualitäten von Pflanzen erforscht werden (Nhut und Nam, 2010). Dabei wurden die Pflanzenreaktionen auf spezifische spektrale Wellenlängenbereiche, durch die Verwendung eines einzelnen LED-Typs zur Pflanzenbelichtung, ebenso untersucht wie die Reaktion auf die Kombination unterschiedlicher Wellenlängenbereiche.

2.4.3.1 Spezifische spektrale Wellenlängenbereiche

Untersuchungen zur Wirkung der **UV-Strahlung** auf Pflanzen sind nicht so intensiv durchgeführt worden, wie Versuche mit Strahlung anderer Wellenlängenbereiche und weisen zum Teil unterschiedliche Schlussfolgerungen auf. Brazaityte et al. (2009) empfehlen UV-A bei der Kultivierung der Gurkenhybride `Mandy F1` unter künstlicher Belichtung wegen eines gehemmten Wachstums zu vermeiden. Hingegen konnte kein sichtbarer Einfluss einer zusätzlichen UV-A-Strahlung auf Wachstumsparameter (Pflanzengröße, Trockenmassegehalt) von Fuchsien- und Rosen-Hybriden erfasst werden. Der UV-A-Strahlung wird ein mildernder Effekt der schädigenden Wirkung des UV-B zugesprochen, da durch diese die Bildung von UV-abschirmenden Verbindungen und antioxidativen Pigmenten, wie zum Beispiel Flavonoiden induziert wird. Diese haben nicht nur die Fähigkeit Gewebe durch die UV-Absorption zu schützen, sondern auch reaktiven Sauerstoff einzufangen (Helsper et al, 2003). UV-A-Strahlung konnte ebenso wie blaue Strahlung bei in vitro kultivierten Kopfstecklingen von Apfelunterlagen die Knospenbildung fördern, ohne die Apikaldominanz zu beeinflussen (Muleo und Morini, 2006).

Die Belichtung im **blauen Wellenlängenbereich des Strahlungsspektrums** ist unter anderem wichtig für die Entwicklung von Chloroplasten und fördert die Bildung photosynthetischer Pigmente, vor allem Chlorophyll (Senger, 1982; Wu et al., 2007). Die in vitro kultivierte Weinrebe *Vitis ficifolia* var. `Ganebu` und der Pfirsich *Pisum sativum* reagierten mit höheren Chlorophyllgehalten im Vergleich zu einer reinen roten Belichtung, einer Leuchtstofflampenbelichtung, oder im Fall des Pfirsichs einer kaltweißen LED-Belichtung (Poudel et al., 2008). In einem ähnlichen Vergleich konnte eine gesteigerte Photosynthesekapazität von Orchideen (Miyashita et al., 1997) und der Hängebirke *Betula pendula* `Roth` durch blaue Strahlung erzielt werden (Saebo et al., 1995). Auch ein gesteigerter Karotinoidgehalt konnte neben dem Chlorophyllgehalt bei *Euphorbia millii* beobachtet werden, ebenso wie eine Förderung der Blütenbildung (Dewir et al., 2006). Die Reaktionen der Pflanzen auf eine blaue

Belichtung scheinen nicht immer gleich und von der Pflanzenart abhängig zu sein. Bei in vitro kultivierten Chrysanthenen (*Dendranthema grandiflorum* 'Kitam Cheonsu') fanden Kim et al. (2004) eine recht niedrige Photosyntheserate unter einer rein blauen LED-Belichtung.

Neben der Bedeutung der blauen Strahlung für den Photosyntheseapparat ist eine Wirkung auf die Stomatabewegung, also das Öffnen und Schließen der Stomata, bekannt sowie auf die Stomatadichte (Talbot et al., 2002; Kasahara et al., 2002; Heo et al., 2002). Zu den weiteren möglichen Reaktionen gehören eine gehemmte Hypokotyl- und Sprossstreckung (Kurilcik et al., 2008; Talbot et al., 2002; Batschauer, 1998; Appelgren, 1991). Auch eine erhöhte Sprossverzweigung bei *Prunus cerasifera* (Muleo et al., 2001) und eine erhöhte Sprossbildung bei der *Vitis*-Hybride 'Remaily Seedless', offenbar verursacht durch eine durch blau induzierte Inhibition der Apikaldominanz, konnte gezeigt werden. Im Gegensatz zu einer Belichtung mit roten LEDs konnte ein Einfluss von Blau auf den Phototropismus an der Weinreben-Hybride nachgewiesen werden (Chée, 1986). Auch ein inhibierender Einfluss auf die Wurzelbildung konnte anhand mehrerer Pflanzenarten belegt werden (Kurilcik et al., 2008; Moon et al., 2006; Tanaka et al., 1992).

Viele Pflanzenarten zeigen eine unterschiedliche, aber teilweise auch hohe Absorption im **grünen Wellenlängenbereich** des Strahlungsspektrums. Diese Strahlung kann neben der stärker absorbierten blauen und roten Strahlung auch von der Pflanze genutzt werden und stellt eine wichtige Energiequelle dar (Nishio, 2000). Die Relevanz der grünen Strahlung wurde dadurch bestärkt, dass Pflanzen Umgebungen mit erhöhtem Anteil grüner Strahlung, zum Beispiel Epiphyten unter einem Baumkronendach, ausgesetzt sein können. Die Beschattung durch das Baumkronendach führt zu einer insgesamt geringeren PPFD für die darunter liegenden Pflanzen, einer Verlagerung des Strahlungsspektrums in das Dunkelrote und NIR sowie einem erhöhten Grünanteil im Vergleich zu dem Anteil an hellroter und blauer Strahlung (Folta und Maruhnich, 2007). Es wird aber ein zusätzliches System von Strahlungssensoren vermutet, welches spezifische Effekte durch grüne Strahlung vermittelt. Dieses neigt zu einem Dämpfen oder Mildern der durch Strahlung anderer Wellenlängenbereiche hervorgerufenen physiologischen Reaktionen (Bouley et al, 2007; Bangerjee et al., 2007). Eine Schwierigkeit besteht darin, die Reaktionen durch grüne Strahlung zu charakterisieren, da andere Photorezeptoren ebenfalls im grünen Wellenlängenbereich Strahlung absorbieren. Die durch grüne Strahlung hervorgerufenen Reaktionen sind nach Folta und Maruhnich (2007) und Golovatskaya (2005) auf cryptochromeabhängige oder auf ein bisher nicht identifiziertes Sensorsystem (Grünrezeptoren), also auf cryptochromunabhängige Reaktionen, zurückzuführen.

In vielen Pflanzenarten, darunter Salate, Leguminosen und andere dikotyle Pflanzen sowie Gräsern, konnte durch grüne Strahlung eine Umkehr des durch blaue Strahlung oder UV induzierten Öffnens der Stomata gezeigt werden (Frenchilla et al., 2000; Talbott et al., 2002; Eisinger et al., 2003; Kim et al., 2004b). Bei Salatpflanzen (*Lactuca sativa* 'Waldmanns Green') konnten Kim et al. (2004a) unter einer grünen LSL die mit Abstand geringste stomatäre Leitfähigkeit feststellen, verglichen mit einer kaltweißen LSL, einer Variante mit roten, grünen und blauen LEDs (RGB) und einer RB-Variante. Folta (2004) beobachteten eine schnellere Streckung des Hypokotyls von im Dunkeln gewachsenen *Arabidopsis thaliana* Sämlingen bei grüner Dunkelkammerbelichtung ($0,1$ bis $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) gegenüber der Streckung in kompletter Dunkelheit. Diese Reaktion der Pflanzen konnte auch in einer Umgebung mit zusätzlicher, gedimmter, roter Strahlung beobachtet werden, wodurch das Phytochrom als Rezeptor dieser Reaktion ausgeschlossen werden kann. Die Förderung der Hypokotylstreckung der Sämlinge geht unter anderem mit einer Herabregulierung von Chloroplastentranskripten einher (Folta, 2004; Dhingra et al., 2006). In zu Folta (2004) ähnlichen Versuchen konnte eine gesteigerte Biomasseproduktion nach dem Aufkeimen von Karotten- (*Daucus carota*), Radieschen- (*Raphanus sativus*) und Kressesamen (*Lepidium sativum*) aufgezeigt werden (Sommer und Franke, 2006).

Rote Strahlung wird vor allem im Zusammenhang mit der Entwicklung des Photosyntheseapparates und einem erhöhtem Streckungswachstum genannt. Bereits Saebo et al. (1995) beschrieben die Bedeutung für den Photosyntheseapparat und die Akkumulation von Stärke (siehe auch Dewir et al., 2006; Wu et al., 2007). Eine erhöhte Expression des akzessorischen Pigments β -Karotin und eine gesteigerte Aktivität von Antioxidantien wurde bei *Pisum sativum* durch eine Belichtung mit roten LEDs (Peak 630 nm) festgestellt (Wu et al., 2007), wohingegen eine solche Belichtung bei *Euphorbia millii* zu einer starken Reduzierung des Chlorophyll- und Karotinoidgehalts führte.

Eine geringe beobachtete Photosyntheseleistung unter roter LED-Belichtung ist zum Teil auf eine geringere Leitfähigkeit der Stomata zurückzuführen, welche eher durch Strahlen im blauen Wellenlängenbereich (siehe oben) kontrolliert und gefördert wird. Weiterhin können die sehr schmalbandigen Emissionsspektren der LEDs bei roten LEDs zu einem Ungleichgewicht von Photonen für das Photosystem I und Photosystem II führen. Dadurch ändert sich das Verhältnis des Transportzyklus der gesamten Kettenreaktion und kann in einer Reduktion der Netto-Photosyntheserate resultieren (Nhut und Nam, 2010).

Eine erhöhte Sprosstreckung durch eine rote Belichtung konnte bei vielen Pflanzenarten festgestellt werden, darunter auch Salatpflanzen (Yanagi et al., 1996), Tomaten (Aksenova et al., 1994), *Euphorbia millii* (Dewir et al., 2006), *Rehmannia glutinosa* (Hahn et al., 2000) und *Pelargonium x hortorum* `Penny Irene` (Appelgren, 1991). Dabei kann die monochromatische Belichtung mit roter Strahlung durch LEDs auch zu weniger vitaler Pflanzen mit einer Fragilität des Stängels führen (Ohashi-Kaneko et al., 2006; Kim et al., 2004b). Der Einfluss der Strahlung im roten Wellenlängenbereich auf die Streckung des Sprosses scheint, wie auch die Pflanzenreaktion auf blaue Strahlung, nicht konsistent zu sein, da bei einigen Kulturen (*Rehmannia glutinosa*, *Salvia splendens*, *Tagetes erecta*) auch eine Hemmung der Sprosstreckung aufgezeigt werden konnte (Heo et al., 2006, 2002; Tenessen et al., 1994). Es ist anzunehmen, dass die Sprosstreckung durch unterschiedliche synergistische Interaktionen zwischen blauen und roten Rezeptoren kontrolliert werden kann. Diese sind abhängig von der Pflanzenart, der physiologischen Erkennung der Strahlung und von den durch die Strahlungsqualität beeinflussten photochemischen Reaktionen (Wu et al., 2007; Kim et al., 2004a).

Neben einer höheren Frischmasse und längeren Pflanzen kam es auch zu einer Reduktion des Trockenmassegewichts, einer geringeren Blattanzahl und Blüteninduktion pro Pflanze im Vergleich zur Belichtung mit blauen LEDs und einer LSL-Variante (Dewir et al., 2006; Heo et al., 2002). Der Einfluss auf die Apikaldominanz wurde in der Literatur unterschiedlich dargestellt und scheint ebenfalls pflanzenartabhängig zu sein (Muleo et al., 2001; Chée, 1986).

Als Reaktion auf die Veränderung der Strahlung im roten und **dunkelroten Wellenlängenbereich** in der Umgebung kontrollieren Phytochrome (Kapitel 2.4.2) die Morphogenese. Einige kommerziell genutzte Anwendungen, welche die Produktivität und Qualität gartenbaulich genutzter Pflanzen erhöhen sollen, beziehen eine Manipulation der Produktionsumgebung durch rote und dunkelrote Strahlung mit ein (Rajapakse und Shahak, 2007).

Dem Rot-Dunkelrot-Verhältnis, also das Verhältnis der Wellenlängenbereiche 600 nm bis 700 nm zu 700 nm bis 800 nm, wurden Einflüsse auf die Sprosstreckung, die Wurzelbildung und die Aktivität von Antioxidantien zugeschrieben. Ein abnehmendes Rot-Dunkelrot-Verhältnis (R:DR), also ein ansteigender Dunkelrotanteil gegenüber der roten Strahlung, wurde als fördernd für die Streckung des Sprosses bezeichnet und bei ansteigendem R:DR wurde eine gehemmte Internodienstreckung beobachtet. Allerdings führte die Steigerung der Sprosstreckung ebenso wie bei einer rein roten Belichtung teilweise zu fragilen Stengeln (Kim

et al., 2004b; Robin et al., 1994). Stieg der Anteil an DR kam es zum Beispiel bei *Pisum sativum* cv. `Torsdag` zu einer Verringerung des Ertrages, der Blattgröße und des Trockengewichtes des Sprosses (Cummings et al., 2007).

Ein Einfluss auf die Wurzelbildung konnte bei *Chrysanthemum morifolium* Ramat `Ellen` durch den Anstieg der Wurzelanzahl und der Bewurzelungsrate bei gering steigendem Dunkelrotanteil von $4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf $4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (gesamte PPF: $43 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) und einem RB-Verhältnis von 5:2 verzeichnet werden. Allerdings führte ein weiterer Anstieg des Dunkelrotanteils zu einem Abfall beider Wachstumsparameter (Kurilcik et al., 2008).

Bei Reishülsen wurde Dunkelrot als förderlich für die Aktivität von Antioxidantien beschrieben (Lee et al., 2003). Durch die Anregung des Phytochroms mittels Wellenlängen im dunkelroten Bereich kann das Phytochrom als Antagonist der durch grüne Strahlung hervorgerufenen Reaktionen gesehen werden (Golovatskaya, 2005).

2.4.3.2 Kombination spektraler Wellenlängenbereiche

Bei der Entwicklung von LED-Belichtungssystemen wurde zur Auswahl der LED-Typen häufig die Absorptionkurve der Chlorophylle herangezogen, weshalb LEDs in den Farben Blau und Rot bis heute überwiegend Verwendung finden. Durch diese LED-Auswahl kann im Bereich der Absorptionsmaxima des Chlorophylls (etwa 430 nm und 660 nm) Strahlung emittiert werden. Dabei überwiegt meist der Rotanteil gegenüber dem Anteil an blauer Strahlung (zum Beispiel Wongnok et al., 2008; Moon et al., 2006; Nhut et al., 2006)

Blaue LEDs wurden in der Vergangenheit, meist aus Kostengründen, seltener bei der Umsetzung der LED-Belichtungssysteme eingesetzt. Ohne den Einsatz von blauen LEDs können Pflanzen jedoch anormales Wachstum aufweisen. Viele Pflanzenarten zeigten ohne die Belichtung mit blauen LEDs ein Ungleichgewicht während des Wachstums und der Entwicklung, wodurch sich die Notwendigkeit dieser für eine normale Pflanzenentwicklung verdeutlicht (Nhut und Nam, 2010). Über das optimale Verhältnis der Strahlung im roten und blauen Wellenlängenbereich zur Verbesserung der Pflanzenentwicklung gibt es viele Studien, welche allerdings keine eindeutigen Aussagen zulassen. Das optimale Verhältnis von roten zu blauen LEDs für das Pflanzenwachstum variiert zwischen den unterschiedlichen Pflanzenarten (Nhut et al., 2006).

Ein höherer Anteil der Strahlung im roten Wellenlängenbereich als im blauen kann zu einem optimalen Pflanzenwachstum führen. Dies wurde am Beispiel in vitro kultivierter *Fragaria x*

ananassa cv. `Akihime` und *Tripterospermum japonicum* mit einem PPFD-Verhältnis von roter zu blauer Strahlung von 7:3 (RB 7:3) nachgewiesen. Bei *Tripterospermum japonicum* machte sich dies durch eine maximale Bewurzelungsrate, ein maximales Frischmassegewicht und den höchsten Chlorophyllgehalt bemerkbar (Moon et al., 2006). Bei Bananenpflanzen (*Musa* ssp.) und *Spathiphyllum wallisii* konnte die Belichtungsvariante RB 8:2 als optimal für das Spross- und Wurzelgewicht herausgestellt werden (Nhut et al., 2005, 2003b). In Versuchen mit Reissorten und einem ebensolchem RB-Verhältnis von 8:2 konnten die Biomasseproduktion und die Photosyntheserate erhöht werden. Die Ergebnisse dieser Versuche wiesen aber auch darauf hin, dass ein Zusatz von blauer Strahlung zu einer weiteren Erhöhung der Photosynthese führen kann (Ohashi-Kaneko, 2006; Matsuda et al., 2004).

Shin et al. (2008) konnten bei Pflanzen der Gattung *Doritaenopsis* (Orchidaceae) durch den kombinierten Einsatz von roten und blauen LEDs im PPFD-Verhältnis 1:1 (RB 1:1) eine Erhöhung des Kohlenhydratgehalts und der Biosynthese von Blattpigmenten wie Chlorophyllen und Karotinoiden im Vergleich zu einfarbigen LED-Varianten und einer Leuchtstofflampen-Variante feststellen. Ähnliches konnte bei *Dendranthema grandiflorum* Kitam `Cheonsu` mit einer Erhöhung der Photosyntheseraten und Frischmassegewichte erreicht werden. Dabei konnte eine Fragilität der Stengel wie bei rein roter Belichtung nicht beobachtet werden (Kim et al., 2004b). Entgegen dieser Beobachtungen konnten bei der In-vitro-Kultivierung des Chinesischen Fingerhuts (*Rehmannia glutinosa*) keine Unterschiede bei der Sprosslänge, dem Trockengewicht und der Netto-Photosyntheserate bestimmt werden (Hahn et al., 2000). Die höchste Vermehrungsrate über Brutzwiebeln der *Lilium orientalis*-Hybriden `Pesaro` wurden in der LSL-Variante erzielt, auch wenn sich die Variante RB 1:1 ebenfalls für ein gutes Wachstum eignete (Lian et al., 2002).

Neben den blauen und roten LEDs werden auch teilweise weiße oder grüne LEDs mit in die Untersuchungen einbezogen. Die Pflanzenhöhe, die Frisch- und Trockenmasse von Salatpflanzen (*Lactuca sativa*) wurden durch zusätzliche grün-gelbe Strahlung verringert (Dougher und Bugbee, 2001). Andererseits konnte bei einem Belichtungssystem aus roten und blauen LEDs gezeigt werden, dass ein zusätzlicher Einsatz von grünen LEDs bei Salatpflanzen zu größeren Blättern und einer höheren Trockenmasse und bei Gurkenhybriden `Mandy F1` zu einer Internodienstreckung und höherer Trockenmasse führen kann (Brazaityte et al. 2009; Kim et al., 2004a).

Viele Studien haben sich mit der Bestimmung physiologischer und morphologischer Effekte beschäftigt, die durch unterschiedliche Strahlungsqualitäten ausgelöst wurden. Dabei variieren

die Reaktionen je nach Pflanzenart. Ein bestimmter Effekt einer Strahlungsqualität kann nicht einheitlich für die bisher untersuchten Pflanzenarten quantifiziert werden. Daher ist es notwendig, ein geeignetes LED-Belichtungssystem an unterschiedliche Ziele anzupassen. Die Anpassung kann je nach Ziel, zum Beispiel Förderung oder Hemmung des Spross- und Wurzelwachstums, längere oder kürzere Internodien, etc., unterschiedlich ausfallen (Poudel et al., 2008).

2.5 Chancen des LED-Einsatzes im Gartenbau

LEDs bieten gegenüber anderen Leuchtmitteln enorme Vorteile für Untersuchungen im wissenschaftlichen Bereich des Gartenbaus. Durch die Emission von annähernd **monochromatischer Strahlung**, ermöglichen LEDs die Belichtung mit einer definierten spektralen Zusammensetzung und einen selektiven, spezifischen Wellenlängenbereich, um Reaktionen von Pflanzen darauf zu untersuchen (Massa et al., 2008). Das Emissionsspektrum kann, durch die Zusammenstellung unterschiedlicher LEDs, zum Beispiel an die Absorption der pflanzlichen Photorezeptoren und an die Pflanzenbedürfnisse hinsichtlich eines optimalen Wachstums angepasst werden (Bula et al., 1991; Barta et al., 1992; Nhut und Nam, 2010). Fujiwara und Sawada (2006) imitierten das Strahlungsspektrum der Sonne, einschließlich der spektralen Veränderungen im Tagesverlauf, im Bereich von 400 nm bis 900 nm mittels 32 unterschiedlicher LEDs mit jeweils unterschiedlichen Peak-Wellenlängen.

Aufgrund der Möglichkeit, die LEDs stufenlos zu regulieren, können neben der Strahlungsqualität auch unterschiedliche Bestrahlungsstärken realisiert werden (Bula et al., 1991; Barta et al., 1992). Die **Verringerung des Abstandes** zwischen Leuchtmittel und Pflanze trägt zur Möglichkeit der Belichtung mit sehr hohen PPFD bei. Durch die Abfuhr der Verlustwärme über die Rückseite (Kapitel 2.2.1.1) können die LEDs sehr nah an der Pflanze eingesetzt werden, ohne diese durch zu hohe Wärmestrahlung einem Stress auszusetzen oder zu beschädigen (Morrow, 2008). Demzufolge sind LEDs ein sehr gutes Instrument, um nicht nur die Wirkung von Strahlungsqualitäten, sondern auch die von Strahlungsintensität auf die Morphologie und die Physiologie von Pflanzen sowie für eine optimale Pflanzenproduktion zu ermitteln (Tenessen et al., 1994; Nhut et al., 2003b; Nhut und Nam, 2010).

Unter den Vorteilen der LEDs als künstliche Strahlungsquelle für das Pflanzenwachstum in kontrollierter Umgebung wird die **hohe Effizienz mit einer geringen Wärmeentwicklung** genannt. Meist wird die Effizienz einzelner LEDs über die Lichtausbeute beschrieben, selten über den Wirkungsgrad und kaum über eine für den Gartenbau relevante

Photonenflussausbeute. Die höchsten Lichtausbeuten werden mit kaltweißen HL-LEDs erzielt, die mit 80 lm W^{-1} bis 129 lm W^{-1} teilweise über denen von Leuchtstofflampen liegen (<http://www.philipslumileds.com/products/luxeon-rebel/luxeon-rebel-white#datasheets>, Stand 04.07.2011; Pousset et al., 2010). Nach Yeh und Chung (2009) macht die in der In-vitro-Kultur zur Belichtung am häufigsten genutzte Leuchtstofflampenbelichtung 65 % des gesamten Energiebedarfs eines Kulturraums aus. Bei einem höheren Wirkungsgrad der einzelnen LEDs könnte der Energieverbrauch für die Belichtung von Pflanzen nicht nur direkt verringert werden, sondern auch indirekt durch die verminderte Abgabe von Wärme, so dass die benötigte Leistung für die Kühlung des Kulturraums reduziert wird (Taguchi, 2008).

Der **Betrieb im Kleinspannungsbereich** (bei Wechselspannungen (AC) bis 50 V, bei Gleichspannungen (DC) bis 120 V) macht diese Technik recht sicher, da dieser Bereich bei Kontaktherstellung für den Menschen in der Regel keine Gefahr darstellt (Hoenecke et al., 1992; Wu et al., 2003). Die kleine Bauteilgröße lässt die Konstruktion sehr kompakter LED-Leuchten zu, wodurch in einem Kulturraum die Raumausnutzung gesteigert werden kann (Bula et al., 1991; Barta et al., 1992; Wu et al., 2007). Ein weiterer zu nennender Vorteil gegenüber anderen Belichtungssystemen ist die lange Lebensdauer der LEDs, die mit bis zu 50.000 Stunden angegeben wird (Morrow, 2008).

Die eben genannten Vorteile der LEDs haben zu Untersuchungen der möglichen Einsatzgebiete im Gartenbau geführt. Dazu zählen Untersuchungen zur Pflanzenphysiologie und -morphologie, zur Belichtung in der Pflanzenproduktion, aber auch zum Beispiel zur Anwendung im Pflanzenschutz.

Studien über eine mögliche **Pflanzenproduktion** mittels LED-Technologie wurden intensiv ab Ende der 80er und Anfang der 90er Jahre durchgeführt. Anfangs wurden meist nur rote LEDs verwendet, da mit blauen LEDs damals noch keine adäquaten Bestrahlungsstärken erreicht werden konnten (zum Beispiel Wheeler, 1987; Barta et al., 1991; Bula et al., 1991). Diese ersten Untersuchungen von LEDs zur direkten Pflanzenbelichtung wurden für Systeme einer weltraumgestützten Pflanzenproduktion durchgeführt, welche bis heute erweitert und verbessert wurden (zum Beispiel Zyablova et al., 2010, Ilieva et al., 2010; Massa et al., 2006), sowie für Pflanzenproduktionseinheiten in lebensfeindlichen Umgebungen wie der Antarktis (Capiotti et al., 2008). Vor allem das geringe Gewicht und Volumen der LEDs machte sie für diese Einsatzbereiche interessant (Barta et al., 1991; Bula et al., 1991). Aus den anfänglichen Studien in der Weltraumforschung entwickelten sich schnell LED-Belichtungssysteme für Experimente zur Pflanzenphysiologie, Samenkeimung, Bewurzelung und zur

Pflanzenvermehrung in-vitro. Die konventionelle Nutzung von LEDs im Gartenbau verhindern der bisher noch sehr hohe Preis der LEDs und der geringe Strahlungsfluss der verfügbaren LEDs, der in einigen Wellenlängenbereichen derzeit als unzureichend beschrieben wird (Morrow, 2008). Beim praktischen Einsatz sollte auch die spektralen Veränderungen der LEDs bei unterschiedlichen Betriebszuständen berücksichtigt werden, welche von der Sperrschichttemperatur und der Betriebsstromstärke abhängig sein können (Taguchi, 2008).

Mit der Weiterentwicklung der LEDs wurden diese zunehmend als **Assimilationsbelichtung in Kulturkammern**, die auch als Phytotrone bezeichnet werden, für die konventionelle Pflanzenproduktion und auch für den Einsatz in der In-vitro-Kultur untersucht. In der Weltraumforschung und zur Belichtung von In-vitro-Kulturen wurden oft großflächige Belichtungssysteme verwendet, bei denen die LEDs gleichmäßig über die zur Verfügung stehenden Fläche verteilt angeordnet sind. Diese Systeme wurden für die Belichtung von Regaletagen konstruiert, um eine möglichst hohe Raumausnutzung zu erzielen (Cuello, 2002; Massa et al., 2008). Teilweise wurden sie auch in Stabform gebaut und können nebeneinander zur Belichtung einer größeren zusammenhängenden Fläche, zum Beispiel eine Regalette, angeordnet oder einzeln zwischen die Pflanzen gehängt werden (Jao und Fang, 2002; Massa et al., 2008). Auch kleine rechteckige oder runde Systeme zur Belichtung einzelner Kulturgefäße wurden für wissenschaftliche Untersuchungen eingesetzt (Nhut et al., 2005). Diese Systeme, welche sich zur Belichtung in der In-vitro-Kultur eignen, haben den Einsatz von Standard-LEDs gemeinsam. Das Erreichen einer hohen PPFD ist damit nur bei hoher LED-Dichte möglich.

Zur **Assimilationsbelichtung im Gewächshaus** wird eine höhere PPFD benötigt als in der In-vitro-Kultur (George et al., 2008; Jo et al., 2008). Da die einzelnen LEDs im Vergleich zu anderen Leuchtmitteln geringe Strahlungsflüsse aufweisen, wird für die Anwendungen im Gewächshaus versucht, möglichst kompakte LED-Leuchten, mit möglichst hohen Strahlungsflüssen der einzelnen LEDs zu konstruieren, da sonst die Beschattung der Pflanzen zu stark wäre. Die Vorteile der Hochleistungs-LEDs gegenüber Standard-LEDs, wie zum Beispiel ein höherer Strahlungsfluss und Wirkungsgrad, machten sie für Untersuchungen des möglichen Einsatzes als Assimilationsbelichtung im Gewächshaus interessant (siehe zum Beispiel Tamulaitis et al., 2005). Auf dem Markt befinden sich bereits etliche LED-Belichtungssysteme, die zur Assimilation der Pflanzen als Alternative zu den überwiegend genutzten Natriumhochdruck-Dampflampen (NHDL) und den Metallhalogen-Dampflampen (MHDL) angeboten werden (zum Beispiel http://www.lemnislighting.com/en/about_greenhouse.html, Stand 05.03.2011; <http://www.growlight.cn/288W-grow-lights.asp>, Stand 05.03.2011; <http://www.flowmagic.nl/folder/clusterled32.pdf> Stand 05.03.2011). Auf Grund der bisher noch

sehr hohen Kosten und des geringeren Wirkungsgrades im Vergleich zu den konventionell im Gewächshaus genutzten Leuchtmitteln wie der NHDL, sind LEDs und HL-LEDs noch keine ökonomische Alternative (Morrow, 2008; Tamulaitis et al., 2005).

Die Belichtung zwischen den Kulturen („**intercrop lighting**“) wurde mit der voranschreitenden Entwicklung von LEDs wieder aufgenommen, da sie gegenüber anderen Leuchtmitteln den Vorteil bieten, dass sie die beim LED-Betrieb entstehende Verlustleistung in Form von Wärme nicht als Strahlung in Richtung der Pflanze abgeben. Dies erlaubt die Positionierung des Leuchtmittels sehr nah an der Pflanze (Bourget, 2008; Hovi-Pekkanen und Tahvonen, 2008; Hogewoning et al., 2007). Die photoperiodische Belichtung mittels LEDs war ebenfalls bereits Bestandteil von Untersuchungen, bei denen Blütenbildungen von Langtagpflanzen (Sommerazaleen, Petunien, Spinat) und Kurztagpflanzen (Zinnien, Sesamblatt, Schmuckkörbchen, Chrysanthemen) induziert wurden (Kawai et al., 1996; Hamamoto et al., 2003).

Die **Entomologie** stellt ein weiteres Gebiet dar, in welchem eine Nutzung von LEDs untersucht wird. So wurden diese bisher eingesetzt, um das Verhalten diverser Schad- und Nutzinsekten auf unterschiedliche Strahlungsqualitäten zu untersuchen (Akyazi, 2009; Bornwaßer, 2007). Auch die Verbesserung eines Monitorings im Gewächshaus sowie Insektenfallen mit LED-Belichtung wurden untersucht (Cohnstaedt et al., 2008; Simmons et al., 2004; Chen et al., 2004). Auch Viren und Pilze scheinen über Strahlungsqualitäten beeinflussbar zu sein. So zeigten Schuerger und Brown (1997) und Schuerger et al. (1997) einen negativen Einfluss einiger Strahlungsqualitäten auf die Entwicklung des Tomatenmosaikvirus (ToMV) bei Paprika und Echten Mehltau an Gurken. Der LED-Einsatz könnte demnach auch als ein möglicher Teil des integrierten Anbaus in Betracht gezogen werden und zur Reduzierung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes beitragen.

3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Steigerung der Energieeffizienz pflanzlicher In-vitro-Kulturverfahren durch den Einsatz von Hochleistungs-LEDs (HL-LEDs) zur Belichtung der Kulturen. Dazu gehört sowohl die Bewertung der einzelnen Leuchtmittel über die Photonenflussausbeute, als auch die Entwicklung und Erprobung eines Belichtungssystems mit HL-LEDs zur Senkung des Energieverbrauchs, unter gleichzeitiger Erhöhung der Raumausnutzung, einer homogenen PPFD-Verteilung und der Optimierung der Wachstumsparameter unterschiedlicher Pflanzenarten.

Es ist bekannt, dass verschiedene Kurven der Blattabsorption und Wirkungsspektren der Photosynthese unterschiedlicher Kulturen, sowie die Absorption des Chlorophylls und der akzessorischen Pigmente, auf eine höhere Effizienz bestimmter Wellenlängenbereiche im Vergleich zu anderen Bereichen hinsichtlich der Photosyntheserate der Pflanzen hinweisen. Durch das Bestehen der Ansteuerungsmöglichkeiten von Hochleistungs-LEDs soll eine Optimierung der Strahlungsqualität und Strahlungsintensität eines HL-LED-Belichtungssystem im Hinblick auf verschiedene Wachstumsparameter erreicht werden.

4 Material und Methoden

4.1 Radiometrische Bewertung von Hochleistungs-LEDs

Für die Durchführung der radiometrischen Bewertung musste der gesamte Strahlungsfluss einer Strahlungsquelle erfasst werden. Dazu wurde eine Ulbrichtkugel angefertigt und diese in ein System integriert, mit dem die Messungen der HL-LEDs stattfanden. Diese Messungen wurden bei unterschiedlichen, für den HL-LED-Betrieb relevanten Parametern durchgeführt.

4.1.1 Aufbau des Messsystems

Das Messsystem zur radiometrischen Bewertung der Hochleistungs-LEDs (HL-LEDs) bestand aus einer Ulbrichtkugel als optisches System, einer signalverarbeitenden Einheit (Spektrometer), einer HL-LED-Halterung und einer Steuereinheit.

4.1.1.1 Aufbau der Ulbrichtkugel

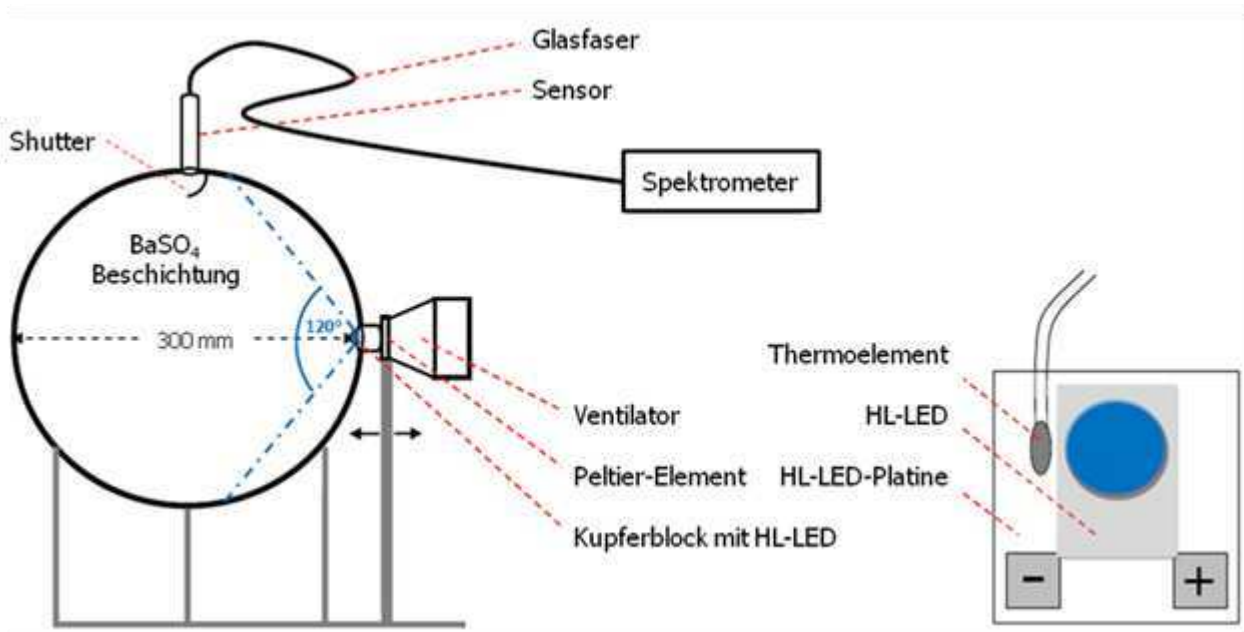


Abb. 4.1.1 Schematische Darstellung des Messsystems mit A) der Ulbrichtkugel, der signalverarbeitenden Einheit, der Halterung und B) einer schematischen Detailansicht der HL-LED mit Platine und Thermoelement (Bild siehe Anhang A.1).

Die Ulbrichtkugel wurde an der Leibniz Universität Hannover im Fachgebiet für Biosystem- und Gartenbautechnik angefertigt. Sie bestand aus mehreren Schichten Epoxidharz mit einem Innendurchmesser von 300 mm. Auf der äußeren Oberfläche war die Kugel mit einem

schwarzen matten Lack versehen und innen mit Bariumsulfat beschichtet. Die Kugel besaß zwei Öffnungen, eine Hauptöffnung für die Einspeisung der Strahlung (25 mm \varnothing) und eine Sekundäröffnung (35 mm \varnothing) zur Aufnahme des Messsignals. Der Durchmesser der Sekundäröffnung wurde so gewählt, dass verschiedene Sensoren unterschiedlicher Größe eingepasst werden konnten. Vor der Sekundäröffnung war ein weißer Shutter (25 mm · 10 mm) angebracht, um die Öffnung vor der direkten Strahlung, die von der HL-LED ausgeht, abzuschirmen (Abb. 4.1.1).

Der Anteil der Öffnungsflächen im Verhältnis zur gesamten Kugeloberfläche ist ein wichtiger Einflussfaktor für die Integrationsfähigkeit (Kapitel 2.2.4) einer Ulbrichtkugel und betrug im beschriebenen Modell weniger als 0,5 %.

4.1.1.2 Hochleistungs-LED-Halterung

Die Halterung für eine HL-LED bestand aus einem Peltier-Element mit Lüfter (Arctic Cooling, 5 V). Auf der dem Lüfter gegenüberliegenden Seite wurde ein Kupferblock (25 mm \varnothing , 15 mm lang) auf das Peltier-Element aufgebracht. Auf dem Kupferblock konnte jeweils eine HL-LED mit Wärmeleitkleber (Arctic Silver; Wärmeleitfähigkeit von $7,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) befestigt werden. Die während des Betriebs der HL-LEDs entstandene Wärme wurde über den Kupferblock nach außen abgeführt und über das Peltier-Element und den Ventilator an die Raumluft übertragen. Das Peltier-Element wurde durch eine Zweipunktregelung „ITG10“ (entwickelt im Fachgebiet Biosystem- und Gartenbautechnik) geregelt. Die Platinentemperatur wurde mit einem Thermoelement gemessen, welches möglichst nah an der Linse befestigt wurde, ohne jedoch die Strahlenemission der HL-LED einzuschränken. Die HL-LED-Halterung konnte durch die Hauptöffnung soweit in die Ulbrichtkugel geschoben werden, dass der Kupferblock bündig mit der inneren Kugeloberfläche abschloss und die HL-LED mit der Stärke ihrer Platine in die Ulbrichtkugel hineinragte.

4.1.1.3 Hochleistungs-LED-Steuereinheit

Die HL-LED-Steuereinheit bestand aus einem DC-Netzteil (HAMEG, Programmable Power Supply HM 8142) über das die Stromzufuhr gewährleistet wurde. Die Verbindung von Netzteil und HL-LED geschah, ohne Verluste der Dichtigkeit an der Hauptöffnung der Ulbrichtkugel, über ein Kabel. Die vom Netzteil ausgehende Betriebsstromstärke (I , A) der HL-LEDs war variabel regulierbar und, wie auch die benötigte Spannung (U , V), über eine Anzeige abzulesen. Die Einstellgenauigkeit des Netzteils wurde mit einer maximal möglichen Abweichung von 0,2 % angegeben (Hameg® Instruments, 2005).

4.1.1.4 Signalverarbeitende Einheit

Zu der signalverarbeitenden Einheit gehörten Sensor, Lichtfaser, Spektrometer und Computer. Das Spektrometer (Ocean Optics USB 4000) wurde über eine Lichtfaser (P600-2-VIS-NIR, 600 μm \varnothing , 2 m, VIS-NIR) mit der Ulbrichtkugel verbunden. Am Ende der Lichtfaser befand sich ein kosinuskorrigierter Sensor (Ocean Optics CC-3; 180°), der in der Sekundäröffnung platziert wurde und bündig mit der Kugelfläche abschloss. Das Spektrometer war mit einem Gitter zur Aufspaltung der Strahlung im Wellenlängenbereich von 177,90 nm und 893,96 nm ausgerüstet und hatte eine Auflösung von $\leq 0,22$ nm (www.oceanoptics.com, 2011, Ocean Optics, 2007). Das Endergebnis jeder Spektrenmessung war ein Mittelwert aus 10 hintereinander aufgenommenen Spektren.

4.1.2 Kalibrierung des Spektrometers

Das Ocean Optics USB 4000 wurde mit einer Kalibrierleuchte absolut kalibriert. Die Kalibrierung wurde mit einer Halogenlampe (EG & G Gamma Scientific, RS-10A) lampenbedingt in einem Wellenlängenbereich von 329,98 nm bis 893,96 nm vorgenommen. Dazu wurde mit dem Spektrometer ein Spektrum der Halogenlampe in 250 mm Entfernung aufgenommen, nachdem die Leuchte circa 30 Minuten in Betrieb war und dadurch von einer konstanten Bestrahlungsstärke der Kalibrierleuchte ausgegangen werden konnte. Der wellenlängenabhängige Kalibrierfaktor (f_{cal}) ergibt sich aus dem Quotienten der bekannten Bestrahlungsstärke der Kalibrierleuchte (E_{out} W m^{-2}) in einer spezifischen Entfernung von Sensor zur Halogenlampe (250 mm) und aus der durch das Spektrometer gemessenen, wellenlängenabhängigen Intensität (E_{spek} Counts).

$$f_{cal}(\lambda) = \int_{329,97}^{893,96} E_{out\lambda} \cdot d\lambda / \int_{329,97}^{893,96} E_{spek\lambda} \cdot d\lambda \quad [\text{W m}^{-2} \text{ Counts}^{-1}] \quad (4.1)$$

4.1.3 Kalibrierung der Ulbrichtkugel

Für die Bestimmung des gesamten Strahlungsflusses einer Strahlungsquelle (Φ) musste die Ulbrichtkugel kalibriert werden. Daraus ergab sich ein Kugelfaktor zur Berechnung der Absolutwerte des Strahlungsflusses. Der Kugelfaktor (K_f) wurde aus dem Quotienten der in die Ulbrichtkugel einstrahlenden Strahlungsflusses der Kalibrierleuchte (Φ_{in}) und der Bestrahlungsstärke (E_{in}), die in der Ulbrichtkugel gemessen wurde, gebildet.

$$Kf = \frac{\Phi_{in}}{E_{in}} \quad [\text{m}^2] \quad (4.2)$$

Der in die Ulbrichtkugel einstrahlende Strahlungsfluss der Kalibrierleuchte (Φ_{in}) wurde aus E_{out} und der Fläche der Hauptöffnung der Ulbrichtkugel (A_H) berechnet:

$$\Phi_{in} = A_H \int_{329,97}^{893,96} E_{out \lambda} \cdot d_\lambda \quad [\text{W}] \quad (4.3)$$

$$E_{in} = \int_{329,97}^{893,96} E_{in \lambda} \cdot d_\lambda \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (4.4)$$

4.1.4 Ermittlung des Wirkungsgrades und der Photonenflussausbeute

Nach der Kalibrierung konnte der gesamte Strahlungsfluss einer Strahlungsquelle (Φ) im Wellenlängenbereich der emittierten Strahlung der HL-LEDs aus der durch das Spektrometer gemessenen Bestrahlungsstärke innerhalb der Ulbrichtkugel ($E_{x\lambda}$) und dem Kugelfaktor bestimmt werden. Die untere Grenze des Integrals lag, bedingt durch die Kalibrierung, bei einer Wellenlänge von 330 nm. Die obere Grenze von 800 nm ergab sich aus den Strahlungsspektren der HL-LEDs, die nicht über diese Wellenlänge hinaus Strahlung emittieren.

$$\Phi = \int_{330}^{800} E_{x\lambda} \cdot d_\lambda \cdot (\Phi_{in} / E_{in}) \quad [\text{W}] \quad (4.5)$$

Anhand dieser Daten konnte der gesamte emittierte Strahlungsfluss pro Watt elektrischer Leistung, also der Wirkungsgrad (η), berechnet werden. Dazu mussten die Daten der Spannung (V) und der Betriebsstromstärke (A) der HL-LEDs bekannt sein.

$$\eta = \left(\int_{330}^{800} E_{x\lambda} \cdot d_\lambda \cdot (\Phi_{in} / E_{in}) \right) / (V \cdot A) \quad [\text{W}_{\text{Strahlung}} \text{W}_{\text{el}}^{-1}] \quad (4.6)$$

Die Umrechnung der Bestrahlungsstärke E_{in} in die Photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD; E_{phot}) wurde im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 700 nm, über einen Umrechnungsfaktor wie folgt vorgenommen:

$$E_{Phot} = \frac{\lambda}{119,6} \cdot \int_{400}^{700} E_{in\lambda} \cdot d_{\lambda} \quad [\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (4.7)$$

Der Umrechnungsfaktor ergab sich nach McCree (1972a) aus dem Plankschen Wirkungsquantum, der Boltzmannkonstante und der Avogadrokonstante.

Der Photonenfluss (Φ_{Phot}) im Bereich der PAR wurde, wie auch der gesamte Strahlungsfluss einer Strahlungsquelle, über den Kugelfaktor berechnet.

$$\Phi_{Phot} = E_{Phot} \cdot \left(\frac{\Phi_{in}}{E_{in}} \right) \quad [\mu\text{mol s}^{-1}] \quad (4.8)$$

Unter Einbeziehung der elektrischen Leistung wurde die Photosynthetische Photonenflussausbeute (*PPFA*) ermittelt.

$$PPFA = \frac{E_{Phot} \cdot \left(\frac{\Phi_{in}}{E_{in}} \right)}{V \cdot A} \quad [\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}] \quad (4.9)$$

4.1.5 Bewertete HL-LEDs

Bei der Auswahl der HL-LEDs wurde die Eignung zur Integration in ein HL-LED-Belichtungssystem berücksichtigt. Auf Grund der unterschiedlichen Bauweisen der HL-LED-Modelle, auch innerhalb der Modelle eines Herstellers, wurde deshalb nur ein HL-LED-Modell verwendet. Das zu verwendende Modell sollte in den Typen Blau, Grün, Rot und Kaltweiß erhältlich sein und im Vergleich zu anderen HL-LEDs eine hohe Lichtausbeute aufweisen. Bei dem Auswahlverfahren musste auf photometrische Einheiten zum Vergleich zurückgegriffen werden, da radiometrische Einheiten in den Datenblättern der Hersteller nur selten dargestellt werden (siehe dazu Kapitel 2.2.1).

Die in Tabelle 4.1.1 aufgelisteten HL-LEDs der Firma Philips Lumileds, wurden für die Konstruktion eines HL-LED-Belichtungssystems in Betracht gezogen und für die Untersuchungen mit dem oben beschriebenen Messsystem verwendet. Dazu wurden die HL-LEDs jeweils maschinell auf einer Aluminiumplatte (10 mm * 10 mm * 0,9 mm (L*B*H)) aufgelötet.

Tab. 4.1.1 Auflistung der bei den Ulbrichtkugelmessungen verwendeten HL-LEDs. Angaben nach Philips Datenblatt (2008).

Modell	Artikelbezeichnung	HL-LED-Typ	Peak Wellenlänge (nm) oder Farbtemperatur (K)
LUXEON Rebel	LXML-PR01-0225	Royal Blau	455 nm
LUXEON Rebel	LXML-PM01-0070	Grün	530 nm
LUXEON Rebel	LXML-PD01-0040	Rot	627 nm
LUXEON Rebel	LXML-PWC1-0100	Kaltweiß	6500 K

4.1.6 Parameterstudien

Mit dem Messsystem wurden die Strahlungsspektren der HL-LEDs, bedingt durch die Kalibrierung, zwischen circa 330 nm und 900 nm in der jeweiligen Versuchseinstellung aufgenommen. Dabei bestand jede Aufnahme eines Spektrums aus dem Mittelwert aus 10 aufeinander folgenden Messungen. Bei jeder Messung wurden die Spannung (U , V) und die Betriebsstromstärke (I , A) protokolliert, aus denen die elektrische Leistung der HL-LEDs in jeder Versuchseinstellung hervorging. Für jede Versuchseinstellung konnten somit die Photosynthetische Photonenflussausbeute und der Wirkungsgrad der HL-LEDs ermittelt werden (Kapitel 4.1.4). Neben dem Strahlungsspektrum, der Spannung und der Betriebsstromstärke wurde auch die Platinentemperatur zum Zeitpunkt der Messung aufgezeichnet.

4.1.6.1 Betriebsstromstärke

Bei der ersten Versuchsreihe wurde die Platinentemperatur konstant bei 25 °C gehalten. Die Strahlungsspektren der vier HL-LED-Typen (Tab. 4.1.1) wurden bei folgenden Betriebsstromstärken gemessen: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700 mA. Jede Versuchseinstellung wurde mit 6 HL-LEDs pro HL-LED-Typ wiederholt.

4.1.6.2 Platinentemperatur

Jede Messung dieser Versuchsreihe wurde bei einer konstanten Betriebsstromstärke von 350 mA an den vier unterschiedlichen HL-LED-Typen vorgenommen. Die Temperatur wurde zwischen 5 °C und 85 °C bei 11 unterschiedlich eingestellten Temperaturen (5, 10, 15, 20, 25,

30, 40, 50, 60, 70, 80 °C) gemessen. Jede Versuchseinstellung wurde mit 3 HL-LEDs pro HL-LED-Typ wiederholt.

Die gemessene Platinentemperatur stimmte nicht mit der Sperrschichttemperatur am HL-LED-Chip überein. Diese ließ sich über eine Formel ermitteln (Kapitel 5.1.2). Aufgrund dieser Parameterstudie konnten die Abweichungen der Photosynthetischen Photonenflussausbeute und des Wirkungsgrades abhängig von der Sperrschichttemperatur ermittelt werden. Die Daten des Einflusses der Betriebsstromstärke konnten dann für die einzelnen HL-LED-Typen bei jeder Einstellung der Betriebsstromstärke (Kapitel 4.1.6.1) um die Abweichungen korrigiert werden (siehe dazu Kapitel 5.1.2). Erst nach der Korrektur konnte bei den unter Kapitel 4.1.6.1 beschriebenen Versuchen von einer konstanten Temperatur (Sperrschichttemperatur) ausgegangen werden.

4.1.7 Spektrale Veränderungen der HL-LEDs

Die Peakwellenlänge der HL-LEDs wurde aus jeder durchgeführten Messung des Strahlungsspektrums durch Sortierung der Daten ermittelt. Dadurch konnte ein möglicher Einfluss der Betriebsstromstärke und der Platinentemperatur auf die spektrale Veränderung untersucht werden. Bei den kaltweißen HL-LEDs wurde neben der Peakwellenlänge die Veränderung der ähnlichsten Farbtemperatur (T_{cp} ; auch correlated colour temperature), ein Maß für den Farbeindruck einer Strahlungsquelle, untersucht. Dazu wurden mit Hilfe der Strahlungsspektren der HL-LEDs nach CIE XYZ 1931 die Normwertfarbanteile x und y berechnet. Diese dienen zur farblichen Einordnung eines Leuchtmittels in die CIE-Normfarbtafel. Die Normwertfarbanteile wurden anhand der Normfarbwerte X , Y und Z , die auch als Tristimulus bezeichnet werden, ermittelt (nach Pousset et al., 2010):

$$X = k' \cdot \sum_{\lambda} \Phi_{\lambda} \cdot \bar{x}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (4.10)$$

$$Y = k' \cdot \sum_{\lambda} \Phi_{\lambda} \cdot \bar{y}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (4.11)$$

$$Z = k' \cdot \sum_{\lambda} \Phi_{\lambda} \cdot \bar{z}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (4.12)$$

\bar{x}_{λ} , \bar{y}_{λ} , \bar{z}_{λ} sind dabei die genormten Funktionen der Empfindlichkeitskurven der drei menschlichen Farbrezeptoren (Colour Matching Functions; nach CIE 1331 2-deg, XYZ CMFs (<http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk>, 2011)), die auch Tristimuluskurven genannt werden (Dohlus, 2010).

$$k' = \frac{100}{\sum_{\lambda} \Phi_{\lambda} * \bar{y}_{\lambda} * \Delta\lambda} \quad (4.12)$$

Die Normwertfarbanteile x und y wurden wie folgt berechnet:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4.13)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (4.14)$$

Die Berechnung der ähnlichsten Farbtemperatur (T_{cp}) der HL-LEDs geschah nach der McCamy Methode (McCamy, 1992)

$$T_{cp} = 5520,33 - 6823,3n + 3525n^2 - 449n^3 \quad (4.15)$$

$$n = \frac{x - 0,3320}{y - 0,1858} \quad (4.16)$$

4.1.8 Auswertung der Strahlungsspektren

Bei jeder Spektrenaufnahme wurde zuvor eine Dunkelstromkorrektur des Spektrometers mit Hilfe eines Bedienungsprogramms für das Ocean Optics USB 4000 (SpectraSuite Spectrometer Operating Software) durchgeführt, um das gerätebedingte Signalrauschen zu minimieren. Desweiteren wurde für jede Messung ein Dunkelspektrum ohne eingeschaltetes Leuchtmittel aufgenommen und dieses mit dem aufgenommenen Strahlungsspektrum der HL-LEDs verrechnet. Die Daten der Strahlungsspektren wurden mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Excel 2007, Version 12.0 (Microsoft Corporation) aufbereitet und die Angaben des Strahlungsflusses, der PAR-Ausbeute (Kapitel 4.1.4), der PPFD und der Photosynthetischen Photonenflussausbeute (Kapitel 4.1.4) berechnet.

Die graphische Darstellung der Ergebnisse wurde mit SigmaPlot, Version 11.0 (Systat Software Inc.) durchgeführt.

4.2 Entwicklung und Bewertung eines HL-LED-Belichtungssystems

4.2.1 Aufbau des HL-LED-Belichtungssystems

Das HL-LED-Belichtungssystem bestand aus einer Steuerungseinheit und einer Belichtungseinheit. Die Belichtungseinheit beinhaltete die HL-LEDs, Kühlprofile und einen Gitterboden, unter dem die Aluminiumprofile befestigt werden konnten.

Das System wurde als eine mögliche Alternative zu einer konventionell eingesetzten Belichtung in einem Regalsystem entwickelt (siehe dazu Kapitel 2.3.5). Dadurch bedingt war eine Etagenfläche von 1550 mm * 500 mm als die zu bestrahlende Fläche vorgegeben. Dabei wurde die Etagenfläche aus der gängigen Etagengröße für Kulturräume zur Kultivierung von In-vitro-Kulturen mit einer Leuchtstofflampenbelichtung (1 * 58 W; Länge: 1500 mm; Durchmesser: 28 mm) entnommen.

4.2.1.1 HL-LED-Platinen

Die maschinell gefertigten Platinen (250 mm * 25 mm) hatten eine Stärke von 1 mm und waren jeweils 250 mm lang (Abb. 4.2.1), so dass sechs Platinen hintereinander die durch die Kühlprofile vorgegebene Länge von 1500 mm nicht überschritten. Die Höhe der Platine mit aufgebrachtener HL-LED betrug 3,1 mm.

Auf den Platinen waren jeweils eine HL-LED des Modells LUXEON® Rebel vom Typ Royal Blau, Rot und Kaltweiß aufgelötet. Unter den HL-LEDs befanden sich Durchkontaktierungen, durch welche eine schnelle Wärmeleitung der HL-LED durch die Platine auf das Aluminiumprofil (siehe Kapitel 4.2.1.2) gewährleistet werden konnte. Auf der in Abb. 4.2.1 linken Seite der Platine lagen durchkontaktierte Bereiche für eine optionale Erweiterung der HL-LED-Anzahl pro Platine auf sechs HL-LEDs. An den beiden Enden der Platinen befanden sich drei Stellen für Lötbrücken zur Verbindung der Platinen in einer Reihenschaltung für den jeweiligen HL-LED-Typ. Die Kathode befand sich auf der linken Seite der HL-LEDs.

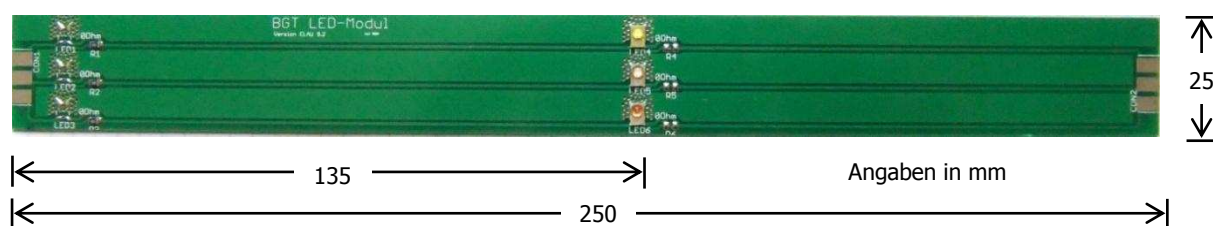


Abb. 4.2.1 Bild einer HL-LED-Platine mit drei HL-LEDs.

4.2.1.2 Temperaturmanagement

Die HL-LEDs des Belichtungssystems wurden passiv über Konvektion mit der Raumluft gekühlt. Als Konvektionsfläche dienten die 1500 mm langen Profile aus Aluminium. Das erste Profil war als U-Profil (30 mm * 20 mm * 30 mm) mit einer Stärke von 2 mm in Verbindung mit einem weiteren U-Profil (20 mm * 60 mm * 20 mm * 2 mm) konzipiert (Abb. 4.2.2 A). Bei dieser Profilform und der Anordnung der HL-LEDs unter dem Profil waren die HL-Leds ungeschützt gegenüber mechanischer Beanspruchung.

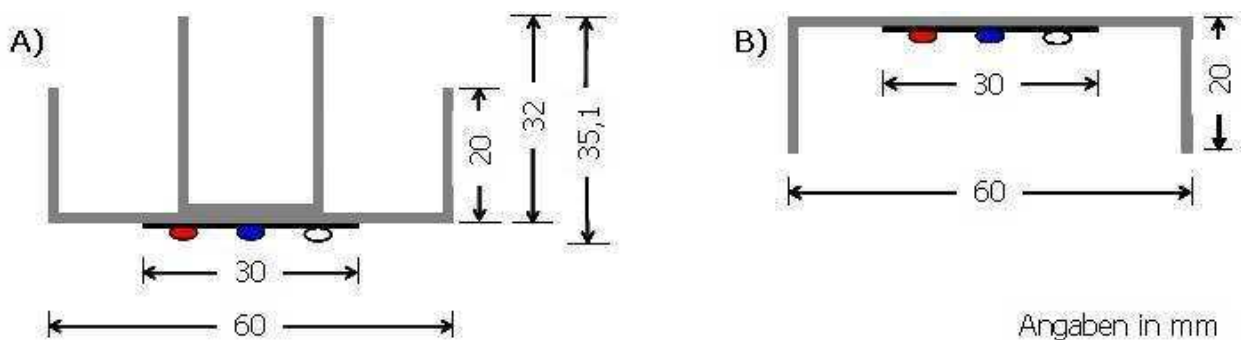


Abb. 4.2.2 Schematische Darstellung zweier Kühlprofile mit HL-LED-Platinen im Querschnitt. Die Stärke der Aluminiumprofile betrug 2 mm und die Höhe der Platine (schwarze Linie) mit den drei HL-LEDs (blaues, rotes und weißes Oval mit schwarzem Rand) 3,1 mm.

Ein weiterentwickeltes Kühlprofil, ebenfalls mit einer Länge von 1500 mm, bestand aus nur einem umgedrehten U-Profil (20 mm * 60 mm * 20 mm * 2 mm) aus Aluminium (Abb. 4.2.2 B). Mit der Anordnung der HL-LEDs innerhalb der U-Profile waren sie durch die Profilschenkel vor mechanischen Einflüssen weitestgehend geschützt. Die Kalkulation der notwendigen Konvektionsfläche (Fläche des Profils) zur Abfuhr der Verlustleistung der HL-LEDs in Form von Wärme wurde über eine vereinfachte Berechnung des Temperaturprofils eines LED-Trägers durchgeführt. Die Berechnungen wurden freundlicherweise von Dr.-Ing. Burkhard von Elsner, wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fachgebiets Biosystem- und Gartenbautechnik der Leibniz Universität Hannover, durchgeführt. Die Abgabe der Verlustwärme wurde nach den Regeln für freie Konvektion und Strahlungswärmeabgabe bei einer Raumtemperatur von 20 °C und einer Solltemperatur an den HL-LEDs von 25 °C berechnet. Das in Abb. 4.2.2 B dargestellte Aluminiumprofil erfüllte nach den Berechnungen, unter Einbeziehung der eben genannten Vorgaben, die Anforderungen an ein Kühlprofil für HL-LEDs.

Sechs der HL-LED-Platinen wurden an den durchkontaktierten Bereichen mit einem Wärmeleitkleber (Arctic Silver; Wärmeübertragung von $7,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) hintereinander auf den Kühlprofilen mittig befestigt und über Lötbrücken miteinander verbunden.

4.2.1.3 Aufbau der HL-LED-Belichtungseinheit

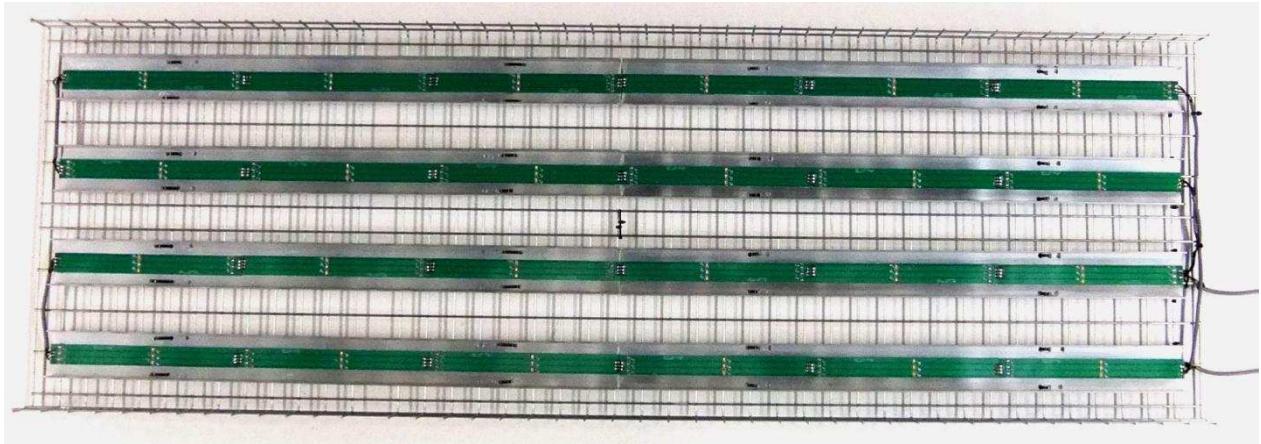


Abb. 4.2.3 Bild eines HL-LED-Belichtungseinheit mit 24 HL-LEDs pro HL-LED-Typ. Die Aluminiumprofile (1500 mm * 60mm * 20 mm) wurden mit einem Abstand von 60 mm zueinander auf einem Gitterboden (1550 mm * 500 mm * 50 mm) angeordnet und befestigt.

Zu einer HL-LED-Belichtungseinheit (Abb. 4.2.3) wurden die HL-LEDs, die Kühlprofile (Kapitel 4.2.1.2; Abb. 4.2.2) und ein Gitterboden (1550 mm * 500 mm), unter den die Aluminiumprofile befestigt werden konnten, gezählt. Mit Hilfe der HL-LED-Steuerung (siehe Kapitel 4.2.1.4) konnten Reihenschaltungen aus sechs oder 12 HL-LEDs realisiert werden und somit, durch eine Parallelschaltung der hintereinander geschalteten HL-LEDs, zwei bis vier Aluminiumprofile pro Belichtungseinheit unter einem Gitterboden befestigt werden. Dementsprechend konnte eine HL-LED-Belichtungseinheit aus 12, 18 oder 24 HL-LEDs pro HL-LED-Typ bestehen (Abb. 4.2.3). Ein Schaltplan des kompletten Belichtungssystems, bestehend aus 24 HL-LEDs pro HL-LED-Typ mit jeweils 12 in Reihe geschalteten HL-LEDs ist in Abb. 4.2.4 dargestellt. Bei dem Einsatz einer höheren Anzahl an Aluminiumprofilen, auf denen die HL-LED-Platinen befestigt waren, würde die vertikale Luftbewegung durch den Gitterboden stark verringert und eine konvektive Kühlung über die Luft erschwert werden.

Die HL-LED-Belichtungseinheit wurde in einer Klimakammer in eine Regalkonstruktion aus gelochten Winkelprofilen integriert. Dabei war der Etagenabstand des Regals variabel einstellbar. Die Außenseiten des Regals wurden zwischen Etagenboden und HL-LED-Belichtungseinheit mit schwarzer Folie abgehängt, wodurch ein Strahlungseinfluss von außen verhindert wurde.

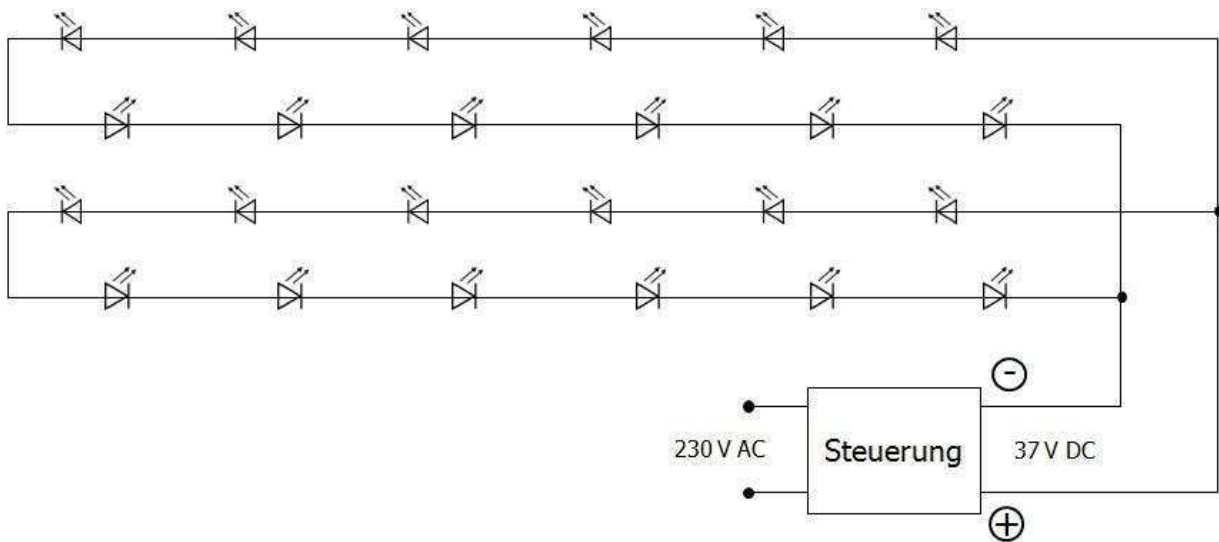


Abb. 4.2.4 Schaltplan eines HL-LED-Belichtungssystems mit 24 HL-LEDs pro HL-LED-Typ.
Ein Symbol der Lichtdioden (\triangleleft) steht für ein HL-LED-Cluster aus einer weißen, blauen und roten HL-LED.

4.2.1.4 Ansteuerung der LED-Belichtungsanlage

Am Fachgebiet Biosystem- und Gartenbautechnik der Leibniz Universität Hannover wurden die Steuerungen für die HL-LEDs entwickelt. Sie beinhalteten drei Kanäle mit denen maximal 24 HL-LEDs eines HL-LED-Typs angesteuert werden konnten. Es war auch eine stufenlose Dimmung der HL-LEDs möglich. Jeder HL-LED-Typ war an einen separaten Kanal angeschlossen, so dass die Strahlungsqualität, im Rahmen der emittierten Strahlungsspektren der HL-LEDs, variiert werden konnte.

Die gesamte Steuerung der HL-LEDs wurde auf einer Platine im EURO-Platinenmaß (DIN 41612; 160 mm * 100 mm, Rastermaß 2,54 mm) komprimiert, so dass die Platinen in 19" Baugruppenträger für Informationstechnik eingeschoben und berührungssicher gemacht werden konnten. Auf einer EURO-Platine wurden ein 50 V Ringkerntransformators (Talema Electronics TRT50218) mit Gleichrichter zur Umwandlung von Wechselstrom (AC) auf Gleichstrom (DC) und die drei Steuerkanäle untergebracht (Abb. 4.2.5).

Die Steuerungskanäle stellten die benötigte Spannung der in Reihe geschalteten HL-LEDs für jeden Typ bereit. Diese ergab sich aus der typischen Spannung (siehe Philips Datenblatt, 2008) der jeweiligen HL-LED-Typen. Bei jedem der drei Kanäle konnte über ein analoges Potentiometer der Tastgrad eines PWM-Signals (Pulsweitenmodulations-Signals), das durch einen Spannungskomparator erzeugt wurde, variiert werden. Das heißt, dass bei konstanter Frequenz die Impulsweite des Signals geregelt werden kann. Durch das PWM-Signal wurde ein

MOSFET (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor) mit einem geringen Durchgangswiderstand von $0,001 \Omega$ geschaltet und so die Stromstärke geregelt. Die Erhöhung der Stromstärke führte zu einer Steigerung der PPFd auf der durch die HL-LEDs zu belichtenden Fläche. Die Stromstärke wurde dabei über einen niederohmigen ($0,5 \Omega$) Nebenschlusswiderstand (Messwiderstand) gemessen. Eine Stromstärke über 350 mA der in Reihe geschalteten HL-LEDs konnte mit dieser HL-LED-Steuerung nicht überschritten werden.

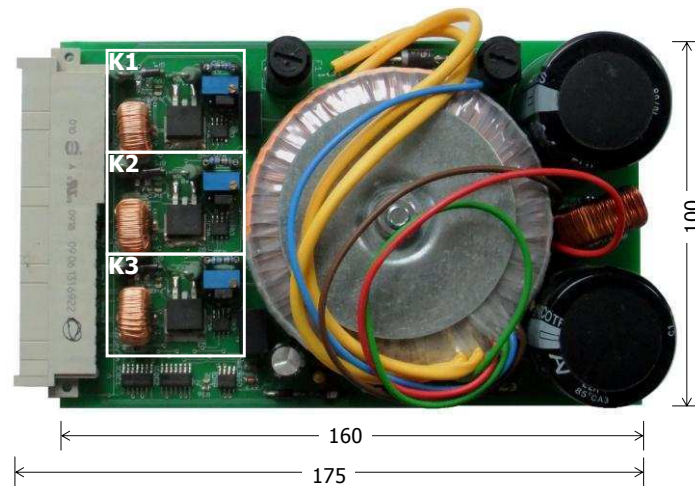


Abb. 4.2.5 Bild einer HL-LED-Steuerung mit einem Ringkerntransformator zwei großen Kondensatoren (rechts im Bild). Die weißen Rechtecke grenzen die einzelnen Steuerkanäle (K1 bis K3) der jeweiligen HL-LEDs ein.

4.2.2 Kontrollvariante

Die Kontrollvariante bestand aus einer Leuchtstofflampenbelichtung (58 W; Länge: 1500 mm; Durchmesser: 28 mm). Als Leuchtmittel wurden Leuchtstofflampen von Philips verwendet. Bei den Untersuchungen wurden folgende Lampentypen eingesetzt: Master TL-D 58W 840, Master TL-D 58W 840 mit Reflektor (Reflektor konstruiert am FG BGT der Leibniz Universität Hannover) und einer Master TL-D Reflex 58W 840. Die Leuchten wurden unter einem Gitterboden angebracht. Der Etagenabstand in einem Regalsystem aus Lochstangen betrug stets 300 mm, wodurch ein Abstand von Leuchtmittel zum Etagenboden von 210 mm gegeben war. Jeder Leuchtstofflampe war ein dimmbares elektronisches Vorschaltgerät (HÜCO EVG-HP 1x58W T8 MS3 A-DIM) vorgeschaltet, mit dem die Leuchtstofflampen stufenlos gedimmt werden konnten. Die Ansteuerung des EVGs geschah über ein Steuersignal (1V bis 10 V).

4.2.3 Methoden

Die Versuche mit dem HL-LED-Belichtungssystem wurden in einem Kulturraum bei einer Raumtemperatureinstellung von 20 °C bei ständiger Luftumwälzung durch einen Ventilator durchgeführt.

4.2.3.1 Messung der PPFD-Verteilungsmuster

Für das Ermitteln einer durchschnittlichen PPFD ($PPFD_{\emptyset}$) auf der zu belichtenden Fläche (Etagenfläche, 0,775 m²) wurde das Verteilungsmuster der PPFD (PAR-Verteilung) bestimmt. Dazu wurde die PPFD an 161 unterschiedlichen Messpunkten auf der Etagenfläche mit einem LI-250A Light Meter (LI-COR, Inc.) über den LI-190 Quantum Sensor (LI-COR, Inc.) gemessen. Die Werte entstanden aus 15 Sekunden Mittelwerten, die durch das Messgerät ermittelt werden konnten. Durch die Höhe der Sensorhalterung betrug die Messhöhe der PPFD 55 mm über der Fläche, auf den der Sensor platziert wurde. Die Messpunkte waren quadratisch auf der Fläche eines Etagenbodens angeordnet und hatten jeweils einen Abstand von 65 mm zueinander (Abb. 4.2.6).

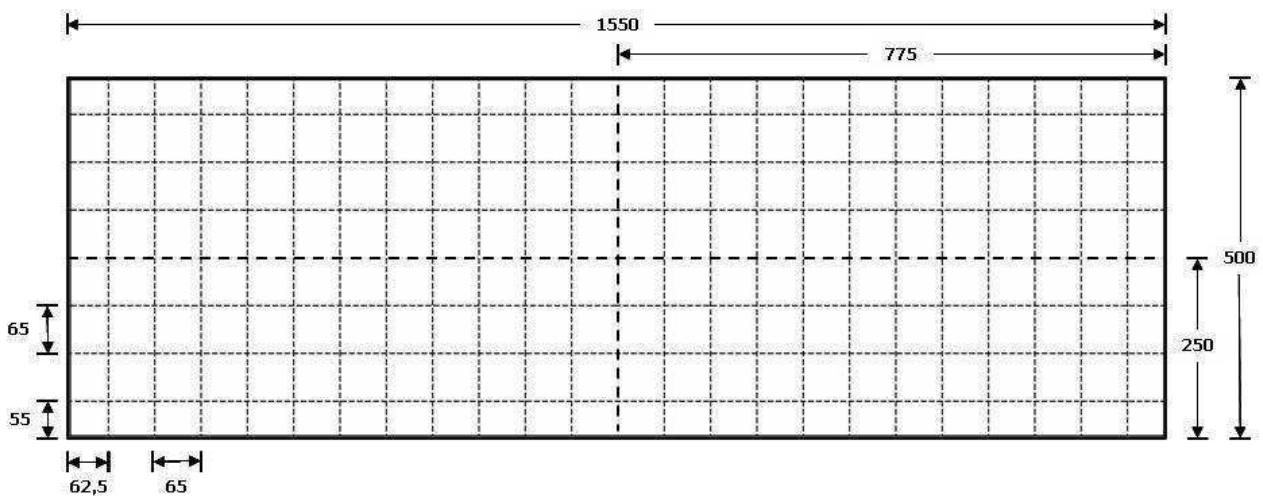


Abb. 4.2.6 Verteilungsmuster der Messpunkte über die Fläche eines Etagenbodens.
Die Schnittpunkte der gestrichelten Linien stellen die Messpunkte dar. Angaben in mm.

4.2.3.2 Messung der Stromaufnahme

Die elektrische Leistung des HL-LED-Belichtungssystems wurde mit einem geeichtem Impulsstromzähler (ShellCount EEM 12 – 25 A, 230 V, 5(25)A) mit Impulsgeber (2000 Impulse pro kWh) über einen Zeitraum von mindestens acht Stunden gemessen. Dieser wurde mit einer

Genauigkeitsklasse von 1 angegeben. Die Abweichung sollte demnach nicht mehr als 1 % vom Messwert ausmachen dürfen. Mit Hilfe eines Datenerfassungssystems („ITG 10“) wurden die Impulse über einen Zeitraum von 30 Minuten aufsummiert und abgespeichert. Aus den aufsummierten Werten wurde die mittlere benötigte elektrische Leistung (P , W) in einem Zeitraum von einer Stunde ermittelt.

4.2.4 Datenanalyse

4.2.4.1 Berechnung der durchschnittlichen PPFD

Aus den Daten der Verteilungsmessungen konnte die durchschnittliche PPFD ($PPFD_{\emptyset}$), über die Mittelwertbildung der einzelnen gemessenen PPFD-Werte, ermittelt werden. Für die Einstellung einer bestimmten $PPFD_{\emptyset}$ auf der zu belichtenden Fläche, wurden die Werte jeder einzelnen Messstelle über einen Faktor berechnet. Der Faktor ergab sich aus dem Quotienten der $PPFD_{\emptyset}$, die durch die Verteilungsmessung ermittelt wurde, und der einzustellenden $PPFD_{\emptyset}$.

4.2.4.2 Berechnung der Energieeffizienz

Die Energieeffizienz eines Belichtungssystems (siehe Kapitel 2.1), angegeben in $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$, wurde aus dem Quotienten der $PPFD_{\emptyset}$ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) und der aus den Messungen der Stromaufnahme ermittelten benötigten elektrischen Leistung gebildet. Da sich die $PPFD_{\emptyset}$ auf eine Fläche von einem Quadratmeter bezog, wurden die Daten der elektrischen Leistung, die sich auf die durch das Belichtungssystem belichtete Fläche von $0,775 \text{ m}^2$ bezog, auf einen Quadratmeter hochgerechnet.

4.2.4.3 Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung

Anhand von Messungen der Stromstärke (I , A) mit denen die HL-LEDs bei unterschiedlichen Versuchseinstellungen betrieben wurden, konnte ein durchschnittlicher Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung ermittelt werden.

Die Stromstärken der einzelnen HL-LED-Typen des Belichtungssystems wurden am Ausgang der Steuerungskanäle des jeweils zu betreibenden HL-LED-Typs gemessen. Die Messungen wurden bei einem Etagenabstand von 300 mm und unterschiedlicher $PPFD_{\emptyset}$, ansteigend in Schritten von $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis zu einem möglichen Maximum des jeweiligen HL-LED-Typs, gemessen. Die Abhängigkeit von Betriebsstromstärke und $PPFD_{\emptyset}$ konnte anhand einer Funktion dargestellt werden, mit deren Hilfe die Stromstärke bei jeder $PPFD_{\emptyset}$ zwischen $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und dem jeweiligen Maximum des HL-LED-Typs berechnet werden konnte.

Über die Daten der Stromstärke der HL-LEDs und der gemessenen Spannung (U , V) wurde die elektrische Leistung (P , W) für die je HL-LED-Typ betriebenen 24 HL-LEDs ermittelt ($P = U * I$ [W]). Aus den Messungen der Leistungsaufnahme des HL-LED-Belichtungssystems (Kapitel 4.4.3.2; Kapitel 5.3.3) konnte der Leistungsanteil der Steuerung an der gesamten benötigten elektrischen Leistung des Belichtungssystems errechnet und somit der Wirkungsgrad der Steuerungseinheit errechnet werden. Dazu wurde auch hier die Abhängigkeit von elektrischer Leistung und $PPFD_{\theta}$ anhand einer Funktion dargestellt.

4.2.4.4 Statistische Datenanalyse

Die statistischen Datenauswertungen und die graphischen Darstellungen der Ergebnisse von $PPFD$ -Verteilung und Energieeffizienz wurden mit SigmaPlot, Version 11.0 (Systat Software Inc.) durchgeführt. Die Daten wurden mit einer ANOVA (Varianzanalyse) auf eventuelle Unterschiede der Daten zwischen den Varianten überprüft. Je nach Normalverteilung und Homogenität der Varianzen wurde eine Einweg-ANOVA oder eine Kruskal-Wallis Einweg-ANOVA nach Rängen angewendet. Entsprechend der vorherigen Vorgehensweise wurde anschließend ein geeigneter multipler Mittelwertvergleich zwischen den verschiedenen Varianten durchgeführt.

Für die statistische Auswertung der unterschiedlichen $PPFD$ -Verteilungen wurden die Mittelwerte der quadrierten Abweichungen der in den Versuchen eingestellten durchschnittliche $PPFD$ miteinander verglichen.

4.2.5 Versuchsvariablen

Für die im Folgendem beschriebenen Untersuchungen wurde ein Belichtungssystem verwendet, welches mit vier Aluminiumprofilen in einfacher U-Form (siehe Abb. 4.2.2 B), also 24 HL-LEDs pro HL-LED-Typ, ausgestattet war.

4.2.5.1 HL-LED-Dichte

Zur Bestimmung der optimalen HL-LED-Dichte wurde die Anzahl der HL-LEDs eines HL-LED-Typs pro Belichtungssystem variiert. Es wurden drei Belichtungseinheiten mit einer HL-LED-Dichte pro HL-LED-Typ und Belichtungssystem von 12, 18 oder 24 HL-LEDs (zum Beispiel Abb 4.2.7) hergestellt. Diese ergaben HL-LED-Dichten von 16, 23 oder 31 HL-LEDs m^{-2} und HL-LED-Typ. Der Abstand zwischen den Aluminiumprofilen, auf denen jeweils sechs HL-LEDs pro Typ untergebracht waren, war immer gleich und der Abstand zwischen dem Rand des Gitterbodens und den äußeren Profile betrug immer die Hälfte des Abstandes der Profile zueinander. In allen

drei Varianten wurde ein Rot-Blau-Verhältnis der PPFD von 7:3 (RB 7:3) bei einer durchschnittlichen PPFD von $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und einem Etagenabstand von 240 mm eingestellt.

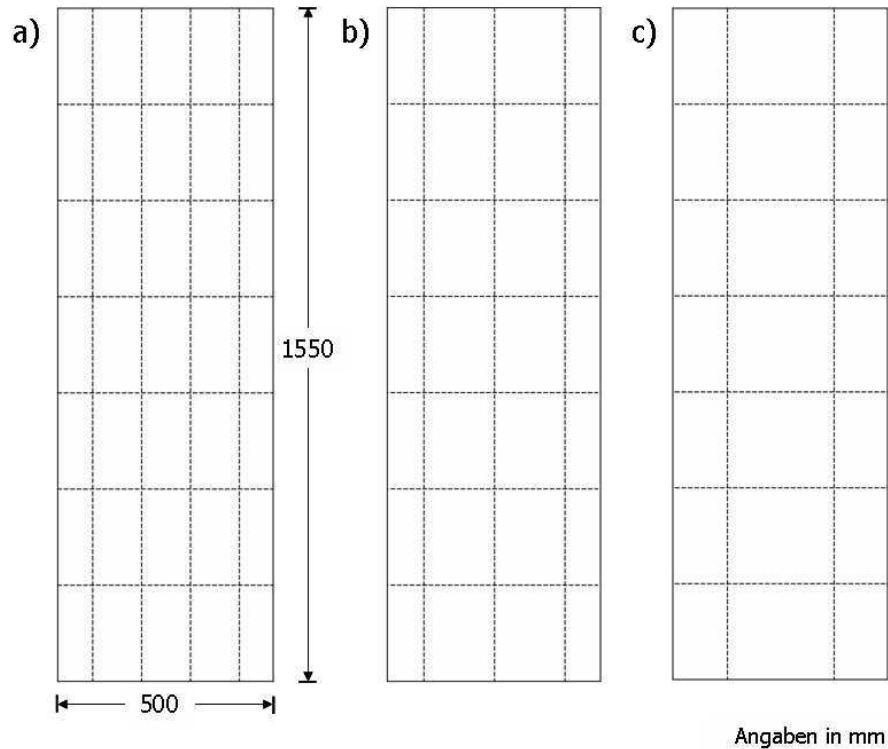


Abb. 4.2.7 Schematische Darstellung der HL-LED-Anordnung auf einem Gitterboden (1550 * 500 mm) mit a) 24 HL-LEDs, b) 18 HL-LEDs und c) 12 HL-LEDs. An den Schnittpunkten der gestrichelten Linien wurden jeweils eine HL-LED in blau und rot angebracht. Angaben in mm.

4.2.5.2 Etagenabstand

Die Messungen der Stromaufnahme und der PPFD-Verteilungsmuster der Belichtungssysteme wurde bei fünf unterschiedlichen Etagenabständen (300 mm, 270 mm, 240 mm, 210 mm und 180 mm) durchgeführt.

4.2.5.3 Durchschnittliche PPFD

Bei den unterschiedlichen Einstellungen des Etagenabstandes wurde zusätzlich die durchschnittliche PPFD ($PPFD_{\theta}$) der Belichtungssysteme variiert. Dazu wurden Werte von $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ eingestellt.

4.2.5.4 Kombinationen spektraler Wellenlängenbereiche

Eine weitere Variable bei den Versuchen stellte die Kombination spektraler Wellenlängenbereiche dar. Die Messungen wurden bei einem Rot-Blau-Verhältnis der PPF_{D₀} von 7:3 (RB 7:3) und 3:7 (RB 3:7) und einem Rot-Weiß-Verhältnis von 5:5 (RW 5:5) durchgeführt.

4.3 Pflanzenbauliche Untersuchungen

4.3.1 Versuchsaufbau

Die Versuchsanlage bestand aus mehreren Regaletagen, welche mit HL-LED-Belichtungssystemen, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, und einem Belichtungssystem mit Leuchtstofflampen ausgestattet waren. Der Etagenabstand der Versuchsregale betrug 300 mm. Das Strahlungsspektrum der Leuchtstofflampe wurde als Vergleich zu den Strahlungsqualitäten der HL-LEDs mit einem Spektrometer (Ocean Optics Inc., USB 400) aufgenommen.

Die Versuchsanlage stand in einem Kulturraum, in dem die maximale Raumtemperatur über eine Kühlung begrenzt und eine zu starke Absenkung der Temperatur bei ausgeschalteter Belichtung durch einen Heizlüfter (ismet SH 281 T, 2000 W) verhindert wurde. Die Luft des Kulturraums wurde permanent über einen Ventilator umgewälzt. Die Raumtemperatur konnte variiert und in den beschriebenen Versuchen der Kapitel 4.3.2.1 und 4.3.2.2 mit Thermoelementen gemessen und über einen „ITG 10“ (entwickelt am BGT) aufgezeichnet werden. Die Versuche mit *Gentiana cruciata*×*scabra*, *Canna indica* und *Kalmia latifolia* wurden in einem anderen Kulturraum durchgeführt, in welchen die Raumtemperaturen über NTCs (Negative Temperature Coefficient Thermistors) gemessen und die Daten über ein Mess- und Regelgerät (Labjack U12, LabJack Corporation) erfasst wurden. Die PPF_D wurde in beiden Räumen als durchschnittliche PPF_D (PPF_{D₀}, siehe Kapitel 4.2.4.1) eingestellt und die Konstanz mit einem LI-250A Light Meter (LI-COR, Inc.) über den LI-190 Quantum Sensor (LI-COR, Inc.) regelmäßig kontrolliert. Die Belichtungsdauer betrug in allen pflanzenbaulichen Versuchen 12 Stunden pro Tag.

Die Pflanzen wurden in zylindrischen Kulturgefäßen aus Kunststoff kultiviert (Durchmesser Boden: 92 mm; Durchmesser Deckel 112 mm; Höhe: 80 mm). Die Gefäße waren etwa 10 mm bis 15 mm mit Medium befüllt. Nach dem Bestücken der Becher mit Pflanzen wurden sie mit einer dünnen Kunststofffolie einlagig umwickelt. Die Transmission der Folie und des Kulturgefäßes wurde mit einem Spektrometer (Perkin Elmer Lambda 900 UV/VIS/NIR Spektrometer) ermittelt (siehe Kapitel 5.3.1).

Die Dauer einer Kulturpassage variierte je nach Kultur zwischen sechs und acht Wochen. Nach jeder Kulturpassage wurden die Pflanzen bearbeitet. Dazu wurden sie wieder vereinzelt und Stecklinge geschnitten, die in neues Medium überführt werden konnten. Die Kulturen durchliefen zum Teil mehrere Kulturpassagen, bei denen sich sowohl die Medienzusammensetzung als auch das Ziel unterschieden. Bei der Kultivierung auf Vermehrungsmedium (Phase 2; siehe Kapitel 2.3) soll die Pflanzenanzahl in einem Kulturgefäß erhöht werden. Die Kultivierung auf Stockmedium, beziehungsweise Zwischenmedium (zum Beispiel bei *Helleborus niger*), dient der Entwicklung des Sprosses und der Produktion uniformer Pflanzen sowie der Bewurzelung (Phase 3a). Auf einem sogenannten Produktionsmedium (Bezeichnungen der Medien nach Bock Bio Science GmbH) sollen die Pflanzen eine ausreichende Entwicklung hinsichtlich Streckung und Bewurzelung erfahren, damit sie zur Akklimatisierung unter Gewächshausbedingungen weiterkultiviert werden können (Phase 3b). Am Ende dieser Phase soll also eine verkaufsfertige Jungpflanze zur Weiterkultivierung in vivo erhalten werden.

4.3.2 Versuchspflanzen und Versuchsdurchführung

Die Pflanzen, die Kulturgefäße und die dazugehörigen Medien wurden von der Firma Bock Bio Science GmbH zur Verfügung gestellt. Die Pflanzen in den Untersuchungen mit *Phalaenopsis*-Hybriden und *Helleborus niger* wurden am Standort der Firma (Bremen) unter Mithilfe der Arbeitskräfte vor Ort ausgewertet. Alle anderen Kulturen wurden in Hannover am BGT ausgewertet. Am Standort Hannover wurden sämtliche Versuchspflanzen kultiviert. Die verwendeten Medien wurden teilweise modifiziert. Die genauen Medienmodifikationen bleiben hier aus Datenschutzgründen ungenannt.

Die Pflanzen wurden mit der $PPFD_{\emptyset}$ belichtet, welche sich im Betriebsablauf als optimal herausgestellt hat. Bei Versuchen mit Pflanzen der Gattung *Helleborus* und *Gentiana* wurde neben der Strahlungsqualität auch der Einfluss einer verringerten Strahlungsintensität untersucht. Die niedrigere durchschnittliche $PPFD$ ergab sich aus der Berücksichtigung der Chlorophyllabsorptionskurve zur selektiven Belichtung mit spezifischen Wellenlängenbereichen. Dazu wurden die Daten des Strahlungsspektrums einer Leuchtstofflampe (Philips Master TL-D 58 W 840) nur in dem Wellenlängenbereich zur Berechnung der $PPFD$ integriert, in dem die Absorption des Chlorophylls über 10 % liegt. Dadurch blieben bei der Integration die Wellenlängen zwischen 480 nm und 600 nm unberücksichtigt. Der Wert entsprach etwa 50 % von der gesamten $PPFD$ einer Leuchtstofflampe, wenn das Integral über das gesamte Strahlungsspektrum, also einschließlich des Bereichs von 480 nm bis 600 nm gebildet wird.

Durch die Ansteuerungsmöglichkeiten des HL-LED-Belichtungssystems (siehe Kapitel 4.2.1.4) konnte die $PPFD_{\emptyset}$ stufenlos verringert werden. Ein dimmbares elektronisches Vorschaltgerät machte dies auch bei einer Leuchtstofflampenbelichtung möglich (siehe Kapitel 4.2.2).

Allen Pflanzenversuchen waren das Ziel einer höheren Vermehrungsrate gemein. Weitere gewünschte Effekte wurden durch die LED-Belichtung im Folgenden für die jeweiligen Kulturen beschrieben.

4.3.2.1 *Gentiana cruciata* × *scabra* ‘Alpine Success BLUE 05’

Für diese Versuche wurde der Enzian *Gentiana cruciata* × *scabra* ‘Alpine Success BLUE 05’, auch Japanischer Herbstenzian, verwendet. Die Sorte zeichnet sich durch eine große, intensiv blaue Blüte (bis 5 cm Länge) und eine langen Blütezeit aus (United States Patent PP18767, 2008).

Der Enzian wurde bei einer Raumtemperatur von 20 °C auf MS-Medium (Murashige und Skoog, 1962) kultiviert. Die Pflanzen wiesen nach Angaben der Firma Bock Bio Science GmbH unter konventionellen Kulturbedingungen eine hohe Internodienstreckung auf, bei der die Pflanzen oft bis an den Becherdeckel reichten. Teilweise trat eine unerwünschte Knospenbildung auf, die eventuell auf eine zu lange Belichtungsdauer und niedrige Temperaturen zurückzuführen war. Neben den unter Kapitel 4.3.3 aufgeführten Auswertungsparametern wurden hier auch die Anzahl der Knospen pro Kulturgefäß erfasst. Beim Enzian wurde nur ein Medium für Vermehrung und Bewurzelung der Pflanzen verwendet. Eine gute Pflanzenentwicklung auf dem Medium ist ausreichend, um eine direkte Akklimatisierung der Pflanzen unter Gewächshausbedingungen durchzuführen. Die Dauer einer Kulturpassage betrug acht Wochen und wurde insgesamt vier Mal wiederholt. Für jede Variante wurden sechs Becher mit jeweils 20 Pflanzen verwendet. Die Belichtungsvarianten sind in Tab. 4.3.1 aufgeführt.

Weitere Enzian-Versuche wurden bei einer niedrigeren $PPFD_{\emptyset}$ von $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei ansonsten gleichen Kulturbedingungen aber mit einer geringeren Anzahl an Varianten durchgeführt (Tab. 4.3.2). Zusätzlich zur Kontrollvariante mit einer Leuchtstofflampenbelichtung (LSL_13) wurde noch eine Leuchtstofflampen-Variante bei betriebsüblicher $PPFD_{\emptyset}$ von $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ eingesetzt (LSL_26).

Tab. 4.3.1 Versuchsvarianten der Versuche mit *Gentiana cruciata*×*scabra* 'Alpine Success BLUE 05'. Der relative Anteil an der durchschnittlichen PPFD durch rote (R), blaue (B) oder kaltweiße (W) HL-LEDs ist angegeben.

Variante	PPFD _Ø , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Anteil Rot, (-)	Anteil Blau, (-)	Anteil Kaltweiß, (-)
LSL	26,0	0,0	0,0	0,0
RB 7:3	26,0	0,7	0,3	0,0
RB 5:5	26,0	0,5	0,5	0,0
RB 3:7	26,0	0,3	0,7	0,0
RB 1:9	26,0	0,1	0,9	0,0
RW 7:3	26,0	0,7	0,0	0,3
RW 5:5	26,0	0,5	0,0	0,5
RW 3:7	26,0	0,3	0,0	0,7

Tab. 4.3.2 Versuchsvarianten der Versuche mit *Gentiana cruciata*×*scabra* 'Alpine Success BLUE 05' bei geringerer durchschnittlichen PPFD. Der relative Anteil an der durchschnittlichen PPFD durch rote (R), blaue (B) oder kaltweiße (W) HL-LEDs ist mit angegeben.

Variante	PPFD _Ø , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Anteil Rot, (-)	Anteil Blau, (-)	Anteil Kaltweiß, (-)
LSL_26	26,0	0,0	0,0	0,0
LSL_13	26,0	0,0	0,0	0,0
RB 7:3	26,0	0,7	0,3	0,0
RB 3:7	26,0	0,3	0,7	0,0
RW 5:5	26,0	0,5	0,0	0,5
RW 3:7	26,0	0,3	0,0	0,7

4.3.2.2 *Canna indica*

Die Pflanzen wurden in dem gleichen Kulturraum unter den gleichen Bedingungen (20 °C Raumtemperatur, 12 Std. Belichtungsdauer, PPFD_Ø von 26 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, MS-Medium) und Belichtungsvarianten (siehe Tab. 4.3.1) wie *Gentiana cruciata*×*scabra* kultiviert. Die Pflanzen wuchsen über vier Kulturpassagen von jeweils acht Wochen. Für jede Variante wurden sechs Becher mit jeweils 18 Pflanzen verwendet. Ein starkes Längenwachstum ließ die Blätter schnell bis an die Becherdeckel reichen, was ähnlich negative Effekte wie bei *Gentiana cruciata*×*scabra* hervorrief (mdl. Angabe Bock Bio Science GmbH).

4.3.2.3 *Kalmia latifolia*

Kalmia latifolia 'Corona' und *K. latifolia* 'Ginkona' wurden unter den Bedingungen wie in Kapitel 4.3.2.1 beschrieben kultiviert (20 °C Raumtemperatur, 12 Std. Belichtungsdauer, PPF_D von 26 μmol m⁻² s⁻¹, Belichtungsvarianten siehe Tab. 4.3.1).

Die Pflanzen wurden auf einem von Bock Bio Science GmbH modifizierten Woody Plant Medium (Lloyd und Mc Crown, 1980) kultiviert. Es wurden sechs Becher pro Variante mit jeweils zwölf Pflanzen verwendet. Nach jeder der drei Kulturpassagen von jeweils acht Wochen wurden die Pflanzen ausgewertet (siehe Kapitel 4.3.3), bearbeitet und erneut auf neues Medium überführt.

Beide Sorten sind winterhart und erreichen nach etwa zehn Jahren eine Höhe von 120 cm. *K. latifolia* 'Corona' hat weiße Blüten mit dunkelkastanienfarbigen Punkten im Innern. *K. latifolia* 'Ginkona' hat sehr große Blüten mit fast 40 mm Durchmesser und blüht in Weiß mit rosa Beschlag (<http://www.in-vitro.pl/oferta.php?p=6>; Stand 18.05.2011).

4.3.2.4 *Phalaenopsis*-Hybriden

Es wurden drei Sorten von *Phalaenopsis*-Hybriden ('Jaunina', 'Paulina', 'Don Giovanni') mit unterschiedlichem Wuchsverhalten untersucht. Nach Angaben der Firma Bock Bio Science GmbH zeigte die *P.*-Hybride 'Jaunina' unter einer Leuchtstofflampenbelichtung für gewöhnlich ein durchschnittliches Wuchsverhalten und eine ebensolche Vermehrungsrate. Die *P.*-Hybride 'Paulina' wurde charakterisiert durch eine hohe Vermehrungsrate und geringe Sprosstreckung. *P.*-Hybride 'Don Giovanni' wies eine geringe Vermehrungsrate mit sehr starkem Sprosswachstum bereits auf Vermehrungsmedium auf. Auch in der Phase 3b, auf dem sogenannten Stockmedium zur weiteren uniformen Ausbildung der Sprosse und der Bewurzelung, zeigte sich ein sehr hohes Wachstum mit langsamer Bewurzelung.

Alle Hybriden wurden in einer Kulturkammer mit einer Raumtemperatur von 26 °C und bei 34 μmol m⁻² s⁻¹ auf einem nach Bock Bio Science GmbH modifizierten Medium nach Vacin und Went (1949) kultiviert. Es wurden drei Kulturpassagen von je acht Wochen durchlaufen, zwei auf Vermehrungsmedium und eine auf Stockmedium. Die Versuchsvarianten sind in Tab. 4.3.3 dargestellt. Für die Versuche wurden 16 Becher pro Sorte und Variante mit jeweils 18 Pflanzen pro Becher verwendet.

Tab. 4.3.3 Versuchsvarianten der Versuche mit *Phalaenopsis*-Hybriden.
Der relative Anteil an der durchschnittlichen PPFD durch rote (R), blaue (B), kaltweiße (W) oder grüne (G) HL-LEDs ist angegeben.

Variante	PPFD _Ø , μmol m ⁻² s ⁻¹	Anteil Rot, (-)	Anteil Blau, (-)	Anteil Kaltweiß, (-)	Anteil Grün, (-)
RB 1:1	34,0	0,5	0,5	0,0	0
RW 1:1	34,0	0,5	0,0	0,5	0
RWB 1:1:1	34,0	0,33	0,33	0,33	0
RGB 1:1:1	34,0	0,33	0,33	0,0	0,33
LSL	34,0	0,0	0,0	0,0	0,0

4.3.2.5 *Helleborus niger* und *H. x ericsmithii*-Hybride 'St. Basilius'

Für die Untersuchungen wurden drei Klone der Gattung *Helleborus* herangezogen. Die Sortennamen zweier Klone bleiben hier aus Datenschutzgründen ungenannt und werden im Folgenden mit *Helleborus niger* Klon I und Klon II bezeichnet. Nach Angaben von Bock Bio Science GmbH war der Klon I schwachwüchsig mit hellen und dünnen Blättern, jedoch verfügte er über eine hohe Vermehrungsrate. Klon II zeigte gewöhnlich unter einer Leuchtstofflampenbelichtung ein durchschnittliches Wuchsverhalten und eine mittlere Vermehrungsrate. *Helleborus x ericsmithii*-Hybride 'St. Basilius' wies hingegen ein optimales Wuchsverhalten auf und bildete kompakte, gut ausgebildete Pflanzen mit hohen Vermehrungsraten.

Die Raumtemperatur der Kulturkammer wurde auf 12 °C eingestellt. Es wurden vier Kulturpassagen von je sechs Wochen Dauer durchgeführt; zwei Phasen auf Vermehrungsmedium, und zwei auf einem Medium zur weiteren Entwicklung der Sprosse (Zwischenmedium). Die Medien für die *Helleborus*-Kultivierung wurden eigens von der Bock Bio Science GmbH entwickelt. Daher werden die einzelnen Komponenten aus Datenschutzgründen nicht aufgeführt. Für die Versuche wurden acht Becher pro Variante (Tab. 4.3.4) und Sorte mit jeweils 25 Pflanzen verwendet und die Becher randomisiert in den entsprechenden Etagen aufgestellt.

Neben den Versuchen bei einer betriebsüblichen PPFD_Ø wurden die Pflanzen in einem weiteren Versuch bei ansonsten gleichen Bedingungen und Varianten mit einer geringeren PPFD_Ø von 13 μmol m⁻² s⁻¹ belichtet.

Tab. 4.3.4 Versuchsvarianten der *Helleborus*-Versuche. Der relative Anteil der roten (R), blauen (B) oder kaltweißen (W) HL-LEDs an der durchschnittlichen PPFD ist mit angegeben.

Variante	PPFD _Ø , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Anteil Rot, (-)	Anteil Blau, (-)	Anteil Kaltweiß, (-)
RB 7:3	26,0	0,7	0,3	0,0
RB 3:7	26,0	0,3	0,7	0,0
RB 1:9	26,0	0,1	0,9	0,0
RW 3:7	26,0	0,3	0,0	0,7
W	26,0	0,0	0,0	1,0
LSL	26,0	0,0	0,0	0,0

4.3.3 Auswertungsparameter

Bei den Auswertungen von *Gentiana cruciata*×*scabra*, *Canna indica* und *Kalmia latifolia* wurde zuerst eine visuelle Bonitur der **Blattfärbung** durchgeführt. Die Färbung wurde in Boniturnoten mit Hilfe der normierten RAL-Farben eingeteilt, von gelbgrün (RAL 1618; Boniturnote 1) über grasgrün (RAL 6010; Boniturnote 2) bis laubgrün (RAL 6002; Boniturnote 3). Die Boniturnoten bei *Canna indica* wurde um einen Grünton erweitert und bei den *Kalmia*-Arten um einen Rotton, der bei *Kalmia latifolia* 'Ginkona' auftreten konnte. Die **Pflanzenhöhe** wurde durch die Einteilung der gesamten Pflanzen eines Bechers in Größenordnungen (1 cm bis 2 cm, 2 cm bis 3 cm, 3 cm bis 4 cm, 4 cm bis 5 cm und > 5 cm) bestimmt. Die Pflanzenhöhe wurde ab der Mediumoberfläche gemessen. Je nach Füllhöhe des Mediums grenzte die Größenordnung > 5 cm direkt an den Becherdeckel. Im Falle der *Kalmia latifolia* wurde die mittlere Höhe der Pflanzen eines Kulturgefäßes in mm angegeben. Der **Frischmassezuwachs** pro Pflanzen wurde über die Differenz des Bechergewichts mit Pflanzen bei Versuchsbeginn und -ende bestimmt, und die Gewichtszunahme der Pflanzen eines Bechers auf eine einzelne auf das Medium aufgelegte Pflanze bezogen. Die **Vermehrungsrate** wurde über die Anzahl der aus den Pflanzen eines Bechers geschnittenen Stecklinge ermittelt. Unmittelbar vor jeder Versuchsauswertung wurden Messungen der **maximalen Photosystem II Quantenausbeute (Qy_max)** mit einem Chlorophyllfluoreszenz-Spektrometer (Open FluorCam FC 800-O/1010 von Photon Systems Instruments) von jedem einzelnen Becher durchgeführt. Das Spektrometer stellt ein Imagingsystem dar, mit dem alle Pflanzen eines Kulturgefäßes auf einmal erfasst werden können. Qy_max beschreibt die Quanteneffizienz, wenn alle Reaktionszentren des Photosystems II (PSII) geöffnet sind (Genty et al, 1989). Qy_max, bietet Informationen über den zugrundeliegenden Prozess, der die Effizienz des PSII verändert. Die Werte dunkeladaptierter Pflanzen spiegeln die potentielle Quanteneffizienz des

PSII wieder (Johnsen et al., 1993). Für die Messungen mussten die Deckel der Kulturgefäße ausgetauscht werden, da diese meist von innen mit Kondenswasser benetzt waren und dies zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen konnte. Die Pflanzen wurden vor jeder Messung 30 Minuten dunkeladaptiert und stets im gleichen Zeitraum (10 bis 12 Uhr MEZ) gemessen. Die PPFD des Aktinischen Lichts lag bei $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, die des Sättigungsimpulses bei etwa $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Bei den ersten Versuchen mit *Phalaenopsis*-Hybriden wurden nur die zwei Auswertungsparameter Vermehrungsrate und Frischmassezuwachs untersucht und bei den Versuchen mit *Helleborus* einzig die Vermehrungsrate. Jedoch wurden zusätzlich die vermehrten *Helleborus* in zwei Pflanzenkategorien (Pflanzenkategorie 1 und 2) eingeteilt. Die Pflanzenkategorie bestimmte die weitere Behandlung der Pflanzen. Die Pflanzen der Kategorie 1 waren weit genug entwickelt um sie zur letztendlichen Vorbereitung auf die Akklimatisierung auf einem sogenannten Produktionsmedium weiter zu kultivieren. Die Pflanzen der Kategorie 2 wurden nochmals auf ein Medium zur Sprossentwicklung überführt, damit die Pflanzen das Entwicklungsstadium zur Weiterkultivierung auf einem Produktionsmedium erreichten.

4.3.4 Datenanalyse

Die statistische Datenauswertung und die graphische Darstellung der Ergebnisse wurden mit SigmaPlot, Version 11.0 (Systat Software Inc.) durchgeführt. Um die Daten jedes Auswertungsparameters in den einzelnen Varianten über die vier Kulturpassagen zu vergleichen wurden diese mit einer Zweiweg-ANOVA, mit den Faktoren Kulturpassage und Variante, untersucht. Bei einfaktoriellen multiplen Vergleichen wurde vorweg bei Normalverteilung und gleichen Varianzen eine Einweg-ANOVA angewandt. Waren die Daten nicht normalverteilt wurde mit einer Kruskal-Wallis Einweg-ANOVA nach Rängen auf eventuelle Unterschiede zwischen den Daten der unterschiedlichen Varianten getestet. Für den anschließenden Mittelwertvergleich der Varianten wurde ein multipler Vergleich der Daten nach der Dunn's Methode oder mit einem Multiplen Test mit α -Adjustierung nach Bonferroni angewendet.

5 Ergebnisse

5.1 Photonenflussausbeute der Hochleistungs-LEDs

Die Daten der mit einem Spektrometer aufgenommenen Strahlungsspektren der HL-LEDs konnten nach Kalibrierung des Spektrometers und der Ulbrichtkugel in den Strahlungsfluss und den Photonenfluss umgerechnet werden. Der dazu notwendige Kugelfaktor, welcher sich aus der Kalibrierung der Ulbrichtkugel ergab, lag bei 0,03938.

5.1.1 Strahlungsspektren der Hochleistungs-LEDs

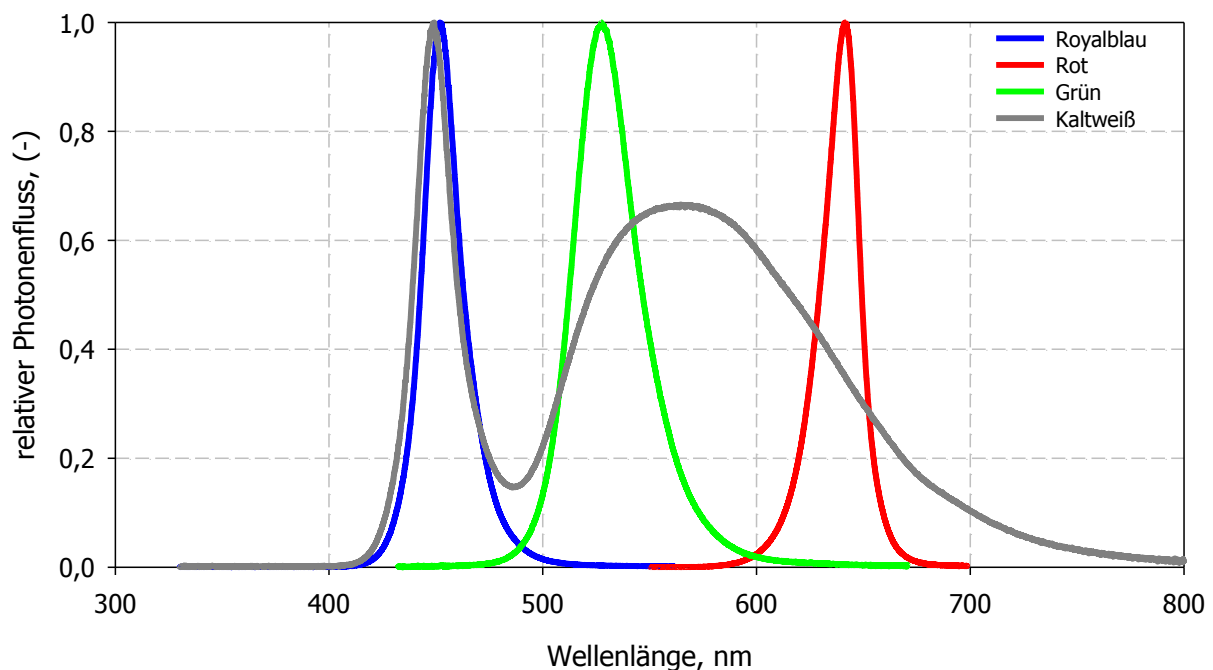


Abb. 5.1.1 Relative Strahlungsspektren von HL-LEDs des Modells LUXEON Rebel der Typen Royalblau, Rot, Grün und Kaltweiß. Die Spektren wurden bei einer Stromstärke von 350 mA und 25 °C Sperrschichttemperatur aufgenommen.

Die drei farbigen HL-LED-Typen zeigten ein typisch schmalbandiges Strahlungsspektrum mit einem deutlichen Peak. Der Wellenlängenbereich, in dem die HL-LEDs Strahlung emittieren, erstreckte sich maximal über etwa 130 nm im Beispiel der grünen HL-LEDs (Abb. 5.1.1). Die Breite der Strahlungsspektren der blauen und roten HL-LEDs war geringer als 100 nm. Dabei lagen die Peakwellenlängen (siehe Kapitel 5.1.4) nicht unbedingt in der Mitte des jeweils

emittierten Strahlungsspektrums, wie es zum Beispiel deutlich bei den grünen HL-LEDs zu erkennen ist.

Das Strahlungsspektrum der kaltweißen HL-LED hob sich deutlich von den Spektren der schmalbandigen, farbigen HL-LEDs ab. Das Strahlungsspektrum bis 470 nm ähnelte sehr dem der blauen HL-LEDs. Über den grüngelben Wellenlängenbereich erstreckte sich das Strahlungsspektrum in Form einer Welle, die im roten Wellenlängenbereich langsam ausläuft. Das Verhältnis vom wellenförmigen Teil des Strahlungsspektrums zum schmalbandigen Teil im blauen Wellenlängenbereich ist typisch für eine kaltweiße HL-LED. Bei einer warmweißen HL-LED würde der Peak im blauen Wellenlängenbereich unter dem der wellenförmigen Emission im grünen Wellenlängenbereich liegen, wodurch der Anteil an blauer Strahlung im Verhältnis zum restlichen Strahlungsspektrum verringert wird.

5.1.2 Photonenflussausbeute und Wirkungsgrad einzelner HL-LEDs

Die Photonenflussausbeute und der Wirkungsgrad der HL-LEDs wurden bei den zwei Parametern Betriebsstromstärke und Sperrschichttemperatur untersucht. Dazu wurden die gesamte Strahlungsleistung und der Photonenfluss im Wellenlängenbereich der PAR (400 bis 700 nm) aus den Daten der Strahlungsspektren, die in der Ulbrichtkugel erfasst wurden, berechnet. Neben der Berechnung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute (*PPFA*) ist die Berechnung des Wirkungsgrades interessant, zum Beispiel für die Kalkulation der benötigten Kühlleistung zur Abfuhr der durch den HL-LED-Betrieb entstehenden, überschüssigen Verlustleistung in Form von Wärme.

Bei der Durchführung der Versuche wurde die Platinentemperatur der HL-LEDs gemessen. Die Sperrschichttemperatur (T_J), also die Temperatur des LED-Chips gemessen in °C, stimmte allerdings nicht mit der Platinentemperatur überein. Diese Abweichung wurde auf Basis der erhaltenen Ergebnisse korrigiert. Die Sperrschichttemperatur ist abhängig von der umgesetzten elektrischen Leistung (P) der HL-LED und wird zusammen mit dem gesamten thermischen Widerstand ($R_{th, ges}$) vom HL-LED-Chip bis zum Thermoelement und der Platinentemperatur ermittelt (Singer et al., 2007).

$$T_J = P * R_{th, ges} + T_B \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.1)$$

Der thermische Widerstand setzte sich zusammen aus dem inneren thermischen Widerstand der HL-LED ($R_{th, JP}$) und dem thermischen Widerstand zwischen der HL-LED und dem Temperatursensor. Letzterer wurde hier gebildet aus dem thermischen Widerstand der HL-LED-

Platine von HL-LED bis zum auf der HL-LED-Platine montierten Thermoelement ($R_{th,PM}$) und dem thermischen Widerstand zwischen HL-LED-Platine und dem Thermoelement ($R_{th,MT}$).

$$T_J = P * (R_{th,JP} + R_{th,PM} + R_{th,MT}) + T_P \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.2)$$

Die elektrische Leistung (P) ergab sich aus der Betriebsstromstärke und der Spannung (siehe Kapitel 4.2.4.3). $R_{th,JP}$ konnte dem Datenblatt der HL-LED entnommen werden und wird mit 10 K W^{-1} angegeben, mit Ausnahme der roten HL-LEDs mit 12 K W^{-1} (Philips Datenblatt, 2008). $R_{th,PM}$ wurde mit dem Wärmeleitwiderstand für einen Zylindermantel der Länge (l_{Zyl}) und $R_{th,MT}$ mit dem Wärmeleitwiderstand in einer Platte mit der Fläche (A) berechnet:

$$R_{th,PM} = \frac{1}{\lambda_{Alu} \cdot 2\pi \cdot l_{Zyl}} \cdot \ln\left(\frac{r2}{r1}\right) \quad (\text{K W}^{-1}) \quad (5.3)$$

$$R_{th,MT} = \frac{l_{Pl}}{\lambda_{WK} \cdot A} \quad (\text{K W}^{-1}) \quad (5.4)$$

Die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium (λ_{Alu}) beträgt $235 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Ostermann, 2007) und die Wärmeleitfähigkeit des Wärmeleitklebers (λ_{WK}) $7,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ nach Angaben des Herstellers. Der Radius der HL-LED-Linse, unter der sich die Wärmefalle (Thermal Pad) befand, wurde mit $0,00138 \text{ m}$ als Innenradius ($r1$) angenommen. Der Außenradius ($r2$) von $0,006 \text{ m}$ ergab sich aus dem Abstand von HL-LED-Mitte bis zur Mitte des Thermoelements. Die Länge des Zylindermantels (l_{Zyl}) wurde mit der Schichtdicke der HL-LED-Platine auf $0,001 \text{ m}$ festgelegt. Als Länge der Platte (l_{Pl}) wurde die Schichtdicke des Wärmeleitklebers von $0,0001 \text{ m}$ angenommen und die Fläche (A) mit $0,00000707 \text{ m}^2$, welche sich aus dem Radius der Auflagefläche des Thermoelements ergab. Aus den Daten ergab sich ein gesamter thermischer Widerstand ($R_{th,ges}$) von $12,882 \text{ K W}^{-1}$.

Die Differenz zwischen Platinentemperatur und Sperrschichttemperatur (ΔT_{JP}) stieg mit zunehmender Betriebsstromstärke. Der Zusammenhang zwischen ΔT_{JP} und Betriebsstromstärke war linear mit einem minimalen Bestimmtheitsmaß (R^2) von $0,9896$ bei den roten HL-LEDs. Die Sperrschichttemperatur der roten HL-LEDs stieg mit zunehmender Betriebsstromstärke mit $34,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ am stärksten (hervorgehend aus Tab. 5.1.1). Anhand der Ergebnisse vom Einfluss der Sperrschichttemperatur auf die Photosynthetische Photonenflussausbeute und den Wirkungsgrad der HL-LEDs (siehe Kapitel 5.1.2.2) konnten die Daten des Einflusses der Betriebsstromstärke korrigiert werden. Dazu wurde die erwartete Abweichung der

Photosynthetischen Photonenflussausbeute ($\Delta PPFA$) und des Wirkungsgrades ($\Delta Watt$) zwischen der Platinentemperatur (25 °C) und der tatsächlichen Sperrschichttemperatur (ΔT_{JP}) bei jeder Messung des Einflusses der Betriebsstromstärke berücksichtigt.

Tab. 5.1.1 Sperrschichttemperaturen der HL-LED-Typen bei einer Betriebsstromstärke von 50 mA ($T_{J, min}$) und 700 mA ($T_{J, max}$) und die dabei entstehende maximale, temperaturbedingte Änderung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute ($\Delta PPFA$).

HL-LED-Typ	$T_{J, min}$ °C	$T_{J, max}$ °C	$\Delta PPFA$, %
Royalblau	26,8	55,3	4,1
Grün	26,7	55,7	6,1
Rot	26,5	61,1	12,6
Kaltweiß	26,8	54,4	4,6

5.1.2.1 Einfluss der Betriebsstromstärke

Durch den Einsatz einer Zweipunktregelung zur Regulierung der Sperrschichttemperatur schwankte die Temperatur um die zu haltenden 25 °C. Die Schwankungen nahmen mit steigender Stromstärke durch die erhöhte Wärmeentwicklung am HL-LED-Chip zu. Zum Zeitpunkt der Spektrenaufnahme lag die Sperrschichttemperatur stets zwischen 24,7 °C und 25,3 °C.

Alle vier HL-LED-Typen zeigten einen Abfall der Photosynthetischen Photonenflussausbeute mit steigender Betriebsstromstärke (Abb. 5.1.2). Dabei war die Stärke des Abfalls der Photonenanzahl, die die HL-LEDs emittierten und einem Watt zugeführter, elektrischer Leistung in einer Sekunde, abhängig vom HL-LED-Typ. Bei diesen wiesen die roten HL-LEDs den stärksten Abfall, mit einer Differenz zwischen 50 mA und 700 mA von $0,77 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$, auf. Der Kurvenverlauf war bei diesem HL-LED-Typ ein fast linearer. Im Gegensatz dazu konnte bei den anderen HL-LED-Typen ein unterproportionaler Abfall bei steigender Stromstärke beobachtet werden. Bis zu einer Betriebsstromstärke von 500 mA waren die roten HL-LEDs die effizientesten. Nur bei höheren Stromstärken lagen die Werte der kaltweißen HL-LEDs durch den geringen Kurvenabfall mit einer Differenz von $0,45 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ zwischen 50 mA und 700 mA, über denen der roten HL-LEDs. Der Kurvenabfall von Royalblau war mit $0,21 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ über den gemessenen Stromstärkebereich am niedrigsten. Die grünen HL-LEDs wiesen auch bei niedrigen Betriebsstromstärken eine sehr geringe Photosynthetische

Photonenflussausbeute auf, die gerade bei höheren Betriebsstromstärken maximal die Hälfte dessen erreichte, was die drei anderen HL-LED-Typen erreichten.

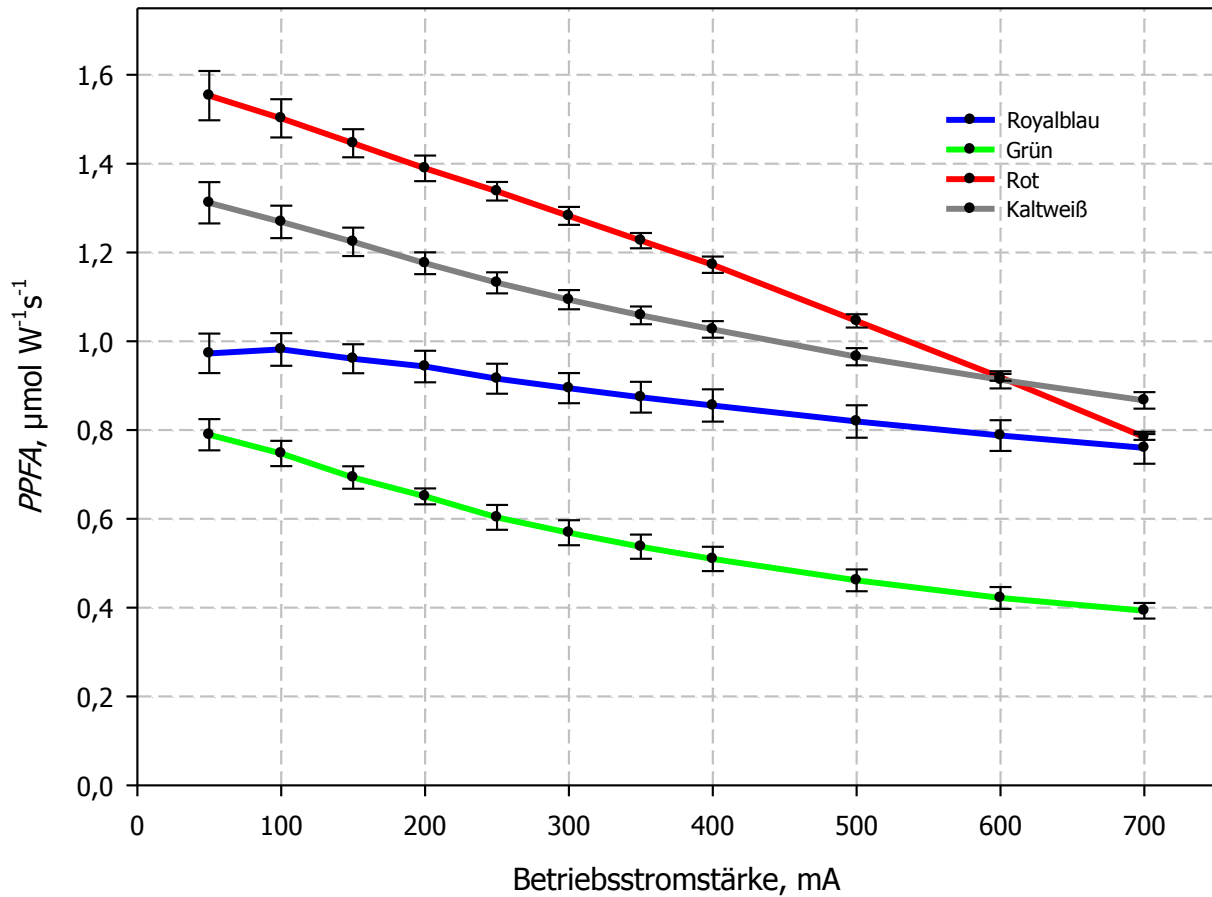


Abb. 5.1.2 Photosynthetische Photonenflussausbeute (*PPFA*) von vier unterschiedlichen HL-LED-Typen des ModellSE LUXEON® Rebel in Abhängigkeit von der Betriebsstromstärke. Für das Ermitteln der Werte wurden sechs HL-LEDs eines HL-LED-Typs bei einer Sperrschichttemperatur von 25 °C vermessen ($n = 6$).

Die Standardabweichungen waren im Bereich niedriger Stromstärken bis 150 mA größer als bei höheren Stromstärken, was bei den kaltweißen und roten HL-LEDs sehr deutlich wurde. Die blauen HL-LEDs zeigten durchweg höhere Abweichungen.

Die Kurvenverläufe des Wirkungsgrades wiesen bei steigender Betriebsstromstärke ähnliche Verläufe auf wie die der Photosynthetischen Photonenflussausbeute. Der Wirkungsgrad fiel bei allen vier HL-LED-Typen mit zunehmender Betriebsstromstärke ab (Abb. 5.1.3). Die Stärke des Abfalls war wiederum abhängig vom jeweiligen HL-LED-Typ. Dennoch werden bei der

Betrachtung des Wirkungsgrades der HL-LEDs Unterschiede gegenüber der Photosynthetischen Photonenflussausbeute sichtbar, da hier eine andere Gewichtung der Daten vorlag.

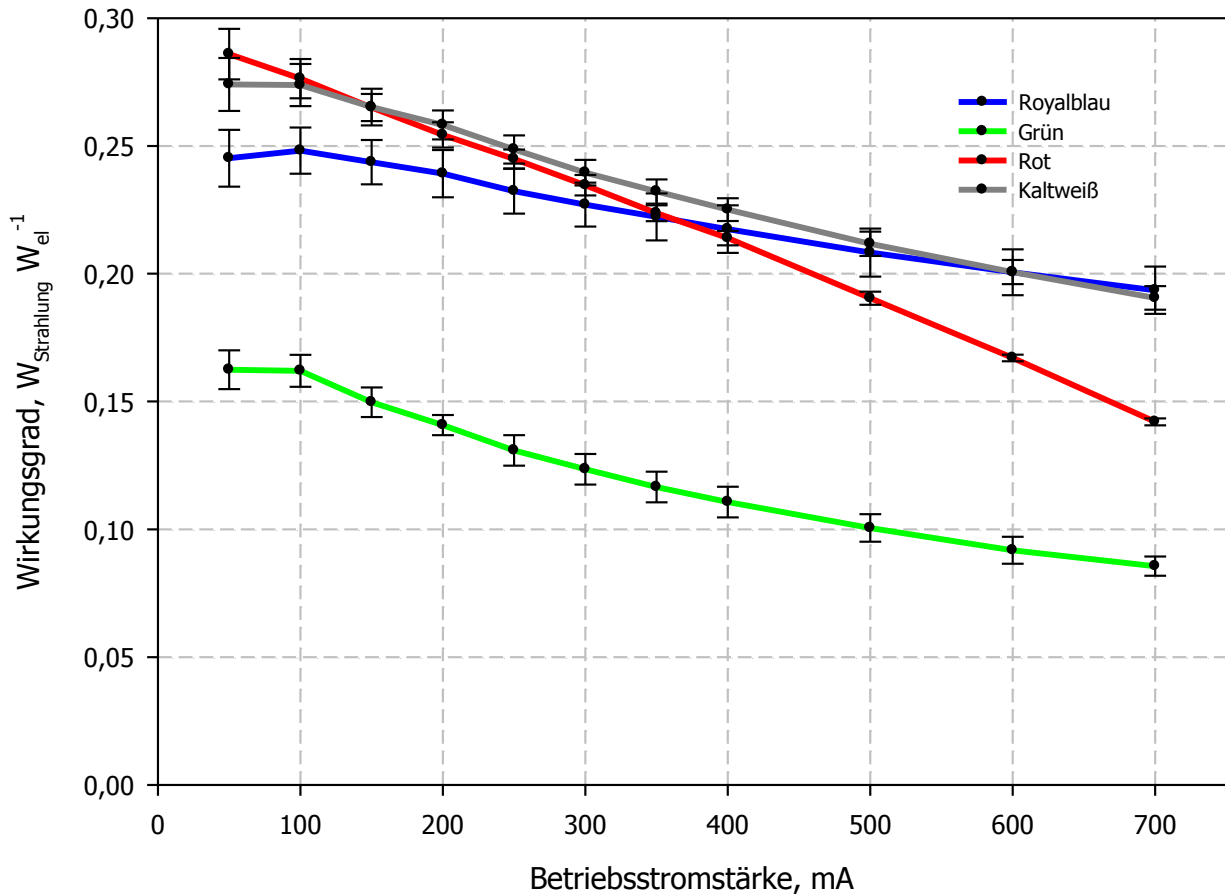


Abb. 5.1.3 Wirkungsgrad von vier unterschiedlichen HL-LED-Typen des Modells LUXEON® Rebel in Abhängigkeit von der Betriebsstromstärke.
Für das Ermitteln der Werte wurden sechs HL-LEDs eines HL-LED-Typs bei einer Sperrschichttemperatur von 25 °C vermessen (n = 6).

Der Kurvenabstand zwischen den kaltweißen und den blauen HL-LEDs war im Vergleich zu den Kurven in Abb. 5.1.2. deutlich verringert. Der Kurvenabfall von Royalblau war mit $0,05 W_{\text{Strahlung}} W_{\text{el}}^{-1}$ über den Bereich von 50 mA bis 700 mA wieder am niedrigsten. Der Wirkungsgrad der roten HL-LEDs war, mit einer hohen Wirkungsgraddifferenz von $0,14 W_{\text{Strahlung}} W_{\text{el}}^{-1}$ zwischen 50 mA und 700 mA, bereits bei einer Betriebsstromstärke von 150 mA geringer als der der kaltweißen und bei 350 mA kleiner als der der blauen HL-LEDs. Auch bei Betrachtung des Wirkungsgrades emittierten die grünen HL-LEDs die geringste Strahlungsleistung bezogen auf ein Watt zugeführter, elektrischer Energie.

5.1.2.2 Einfluss der Sperrschichttemperatur

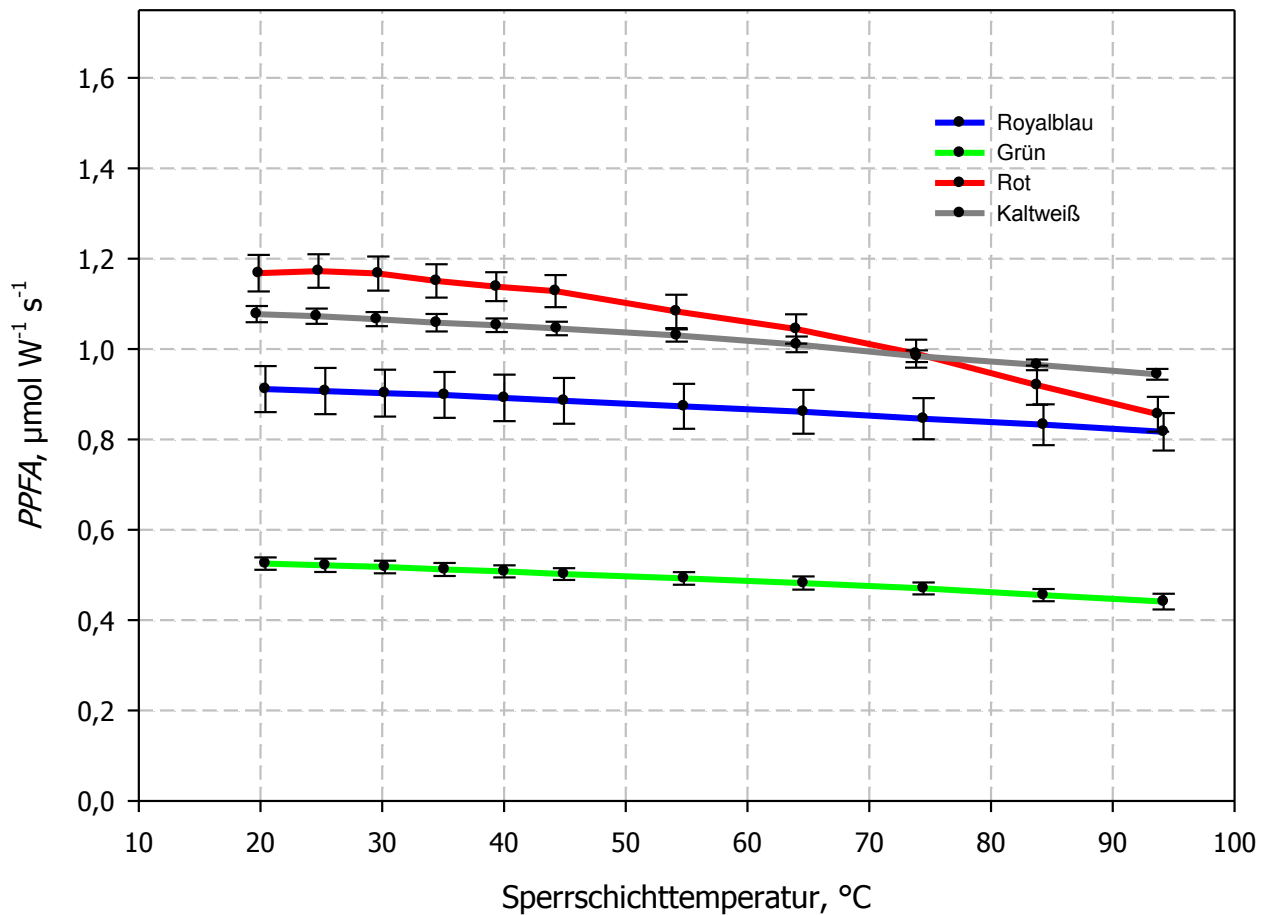


Abb. 5.1.4 Photosynthetische Photonenflussausbeute (PPFA) von vier unterschiedlichen HL-LED-Typen des Modells LUXEON® Rebel in Abhängigkeit von Sperrschichttemperatur. Für das Ermitteln der Werte wurden sechs HL-LEDs eines HL-LED-Typs bei einer Betriebsstromstärke von 350 mA vermessen (n = 3).

Die Messungen zum Einfluss der Sperrschichttemperatur auf die Photosynthetische Photonenflussausbeute und den Wirkungsgrad der HL-LEDs wurden bei einer konstanten Betriebsstromstärke von 350 mA durchgeführt und die Sperrschichttemperatur mit Hilfe eines Peltier-Elements geregelt. Die Sperrschichttemperatur beeinflusste dabei sowohl die Photosynthetische Photonenflussausbeute als auch den Wirkungsgrad der HL-LEDs negativ, wie es auch bei einer steigenden Betriebsstromstärke gezeigt werden konnte.

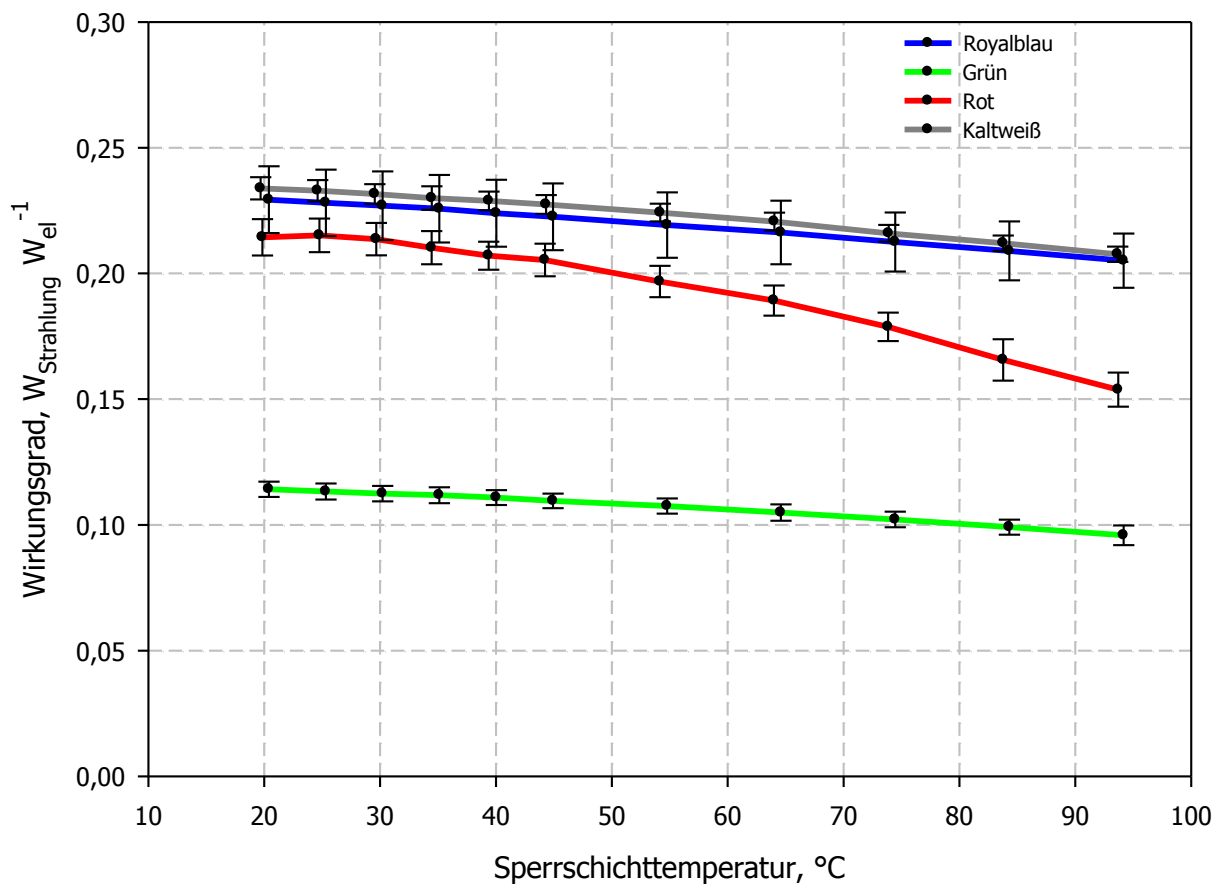


Abb. 5.1.15 Wirkungsgrad von vier unterschiedlichen HL-LED-Typen des Modells LUXEON® Rebel in Abhängigkeit von der Sperrschichttemperatur.
Für das Ermitteln der Werte wurden sechs HL-LEDs eines HL-LED-Typs bei einer Betriebsstromstärke von 350 mA vermessen ($n = 3$).

Bis auf die roten HL-LEDs ist ein Abfall der Photosynthetischen Photonenflussausbeute um weniger als $0,13 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ erkennbar (Abb. 5.1.4). Die Werte von Kaltweiß liegen konstant über denen von Blau. Wie bereits in Kapitel 5.1.2.1 ist die Effizienz der grünen HL-LEDs unabhängig von der Sperrschichttemperatur sehr gering und fällt bis auf $0,44 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1} \pm 0,02 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ bei $93,2 \text{ °C}$. Die höchste Differenz der Photosynthetischen Photonenflussausbeute wies Rot mit $0,31 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ über den gesamten vermessenen Temperaturbereich auf. Dennoch liegen die Werte von Rot bis zu einer Sperrschichttemperatur von etwa 75 °C über denen von Kaltweiß und mit minimal $0,86 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1} \pm 0,04 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ stets über denen von Blau.

Die Kurvenverläufe des Wirkungsgrades ähneln denen der Photosynthetischen Photonenflussausbeute. Allerdings liegt der Wirkungsgrad der roten HL-LEDs unabhängig von

der Sperrschichttemperatur unter denen der blauen und weißen HL-LEDs (Abb. 5.1.5). Die Wirkungsgraddifferenz der roten HL-LEDs über den vermessenen Temperaturbereich ist mit $0,06 W_{\text{Strahlung}} W_{\text{el}}^{-1}$ deutlich am höchsten. Die Differenz der anderen HL-LED-Typen liegt unter $0,03 W_{\text{Strahlung}} W_{\text{el}}^{-1}$.

5.1.3 Spektrale Veränderungen von Hochleistungs-LEDs

Die Konstanz des Strahlungsspektrums der HL-LEDs ist bei der Anwendung zur Pflanzenbelichtung ein wichtiger Aspekt, um den Pflanzen unabhängig von deren benötigter PPFD mit variierender Sperrschichttemperatur und Betriebsstromstärke eine spektral gleichmäßige Belichtung zu gewährleisten. Deshalb wurde der Einfluss dieser zwei Parameter auf das Strahlungsspektrum der HL-LEDs untersucht und für die unterschiedlichen HL-LED-Typen die Veränderung der Peakwellenlängen dargestellt.

5.1.3.1 Einfluss der Betriebsstromstärke

Tab. 5.1.2 Verschiebung der Peakwellenlänge bei variabler Betriebsstromstärke zwischen 50 mA und 700 mA.
Angegeben sind die mittlere Peakwellenlänge, der minimale und der maximale Peak (n = 6).

HL-LED-Typ	Peakwellenlänge, nm	Peakminimum, nm	Typischer Peak, nm	Peakmaximum, nm
Royalblau	451,9 ± 0,59	450,9	451,9	452,4
Grün	528,4 ± 2,19	526,1	527,6	532,7
Rot	640,7 ± 2,95	637,5	640,7	646,8
Kaltweiß	448,5 ± 0,89	448,2	448,6	448,7

Die Abweichungen der Peakwellenlänge unter Einfluss der Betriebsstromstärke lagen unter 3 nm. Peakverschiebungen unter einem Nanometer wiesen die blauen und kaltweißen HL-LEDs auf (Tab. 5.1.2). Der höchste Einfluss zeigte sich bei Rot mit einer Differenz zwischen minimaler und maximaler Peakwellenlänge von 9,2 nm. Dieser Einfluss auf die roten HL-LEDs ist auch beispielhaft anhand der Strahlungsspektren bei fünf unterschiedlichen Betriebsstromstärken in Abb. 5.1.6 dargestellt. Hierbei ließ sich nicht nur die Peakverschiebung erkennen, sondern auch eine Veränderung des Wellenlängenbereichs, bei dem die HL-LED Strahlung emittiert. Diese Verschiebung wurde mit zunehmender Stromstärke breiter.

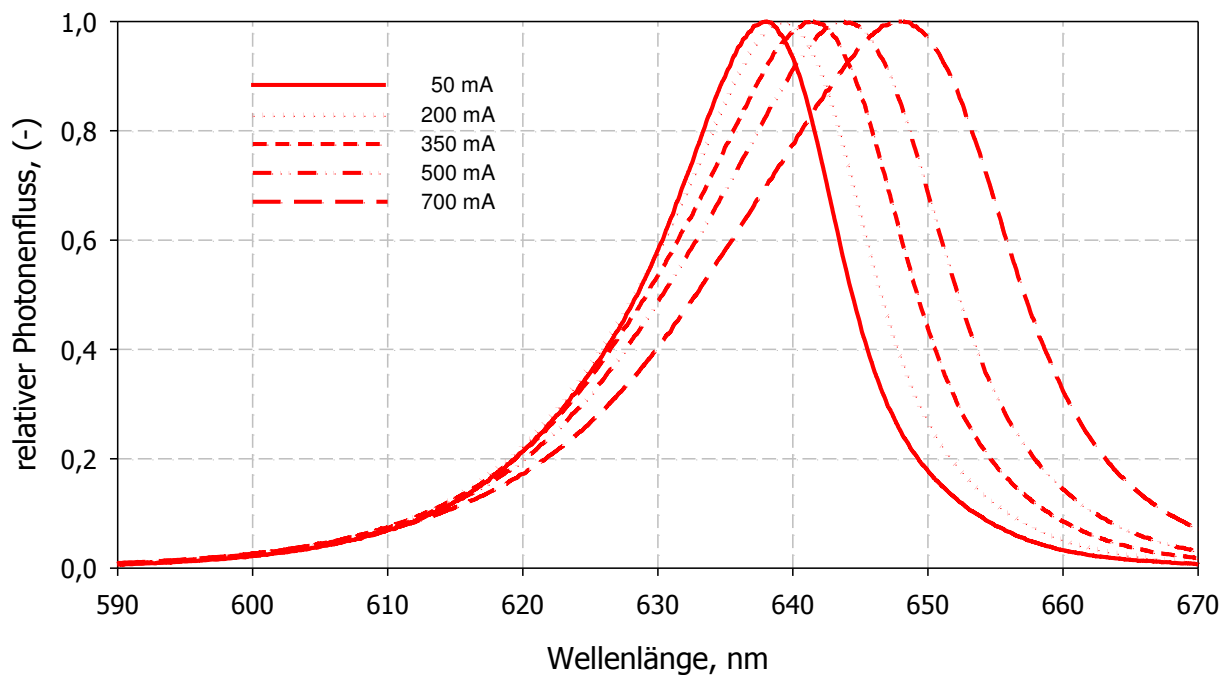


Abb. 5.1.6 Spektrale Veränderung am Beispiel einer roten HL-LED bei unterschiedlichen Betriebsstromstärken.
Die Messungen wurden bei einer Platinentemperatur von 25 °C durchgeführt.

Ein wesentlicher Unterschied im Einfluss der Betriebsstromstärke auf die verschiedenen HL-LED-Typen bestand darin, dass dieser Parameter bei ansteigenden Werten zu einer Peakwellenlängenverschiebung der roten HL-LEDs hin zu den längeren Wellenlängen tendiert. Dahingegen verringerte sich die Peakwellenlänge bei den blauen, grünen und kaltweißen HL-LEDs bei ansteigender Betriebsstromstärke. Bei einer linearen Beschreibung der Peakveränderungen mit steigender Betriebsstromstärke zeigte sich der unterschiedliche Einfluss in mit einer negativen Steigung bei Royalblau ($y = -0,0021x + 452,56$), Grün ($y = -0,0088x + 531,27$) und Kaltweiß ($y = -0,0006x + 448,7$) und einer positiven Steigung bei Rot ($y = 0,0141x + 636,13$).

5.1.3.2 Einfluss der Sperrschichttemperatur

Der Einfluss dieses Parameters rief bei allen untersuchten HL-LED-Typen die gleiche Tendenz hervor. Eine steigende Sperrschichttemperatur führte bei den vier HL-LED-Typen zur Erhöhung der Peakwellenlängen, wobei auch bei diesem Parameter der Einfluss auf die roten HL-LEDs am stärksten war. Die Abweichungen waren im Vergleich zu den anderen HL-LED-Typen bei Rot mehr als doppelt so hoch mit einer Differenz zwischen minimaler und maximaler

Peakwellenlänge von 13,8 nm. Der Einfluss der Sperrschichttemperatur auf die drei anderen HL-LED-Typen unterschied sich nur unwesentlich (Tab. 5.1.3 und Anhang A.1.2).

Tab. 5.1.3 Verschiebung der Peakwellenlänge bei variabler Sperrschichttemperatur zwischen 5 °C und 80 °C.
Angegeben sind die mittlere Peakwellenlänge, der minimale und der maximale Peak (n = 3).

HL-LED-Typ	Peakwellenlänge, nm	Peakminimum, nm	Typischer Peak, nm	Peakmaximum, nm
Royalblau	457,0 ± 1,58	455,9	456,2	458,5
Grün	526,9 ± 1,49	525,1	525,7	530,1
Rot	642,9 ± 4,59	637,2	640,9	651,0
Kaltweiß	453,1 ± 1,93	451,1	452,1	456,4

5.1.3.3 Farbtemperaturveränderung breitbandiger Hochleistungs-LEDs

Tab. 5.1.4 Veränderung der Farbtemperatur kaltweißer HL-LEDs bei steigender Betriebsstromstärke (50 mA bis 700 mA; konstant 25 °C) und Sperrschichttemperatur (20 °C bis 90 °C; konstante 350 mA).
Angegeben sind die mittlere Farbtemperatur, die minimale und die maximale Farbtemperatur (n = 6).

Parameter	mittlere Farbtemp., K	Farbtemp.-minimum, K	Typische Farbtemp., K	Farbtemp.-maximum, K
Betriebsstromstärke	5723,3 ± 135,4	5513,3	5721,8	5944,2
Sperrschichttemperatur	5431,6 ± 110,2	5313,8	5389,4	5637,2

Mit steigender Betriebsstromstärke und Sperrschichttemperatur erhöhte sich die Farbtemperatur der kaltweißen HL-LEDs (Tab. 5.1.4). Die mittlere Farbtemperatur und die Differenz zwischen minimaler und maximaler Farbtemperatur waren bei dem Parameter Betriebsstromstärke (430,9 K) höher als bei der Sperrschichttemperatur (323,2 K). Die Veränderung des Spektrums ist hier mit Hilfe einer HL-LED und aus Gründen der Übersichtlichkeit anhand von vier Betriebsstromstärken in Abb. 5.1.7 veranschaulicht.

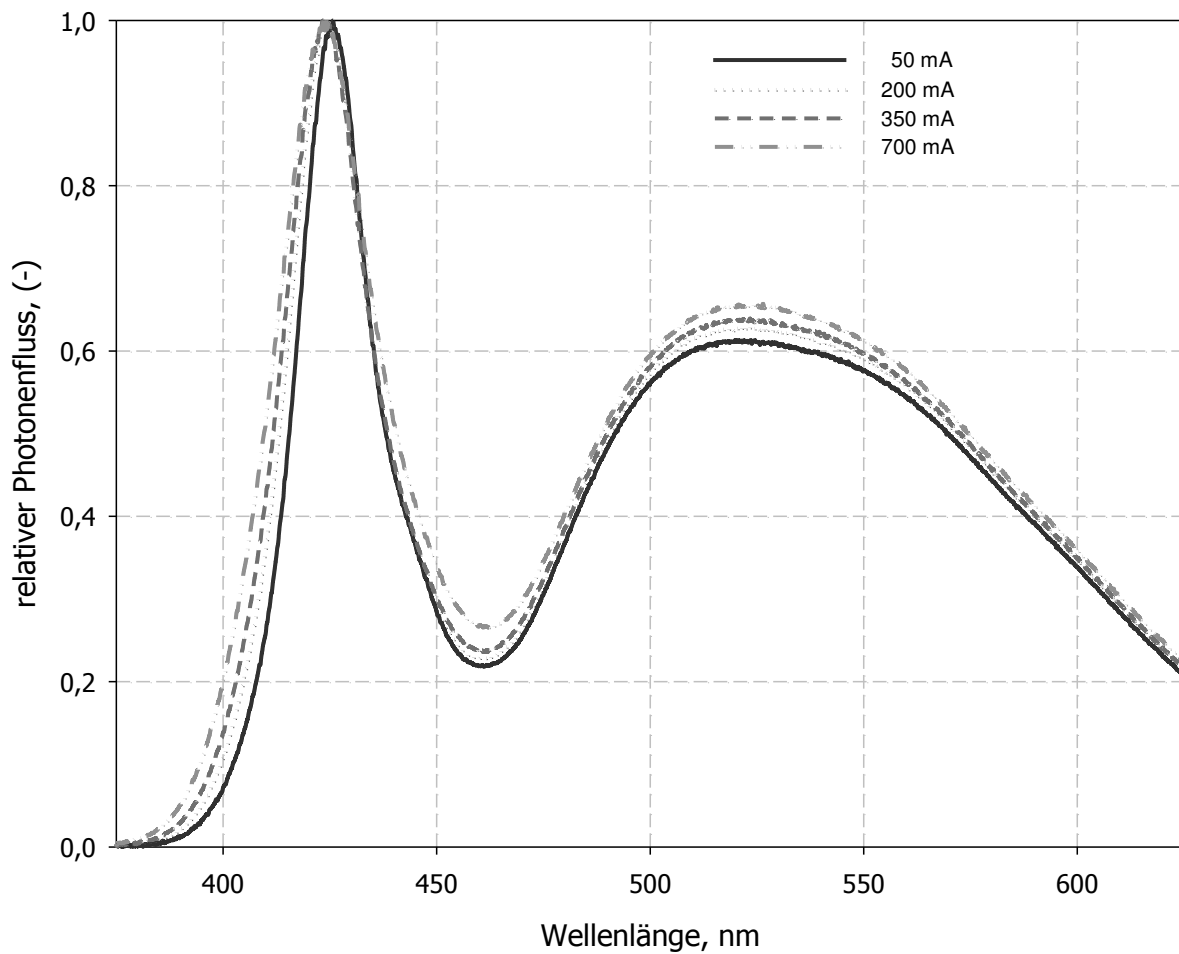


Abb. 5.1.7 Spektrale Veränderung einer kaltweißen HL-LED bei unterschiedlichen Betriebsstromstärken. Die Messungen wurden bei einer Sperrschichttemperatur von 25 °C durchgeführt.

Wie bereits in Kapitel 5.1.3.1 beschrieben nahm die Peakwellenlänge der kaltweißen HL-LEDs mit zunehmender Betriebsstromstärke ab (Abb. 5.1.7). Hingegen nahm der Anteil der emittierten Strahlung im Wellenlängenbereich von 450 nm bis 600 nm mit steigender Betriebsstromstärke zu. Im Bereich von 350 nm bis 450 nm wurde das Strahlungsspektrum mit zunehmender Betriebsstromstärke breiter.

5.2 Energieeffizienz eines HL-LED-Belichtungssystems

Die Ansprüche an ein Belichtungssystem sind den Pflanzen eine ausreichende PPFD bei geeignetem Spektrum zu bieten, ein geringer Stromverbrauch und eine gute Verteilung der Strahlung. Im Folgenden werden die PPFD-Verteilung und die Energieeffizienz eines HL-LED-Belichtungssystems einem Belichtungssystem mit Leuchtstofflampen gegenübergestellt und die Belichtungssysteme bei unterschiedlichen Parametereinstellungen (HL-LED-Dichte, Etagenabstand, $PPFD_{\emptyset}$) verglichen.

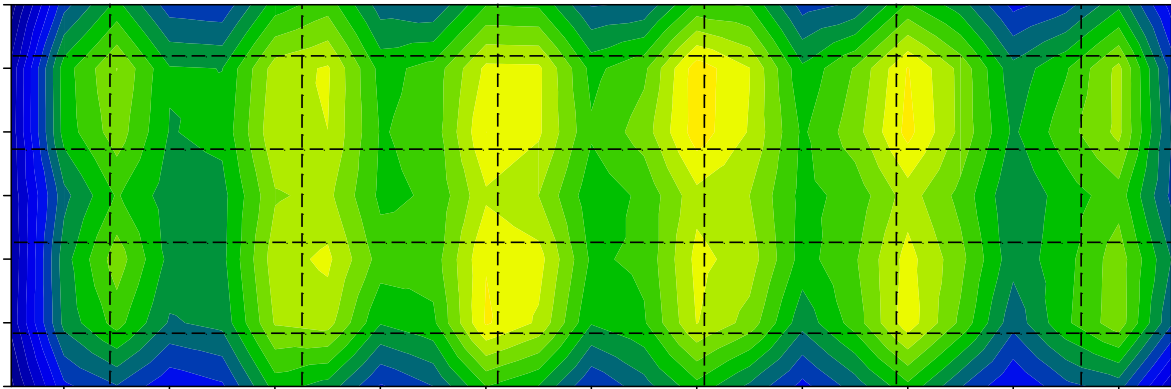
5.2.1 PPFD-Verteilung

Die Veränderungen der PPFD-Verteilungsmuster bei der Variation der zwei untersuchten Parameter HL-LED-Dichte und Etagenabstand wurden untersucht und graphisch dargestellt. Zur graphischen Darstellung der PPFD-Verteilungsmuster wurde zwischen den 161 gemessenen PPFD-Werten linear interpoliert und die Bereiche bestimmter PPFD durch eine Farbskalierung zwischen $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gekennzeichnet. Für einen statistischen Vergleich der Verteilungsmuster wurden die Abweichungen der pro Versuchseinstellung 161 einzelnen Messwerte zur durchschnittlichen PPFD ($PPFD_{\emptyset}$) von $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ miteinander verglichen. Die Abweichungen wurden quadriert, was zu einem Vergleich rein positiver Werte und einer stärkeren Herausstellung von Ausreißern in den Datensätzen führte.

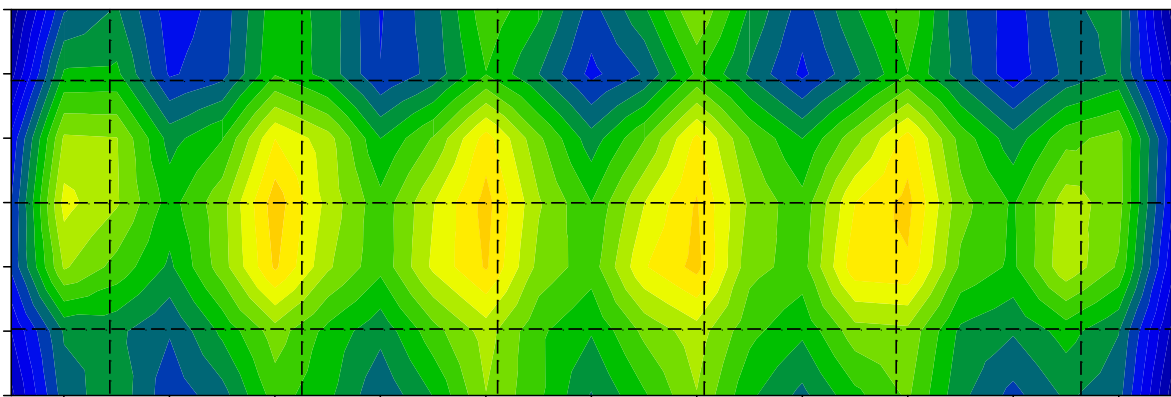
5.2.1.1 Hochleistungs-LED-Dichte

Die Abnahme der HL-LED-Dichte führte zu einer vermehrten Bildung von PPFD-Bereichen mit höheren Abweichungen von der $PPFD_{\emptyset}$. Die Werte reichten beim Belichtungssystem mit zwölf HL-LEDs pro HL-LED-Typ bis in einen Bereich zwischen $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, erkennbar an den rötlich gefärbten Bereichen (Abb. 5.2.1 C), die in den anderen beiden Varianten mit jeweils 24 (24 HL-LEDs) oder 18 HL-LEDs pro HL-LED-Typ (18 HL-LEDs) nicht zu erkennen waren.

A) 24 HL-LEDs



B) 18 HL-LEDs



C) 12 HL-LEDs

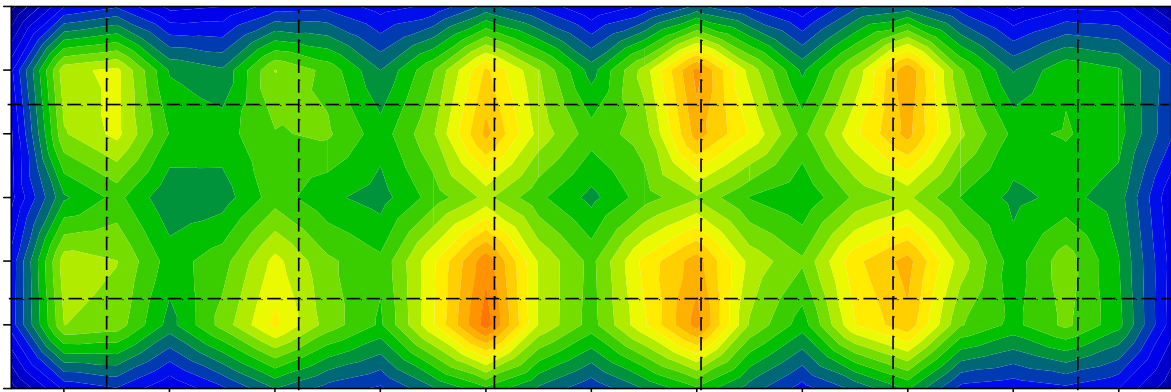


Abb. 5.2.1 PPFD-Verteilungsmuster von HL-LED-Belichtungssystemen mit unterschiedlichen HL-LED-Dichten. A) 24 HL-LEDs der HL-LED-Typen Blau, Rot und Kaltweiß; B) 18 HL-LEDs pro HL-LED-Typ; C) 12 HL-LEDs pro HL-LED-Typ. Die Farbskalierung weist auf Bereiche bestimmter PPFD zwischen $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, usw. hin. Die durchschnittliche PPFD betrug $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf einem Regaletagenboden ($1500 * 500 \text{ mm}$) mit einem Etagenabstand von 240 mm . Gitternetzschrittpunkte geben Position der HL-LEDs an; exakte Positionierung der HL-LEDs siehe Abbildung 4.2.3 und Abbildung 4.2.4.

Die Werte bei 24 HL-LEDs reichten von $17,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $45,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, bei 18 HL-LEDs von $18,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $47,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und bei 12 HL-LEDs von $17,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $53,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Die Maximalwerte der PPFD nahmen mit verringerter HL-LED-Dichte zu, wohingegen die Minimalwerte, wie auch die PPFD der Randbereiche, keine wesentlichen Veränderungen aufwiesen.

Der Anstieg der PPFD-Maximalwerte mit geringerer HL-LED-Dichte und die vermehrten und höheren Abweichungen der PPFD zum Mittelwert führten bei einem Mittelwertvergleich (Abb. 5.2.2) zu einem statistischen Unterschied der Verteilung der Variante 12 HL-LEDs zu den anderen beiden Varianten mit höherer HL-LED-Dichte, die sich statistisch nicht, sich aber sichtbar in ihrem Verteilungsmuster unterschieden. Bei der Variante 18 HL-LEDs war eine Erhöhung der Werte zur Mitte der Fläche mit einer leichten Vergrößerung der Randbereiche mit niedrigen Werten (blaue Bereiche) festzustellen (Abb. 5.2.1 B).

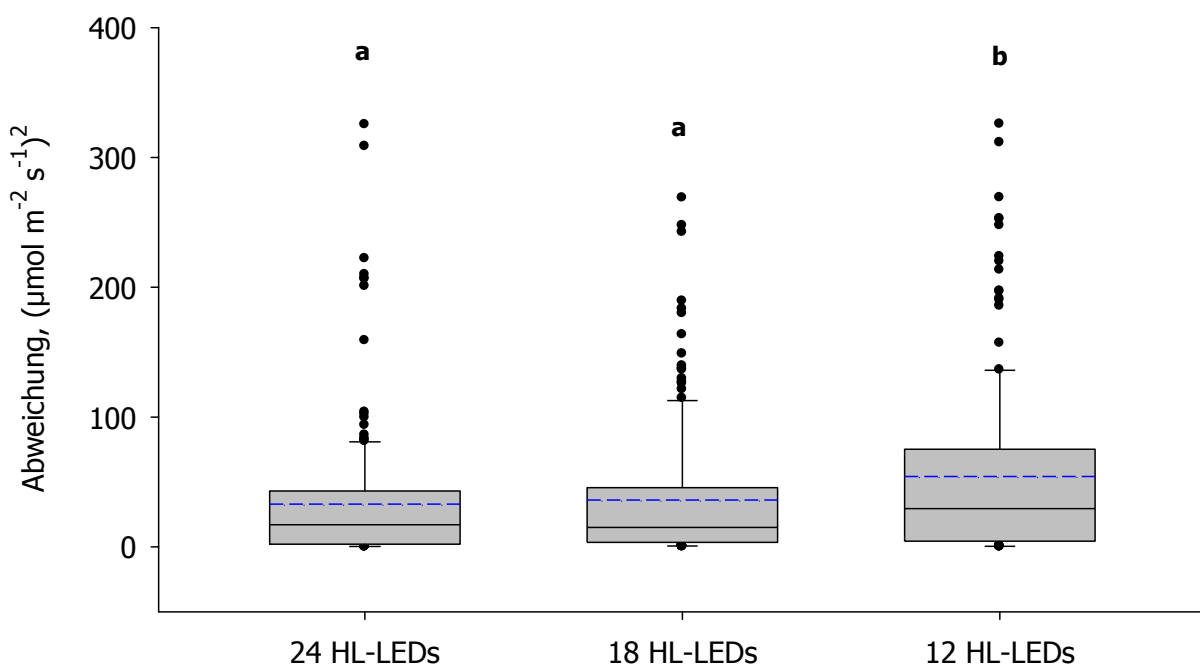


Abb. 5.2.2 Boxplots der quadrierten Abweichung der PPFD von der durchschnittlichen PPFD ($35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) dreier HL-LED-Belichtungssysteme mit unterschiedlichen HL-LED-Dichten. 24 HL-LEDs der HL-LED-Typen Blau, Rot und Kaltweiß je Belichtungssystem (24 HL-LEDs), 18 HL-LEDs pro HL-LED-Typ (18 HL-LEDs) und 12 HL-LEDs pro HL-LED-Typ (12 HL-LEDs). Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied hin (Holm-Sidak-Methode, $n = 161$, $\alpha = 0,05$).

5.2.1.2 Etagenabstand

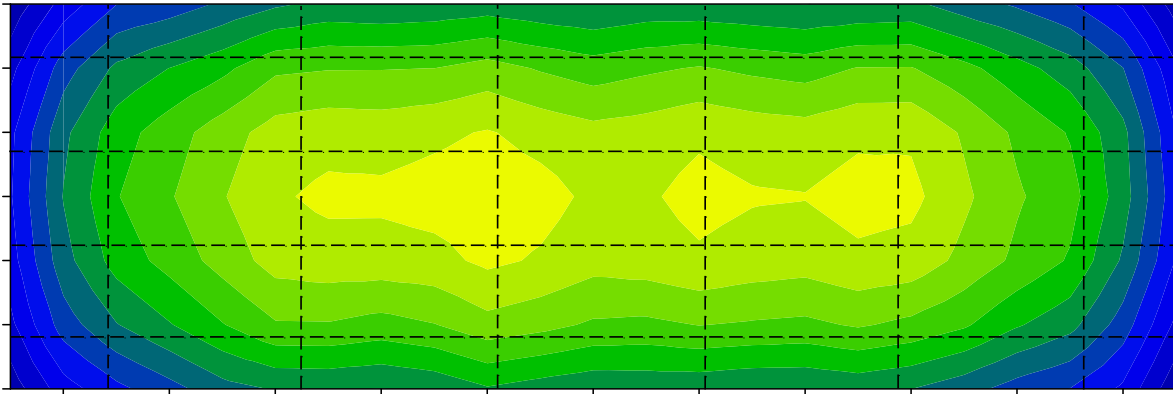
Die Versuche wurden neben den Belichtungssystemen mit Leuchtstofflampen mit einem Belichtungssystem mit jeweils 24 HL-LEDs pro HL-LED-Typ bei einem PPFD-Verhältnis der Farben Rot und Blau von sieben zu drei (RB 7:3) bei einer $PPFD_{\emptyset}$ von $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durchgeführt. Der Etagenabstand wurde bei dem HL-LED-Belichtungssystem zwischen 300 mm und 180 mm variiert.

Mit der Abnahme des Etagenabstandes nahm die Gleichmäßigkeit der PPFD-Verteilung ab (Abb. 5.2.3 und 5.2.4). Dies wurde durch eine Flächenzunahme der PPFD-Bereiche mit hohen Werten bis $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (rötliche Bereiche) und mit niedrigen Werten zwischen $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sichtbar (Abb. 5.2.4 B). Die Bereiche, in denen die HL-LEDs angeordnet waren wurden mit der Verringerung des Etagenabstandes sichtbarer. Bei 180 mm Etagenabstand überlappte die Strahlung der einzelnen HL-LEDs nicht mehr so stark und es wurden so direkt unter den HL-LEDs die Bereiche hoher PPFD bis $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gebildet. Die Position der HL-LEDs ist bei einem Etagenabstand von 300 mm (Abb. 5.2.3 A) nicht wahrzunehmen und eine Tendenz erst ab 240 mm (Abb. 5.2.3 C) erkennbar.

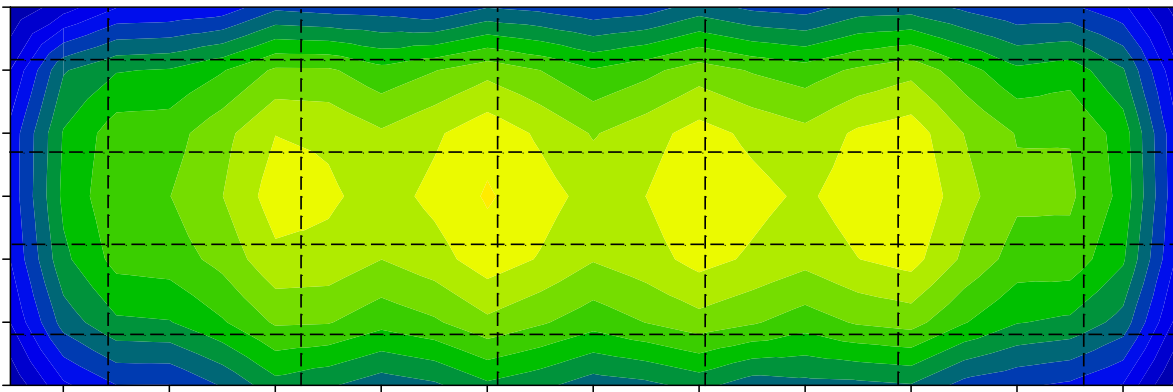
Die geringen Veränderungen der niedrigen PPFD-Werte unter $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis zu einer Reduzierung des Etagenabstandes auf 210 mm führte zu einer nur geringfügig schwächeren Ausleuchtung der Randbereiche, welche aber bei 180 mm deutlich wurde. Dabei verringerte sich die minimale PPFD in den Randbereichen von $20,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei 300 mm, über $19,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei 270 mm, $19,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei 240 mm, $16,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei 210 mm, bis auf $14,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei einem Etagenabstand von 180 mm. Eine Änderung der gesamten PPFD-Verteilung zeigte sich stärker in der Veränderung der Maximalwerte. Diese stiegen von $43,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei 300 mm Etagenabstand auf $55,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei 180 mm an.

Unter den Leuchtstofflampen-Belichtungssystemen (Abb 5.2.5) wies die Variante mit der einfachen Leuchtstofflampe (Abb. 5.2.5 A) die gleichmäßigste PPFD-Verteilung auf. Die zentrale Position des Leuchtmittels war bei allen drei Leuchtstofflampen-Varianten zu erkennen.

A) 300 mm



B) 270 mm



C) 240 mm

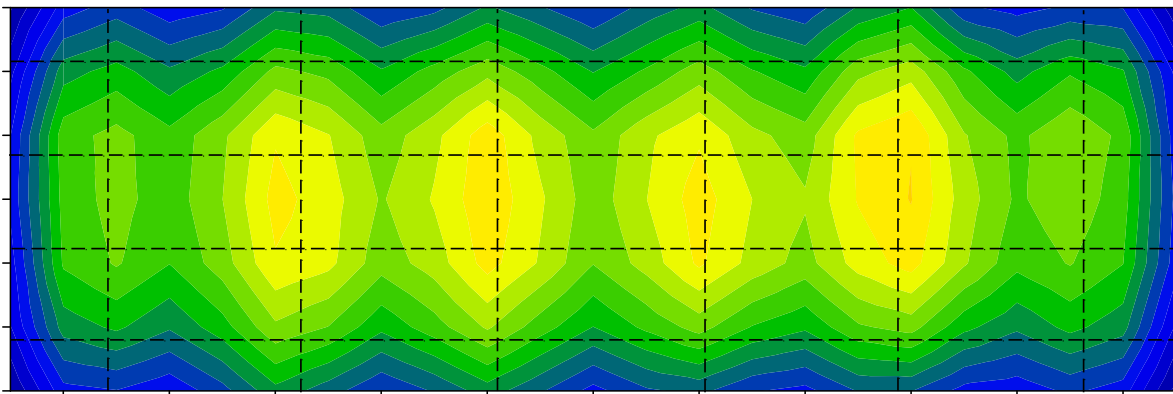
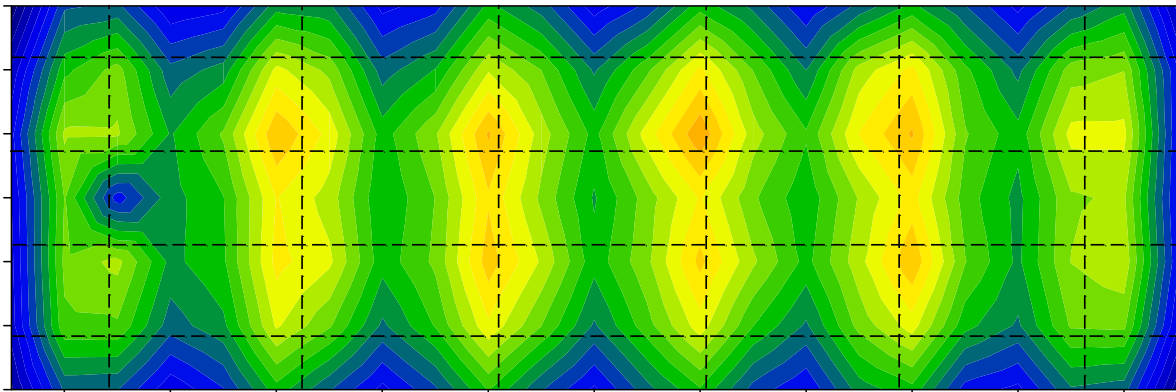


Abb. 5.2.3 PPFD-Verteilungsmuster von HL-LED-Belichtungssystemen bei einem Etagenabstand von A) 300 mm, B) 270 mm und C) 240 mm.

Die Farbskalierung weist auf Bereiche bestimmter PPFD zwischen $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, usw. hin. Die durchschnittliche PPFD betrug $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf einem Regaletagenboden ($1500 * 500 \text{ mm}$). Gitternetzschrittpunkte geben Position der HL-LEDs an; exakte Positionierung der HL-LEDs siehe Abbildung 4.2.3 und Abbildung 4.2.4.

A) 210 mm



B) 180 mm

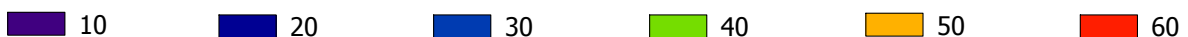
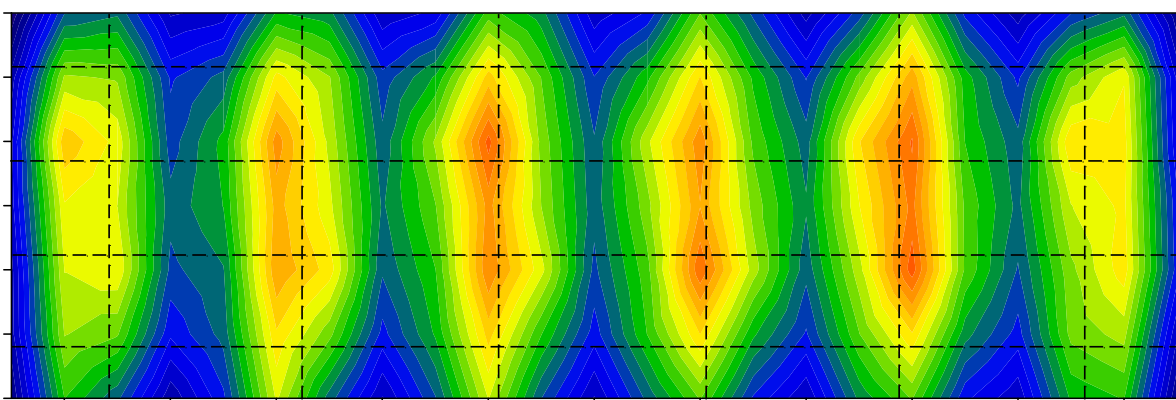
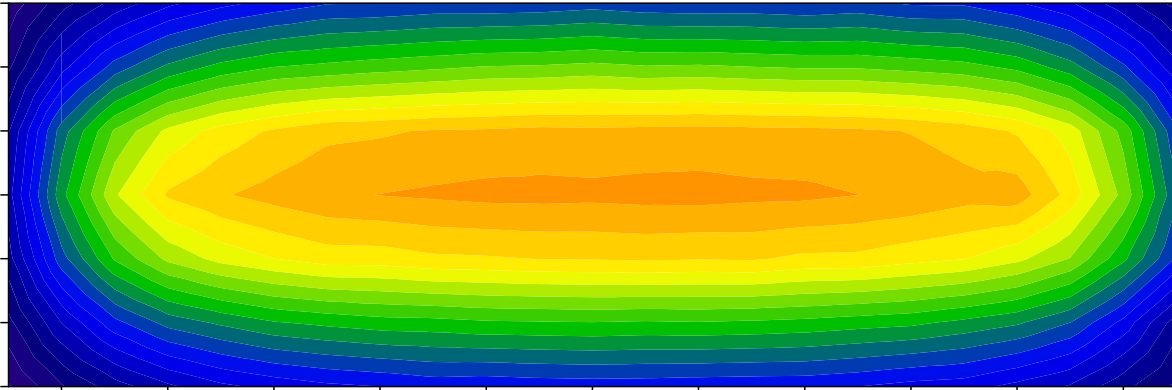


Abb. 5.2.4 PPFD-Verteilungsmuster von HL-LED-Belichtungssystemen bei einem Etagenabstand von A) 210 mm und B) 180 mm.

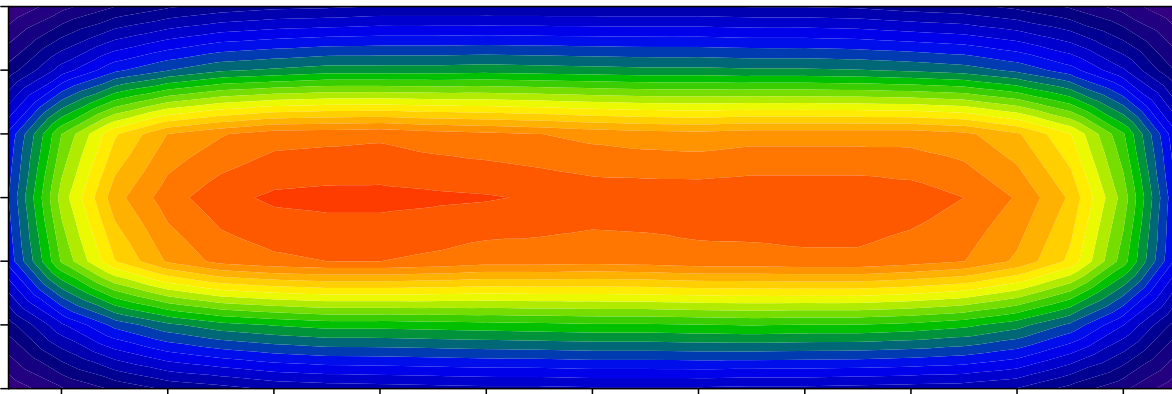
Die Farbskalierung weist auf Bereiche bestimmter PPFD zwischen $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, usw. hin. Die durchschnittliche PPFD betrug $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf einem Regaletagenboden ($1500 * 500 \text{ mm}$). Gitternetzschneppunkte geben Position der HL-LEDs an; exakte Positionierung der HL-LEDs siehe Abbildung 4.2.3 und Abbildung 4.2.4.

Der Reflektor (LSL + Reflektor), sowie die reflektierende Beschichtung in der Leuchtstofflampe (LSL Reflex) führten zu größeren Randbereichen mit PPFD-Werten unter $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und unter $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Abb. 5.2.5 B, C) und höheren Werten im horizontalen, zentralen Bereich der vermessenen Fläche. Die Maxima reichen von $50,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LSL) über $55,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LSL Reflex) bis $56,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LSL + Reflektor), die Minima von $10,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LSL Reflex) über $11,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LSL) bis $13,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LSL + Reflektor).

A) LSL



B) LSL + Reflektor



C) LSL Reflex

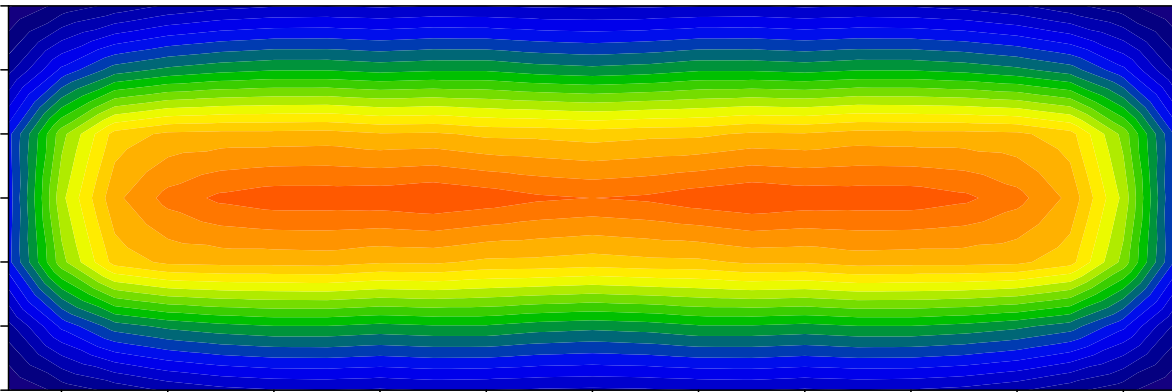


Abb. 5.2.5 PPFD-Verteilungsmuster von Leuchtstofflampen-Belichtungssystemen bei einem Etagenabstand 300 mm.

A) Leuchtstofflampe Philips Master TL-D 58W 840; B) Master TL-D 58W 840 mit Reflektor; C) Philips Master TL-D Reflex 58W 840. Die Farbskalierung weist auf Bereiche bestimmter PPFD zwischen $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, usw. hin. Die durchschnittliche PPFD betrug $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf einem Regaletagenboden ($1500 * 500 \text{ mm}$).

Durch eine Anordnung der HL-LEDs über die gesamte Fläche konnte eine gleichmäßigere PPFD-Verteilung bis zu einem Etagenabstand von 210 mm gegenüber einem Belichtungssystem mit einer Leuchtstofflampe erreicht werden. Dies wurde statistisch anhand des Vergleiches der Abweichungsquadrate herausgestellt (Abb. 5.2.6). Bei einem Etagenabstand von 180 mm konnte nicht mehr von einer gleichmäßigeren Verteilung des LED-Belichtungssystems gegenüber einem einfachen Leuchtstofflampensystems (LSL) ausgegangen werden. Der Reflektor und die reflektierende Beschichtung schienen nicht zur gleichmäßigeren Verteilung der PPFD eines Leuchtstofflampen-Belichtungssystems beizutragen, da die Abweichungen der Variante LSL nicht groß waren und sich gegenüber LSL + Reflektor auch statistisch unterschieden. Die PPFD-Verteilung des LED-Belichtungssystems wurde mit abnehmendem Etagenabstand bis 210 mm zwar sichtbar ungleichmäßiger (Abb. 5.2.3 A – C, Abb. 5.2.4 A), jedoch ohne einen statistischen Unterschied der Abweichungsquadrate, weshalb der Etagenabstand von 210 mm als minimal für eine gleichmäßige PPFD-Verteilung beschrieben werden kann.

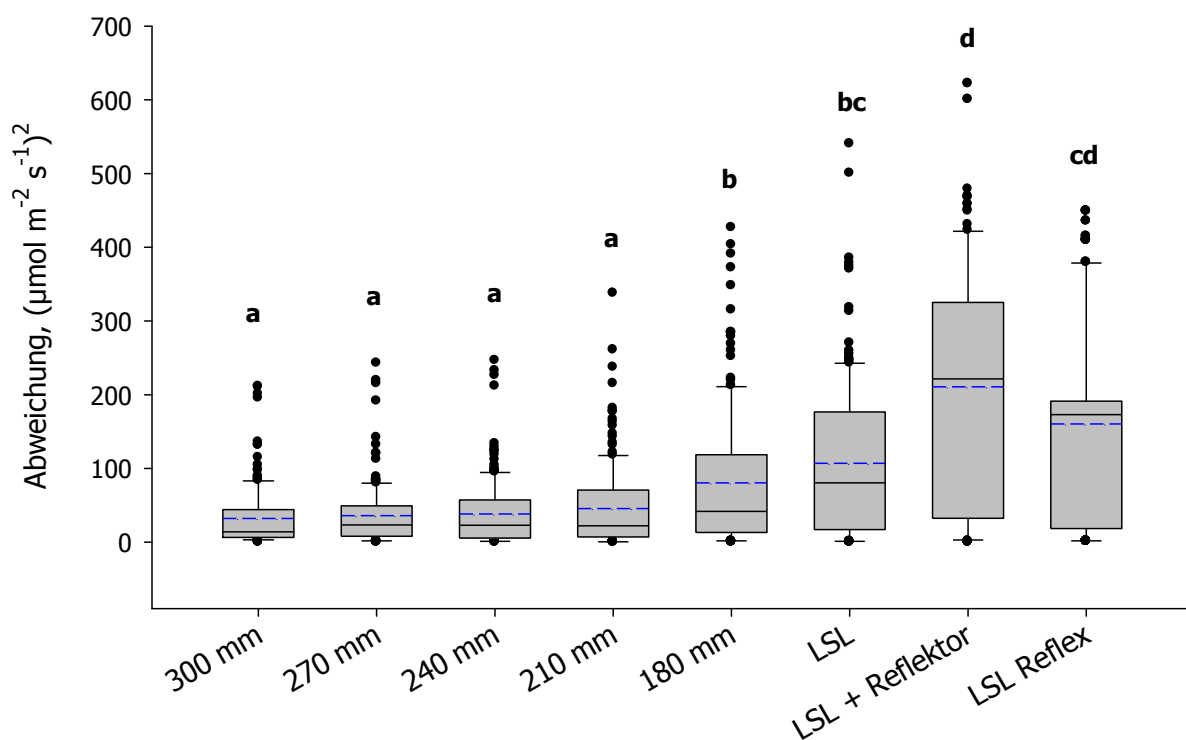


Abb. 5.2.6 Boxplots der quadrierten Abweichung der PPFD von der durchschnittlichen PPFD ($35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) unterschiedlicher Belichtungssysteme. HL-LED-Belichtungssysteme mit unterschiedlichem Etagenabstand (300 mm bis 180 mm) und Leuchtstofflampen-Belichtungssysteme (LSL, LSL + Reflektor, LSL Reflex) bei 300 mm Etagenabstand. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied hin (Dunn's Methode, $n = 161$, $\alpha = 0,05$).

5.2.2 Energieeffizienz

Die Energieeffizienz eines HL-LED-Belichtungssystems wurde bei unterschiedlichen Parametern (HL-LED-Dichte, Etagenabstand, $PPFD_{\emptyset}$) ermittelt und mit der Energieeffizienz von Leuchtstofflampen-Belichtungssystemen verglichen.

5.2.2.1 Hochleistungs-LED-Dichte

Die Steigerung der HL-LED-Dichte, im Folgenden die Anzahl der HL-LEDs pro HL-LED-Typ im Belichtungssystem, hat einen positiven Effekt auf die Energieeffizienz des HL-LED-Belichtungssystems. Dabei ist die Differenz der Energieeffizienz vom Belichtungssystem mit 18 HL-LEDs pro HL-LED-Typ zu einem Belichtungssystem mit einer HL-LED-Dichte von 12 mit $0,20 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ höher als die von 18 HL-LEDs zu 24 HL-LEDs mit $0,12 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ (Abb. 5.2.7).

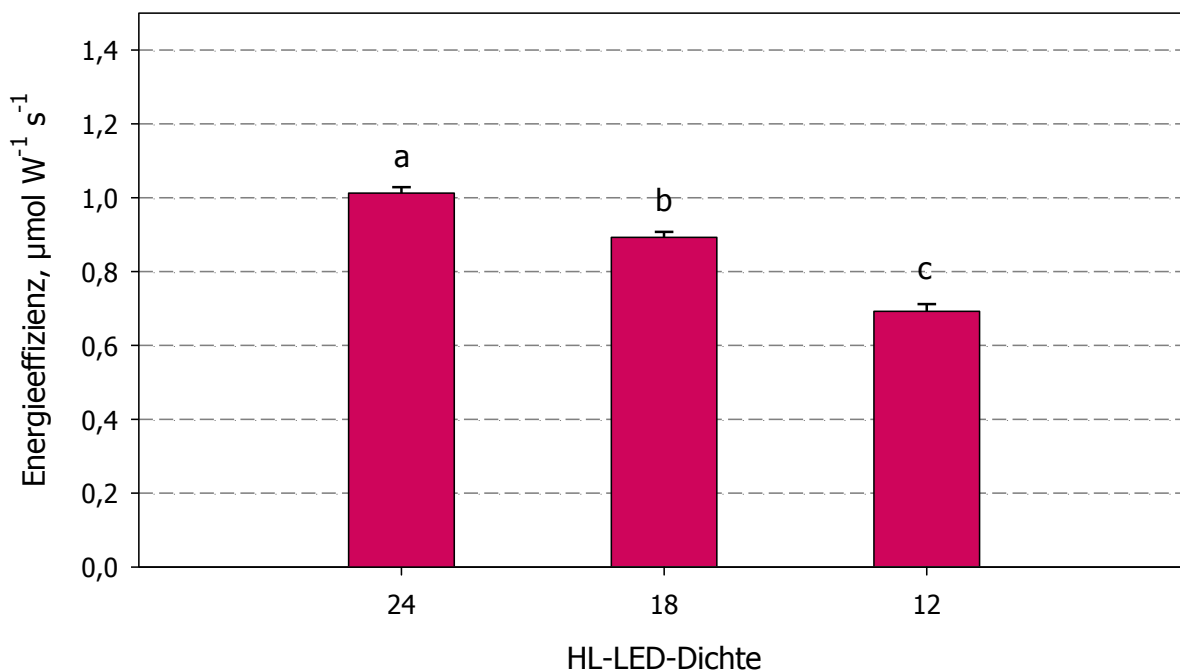


Abb. 5.2.7 Einfluss der HL-LED-Dichte auf die Energieeffizienz verschiedener HL-LED-Belichtungssysteme bei unterschiedlicher Anzahl an HL-LEDs pro Belichtungssystem und HL-LED-Typ (HL-LED-Dichte).

24 rote und 24 blaue HL-LEDs pro HL-LED-Belichtungssystem (24), 18 HL-LEDs pro HL-LED-Typ (18) und 12 HL-LEDs pro HL-LED-Typ (12). Das Belichtungssystem mit roten und blauen HL-LEDs wurde mit einem $PPFD$ -Verhältnis von 7:3 bei einer durchschnittlichen $PPFD$ von $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ betrieben. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied hin (Holm-Sidak-Methode, $n = 10$, $\alpha = 0,05$).

5.2.2.2 Etagenabstand

Der Etagenabstand wurde mit Hilfe des HL-LED-Belichtungssystems untersucht und mit Leuchtstofflampen-Belichtungssystemen bei einem konstanten Abstand verglichen, der ein Minimum für Leuchten mit Leuchtstofflampen darstellte. Die Messungen fanden bei einer HL-LED-Dichte von 24 und einer PPF_{D₀} von 35 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ statt. Das HL-LED-Belichtungssystem wurde bei drei PPF_D-Verhältnissen untersucht. Zum einen bei einem PPF_D-Verhältnis von Rot zu Blau von 7:3 (RB 7:3) und 3:7 (RB 3:7), zum anderen mit einem PPF_D-Verhältnis von Rot zu Weiß von 1:1 (RB 5:5).

Die Verringerung des Etagenabstandes führte zu einem Anstieg der Energieeffizienz der HL-LED-Belichtungssysteme (Abb. 5.2.8). Diese Tendenz wurde bei allen drei Varianten beobachtet. Die höchste Steigerung um 0,44 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ von 0,75 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ auf 1,20 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ wurde bei RB 7:3, mit einer Verringerung des Etagenabstandes von 300 mm auf 180 mm, erzielt, die niedrigste bei RW 5:5 mit 0,23 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ von 0,75 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ auf 0,98 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Bei höheren Etagenabständen ist das HL-LED-Belichtungssystem mit der Einstellung RB 3:7 am effizientesten (Abb. 5.2.8). Dies ließ sich bis zu einem Etagenabstand von 210 mm beobachten, aber nur bei einem Abstand von 300 mm und 270 mm statistisch nachweisen. Die Energieeffizienz von RW 5:5 lag, ausgenommen der Werte beim höchsten untersuchten Etagenabstand, stets unter der von RB 7:3 und RB 3:7. Dabei nahm der Unterschied mit der Reduzierung des Etagenabstandes zu.

Die Energieeffizienz der HL-LED-Belichtungssysteme lag bei allen Einstellungen (Etagenabstand, PPF_D-Verhältnis) über der Energieeffizienz der Belichtungssysteme mit Leuchtstofflampen. Dabei unterschied sich die Energieeffizienz der drei Leuchtstofflampen-Belichtungssysteme bereits stark voneinander, mit der geringsten Energieeffizienz bei einem einfachen Belichtungssystem mit einer Leuchtstofflampe (0,43 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$) und lag mit der höchsten Energieeffizienz bei LSL Reflex (0,68 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$) noch deutlich unter der von HL-LED-Belichtungssystemen. Jedoch bewirkte der Einsatz eines Reflektors eine Steigerung der Energieeffizienz um 0,11 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$.

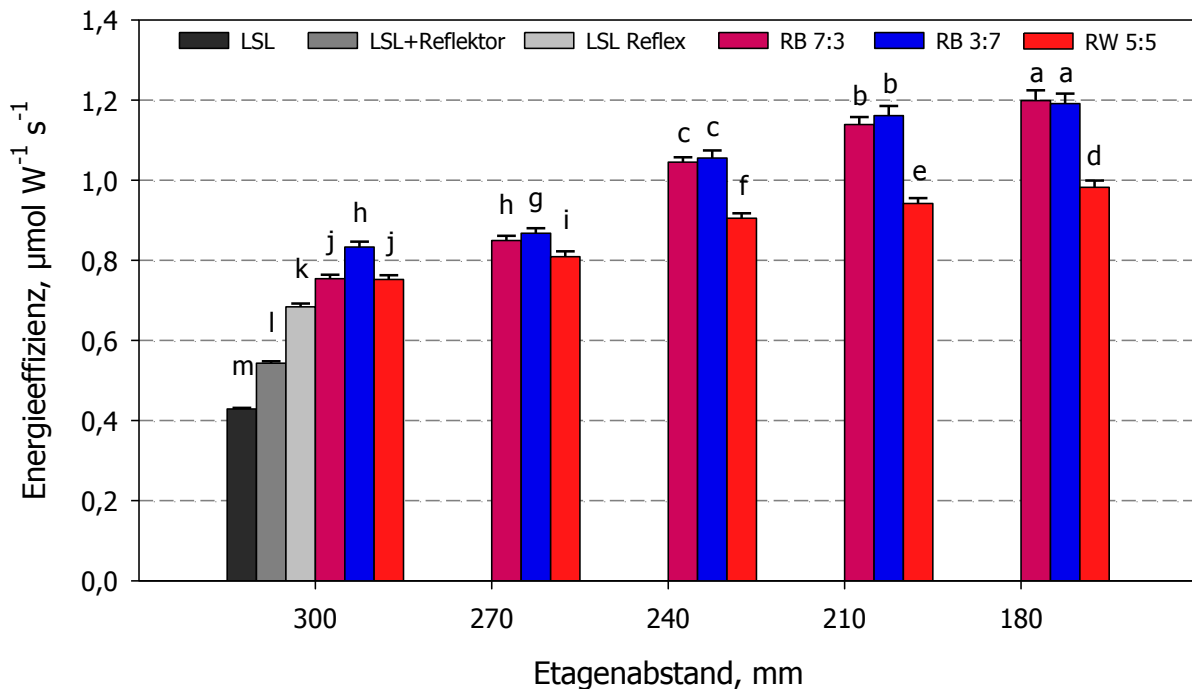


Abb. 5.2.8 Energieeffizienz verschiedener Belichtungssysteme bei unterschiedlichen Etagenabständen. Leuchtstofflampen-Belichtungssysteme: LSL: Philips Master TL-D 58W 840, LSL + Reflektor: Master TL-D 58W 840 mit Reflektor, LSL Reflex: Philips Master TL-D Reflex 58W 840. HL-LED-Dichte: 24, durchschnittliche PPFd: $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, PPFd-Verhältnis: Rot zu Blau von 7:3 (RB 7:3) und 3:7 (RB 3:7) und Rot zu Weiß von 1:1 (RW 5:5). Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied hin (Holm-Sidak-Methode, $n = 15$, $\alpha = 0,05$).

Beim Betrachten des Abstandes von Etagenboden bis zum Leuchtmittel (Leuchtmittelabstand) bleibt im Gegensatz zum Etagenabstand die Leuchtenhöhe nicht unberücksichtigt. Dadurch ändert sich der direkte Vergleich zwischen Belichtungssystemen mit HL-LEDs und denen mit Leuchtstofflampen. Der Leuchtmittelabstand bei den Leuchtstofflampen-Belichtungssystemen lag, verursacht durch eine Leuchtenhöhe von 90 mm, bei 210 mm. Die Leuchtenhöhe der HL-LED-Belichtungssysteme lag bei 35 mm, der Leuchtenabstand nahm aber konstruktionsbedingt (siehe Kapitel 4.2.1.2) gegenüber dem Etagenabstand nur um 5 mm ab. Unter Berücksichtigung der Leuchtenhöhe kann somit die Energieeffizienz der Leuchtstofflampen mit der von dem HL-LED-Belichtungssystem mit einem Etagenabstand von 210 mm direkt verglichen werden, da sich hierbei der Leuchtmittelabstand nur geringfügig unterschied. Die Energieeffizienz von RB 7:3 und RB 3:7 verdreifachte sich demnach gegenüber der LSL und verdoppelte sich fast gegenüber der LSL Reflex.

5.2.2.3 Durchschnittliche PPFD

Die Verringerung der durchschnittlichen PPFD ($PPFD_{\emptyset}$) führte zu einer Erhöhung der Energieeffizienz der HL-LED-Belichtungssysteme. Ein statistisch signifikanter Anstieg konnte, nach einer Zweiweg-ANOVA (Faktor A: Belichtungsvariante, Faktor B: PPFD-Variante) und anschließendem paarweisen multiplen Test aller Varianten, nur bei der Belichtungsvariante RB 7:3 mit einer Differenz von $0,07 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ zwischen $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Abb. 5.2.9, RB 7:3 A) und $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Abb. 5.2.9, RB 7:3 B) aufgezeigt werden. Die Messungen wurden bei einem Etagenabstand von 300 mm durchgeführt. Wie auch in Abb. 5.2.7 beim gleichen Etagenabstand zu sehen, wurde bei der Belichtungsvariante RB 3:7 die höchste Energieeffizienz erzielt.

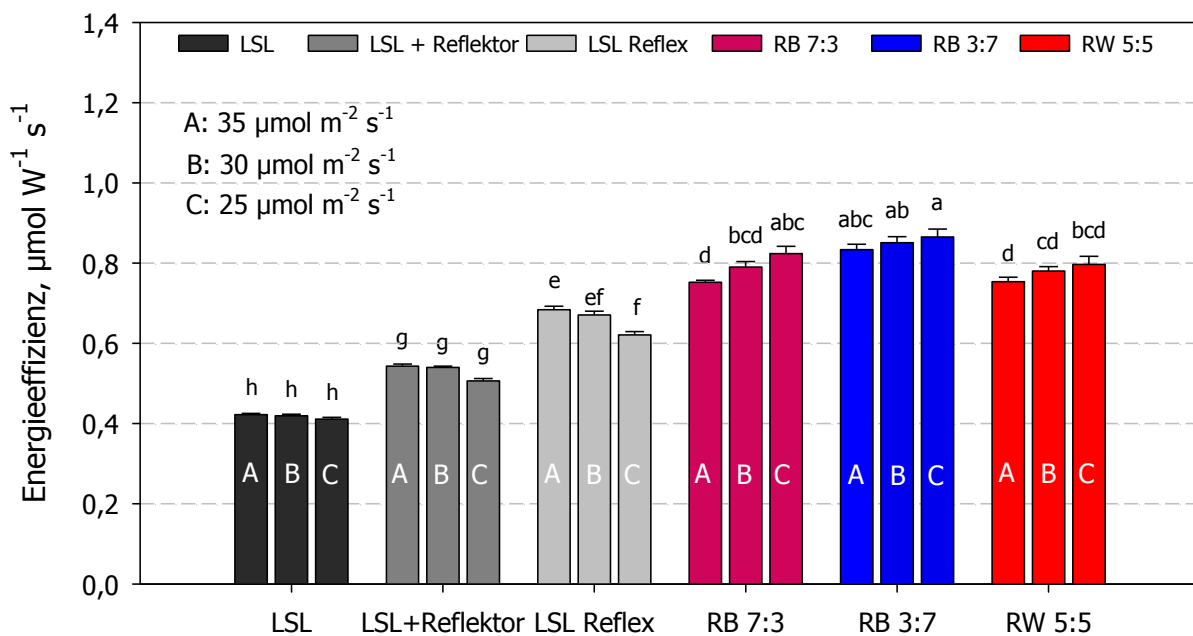


Abb. 5.2.9 Energieeffizienz verschiedener Belichtungssysteme bei unterschiedlicher durchschnittlicher PPFD.

Leuchtstofflampen-Belichtungssysteme: LSL: Philips Master TL-D 58W 840, LSL + Reflektor: Master TL-D 58W 840 mit Reflektor, LSL Reflex: Philips Master TL-D Reflex 58W 840. HL-LED-Dichte: 24, PPFD-Verhältnis: Rot zu Blau von 7:3 (RB 7:3) und 3:7 (RB 3:7) und Rot zu Weiß von 1:1 (RW 5:5). 300 mm Etagenabstand. Unterschiedliche Kleinbuchstaben über den Balken weisen auf einen statistischen Unterschied hin (Zweiweg-ANOVA mit anschließendem Bonferroni t-Test, $n = 15$, $\alpha = 0,05$).

Im Gegensatz zu den HL-LED-Belichtungsvarianten führte die Dimmung der Leuchtstofflampen-Belichtungssysteme zu einer Verschlechterung der Energieeffizienz. Zwar war auch hier ein statistischer Unterschied innerhalb einer Belichtungsvariante nur bei einer Variante (LSL Reflex)

zu erkennen, jedoch war die Tendenz zu einer geringeren Energieeffizienz bei Verringerung der $PPFD_{\emptyset}$ bei allen drei Belichtungsvarianten vorhanden. Weiterhin unterschieden sich alle Varianten mit Leuchtstofflampen statistisch von denen mit HL-LEDs in ihrer Energieeffizienz.

5.2.3 Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung

Für die Wirkungsgradberechnung der HL-LED-Steuerung wurde die Stromstärke der HL-LED-Typen bei unterschiedlicher $PPFD_{\emptyset}$ gemessen. Der Zusammenhang konnte durch Funktionen (Polynome 3. Grades) beschrieben werden (Tab. 5.2.1).

Tab. 5.2.1: Beschreibung der Abhängigkeit der Betriebsstromstärke von der durchschnittlichen $PPFD$ einzelner HL-LED-Typen.

$f(x)$ = Betriebsstromstärke (mA) mit Bestimmtheitsmaß (R^2). x = durchschnittliche $PPFD$, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Definitionsbereich: $D = [5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}; 40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ (siehe Anhang A.1.3)

HL-LED-Typ	Funktion	R^2
Rot	$f(x) = 0,0083 \cdot x^3 - 0,3538 \cdot x^2 + 16,405 \cdot x - 15,452$	0,9996
Blau	$f(x) = 5 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0,0638 \cdot x^2 + 8,7237 \cdot x + 2,0399$	0,9999
Kaltweiß	$f(x) = -0,0006 \cdot x^3 + 0,1411 \cdot x^2 + 8,6838 \cdot x + 3,3186$	0,9998

Das Ergebnis der Stromstärkeberechnungen ist für die jeweils betriebenen HL-LED-Typen bei den einzelnen Versuchseinstellungen in Tabelle 5.2.3 (Betriebsstromstärke, mA) dargestellt.

Die Betriebsstromstärken einzelner HL-LEDs im Belichtungssystem lagen in einem niedrigen Bereich der möglichen Betriebsstromstärke (700 mA) und blieben bei den verschiedenen Versuchseinstellungen unter 300 mA (Tab. 5.2.3, Rot). Die Daten der Tabelle beinhalten Werte der Betriebsstromstärke, mit denen die einzelnen HL-LEDs eines HL-LED-Typs versorgt wurden und nicht die Betriebsstromstärke, welche zum Betreiben der HL-LEDs eines HL-LED-Typs im gesamten Belichtungssystem nötig war. Der Wert der Betriebsstromstärke zum Betreiben der HL-LEDs eines HL-LED-Typs, und somit auch der eigentlich gemessene Wert, war stets doppelt so hoch wie der in der Tabelle 5.2.3 angegebene. Dies lag an der konstruktionsbedingten Parallelschaltung von jeweils 12 in Reihe geschalteten HL-LEDs der insgesamt 24 HL-LEDs eines HL-LED-Typs.

Zusammen mit den Daten der benötigten Spannung der HL-LEDs konnte die benötigte elektrische Leistung der HL-LED-Typen in Abhängigkeit von der $PPFD_{\emptyset}$ berechnet werden. Dieser Zusammenhang wurde dann ebenfalls mit Polynomen 3. Grades beschrieben (Tab. 5.2.2).

Tab. 5.2.2 Beschreibung der benötigten elektrischen Leistung der HL-LED-Typen im Belichtungssystem von der durchschnittlichen $PPFD_{\emptyset}$.

$f(x)$ = elektrische Leistung (W) mit Bestimmtheitsmaß (R^2). x = durchschnittliche $PPFD_{\emptyset}$, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Definitionsbereich: $D = [5; 40]$ (siehe Anhang A.1.4)

HL-LED-Typ	Funktion	R^2
Rot	$f(x) = 0,0006 \cdot x^3 - 0,0246 \cdot x^2 + 1,1418 \cdot x - 1,0755$	0,9996
Blau	$f(x) = -4 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,0048 \cdot x^2 + 0,6595 \cdot x + 0,152$	0,9996
Kaltweiß	$f(x) = -4 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,0107 \cdot x^2 + 0,6565 \cdot x + 0,2509$	0,9998

Das Ergebnis der Berechnung der elektrischen Leistung der HL-LED-Typen im Belichtungssystem für die einzelnen Versuchseinstellungen ist in Tabelle 5.2.3 (Leistungs HL-LEDs, W) dargestellt. Aus der berechneten elektrischen Leistung der HL-LEDs im Belichtungssystem und der gemessenen, gesamten elektrischen Leistung des HL-LED-Belichtungssystems konnte der Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung ermittelt werden.

Tab. 5.2.3 Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung bei unterschiedlichen Varianten der Belichtung und der $PPFD$ (35, 30, 25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Zusätzliche Angaben der elektrischen Leistung der HL-LED-Belichtungsanlage und der der HL-LEDs, sowie die Betriebsstromstärke der einzelnen HL-LEDs des jeweiligen HL-LED-Typen (Blau, Rot, Kaltweiß). Drei Belichtungsvarianten mit einem $PPFD$ -Verhältnis von Rot zu Blau von 7:3 (RB 7:3) und 3:7 (RB 3:7) und Rot zu Weiß von 1:1 (RW 5:5).

Belichtungs- variante	$PPFD_{\emptyset}$, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Betriebsstromstärke, mA			Leistung HL-LEDs, W	Gesamtleistung Belichtungsanlage, W	Wirkungsgrad HL- LED-Steuerung, %
		Rot	Blau	Kaltweiß			
RB 7:3	35	296,2	100,6	0,0	28,6	36,0	79,4
RB 7:3	30	249,9	85,7	0,0	24,1	29,4	82,0
RB 7:3	25	207,8	71,0	0,0	20,0	23,6	84,5
RB 3:7	35	127,4	253,3	0,0	28,0	32,6	86,1
RB 3:7	30	109,6	212,9	0,0	23,7	27,4	86,5
RB 3:7	25	91,2	174,0	0,0	19,5	22,3	87,4
RW 5:5	35	207,8	0,0	390,6	29,4	36,1	81,5
RW 5:5	30	179,0	0,0	326,6	24,9	29,7	83,9
RW 5:5	25	150,5	0,0	265,5	20,6	24,6	83,8

Der Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung, der sich aus dem Wirkungsgrad der gesamten Belichtungsanlage und aus dem der HL-LEDs ergab, lag im Durchschnitt bei $83,9 \% \pm 2,6 \%$. Je nach Versuchseinstellung variierte dieser zwischen $79,4 \%$ bei der Variante RB 73 mit einer $PPFD_{\emptyset}$ von $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $87,4 \%$ bei RB 37 mit $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Tab. 5.2.1). Die drei Belichtungsvarianten (RB 3:7, RB 7:3, RW 5:5) wiesen, abgesehen von der eingestellten $PPFD_{\emptyset}$, abweichende Wirkungsgrade auf. Die Werte bei RB 7:3 waren gegenüber den anderen Varianten mit $82,0 \% \pm 2,6 \%$ am niedrigsten und bei RB 3:7 mit $86,7 \% \pm 0,7 \%$ am höchsten mit der geringsten Standardabweichung vom Mittelwert.

5.3 Ergebnisse der pflanzenphysiologischen Untersuchungen

5.3.1 Einfluss der Strahlungsqualität

Die In-vitro-Pflanzenentwicklung von fünf Arten wurde unter unterschiedlichen Strahlungsqualitäten untersucht. Es wurden verschiedene PPFD-Verhältnisse der HL-LED-Belichtungssysteme eingestellt. Zur Kontrolle diente ein Leuchtstofflampen-Belichtungssystem (Leuchtmittel: Philips Master TL-D 58W/840), deren relatives Strahlungsspektrum in der folgenden Abb. dargestellt ist (Abb. 5.3.1).

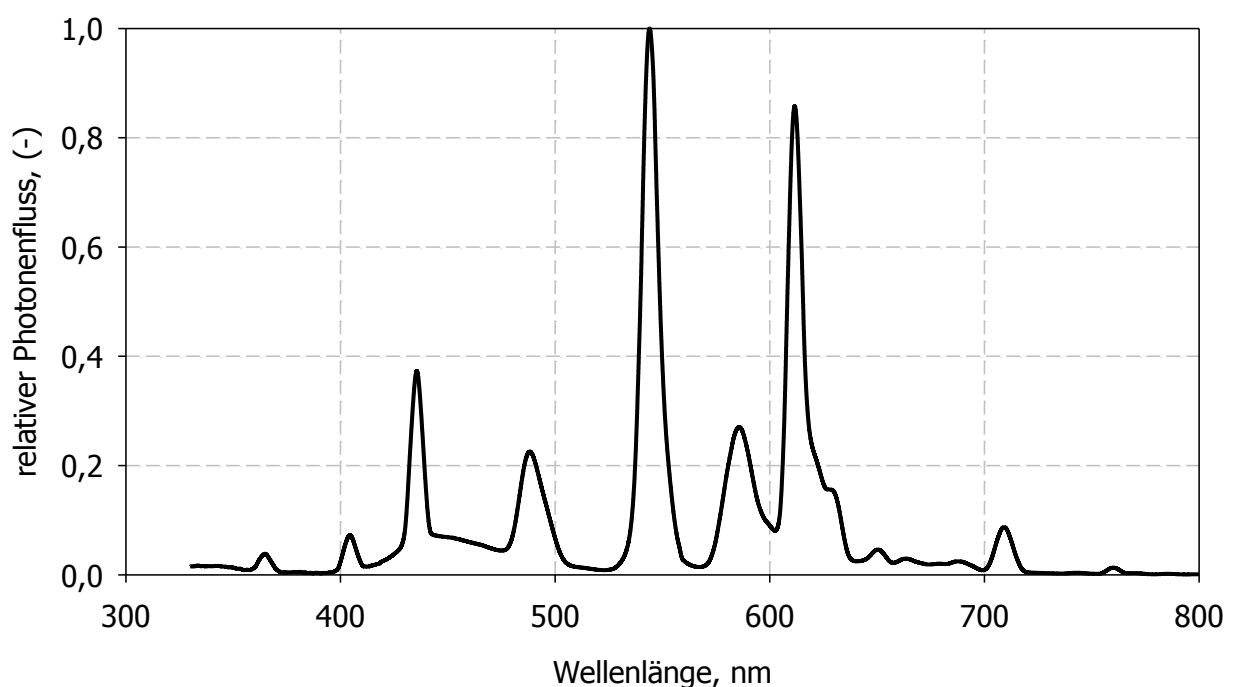


Abb. 5.3.1 Relative Strahlungsspektren einer Leuchtstofflampe (Philips Master TL-D 58W/840).

Das Strahlungsspektrum der kaltweißen Leuchtstofflampe unterscheidet sich deutlich von dem einer kaltweißen HL-LED und der farbiger HL-LEDs (siehe dazu Abb. 5.1.1). Bei der Leuchtstofflampe wurden mehrere Peaks in einem Wellenlängenbereich von 360 nm bis 760 nm erzeugt, mit zwei herausragenden Peaks bei 545 nm und 612 nm. Der nächsthöhere Peak befand sich im blauen Bereich des Strahlungsspektrums bei 437 nm. Die kaltweiße HL-LED erzeugte hingegen ein Strahlungsspektrum mit einem hohen maximalen Peak im blauen Wellenlängenbereich (449 nm) und einer wellenförmigen Strahlungsemission im grün-gelben Wellenlängenbereich mit einem Scheitelpunkt bei 564 nm. Eine kaltweiße Leuchtstofflampe und

HL-LED erzeugen beide mit unterschiedlichen Strahlungsspektren einen Farbeindruck kaltweißen Lichts.

Die in den Versuchen eingesetzten Kulturgefäße und die Folien, mit denen die Gefäße umwickelt waren, beeinflussten die Strahlungsspektren der Leuchten kaum. Die Transmissionsmessungen der beiden übereinanderliegenden Materialien, die mit einem Spektrometer (Perkin Elmer Lambda 900 UV/VIS/NIR Spektrometer) gemessen wurden, ergaben eine recht gleichmäßige, durchschnittliche Transmission von $89,5 \% \pm 1,04$ im Wellenlängenbereich der PAR (Abb. 5.3.2). Sie lag minimal bei $86,9 \%$ und maximal bei $90,5 \%$, wobei nur die Transmission im kurzwelligeren Bereich der PAR bis 465 nm Werte unter 89% aufwies.

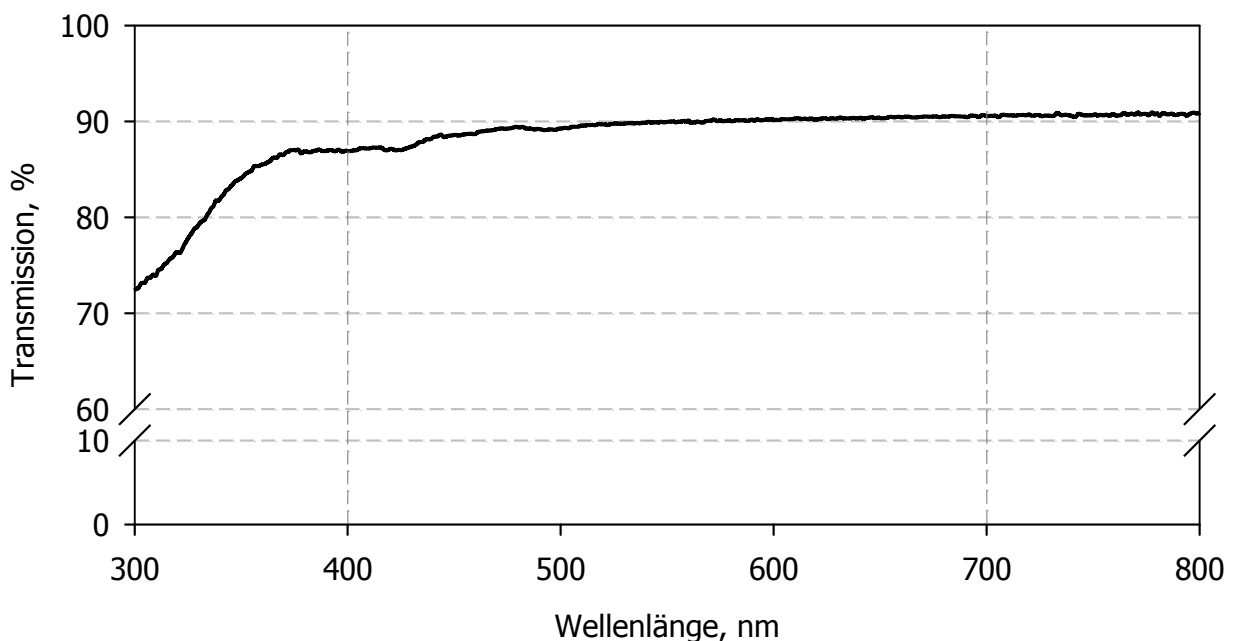


Abb. 5.3.2 Transmission der Kulturgefäße mit Folienüberzug.
Die beiden vertikalen gestrichelten Linien Grenzen den Bereich der PAR zwischen 400 nm und 700 nm ein.

5.3.1.1 *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05'

Die Ergebnisse in den vier einzelnen Kulturpassagen werden für die unterschiedlichen Auswertungsparameter in den folgenden Graphiken anhand dieser Kultur beispielhaft dargestellt (Abb. 5.3.4 und 5.3.5). Die statistischen Unterschiede zwischen den Varianten wurden in Abb. 5.3.6 bei dem Vergleich der über die vier Kulturpassagen zusammengefassten Daten in den Graphiken aufgezeigt. Die Temperatur in der Kulturkammer betrug durchschnittlich $20,6 \text{ °C} \pm$

1,8 °C. Die Kulturpassagen 1 bis 4 folgten aufeinander in KW39/09 bis KW47/09, KW 47/09 bis KW 03/10, KW 03/10 bis KW 11/10 und KW 11/10 bis KW 19/10. Die mittlere Raumtemperatur schwankte innerhalb der Kulturpassage von $19,3\text{ °C} \pm 0,6\text{ °C}$ (Kalenderwoche (KW) 39-47/09) und $21,0\text{ °C} \pm 1,5\text{ °C}$ (KW 31-39/09). Ein typischer Raumtemperaturverlauf ist in Abb. 5.3.3 dargestellt. Jahreszeitlich bedingt unterschieden sich die Temperaturverläufe teilweise durch eine tiefere Nachttemperatur, aus welcher die Unterschiede bei den Durchschnittstemperaturen zu Stande kamen.

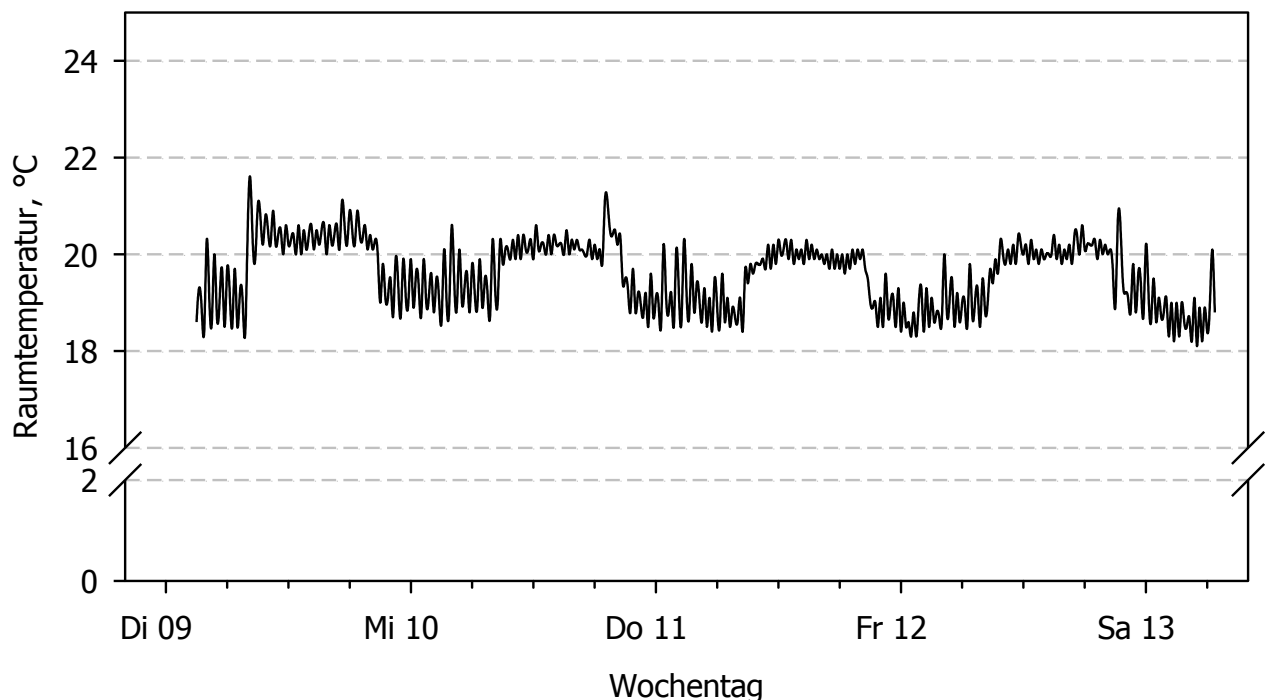


Abb. 5.3.3 Raumtemperatur in der Kulturkammer am Beispiel von fünf Wochentagen (09.02.2010 bis 13.09.2010) bei einer Einstellung von 20 °C Raumtemperatur. Die Daten wurden in einem 15 Sekunden Intervall gespeichert.

Beinahe alle Varianten wiesen erhebliche Unterschiede zwischen den Kulturpassagen bezüglich der Daten zum Frischmassezuwachs, zur Vermehrungsrate und teilweise zur Pflanzenhöhe auf (Abb. 5.3.4 A bis C). Ein Langzeiteffekt konnte dabei jedoch nicht beobachtet werden. Die Unterschiede zwischen den Varianten in den Kulturpassagen waren nicht einheitlich oder verstärkten sich sogar mit der Zeit. Ein auffallend niedriges Niveau in allen Varianten bei der Auswertung des Frischmassezuwachses und der Vermehrungsrate wurde in der Kulturpassage 3 zu den drei anderen Kulturpassagen gemessen.

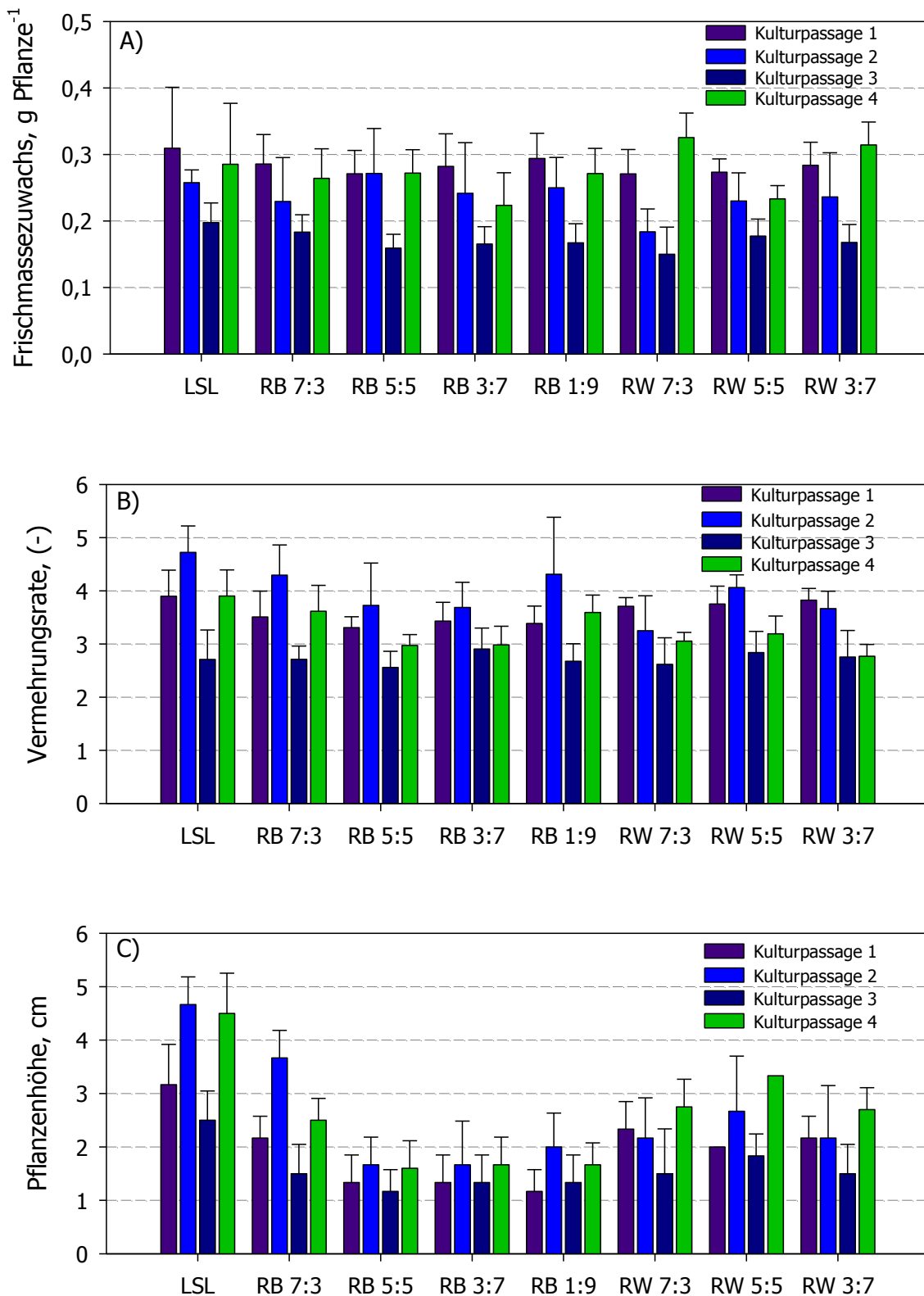


Abb. 5.3.4 Frischmassezuwachs (A), Vermehrungsrate (B) und Pflanzenhöhe (C) von *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' in vier aufeinanderfolgenden Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten, bei einer durchschnittlichen PPFD von $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Werte dargestellt als Mittelwerte mit Standardabweichung ($n = 6$).

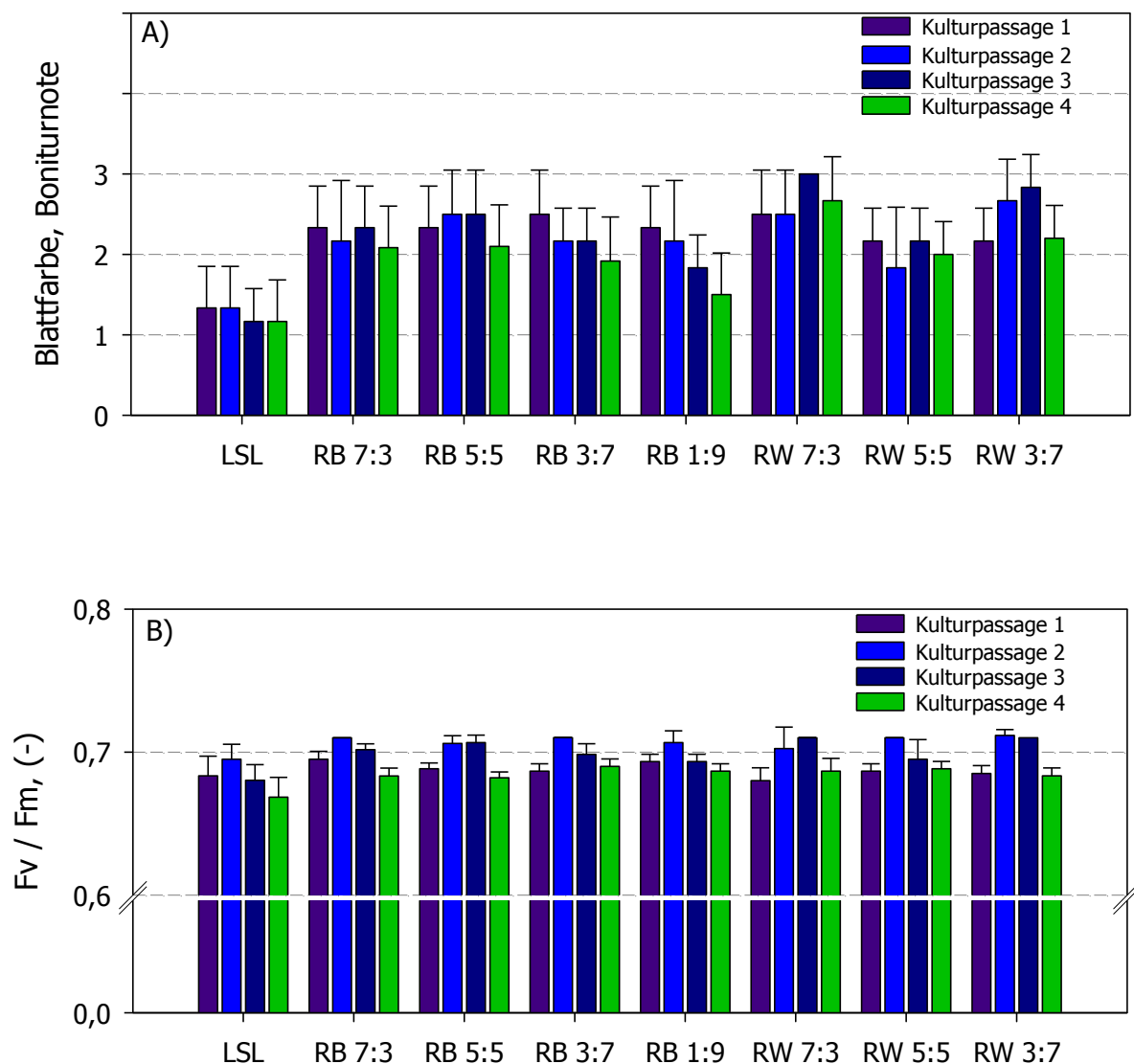


Abb. 5.3.5 Blattfarbe (A) und maximale PSII Quantenausbeute (B) von *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' in vier aufeinanderfolgenden Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten, bei einer durchschnittlichen PPFd von $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Werte dargestellt als Mittelwerte mit Standardabweichung ($n = 6$).

In der Leuchtstofflampenvariante (LSL-Variante) waren die Pflanzen stets am längsten, auch wenn die deutlichsten Unterschiede zwischen den Kulturpassagen bei dieser Variante zu erkennen waren. Das niedrigste Pflanzenwachstum gegenüber den anderen HL-LED-Varianten wurde in den RB-Varianten mit einem gleichen oder erhöhten Blauanteil (RB 5:5, RB 3:7, RB 1:9) erzielt. Hingegen zeigten die Bonitur der Blattfarbe und die Messungen der maximalen PSII Quantenausbeute (Abb. 5.3.5) im Vergleich mit den anderen Auswertungsparametern die geringsten Unterschiede innerhalb einer Variante. In der Leuchtstofflampenvariante

entwickelten sich die hellsten Blätter mit einer niedrigeren maximalen PSII-Quantenausbeute im Vergleich zu Pflanzen in den HL-LED-Varianten. Die helleren Blätter der Blattfarbe sind am Beispiel von Bildern der Pflanzen aus der Leuchtstofflampenvarianten und der HL-LED-Variante RB 3:7 in Abb. 5.3.7 beispielhaft dargestellt. Anhand der Bilder lassen sich auch die Unterschiede der Pflanzenhöhe verdeutlichen.

Bei der Auswertung der Ergebnisse mit einer Zweiweg-ANOVA, mit den Faktoren Belichtungsvariante und Kulturpassage, traten beim Frischmassezuwachs und der Vermehrungsrate vermehrt signifikante Unterschiede in mehr als einer Variante über die vier Kulturpassagen auf. Dabei trug ein verringertes Niveau der Werte in Kulturpassage 3 stark zu den Unterschieden bei. Um die Daten über alle Kulturpassagen vergleichbar zu machen, wurden die Daten der Vermehrungsrate und des Frischmassezuwachses auf die Leuchtstofflampenvariante der jeweiligen Kulturpassage normiert. Eine Zweiweg-ANOVA zeigte dennoch Unterschiede in einigen Varianten über die Kulturpassagen, diese konnten aber durch die Normierung minimiert werden. Bei jedem Auswertungsparameter wurden die Daten einer Variante über die vier Kulturpassagen zusammengefasst und danach miteinander verglichen (Abb. 5.3.6).

Trotz der Normierung zeigten sich keine signifikanten Unterschiede beim Frischmassezuwachs. Die Mittelwerte (absoluter Mittelwert der Leuchtstofflampenvariante $0,26 \text{ g} \pm 0,07 \text{ g Pflanze}^{-1}$) weisen auf einen leicht verringerten Frischmassezuwachs bei den HL-LED-Varianten hin (Abb. 5.3.6 A). Auch bei der Auswertung der Vermehrungsrate zeigte die LSL-Variante den höchsten Mittelwert (absoluter Mittelwert von $3,81 \pm 0,87$), mit einem statistisch signifikanten Unterschied zu RB 5:5 und RW 7:3.

Die höchsten Pflanzen entwickelten sich in der LSL-Variante. In allen HL-LED-Varianten wuchsen die Pflanzen gedrungener bei einem sehr geringen Wachstum in den RB-Varianten und einem Blauanteil $\geq 50 \%$. Bei der Blattfarbe und der maximalen PSII-Quantenausbeute bestätigten sich die Aussagen, welche bereits bei Betrachtung der Ergebnisse in den einzelnen Kulturpassagen (Abb. 5.3.5) getroffen wurden. Statistisch signifikant war der Unterschied in der Blattfarbe nur bei einem Vergleich von RW 7:3 mit LSL und RB 1:9, wobei der Mittelwert in der LSL-Variante am niedrigsten war.

In den Kulturgefäßen (Ergebnisse hier nicht dargestellt) kam es vereinzelt zu einer Blütenknospenbildung, die aber nicht auf eine bestimmte Strahlungsqualität zurückzuführen ist, da die seltene Knospenbildung eher zufällig vorkam und nicht auf eine bestimmte Versuchsvariante beschränkt war.

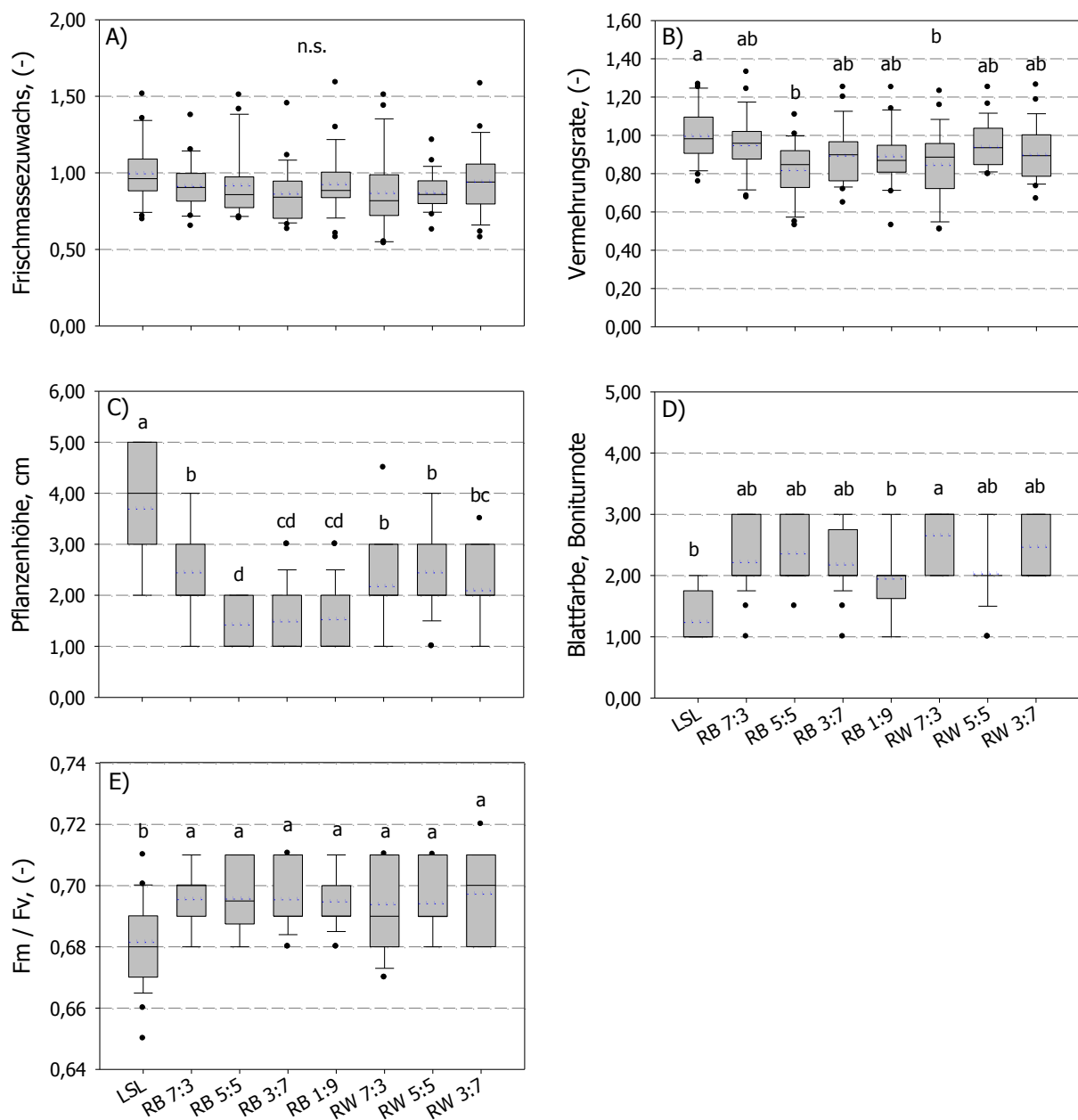


Abb. 5.3.6 Normierter mittlerer Frischmassezuwachs (A), normierte Vermehrungsrate (B), Absolutwerte der Pflanzenhöhe (C), Blattfarbe (D; aus Boniturnoten von 1 bis 3) und maximale PSII-Quantenausbeute (E) von *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' über vier Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 24). Durchschnittliche PPFD: $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Blaue gepunktete Linien stellen den Mittelwert dar. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied mit $p \leq 0,05$ (Mittelwertvergleiche nach Tukey mit Alpha-Adjustierung nach Bonferroni (A, B, E) oder nach Dunn's Methode (C, D) hin.

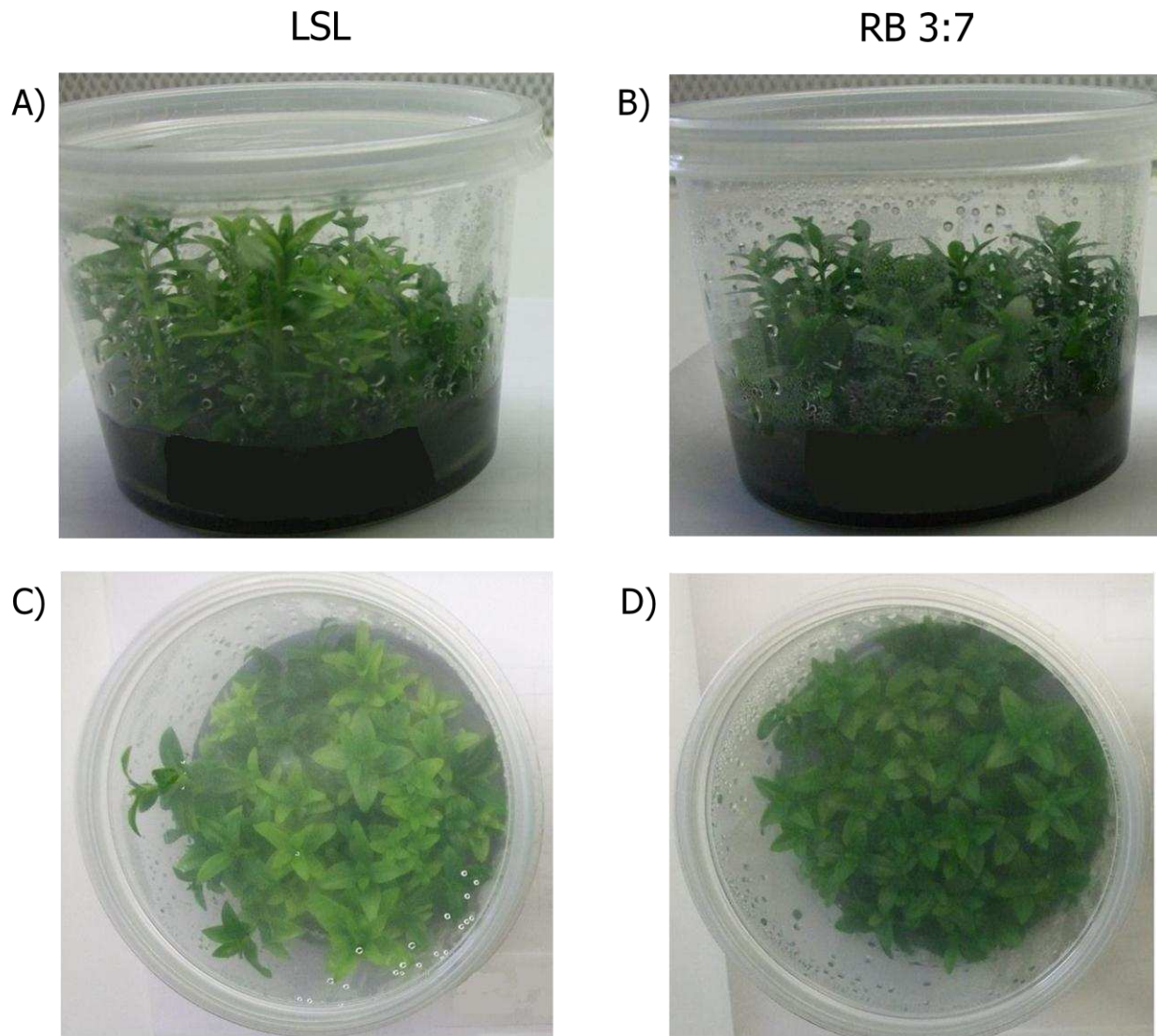


Abb. 5.3.7 Seitenansicht und Aufsicht der Kulturgefäße mit *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' aus der Kulturpassage 1 bei $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A), C) Leuchtstofflampenvariante (LSL). B), D) HL-LED-Variante RB 3:7. Schilder mit betriebsinternen Etikettierungen der Firma Bock Bio Science GmbH wurden bei A) und B) wegetuschiert.

5.3.1.2 *Canna indica*

Wie bei der Auswertung von *G. cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' traten auch bei den *Canna indica* häufig signifikante Unterschiede bei den Frischmassezuwächsen und den Vermehrungsraten in mehr als einer Variante über die vier Kulturpassagen auf, weshalb die Daten, wie in Kapitel 5.3.1.1 beschrieben, normiert wurden.

Die Temperatur in der Kulturkammer betrug durchschnittlich $20,3 \text{ °C} \pm 1,9 \text{ °C}$. Die mittleren Raumtemperaturen schwankten innerhalb der Kulturpassagen zwischen $19,0 \text{ °C} \pm 2,1 \text{ °C}$ (KW 38-46/09) und $20,5 \text{ °C} \pm 2,6 \text{ °C}$ (KW 46/09-02/10).

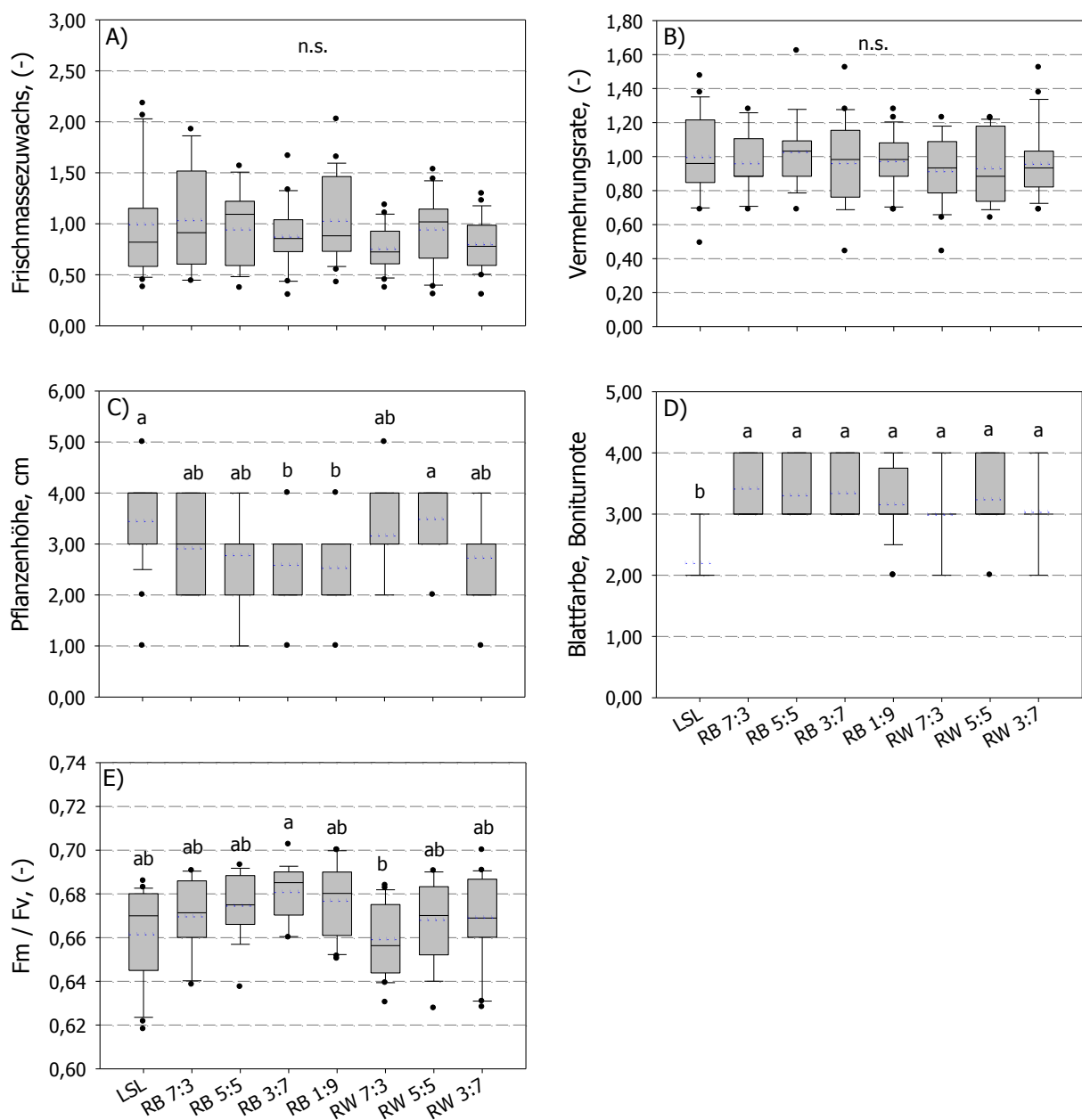


Abb. 5.3.8 Normierter mittlerer Frischmassezuwachs (A), normierte Vermehrungsrate (B), Absolutwerte der Pflanzenhöhe (C), Blattfarbe (D; aus Boniturnoten von 1 bis 4) und maximale PSII-Quantenausbeute (E) von *Canna indica* über vier Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 24).

Durchschnittliche PPF: $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Blaue gepunktete Linien stellen den Mittelwert dar. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied mit $p \leq 0,05$ (multiple Mittelwertvergleiche nach der Dunn's Methode) hin.

Beim Frischmassezuwachs und der Vermehrungsrate der *Canna indica* (Abb. 5.3.8 A, B) konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die Vermehrungsrate lag bei allen

Varianten nur knapp im positiven Bereich (absoluter Mittelwert LSL: $1,1 \pm 0,27$). Eine auffällig hohe Zahl der vereinzelt Pflanzen in den Kulturgefäßen starb in den 8-wöchigen Kulturpassagen ab.

Unter einer Belichtung mit hohem Blauanteil bei den RB-Varianten wuchsen die Pflanzen gedrungener. Hohe Pflanzen wurden in den Varianten LSL und RW 5:5 erzielt (Abb 5.3.8 C). Die Belichtung in den HL-LED-Varianten führte, wie auch bei *G. cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05', zu Pflanzen mit einer kräftigeren Grünfärbung als bei Pflanzen unter einer Leuchtstofflampenbelichtung (Abb. 5.3.8 D). Der Unterschied der maximalen PSII-Quantenausbeute zwischen der Leuchtstofflampenvariante und den HL-LED-Varianten fiel hier jedoch nicht so deutlich aus und es ergab sich nur ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen RB 3:7 zu RW 7:3.

5.3.1.3 *Kalmia latifolia*

Die Reaktion des Berglorbeers auf unterschiedliche Strahlungsqualitäten wurde anhand zweier Sorten untersucht und die Ergebnisse sind nacheinander in den Abb.en 5.3.9 (*Kalmia latifolia* 'Corona') und 5.3.10 (*K. latifolia* 'Ginkona') dargestellt. Die Daten des Frischmassezuwachses und der Vermehrungsrate wurden aus den in Kapitel 5.3.1.1 und 5.3.1.2 beschriebenen Gründen normiert. Die Raumtemperatur betrug innerhalb der drei Kulturpassagen durchschnittlich $20,4 \text{ °C} \pm 1,4 \text{ °C}$ bei einer PPFD_\emptyset von $26 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Insgesamt zeigten die Ergebnissen aus den Versuchen mit den beiden Sorten von *K. latifolia* ein ähnliches Bild mit wenigen statistischen Unterschieden. Der Frischmassezuwachs von *K. latifolia* 'Corona' (Abb. 5.3.9 A) war bei RB 5:5 mit $0,15 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g Pflanze}^{-1}$ am höchsten, unterschied sich statistisch aber nur von RW 3:7. Keine statistischen Unterschiede gab es bei *K. latifolia* 'Ginkona' (Abb. 5.3.10 A). Hier lag der Zuwachs in der LSL-Variante bei $0,17 \text{ g Pflanze}^{-1}$. Die Vermehrungsraten unterschieden sich nicht voneinander (Abb. 5.3.9 B und Abb. 5.3.10 B). Die absolute Vermehrungsrate von *K. latifolia* 'Corona' betrug in der LSL-Variante $4,18 \pm 0,49$ und bei *K. latifolia* 'Ginkona' bei $3,97 \pm 0,43$. Anders als bei den Ergebnissen in den Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 wurde kein signifikant höheres Längenwachstum der beiden Sorten von *K. latifolia* unter einer Leuchtstofflampenbelichtung festgestellt, auch wenn der jeweilige Mittelwert in der LSL-Variante gegenüber den HL-LED-Varianten am höchsten war (Abb. 5.3.9 C und Abb. 5.3.10 C). Deutlich zu erkennen waren die ebenso helleren Blätter der Pflanzen, die unter einer Leuchtstofflampe kultiviert wurden (siehe Anhang A.3). Mit Ausnahme der Varianten RB 7:3, RB 3:7 und RB 1:9 von *K. latifolia* 'Ginkona' (Abb 5.3.8 D) zeigte der statistische Vergleich bei beiden Sorten stets Unterschiede der HL-LED-Varianten zur LSL-Variante.

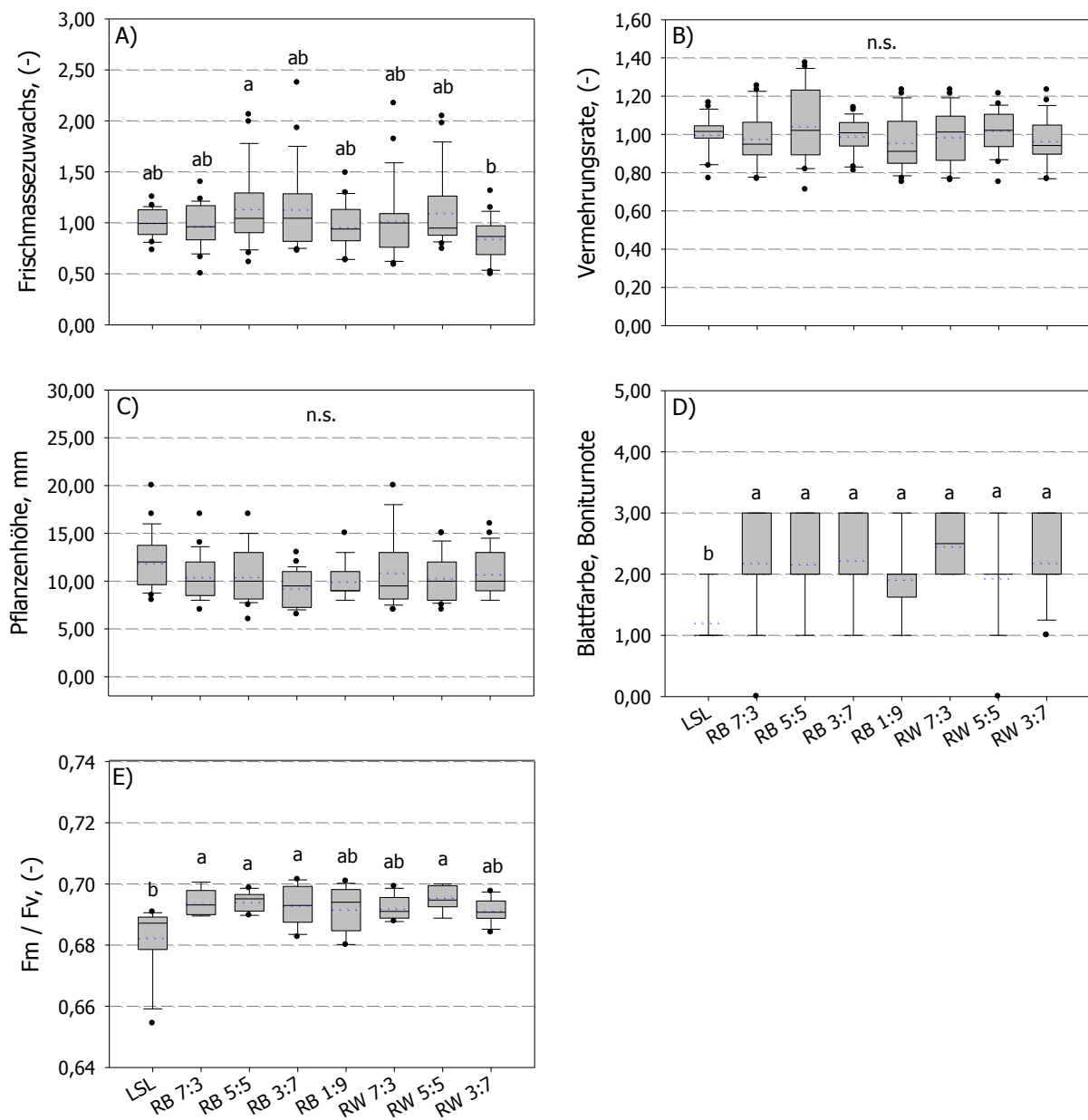


Abb. 5.3.9 Normierter mittlerer Frischmassezuwachs (A), normierte Vermehrungsrate (B), Absolutwerte der Pflanzenhöhe (C), Blattfarbe (D; aus Boniturnoten von 1 bis 4) und maximale PSII-Quantenausbeute (E) von *Kalmia latifolia* 'Corona' über vier Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 18). Durchschnittliche PPFD: $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Blaue gepunktete Linien stellen den Mittelwert dar. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied mit $p \leq 0,05$ (multiple Mittelwertvergleiche nach der Dunn's Methode) hin.

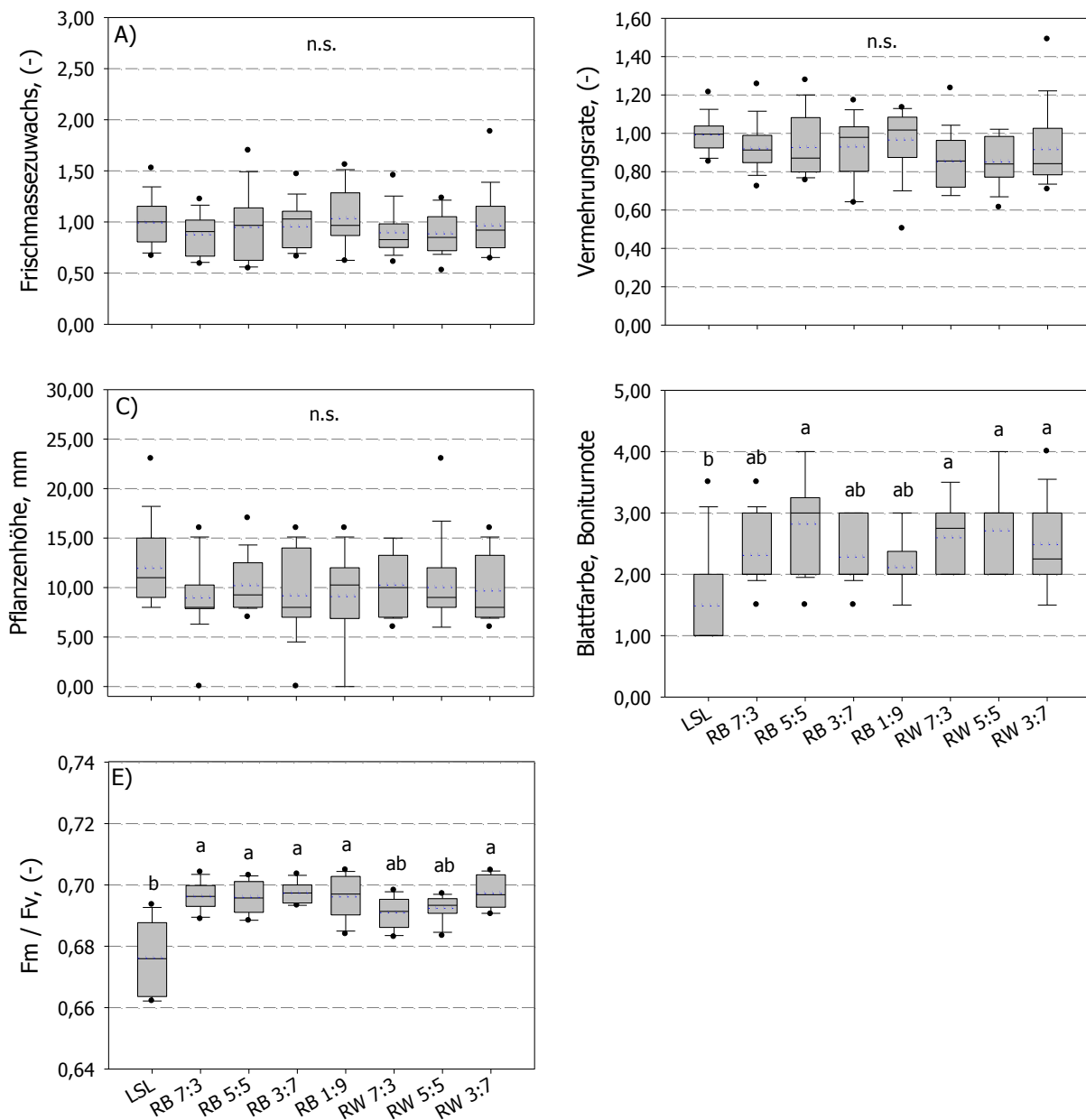


Abb. 5.3.10 Normierter mittlerer Frischmassezuwachs (A), normierte Vermehrungsrate (B), Absolutwerte der Pflanzenhöhe (C), Blattfarbe (D; aus Boniturnoten von 1 bis 4) und maximale PSII-Quantenausbeute (E) von *Kalmia latifolia* 'Ginkona' über vier Kulturpassagen mit acht unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 18).

Durchschnittliche PPFD: $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Blaue gepunktete Linien stellen den Mittelwert dar. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied mit $p \leq 0,05$ (multiple Mittelwertvergleiche nach der Dunn's Methode) hin.

Ähnlich wie bei den Ergebnissen zur Blattfarbe ergaben sich auch oftmals Unterschiede in der maximalen PSII-Quantenausbeute zwischen den LSL-Varianten und den HL-LED-Varianten beider Sorten mit nur wenigen Ausnahmen (Abb. 5.3.9 E und 5.3.10 E). Eine niedrigere maximale PSII-Quantenausbeute derjenigen Pflanzen, die unter einer Leuchtstofflampenbelichtung gewachsen waren, konnte bereits bei *G. cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' und *C. indica* aufgezeigt werden (siehe oben).

5.3.1.4 *Phalaenopsis*-Hybriden

Auf Grund der Unterschiede zwischen den Daten der beiden Kulturpassagen innerhalb einer Variante wurden die Daten wie oben beschrieben normiert und zusammengefasst. Die Raumtemperatur in dem Kulturraum betrug über die zwei Kulturpassagen von jeweils acht Wochen durchschnittlich $24,2\text{ °C} \pm 2,4\text{ °C}$ (KW 50/07 bis 15/08).

Die drei *Phalaenopsis*-Hybriden zeigten keine einheitlichen Reaktionen auf die fünf unterschiedlichen Strahlungsqualitäten in Bezug auf den Frischmassezuwachs und die Vermehrungsrate. Der Frischmassezuwachs unter der LSL-Variante war bei den Pflanzen auf Vermehrungsmedium bei jeder Hybride am niedrigsten (Tab. 5.3.1 A bis C). Dies gilt bis auf die *P.*-Hybride 'Don Giovanni' (Tab. 5.3.1 F) auch für die Pflanzen, die auf Stockmedium gewachsen sind (Tab. 5.3.1 D, E).

Unter der Belichtung mit einer Leuchtstofflampe vermehrten sich die Pflanzen meist etwas besser als die Pflanzen unter den HL-LED-Varianten, auch wenn die Datenauswertung kaum statistische Unterschiede aufzeigte. Dies konnte bei den auf Vermehrungs- und Stockmedium gewachsenen Pflanzen beobachtet werden. Statistisch signifikante, höhere Vermehrungsraten ergaben sich nur bei der *Phalaenopsis*-Hybride 'Don Giovanni', die in den HL-LED-Varianten RW und RGB kultiviert wurden (Tab. 5.3.1 D).

Tab. 5.3.1 Normierter Frischmassezuwachs und Vermehrungsrate der *Phalaenopsis*-Hybride 'Don Giovanni' (A, D), 'Paulina' (B, E) und 'Don Giovanni' (C, F) kultiviert auf Vermehrungsmedium (A bis C) und auf Stockmedium (D bis E) über je zwei Kulturpassagen mit fünf unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 16).
Durchschnittliche PPFD: 34 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied hin mit $p \leq 0,05$ (multiple Mittelwertvergleiche nach der Dunn's Methode oder nach Tukey mit Bonferroni α -Adjustierung) hin.

A) 'Don Giovanni', Vermehrungsmedium

Variante	Frischmassezuwachs, (-)	Vermehrungsrate, (-)
LSL	1,00 \pm 0,16 c	1,00 \pm 0,10 n.s.
RW	1,17 \pm 0,09 b	0,98 \pm 0,18 n.s.
RB	1,53 \pm 0,15 a	1,04 \pm 0,13 n.s.
RGB	1,55 \pm 0,52 ab	0,94 \pm 0,15 n.s.
RWB	1,04 \pm 0,14 bc	1,03 \pm 0,11 n.s.

D) 'Don Giovanni', Stockmedium

Variante	Frischmassezuwachs, (-)	Vermehrungsrate, (-)
LSL	1,00 \pm 0,17 b	1,00 \pm 0,29 b
RW	1,28 \pm 0,25 a	1,51 \pm 0,41 a
RB	1,05 \pm 0,16 b	0,96 \pm 0,42 b
RGB	1,25 \pm 0,24 a	1,51 \pm 0,46 a
RWB	1,07 \pm 0,15 b	0,75 \pm 0,35 b

B) 'Paulina', Vermehrungsmedium

Variante	Frischmassezuwachs, (-)	Vermehrungsrate, (-)
LSL	1,00 \pm 0,21 bc	1,00 \pm 0,08 a
RW	1,41 \pm 0,22 a	1,04 \pm 0,10 a
RB	1,15 \pm 0,21 b	0,89 \pm 0,14 b
RGB	0,94 \pm 0,23 c	0,98 \pm 0,17 ab
RWB	1,03 \pm 0,30 bc	0,95 \pm 0,14 ab

E) 'Paulina', Stockmedium

Variante	Frischmassezuwachs, (-)	Vermehrungsrate, (-)
LSL	1,00 \pm 0,29 b	NA \pm NA
RW	1,54 \pm 0,21 a	NA \pm NA
RB	1,42 \pm 0,22 a	NA \pm NA
RGB	1,14 \pm 0,23 b	NA \pm NA
RWB	1,08 \pm 0,17 b	NA \pm NA

C) 'Don Giovanni', Vermehrungsmedium

Variante	Frischmassezuwachs, (-)	Vermehrungsrate, (-)
LSL	1,00 \pm 0,11 c	1,00 \pm 0,15 a
RW	1,24 \pm 0,22 ab	1,02 \pm 0,14 a
RB	1,45 \pm 0,23 a	1,05 \pm 0,16 a
RGB	1,20 \pm 0,27 b	0,98 \pm 0,14 a
RWB	1,10 \pm 0,25 bc	0,78 \pm 0,14 b

F) 'Don Giovanni', Stockmedium

Variante	Frischmassezuwachs, (-)	Vermehrungsrate, (-)
LSL	1,00 \pm 0,23 ab	1,00 \pm 0,52 n.s.
RW	0,89 \pm 0,21 b	1,12 \pm 0,55 n.s.
RB	0,94 \pm 0,18 ab	1,12 \pm 0,43 n.s.
RGB	0,96 \pm 0,16 ab	0,84 \pm 0,37 n.s.
RWB	1,07 \pm 0,20 a	0,87 \pm 0,47 n.s.

5.3.1.5 *Helleborus niger* und *Helleborus x ericsmithii*-Hybride

Bei den *Helleborus niger* Klonen I und II und bei *Helleborus x ericsmithii*-Hybride die Auswertungen der Daten zur Vermehrungsrate wie oben beschrieben auf die Leuchtstofflampenvariante in der jeweiligen Kulturpassage normiert. Die Raumtemperatur des Kulturraums betrug über die vier aufeinanderfolgenden Kulturpassagen von jeweils sechs Wochen durchschnittlich $12,5 \text{ °C} \pm 1,02 \text{ °C}$ (KW 50/07 bis KW 15/08).

Die drei Klone reagierten unterschiedlich auf die sechs Strahlungsqualitäten und zeigten weder einheitliche Vermehrungsraten noch eine einheitliche Ausbildung der Pflanzenmorphologie, die der Pflanzenkategorie 1 zugeordnet werden konnte. In den meisten Fällen unterschieden sich die Vermehrungsraten der HL-LED-Varianten kaum von denen der LSL-Varianten, insbesondere wenn die Pflanzen auf Vermehrungsmedium kultiviert wurden. Statistisch höhere Vermehrungsraten gegenüber der LSL-Variante konnten nur auf Zwischenmedium bei *Helleborus niger* Klon I (Tab. 5.3.2 D) in der Variante RB 3:7 und bei *H. x ericsmithii*-Hybride 'St. Basilius' in der Variante RGB 1:1:1 (Tab. 5.3.2 E) erzielt werden, sowie beim Klon II in der Variante RB 3:7 auf Zwischenmedium.

Die Einteilung der Pflanzen erfolgte in zwei Kategorien, von denen nur die Anzahlen der ersten Kategorie dargestellt sind. In den meisten Fällen war die Anzahl der Pflanzen, die der Kategorie 1 zugeordnet wurden gleich. Eine statistisch höhere Pflanzenanzahl in dieser Kategorie gegenüber der LSL-Variante konnte allein in der Variante RB 3:7 mit dem *H. niger* Klon I auf Zwischenmedium (Tab. 5.3.2 D) beobachtet werden. Bei diesem Klon wurden auf beiden Medien die niedrigsten Mittelwerte in der Variante RB 1:9 festgestellt.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen *Helleborus*-Klone auf den zwei Medien ließen keine Tendenz erkennen, dass eine Variante als besonders förderlich für die Vermehrungsrate oder die Produktion von Pflanzen der Kategorie 1 herausgestellt werden konnte.

Tab. 5.3.2 Normierter Frischmassezuwachs und Vermehrungsrate des *Helleborus niger* Klons I (A, D), des *Helleborus x ericsmithii*-Hybride 'St. Basilius' (B, E) und des *H. niger* Klons II (C, F) kultiviert auf Vermehrungsmedium (A bis C; n = 16) über zwei Kulturpassagen und auf Zwischenmedium (D bis E; n= 8) über eine Kulturpassage mit sechs unterschiedlichen Belichtungsvarianten.

Durchschnittliche PPFD: $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied mit $p \leq 0,05$ (multiple Mittelwertvergleiche nach der Dunn's Methode oder nach Tukey mit Bonferroni α -Adjustierung) hin.

A) Klon I, Vermehrungsmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,09 a	49,8 ± 15,1 n.s.
CW	0,98 ± 0,34 ab	51,7 ± 10,9 n.s.
RW 3:7	0,86 ± 0,14 ab	43,5 ± 10,5 n.s.
RGB 1:1:1	0,81 ± 0,12 b	40,8 ± 7,8 n.s.
RB 3:7	0,80 ± 0,16 b	45,1 ± 22,2 n.s.
RB 1:9	0,77 ± 0,22 b	37,6 ± 9,0 n.s.

D) Klon I, Zwischenmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,11 b	21,4 ± 4,9 bc
CW	1,11 ± 0,09 ab	26,0 ± 4,6 ab
RW 3:7	1,03 ± 0,08 b	27,6 ± 4,2 ab
RGB 1:1:1	1,06 ± 0,06 b	28,8 ± 3,3 ab
RB 3:7	1,20 ± 0,14 a	31,5 ± 4,2 a
RB 1:9	0,74 ± 0,09 c	15,4 ± 4,4 c

B) 'St. Basilius', Vermehrungsmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,07 n.s.	22,5 ± 5,4 n.s.
CW	1,03 ± 0,11 n.s.	23,4 ± 10,7 n.s.
RW 3:7	1,13 ± 0,14 n.s.	33,0 ± 7,5 n.s.
RGB 1:1:1	1,09 ± 0,20 n.s.	20,4 ± 10,9 n.s.
RB 3:7	1,03 ± 0,15 n.s.	22,1 ± 5,4 n.s.
RB 1:9	1,28 ± 0,50 n.s.	37,5 ± 19,1 n.s.

E) 'St. Basilius', Zwischenmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,09 b	14,1 ± 4,1 n.s.
CW	1,15 ± 0,12 ab	20,8 ± 4,1 n.s.
RW 3:7	1,09 ± 0,16 ab	15,1 ± 6,7 n.s.
RGB 1:1:1	1,20 ± 0,10 a	17,2 ± 7,3 n.s.
RB 3:7	1,07 ± 0,06 ab	13,9 ± 2,0 n.s.
RB 1:9	1,10 ± 0,11 ab	14,3 ± 4,5 n.s.

C)) Klon II, Vermehrungsmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,14 ab	37,3 ± 12,7 ab
CW	1,10 ± 0,16 ab	41,0 ± 14,0 ab
RW 3:7	1,09 ± 0,32 ab	41,1 ± 10,6 ab
RGB 1:1:1	1,22 ± 0,14 a	44,5 ± 12,9 a
RB 3:7	1,03 ± 0,28 ab	38,0 ± 5,9 ab
RB 1:9	0,88 ± 0,11 b	28,8 ± 7,0 b

F) Klon II, Zwischenmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,12 b	24,1 ± 5,2 n.s.
CW	1,09 ± 0,22 b	25,5 ± 5,3 n.s.
RW 3:7	1,09 ± 0,16 ab	28,1 ± 5,0 n.s.
RGB 1:1:1	1,22 ± 0,18 ab	26,3 ± 10,3 n.s.
RB 3:7	1,33 ± 0,12 a	24,8 ± 5,0 n.s.
RB 1:9	0,97 ± 0,11 b	24,0 ± 4,2 n.s.

5.3.2 Einfluss der Strahlungsintensität

5.3.2.1 *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05'

Die mit einer geringeren $PPFD_{\emptyset}$ von $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ belichteten *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' wurden über drei Kulturpassagen von jeweils acht Wochen bei einer mittleren Raumtemperatur von $20,8 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und unter sechs unterschiedlichen Strahlungsqualitäten kultiviert. Die mittleren Raumtemperaturen schwankten zwischen den Kulturphasen von $20,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in KW 20-28/10 bis $21,0 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in KW 28-36/10. Zusätzlich zu den Varianten mit einer geringen $PPFD_{\emptyset}$ (LSL_13) gab es eine LSL-Variante (LSL_26), bei der die Pflanzen, wie in Kapitel 5.3.1.1 beschrieben, mit einer $PPFD_{\emptyset}$ von $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ belichtet wurden.

Die Daten zur Vermehrungsrate und zum Frischmassezuwachs wurden auf die Daten der Variante LSL_13 normiert (siehe dazu Kapitel 5.3.1.1). Dabei unterschied sich die LSL_26 mit ihren höheren Werten deutlich von den anderen. Bei den Varianten mit einer $PPFD_{\emptyset}$ von $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ konnten, trotz höherer Mittelwerte der Variante LSL_13, bei der Vermehrungsrate keine Unterschiede festgestellt werden. Beim Frischmassezuwachs gab es zwischen den Varianten LSL_13 und RW 5:5 (Abb. 5.3.11 A) einen statistischen Unterschied. Ähnlich geringe Unterschiede ergaben sich in den *Gentiana*-Versuchen mit einer höheren $PPFD_{\emptyset}$ (Abb. 5.3.6 A, B).

Die niedrigere $PPFD_{\emptyset}$ führte nicht nur zu geringeren Frischmassezuwächsen und Vermehrungsraten, sondern auch zu einem verringerten Wachstum der Pflanzen mit besonders kleinen Pflanzen in den HL-LED-Varianten. Dabei war der Unterschied zwischen der LSL_13 und den HL-LED-Varianten nicht so deutlich wie bei den *Gentiana*-Versuchen mit höherer $PPFD_{\emptyset}$ (siehe Abb. 5.3.6 C und Abb. 5.3.11 C). Die maximale PSII-Quantenausbeute (Abb. 5.3.11 E) war in der Variante LSL_26 höher als in den Varianten mit einer geringeren $PPFD_{\emptyset}$ von $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Die Variante LSL_13 zeigte ähnliche Unterschiede zu den HL-LED-Varianten wie sie bereits in Abb. 5.3.6 E zu erkennen waren, in welcher die LSL-Varianten die niedrigsten Werte aufwiesen. Auch hier unterschied sich die Blattfarbe der Pflanzen unter einer Leuchtstofflampenbelichtung sichtbar von der Blattfarbe unter der LED-Belichtung (Abb. 5.3.20 D). Die niedrigere $PPFD_{\emptyset}$ in den LSL-Varianten führte zu einer Ausprägung von etwas dunkelgrünere Blättern als bei der Variante LSL_26.

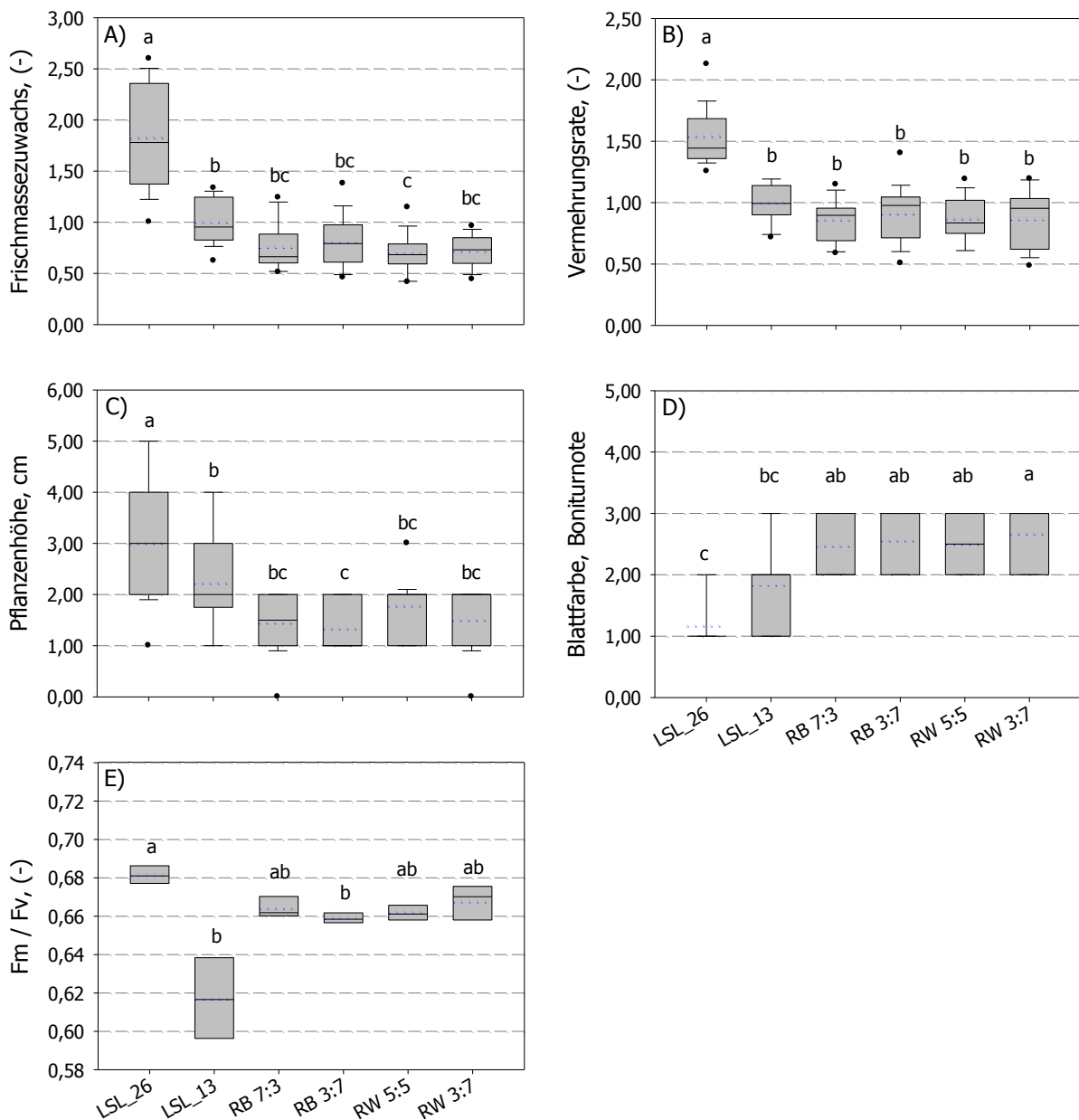


Abb. 5.3.11 Normierter mittlerer Frischmassezuwachs (A), normierte Vermehrungsrate (B), Absolutwerte der Pflanzenhöhe (C), Blattfarbe (D; aus Boniturnoten von 1 bis 3) und maximale PSII Quantenausbeute (E) von *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' über vier Kulturpassagen mit sechs unterschiedlichen Belichtungsvarianten (n = 18). Durchschnittliche PPFd: $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Blaue gepunktete Linien stellen den Mittelwert dar. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied mit $p \leq 0,05$ (Mittelwertvergleiche nach der Dunn's Methode oder nach Tukey mit Bonferroni α -Adjustierung) hin.

5.3.2.2 *Helleborus niger* und *H. x ericsmithii*-Hybride 'St. Basilus'

Die Versuche liefen parallel zu den in Kapitel 5.3.1.5 beschriebenen Versuchen. Die Bedingungen in der Kulturkammer waren dementsprechend dieselben. Wie auch in den in Kapitel 5.3.1.5 dargestellten Ergebnissen ergab die Auswertung der Vermehrungsrate und der Anzahl an Pflanzen der Kategorie 1 nur wenige signifikante Unterschiede und es ließ sich keine Variante als vorteilhaft oder nachteilig herausstellen.

Die Daten zur Vermehrungsrate wurden wie auch schon bei den vorangegangenen Auswertungen normiert. Die Vermehrungsrate der Pflanzen auf dem Vermehrungsmedium lag bei der *H. x ericsmithii*-Hybride 'St. Basilus' (Tab. 5.3.3 B) und *H. niger* Klon II (Tab. 5.3.3 C) in der LSL-Variante über den Raten der HL-LED-Varianten. Dieser Unterschied bestätigte sich aber bei Klon I auf Vermehrungsmedium nicht, ebenso nicht in der Vermehrungsrate bei den Pflanzen, die auf dem Zwischenmedium wuchsen.

Die einzigen statistisch signifikanten Unterschiede dieser Pflanzenkategorie konnten bei *H. x ericsmithii*-Hybride 'St. Basilus' auf Vermehrungsmedium und beim *H. niger* Klon I auf Zwischenmedium erfasst werden (Tab. 5.3.3 B, D). Dabei waren die Unterschiede zwischen den Varianten nicht einheitlich, so dass zum Beispiel die Tendenz zu einer niedrigeren Anzahl an Pflanzen der Kategorie 1 in der LSL-Variante nicht ausgemacht werden konnte. Einmal wurde eine höhere Anzahl und ein anderes Mal eine niedrigere Anzahl an Pflanzen der Kategorie 1 gezählt.

Die Daten der Vermehrungsraten, die auf dem Vermehrungsmedium mit höheren $PPFD_{\emptyset}$ erzielt wurden (Kapitel 5.3.5), wiesen nur unwesentlich höhere Werte (zwischen 1,9 und 2,8) gegenüber den Versuchen unter einer niedrigeren $PPFD_{\emptyset}$ mit Werten zwischen 2,2 und 2,6 auf (Daten hier nicht abgebildet). Die Vermehrungsrate auf dem Zwischenmedium war etwas geringer, allerdings konnten auch auf dem Zwischenmedium, mit Werten von 1,7 bis 1,9 bei $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und 1,7 bis 2,0 bei $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, keine Unterschiede in der Vermehrungsrate ermittelt werden. Generell wurde bei den Versuchen mit einer niedrigeren $PPFD_{\emptyset}$, unabhängig von Medium und Klon, eine geringere Anzahl an Pflanzen gefunden, die in die Kategorie 1 fielen.

Im Vergleich zu den Pflanzen, die unter einer höheren $PPFD_{\emptyset}$ gewachsen sind, wurden hier Pflanzen mit einer nicht so intensiven Grünfärbung erhalten, die auch einen nicht ganz so kräftigen Eindruck machten. Insgesamt konnte die Pflanzenqualität, die bei der Kultivierung mit einer höheren $PPFD_{\emptyset}$ erzielt wurde, beim Einsatz einer niedrigeren $PPFD_{\emptyset}$ nicht erreicht werden.

Tab. 5.3.3 Normierter mittlerer Frischmassezuwachs und Vermehrungsrate des *Helleborus niger* Klons I (A, D), der *Helleborus x ericsmithii*-Hybride 'St. Basilius' (B, E) und des *H. niger* Klons II (C, F) kultiviert auf Vermehrungsmedium (A bis C; n = 16) über zwei Kulturpassagen und auf Stockmedium (D bis E; n = 8) über eine Kulturpassage mit sechs unterschiedlichen Belichtungsvarianten Durchschnittliche PPFD: $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Dargestellt sind die Mittelwerte mit Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben weisen auf einen statistischen Unterschied mit $p \leq 0,05$ (multiple Mittelwertvergleiche nach der Dunn's Methode oder nach Tukey mit Bonferroni α -Adjustierung) hin.

A) Klon I, Vermehrungsmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,19 n.s.	48,9 ± 19,0 n.s.
CW	1,07 ± 0,54 n.s.	53,3 ± 22,6 n.s.
RW 3:7	0,96 ± 0,44 n.s.	46,5 ± 17,9 n.s.
RGB 1:1:1	1,01 ± 0,47 n.s.	49,8 ± 19,8 n.s.
RB 3:7	1,10 ± 0,36 n.s.	58,9 ± 14,0 n.s.
RB 1:9	1,01 ± 0,35 n.s.	48,3 ± 13,8 n.s.

D) Klon I, Zwischenmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,05 n.s.	22,6 ± 2,6 b
CW	0,97 ± 0,10 n.s.	24,5 ± 4,0 ab
RW 3:7	1,08 ± 0,08 n.s.	31,1 ± 3,7 a
RGB 1:1:1	1,11 ± 0,15 n.s.	29,5 ± 4,1 ab
RB 3:7	1,07 ± 0,12 n.s.	27,0 ± 6,4 ab
RB 1:9	1,11 ± 0,16 n.s.	30,9 ± 8,8 a

B) 'St. Basilius', Vermehrungsmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,14 a	37,7 ± 9,1 a
CW	0,78 ± 0,10 b	32,4 ± 19,2 ab
RW 3:7	0,81 ± 0,07 b	25,1 ± 16,4 b
RGB 1:1:1	0,71 ± 0,10 b	22,2 ± 8,0 b
RB 3:7	0,79 ± 0,14 b	27,2 ± 7,3 ab
RB 1:9	0,81 ± 0,13 b	28,8 ± 14,9 ab

E) 'St. Basilius', Zwischenmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,10 c	15,9 ± 3,4 n.s.
CW	1,20 ± 0,10 ab	20,1 ± 3,0 n.s.
RW 3:7	1,06 ± 0,14 b	15,9 ± 5,4 n.s.
RGB 1:1:1	1,21 ± 0,06 ab	16,9 ± 2,5 n.s.
RB 3:7	1,06 ± 0,13 b	16,7 ± 2,5 n.s.
RB 1:9	1,24 ± 0,15 a	22,3 ± 6,5 n.s.

C) Klon II, Vermehrungsmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,12 a	45,6 ± 18,4 n.s.
CW	0,76 ± 0,11 bc	42,2 ± 8,2 n.s.
RW 3:7	0,88 ± 0,21 ab	49,9 ± 9,6 n.s.
RGB 1:1:1	0,71 ± 0,18 c	39,3 ± 9,8 n.s.
RB 3:7	0,74 ± 0,10 bc	44,5 ± 13,6 n.s.
RB 1:9	0,73 ± 0,16 bc	43,3 ± 10,8 n.s.

F) Klon II, Zwischenmedium

Variante	Vermehrungsrate, (-)	Pfl.-kategorie 1, Pfl. pro Kulturgefäß
LSL	1,00 ± 0,06 n.s.	26,9 ± 3,9 n.s.
CW	1,15 ± 0,11 n.s.	30,8 ± 6,1 n.s.
RW 3:7	1,06 ± 0,16 n.s.	29,0 ± 4,2 n.s.
RGB 1:1:1	1,09 ± 0,07 n.s.	31,9 ± 3,3 n.s.
RB 3:7	1,09 ± 0,21 n.s.	31,9 ± 6,2 n.s.
RB 1:9	1,07 ± 0,15 n.s.	26,8 ± 6,2 n.s.

6 Diskussion

6.1 Systembewertung und Bewertung der Versuchsdurchführung

6.1.1 Effizienzermittlung einzelner HL-LEDs

Die quantitative Bewertung von Leuchtmitteln geschieht meist durch Messungen, die in einer Ulbrichtkugel und nicht mit einem Goniophotometer, deren Nachteil in der großen Messvorrichtung und der langen Dauer einer Messung besteht, durchgeführt werden (Hovilla et al., 2004). Üblicherweise werden die Eigenschaften der Leuchtmittel, welche aus diesen Messungen hervorgehen, mit photometrischen Größen beschrieben. In der vorliegenden Arbeit wurden die Strahlungsspektren mit einem Spektrometer aufgenommen und die erhaltenen Daten für eine Wirkungsgradbestimmung als Strahlungsfluss ermittelt und in den für eine pflanzenbauliche Bewertung relevanten Photonenfluss umgerechnet. Bei den Messungen mit einer Ulbrichtkugel können viele Faktoren Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse nehmen, die aus diesen Messungen hervorgehen.

6.1.1.1 Messsystem

Mit einem **Anteil der Öffnungsfläche** an der Gesamtfläche der Ulbrichtkugel unter 0,05 wurde eine wichtige Regel bei der Konstruktion der Ulbrichtkugeln beachtet. Diese liegt damit unter dem von Goebel (1967) maximal angegebenen Öffnungsanteil. Bei einem höheren Anteil der Öffnungsflächen an der Gesamtoberfläche der Ulbrichtkugel würde der Vorteil, der durch eine hochreflektierende Beschichtung geboten wird, verloren gehen (Carr, 1997). Auch bei einem geringeren Kugeldurchmesser können die in der Kugel angebrachten Teile (Shutter, LED-Halterung, Sensorhalterung) zur höheren Eigenabsorption beitragen und somit den Strahlungslevel innerhalb der Kugel und den gesamten Reflexionsgrad verringern (Liu et al., 2008). Ein Kugeldurchmesser von 300 mm, wie er in dieser Arbeit verwendet wurde (Abb 4.1.1), ist eine öfter verwendete Größe zur Messung von LEDs, um diesen Einflüssen vorzubeugen (zum Beispiel Poikonen et al., 2010; Singer et al., 2007).

Die **Bariumsulfat-Beschichtung** ermöglicht eine hohe Reflexion im Bereich der PAR. Sie gilt als leicht zerbrechlich, anfällig für Fremdstoffe und nicht stabil gegenüber UV-Strahlung. Dafür ist BaSO₄ eine sehr kostengünstige Alternative und gut geeignet für Messungen im Bereich der PAR zwischen 400 nm und 700 nm (Poikonen, 2010, Carr, 1997). Die konstruierte Ulbrichtkugel für die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen stand an einer Stelle, wurde keiner UV-

Strahlung ausgesetzt und die Öffnungen stets verschlossen gehalten, so dass die beschriebenen Nachteile unberücksichtigt bleiben konnten. Bei punktuellen Reflexionsmessungen (Ergebnisse nicht dargestellt) wurde stets ein Reflexionsgrad von etwas über 90 % gemessen. Der maximale Reflexionsgrad einer so beschichteten Ulbrichtkugel wird mit 94 bis 96 % angegeben mit einem optimalen Einsatzbereich von 400 bis 1100 nm (Carr, 1997; Lot-Oriel, 2010b). Ohno und Daubach, (2001) konnten mit einer gut konstruierten Ulbrichtkugel ohne Kontamination der Innenbeschichtung (Kugeldurchmesser: 2000 mm) bei Messungen von Glühlampen und Entladungslampen ohne Reflektoren ein Messfehler von circa 1 % bei einer Gesamtreflexion von 80 % und ein Fehler von 0,1 % bei einer Reflexion von 98 % ermittelt werden. Bei Leuchtmitteln mit Reflektoren lag die Messungengenauigkeit zwischen 2 % und 0,2 %. Durch den hohen Reflexionsgrad von über 90 % der in dieser Arbeit beschriebenen Ulbrichtkugel und der Kalibrierung der Ulbrichtkugel mit einer Normlichtlampe kann ein möglicher Fehler durch die Beschichtung vernachlässigt werden.

Die **HL-LED-Halterung** ist ebenfalls ein Einflussfaktor auf die Eigenabsorption im Inneren der Ulbrichtkugel, der nicht bei der Kalibrierung mit einbezogen werden kann, da durch die Primäröffnung die Strahlung der Kalibrierlampe scheint in der sich nachher die HL-LED-Halterung befindet. Mittels einer Hilfslampe kann ein Korrekturfaktor (Hilfslampenfaktor) ermittelt werden, welcher den Einfluss der HL-LED-Halterung und der HL-LED auf das Messergebnis beschreibt. Der Korrekturfaktor der Eigenabsorption der HL-LED-Halterung wurde bei photometrischen Messungen von HL-LEDs, welche auf einer HL-LED-Halterung mit 21 mm Durchmesser aufgebracht waren, mit 0,995 angegeben. Für einen geringeren Fehler müssten die HL-LED-Typen der Hilfslampe und der zu messenden HL-LED ähnlich sein, also ein ähnliches Strahlungsspektrum emittieren (Poikonen et al., 2010; Hansaeler et al., 2009). Auf Grund des geringen anzunehmenden Fehlers ($\leq 0,5\%$) bei einer HL-LED-Halterung mit 22 mm Durchmesser wurde auf den Einsatz einer Hilfslampe verzichtet und ein Hilfslampenfaktor von eins angenommen. Die HL-LED-Halterung fungierte gleichzeitig als Wärmeleiter für die am HL-LED-Chip produzierte und über die HL-LED-Platine abgeführte, überschüssige Verlustleistung in Form von Wärme. Diese wurde über den Kupferblock, das Peltier-Element und schließlich über einen Ventilator an die Raumluft außerhalb der Ulbrichtkugel abgeführt. Durch eine schnelle Wärmeableitung konnten die durch eine hohe Wärmeentwicklung in der Ulbrichtkugel auf Grund des HL-LED-Betriebs entstehenden Probleme, wie sie von Liu et al. (2008) beschrieben wurden, vermieden werden. Diese wurden durch eine Position der HL-LED bündig zur inneren Kugeloberfläche und der außerhalb der Kugel angebrachten Apparatur zur Wärmeableitung

verhindert. Weiterhin minimiert diese Positionierung der HL-LED zusätzlich die Absorption der HL-LED-Halterung in der Kugel (Hansaeler et al., 2009).

Neben der HL-LED-Halterung trägt auch der **Shutter** (Abschirmung) vor dem Sensor zur Erhöhung der Eigenabsorption der Ulbrichtkugel bei. Ohne einen Shutter vor dem Sensor würde allerdings nicht nur die reflektierte Strahlung, sondern auch die direkte Strahlung einer Strahlungsquelle gemessen werden, was eine erhebliche Fehlerquelle darstellt (Hansaeler et al., 2009). Die Größe des Shutters war im Verhältnis zur Ulbrichtkugel sehr gering. Der Shutter trägt ebenso wie andere Bauteile in der Kugel, Fehlerstellen in der Innenwand und eine unregelmäßige Beschichtung dazu bei, dass die Ulbrichtkugel kein idealer Diffusor sein kann, trotzdem kommt die Ulbrichtkugel dem Lambertschen Diffusor am nächsten (Lot-Oriel, 2010a). Die Position des Shutters kann einen erheblichen Einfluss auf die Messungen haben, der aber mit einer höheren Gesamtreflexion der Ulbrichtkugel unkritischer wird (Ohno, 1994). Zu der optimalen Shutterposition gibt es unterschiedliche Angaben. Eine geeignete Position wurde bei Messungen von Standard-LEDs mit einem Abstand zum Shutter von 0,5 bis 0,3 des Kugelradius angegeben (Hansaeler et al., 2009). Dabei befanden sich die Strahlungsquellen allerdings im Zentrum der Kugel und wurden nicht auf Höhe der Kugelinnenwand installiert. Wie bei den Messungen von HL-LEDs durch Singer et al. (2007) wurde der Shutter bei der Ausführung in der vorliegenden Arbeit mit einem geringeren Abstand zum Sensor angebracht. Die entstehende Eigenabsorption des Shutters, die Beschattung des Sensors und die Verringerung der gesamten Reflexion in der Ulbrichtkugel wurden durch die Kalibrierung der Ulbrichtkugel mit Hilfe einer Normlichtlampe und der daraus resultierenden Kalibrierfunktion berücksichtigt.

Es wurde ein **kosinuskorrigierter Sensor** verwendet, um einen Fehler durch nicht senkrecht auf die Sensorfläche auftreffende Strahlung zu verhindern. Mit einem angegebenen Messfeld von 180° konnte die in der Kugel mehrfachreflektierte Strahlung richtungsunabhängig erfasst werden. Der Sensor war auch wie die HL-LED-Halterung plan an der inneren Kugeloberfläche angebracht, um den Fremdkörpereinfluss in der Kugel so gering wie möglich zu halten.

Vor jeder Messung eines Strahlungsspektrums wurde eine Dunkelstromkorrektur des **Spektrometers** mit Hilfe des Bedienungsprogramms (SpectraSuite Spectrometer Operating Software) durchgeführt, um das gerätebedingte Signalrauschen zu minimieren, welches auch ohne die Einstrahlung durch das CCD-Element des Spektrometers geliefert wird (Ocean Optics, 2008). Das danach noch vorhandene Signalrauschen wurde durch die Aufnahme eines Spektrums ohne eingeschaltete Strahlungsquelle (Dunkelspektrum) und die Verrechnung des anschließend gemessenen Strahlungsspektrums der HL-LEDs auf ein Minimum reduziert.

Auch bei der **Kalibrierung der Ulbrichtkugel** können Messfehler auftreten, welche zum Beispiel durch mögliche geringe Veränderungen der Kalibrierlampe hervorgerufen werden. Nach Miller und Ohno (2001) ergab die Ermittlung des Messfehlers bei der Kalibrierung einer Ulbrichtkugel mit einem Durchmesser von 2500 mm eine Messungenauigkeit zwischen 0,6 % und 2,28 %. Generell lassen sich aber die ermittelten Messfehler nicht direkt auf andere Ulbrichtkugelsysteme wie das in dieser Arbeit dargestellte System übertragen und gelten streng genommen nur für das jeweils bewertete System (Miller und Ohno, 2001). Von der Annahme eines Messfehlers durch die Kalibrierung in Bezug auf die in dieser Arbeit beschriebene Ulbrichtkugel wird deshalb abgesehen.

Die Betriebsstromstärke konnte mit einem **Netzteil** (HAMEG, Programmable Power Supply HM 8142) geregelt werden. Dabei konnte von einem sehr geringen Fehler ausgegangen werden, da das Netzteil mit einer Einstellgenauigkeit vom Messwert von 0,2 % angegeben wurde (Hameg® Instruments, 2005).

6.1.1.2 Durchführung der Messungen

Die **gemessene Platinentemperatur** der HL-LEDs stimmte nicht mit der Sperrschichttemperatur, also der Temperatur am p-n-Übergang des HL-LED-Chips, überein. Die Sperrschichttemperatur wurde aus den Angaben zu den thermischen Widerständen der HL-LEDs, welche den Datenblättern entnommen werden kann, einem kalkulierten thermischen Widerstand der HL-LEDs und der elektrischen Leistung errechnet. Bei ähnlichen Berechnungen wurde eine mögliche Messunsicherheit von $\pm 6 \text{ }^\circ\text{C}$ festgestellt (Singer et al., 2007). Diese Messunsicherheit machte hier eine Abweichung der berechneten Photosynthetischen Photonenflussausbeute von maximal 2,14 % ($0,026 \text{ } \mu\text{mol W}^{-1} \text{ s}^{-1}$) bei den roten HL-LEDs möglich. Bei den anderen HL-LED-Typen lag die mögliche Abweichung durch diese Messunsicherheit unter 1,25 % ($0,007 \text{ } \mu\text{mol W}^{-1} \text{ s}^{-1}$), bei den blauen HL-LEDs sogar nur bei 0,85 % vom Messwert.

Der Einfluss der aus der Platinentemperatur hervorgehenden **Sperrschichttemperatur** des HL-LED-Chips konnte bis etwa $90 \text{ }^\circ\text{C}$ untersucht werden. Für höhere Temperaturen war die Steuerung der Platinentemperatur mit Kupferblock, Peltier-Element und Lüfter nicht ausgelegt. Außerdem waren solche hohen Sperrschichttemperaturen für weiterführende Berechnungen uninteressant, da die HL-LEDs in der Praxis, also auch beim Einsatz in der In-vitro-Kultur, durch geeignetes Wärmemanagement nicht bei solch hohen Temperaturen betrieben werden, da

solch hohe Sperrschichttemperaturen die Lebensdauer der HL-LEDs verkürzen (Philips Datenblatt, 2008).

Die Messungen zum Einfluss der **Betriebsstromstärke** der HL-LEDs wurden bei einer Platinentemperatur von 25 °C durchgeführt. Durch die Zweipunktregelung (unstetiger Regler) des Peltier-Elements schwankte die Temperatur um den erwarteten Wert. Zum Zeitpunkt der Spektrenaufnahmen lag die Platinentemperatur zwischen 24,7 °C und 25,3 °C. Dies kann zu einem maximalen Messfehler bei Photosynthetischer Photonenflussausbeute und Wirkungsgrad von 0,22 % führen und wurde bei den Berechnungen vernachlässigt. In dem Fall, dass ein stetiger Regler zur Temperaturregelung eingesetzt worden wäre, hätte sich die Schwingungen um den Einstellwert reduziert und damit den Messfehler verringert.

Auch eine Abweichung der gemessenen **Peakwellenlänge** von den durch den Hersteller angegebenen Werte können durch den Sortierbereich des „Binnings“ erklärt werden. Trotz einer bei den roten HL-LEDs höheren Abweichung von etwa 13 nm vom angegebenen mittleren Peak bei den zur Charakterisierung von HL-LEDs typischen Betriebsbedingungen (350 mA, 25 °C), lag die Abweichung im angegebenen Wellenlängenbereich von minimal 620,5 nm bis maximal 645 nm (Philips Datenblatt, 2008). Eine spektrale Korrektur der Daten auf Grundlage der Unterschiede zwischen gemessener Platinentemperatur und tatsächlicher Sperrschichtkorrektur konnte nicht durchgeführt werden. Deshalb unterschieden sich nicht nur die angegebenen und gemessenen Peakwellenlängen, sondern auch die Farbtemperatur der kaltweißen HL-LEDs, welche laut Hersteller zwischen 4500 K und 10000 K liegen kann. Unter typischen Betriebsbedingungen liegt die Abweichung von gemessenen und angegeben Daten zwischen etwa 800 K bis 1000 K, dennoch zeigten die Messungen nur geringe Standardabweichungen vom Mittelwert, weshalb bei der Umrechnung auf die Farbtemperatur von einem recht konstanten Messverfahren ausgegangen werden kann. Bei der hohen angegebenen möglichen Abweichung erscheint auch eine Wiederholung mit sechs oder drei HL-LEDs sehr gering. Bei höheren Wiederholungszahlen hätten die Werte eventuell näher an den angegebenen Werten liegen können, wobei die grünen und blauen HL-LEDs mit Abweichungen von maximal 3,1 nm unter typischen Betriebsbedingungen bereits sehr gering waren.

Weiterhin können bei den Messungen auch Variationen durch die zu messenden HL-LEDs selbst entstehen. Nach dem Herstellungsprozess werden die LEDs in Klassen eingeteilt, das sogenannte „**Binning**“. Diese können sich zum Beispiel auf den Lichtstrom, den Strahlungsfluss, die Spannung und die elektrische Leistung beziehen. Bei den hier untersuchten HL-LEDs wurde eine Toleranz von $\pm 6,5\%$ für den Lichtstrom bei einer Betriebsstromstärke von

350 mA und einer Sperrschichttemperatur von 25 °C angegeben (Philips Datenblatt, 2008). Bezieht man die Toleranz des Lichtstroms auf den gemessenen Photonenfluss der untersuchten HL-LEDs kann dies bei gleichen Betriebsbedingungen zu einer möglichen Änderung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute je nach HL-LED-Typ zwischen $\pm 0,04 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ und $\pm 0,07 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ führen ($\pm 6,5 \%$ bis $\pm 6,7 \%$). Die Toleranz des Wirkungsgrades liegt demnach alleine durch das „Binning“ bei 3,5 bis 6,1 %. Sogar bei Messungen mit LED basierten Normlampen unterschiedlicher Farbe in einer Ulbrichtkugel wurde die Überdeckungswahrscheinlichkeit der Werte mit 5 % beschrieben (Agaphonov et al., 2000).

6.1.1.3 Fehlerbewertung des Messsystems

Die Messungen mit einer Ulbrichtkugel können, wie oben beschrieben, Fehlerquellen aufweisen, welche zu einer möglichen Abweichung bei den berechneten Photosynthetischen Photonenflussausbeuten und Wirkungsgraden führen können. Aufgrund der oben genannten Fehlerquellen konnte eine Fehlerberechnung des Messsystems durchgeführt werden. Wie bereits oben erwähnt werden mögliche Fehler der BaSO₄-Beschichtung und des Shutters durch die Kalibrierung des Messsystems bereits berücksichtigt und bleiben hier unbeachtet. Die mögliche Abweichung vom Messwert ist an einem Beispiel des Photonenflusses und den Fehlerquellen mit dem maximal und minimal möglichen Photonenfluss in Tabelle 6.1.1 beschrieben.

Tab. 6.1.1 Messfehlerquellen des Messsystems zur Quantifizierung der möglichen Abweichung des Photonenflusses.

Der fortlaufend berechnete Einfluss auf den minimalen und maximalen Photonenfluss ist am Beispiel der roten HL-LEDs bei 350 mA Betriebsstromstärke und 25 °C Sperrschichttemperatur mit dem Ausgangswert von $1,187 \mu\text{mol s}^{-1}$ dargestellt.

Messfehlerquellen	mögliche Abweichung, %	minimaler Photonenfluss, $\mu\text{mol s}^{-1}$	maximaler Photonenfluss, $\mu\text{mol s}^{-1}$
Kalibrierung	2,28	1,16	1,21
HL-LED-Halterung	0,50	1,15	1,22
Platinentemperaturmessung	2,14	1,13	1,25
Sperrschichttemperaturberechnung	0,22	1,13	1,25

Unter Einbeziehung der möglichen Abweichung der Betriebsstromstärkeneinstellung durch das Netzteil kann die berechnete Photosynthetische Photonenflussausbeute, bei einem Ausgangswert des Photonenflusses von $1,187 \mu\text{mol s}^{-1}$ und einer daraus berechneten

Photosynthetischen Photonenflussausbeute von $1,14 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$, bei den roten LEDs zwischen $1,08 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ und $1,20 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ liegen. Die Photosynthetische Photonenflussausbeute kann also demnach zwischen 95 % und 105 % des Wertes schwanken. Durch die unterschiedlichen Messunsicherheiten, die bei den Messungen der Platinentemperatur der einzelnen HL-LED-Typen angenommen wurden (siehe Kapitel 6.1.1.2), können bei den blauen und kaltweißen HL-LEDs geringere Abweichungen erwartet werden. Somit können die Werte der blauen HL-LEDs bis minimal 96 % und maximal 104 % abweichen und die der kaltweißen HL-LEDs zwischen 96 % und 105 %.

6.1.2 Konstruktionsbewertung des HL-LED-Belichtungssystems

Das HL-LED-Belichtungssystem wurde als Alternative zu einem in der In-vitro-Kultur konventionell verwendeten Belichtungssystem mit Leuchtstofflampen konstruiert. Dabei sollten keine Nachteile gegenüber einer konventionellen Belichtung entstehen.

Ein bereits sehr früh genannter Vorteil des LED-Einsatzes zur Pflanzenbelichtung soll die geringe **Größe des Belichtungssystems** sein (Bula et al., 1992; Hoenecke et al., 1992). Dies trifft auf die einzelnen Leuchtmittel, also die einzelnen HL-LEDs auch zu, aber nicht unbedingt auf das HL-LED-Belichtungssystem. Dieses bestand in dem vorliegendem Fall unter anderem aus vier Aluminiumprofilen, welche über die Fläche einer Regaletage verteilt angebracht wurden, um eine gute PPF-D-Verteilung zu gewährleisten (siehe unten). Auf den Aluminiumprofilen waren die HL-LEDs befestigt. Die vier Profile mit den Leuchtmitteln dienten somit als Ersatz einer Leuchtstofflampe zur Belichtung einer Regaletagenfläche. Die Leuchtstofflampenleuchte bestand, neben dem elektronischen Vorschaltgerät und der Stromversorgung, aus nur einer Leuchtstofflampe mit Fassung, welche unter dem oberen Etagenboden zentral angebracht wurde. Dementsprechend war das HL-LED-Belichtungssystem fast fünf Mal breiter als das konventionelle Belichtungssystem und beanspruchte im Vergleich eine größere Fläche. Der Vorteil des geringeren Leuchtmittelvolumens lag bei den HL-LEDs in der Höhe. Diese wurde durch das Aluminiumprofil vorgegeben und lag bei 20 mm gegenüber 90 mm bei dem LSL-Belichtungssystem. Somit konnte konstruktionsbedingt der Etagenabstand, ohne mögliche Raumverluste zwischen Belichtungssystem und Etagenboden, um 70 mm reduziert und eine erhöhte Kulturraumausnutzung möglich gemacht werden.

Weiterhin führt eine zentrale Anbringung der Leuchtstofflampen in einer Regaletage zu einer schlechteren Wärmeverteilung und einem höheren Temperaturgradienten als eine seitlich an dem Regal angebrachte Belichtung mit Leuchtstofflampen. Dafür wird einem seitlich

angebrachten Belichtungssystem eine schlechtere PPF-D-Verteilung nachgesagt (Pierik, 1997). In der Regel wird eine zentrale Anordnung in der Regaletage bevorzugt. Desweiteren gilt bei beiden Anordnungsmöglichkeiten, dass die nahe an der Belichtung stehenden Kulturgefäße höhere Lufttemperaturen im Gefäß aufweisen als die weiter vom Leuchtmittel entfernten Gefäße (Pierik, 1997). Trotz der Breite des HL-LED-Belichtungssystems mit den vier 60 mm breiten Aluminiumprofilen konnte eine gute Durchlüftung gewährleistet werden, da noch immer über 50 % der Etagenbreite nicht mit Profilen verdeckt und diese mit 65 mm, also mit ausreichend Abstand zueinander angebracht waren. Dadurch konnte die Luft zwischen den einzelnen Profilen hindurch strömen. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber komplett geschlossenen Systemen, bei denen der horizontale Luftaustausch innerhalb des Regals verhindert wird (siehe zum Beispiel http://www.flowmagic.nl/index.php?s=p_2&p=411, Stand 2010; Tamulaitis et al., 2005). Auch in der Weltraumforschung werden geschlossene LED-Belichtungssysteme entwickelt, wobei diese zur In-vivo-Kultivierung genutzt werden sollen (Zyablova, 2010; Ilieva et al., 2010; Cuello, 2002). Besser sind jedoch Lösungen, bei denen die LEDs nicht auf einer geschlossenen Fläche aufgebracht werden (siehe zum Beispiel Professional Lighting, 2010; Jao und Fang, 2003, 2002).

Die unregelmäßige Aufheizung der Luft in den Kulturgefäßen, wie sie bei der Verwendung von Leuchtstofflampen beschrieben wurde (Pierik, 1997), wurde im Vorfeld durch eine verteilte Anordnung der HL-LEDs und der Aluminiumprofile ausgeschlossen. Des Weiteren bringen LEDs den Vorteil mit sich, dass sie **keine Wärmestrahlung in Photonenflussrichtung** emittieren, sondern die entstehende Wärme mittels Wärmeleitung auf der LED-Rückseite abgeben. Dies erlaubt die Positionierung der HL-LEDs sehr nah an der Pflanze (Bourget, 2008; Hovi-Pekkanen und Tahvonen, 2008; Hogewoning et al., 2007). Die Kondensation von Wasserdampf an den Innenseiten der Becherdeckel mit anschließender Tropfenbildung konnte hingegen nicht verhindert werden. Ein Verhindern der Kondensation kann durch das „Bottom Cooling“ (siehe dazu Kapitel 6.1.3) erzielt werden, bei dem der Etagenboden gekühlt wird (Saher et al., 2005; Pierik, 1997).

Die **Aluminiumprofile** (Kühlprofile) auf denen die HL-LED-Platinen befestigt wurden (siehe Abb. 4.2.2 A) bieten durch die umgedrehte U-Form einen gewissen Berührungsschutz. Dieser ist notwendig, da die Linsen der HL-LEDs sehr empfindlich gegenüber mechanische Beanspruchung sind und leicht abgelöst werden können oder verkratzen, wodurch der Photonenfluss der einzelnen HL-LEDs reduziert wird. Bei der Konstruktion fehlt jedoch, wie auch bei dem LSL-Belichtungssystem, ein Schutz vor Spritzmittelresten, welche sich während der Ausbringung auf den Leuchtmitteln ablagern können. Ein entsprechender Schutz hätte aber zur

Verminderung des Photonenflusses aller HL-LEDs geführt und somit zur Verringerung der Energieeffizienz des Belichtungssystems. Ein Spritzwasserschutz nach IP66 (DIN EN 60529) ist nicht berücksichtigt worden, da dieser in einem Kulturraum mit In-vitro-Kulturen nicht vorgeschrieben ist und zu einem Mehraufwand geführt hätte. Durch den Betrieb im Kleinspannungsbereich konnte auch auf einen kompletten Berührungsschutz der Kontakte des HL-LED-Belichtungssystems verzichtet werden (Wu et al., 2003).

Die HL-LED-Anzahl in einem Belichtungssystem, also die **HL-LED-Dichte**, wurde so gewählt, dass diese für eine homogene PPF_D-Verteilung ausreichte und um einen möglichst geringen Energieverbrauch bei bestimmter benötigter durchschnittlicher PPF_D (PPF_{D \emptyset}) zu gewährleisten. Wie aus den Ergebnissen hervorgeht gilt: je höher die HL-LED-Dichte, desto vorteilhafter gestalten sich Energieeffizienz und PPF_D-Verteilung (siehe Abb. 5.2.1 und Abb. 5.2.7). Allerdings hätte eine Steigerung der HL-LED-Dichte zu einer enormen Investitionssteigerung für das HL-LED-Belichtungssystem geführt, da die Leuchtmittel den größten Teil der Kosten ausmachen. Daher waren die Profile so ausgelegt, dass die im beschriebenen System jeweils 24 HL-LEDs pro HL-LED-Typ und Regaletage ausreichten, um die überschüssige Wärme bei einer Raumtemperatur von 20 °C abzuleiten. Eine Erhöhung der Kühlprofilfläche ist bei einer Erhöhung der HL-LED-Dichte und gleicher benötigter PPF_{D \emptyset} auf der zu belichtenden Fläche nicht zu erwarten, es sei denn der Platz für die Unterbringung der HL-LEDs würde nicht ausreichen. Durch den Betrieb der HL-LEDs bei niedrigeren Stromstärken wird die Energieeffizienz verbessert und somit der Anteil überschüssiger Wärme an der eingesetzten elektrischen Energie verringert.

Für eine bessere vertikale Luftbewegung innerhalb einer Regaletage wäre eine zentrale **Anordnung der HL-LEDs** optimal, wie sie bei einem LSL-Belichtungssystem praktiziert wird. Dabei müsste die entstehende Verlustenergie (Wärme) allerdings auf einer sehr kleinen Fläche abgeführt werden, so dass eine Abfuhr über Konvektion nicht mehr ausreichen und eine aktive Kühlung (zum Beispiel Wasserkühlung) notwendig würde. Unter Berücksichtigung einer verbesserten PPF_D-Verteilung gegenüber einer zentralen Anordnung der HL-LEDs wurde hier eine Verteilung auf der gesamten Fläche mittels vier Aluminiumprofilen bevorzugt.

Bei der Bewertung der gemessenen **PPF_D-Verteilung** (siehe Kapitel 5.2.1) wurde von der gleichen Abstrahlcharakteristik der HL-LED-Typen, nach Angabe des Herstellers (Philips Datenblatt, 2008) ausgegangen, sowie von gleichen Photonenflüssen der HL-LEDs innerhalb eines HL-LED-Typs. Die Verteilungsmessungen wurden mit einem Belichtungssystem mit roten und blauen HL-LEDs durchgeführt. Bei gleicher Abstrahlcharakteristik konnte also auch bei

einem Belichtungssystem mit roten und kaltweißen HL-LEDs von einem gleichen Verteilungsmuster ausgegangen werden. Dabei blieb der Abstand der blauen und kaltweißen HL-LEDs von 5 mm unberücksichtigt. Die Photonenflüsse der HL-LEDs können sich im Rahmen der Klasseneinteilung der HL-LEDs (siehe Kapitel 6.1.1) unterscheiden und somit auch zu Abweichungen der PPF-D-Verteilung führen, welche hier unbeachtet blieben.

Die Sensorhöhe zur Messung der PPF-D spielt eine erhebliche Rolle beim Erstellen der PPF-D-Verteilungsmuster und der Berechnung der Energieeffizienz des Belichtungssystems. Der Abstand vom Leuchtmittel zum Sensor unterschied sich stets vom Abstand zwischen Leuchtmittel und Etagenboden und somit ist die tatsächliche PPF-D auf dieser Fläche niedriger als die gemessenen PPF-D in Sensorhöhe. Die Messhöhe betrug 55 mm und lag damit meist ungefähr auf Höhe der Pflanzenspitzen in den Kulturgefäßen, bei einer Kulturgefäßhöhe von 80 mm und einer Medienfüllhöhe von bis zu 20 mm. Natürlich galt dies nicht für frisch in die Kulturgefäße eingesetzte Pflanzen. Dennoch hätte auch eine Messung auf Höhe des Etagenbodens nicht dem Abstand der Pflanzen zum Leuchtmittel entsprochen und die PPF-D wäre unterbewertet worden. Ziel der PPF-D-Messungen und der daraus resultierenden PPF-D-Verteilung war es eine durchschnittliche PPF-D ($PPFD_{\emptyset}$) auf Höhe der Pflanzen einstellen zu können. Deshalb kann die Sensorhöhe auch als eine Annäherung an den Abstand von Pflanzen zum Leuchtmittel gesehen werden, auch wenn die tatsächliche PPF-D in den Kulturgefäßen durch die Transmission des Kunststoffes (siehe Abb. 5.3.2) und eventuell auftretende Kondensation an den Becherdeckeln geringer war.

Die **Stromaufnahme des Belichtungssystems** wurde mit einem geeichten Impulsstromzähler der Genauigkeitsklasse 1 gemessen. Nach DIN 1319-1 sollten also die Abweichungen bei den Messungen, mit weniger als 1 % vom Messwert, sehr gering gewesen sein. Die Impulse wurden über einen Zeitraum von 30 Minuten aufsummiert. Eine Aufsummierung über einen längeren Zeitraum hätte einen eventuellen Fehler noch verringern können, ist aber auf Grund der Einstellungen des Dataloggers („ITG10“) nicht möglich gewesen.

Die eingestellte **durchschnittliche PPF-D** auf der zu belichtenden Fläche erwies sich auch über einen längeren Zeitraum als sehr stabil und es konnten keine gravierenden Änderungen gemessen werden. Besonders gut konnte dies in der wissenschaftlichen Versuchsanlage beobachtet werden, da diese über einen längeren Zeitraum von 18 Monaten mit einer täglichen Belichtungszeit von 12 Stunden eine Betriebsdauer von etwa 6500 Stunden aufwies.

Bei der Berechnung des **Wirkungsgrades der HL-LED-Steuerung** wurden die Verluste über die Leiterbahnen und die Verbindungen der Platinen (Lötbrücken und teilweise Kabel zur

Verbindung der einzelnen HL-LED-Platinen) nicht berücksichtigt. Deshalb kann der Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung etwas überschätzt worden sein. Auf Grund der Platinenplanung einer für diese Anwendung geeigneten Herstellerfirma wird nicht angenommen, dass die Abweichung bei der Wirkungsgradberechnung sich in einem Bereich über 1 % bewegt und wurde deshalb vernachlässigt. Die Funktion der HL-LED-Steuerung wird weiter unten in Kapitel 6.2.3 diskutiert.

6.1.3 Umsetzung der pflanzenbaulichen Untersuchungen

Die Materialbereitstellung, die Pflanzenmaterial, bereits mit Medium gefüllte Kulturgefäße, Folie zum Einwickeln der Kulturgefäße und Bearbeitungswerkzeuge beinhaltete, erfolgte durch die Firma Bock Bio Science GmbH. Es konnte von stets einheitlicher Medienkomposition für die jeweiligen Kulturen und gleichem Bechermaterial ausgegangen werden. Die Bereitstellung des Pflanzenmaterials erfolgte einmalig vor Beginn der ersten Kulturpassage. Für die weiteren Kulturpassagen wurden Subkulturen aus dem vorhandenen Pflanzenmaterial angefertigt und weiterkultiviert. Die **Versuchskulturen** wurden nach wirtschaftlicher Bedeutung ausgewählt, sowie nach der Verfügbarkeit und dem Pflanzensortiment der Kooperationsfirma Bock Bio Science GmbH. Bei der Auswahl der Pflanzen wurden Gehölze, Stauden, krautige und CAM Pflanzen mit einbezogen, um die Vielfalt der Pflanzen berücksichtigen zu können.

Um die Pflanzenversuche vergleichbar durchführen zu können, war eine gleichmäßige **durchschnittliche PPF_D (PPFD₀)** in den einzelnen Etagen, also in den unterschiedlichen Varianten notwendig. Diese wurde durch eine regelmäßige Kontrolle gewährleistet. Die direkte Beeinflussung der Pflanzen durch Strahlung aus anderen Etagen wurde durch den Einsatz von Folie auf dem Etagenboden als optische Trennung unterbunden. Das Regal stand direkt an einer Wand, so dass nur eine Seite des Regals auf der Gangseite offen war. Von dieser Seite her reflektierte die Strahlung einer Etage in die anderen hinein. Diese durch Reflektion entstandene PPF_D lag in der Mitte der Etagen unter $0,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und konnte vernachlässigt werden. Eine weitere Abschirmung der Etagen hätte zu einem Wärmestau geführt. Um diesen generell zu verhindern wurde die Raumluft permanent umgewälzt, so dass ein vertikaler Temperaturgradient minimiert und die durch die Belichtungssysteme entstehende Wärme schnell abgeführt wurde.

Die **Lufttemperatur in den Kulturgefäßen** ist, durch die Abgabe von Wärmestrahlung der Leuchtmittel und den daraus resultierenden Treibhauseffekt im Gefäß, meist etwas höher als die Raumtemperatur der Kulturkammer (Debergh, 1988). Der Unterschied wird mit einer

Differenz von weniger als 1 °C angegeben, wenn die Bestrahlungsstärke nicht über 35 W m⁻² hinausgeht, also im Bereich einer niedrigen PPFd liegt (Nguyen und Kozai, 1998). Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen unterschied sich die Lufttemperaturdifferenz der Kulturgefäße und der Raumluft der Kulturkammer zwischen der Leuchtstofflampenvariante und den HL-LED-Belichtungssystemen mit 0,1 °C nur unwesentlich (Ergebnisse in dieser Arbeit nicht dargestellt). Bei Messungen mit sechs unterschiedlichen, mit Pflanzen bestückten Kulturgefäßen lag die mittlere Temperaturdifferenz der Leuchtstofflampenvariante bei $0,59 \pm 0,1$ °C und die der LED-Varianten bei $0,49 \pm 0,05$ °C. Dabei konnte ein Unterschied der Temperaturdifferenz auf Grund von Messungenauigkeiten nicht ausgeschlossen werden und ist deshalb nicht direkt auf den Einsatz von HL-LED-Belichtungssystemen zurückzuführen.

Auch durch die Anordnung der Belichtung unter den Etagenböden ist die Temperatur der Gefäßböden meist höher als die Temperatur an den Deckeln, wodurch es zur Kondensation des Wasserdampfes an den Gefäßdeckeln und -wänden kommen kann (Debergh, 1988). Dabei ist die **relative Luftfeuchte** im Kulturgefäß abhängig von der inneren Lufttemperatur und der Medientemperatur. Bei gleicher Temperatur der Luft und des Mediums in einem geschlossenen Kulturgefäß, kann von einer relativen Luftfeuchte im Gefäß von 98 % bis 99,5 % ausgegangen werden. Durch die Verlustwärme der unter den Etagen angeordneten Belichtungssysteme überschreitet die Temperatur des Mediums die der Lufttemperatur und es kommt fast zu einer vollständigen Sättigung der Gefäßluft. Unter solchen Bedingungen unterschreitet der obere Teil der Kulturgefäße die Taupunkttemperatur und das Wasser kondensiert an den Gefäßwänden und Gefäßdeckelunterseiten (George et al., 2008).

Die Kondensation an den Gefäßdeckeln und Gefäßwänden konnte auch in den HL-LED-Varianten beobachtet und gegenüber der Leuchtstofflampenbelichtung nicht verringert werden. Eine Optimierung eines HL-LED-Belichtungssystem könnte aus einer Kombination der Belichtungseinheit mit einem „Bottom Cooling“-System bestehen. Die wassergekühlten Etagenböden zusammen mit einem HL-LED-Belichtungssystem könnten ein ideales Temperaturmanagement der HL-LEDs gewährleisten. Das Kühlen der Gefäßböden („Bottom Cooling“) und die dadurch reduzierte relative Luftfeuchte in den Gefäßen verhindert eine Kondensation an den Gefäßdeckeln und -seiten. Durch die im Verhältnis zur Lufttemperatur geringere Medientemperatur, findet dann die Kondensation am Medium statt, wodurch gleichzeitig ein Austrocknen dieses verhindert werden kann (Saher et al., 2005; Vanderschaeghe und Debergh, 1987). Allerdings wäre ein enormer Mehraufwand bei der Konstruktion und Investition nötig. Das Problem des fehlenden vertikalen Luftaustausches innerhalb eines Regals, welches sich durch einen geschlossenen Etagenboden ergibt, träte

dadurch nicht mehr auf und könnte bei der Umsetzung einer LED-Belichtung unbeachtet bleiben.

Auch sind eine mögliche schlechtere Entwicklung und eine Störung physiologischer und morphologischer Strukturen auf eine sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit in den Gefäßen zurückzuführen. Diese Bedingungen können zu einer abnormen Entwicklung der Blätter, zur Hyperhydrizität des Sprosses und zu einer geringeren Transpiration führen (Hazarika, 2006; Kozai et al., 1997; Schloupf et al., 1995). Unter Bedingungen hoher relativer Luftfeuchtigkeit kommt es zu einer Erhöhung der Stomatadichte und -größe, sowie zu einer Verringerung der Stomatafunktion (Sciutti und Morini, 1995). Bereits eine geringe Reduzierung der relativen Luftfeuchte zum Beispiel von 95 % auf 90 % kann positive Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum, auf die Bildung epikutikulären Wachses und auf die Stomatafunktion haben (Nguyen und Kozai, 1998). Die Pflanzen könnten dadurch auch den Wasserstress bei der Überführung der Pflanzen in das Gewächshaus besser überstehen und einen überschüssigen Wasserverlust kontrollieren (Tanaka et al., 1992).

Ein weiterer entscheidender Wachstumsfaktor stellt die **Atmosphäre im Kulturgefäß** dar. Für ein optimales Wachstum der Pflanzen in einem Kulturgefäß kann die Konzentration an Kohlendioxid (CO_2), Sauerstoff (O_2) und Ethylen (C_2H_4) von hoher Bedeutung sein. Die Veränderung der Konzentration eines der Gase hat Einfluss auf die Konzentration der anderen Gase im Kulturgefäß und kann zu veränderten Pflanzenreaktionen führen (Van Huylbroeck et al., 1998; Buddendorf-Joosten und Woltering, 1996). Es wurden hier keine Messungen der Gaskonzentrationen durchgeführt, so dass eine unterschiedliche Wirkung nicht unbedingt auf die Gase zurückzuführen ist, aber auch nicht ausgeschlossen werden kann.

Neben sehr **heterogenen Pflanzenreaktionen** der verschiedenen untersuchten Kulturen auf die unterschiedlichen HL-LED-Varianten konnten auch starke Schwankungen der Ergebnisse zwischen den Wachstumsperioden innerhalb der Varianten einer Kultur beobachtet werden. Am Beispiel von *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' konnten unterschiedliche Niveaus in Bezug auf die Vermehrungsrate und den Frischmassezuwachs aufgezeigt werden. Für eine Minimierung der Unterschiede in einer Variante über die Kulturpassagen wurden die Daten der Vermehrungsrate und des Frischmassezuwachses auf den Mittelwert der Leuchtstofflampe, also auf die Kontrolle normiert. Auch nach der Normierung der Daten waren die Unterschiede der gepoolten Daten noch deutlich vorhanden, die hohen Abweichungen vom Mittelwert hingegen etwas reduziert.

Am Ende einer Kulturpassage wurden Subkulturen aus derselben Variante für die Weiterkultivierung verwendet. Dadurch sollte ein eventuell auftretender Langzeiteffekt bei den HL-LED-Varianten überprüft werden, der sich auf Grund der Heterogenität aber nicht herausstellen ließ. Bei dieser Methode können aber auch negative Einflüsse und deren Folgen für die Pflanzen in eine Kulturpassage übernommen werden. Pflanzen aus geschwächtem Material haben eine andere Ausgangssituation als Pflanzen aus gesundem Pflanzenmaterial. Es wurde versucht, diesen Einfluss durch die Anzahl an Wiederholungen innerhalb einer Variante zu minimieren. Dabei wurden für jeden neuen Ansatz in einem Kulturgefäß nur Pflanzen aus einem einzigen Kulturgefäß der vorherigen Kulturpassage verwendet. Eine höhere Wiederholungszahl hätte einen unerwünschten Einfluss annähernd ausgeschlossen. Ein anderes Vorgehen könnte eine Kultivierung aus randomisierten Pflanzenmaterial aller Varianten vorsehen, bei der allerdings mögliche Langzeiteffekte einer Belichtungsvariante ausgeschlossen würden.

Teilweise kann die Heterogenität der Ergebnisse auf einen Temperatureffekt zurückgeführt werden. Zwar unterschieden sich die mittleren Raumtemperaturen während der einzelnen Kulturphasen einer Kultur kaum voneinander und wiesen eine maximale Standardabweichung von unter 2 °C auf, doch konnte zum Beispiel ein deutlicher Effekt am Beispiel von *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' aufgezeigt werden. Gegen Ende der dritten Kulturpassage kam es jahreszeitlich bedingt (KW 03 2010 bis KW 10 2010) zu einer erhöhten Nachtabenkung. Die normalerweise nicht unter 18,5 °C abfallende Raumtemperatur senkte sich auf Temperaturen von bis zu 16,7 °C. Diese Temperaturabsenkung könnte zu einem geringeren Frischmassezuwachs und einer geringeren Größe der Pflanzen geführt haben. Bei einer stets gleichen Reaktion der Pflanzen auf die unterschiedlichen Strahlungsqualitäten hätten die Pflanzen der unterschiedlichen Kulturpassagen dieselbe Tendenz aufweisen müssen, um die Unterschiede der Pflanzenreaktionen hauptsächlich auf Temperatureffekte zurückführen zu können. Die heterogenen Reaktionen auf die unterschiedlichen Strahlungsqualitäten innerhalb der einzelnen Kulturpassagen sind schwer zu interpretieren, da im Nachhinein nicht alle Fehlerquellen ausgemacht werden können. Ein auf Grund der Raumtemperatur hervorgerufener Effekt kann der Einfluss von bestimmten Phytohormonkonzentrationen im Medium sein (George et al., 2008). Ein bestimmtes konstantes Verhältnis der Phytohormone, zum Beispiel von Auxin und Cytokinin, kann für unterschiedliche Wirkungen auf Wachstumsprozesse entscheidend sein (George und Sherrington, 1984; Roitsch und Sinha, 2002). Auch eine geringe Abweichung der Medienkomposition könnte also Auswirkungen auf die Pflanzenreaktionen gehabt haben, was aber nicht untersucht wurde.

Die Belichtungsvarianten der Versuche mit *Phalaenopsis*-Hybriden und *Helleborus*-Arten unterschieden sich von den Varianten der anderen drei untersuchten Kulturen. Die nicht einheitlichen Versuchseinstellungen sind auf unterschiedliche Ausführungen der Versuchsanlagen zurückzuführen, da die Belichtungssysteme weiterentwickelt und in einer neuen Versuchsanlage realisiert wurden. Grundsätzlich wurden die Kulturgefäße bei allen Versuchsvarianten randomisiert aufgestellt und dabei die Randbereiche der Etagenflächen ausgelassen. Gerade die Randbereiche unter der LSL-Belichtung mit sehr hohen Abweichungen zur $PPFD_0$ wurden so ausgespart. Der Etagenabstand von mindestens 250 mm wurde für ein gleichmäßiges PPFD-Verteilungsmuster und eine gute Handhabbarkeit der Kulturgefäße in einer Regaletage gewählt.

Bei den Versuchsauswertungen hätte die Größe der Pflanzen genauer bestimmt werden können. Es wurden keine Pflanzen einzeln ausgemessen, sondern Zentimeterbereiche am Becher festgelegt, um den Bereich einschätzen zu können in denen die Mehrzahl der Pflanzenspitzen in einem Becher liegt. Dadurch konnte auch das Kontaminationsrisiko durch eine stark verkürzte Bearbeitungszeit verringert und mehr Wert auf eine höhere Wiederholung gelegt werden.

Die **maximale PSII Quanteneffizienz** (Qy_{max}), bietet Informationen über den zugrundeliegenden Prozess, der die Effizienz des Photosystem II (PSII) verändert. Dieser Parameter beschreibt das Verhältnis des, durch das mit dem Photosystem II verbundenen Chlorophyll, absorbierten Lichtes, das in der Photochemie genutzt wird. Die Werte dunkeladaptierter Pflanzen spiegeln die potentielle Photonen- oder Quanteneffizienz des PSII wider und werden als Indikator der Photosynthese von Pflanzen genutzt, mit einem bei vielen Pflanzen gemessenen optimalen Wert von 0,83. Unter Stressbedingungen wurden geringere Werte von Qy_{max} bei den Pflanzen ermittelt (Maxwell und Johnsen, 2000; Johnsen et al., 1993). Chlorophyllfluoreszenzmessung gelten als eine schnelle, nichtinvasive Möglichkeit zur Bewertung der photosynthetischen Aktivität von Pflanzen (Lin und Hsu, 2004). Der Vorteil des verwendeten Imagingsystems war die Möglichkeit alle Pflanzen eines Kulturgefäßes gleichzeitig zu messen und die Nachteile von punktuellen Messungen zu vermeiden (Lichtenthaler et al., 2005). Für die Messungen mussten die Deckel der Kulturgefäße ausgetauscht werden, da diese meist von innen mit Kondenswasser benetzt waren und dies zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen konnte. Die Eignung dieser Messungen für ein schnelles und unkompliziertes Verfahren, ebenso wie eine Messreihe während einer Kulturpassage wurde dadurch herabgestuft. Der Wechsel des Becherdeckels unter sterilen Bedingungen ist relativ zeitintensiv und birgt ein Kontaminationsrisiko. Anhand der Messergebnisse des Fluoreszenzspektrometers zur Quantifizierung der maximalen PSII Quantenausbeute konnte das Messverfahren nicht als

sensitiver Indikator zur Beurteilung der Pflanzenqualität herausgestellt werden (siehe Kapitel 6.3.3).

6.2 Energieeffizienz

6.2.1 Energieeffizienz und Photonenflussausbeute als Vergleichsmerkmal

Die Photosynthetische Photonenflussausbeute und die in dieser Arbeit definierte Energieeffizienz finden Verwendung in der Bewertung von Leuchtmitteln oder Belichtungssystemen zur Anwendung im Bereich des Gartenbaus. Beide Größen lassen sich über den Photonenfluss, bzw die $PPFD_{\phi}$ ermitteln, welche jeweils auf die benötigte elektrische Leistung bezogen wird.

6.2.1.1 Photosynthetische Photonenflussausbeute

Die photosynthetische Photonenflussdichte (*PPFA*) beschreibt die Anzahl an Photonen im Wellenlängenbereich der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR), die innerhalb einer Sekunde auf eine Fläche auftrifft und theoretisch von einem Blatt absorbiert werden kann. Für die quantitative Bewertung der Strahlung, die zur Photosynthese genutzt werden kann, kann der photosynthetisch aktive Anteil der Strahlung nach der auf einem Blatt einfallenden Energie oder nach der Anzahl der von einem Blatt absorbierten Photonen pro Wellenlänge im PAR-Bereich normalisiert werden. Dabei konnte eine geringe Abweichung bei der Normalisierung des Photonenflusses gegenüber der einfallenden Energie festgestellt werden. Die Photosyntheserate einer Pflanze unter natürlichem Licht wurde, bei Messungen des Strahlungsfluss ($W\ m^{-2}$) zwischen 400 nm und 700 nm, systematisch um 19 % überbewertet, wenn die Daten unter einer Glühlampe gesammelt wurden. Wurde die Strahlung als PPFD gemessen verringerte sich der Fehler auf 8 % (McCree, 1972b). Somit wurde die PPFD als geeignete Einheit zur Quantifizierung der PAR festgelegt (McCree, 1972a; Monteith und Unsworth, 1990; siehe auch Kapitel 2.1). Die PPFD wird zur Einstellung der PAR-Intensität bei der Pflanzenbelichtung (siehe zum Beispiel Yeh und Chung, 2009; Massa et al., 2006; Nhut et al., 2006) und auch zur Charakterisierung von LEDs für den Einsatz im Gartenbau herangezogen (zum Beispiel Tamulaitis et al., 2005; Fang und Jao, 2000; Tenessen et al., 1994).

Als Reaktion auf die Veränderung der Strahlung im roten und dunkelroten Wellenlängenbereich in der Umgebung kontrollieren Phytochrome (Kapitel 2.4.2) die Morphogenese. Die Verwendung dunkelroter HL-LEDs wurde bereits in diesem Zusammenhang für Untersuchungen genutzt. Diese schließen zum Beispiel Untersuchungen zur Stängelstreckung, aber auch kommerzielle Anwendungen, bei denen die Produktivität und Qualität gartenbaulich genutzter Pflanzen erhöht

werden sollen, mit ein (Rajapakse und Shahak, 2007; Kim et al., 2004b). Dabei kann es vorkommen, dass der Strahlungsstrom von LEDs, deren Strahlungsspektrum zum Teil im Wellenlängenbereich über 700 nm liegt, durch die Bewertung mit der PPFD unterbewertet werden, da die Photonen nicht alle im Wellenlängenbereich der PAR emittiert werden. Die Strahlungsspektren der in dieser Arbeit verwendeten HL-LEDs lagen mit Ausnahme der kaltweißen HL-LEDs im Wellenlängenbereich unter 700 nm. Der Anteil der Strahlungsemission der kaltweißen HL-LEDs über 700 nm ist sehr gering, so dass eine Unterbewertung der PPFD vernachlässigt wurde.

Leuchtmittel, wenn sie nicht gerade speziell für die Pflanzenbelichtung hergestellt werden, werden meist mit photometrischen Größen charakterisiert, welche sich auf die Strahlungsempfindlichkeit des menschlichen Auges beziehen. Dabei wird der Lichtstrom als eine häufige Messgröße verwendet, aus dem die Lichtausbeute resultiert (siehe Kapitel 2.1). Dabei ist die Empfindlichkeit des menschlichen Auges ($V(\lambda)$ -Kurve) zum Beispiel im blauen und roten Wellenlängenbereich sehr niedrig (Ohno, 1999) und würde für diese LEDs nur sehr niedrige Lichtstromwerte hervorbringen. Bei der Veränderung der Strahlungsspektren hin zum Maximum der Lichtempfindlichkeit des Auges (555 nm) kommt es zu höheren Werten bei der Charakterisierung über den Lichtstrom. (Müller et al., 2001). Eine wellenlängenabhängige, unterschiedliche Bewertung des Strahlungsflusses im Bereich der PAR wird mit der Bewertung der Leuchtmittel durch die PPFD umgangen.

Blaue HL-LEDs werden häufig durch die Angabe des Wirkungsgrades charakterisiert, der z.B. in $\text{mW}_{\text{Strahlung}} \text{W}_{\text{el}}^{-1}$ angegeben wird (zum Beispiel Philips Datenblatt, 2008). Auch hier wurden zur Bewertung der einzelnen HL-LEDs neben dem Photonenfluss auch der Strahlungsfluss gemessen, um einen Wirkungsgrad und somit die überschüssige Verlustleistung in Form von Wärme quantifizieren zu können. Der Unterschied zur Bewertung der HL-LEDs über den Strahlungsfluss und dem daraus resultierendem Wirkungsgrad wird in Kapitel 6.2.2 dargelegt.

6.2.1.2 Energieeffizienz

Die Energieeffizienz von Belichtungssystemen und auch die Photosynthetische Photonenflussausbeute einzelner Leuchtmittel werden mit der Einheit $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ angegeben. Jedoch unterscheidet sich die Berechnung der Einheiten. Die Photosynthetische Photonenflussausbeute ergibt sich aus dem Photonenfluss ($\mu\text{mol s}^{-1}$) des einzelnen Leuchtmittels, der in einer Ulbrichtkugel direkt gemessen und auf die benötigte elektrische Leistung (W) bezogen wurde (Kapitel 4.1.4). Die Energieeffizienz des Belichtungssystems

(Kapitel 4.2.4.2) hingegen ergibt sich aus der durchschnittlichen PPF_D auf der zu belichtenden Fläche (PPFD₀, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) und der benötigten elektrischen Leistung eines Belichtungssystems zur Ausleuchtung von einer Quadratmeter Kulturfläche (W m^{-2}). Trotz gleicher Einheiten wurden auf Grund der unterschiedlichen Berechnungsgrundlage verschiedene Bezeichnungen gewählt. Deshalb ist bei Angaben dieser Einheit in anderen Quellen darauf zu achten wie sie erstellt wurden, um sie in Vergleiche mit einbeziehen zu können.

Bei den Messungen in einer Ulbrichtkugel wird unabhängig vom Abstrahlwinkel der Strahlungsquelle der gesamte Strahlungsstrom gemessen, aus dem sich Photonenfluss und anschließend die Photosynthetische Photonenflussausbeute ergeben. So erstellte Werte sind also stets miteinander vergleichbar, lassen dabei aber nur einen direkten Leuchtmittelvergleich und keinen Leuchtenvergleich, also keinen Vergleich unterschiedlicher Belichtungssysteme, zu. Zwar können diese ebenso in einer Ulbrichtkugel vermessen werden, bei einem Vergleich unterschiedlicher Belichtungssysteme zur Belichtung einer bestimmten Fläche muss der Abstrahlwinkel, besser die PPF_D-Verteilung auf der zu belichtenden Fläche mit einbezogen werden.

Die PPF_D-Verteilung eines Belichtungssystems ist unter anderem abstandsabhängig (Kapitel 5.2.1.2) und wichtig für die Berechnung der PPF_D auf der zu belichtenden Fläche. Die Energieeffizienz erhöht sich mit der Verringerung des Abstandes zwischen Leuchtmittel und der zu belichteten Fläche (Leuchtmittelabstand), wodurch ein Vorteil eines HL-LED-Belichtungssystems gegenüber Belichtungssystemen mit anderen Leuchtmitteln entsteht (Kapitel 6.2.4). Ohne eine Angabe zum Leuchtmittelabstand ist also ein Vergleich der Energieeffizienz nicht möglich. Selbst wenn es eine Angabe des Leuchtmittelabstandes gibt (siehe zum Beispiel Fang und Jao, 2000) ist bei unterschiedlichen Leuchtmittelabständen der Belichtungssysteme ein Vergleich schwierig. Es gibt die Möglichkeit den Leuchtmittelabstand in einem Wert mit anzugeben, indem die Energieeffizienz auf den Leuchtmittelabstand bezogen wird. Durch die Multiplikation von Energieeffizienz und Leuchtmittelabstand werden Werte gebildet, aus denen sich dann eine Einschätzung der Energieeffizienz in einem bestimmten Etagenabstand, durch Division des gewünschten Etagenabstandes, errechnet werden kann. Die Werte liegen bei den in dieser Arbeit ermittelten Energieeffizienzen bei z. B. $232,35 \text{ mm } \mu\text{mol W}^{-1} \text{ s}^{-1} \pm 13,3 \text{ mm } \mu\text{mol W}^{-1} \text{ s}^{-1}$ für die Variante RB 7:3. Gemittelt wurden die Werte über die mit dem Leuchtmittelabstand multiplizierten Energieeffizienzen, die bei den jeweiligen Einstellungen des Etagenabstandes gemessen wurden. Die Relationen zu den Ergebnissen der anderen Belichtungsvarianten, auch die der Leuchtstofflampenvarianten bleiben auch bei dieser Bewertung unverändert. Die hohe Abweichung ergibt sich aus den

Messfehlern, die durch Ungenauigkeiten bei der Durchführung der Messungen, zum Beispiel durch geringe Positionsabweichungen des Messensors und fehlerhafte Einstellung der $PPFD_{\emptyset}$, zu Stande kamen (siehe Kapitel 6.1.2). Bei einem geringen Etagenabstand werden die Ungenauigkeiten auf Grund der ungleichmäßigeren $PPFD$ -Verteilung größer. Bei den oben beschriebenen Werten zur etagenabstandsunabhängigen Bewertung eines Belichtungssystems wird also auch von einer gleichmäßigen $PPFD$ -Verteilung ausgegangen.

Neben dieser Vergleichsmöglichkeit würde ein standardisiertes Messverfahren unterschiedliche Belichtungssysteme miteinander vergleichbar machen. Dabei wäre die Art und Weise der Ermittlung der $PPFD_{\emptyset}$ ebenso festzulegen wie der Leuchtmittelabstand bei dem die Messungen durchgeführt werden sollen. Eine gleichmäßige $PPFD$ -Verteilung auf einer bestimmten Fläche wäre demnach dann eine Grundvoraussetzung für eine Vergleichbarkeit der Belichtungssysteme. Wird die Energieeffizienz ohne Berücksichtigung der $PPFD_{\emptyset}$ berechnet, also zum Beispiel nur durch die Messung der $PPFD$ in der Mitte des Belichtungssystems, kann der Wert nur bei einer völlig gleichmäßigen $PPFD$ -Verteilung repräsentativ für das Belichtungssystem sein. Ansonsten wird nur eine punktuelle Angabe der Energieeffizienz und nicht die eines kompletten Belichtungssystems wiedergegeben.

Bei der Bewertung des HL-LED-Belichtungssystems wurde von einer Einbeziehung pflanzenbaulicher Parameter wie zum Beispiel dem Ertrag abgesehen. Die Problemstellungen waren vielfältig, weshalb hier kein einheitlicher Parameter festgelegt wurde. Ansonsten könnte die Energieeffizienz auch die Auswirkungen auf die Vermehrungsrate oder den Frischmassezuwachs beinhalten. Andere Parameter, welche je nach Fragestellung wichtiger sein können, würden dabei allerdings nicht beachtet.

Beim Vergleich der Energieeffizienzen unterschiedlicher Belichtungssysteme ist für einen Vergleich also darauf zu achten, wie die Werte erstellt worden sind. Ein Problem sind dabei oft fehlende Angaben, zum Beispiel die des Leuchtmittelabstandes, bei dem die Messungen durchgeführt wurden. Generell beinhalten die Werte der Energieeffizienz, bis auf die Eingrenzung auf den Wellenlängenbereich der PAR, auch keine Informationen über die Strahlungsspektren der Leuchten. Auch dies gilt es bei einem Vergleich unterschiedlicher Belichtungssysteme zu beachten.

6.2.2 Effizienter Betrieb von HL-LEDs

Für den effizienten Betrieb einer HL-LED ist der Betriebszustand ausschlaggebend. Eine hohe Photosynthetische Photonenflussausbeute, ein hoher Wirkungsgrad und eine lange Lebensdauer sind maßgeblich von der Sperrschichttemperatur und der Betriebsstromstärke abhängig.

6.2.2.1 Einflussfaktor Betriebsstromstärke

Mit steigender Betriebsstromstärke einer HL-LED wurde der Strahlungsfluss sowie der Photonenfluss einer HL-LED erhöht. Dabei bestand ein unterproportionaler Zusammenhang zwischen der steigenden Betriebsstromstärke und dem Strahlungsfluss sowie dem Photonenfluss. Trotz konstanter Sperrschichttemperatur verringerten sich der Wirkungsgrad und die Photonenflussausbeute bei jedem HL-LED-Typ unterschiedlich stark mit zunehmender Betriebsstromstärke (siehe Kapitel 5.1.2). Dieser Zusammenhang wurde bei den vier untersuchten HL-LED-Typen zwischen 50 mA und 700 mA festgestellt. Gu et al. (2006) zeigten ebenfalls an vier anderen HL-LED-Typen (Blau, Rot, Grün, Kaltweiß) einen negativen Einfluss der Betriebsstromstärke auf die Lichtausbeute der HL-LEDs. Ein geringerer Einfluss der Betriebsstromstärke wurde mit einer Dimmung der HL-LEDs mittels PWM (Pulsweitenmodulation) erzielt. Dabei war zwar die Lichtausbeute bei unterschiedlichen Stufen der Dimmung stabiler jedoch trat ein umgekehrter Effekt auf, die Lichtausbeute stieg mit Erhöhung des Lichtstroms mittels PWM. Dennoch war die Lichtausbeute, trotz gleichem Energieaufwand, insgesamt stets niedriger als die Lichtausbeute bei einer kontinuierlichen Regulierung der Stromstärke, wie sie auch bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen der einzelnen HL-LEDs vorgenommen wurde (Gu et al., 2006).

Trotz gleicher Tendenz wiesen die Ergebnisse des Wirkungsgrades und der Photonenflussausbeute der HL-LED-Typen ein unterschiedliches Bild auf (vgl. Abb. 5.1.2 und Abb. 5.1.3). Die Charakterisierung von HL-LEDs mittels Strahlungsfluss und dem daraus hervorgehenden Wirkungsgrad wird oft für blaue HL-LEDs verwendet (zum Beispiel Philips Datenblatt, 2011), da der sonst üblicherweise verwendete Lichtstrom und die Lichtausbeute sehr niedrige Werte aufweisen würden (siehe Kapitel 6.2.1). Bei der Ermittlung des Photonenflusses wird die Anzahl an Photonen in einer Sekunde bei entsprechender Wellenlänge wiedergegeben. Die Energie der Photonen unterscheidet sich je nach Wellenlänge der Strahlung (λ). Nach der Teilchentherorie ist die Energie eines Photons (E) also abhängig von der Wellenlänge und kann mit den Konstanten des Plankschen Wirkungsspektrum (h) und der Lichtgeschwindigkeit (c) berechnet werden (Dohlus, 2010).

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad [J]$$

Demnach ist ein Photon im blauen Wellenlängenbereich energiereicher als ein Photon im roten Wellenlängenbereich. Mit höherer Wellenlänge nimmt also die Energie eines einzelnen Photons ab. Aus diesem Zusammenhang erklären sich die unterschiedlichen Kurvenverläufe der HL-LEDs bei Betrachtung des Wirkungsgrades und der Photosynthetischen Photonenflussausbeute. Die roten HL-LEDs wiesen eine hohe Photosynthetische Photonenflussausbeute auf und ihre Verlaufskurve in Abhängigkeit von der Betriebsstromstärke (Abb. 5.1.2) zeigte einen deutlichen Abstand zu den weißen und blauen HL-LEDs, besonders bei niedrigen Betriebsstromstärken. Hingegen war der Kurvenabstand bei Betrachtung des Wirkungsgrades (Abb. 5.1.3) viel geringer und die Werte der blauen und weißen HL-LEDs bei höheren Betriebsstromstärken sogar größer als die der roten HL-LEDs. Dies ist auf die Strahlungsspektren der HL-LEDs zurückzuführen, bei denen die roten HL-LEDs in einem langwelligeren Wellenlängenbereich Strahlung emittieren als die blauen HL-LEDs und einzelne Photonen der roten HL-LEDs weniger Energie besitzen als die Photonen, die durch die blauen HL-LEDs erzeugt werden. Bei den weißen HL-LEDs lassen sich die Unterschiede in der Bewertung ebenso erklären. Die Strahlung der weißen HL-LEDs wird in einem kurzwelligeren Wellenlängenbereich emittiert als die der roten HL-LEDs. Die weißen HL-LEDs zeichnen sich durch einen Peak im blauen Wellenlängenbereich aus. Somit haben die einzelnen Photonen der kaltweißen HL-LEDs insgesamt eine höhere Energie als die der roten HL-LEDs. Bei gleicher Photonenanzahl der blauen, kaltweißen und roten HL-LEDs würde demnach die Energie der blauen und kaltweißen HL-LEDs höher sein als die der roten HL-LEDs. Gleiches gilt für die Beobachtungen des Einflusses der Sperrschichttemperatur auf die Photosynthetische Photonenflussausbeute und den Wirkungsgrad.

Die Abnahme der Photosynthetischen Photonenflussausbeute und des Wirkungsgrades verhält sich je nach HL-LED anders. Die blauen, grünen und kaltweißen HL-LEDs zeigten ein ähnliches Kurvenverhalten, wohingegen die roten HL-LEDs einen stärkeren Einfluss der Betriebsstromstärke aufwiesen. Dies kann auf die unterschiedlich dotierten **Halbleitermaterialien** der HL-LEDs-Chips zurückzuführen sein. Bis auf die roten HL-LEDs, mit einer Aluminium-Indium-Gallium-Phosphor-Verbindung (AlInGaP), basierten die untersuchten HL-LEDs auf einer Indium-Gallium-Nitrid-Verbindung (InGaN) (Philips Datenblatt, 2008). Ein negativer Effekt einer steigenden Stromstärke kann teils den Datenblättern der HL-LEDs entnommen werden. Dabei wird die Abhängigkeit des relativen Lichtstroms von der Betriebsstromstärke dargestellt (Philips Datenblatt, 2011; CREE Datenblatt, 2008). Die Kurven

zeigen einen unterproportional ansteigenden Verlauf, was bei sonst konstanten Bedingungen in Hinblick auf Sperrschichttemperatur und Spannung, auf eine Verringerung der Lichtausbeute mit steigender Betriebsstromstärke schließen lässt. Eine Charakterisierung in Form des Photonenflusses ist bei den Herstellern von HL-LEDs nicht üblich. Anhand der in dieser Arbeit untersuchten HL-LEDs konnte aber eine ähnliche Tendenz bei der Abhängigkeit der Photosynthetischen Photonenflussausbeute von der Betriebsstromstärke aufgezeigt werden.

HL-LEDs werden überwiegend für Beleuchtungszwecke eingesetzt und kennzeichnen sich durch hohe Strahlungsflüsse einzelner HL-LEDs aus. Sie werden mit höheren Stromstärken betrieben als zum Beispiel Standard-LEDs, welche in dieser Bauweise mit bis zu 80 mA betrieben werden (Arik et al., 2002; www.led-info.de, Stand 12.2010). Bei den Versuchen zum Einfluss auf die Betriebsstromstärke war im Bereich niedriger Betriebsstromstärken unter 150 mA die Standardabweichung der gemittelten Messwerte höher als bei höheren Stromstärken. Mit der Entwicklung der Indium-Gallium-Nitrid (InGaN) und Aluminium-Indium-Gallium-Phosphor (AlInGaP) LEDs und Optimierung des Temperaturmanagements konnte der Betrieb mit hohen Stromstärken, teilweise mit bis zu 2000 mA, und damit höheren Lichtausbeuten ermöglicht werden (Kovac et al., 2003). Die HL-LEDs wurden für den Betrieb mit höheren möglichen Betriebsstromstärken optimiert, was durch ein verbessertes Temperaturmanagement begünstigt wurde. Dies kann die höheren Abweichungen bei niedrigen Stromstärken erklären.

Bei der Pflanzenbelichtung mit spezifischen Wellenlängen war es wichtig die HL-LEDs auf mögliche **Veränderungen des Strahlungsspektrums** hin zu untersuchen (Kapitel 5.1.4). Die Peakveränderungen in den Strahlungsspektren der hier untersuchten HL-LEDs bei steigender Betriebsstromstärke ist nicht allein auf den Faktor Betriebsstromstärke zurückzuführen, sondern auch auf die Veränderung der Sperrschichttemperatur, welche nicht mit der konstant gehaltenen Platinentemperatur übereinstimmte. Die Abweichung der Sperrschicht- von der Platinentemperatur wurde mit zunehmender Stromstärke höher.

Die Aluminium-Indium-Gallium-Phosphor basierten roten HL-LEDs unterschieden sich in ihrer Veränderung hinsichtlich der Richtung der Peakverschiebung gegenüber von Indium-Gallium-Nitrid basierten HL-LEDs. Bei AlInGaP basierten HL-LEDs verschiebt sich mit steigender Betriebsstromstärke die Peakwellenlänge in den langwelligeren Bereich, bei den InGaN basierten HL-LEDs in die andere Richtung (Dyble et al., 2005; Müller et al., 2001). Die Richtungsänderung der Peakwellenlängen der in dieser Arbeit untersuchten HL-LEDs stimmt mit dieser Beobachtung überein und wurde auch durch Gu et al. (2006) bestätigt. Sie untersuchten ebenso vier unterschiedliche HL-LED-Typen. Allerdings konnte auch dabei der Einfluss der

Betriebsstromstärke und der Sperrschichttemperatur nicht differenziert werden, da die Versuche in einer Box mit konstanter Lufttemperatur, also mit einer konstanten Umgebungstemperatur der HL-LEDs durchgeführt wurden. Deshalb ist auch bei diesen Versuchen mit einer steigenden Sperrschichttemperatur bei einer Erhöhung der Betriebsstromstärke zu rechnen.

Die spektrale Veränderung von Indium-Gallium-Nitrid basierten LEDs (Blau, Grün, Kaltweiß) ist auf die Veränderung der optischen Eigenschaften des Indiums zurückzuführen, welcher durch den sogenannten „Quantum confined stark effect“ (QCSE) hervorgerufen wird, bei dem es zu einer Verschiebung von Spektrallinien kommt (Kim et al., 2001). Bei InGaN basierten LEDs mit einer Dimmung über PWM konnte eine geringere Veränderung der Peakwellenlänge und dadurch ein stabileres Strahlungsspektrum bei einer Änderung der Betriebsstromstärke festgestellt werden. So wurde nur bei den grünen HL-LEDs eine höhere Peakveränderung um 10 nm bei einer Erhöhung der Betriebsstromstärke, also ohne Dimmung durch ein PWM-Signal, von 17,5 mA auf 350 mA gemessen. Die Veränderung der Peakwellenlänge lag bei den blauen und kaltweißen HL-LEDs unter 5 nm, weshalb ein stabileres Strahlungsspektrum durch eine Dimmung mittels PWM nur eine unwesentliche Verbesserung der Konstanz der spektralen Eigenschaften zur Folge hat (Gu et al., 2006).

Wie bereits im vorangegangenen Absatz beschrieben nahm die Peakwellenlänge auch der InGaN basierten kaltweißen HL-LEDs mit zunehmender Betriebsstromstärke ab (Dyble et al., 2005). Der Anteil der emittierten Strahlung im Wellenlängenbereich von 450 nm bis 600 nm nahm gegenüber dem Strahlungsanteil unter 450 nm, in dem sich auch die Peakwellenlänge der kaltweißen HL-LEDs befindet, mit steigender Betriebsstromstärke hingegen zu. Daraus lässt sich auch erklären warum die **Farbtemperatur** trotz niedrigerer Peakwellenlänge nicht kälter wird, sondern wärmer. Der Anteil grün-gelb-roter Strahlung wird im Verhältnis zur blauen Strahlung größer. Bei warmweißen HL-LEDs ist das Verhältnis der Strahlung im blauen Wellenlängenbereich zu der Strahlung im Bereich der grün-gelb-roten Strahlung recht gering und der Blaupik kann unter dem des Peaks im grünen Wellenlängenbereich liegen. Somit führt die oben beschriebene Veränderung des Strahlungsspektrums mit steigender Stromstärke zu einem wärmeren Farbton durch eine höhere Farbtemperatur. Der Unterschied war bei den in dieser Arbeit untersuchten HL-LEDs trotz dieser Beobachtung marginal, da die Veränderung sich im Bereich der kaltweißen Farbtemperatur abspielte und den Farbeindruck nicht veränderte.

6.2.2.2 Einflussfaktor Sperrschichttemperatur

Die Sperrschichttemperatur der HL-LEDs, also die Temperatur am p-n-Übergang des HL-LED-Chips, ist wie auch die Betriebsstromstärke ein beeinflussender Faktor des Wirkungsgrades und der Photosynthetischen Photonenflussausbeute. Steigt die Sperrschichttemperatur verringert sich die Photosynthetische Photonenflussausbeute und der Wirkungsgrad der HL-LEDs (siehe Kapitel 5.1.2.2). Dies konnte anhand von Messungen des Lichtstroms und der daraus resultierenden Lichtausbeute zum Beispiel von Singer et al. (2007) bestätigt werden. Wie auch bei den in dieser Arbeit untersuchten HL-LEDs verringerten sich dort die Werte mit zunehmender Sperrschichttemperatur. Demnach war eine Verringerung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute ebenso zu erwarten wie die des Lichtstroms bei anderen Untersuchungen (Taguchi, 2008; Singer et al., 2007; Arik et al., 2002). Nur die quantitative Veränderung auf Basis des Photonenflusses konnte aus diesen Daten nicht hergeleitet werden und wurde in der vorliegenden Arbeit behandelt. Es wurde ebenso wie bei einer steigenden Betriebsstromstärke ein größerer Einfluss der Sperrschichttemperatur auf AlInGaP basierte HL-LEDs (rote HL-LED) gegenüber den InGaN basierten HL-LEDs festgestellt. Die Stärke des Einflusses der Sperrschichttemperatur scheint dabei abhängig vom HL-LED-Modell und HL-LED-Typ zu sein und ist demnach, bis auf die Tendenz, schwer zu verallgemeinern.

Die **Veränderung des Strahlungsspektrums** einer LED ist abhängig von der Sperrschichttemperatur des LED-Chips und die Voraussetzung für ein stabiles Strahlungsspektrum folglich eine konstante Sperrschichttemperatur. Bei vielen Standard-LEDs verschiebt sich das Strahlungsspektrum von blauen LEDs mit steigender Sperrschichttemperatur in den kurzwelligeren Bereich, wohingegen bei anderen LEDs, bedingt durch andere Halbleitermaterialien, eher eine Verschiebung hin zum langwelligeren Bereich beobachtet wird. Bei Standard-LEDs konnte eine Verschiebung von $0,1 \text{ nm K}^{-1}$ bis $0,3 \text{ nm K}^{-1}$ bei steigender Sperrschichttemperatur und konstanter Stromstärke gemessen werden (Sutton, 2001). Die Veränderung der Peakwellenlänge lag bei den in dieser Arbeit untersuchten HL-LEDs-Typen zwischen $0,03 \text{ nm K}^{-1}$ und $0,19 \text{ nm K}^{-1}$ (Blau: $0,03 \text{ nm K}^{-1}$; Grün: $0,06 \text{ nm K}^{-1}$; Rot: $0,19 \text{ nm K}^{-1}$; Kaltweiß: $0,07 \text{ nm K}^{-1}$). Dabei verschoben sich die Peakwellenlänge bei allen HL-LEDs, auch bei den blauen HL-LEDs in einen langwelligeren Bereich, die Peakwellenlängen stiegen also mit ansteigender Sperrschichttemperatur an (siehe Kapitel 5.1.4). Die Verschiebung der Strahlungsspektren der blauen LEDs mit steigender Sperrschichttemperatur zum langwelligeren Bereich ist typisch für GaN basierte Halbleiterverbindungen (Agaphonov et al., 2000). Der Einfluss der Sperrschichttemperatur auf die Veränderung der Peakwellenlänge war bei den in

dieser Arbeit untersuchten roten HL-LEDs, wie auch der Einfluss der Betriebsstromstärke, am höchsten (siehe Tab. 5.1.3). Die Veränderung lag bei einer Sperrschichttemperatur zwischen 20 °C und 94 °C bei 13,8 nm. Der höhere Einfluss auf die roten HL-LEDs kann wieder auf die im Vergleich zu den anderen HL-LED-Typen unterschiedlichen Halbleitermaterialien zurückgeführt werden. Die Temperaturabhängigkeit des Halbleitermaterials InGaN ist geringer als bei AlInGa, welches für langwelligere LEDs, also zum Beispiel rote LEDs verwendet wird. Dies zeigte sich in den von Singer et al. (2007) durchgeführten Versuchen, bei denen der Einfluss der Sperrschichttemperatur auf eine rote HL-LED (Seoul Semiconductor Z-Power LED P3, 625 nm) wesentlich höher war als der Einfluss auf grüne (Philips Lumileds K2, 530 nm) oder blaue (Osram Platinum Dragon, 470 nm) HL-LEDs. Der höhere Einfluss einer steigenden Sperrschichttemperatur der kaltweißen HL-LEDs gegenüber den blauen HL-LEDs kann auf die Phosphorbeschichtung zurückzuführen sein, da die kaltweißen HL-LEDs ansonsten auf Basis der blauen HL-LEDs hergestellt werden.

Ein starker Einfluss der Sperrschichttemperatur auf die **Farbtemperatur** weißer HL-LEDs, wie von Taguchi (2008) beschrieben, konnte nicht bestätigt werden (siehe Kapitel 5.1.4.3). Dabei wurden bei den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen auch keine Vergleiche zu kaltweißen HL-LEDs durchgeführt, welche zum Beispiel auf einer Farbmischung von Rot, Grün und Blau (RGB-LEDs) basieren. Die Farbtemperaturveränderung der kaltweißen HL-LEDs durch eine steigende Sperrschichttemperatur lag, wie auch bei der Betriebsstromstärke, in einem sehr niedrigen Bereich. Mit einer Veränderung der Farbtemperatur von etwa 325 K zwischen 20 °C und 90 °C Sperrschichttemperatur konnte keine sichtbare Veränderung des Farbtons festgestellt werden.

6.2.2.3 Ergebnisvergleich der Parameterstudien

Die Ergebnisse der Photosynthetischen Photonenflussausbeute, ebenso wie die des Wirkungsgrades, sollten an den Punkten der typischen Betriebsbedingungen (350 mA Betriebsstromstärke, 25 °C Sperrschichttemperatur; siehe Abb. 5.1.2 bis Abb. 5.1.4) zwischen den Messreihen mit den Parametern Betriebsstromstärke und der Sperrschichttemperatur übereinstimmen. Dies trifft auch, bis auf die roten HL-LEDs, sehr gut zu. Bei den roten HL-LEDs weichen die Werte der Photosynthetischen Photonenflussausbeute und des Wirkungsgrades um etwa 4 % von dem jeweils höheren Wert ab. Damit liegen die Werte im Bereich der Standardabweichung der Mittelwerte. Die höheren Abweichungen der roten HL-LEDs sind bereits bei der spektralen Charakterisierung (Peakwellenlänge) aufgefallen. Für die Messungen in den zwei unterschiedlichen Messreihen (Betriebsstromstärke und Sperrschichttemperatur)

wurden nicht dieselben HL-LEDs verwendet, sondern gleiche HL-LEDs desselben HL-LED-Typs. Die Abweichungen können also bedingt sein durch die Klasseneinteilung der HL-LEDs (Binning), die möglichen Messfehler und etwaige Durchführungsungenauigkeiten (siehe Kapitel 6.1.1.2). Höhere Wiederholungszahlen in den Messreihen hätten wahrscheinlich zu einer geringeren Abweichung geführt.

Insgesamt wiesen die blauen und kaltweißen HL-LEDs ähnliche Reaktionen auf die Einflussfaktoren Betriebsstromstärke und Sperrschichttemperatur auf. Die weißen HL-LEDs basierten in diesem Fall auf einer blauen HL-LED mit gelb fluoreszierendem Phosphor. Dadurch konnten ähnliche Einflüsse erwartet werden. Bei gleicher, blauer HL-LED als Ausgangsbasis für den kaltweißen HL-LED-Typ hätte allerdings eine Verringerung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute und des Wirkungsgrades erwartet werden können, da durch die Phosphorbeschichtung eine geringe Verringerung des Photonenflusses oder des Strahlungsstroms vorhanden gewesen wäre. Somit scheinen als Basis für die kaltweißen HL-LEDs blaue HL-LEDs mit höheren Strahlungsströmen verwendet worden zu sein als die hier verwendeten blauen HL-LEDs aufweisen.

Bei den Untersuchungen des Einflusses auf die spektrale Verteilung in den zwei Messreihen mit den Parametern Betriebsstromstärke und Sperrschichttemperatur wurden an den Punkten gleicher Betriebszustände (25 °C Sperrschichttemperatur, 350 mA Betriebsstromstärke) teilweise unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Die Abweichungen liegen im Bereich der durch den Hersteller angegebenen möglichen minimalen und maximalen Peakwellenlänge von 5 nm, die durch die Klasseneinteilung der HL-LEDs (Binning) zu Stande kommt (Philips Datenblatt, 2008). Für die beiden Versuchsreihen wurden nicht dieselben HL-LEDs verwendet, sondern stets neue HL-LEDs des gleichen HL-LED-Typs. Natürlich können bei diesem aufgetretenen Fehler auch Messungenauigkeiten, welche bereits oben beschrieben wurden, eine Rolle gespielt haben.

Insgesamt sollten die HL-LEDs für das Erreichen hoher Photosynthetischer Photonenflussausbeuten und hoher Wirkungsgrade stets bei niedrigen Stromstärken und einer niedrigen Sperrschichttemperatur betrieben werden. Letztere setzt bei Betrieb mit höheren Stromstärken eine dementsprechend hohe Kühlleistung voraus. Wird dies nicht beachtet, kommt es zu einem verstärkt negativen Effekt auf die Photosynthetische Photonenflussausbeute und auf den Wirkungsgrad, der sich aus der steigenden hohen Betriebsstromstärke und der hohen Sperrschichttemperatur zusammensetzt. Dabei konnte bei den blauen HL-LEDs der geringste Einfluss der untersuchten Parameter festgestellt werden und bei den roten HL-LEDs der höchste Einfluss.

Mit einer gravierenden Veränderung der Strahlungsspektren bei unterschiedlichen Betriebszuständen ist, zumindest in den hier untersuchten Bereichen der Stromstärke und Sperrschichttemperatur, nicht zu rechnen. Bei der Beachtung des Betriebs der HL-LEDs unter für die Photosynthetische Photonenflussausbeute und für den Wirkungsgrad günstigen Bedingungen ist, neben dem direkten Effekt durch eine geringe Wärmeabgabe, auch ein indirekter Effekt zu erwarten, bei dem die benötigte Energie für die Kühlung reduziert wird (Taguchi, 2008).

6.2.3 Leuchtmittelvergleich

Für den effizienten Einsatz von LEDs in der In-vitro-Kultur ist ein Vergleich der Leuchtmittel hinsichtlich ihrer Effizienz, Lebensdauer und ihres Preises interessant. Wie oben bereits erwähnt werden die unterschiedlichen Leuchtmittel meist durch photometrische Größen, oft mit dem Lichtstrom aus dem sich die **Lichtausbeute** ergibt, charakterisiert. Die Werte der Lichtausbeute farbiger HL-LEDs sind auf Grund der Bewertung mit der $V(\lambda)$ -Kurve sehr gering, vor allem bei den blauen HL-LEDs (siehe Kapitel 6.2.1). Die höchsten Lichtausbeuten werden mit kaltweißen HL-LEDs erzielt und liegen mit 80 lm W^{-1} bis 129 lm W^{-1} teils über denen von Leuchtstofflampen, welche mit 70 lm W^{-1} bis 100 lm W^{-1} angegeben werden (Pousset et al., 2010; Taguchi, 2008; <http://www.philipslumileds.com/products/luxeon-rebel/luxeon-rebel-white#datasheets>, Stand 04.07.2011). Noch ist es schwierig, vergleichende Daten auf Basis des Photonenflusses, aus der sich die **Photosynthetische Photonenflussausbeute** ergibt, zu erhalten. Auch bei speziell für die Pflanzenbelichtung entwickelten HL-LEDs fehlen diese Angaben oft und es werden nur die Wirkungsgrade angegeben (zum Beispiel http://ledlight.osram-os.com/reports/hort/4-LH_CDPD_Pb-free.pdf, Stand 04.07.2011).

Die Photosynthetische Photonenflussausbeute der HL-LEDs hat mittlerweile die der kommerziell in der In-vitro-Kultur verwendeten Leuchtstofflampen überschritten und kann sich mit der Energieeffizienz der Natriumhochdruck-Dampflampen messen (Tab. 6.2.1).

Mit der Weiterentwicklung der HL-LEDs kann ein deutliches Überschreiten des von den Natriumhochdruck-Dampflampen vorgegebenen Maximums der Photonenflussausbeute und auch der Lichtausbeute erwartet werden (Bourget, 2008; Kovac et al., 2003). Für rote HL-LEDs sind bereits Angaben von $2,0 \mu\text{mol W}^{-1} \text{ s}^{-1}$ zu finden, allerdings ohne weitere Angaben zum HL-LED-Typ und weiterer Spezifikationen sowie Betriebszuständen (<http://www.lemnislighting.com/pdf/65259%20Lemnis%20Folder%20Greenhouse%20ENG.pdf>, Stand 04,07.2011).

Tab. 6.2.1 Vergleich der Photosynthetischen Photonenflussausbeute unterschiedlicher Leuchtmittel.

Leuchtmitteltyp	Artikelbezeichnung	PPFA, $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$
Leuchtstofflampe ¹⁾	Master TL-D Reflex Super 80 58 W	1,26
Hochdruck-Natriumdampflampe ¹⁾	Master GreenPower T 400W	1,81
Hochdruck-Natriumdampflampe ¹⁾	Master SON-T PIA Agro 400 W	1,65
HL-LED Royalblau ²⁾	LUXEON® Rebel	0,97
HL-LED Rot ²⁾	LUXEON® Rebel	1,55
HL-LED Kaltweiß ²⁾	LUXEON® Rebel	1,31

¹⁾ Quelle: Professional Lighting, 2010

²⁾ Quelle: Ergebnisse der Photosynthetischen Photonenflussausbeute aus Kap. 5.1.2 bei 50 mA

Die Photosynthetische Photonenflussausbeute der derzeit auf dem Markt erhältlichen LUXEON® Rebel kann in Relation zur gestiegenen Lichtausbeute, welche den neusten Datenblättern zu entnehmen ist (Philips Datenblatt, 2011), berechnet werden. Danach liegt die Photosynthetische Photonenflussausbeute royalblauer HL-LEDs mit der Angabe des Strahlungsstroms von 0,5 W statt 0,275 W dann bei maximal 1,76 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ und roter HL-LEDs mit einer Steigerung von 40 lm W^{-1} auf 50 lm W^{-1} bei maximal 1,79 $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Auf Grund der in Kapitel 6.2.1 aufgeführten Probleme bei der Angabe der Energieeffizienz von Belichtungssystemen wurde von einer Auflistung unterschiedlicher Energieeffizienzangaben abgesehen. Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Belichtungssysteme oft nicht mit der Energieeffizienz beschrieben werden, sondern mit Daten zur Lichtausbeute.

Nicht nur die Photosynthetische Photonenflussausbeute von HL-LEDs ist gegenüber der Leuchtstofflampe höher, sondern auch die **Lebensdauer**. Dabei wird die Lebensdauer über die Betriebsstunden beschrieben, bei denen der Strahlungsstrom noch $\geq 90\%$ des anfangs vorhandenen Strahlungsstroms beträgt. Für Leuchtstofflampen (Master TL-D Reflex Super 80 58 W) und Natriumhochdruck-Dampflampen (Master GreenPower T 400W) werden Lebensdauern von 12000 Betriebsstunden angegeben (Professional lighting, 2010). Die Lebensdauer von LEDs wird im Allgemeinen als sehr großer Vorteil hervorgehoben und mit einer Dauer von bis zu 50000 Betriebsstunden, teilweise sogar bis 100000 Betriebsstunden angegeben (Bourget, 2008; Morrow, 2008; Massa et al., 2006). Die Lebensdauer der LEDs hängt dabei sehr stark vom Betriebszustand ab und ist eine Funktion von Sperrschichttemperatur und Betriebsstromstärke. Je höher die Betriebsstromstärke und die Sperrschichttemperatur, also je schlechter die

Kühlung der LEDs, desto geringer ist die Lebensdauer (Morrow, 2008). Bei einem HL-LED-Belichtungssystem können für die Lebensdauer ungünstige Betriebsbedingungen unter Praxisbedingungen gegeben sein, weshalb die Angaben der Lebensdauer eines HL-LED-Belichtungssystems mit 10000 bis 25000 Betriebsstunden wesentlich geringer sind als die der einzelnen LEDs (Professional lighting, 2010; Kim et al., 2006).

Ein großer Nachteil der LED-Anwendungen im Gartenbau sind die hohen **Investitionskosten** gegenüber anderen Leuchtmitteln. Vor allem blaue LEDs sind teurer als andere LED-Typen und werden seltener in der kommerziellen Pflanzenbelichtung eingesetzt (Nhut und Nam, 2010; Morrow, 2008). Dabei sind in Zukunft insgesamt sinkende Preise für LEDs zu erwarten. Das „Haitzsche Gesetz“ beschreibt diese Entwicklung. Demnach fallen die Preise für LEDs mit einem Faktor von 10 pro Dekade, wobei der Strahlungsfluss pro LED-Chip um einen Faktor von 20 pro Dekade steigt (Steigerwald et al., 2002). Dies erhöht den Optimismus, dass eine Massenapplikation von LEDs in Kulturräumen und auch in Gewächshäusern in den kommenden Jahren möglich sein wird (Tamulaitis et al., 2005). Taguchi (2008) erwartet demnach eine Steigerung der Lichtausbeute der kaltweißen HL-LEDs von derzeit 120 lm W⁻¹ auf 320 lm W⁻¹ im Jahr 2020. Dabei bleibt abzuwarten, wie lange sich der Trend der letzten Jahre, welcher durch das „Haitzsche Gesetz“ beschrieben wird, in dem Maße fortsetzt.

Die kommerzielle Einführung von HL-LED-Anwendungen zur Pflanzenbelichtung im Gartenbau beruht insgesamt auf der Verbesserung der Leistungsfähigkeit und der Preissenkung von HL-LEDs (Tamulaitis et al., 2005). Für die ökonomische Bewertung der LED-Anwendung in Kulturräumen ist neben der direkten Energieeinsparung, durch die höheren Wirkungsgrade gegenüber zum Beispiel Leuchtstofflampensystemen, natürlich auch die dann geringere, benötigte Kühlleistung zu beachten (Taguchi, 2008). Bei nicht garantierter, wesentlich längerer Lebensdauer von HL-LED-Belichtungssystemen bleibt ein ökonomischer Einsatz von HL-LEDs, auch wenn sie energiesparend eingesetzt werden können, auf Grund der noch sehr hohen Investitionskosten fraglich und muss im Einzelfall geprüft werden.

6.2.4 Effizienter Einsatz von HL-LED-Belichtungssystemen in der In-vitro-Kultur

Der effiziente Einsatz von HL-LED-Belichtungssystemen hängt von mehreren Faktoren ab, welche einen Einfluss auf die Energieeffizienz des Systems haben. Für eine Alternative zu den konventionell eingesetzten Belichtungssystemen mit Leuchtstofflampen gilt es die im Folgenden beschriebenen Aspekte zu beachten.

Neben dem Einfluss unterschiedlicher HL-LED-Typen mit ihren unterschiedlichen Emissionsspektren auf die Morphologie und die Physiologie von Pflanzen (siehe Kapitel 6.3), hat die **Auswahl der HL-LEDs** einen Einfluss auf die Energieeffizienz eines HL-LED-Belichtungssystems auf Grund der möglichen Unterschiede bei der Photosynthetischen Photonenflussausbeute einzelner HL-LED-Typen (siehe Kapitel 6.2.2). Im vorliegenden Fall wurde für die Umsetzung eines HL-LED-Belichtungssystems zur Effizienzsteigerung trotz einer eventuell positiven Wirkung grüner HL-LEDs auf deren Verwendung verzichtet, da diese mit ihrer geringen Photosynthetischen Photonenflussausbeute keinen positiven Beitrag zur Effizienzsteigerung des Belichtungssystems beigetragen hätten, obwohl teilweise auch ein positiver Effekt zusätzlicher grüner Strahlung auf das Pflanzenwachstum beobachtet werden konnte (Folta, 2004; Sommer und Franke, 2006). Momentan ist es noch schwieriger grüne HL-LEDs mit einem hohen Wirkungsgrad zu produzieren als rote oder blaue HL-LEDs (<http://www.led-professional.com/technology/light-generation/new-method-for-manufacturing-the-elusive-green-led-with-higher-efficacy>, Stand 28.04.2011). Ähnliche Probleme wie bei den grünen HL-LEDs gibt es derzeit auch noch bei der Produktion von dunkelroten HL-LEDs, weshalb auch diese für ein effizientes Belichtungssystem nicht in Frage kommen. Mit dem Einsatz kaltweißer HL-LEDs wurde die Strahlung im Wellenlängenbereich des grünen Lichts mit in die Untersuchungen einbezogen. Die Kombination aus roten und kaltweißen HL-LEDs deckt die Strahlung im blauen und roten Wellenlängenbereich ebenso ab wie die dazwischen liegenden Wellenlängenbereiche. Für viele Pflanzenarten, zum Beispiel *Tripterospermum japonicum* und *Fragaria x ananassa* cv. `Aikihime (Moon et al., 2006), *Musa* ssp. (Nuth et al., 2003b) und *Spathiphyllum wallisii* (Nuth et al., 2005) ist ein Verhältnis aus roter und blauer Strahlung untersucht worden, welches meist einen höheren Anteil roter Strahlung beinhaltet (siehe Kapitel 6.3). Auf Grund der aus diesen Versuchen hervorgegangenen positiven Ergebnisse wurden auch in dieser Arbeit verschiedene PPFD-Verhältnisse zwischen Rot und Blau untersucht.

Der effiziente Einsatz von HL-LED-Belichtungssystemen folgt den bereits in Kapitel 6.1.1 beschriebenen Zusammenhängen zwischen Stromstärke und Photosynthetischer Photonenflussausbeute der einzelnen HL-LEDs. Eine Erhöhung der **durchschnittlichen PPFD (PPFD₀)** auf der zu belichtenden Fläche in einer Regaletage erfordert eine Erhöhung des Photonenflusses der einzelnen HL-LEDs des Belichtungssystems, was in diesem Fall mit einer Erhöhung der Betriebsstromstärke einhergeht. Die Erhöhung der Betriebsstromstärke führt zu einer Verringerung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute der einzelnen HL-LEDs und somit auch zu einer Verringerung der Energieeffizienz des gesamten HL-LED-

Belichtungssystems. Je niedriger die benötigte $PPFD_{\emptyset}$ zur Belichtung der Kulturen ist, desto höher wird die Energieeffizienz eines HL-LED-Belichtungssystems sein.

Für den Einsatz einer HL-LED-Belichtung in der In-vitro-Kultur ist es vorteilhaft, dass meist eine sehr niedrige, jedoch artspezifische $PPFD$ zwischen $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ausreicht, um die In-vitro-Kulturen optimal zu belichten. Einige Gehölze benötigen, entgegen den allgemein empfohlenen, niedrigen Werte in der In-vitro-Kultur, eine höhere $PPFD$ zwischen $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Die Angaben sind ebenfalls artspezifisch und können abhängig von der Wachstumsphase sein (George et al., 2008; Jo et al., 2008; Pierik, 1997). Mit dem in dieser Arbeit beschriebenen HL-LED-Belichtungssystem würde die Energieeffizienz bei einer solch hohen $PPFD$ stark verringert, da das System für eine $PPFD_{\emptyset}$ bis etwa $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ausgelegt wurde.

LEDs bieten den Vorteil, dass die benötigten Belichtungsstärken erreicht werden können ohne die Pflanze durch zu hohe, durch den LED-Betrieb bedingte Wärmestrahlung einem Stress auszusetzen oder Beschädigungen an der Pflanze zu verursachen (Morrow, 2008). Dies macht zusammen mit der geringeren Höhe des HL-LED-Belichtungssystems gegenüber dem in dieser Arbeit verglichenen Belichtungssystem mit Leuchtstofflampen, eine Verringerung des **Etagenabstandes** möglich. Begünstigt wird die geringere Höhe des Belichtungssystems durch die sehr kleine Bauform der LEDs, was eine kompakte Bauweise einer Leuchte erlaubt (Wu et al., 2003; Barta et al., 1992; Bula et al., 1991). Die Verringerung des Etagenabstandes führt bei gleicher $PPFD_{\emptyset}$ zu einer Steigerung der Energieeffizienz des HL-LED-Belichtungssystems. Für die gleiche $PPFD_{\emptyset}$ wird eine niedrigere elektrische Leistung der HL-LEDs benötigt, bei der diese mit geringerer Stromstärke betrieben werden und eine höhere Photosynthetische Photonenflussausbeute aufweisen.

Nach dieser Überlegung hätte bei den Messungen zur Bestimmung der Energieeffizienz des Belichtungssystems bei variierendem Etagenabstand (siehe Abb. 5.2.8) die Variante RW 5:5 ähnlich hohe Werte aufweisen müssen wie die anderen beiden Varianten (RB 7:3, RB 3:7). Berechnungen auf Grundlage von Messungen der Betriebsstromstärke der HL-LEDs eines HL-LED-Typs des Belichtungssystems in Abhängigkeit der $PPFD_{\emptyset}$ (Kapitel 5.2.4) und der sich daraus ergebenden Wirkungsgrade der HL-LEDs während der Versuchseinstellungen mit Hilfe der Ergebnisse aus Kapitel 5.1.2.1 bestätigen diese Annahme. Der Fehler kann auf Ungenauigkeiten der Strommessung oder wahrscheinlich auf unpräzise und damit unterschiedliche Einstellungen der $PPFD_{\emptyset}$ zurückzuführen sein, die ausschlaggebend für die Berechnung der Energieeffizienz sind.

Die Verringerung des Abstandes führt, neben der Erhöhung der Energieeffizienz und des daraus resultierenden geringeren Stromverbrauchs des Belichtungssystems, auch zu einer Erhöhung der **Raumausnutzung**. In einem Regal mit zehn Etagen und einem Etagenabstand von 300 mm kann die Raumausnutzung bei Verringerung des Etagenabstandes auf 200 mm um 50 % gesteigert werden.

Bei einem Etagenabstand von 180 mm kann die Energieeffizienz der HL-LED-Belichtungssysteme mit einer maximalen $PPFD_{\emptyset}$ von $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gegenüber einem Belichtungssystem mit Leuchtstofflampen verdoppelt bis verdreifacht werden (Abb. 5.2.8). Bei der Annahme eines Wirkungsgrades von 25 % beider Belichtungssysteme ist die abgegebene Wärmemenge durch die HL-LED-Belichtungssysteme bei 180 mm Etagenabstand und $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ trotzdem niedriger als die der Leuchtstofflampensysteme bei 300 mm. Ist ein Kulturraum mit einer Kühlanlage für ein Leuchtstofflampensystem, wie sie in dieser Arbeit beschrieben und mit dem HL-LED-Belichtungssystemen verglichen wurden, ausgelegt, kann die Raumausnutzung ohne zusätzlich benötigte Kühlleistung erhöht werden.

Bei der Optimierung hinsichtlich der Raumausnutzung sollte nicht nur die Verringerung der Energieeffizienz beachtet werden, sondern es sollte ebenso die Handhabung bei der Kultivierung berücksichtigt werden. Ein zu geringer Etagenabstand führt dazu, dass das Herausnehmen einzelner Becher aus den Regaletagen zum Beispiel zur Bonitur erschwert wird und deshalb als unpraktisch empfunden werden kann. In der Praxis ist für jeden Einzelfall zu prüfen, welcher minimale Etagenabstand für die Handhabbarkeit der Kulturen nötig ist.

Eine gleichmäßige **PPFD-Verteilung** ist eine wichtige Anforderung an ein Belichtungssystem, um die Pflanzen homogen zu belichten und einheitliche Pflanzen auf der gesamten Fläche zu erzeugen. Dies muss besonders bei der Verringerung des Etagenabstandes beachtet werden.

Leuchtstofflampen in Stabform belichten die Etagenfläche eines Regals nicht gleichmäßig und weisen erhebliche Unterschiede der $PPFD$ zwischen dem zentralen und dem Randbereich auf. Ein ähnlich inhomogenes Verteilungsmuster einer Leuchtstofflampenbelichtung wie in dieser Arbeit dargestellt (Abb. 5.2.5) wurde auch bei einer Belichtung einer Regaletagenfläche (130 mm * 90 mm) mit zwei Leuchtstofflampen (Philips TLD 36W; Länge: 120 mm) festgestellt. Dabei lag die $PPFD_{\emptyset}$ bei $32,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und der Etagenabstand bei 350 mm. Die $PPFD$ sank von über $45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ im zentralen Bereich bis unter $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in den Randbereichen (Chen, 2005).

Mit einem HL-LED-Belichtungssystem kann, durch die Möglichkeit der Anordnung der einzelnen HL-LEDs über die gesamte Fläche, eine gleichmäßigere PPF_D-Verteilung erzielt werden als mit einem einfachen LSL-Belichtungssystem. Die Verringerung des Etagenabstandes kann bei einem bestehenden HL-LED-Belichtungssystem nur unter Berücksichtigung des PPF_D-Verteilungsmusters erfolgen. Die Untersuchungen zeigten eine Abnahme der homogenen PPF_D-Verteilung mit Verringerung des Etagenabstandes. Mit dem hier untersuchten HL-LED-Belichtungssystem (24 HL-LEDs pro HL-LED-Typ und Belichtungssystem) kann bis zu einem Etagenabstand von etwa 210 mm eine gleichmäßigere PPF_D-Verteilung im Vergleich zu einfachen LSL-Belichtungssystemen erreicht werden. Eine höhere Homogenität der PPF_D auf der zu belichtenden Fläche könnte bei geringeren Etagenabständen mit einer Erhöhung der HL-LED-Anzahl, was bei gleichbleibender PPF_D nicht zu einer Erhöhung der benötigten elektrischen Leistung führt (siehe nächster Abschnitt), erreicht werden. In Bezug auf die PPF_D-Verteilung gilt gleiches natürlich auch für LSL-Belichtungssysteme. Bedingt durch die unterschiedliche Ansteuerung der verschiedenen Leuchtmittel ist bei einer Leuchtstofflampenbelichtung nicht von einer gleichbleibenden benötigten elektrischen Leistung auszugehen, sondern von einer Steigerung.

Eine Steigerung der **HL-LED-Dichte** in einem Belichtungssystem bringt mehrere Vorteile mit sich. Wird von einer gleichbleibenden benötigten PPF_D und gleichem Etagenabstand ausgegangen, verringert sich die benötigte Betriebsstromstärke der HL-LEDs in einem Belichtungssystem, wodurch die Photosynthetische Photonenflussausbeute und somit die Energieeffizienz des gesamten HL-LED-Belichtungssystems gesteigert wird. Die gesteigerte Photosynthetische Photonenflussausbeute geht mit einem Anstieg des Wirkungsgrades einher, der zu einer Verringerung der Verlustleistung führt. Bei sonst gleichen Bedingungen im Kulturraum kann dann bei dem in dieser Arbeit vorgestellten HL-LED-Belichtungssystem von einer Verringerung der Sperrschichttemperatur ausgegangen werden, die zusätzlich zu einer Steigerung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute der HL-LEDs führt. Dabei sollte beachtet werden, dass die Vergrößerung des Belichtungssystems nicht zu einem erhöhten Platzbedarf führt, damit eine vertikale Luftbewegung in den Regalsystemen des Kulturraums nicht erschwert wird.

Eine gute Wärmeabfuhr, also ein gutes **Temperaturmanagement**, ist notwendig für den effizienten Einsatz von HL-LED-Belichtungssystemen, da eine Steigerung der Sperrschichttemperatur der HL-LEDs zu einer Verringerung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute und des Wirkungsgrades der HL-LEDs führt. Durch die meist geringe, benötigte PPF_D zur Belichtung von In-vitro-Kulturen (siehe Kapitel 6.3) und ein möglicher

Betrieb der HL-LEDs bei geringen Stromstärken und einer damit verbundenen geringen Wärmeentwicklung im Vergleich zum Betrieb der HL-LEDs mit hohen Stromstärken, kann von einer aktiven Kühlung abgesehen werden. Der Einsatz von Kühlprofilen (Aluminiumprofile) kann eine ausreichende Übertragung der Verlustleistung (Wärme), die von den HL-LEDs ausgeht, durch Konvektion an die Luft sicherstellen. Neben der Gewährleistung einer optimalen Photosynthetischen Photonenflussausbeute durch eine ausreichende Kühlung der HL-LEDs ist die niedrige Sperrschichttemperatur eine wichtige Voraussetzung für eine lange Lebensdauer der HL-LEDs (siehe Kapitel 6.2.3).

Mit steigender Betriebsstromstärke und Sperrschichttemperatur verringert sich die Photosynthetische Photonenflussausbeute der HL-LEDs wie die in Kapitel 5.1.2 dargestellten Ergebnisse zeigten. Ein verstärkter negativer Effekt auf die Energieeffizienz eines HL-LED-Belichtungssystems kann bei einer Erhöhung der Betriebsstromstärke und gleichzeitig unzureichender Kühlung der HL-LEDs erwartet werden. Dabei würde die Energieeffizienz des Belichtungssystems unter ungünstigen Bedingungen einerseits durch den Betrieb der HL-LEDs mit höheren Stromstärken verringert werden, andererseits auch durch die Erhöhung der Sperrschichttemperatur. Dies bestätigten auch nicht dargestellte Ergebnisse der HL-LED-Messungen, bei denen die Betriebsstromstärke ohne eingeschaltete Kühlung erhöht wurde.

Unter Beachtung günstiger Betriebsbedingungen des HL-LED-Belichtungssystems ist, neben dem direkten Effekt auf den Wirkungsgrad der HL-LEDs durch eine geringe Wärmeabgabe, wie auch bei dem Betrieb einzelner HL-LEDs ein indirekter Effekt zu erwarten, bei dem die benötigte Leistung für die Kühlung des Kulturraums reduziert wird (Taguchi, 2008). Dieser Effekt wurde bereits in Kapitel 6.2.2 für die einzelnen HL-LEDs beschrieben und lässt sich auf ein Belichtungssystem in einem Kulturraum übertragen.

Bei einem konstanten Betrieb der HL-LEDs und einer ausreichend dimensionierten Fläche für die Übertragung der durch die HL-LEDs produzierten überschüssigen Verlustleistung über Konvektion an die Raumluft, kann auch bei veränderter Raumlufttemperatureinstellung von einem stabilen Strahlungsspektrum der HL-LEDs ausgegangen werden. Eine ausschlaggebende **Veränderung des Strahlungsspektrums** ist auch bei einer geringen Änderung der Raumtemperatur nicht zu erwarten, auch wenn dadurch die Sperrschichttemperatur leicht angehoben wird (siehe Kapitel 6.2.2). Selbst ein von Sutton (2001) beschriebener starker Einfluss der steigenden Sperrschichttemperatur auf die Peakwellenlängen der HL-LEDs von $0,1 \text{ nm K}^{-1}$ bis $0,3 \text{ nm K}^{-1}$ kann bei einer Raumtemperaturänderung von zum Beispiel 10 °C auf 30 °C eine maximale Verschiebung der Peakwellenlänge von 6 nm ausmachen und somit bei

der Kultivierung von Pflanzen in der In-vitro-Kultur vernachlässigt werden. Gleiches gilt für die spektrale Änderung durch eine unterschiedliche Betriebsstromstärke. Bei den in dieser Arbeit charakterisierten HL-LEDs führte eine Änderung der Betriebsstromstärke zu einer maximalen Verschiebung der Peakwellenlänge von weniger als 5 nm. Für eine wissenschaftliche Untersuchung, zum Beispiel von genauen Berechnungen der Photoneneffizienz, kann je nach Anwendung auch eine geringe Abweichung der Peakwellenlänge eine Änderung der Ergebnisse zur Folge haben. Je nach Anwendung oder Einsatzgebiet der LEDs sind äußerst stabile Betriebszustände eine wichtige Voraussetzung für eine Fehlerminimierung bei der Versuchsdurchführung.

HL-LEDs bieten gegenüber anderen Leuchtmitteln den enormen Vorteil, dass das Emissionsspektrum, durch die Zusammenstellung unterschiedlicher LEDs, zum Beispiel an die Absorption der pflanzlichen Photorezeptoren und an die Pflanzenbedürfnisse, hinsichtlich eines optimalen Wachstums angepasst werden kann (Bula et al., 1991; Barta et al., 1992; Nhut und Nam, 2010). Die **dynamischen Einstellmöglichkeiten der Strahlungsqualitäten** durch eine entsprechende Ansteuerung der LEDs können auch für bestimmte Kulturprotokolle mit unterschiedlichen Anforderungen an die Strahlungsqualität zum Beispiel während der Bewurzelungs-, Wachstums- und Vermehrungsphase genutzt werden (Morrow, 2008). Für einen universellen Einsatz in der In-vitro-Kultur ist es deshalb wichtig die einzelnen HL-LED-Typen separat ansteuern zu können.

Die **HL-LED-Steuerung** trägt zu der gesamten Energieeffizienz eines HL-LED-Belichtungssystems bei. Deshalb ist es wichtig auf hohe Wirkungsgrade einzelner Komponenten der HL-LED-Steuerung zu achten, weshalb ein Ringkerntransformator verwendet wurde. Auch durch den geringen Durchgangswiderstand des MOSFETs von 0,001 Ω hat dieses Bauteil einen sehr geringen Wirkungsgradverlust und beeinflusst so kaum den gesamten Wirkungsgrad der HL-LED-Steuerung.

In der Industrie ist der Einsatz eines PWM-Signals für die Dimmung von LEDs weit verbreitet, da die LEDs dann wegen des linearen Zusammenhangs zwischen Lichtstrom und des Tastgrades des PWM-Signals stufenlos dimmbar sind. Mit einer Dimmung über PWM sind LEDs meist stabiler in Hinblick auf die spektrale Veränderung und den Wirkungsgrad. Die HL-LEDs wurden bei dem in dieser Arbeit beschriebenen HL-LED-Belichtungssystem nicht direkt über eine mögliche Pulsweitenmodulation (PWM) gesteuert, da bei dieser Art der Ansteuerung Verluste bei der Photosynthetischen Photonenflussausbeute und dem Wirkungsgrad gegenüber einer Regulierung der Betriebsstromstärke zur Veränderung des Photonenflusses zu erwarten

waren (Gu et al., 2006). Nach Morrow (2008) kann die Ansteuerung der LEDs generell gut in digitale Steuersysteme integriert werden.

Eine annähernd stufenlose Dimmung war auch mit der in dieser Arbeit beschriebenen HL-LED-Steuerung möglich. Auf der zu belichtenden Fläche im Abstand von 300 mm lagen die Schrittweiten etwa bei einer PPF_D von $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, weshalb von einer annähernd stufenlosen Dimmung gesprochen werden kann. Die Betriebsstromstärke der HL-LEDs wurde bei konstanter Spannung, welche durch eine Konstantspannungsquelle gewährleistet wurde, reguliert. Dies hat gegenüber der Regelung der Spannung bei konstanter Betriebsstromstärke den Vorteil, dass die Photosynthetische Photonenflussausbeute und der Wirkungsgrad der HL-LEDs bei Verringerung der PPF_D durch die Dimmung mit sinkender Stromstärke abnehmen.

Im Gegensatz zu den HL-LED-Belichtungsvarianten führt die Dimmung der Leuchtstofflampenbelichtungssysteme zu einer Verschlechterung der Energieeffizienz des Belichtungssystems. Als Grund dafür kommt das dimmbare elektronische Vorschaltgerät in Frage. Diese Aussage lässt sich aber nicht für alle dimmbaren Vorschaltgeräte verallgemeinern. Wird die Energieeffizienzverschlechterung durch die Dimmung generell angenommen, ist der Einsatz von LSL-Belichtungssystemen für eine niedrige PPF_D auf der zu belichtenden Fläche nicht zu empfehlen. Dabei wird für die Lagerung einiger In-vitro-Kulturen von einer optimalen PPF_D zwischen $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ berichtet (Pierik, 1997; Kubota und Kozai, 1995). Bei einer solch niedrigen PPF_D bietet ein HL-LED-Belichtungssystem im Vergleich zum Leuchtstofflampenbelichtungssystem den Vorteil, dass mit der Dimmung die Energieeffizienz des Belichtungssystems erhöht wird.

6.3 Pflanzenbauliche Bewertung einer LED-Belichtung

Die **Beeinflussung der Morphologie und Physiologie von Pflanzen** durch bestimmte Strahlungsspektren ist bereits seit längerem Bestandteil von Untersuchungen. Dabei wurden LEDs bereits ab Ende der 80er Jahre als Alternative für andere Leuchtmittel zur Assimilationsbelichtung, also für eine mögliche Pflanzenproduktion getestet (zum Beispiel Wheeler und Tibbitts, 1987; Barta et al., 1991; Bula et al., 1991). Das Emissionsspektrum kann, durch die Zusammenstellung unterschiedlicher LEDs, zum Beispiel an die Absorption der pflanzlichen Photorezeptoren und an die Pflanzenbedürfnisse hinsichtlich eines optimalen Wachstums angepasst werden. Die dynamischen Einstellmöglichkeiten der Strahlungsqualitäten können auch für bestimmte Kulturprotokolle mit unterschiedlichen Anforderungen an die Strahlungsqualität während der Bewurzelungs-, Wachstums- und Vermehrungsphase genutzt

werden (Nuht und Nam, 2010; Morrow, 2008). Dabei werden einzelne HL-LED-Typen, sowie die Zusammensetzung mehrerer HL-LED-Typen zur Kombination unterschiedlicher Wellenlängenbereiche verwendet. Viele Studien haben sich mit der Bestimmung physiologischer und morphologischer Effekte durch unterschiedliche Strahlungsqualitäten beschäftigt. Dabei variieren die Reaktionen je nach Pflanzenart. Ein bestimmter Effekt einer Strahlungsqualität kann nicht einheitlich für die bisher untersuchten Pflanzenarten quantifiziert werden. Das optimale Verhältnis zum Beispiel von roten und blauen LEDs für das Pflanzenwachstum variiert zwischen den unterschiedlichen Pflanzenarten (Nhut und Nam, 2010; Nhut et al., 2006). Daher ist es notwendig, ein geeignetes LED-Belichtungssystem an verschiedene Zielsetzungen anpassen zu können. Die Anpassung kann je nach Ziel, zum Beispiel Förderung oder Hemmung des Spross- und Wurzelwachstums, längere oder kürzere Internodien, etc., unterschiedlich ausfallen (Poudel et al., 2008). Dies wurde beim Bau einer wissenschaftlichen Versuchsanlage berücksichtigt, indem die Strahlungsintensität der drei unterschiedlichen HL-LEDs variabel einstellbar waren und somit im Rahmen der verwendeten HL-LED-Typen unterschiedliche Strahlungsqualitäten erzielt werden konnten.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche weisen nicht nur auf eine **pflanzenartspezifische Reaktion** von In-vitro-Kulturen hin, sondern auch auf eine sortenspezifische Reaktion, wie es am Beispiel der *Phalaenopsis*-Hybriden, von *Kalmia latifolia* und von *Helleborus niger* aufgezeigt werden konnte. Eine Verallgemeinerung eines optimalen Emissionsspektrums durch Einsatz eines LED-Belichtungssystems ist deshalb bisher nicht möglich. Dies untermauert die Aussage von Poudel et al. (2008) ein geeignetes LED-Belichtungssystem an unterschiedliche Ziele anzupassen. Somit scheint es in der In-vitro-Kultur notwendig für jede Pflanzenart und eventuell auch für die einzelnen Sorten eine optimale Strahlungsqualität zu ermitteln und im Fall einer LED-Belichtung der Pflanzen diese dementsprechend in das Kulturprogramm mit aufzunehmen.

Es konnten bei den Versuchen starke Schwankungen der Ergebnisse zwischen den Kulturpassagen einer Kultur beobachtet werden. Dabei ist es schwer diese Heterogenität der Pflanzenreaktionen auf die unterschiedlichen Strahlungsqualitäten zurückzuführen (siehe Kapitel 6.1.3).

6.3.1 Strahlungsqualität

Die Auswahl geeigneter Strahlungsqualitäten bei den Versuchen fand unter anderem unter Berücksichtigung der Absorption des Chlorophylls statt. Diese weist eine starke Absorption der

Strahlung im roten Wellenlängenbereich gegenüber der Strahlung im blauen Bereich auf. Im grün-gelben Wellenlängenbereich ist nur eine sehr geringe Absorption vorhanden (Raven, 2000). Oft wurde sich an dieser Chlorophyllabsorptionskurve für ein geeignetes Rot-Blau-Verhältnis bei der Umsetzung eines LED-Belichtungssystems orientiert und ein höherer Rotanteil bei der Pflanzenbelichtung gewählt (zum Beispiel Wongnok et al., 2008; Moon et al., 2006; Nhut et al., 2006). Die Kombination von roten und blauen LEDs mit einem höheren Blauanteil spielt in der Literatur weniger eine Rolle ist aber gerade wegen des Einflusses der unterschiedlichen Wellenlängenbereiche auf die Sprossstreckung interessant (siehe unten).

Viele Untersuchungen an Algensuspensionen, die einen niedrigen Chlorophyllgehalt aufwiesen, zeigten deutlich, dass das Wirkungsspektrum der Photosynthese im grünen Wellenlängenbereich niedriger war als im blauen oder roten Bereich. Daraus entstand die Ansicht, dass grüne Strahlung nicht wichtig für die Photosynthese und somit nicht wichtig für die Pflanzenentwicklung ist. Dabei kann es in höheren Pflanzen genutzt werden und stellt eine wichtige Energiequelle dar, was anhand von Absorptionskurven verschiedener Pflanzenarten dargestellt wurde (Inada, 1976). So können die Blätter von Pflanzen auch im grünen Wellenlängenbereich Strahlung mit unterschiedlicher Stärke absorbieren (Abb. 6.3.1).

Die Relevanz der grünen Strahlung für die Pflanzen wurde dadurch bestärkt, dass Pflanzen Umgebungen mit erhöhtem Anteil grüner Strahlung ausgesetzt sein können. Besonders Pflanzen, die unter einem Baumkronendach wachsen, sind einem, gegenüber dem ungefilterten Strahlungsspektrum der auf die Erde einfallenden Sonnenstrahlen, veränderten Strahlungsspektrum ausgesetzt. Die Beschattung durch das Baumkronendach führt zu einer insgesamt geringeren PPFD, einer Verlagerung des Strahlungsspektrums in das Dunkelrote und das NIR sowie einem erhöhten Grünanteil im Vergleich zum Anteil an roter und blauer Strahlung (Folta und Maruhnich, 2007).

Die Bedeutung von Wellenlängen im grünen Bereich des Strahlungsspektrums für die Entwicklung und das Wachstum von Pflanzen ist unumstritten. Die hervorgerufenen Reaktionen können dabei cryptochromabhängig, oder auf ein bisher nicht identifiziertes Sensorsystem (Grünrezeptoren), also auf cryptochromunabhängige Reaktionen, zurückzuführen sein (Golovatskaya, 2005; Folta und Maruhnich, 2007). Ungeachtet der möglichen Relevanz der Strahlung im Wellenlängenbereich des grünen Lichts wurde eine weiterentwickelte wissenschaftliche Versuchsanlage ohne grüne HL-LEDs fertig gestellt, da diese auf Grund ihrer geringen Photosynthetischen Photonenflussausbeute für ein Belichtungssystem zur Energieeffizienzsteigerung nicht in Frage kamen (siehe Kapitel 6.2.2). Für die Strahlenemission

im grünen Wellenlängenbereich wurden kaltweiße HL-LEDs verwendet, welche neben einem Maximum im blauen Wellenlängenbereich auch eines im grünen Wellenlängenbereich aufweisen (Abb. 5.1.1). Von einer reinen kaltweißen HL-LED-Variante wurde auf Grund der geringen emittierten Strahlung im roten Wellenlängenbereich abgesehen, um den Pflanzen ein breiteres Strahlungsspektrum bieten zu können.

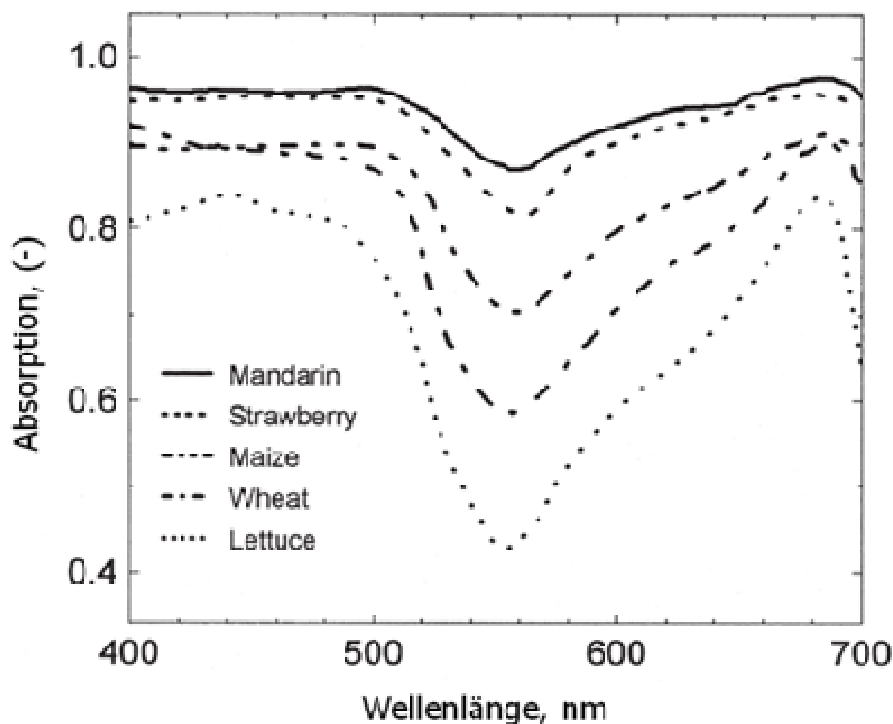


Abb. 6.3.1 Absorptionsspektren der Blätter von fünf unterschiedlichen Pflanzen. Die Abbildung ist übernommen von Inada (1976).

6.3.1.1 Kombination roter und blauer LEDs

Die Kombination aus roten und blauen LEDs hat oft Verwendung in Versuchen gefunden (siehe unten) und wurde auch hier als Variante mit eingebracht, wobei gerade bei schnellwachsenden Pflanzenarten mit starkem Streckungswachstum eine geringere Streckung bei einem steigendem Blauanteil erwartet wurde, wie sie für eine rein blaue Belichtung zum Teil beschrieben wurde (Kurilcik et al., 2008; Appelgren, 1991).

Ein **erhöhter Rotanteil** bei der Kombination aus roten und blauen LEDs wurde für das Wachstum von *Phalaenopsis amabilis* und *P. Hybriden* als günstig beschrieben. Als optimales Verhältnis von roten und blauen LEDs zur Pflanzenbelichtung stellte Nhut et al. (2006) die LED-Variante mit einem PPFD-Verhältnis roter gegenüber blauer LEDs von 8:2 dar (RB 8:2). Die

höchste Anzahl an Seitentrieben von *P.*-Hybriden wurde hingegen in der Variante RB 9:1 erzielt (Wongnok et al., 2008). Hohe Frischmassezuwächse innerhalb einer acht wöchigen Kulturpassage konnten auch in dieser Arbeit bei *P.*-Hybriden in der Variante RB 7:3 beobachtet werden, allerdings ohne gleichzeitig auftretende erhöhte Vermehrungsraten im Vergleich zur Leuchtstofflampenbelichtung. Der erwünschte Effekt eines reduzierten Streckungswachstum wurde in diese Variante bei *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' erzielt, ohne eine Verringerung der Vermehrungsrate oder des Frischmassezuwachses zu verursachen.

Eine von Zhang und Leung (2000, 2002) beschriebene Steuerung der in vitro induzierten Blüten bei *Gentiana triflora* Pall. var. *Axillariflora* konnte für die in dieser Arbeit untersuchte *Gentiana*-Art nicht auf die unterschiedlichen Strahlungsqualitäten zurückgeführt werden (Ergebnisse nicht dargestellt).

Ein höherer Anteil an Strahlung im roten Wellenlängenbereich gegenüber der im blauen zeigte ebenfalls gute Erfolge bei der Kultivierung von *Tripterospermum japonicum* und bei *Fragaria* × *ananassa* cv. 'Aikihime'. Im Vergleich zur LSL und anderen LED-Varianten konnte für diese In-vitro-Kulturen ein optimales Wachstum bei RB 7:3 festgestellt werden. Bei *Tripterospermum japonicum* machte sich dies durch maximal erzielte Bewurzelungsraten, Frischmassegewichte und Chlorophyllgehalte bemerkbar (Moon et al., 2006). Bei Bananenpflanzen (*Musa* ssp.) erwies sich ein Rot-Blau Verhältnis von 8:2 als optimal für die In-vitro-Kultivierung. Hierbei wurde das höchste Spross- und Wurzelgewicht bei einer PPFD von $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gebildet (Nhut et al., 2003b). Ähnliche Ergebnisse erhielten Nhut et al. (2005) bei in vitro kultivierten *Spathiphyllum wallisii*.

Einzelne LED-Typen brachten meist keine Vorteile gegenüber einer konventionellen Belichtung. Bei Versuchen mit *Phalaenopsis amabilis* konnten bei einer Energiesparlampenbelichtung die qualitativ besten Pflanzen im Vergleich zu farbigen Energiesparlampen, einer Leuchtstofflampe sowie nur roten oder nur blauen LEDs produziert werden. Die Belichtung mit roten LEDs und roter Energiesparlampe führte zu einer erhöhten Blattlänge (Nhut et al., 2006). Unter anderem untermauert dies die Verwendung von Kombinationen unterschiedlicher HL-LED-Typen, um ähnliche oder bessere Ergebnisse gegenüber konventionell eingesetzten Leuchtmitteln zu erzielen. Dies zeigte sich auch bei der Biomasseproduktion von unterschiedlichen Reissorten, welche durch RB 8:2 gegenüber monochromatischer roter Belichtung gesteigert wurde. Gleiche Bedingungen führten auch zu einer höheren Photosyntheserate, die mit einem höheren Stickstoffgehalt in den Blättern assoziiert werden konnte. Diese Ergebnisse weisen darauf hin,

dass durch zusätzliche blaue Strahlung die Photosynthese erhöht wird (Ohashi-Kaneko et al., 2006; Matsuda et al., 2004).

Die Veränderung des RB-Verhältnisses hatte einen erheblichen Einfluss auf das **Streckungswachstum** bei *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' und *Canna indicirca*. Bei *Kalmia latifolia* 'Corona' war diese Tendenz ebenfalls zu erkennen. Mit zunehmendem Blauanteil nahm die Streckung der Pflanzen ab, was sich nach der achtwöchigen Kulturpassage in einer geringeren Pflanzenhöhe äußerte. Für eine optimale Pflanzenhöhe muss auch die Bearbeitbarkeit der Pflanzen beachtet werden, welche mit der kulturabhängigen Verringerung der Internodienlänge ab einem gewissen Abstand zwischen den Nodien erschwert wird.

Eine erhöhte Streckung des Sprosses durch eine rein hellrote Belichtung konnte bei vielen Pflanzenarten festgestellt werden, darunter auch *Lactuca sativa* (Yanagi et al., 1996), *Solanum lycopersicum* (Aksenova et al., 1994), *Euphorbia millii* (Dewir et al., 2006), *Rehmannia glutinosa* (Hahn et al., 2000) und *Pelargonium x hortorum* 'Penny Irene' (Appelgren, 1991). Dabei resultierte nach Kim et al. (2004b) die erhöhte Streckung von *Dendranthema grandiflorum* Kitam 'Cheonsu' in einer Fragilität des Stängels. Die Beobachtung weniger vitaler Pflanzen unter monochromatischer roter Belichtung im Vergleich zu anderen Belichtungsvarianten ist auch bei Salat, Spinat, Radieschen und Pfeffer gemacht worden (Ohashi-Kaneko et al., 2006). Bei der Weinrebe *Vitis ficifolia* var. 'Ganebu' wurde mit einer Belichtung durch ausschließlich roten LEDs (Peak bei 660 nm) eine Internodienstreckung erzielt und somit Pflanzen mit längeren Sprossen im Vergleich zur Kultivierung unter blauen LEDs (Peak bei 480 nm) oder einer für die Pflanzenbelichtung geeigneten Leuchtstofflampe erhalten (Poudel et al., 2008).

Wie die Ergebnisse in Kapitel 5.3 zeigten, scheint der Effekt der Strahlung im roten Wellenlängenbereich auf die Streckung des Sprosses, wie auch die Pflanzenreaktion auf blaue Strahlung, nicht konsistent zu sein. Die hier untersuchten Pflanzenarten zeigten unterschiedliche Reaktionen auf einen höheren Rot- oder Blauanteil (siehe Kapitel 5.3.1). Auch Cheé (1986) berichtete von einer vermehrten Sprossstreckung nicht durch rote sondern durch blaue Belichtung. Es ist anzunehmen, dass die Sprossstreckung durch unterschiedliche synergistische Interaktionen zwischen blau und rot sensitiven Rezeptoren kontrolliert werden kann. Diese sind abhängig von der Pflanzenart, der physiologischen Erkennung der Strahlung und von der durch die Strahlungsqualität beeinflussten photochemischen Reaktionen (Kim et al., 2004a; Wu et al., 2007).

Neben dem Einfluss auf die Sprosstreckung durch die Strahlung im roten Wellenlängenbereich konnte bei den hier untersuchten Kulturen keine auffälligen Reaktionen der Pflanzen auf diesen Wellenlängenbereich beobachtet werden. Jedoch sind neben einer erhöhten Sprosstreckung weitere Pflanzenreaktionen durch rote Belichtung bekannt.

Neben einer höheren **Frischmasse** und längeren Pflanzen kam es bei in vitro kultivierten *Euphorbia millii* zu einer Gewichtsreduktion der Trockenmasse, einer geringeren Blattanzahl und geringeren Blüteninduktion pro Pflanze im Vergleich zur Belichtung mit blauen LEDs und einer LSL-Variante. Desweiteren reduzierte der Einsatz von roten LEDs den Chlorophyll- und Karotinoidgehalt der Blätter (Dewir et al., 2006). Dies könnte sich äußerlich in einer Aufhellung der Pflanzen bemerkbar machen, konnte aber bei den in dieser Arbeit untersuchten Pflanzenarten durch eine LED-Belichtung mit hohem Rotanteil nicht festgestellt werden. Nur bei einer Leuchtstofflampenbelichtung waren die Blätter aufgehellt.

Der Einfluss roter Belichtung auf die **Apikaldominanz** scheint ebenfalls pflanzenartabhängig zu sein. Eine Steigerung der Apikaldominanz durch die Strahlung im roten Wellenlängenbereich wurde zum Beispiel *Vitis*-Hybriden zugesprochen (Chée, 1986), wohingegen bei *Prunus cerasifera* eine Abschwächung der Apikaldominanz und eine Hemmung der Knospenbildung beobachtet wurde, was zu einem verstärkten Austrieb der vorhandenen Knospen führte (Muleo et al., 2001). Bei den in dieser Arbeit untersuchten Kulturen hätte sich in den RB-Varianten mit höherem Rotanteil ein verstärkter Austrieb und somit eine vermehrte Seitensprossenbildung in einer höheren Vermehrungsrate bemerkbar gemacht, welche insgesamt nicht beobachtet werden konnte.

Der Strahlung im Wellenlängenbereich des roten Lichts wurde bereits durch Saebo et al. (1995) eine hohe Bedeutung für die Entwicklung des Photosyntheseapparates und der Akkumulation von Stärke zugesprochen (siehe auch Dewir et al., 2006; Wu et al., 2007). Eine geringe beobachtete Photosyntheseleistung unter roter LED-Belichtung ist auf eine geringere Leitfähigkeit der Stomata zurückzuführen, welche eher durch Strahlen im blauen Wellenlängenbereich kontrolliert und gefördert wird (siehe unten). Weiterhin können die sehr schmalbandigen Emissionsspektren der LEDs bei den roten LEDs zu einem Ungleichgewicht von Photonen für das Photosystem I und Photosystem II (PSII) führen, wodurch sich das Verhältnis des Transportzyklus der gesamten Kettenreaktion ändert und in einer Reduktion der Netto-Photosyntheserate resultieren kann (Nhut und Nam, 2010). Die **maximale PSII Quanteneffizienz** (Q_y_{max}) war generell niedriger als das von Johnsen et al. (1993) beschriebene Maximum von 0,83. Die Effizienz des PSII war zwar geringer, unterschied sich

zwischen den LED-Varianten aber nur unwesentlich. Dabei waren die Werte zum Beispiel vergleichbar mit *Phalaenopsis*-Hybriden, die in der Akklimatisierungsphase 30 Tage unter Lichtstress bei $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ kultiviert wurden (Ali et al., 2005). Nicht gestresste *Phalaenopsis amabilis* zeigten hingegen Werte knapp unter 0,8 und reichten somit an das eben beschriebene Maximum heran (Lin und Hsu, 2004). Werden die eben genannten Werte auf die mit dem Fluoreszenzspektrometer gemessenen Kulturen bezogen, scheinen die in diese Arbeit untersuchten Pflanzen Stress ausgesetzt gewesen zu sein. Der Stress ist auf die für Pflanzen ungünstigen Bedingungen bei einer photomixotrophen In-vitro-Kultivierung zurückzuführen (Desjardins, 2009). Die Messungen spiegelten oft die Ergebnisse der Blattfarbenbonitur wieder, bei der die LSL-Variante durch hellere Blätter auffiel. Bei den Messungen von Q_y_{max} wurden bei der LSL-Variante überwiegend die niedrigsten Werte gemessen. Die Messungen von Q_y_{max} scheint für Pflanzen unter Stressbedingungen geeignet zu sein größere Unterschiede darzustellen, erschien aber nicht sensitiv genug für die geringen Unterschiede, die durch eine LED-Belichtung hervorgerufen werden.

Ein **erhöhter Blauanteil** in einer RB-Variante gegenüber der roten Strahlung führte bei den in dieser Arbeit untersuchten Kulturen, deren Pflanzenhöhe ausgewertet wurde (*Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05', *Canna indica*, *Kalmia latifolia* 'Corona' und *K. latifolia* 'Ginkona'), zu einer **Verringerung des Streckungswachstums**. Die Unterschiede waren bei den LED-Varianten RB 3:7 und RB 1:9 gegenüber den anderen LED-Varianten und einer Leuchtstofflampenbelichtung nur bei *K. latifolia* nicht signifikant aber tendenziell vorhanden, was an den verkürzten Internodien der Pflanzen eindeutig zu erkennen war (Kapitel 5.3.1). Eine gehemmte Hypokotylstreckung wurde als allgemeine Reaktion von Pflanzen auf Strahlung im blauen Wellenlängenbereich bereits beschrieben (Batschauer, 1998, Talbott et al., 2002). In vitro kultivierte *Pelargonium peltatum* und *Chrysanthemum morifolium* Ramat 'Ellen' wiesen eine reduzierte Sprossstreckung auf (Appelgren, 1991; Kurilcik et al., 2008), *Prunus cerasifera* eine erhöhte Sprossverzweigung und Achselknospenbildung wobei allerdings das Austreiben der Knospen gehemmt war (Muleo et al., 2001). Der Anstieg von Sprossbildungen bei den Weinreben-Hybriden (*Vitis*-Hybride 'Remaily Seedless') resultiert offenbar aus einer mit blauer Strahlung induzierten Hemmung der Apikaldominanz. Diese konnte in den hier durchgeführten Versuchen nicht beobachtet werden. Es kam zu keiner vermehrten Sprossbildung durch die Erhöhung des Blauanteils, welche sonst in einer höheren Vermehrungsrate resultiert hätte.

Neben den eben erwähnten Effekten kann die Strahlung im blauen Wellenlängenbereich einen Einfluss auf den **Chlorophyllgehalt** und die **Photosynthesekapazität** haben. Die Belichtung

im blauen Wellenlängenbereich des Strahlungsspektrums ist unter anderem wichtig für die Entwicklung von Chloroplasten und fördert die Bildung photosynthetischer Pigmente, vor allem von Chlorophyll (Senger, 1982; Wu et al., 2007). Einen höheren Chlorophyllgehalt durch eine blaue Belichtung beschrieb Miyashita et al. (1997) generell für Orchideen und Saebo et al. (1995) für die Hängebirke *Betula pendula* 'Roth', bei der auch eine höhere Photosynthesekapazität erzielt wurde. Ein schnellerer Anstieg des Chlorophyllgehalts konnte bei der Erbse *Pisum sativum* im Vergleich von roter oder weißer LED-Belichtung beobachtet werden (Wu et al., 2007). Der Chlorophyllgehalt und Karotinoidgehalt war bei in vitro kultivierten *Euphorbia millii* unter blauen LEDs und einer LSL am höchsten. Auch diese Beobachtung einer erhöhten Photosynthesekapazität scheint nicht auf alle Pflanzenarten zuzutreffen. Entgegen der Beobachtung an der Hängebirke fanden Kim et al. (2004a) eine recht niedrige Photosyntheserate bei in vitro kultivierten Chrysanthemen (*Dendranthema grandiflorum* 'Kitam Cheonsu') unter einer rein blauen LED-Belichtung. Augenscheinlich konnte bei der Bonitur der Grünfärbung der unterschiedlichen Pflanzenarten in dieser Arbeit kein intensiverer Farbton durch eine Erhöhung des Blauanteils beobachtet werden, bei sehr hohem Blauanteil (RB 1:9) sogar eher hellere Blätter, was auf einen geringeren Chlorophyllgehalt hinweisen mag, aber nicht weiter untersucht worden ist. Die maximale PSII Quantenausbeute der Variante RB 1:9 unterschied sich bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen auch nicht von den anderen HL-LED-Varianten. Gegenüber der Leuchtstofflampe waren die Pflanzen, die unter den HL-LED-Varianten kultiviert wurden, dunkler gefärbt. In den HL-LED-Varianten war durch die royalblauen oder die kaltweißen HL-LEDs eine deutliche Strahlungsemission im blauen Wellenlängenbereich mit einem Peak um 450 nm vorhanden. Der Anteil der Strahlungsemission einer kaltweißen Leuchtstofflampe im blauen Wellenlängenbereich ist gegenüber den anderen Wellenlängenbereichen sehr gering. Im Vergleich zu der LSL-Variante scheint die HL-LED-Belichtung eine Förderung der Chloroplastenbildung hervorzurufen, was sich dann in einer stärkeren Färbung äußert. Die schwächere Ausfärbung kann unter anderem auch durch das höhere Streckungswachstum zustande kommen, bei dem das Verhältnis von Chloroplastenanzahl zu der Größe der Palisadenparenchymzellen und der Schwammparenchymzellen der Blätter, welche die Chloroplasten beinhalten, verringert wird.

Eine zu **einseitige Belichtung**, also ein sehr hoher Rotanteil oder ein sehr hoher Blauanteil scheint nicht vorteilhaft für die Morphologie und Physiologie der Pflanzen zu sein. Shin et al. (2008) konnten bei Pflanzen der Gattung *Doritaenopsis* (Orchidaceae) durch den kombinierten Einsatz von roten und blauen LEDs im Verhältnis 1:1 (RB 1:1) eine Erhöhung des Kohlenhydratgehalts und der Biosynthese von Blattpigmenten wie Chlorophyll und Karotinoiden

im Vergleich zu einfarbigen LED-Varianten und einer LSL-Variante feststellen. Auch das Gewicht der Frischmasse von Blatt und Wurzeln sowie die Blattfläche waren nach acht Wochen bei RB 1:1 höher als bei einer rein roten oder blauen Belichtung und auch gegenüber einer Leuchtstofflampenbelichtung. Bei ähnlichen Versuchsanordnungen zeigten sich höhere Photosyntheseraten, Trocken- und Frischgewichte und eine größere Blattfläche bei in vitro kultivierten Chrysanthemen (*Dendranthema grandiflorum* Kitam `Cheonsu`) gegenüber einfarbigen LED-Varianten. Zur Kontrolle mit einer Leuchtstofflampenbelichtung gab es keine signifikanten Unterschiede dieser Parameter und es ergaben sich ebenfalls qualitativ hochwertige Pflanzen ohne fragile Stämme. Entgegen dieser Beobachtungen von Shin et al. (2008) und Kim et al. (2004)b wurden, bei der In-vitro-Kultivierung des Chinesischen Fingerhuts (*Rehmannia glutinosa*) keine Unterschiede in der Sprosslänge, beim Trockengewicht und bei der Netto-Photosyntheserate festgestellt (Hahn et al., 2000).

Neben der Bedeutung der blauen Strahlung für den Photosyntheseapparat ist eine Wirkung auf die **Stomatabewegung**, also das Öffnen und Schließen der Stomata sowie auf die Stomatadichte bekannt (Talbot et al., 2002; Kasahara et al., 2002; Heo et al., 2002). Diese war zum Beispiel bei *Vitis ficifolia* var. `Ganebu` unter einer blauen LED-Belichtung (Peak bei 480 nm), wie auch der Chlorophyllgehalt der Blätter, signifikant höher als bei einer rein roten (Peak bei 660 nm) oder einer Leuchtstofflampenbelichtung (Poudel et al., 2008). Dies bekräftigt wiederum den Einsatz von Farbmischungen zur Pflanzenbelichtung.

6.3.1.2 Kombination roter und kaltweißer HL-LEDs

Das Strahlungsspektrum bei einer Kombination von roten und kaltweißen HL-LEDs erstreckt sich über den Wellenlängenbereich von etwa 410 nm bis 680 nm (Abb. 5.1.1). Dabei wird mit Peaks im blauen, grünen, und roten Wellenlängenbereich Strahlung emittiert. Hingegen weist eine Kombination aus roten und blauen HL-LEDs eine Lücke im grün-gelben Wellenlängenbereich auf. Mit der Kombination aus roten und kaltweißen HL-LEDs deckt das Strahlungsspektrum fast den gesamten Bereich der PAR ab, wodurch auch, wie oben erwähnt, mögliche Wirkungen auf die Pflanze durch Strahlung im grünen Wellenlängenbereich berücksichtigt werden konnten.

Die Reaktion von Pflanzen auf die Belichtung mit grüner Strahlung kann unterschiedlich ausfallen. Es konnte festgestellt werden, dass in-vivo kultivierte Salatpflanzen (*Lactuca sativa*), wenn sie zusätzlich zu dem normalen, vollen Strahlungsspektrum grün-gelber Strahlung ausgesetzt wurden, trotz der dadurch entstehenden höheren PPFD, kürzer waren und weniger Frisch- und Trockenmasse aufwiesen (Dougher und Bugbee, 2001). Andererseits konnte bei

einem Belichtungssystem aus roten und blauen LEDs gezeigt werden, dass ein zusätzlicher Einsatz von grünen LEDs bei Salatpflanzen größere Blätter und eine höhere Trockenmasse hervorrufen kann (Kim et al., 2004a). Brazaityte et al. (2009) konnten ebenfalls, durch den zusätzlichen Einsatz von grünen LEDs (Peak bei 520 nm) zu einem LED-Belichtungssystem aus blauen und verschiedenen roten LEDs, bei Gurken Hybriden `Mandy F1` ein stärkeres Pflanzenwachstum mit längeren Internodien und eine gesteigerte Trockenmasse der Blätter und des Stängels feststellen. In vielen Pflanzenarten (*Lactuca sativa*, *Vicia faba*, *Commelina communis*, *Pisum sativum*, *Nicotiana glauca*, *Arabidopsis thaliana*, *Nicotiana tabacum*, *Allium cepa*, *Hordeum vulgare*), darunter Salat, Leguminosen und andere dikotyle Pflanzen sowie Gräser, konnte eine Umkehr des durch blaue Strahlung oder UV induzierten Öffnens der Stomata mittels grüner Strahlung gezeigt werden (Frenchilla et al., 2000; Talbott et al., 2002; Eisinger et al., 2003; Kim et al., 2004a). In zu Folta (2004) ähnlichen Versuchen konnte eine gesteigerte Biomasseproduktion nach dem Aufkeimen von Karotten- (*Daucus carota*), Radieschen- (*Raphanus sativus*) und Kressesamen (*Lepidium sativum*) aufgezeigt werden (Sommer und Franke, 2006).

Der Effekt einer geringeren Streckung bei Erhöhung des PPF-Danteils der kaltweißen HL-LEDs, also mit einer Erhöhung des Grün- und des Blauanteils gegenüber Rot, konnte in den RW-Varianten ebenfalls nicht beobachtet werden. Die Pflanzen zeigten unter allen RW-Varianten ähnliche Ergebnisse wie sie bei RB-Varianten mit höherem Rotanteil erzielt wurden, was auf eine ähnliche Reaktionsumkehr wie bei dem, durch blaue Strahlung oder UV induzierten, Öffnen der Stomata durch grüne Strahlung hinweisen könnte. Nur bei *Canna indica* konnten die geringsten mittleren Frischmassezuwächse bei den RW-Varianten ermittelt werden, allerdings ohne signifikante Unterschiede zu den anderen LED-Varianten und der LSL-Variante.

Die höchste Vermehrungsrate der Brutzwiebeln von *Lilium orientalis*-Hybriden `Pesaro` wurden in der LSL-Variante im Vergleich zu verschiedenen LED-Varianten erzielt, auch wenn sich die Variante RB 1:1 für ein gutes Wachstum eignete (Lian et al., 2002). Bei den in dieser Arbeit dargestellten Ergebnissen der pflanzenbaulichen Untersuchungen konnten die höchsten mittleren Vermehrungsraten bei der LSL-Variante festgestellt werden, allerdings ohne signifikante Unterschiede zu den LED-Varianten aufzuweisen. Mit Ausnahme der *Phalaenopsis*-Hybriden gilt hier gleiches auch für den Frischmassezuwachs. Bei den Orchideen waren die LED-Varianten oft günstiger in Bezug auf den Frischmassezuwachs, allerdings konnten bei den drei unterschiedlichen Sorten nicht die gleichen LED-Varianten für einen erhöhten Frischmassezuwachs herausgestellt werden.

6.3.2 Strahlungsintensität

Strahlungsquellen, die generell für die Belichtung von Pflanzen eingesetzt werden, sind Leuchtstoffröhren, Metall-Halogen, Natriumdampf-Hochdruck und Glühlampen. Diese Leuchtmittel emittieren Strahlung in Wellenlängenbereichen, die für das Pflanzenwachstum von geringer Qualität sind (Hahn et al., 2000). Bei einer optimalen Ausrichtung der spektralen Emission an die jeweiligen Pflanzenbedürfnisse könnte die Emission überflüssiger Strahlung, auch „wasted light“ genannt, verhindert werden und durch die verminderte **Strahlungsintensität** zu einer weiteren Einsparung an Energie bei der Pflanzenbelichtung beitragen (Morrow, 2008). Anhand der Chlorophyllabsorptionskurven wurde versucht die überflüssige Strahlung zu qualifizieren und die nötige durchschnittliche PPFD ($PPFD_{\emptyset}$) im Vergleich zur sonst konventionell eingesetzten Leuchtstofflampe zu berechnen. Dabei blieb die Strahlung der Leuchtstofflampe im Wellenlängenbereich der durch das Chlorophyll nur sehr gering absorbierten Strahlung unberücksichtigt, woraus sich eine fast 50 %ige Reduzierung der $PPFD_{\emptyset}$ ergab. Dadurch sollten mit einer geeigneten LED-Variante die gleichen Ergebnisse erzielt werden wie mit einer Leuchtstofflampenvariante. Durch die Reduzierung der $PPFD_{\emptyset}$ zur Belichtung von *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05', zweier Sorten von *Helleborus niger* und der *Helleborus* × *ericsmithii*-Hybride 'St. Basilius' konnte diese Annahme jedoch nicht bestätigt werden. Die **Verringerung der durchschnittlichen PPFD** führte in allen HL-LED-Varianten zu niedrigeren Vermehrungsraten und bei *G. cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' zu niedrigeren Frischmassezuwächsen gegenüber der ursprünglich verwendeten $PPFD_{\emptyset}$ bei einer Leuchtstofflampenbelichtung. Die Einteilung in Pflanzenkategorien bei den *Helleborus*-Arten zeigte hingegen, trotz verringerter $PPFD_{\emptyset}$, keine Unterschiede zu der Kultivierung bei einer höheren $PPFD_{\emptyset}$, allerdings konnte die allgemeine Qualität, auch durch die schwächere Grünfärbung der Pflanzen, als niedriger angesehen werden. Der Vergleich der HL-LED-Varianten mit einer Leuchtstofflampenvariante mit ebenfalls verringerter $PPFD_{\emptyset}$ rief bei beiden Versuchskulturen ähnliche Ergebnisse hervor wie sie bereits oben beim Vergleich der Varianten bei höherer $PPFD_{\emptyset}$ beschrieben wurden.

Die Angaben der PPFD zur Belichtung von In-vitro-Kulturen sind meist wesentlich geringer als die angegebene PPFD der jeweiligen in-vivo kultivierten Pflanzen. Sie sind artspezifisch und reichen oft von $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, bei enigne Gehölzenteils bis maximal $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. (George et al., 2008; Jo et al., 2008; Pierik, 1997). Beispielsweise liegen die Angaben für eine optimale PPFD zur Vermehrung von *Phalaenopsis*-Hybriden in der In-vitro-Kultur unter den eben genannten Angaben und sind mit $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sehr

gering (Ali et al., 2005; Nhut et al., 2006). Auch in der natürlichen Umgebung von *Phalaenopsis*-Arten erfolgt neben der Beschattung durch das Blätterdach der Bäume eine weitere Reduzierung der auf die Orchideenblätter einfallenden Strahlung durch die Eigenbeschattung. Ältere Blätter werden schrittweise durch die Bildung jüngerer Blätter beschattet, die sich über den Älteren bilden. Einige Studien berichteten, dass die Photosyntheseleistung von *Phalaenopsis* bei $130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $180 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gesättigt ist und eine Belichtung mit einer PPFD über $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ zu einer signifikanten Photoinhibition führt (Lin und Hsu, 2004).

Speziell für die In-vitro-Kultivierung und Vermehrung von *Kalmia*-Arten wurde das WPM Medium von Lloyd und McCown (1980) entwickelt, welches im Vergleich zu dem MS-Medium weniger Salze enthält. Eine hohe Sprossvermehrung wurde auf diesem Medium bei einer PPFD von $90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nach vier bis sechs Wochen erzielt. Die in dieser Arbeit verwendete geringere PPFD ist auf Aussagen der Firma Bock Bio Science GmbH zurückzuführen. Dabei bleibt zu untersuchen, ob mit einer Steigerung der PPFD bei den *Kalmia*-Kulturen zum Beispiel eine wesentlich höhere Vermehrungsrate hervorrufen kann. Bei Untersuchungen von Hosokawa et al. (1998) wurde die höchste Vermehrungsrate von *Gentiana triflora* x *G. scabra* mit einer PPFD von $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und $20 \text{ }^\circ\text{C}$ Raumtemperatur erreicht. Dagegen beschrieb Morgan et al. (1997) bei den *Gentiana*-Arten (*G. cerina* und *G. corymbifera*) eine optimale PPFD von $32 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, die im Bereich der in dieser Arbeit angewendeten PPFD₀ lag. Die Angaben über eine optimale PPFD sind also nicht konsistent und könnten sich sogar unter den einzelnen LED-Varianten auf Grund der unterschiedlichen Strahlungsspektren unterscheiden.

7 Fazit und Ausblick

Ein Belichtungssystem mit Hochleistungs-LEDs kann im Vergleich zu einem konventionellen Belichtungssystem mit Leuchtstofflampen eine höhere Energieeffizienz bei gleichbleibender Pflanzenqualität erzielen. Dabei ist eine enorme Steigerung der Energieeffizienz unter Berücksichtigung der Etagenabstandverringering gegeben. Die Energieeffizienz kann bei einem reinen Austausch der konventionellen Belichtungssysteme gegen HL-LED-Belichtungssysteme in einem bestehenden Regalsystem von $0,43 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ bei einer einfachen Leuchtstofflampe und $0,68 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ bei einer Leuchtstofflampe mit integriertem Reflektor auf maximal $0,83 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ gesteigert werden. Eine Verringerung des Etagenabstandes von 300 mm auf 210 mm führt zu einer Energieeffizienzsteigerung auf $1,16 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$. Die elektrische Leistung des HL-LED-Belichtungssystems kann gegenüber einer einfachen Leuchtstofflampenbelichtung mit einem Etagenabstand von 300 mm maximal um etwa 60 % verringert werden. Der Wert vermindert sich im Vergleich zu einer Leuchtstofflampenbelichtung mit integriertem Reflektor auf 41,5 %. Bei den, auch durch eine Etagenabstandsverringering hervorgerufenen, veränderten Betriebsbedingungen der HL-LEDs ist nur mit einer minimalen und vernachlässigbaren Veränderung der Strahlungsspektren zu rechnen.

Eine homogene PPF-D-Verteilung auf der zu belichtenden Fläche ist vor allem bei einer Etagenabstandsänderung zu berücksichtigen. Eine Optimierungsmöglichkeit liegt in der Anzahl der in einem Belichtungssystem eingesetzten HL-LEDs (HL-LED-Dichte). Durch eine höhere HL-LED-Dichte kann, bei gleicher durchschnittlicher PPF-D (PPFD_\emptyset), die Energieeffizienz gesteigert sowie die PPF-D-Verteilung homogener gestaltet werden. Dabei verringert sich die Betriebsstromstärke der HL-LEDs, was eine Steigerung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute zur Folge hat und somit zu einer Steigerung der Energieeffizienz des Belichtungssystems führt. Um eine Verringerung der Energieeffizienz eines HL-LED-Belichtungssystems zu verhindern ist ein angepasstes Temperaturmanagement nötig, damit eine möglichst niedrige Sperrschichttemperatur gewährleistet werden kann. Bei einer Kühlung der HL-LEDs über die Konvektion der Luft im Kulturraum wird für eine ausreichende Luftbewegung zwischen den Profilen die HL-LED-Dichte durch die Größe der Kühlprofile begrenzt.

Ist ein Kulturraum mit einer Kühlanlage für ein einfaches Leuchtstofflampenbelichtungssystem, wie es in dieser Arbeit als Vergleichsvariante beschrieben worden ist, ausgelegt, kann im optimalen Fall die Raumausnutzung ohne zusätzlich benötigte Kühlleistung um 50 % erhöht

werden. Mit der durch den HL-LED-Betrieb nötigen Wärmeabfuhr durch die Kühlprofile über die Konvektion der Luft, ist bei Verringerung des Etagenabstandes auf eine ausreichende Luftbewegung in den Etagen zu achten.

Durch eine Anordnung der HL-LEDs über die zur Verfügung stehende Fläche kann auch bei einer Etagenabstandsänderung eine homogenere PPF-D-Verteilung gewährleistet werden. Stabförmige Leuchtmittel wie die Leuchtstofflampe weisen deutlich größere Unterschiede zwischen der PPF-D in zentralen Bereichen als in den Randbereichen der zu belichtenden Fläche auf. Eine ungleichmäßigere PPF-D-Verteilung im Vergleich zu dem in dieser Arbeit konstruierten HL-LED-Belichtungssystem ist auch bei stabförmigen LED-Belichtungssystemen zu erwarten.

Neben einer möglichen unterschiedlichen PPF-D-Verteilung verschiedener LED-Belichtungssysteme ist auch die Vergleichbarkeit der Energieeffizienz oft schwierig. Diese ist stark vom Abstand zwischen Sensor und der zu belichtenden Fläche abhängig. Ohne eine Abstandsangabe ist ein Vergleich der Energieeffizienzwerte nicht möglich. In Zukunft könnte ein normiertes Messverfahren zur Bewertung von LED-Belichtungssystemen helfen, eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Auch sollten stets die im Gartenbau geeigneten Einheiten auf Basis der PAR verwendet werden und nicht die photometrischen Einheiten auf Basis der Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges.

Eine flächige Verteilung der HL-LEDs wird durch die Aluminiumprofile begrenzt, welche in einem gewissen Abstand zueinander angeordnet werden müssen, damit eine Luftbewegung zwischen den Profilen zur Wärmeabfuhr stattfinden kann. Eine gleichmäßigere Verteilung der HL-LEDs über die gesamte Fläche wäre mit einer geschlossenen Fläche realisierbar. Da damit aber die Wärmeabfuhr über die Luft erschwert werden würde, könnte das HL-LED-Belichtungssystem dann mit einem „Bottom Cooling“ System kombiniert werden. Somit könnte ein optimales Temperaturmanagement für die HL-LEDs, bei gleichzeitiger Verhinderung der Kondenswasserbildung an den Gefäßdeckeln und Gefäßwänden der Kulturgefäße, gewährleistet werden. Nach Saher (2005) und Vanderschaeghe und Debergh (1987) kann dann durch die im Verhältnis zur Lufttemperatur geringere Medientemperatur eine Kondensation am Medium stattfinden, wodurch gleichzeitig ein Austrocknen des Mediums verhindert würde. Auch die relative Luftfeuchte in den Gefäßen würde verringert, wodurch eine mögliche schlechtere Entwicklung und eine Störung physiologischer und morphologischer Strukturen, z.B. eine abnorme Entwicklung der Blätter, Hyperhydrität des Sprosses, eine geringere Transpiration und Verringerung der Stomatafunktion, verhindert werden könnte (Hazarika, 2006; Nguyen und Kozai, 1998; Kozai, 1997; Schloupf et al., 1995; Sciutti und Morini, 1995).

Mit dem HL-LED-Belichtungssystem konnten bei den untersuchten In-vitro-Kulturen die gleichen Vermehrungsraten und Frischmassegewichte erzielt werden wie mit einer Leuchtstofflampenbelichtung. Dabei war die optimale Strahlungsqualität pflanzenartspezifisch und teilweise sogar sortenspezifisch. Auch nach Angaben von Nhut und Nam (2010) und Morrow (2008) ist mit einer pflanzenartabhängigen Reaktion zu rechnen. Es scheint als müsste bei einer LED-Belichtung für jede Kultur eine individuelle Strahlungsqualität in das Kulturprogramm aufgenommen werden, was mit einem flexiblen System, wie es hier in der Arbeit vorgestellt wurde, möglich ist.

Ein morphologischer Effekt konnte bei den Varianten mit roten und blauen HL-LEDs und einem erhöhten Blauanteil beobachtet werden, bei dem das Streckungswachstum der Pflanzen verringert wurde. Am Beispiel der Versuchskultur *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' ist dieser Effekt positiv, da die Pflanzen unter einer Leuchtstofflampenbelichtung ein unerwünschtes Längenwachstum aufwiesen, bei dem die Pflanzen in kurzer Zeit bis unter den Becherdeckel wuchsen. Insgesamt wurden mit den HL-LED-Varianten deutlich intensiv grünere Pflanzen produziert als mit einer Leuchtstofflampenbelichtung.

Das Pflanzenwachstum und die Entwicklung der Pflanze werden durch die Belichtungsdauer, die Belichtungsstärke und die Strahlungsqualität beeinflusst (Pierik, 1997; Taiz und Zeiger, 2002; Dewir et al., 2006). Eine Verringerung der Strahlungsintensität resultierte bei den zwei daraufhin getesteten Versuchskulturen (*Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05', *Helleborus niger* und *H. x ericsmithii*-Hybride 'St. Basilius') in einer Reduzierung der Vermehrungsrate gegenüber der Belichtung mit höherer PPFD₀. Beim Enzian zeigten sich auch in allen weiteren Auswertungsparametern (Frischmassezuwächse, Pflanzenhöhe, Blattfarbe, maximale PSII Quantenausbeute) Verschlechterungen der Ergebnisse. Um allerdings die Aussage, dass einer Reduzierung der Strahlungsintensität zu negativen Effekten führt, untermauern zu können sind umfangreichere Untersuchungen mit mehreren Versuchskulturen notwendig. Die Pflanzenreaktionen auf eine unterschiedliche Belichtungsdauer und verschiedene Belichtungsstrategien (z.B. alternierende Belichtung) unter HL-LED-Varianten blieben in dieser Arbeit ebenso unberücksichtigt wie mögliche positive Auswirkungen auf die Pflanzen während der Akklimatisierungsphase, welche noch Bestandteil zahlreicher Untersuchungen werden könnten.

Bei einer Interaktion von unterschiedlichen Parametern bei der Kultivierung, wie z.B. Temperatur und Belichtung, ergeben sich sehr viele Versuchsvarianten, die zu einem letztendlichen Optimum bestimmter erwünschter Pflanzenreaktionen führen könnten. Dabei

erscheint eine Zusammenstellung der optimalen Kulturprogramme für unterschiedliche In-vitro-Kulturen bei der Menge an Kulturen und der pflanzenartabhängigen Reaktionen auf bestimmte Strahlungsqualitäten eine große, unüberschaubare Aufgabe zu sein und fordert nicht nur weitere Forschungsarbeit, sondern wird auch noch einige Zeit beanspruchen.

Eine ökonomische Betrachtung am Beispiel eines kompletten Kulturraums wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt. Trotz Einsparpotential und Betrachtung der Lebensdauer ist ein LED-Einsatz aus ökonomischer Sicht wahrscheinlich derzeit noch nicht zu empfehlen, bleibt aber im Einzelfall zu prüfen. Für einen ökonomischen Einsatz müssen die Preise für HL-LED-Belichtungssysteme fallen. Es gibt bisher noch keine Massenproduktion von HL-LED-Belichtungssystemen für den Einsatz im Gartenbau, die eine starke Preissenkung zur Folge hätte. Derzeit erschienen die Investitionskosten für Labore zur konventionellen Pflanzenvermehrung unerschwinglich. Wenn nach dem Haitschen Gesetz die Preise schnell fallen, eine Lebensdauer von 25.000 Stunden zu erwarten ist oder gesteigert werden kann und eventuell einzelne Pflanzenparameter wie die Vermehrungsrate durch eine HL-LED-Belichtung gesteigert werden können, dann können solche Belichtungssysteme bald als eine ökologische und ökonomische Alternative zur Leuchtstofflampenbelichtung angesehen werden. In unserem Beispiel steht ungefähr eine zehnfache Investition einem Belichtungssystem mit Leuchtstofflampen gegenüber. Auch bei einer hohen Energieeinsparung ist deshalb ein lohnender, ökonomischer Einsatz von HL-LEDs zur Belichtung derzeit fraglich. Bei einer Einzelfallprüfung ist allerdings auch die Einsparung an Kühlenergie und eventuell steigende Strompreise und die stetige Erhöhung der Photosynthetischen Photonenflussausbeute einzelner HL-LEDs und somit auch die Energieeffizienzsteigerung der HL-LED-Belichtungssysteme zu berücksichtigen.

Abgesehen von den derzeit sehr hohen Investitionskosten sind HL-LED-Belichtungssysteme, mit ihren Vorteilen gegenüber Belichtungssystemen mit anderen Leuchtmitteln, eine innovative und zukunftssträchtige Belichtungsmöglichkeit in der In-vitro-Kultur und werden in Zukunft eine große Rolle spielen.

8 Zusammenfassung

Die Bedeutung der In-vitro-Kultivierung zur Vermehrung von Pflanzen nimmt stetig zu. Allein in Deutschland stieg die Zahl in vitro vermehrter Pflanzen zwischen 1985 bis 2004 von circa fünf Millionen auf über 48 Millionen Pflanzen an, wobei die Vermehrung der Gattung *Phalaenopsis* mit über 31 Millionen Pflanzen den mit Abstand größten Anteil darstellt. Dieser Trend setzt sich bis heute fort. Unter den Kulturen befinden sich mittlerweile Stauden, Gehölze, andere mehrjährige Pflanzen, sowie Aquarienpflanzen (ADIVK Aktuell, 2009; Winkelmann et al., 2006). Auch wenn die In-vitro-Kultur Vorteile gegenüber der konventionellen vegetativen Vermehrung hat, ist die kommerzielle In-vitro-Vermehrung von Pflanzen durch die hohen Produktionskosten, eine oft niedrige Vermehrungsrate und geringe Überlebensraten der Pflanzen während der Akklimatisierung limitiert. Neben den Lohnkosten stellt der Energieaufwand zur Belichtung der Kulturen und die damit verbundene benötigte Abfuhr der Verlustleistung (Wärme) die höchsten Anteile der Produktionskosten dar (Yeh und Chung, 2009).

In der konventionellen Produktion werden überwiegend Leuchtstofflampen (LSL) zur Belichtung der In-vitro-Kulturen in Kulturkammern eingesetzt. Jede überschüssige Wärme, die durch die Belichtung entsteht, muss aus der Kulturkammer über eine Kühlung abgeführt werden (George et al., 2008; Pierik, 1997). Dafür ist ein hoher Energieaufwand notwendig. Um eine höhere durchschnittliche PPFD ($PPFD_{\varnothing}$) zu erzielen, werden teilweise auch Metallhalogen-, Natriumhochdruckdampflampen oder Glühlampen in den Kulturräumen eingesetzt (Kim et al., 2004a). In der Regel wird bei einer Leuchtstofflampenbelichtung eine zentrale Anordnung des Leuchtmittels in einer Regaletage bevorzugt. Dabei weisen die in der Nähe des Leuchtmittels stehenden Kulturgefäße höhere Lufttemperaturen im Gefäß auf als die weiter entfernt stehenden (Pierik, 1997). Leuchtstofflampen in Stabform belichten die Etagenfläche eines Regals nicht gleichmäßig und weisen erhebliche Unterschiede der PPFD zwischen den zentralen Bereichen und den Randbereichen der Etagenfläche auf (Chen, 2005).

Das Ziel der Arbeit war es, die Energieeffizienz gartenbaulicher In-vitro-Kulturverfahren gegenüber konventionellen Belichtungssystemen durch die Entwicklung eines Belichtungssystems mit Hochleistungs-LEDs (HL-LEDs), deren Einsatz auf dem Gebiet der In-vitro-Kultur im wissenschaftlichen Bereich bisher kaum Beachtung fand, zu steigern. Dazu gehörten die Bewertung der einzelnen Leuchtmittel, der Einsatz eines HL-LED-Belichtungssystems bei gleichzeitiger Erhöhung der Raumausnutzung und die Verbesserung der PPFD-Verteilung bei gleichbleibenden oder sogar gesteigerten Wachstumsparametern

gartenbaulicher In-vitro-Kulturen. Verschiedene Kurven der Blattabsorption und der Wirkungsspektren der Photosynthese unterschiedlicher Kulturen sowie die Absorption des Chlorophylls und seiner akzessorischen Pigmente weisen auf eine höhere Effizienz bestimmter Wellenlängenbereiche im Vergleich zu anderen Bereichen hinsichtlich der Photosyntheserate der Pflanzen hin. Durch die Möglichkeit Hochleistung-LEDs vielseitig anzusteuern, ist eine Optimierung der Strahlungsqualität und Strahlungsintensität eines HL-LED-Belichtungssystems im Hinblick auf verschiedene Wachstumsparameter untersucht worden. Die Bewertung der einzelnen Leuchtmittel fand auf Basis des Photonenflusses ($\mu\text{mol s}^{-1}$) im Wellenlängenbereich des Strahlungsspektrums zwischen 400 nm und 700 nm, also im Bereich der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) statt. Die Photosynthetische Photonenflussausbeute ($\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$), der Wirkungsgrad ($W_{\text{Strahlung}}^{-1} W_{\text{el}}^{-1}$) und der Einfluss auf die Verschiebung des Strahlungsspektrums wurden bei variierenden Betriebszuständen (Stromstärke, Sperrschichttemperatur) untersucht.

Für den effizienten Einsatz von HL-LEDs ist der Betriebszustand, bei möglichst niedrigen Betriebsstromstärken und Sperrschichttemperaturen, ausschlaggebend. Ein Betrieb bei höheren Betriebsstromstärken lässt die Vorteile in Bezug auf die Photosynthetische Photonenflussausbeute und den Wirkungsgrad im Vergleich zu anderen Leuchtmitteln wie der Leuchtstofflampe geringer werden und teils deutlich unter die von konventionell eingesetzten Leuchtmitteln sinken. Ein Betrieb der HL-LEDs bei hohen Stromstärken setzt eine dementsprechend hohe Kühlleistung zur Gewährleistung einer niedrigen Sperrschichttemperatur voraus. Nach Morrow (2008) ist dies ist nicht nur für eine hohe Photosynthetische Photonenflussausbeute zu beachten, sondern auch für eine hohe Lebensdauer der HL-LEDs. Die Photosynthetische Photonenflussausbeute der in dieser Arbeit untersuchten roten HL-LEDs bei einer Betriebsstromstärke von 50 mA unterschied sich mit $1,55 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ deutlich von einer Leuchtstofflampe (LSL) mit $1,26 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$, wohingegen die weißen HL-LEDs ($1,31 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$) nur geringfügig höhere Werte erzielen konnten und die blauen HL-LEDs ($0,97 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$) noch unter dem Wert der Leuchtstofflampe lagen. Die untersuchten grünen HL-LEDs konnten auf Grund der generell geringen Photosynthetischen Photonenflussausbeute nicht zur Erhöhung der Energieeffizienz des Belichtungssystems beitragen.

Mit einer gravierenden Veränderung der Strahlungsspektren bei unterschiedlichen Betriebszuständen ist, zumindest in den hier untersuchten Bereichen der Betriebsstromstärke (50 mA bis 700 mA) und Sperrschichttemperatur (15 °C bis 90 °C), nicht zu rechnen. Den deutlich höchsten Einfluss hatte die Sperrschichttemperatur bei den roten HL-LEDs mit einer maximalen Verschiebung der Peakwellenlänge von 13,8 nm. Bei allen untersuchten HL-LED-Typen stiegen die Peakwellenlängen mit ansteigender Sperrschichttemperatur. Hingegen

verschoben sich bei ansteigender Betriebsstromstärke die Peakwellenlängen der Indium-Gallium-Nitrid basierten HL-LEDs (Royalblau, Grün, Kaltweiß) in den kurzwelligeren Bereich und die der Aluminium-Indium-Gallium-Phosphor basierten HL-LEDs (Rot) in den langwelligeren Bereich. Die Betriebsstromstärke der einzelnen HL-LEDs zum Erreichen einer $PPFD_{\emptyset}$ von $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in den untersuchten HL-LED-Varianten ging nicht über 300 mA hinaus, weshalb die spektralen Veränderungen im Weiteren vernachlässigt werden konnten.

Das HL-LED-Belichtungssystem bestand aus jeweils 24 HL-LEDs dreier unterschiedlicher HL-LED-Typen (Royalblau, Rot, Kaltweiß) zur Belichtung einer Fläche von $0,775 \text{ m}^2$ ($1550 \text{ mm} * 500 \text{ mm}$). Die HL-LEDs wurden über die zur Verfügung stehende Fläche verteilt angeordnet und nicht stabförmig wie bei einer Leuchtstofflampe. Die Betriebsstromstärke jedes einzelnen HL-LED-Typs konnte geregelt werden, so dass im Rahmen der Strahlungsspektren der HL-LED-Typen unterschiedliche Strahlungsqualitäten eingestellt werden konnten. Eine geringe Sperrschichttemperatur wurde durch ein auf die Raumtemperaturbedingungen der Kulturkammern ausgelegtes Aluminiumprofil gewährleistet, welches eine Sperrschichttemperatur von weniger als $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gewährleistete.

Die kompakte Bauweise einer Leuchte mit LEDs wird durch die sehr kleine Bauform der LEDs begünstigt (Wu et al., 2007; Barta et al., 1992; Bula et al., 1991). Im Vergleich zu einer Leuchte mit einer Leuchtstofflampe konnte die Höhe des HL-LED-Belichtungssystems um fast 70 mm auf etwa 20 mm reduziert werden, wodurch bei gleichem Abstand von Leuchte zum Etagenboden der Etagenabstand verringert wurde. Nach Morrow (2008) wird eine mögliche Verringerung dadurch begünstigt, dass die benötigten Belichtungsstärken erreicht werden können ohne die Pflanze durch zu hohe, durch den LED-Betrieb bedingte Wärmestrahlung einem Stress auszusetzen oder Beschädigungen an der Pflanze zu verursachen. Die Verringerung des Etagenabstandes führte zu einer Steigerung der Energieeffizienz des entwickelten HL-LED-Belichtungssystems (siehe Abb. 5.2.8). Bei gleicher $PPFD_{\emptyset}$ auf der zu belichtenden Fläche verringerte sich mit geringerem Etagenabstand die benötigte Betriebsstromstärke und die Photosynthetische Photonenausbeute der einzelnen HL-LEDs stieg an, was zu einer weiteren Steigerung der Energieeffizienz und einer Reduzierung der benötigten elektrischen Leistung des HL-LED-Belichtungssystems beitrug.

Die Energieeffizienz des Leuchtstofflampenbelichtungssystems lag mit einer einfachen Leuchtstofflampe bei $0,43 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ und bei einer LSL mit eingebautem Reflektor bei $0,68 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$. Bei gleichem Etagenabstand (300 mm) konnte die Energieeffizienz des HL-LED-Belichtungssystems auf $0,83 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ gesteigert werden. Durch eine

Etagenabstandsverringering konnte mit dem konstruierten HL-LED-Belichtungssystem bei einem Etagenabstand von 210 mm eine Energieeffizienz von maximal $1,16 \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$ erreicht werden (siehe Kapitel 5.2.2.2). Die elektrische Leistung des Systems sank dabei auf 23,8 W und benötigte nur noch etwa 40 % der elektrischen Leistung eines LSL-Belichtungssystems bei 300 mm Etagenabstand. Neben dem direkten Effekt der Energieeffizienzsteigerung ist daher auch ein indirekter Effekt durch eine geringere Wärmeabgabe zu erwarten, bei dem die benötigte Energie für die Kühlung im Kulturraum reduziert wird. Die mögliche Etagenabstandsverringering birgt somit ein enormes Potential zur Erhöhung der Energieeffizienz. Auch bei einem Etagenabstand von 210 mm konnte im Vergleich zum LSL-Belichtungssystem eine homogenere PPF-D-Verteilung auf der zu belichtenden Fläche gewährleistet und die Raumausnutzung um fast 50 % erhöht werden.

Die Emissionsspektren von LED-Belichtungssystemen kann durch die dynamischen Einstellmöglichkeiten der Strahlungsqualitäten über eine entsprechende Ansteuerung der LEDs den Pflanzenbedürfnissen angepasst werden, was gegenüber anderen Leuchtmitteln einen großen Vorteil darstellt. Der Einsatz von Farbmischungen wie er auch in dieser Arbeit verwendet wurde zur Pflanzenbelichtung zeigte bereits öfter positivere Effekte auf die Pflanzen als die Belichtung durch einen einzelnen LED-Typ (Ohashi-Kaneko et al., 2006; Matsuda et al., 2004).

Mit dem HL-LED-Belichtungssystem wurden fünf unterschiedliche Kulturen unter sieben unterschiedlichen Strahlungsqualitäten (HL-LED-Varianten) kultiviert (siehe Kapitel 4.3.2). Im Vergleich zur Leuchtstofflampenbelichtung konnten Parameter wie die Vermehrungsrate und Frischmassezunahme zwar nicht gesteigert werden, aber stets gleich hohe Werte erreicht werden. Dabei waren die HL-LED-Varianten mit denen ähnliche Werte erzielt wurden zwischen den Kulturen nicht konsistent (siehe Kapitel 5.3.1). Es konnte eine pflanzenartabhängige Reaktion auf unterschiedliche Strahlungsqualitäten festgestellt werden, die bei den untersuchten Kulturen sogar teilweise sortenabhängig war. Eine einzelne HL-LED-Variante konnte nicht als optimale Strahlungsqualität für alle Kulturen erkannt werden. Es ist damit zu rechnen, dass jede Pflanzenart, oder sogar jede Sorte eine eigene Strahlungsqualität für ein optimales Wachstum benötigt. Insgesamt wurden mit den HL-LED-Varianten gegenüber der Leuchtstofflampenvariante aber intensiver grün gefärbte Pflanzen erhalten, welche mit steigendem Blauanteil oft ein geringeres Streckungswachstum aufwiesen. Die Behauptung von Morrow (2008), dass bei einer optimalen Ausrichtung der spektralen Emission auf die jeweiligen Pflanzenbedürfnisse die Emission überflüssiger Strahlung, auch „wasted light“ genannt, verhindert wird und dies somit zu einer weiteren Energieeinsparung bei der Pflanzenbelichtung

beitragen kann, konnte durch Versuche bei reduzierter $PPFD_0$ nicht bestätigt werden, da die Qualität der Pflanzen, die Vermehrungsraten und die Frischmassegewichte abnahmen.

Insgesamt konnte mit dem entwickelten HL-LED-Belichtungssystem, besonders durch die Möglichkeit der Etagenabstandverringering, die Energieeffizienz der Belichtung von In-vitro-Kulturen bei gleicher Qualität der Pflanzen deutlich erhöht werden.

9 Literaturverzeichnis

- ADIVK AKTUELL (2009). Herausgeber: Arbeitskreis Deutsche In Vitro Kulturen, Redaktion: Steinmacher, D. A.. Mitgliederinformation 13. Jg., Vol. 2
- Agaphonov, D. R., Ivanov, V. S., Sapritsky, I. V., Stolyarevskaya, R. I. (2000). Light measurements of high-luminance LEDs. *Metrologia*, 37: 587-590.
- Aitken-Christie, J., Kozai, T., Takayama, S. (1995). Automation and environmental control in plant tissue culture. *Kluwer Academic Publishers*.
- Aksenova, N. P., Konstantinova, T. N., Sergeeva, L. I., Machachkova, I., Golyanovskaya, S. A. (1994). Morphogenesis of potato plants in vitro. 1. Effect of light quality and hormones. *Journal of Plant Growth Regulation*, 13 (3): 143-146.
- Akyazi, G. (2009). Zum Einfluss von Lichtintensität und Lichtqualität (Hochleistungs-LEDs) auf das Verhalten von *Aphis fabae*. Institut für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Masterarbeit Nr. 19
- Ali, M. B., Hahn, E.-J., Paek, K.-Y. (2005). Effects of light intensities on antioxidant enzymes and malondialdehyde content during short-term acclimatization on micropropagated *Phalaenopsis* plantlet. *Environmental and Experimental Botany*, 54 (2): 109-120.
- Appelgren, M. (1991). Effects of light quality on stem elongation of Pelargonium in vitro. *Scientia Horticulturae*, 45: 345-351.
- Arik, M., Petrosk, J., Weavery, S. (2002). Thermal challenges in the future generation of solid state lighting applications: Light Emitting Diodes. *International Society Conference on Thermal Phenomena*: 113-120.
- Banerjee, R., Schleicher, E., Meier, S., Muñoz Viana, R., Pokorny, R., Ahmad, M., Bittl, R., Batschauer, A. (2007). The signaling state of arabidopsis cryptochrome 2 contains flavin semiquinone. *The Journal of Biological Chemistry*, 282 (20): 14916-14922.
- Barta, D. J., Tibbitts, T. W., Morrow, R. C. (1992). Evaluation of Light Emitting Diodes characteristics for a space-based plant irradiation source. *Advanced Space Research*, 12 (5): 141-149.
- Batschauer, A. (1998). Photoreceptors of higher plants. *Planta*, 206: 479-492.
- Biddington, N. L. (1992). The influence of ethylene in plant tissue culture. *Plant Growth Regulation*, 11: 173-187.

- Bornwaßer, T. (2007). Das Verhalten der Schwarzen Bohnenblattlaus *Aphis fabae Scopoli* (Homoptera: Aphididae) auf unterschiedliche Lichtqualitäten. Leibniz Universität Hannover, Institut für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Masterarbeit Nr. 05
- Bouly, J.-P., Schleicher, E., Dionisio-Sese, M., Vandenbussche, F., Van Der Straeten, D., Bakrim, N., Meier, S., Batschauer, A., Galland, P., Bittl, R. und Ahmad, M. (2007). Cryptochrome blue light photoreceptor are activated through interconversion of flavin redox states. *The Journal of Biological Chemistry*, 282: 9383-9391.
- Bourget, C. M. (2008). An introduction to Light-emitting Diodes. *HortScience*, 43 (7): 1947-1950.
- Brazaityte, A., Duchovskis, P., Urbonavičiute, A., Samuoliene, G., Jankauskiene, J., Kasiulevičiute-Bonakere, A., Bliznikas, Z., Novčkovas, A., Bree, K., Žukauskas, A. (2009). The effect of light-emitting diodes lighting on cucumber transplants and after-effect on yield. *Zemdirbyste*, 96 (3): 102-118.
- Briggs, W. R., Huala, E. (1999). Blue-light photoreceptors in higher plants. *Annu. Rev. Cell Div. Biol.*, 15: 33-62.
- Buddendorf-Joosten, J. M. C. und Woltering, E. J. (1996). Controlling the gaseous composition in vitro - description of a flow system and effects of the different gaseous components on in vitro growth of potato plantlets. *Scientia Horticulturae*, 65 (1): 11-23.
- Bula, R. J., Murrow R. C., Tibbitts, T. W. (1991). Light-emitting diodes as a radiation source for plants. *HortScience* 26(2): 203-205
- Campiotti, C. A., Balducci, R., Dondi, F., Alonzo, G., Catanese, V., Incrocci, L. and Bibbiani, C. (2008). The pulsa (plant-based unit for life support in antarctica): a sustainable plant food production technology for remote and isolated environments. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 801: 417-424.
- Carr, K. F. (1997). A guide to integrating sphere radiometry & photometry. *Labsphere Technical Guide*, Labsphere, Inc.: 1-10.
- Chée, R. (1986). In vitro culture of Vitis: the effects of light spectrum, manganese sulfate and potassium iodide on morphogenesis. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 7 (2): 121-134.
- Chen, T.-Y., Chu, C.-C., Henneberry, T. J., Umeda, K. (2004). Monitoring and trapping insects on poinsettia with yellow sticky card traps equipped with light-emitting diodes. *HortTechnology*, 14 (3): 337-341.
- Chen, C. (2005). Fluorescent Lighting Distribution for Plant Micropropagation. *Biosystems Engineering*, 90 (3): 295-306

- Christie, J. M. (2007). Phototropin blue-light receptors. *Annual Review of Plant Biology*, 58: 21-45.
- Cohnstaedt, L. W., Gillen, J. I., Munstermann, L. E. (2008). Light-Emitting Diode technology improves insect trapping. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 24 (2): 331-334.
- CREE Datenblatt, (2008). <http://cree.com/products/pdf/XLamp-E.pdf>. Product family data sheet, Cree[®] XLamp[®] XP-E LEDs. CLD-DS18, Rev 12. Cree, Inc.
- Cuello, J.L. (2002). Latest development in artificial lighting technologies in bioregenerative space life support. IV International ISHS Symposium on Artificial Lighting. *Acta Horticulturae*, 580: 49-56.
- Cummings, I. G., Reid, J. B., Koutoulis, A. (2007). Red to far-red ratio correction in plant growth chambers - Growth responses and influence of thermal load on garden pea. *Physiologia Plantarum*, 131 (2): 171-179.
- Debergh, P.C., Maene L. J. (1981). A scheme for commercial propagation of ornamental plants by tissue culture. *Scientia Horticulturae*, 14 (4): 335-345.
- Debergh, P. C. (1988). Micropropagation of woody species - state of art of in-vitro aspects. *Acta Horticulturae*, 227: 287-295.
- Debergh, P.C., Vanderschaeghe, A. (1996). Mass propagation of in vitro plantlets. International Society for Horticultural Science - Library. *Chronica Horticulturae*.
- Desjardins, Y. (2007). How micropropagation-omics can contribute to a better understanding of phenomena taking place in tissue culture. ISHS Acta Horticulturae 748: II International Symposium on Acclimatization and Establishment of Micropropagated Plants.
- Desjardins, Y. (2009). In vitro culture of plants. A stressful activity. ISHS Acta Horticulturae 812: III International Symposium on Acclimatization and Establishment of Micropropagated Plants.
- Devlin, P. F., Patela, S. R., Whitelam, G. C. (1998). Photochrome E influences internode elongation and flowering time in Arabidopsis. *Plant Cell*, 10: 1479-1488.
- Devlin, P. F., Christie, J. M. und Terry, M. J. (2007). Many hands make light work. *Journal of experimental botany*, 58 (12): 3071-3077.
- Dewir, Y. H., Chakrabarty, D., Hahn, E. J., Paek, K. Y. (2006). The effects of paclobutrazol, Light Emitting Diodes (LEDs) and sucrose on flowering of *Euphorbia millii* plantlets in vitro. *European Journal of Horticultural Science*, 71 (6): 240-244.

- Dhingra, A., Bies, D. H., Lehner, K. R., Folta, K. M. (2006). Green light adjust the plastid transcriptome during early photomorphogenetic development. *Plant Physiology* 142: 1256-1266.
- Dohlus, R. (2010). Photonik - Physikalisch-technische Grundlagen der Lichtquellen, der Optik und des Lasers. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München: 142-158.
- Dougher, T. A. O. und Bugbee, B. (2001). Evidence for yellow light suppression of lettuce growth. *Photochemistry and Photobiology*, 73 (2): 208-212.
- Dyble, M., Narendran, N., Bierman, A., Klein, T. (2005). Impact of dimming white LEDs: chromaticity shifts due to different dimming methods. *Fifth International Conference on Solid State Lighting*, 5941 (1): 291-299.
- Ebrahim, M. K. H. und Ibrahim, I. (2000). Influence of medium solidification and pH value on in vitro propagation of *Maranta leuconeura cv. Kerchoviana*. *Scientia Horticulturae*, 86(3): 211-221.
- Eichler, J. (2007). Physik. Grundlagen für das Ingenieursstudium - kurz und prägnant. Vieweg und Sohn Verlag GmbH, Wiesbaden.
- Eisinger, W. R., Bogomolni, R. A. und Taize, L. (2003). Interaction between a blue-green reversible photoreceptor and a separate UV-B receptor in stomatal guard cells. *American Journal of Botany*, 90: 1560-1566.
- Fang, W., Jao, R. C. (2000). A review on artificial lighting of tissue culture and transplants. In "Transplant production in the 21st century". Eds. C. Kubota und Chun, 108-113. Kluwer Academic publishers. Netherlands.
- Folta, K. M. (2004). Green light stimulates early stem elongation, antagonizing light-mediated growth inhibition. *Plant Physiology*, 135: 1407-1416.
- Folta, K. M. und Maruhnich, S. A. (2007). Green light: a signal to slow down or stop. *J. Exp. Bot.*, 58 (12): 3099-3111.
- Frenchilla, S., Talbott, L. D., Bogomolni, R. A., Zeiger, E. (2000). Reversal of blue light stimulated stomatal opening by green light. *Plant Cell Physiol*, 41 (2): 171-176.
- Fuljahn, S. (2010). Establishment of a photoautotrophic temporary immersion system (PA-TIS) in vitro. Promotion an der Leibniz Universität Hannover, Naturwissenschaftliche Fakultät, Fachgebiet Biosystem- und Gartenbautechnik.
- Fujiwara, K. und Kozai, T. (1995) Physical microenvironments and ist effects. In: Automation and Environmental Control in Plant Tissue Culture (Aitken-Chistie, J, ed.), 319–369. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, The Netherlands.

- Fujiwara, K., Sawada, T. (2006). Design and development of an LED artificial sun-light source system prototype capable to controlling relative spectral power distribution. *Journal of Light and Visual Environment*, 30 (3): 58-64.
- Genty, B., Briantais, J.-M., Baker, N. R. (1989). The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 990 (1): 87-92.
- George, E. F. und Sherrington, P. D. (1984). Plant propagation by tissue culture - handbook and directory of commercial laboratories. *Exegenetics*, Edington
- George, E. F., Hall, M. H., De Klerk, G.-J. (2008). Plant propagation by tissue culture 3rd edition. Springer Verlag, New York: 1-64; 423-464.
- Gigahertz-Optic (2008). Light Measurement Tutorials. Öffentliche Downloads der Firma Gigahertz-Optik Vertriebsgesellschaft für technische Optik mbH, Türkenfeld. http://www.gigahertz-optik.de/files/tutorials_doublesideprint.pdf, Stand 23.10.2008.
- Gigahertz Optic, (2010). Tutorials. Öffentliche Downloads der Firma Gigahertz-Optik Vertriebsgesellschaft für technische Optik mbH, Türkenfeld. http://www.gigahertz-optik.de/files/tutorials_de.pdf, Stand 26.11.2010.
- Goebel, D. G. (1967). Generalized integrating-sphere theory. *Applied Optics*, 6 (1): 125-128.
- Golovatskaya, I. F. (2005). The role of cryptochrome 1 and phytochromes in the control of plant photomorphogenetic responses to green light. *Russian Journal of Plant Physiology*, 52 (6): 724-730.
- Goncalves, S. Correira, P. J., Martins-Loucao, M. A., Romano, A., 2005. A new medium formulation for in vitro rooting of carob tree based on leaf macronutrients concentrations. *Biologia Plantarum*, 49 (2): 277-280.
- Gu, Y., Narendran, N., Dong, T., Wu, H. (2006). Spectral and luminous efficacy change of high-power LEDs under different dimming methods. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 6337: 63370J.
- Gyula, P., Schäfer, E. und Nagy, F. (2003). Light perception and signalling in higher plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 6 (5): 446-452.
- Hahn, E.-J., Kozai, T., Paek, K.-J. (2000). Blue and red Light-Emitting Diodes with or without sucrose and ventilation affect in vitro growth of *Rehmannia glutinosa* plantlets. *Journal of Plant Biology*, 43 (4): 247-250.

- Hamamoto, H., Shimaji, H., Higashide, T. (2003). Budding and bolting responses of horticultural plants to night-break treatments with LEDs of various colors. *J. Agric. Meteorol.*, 59 (2): 103-110.
- HAMEG® Instruments (2005). Arbitrary Power Supply HM8142 – Handbuch/Manual. *HAMEG Instruments GmbH*.
- Hanselaer, P., Keppens, A., Forment, S., Ryckaert, W. R. and Deconinc, G. (2009). A new integrating sphere design for spectral radiant flux determination of light-emitting diodes. *Measurement Science and Technology*, 20 (9): 095111.
- Hazarika, B. N. (2006). Morpho-physiological disorders in in vitro culture of plants. *Scientia Horticulturae*, 108 (2): 105-120.
- Helsper, J. P. F. G., De Vos, C. H. R., Maas, F. M., Jonker, H. H., Van Den Broeck, H. C., Jordi, W., Pot, C. S., Keizer, L. C. P., Schapendonk, A. H. C. M. (2003). Response of selected antioxidants and pigments in tissues of *Rosa hybrida* and *Fuchsia hybrida* to supplemental UV-A exposure. *Physiologia Plantarum*, 117 (2): 171-178.
- Heo, J., Lee, C., Chakrabarty, D., Paek, K. (2002). Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a Light-Emitting Diode (LED). *Plant Growth Regulation*, 38 (3): 225-230.
- Heo, J. W., Lee, C. W., Murthy, H. N., Paek, K. Y. (2003). Influence of light quality and photoperiod on flowering of *Cyclamen persicum* Mill. cv. 'Dixie White'. *Plant Growth Regulation*, 40 (1): 7-10.
- Heo, W. H., Chun, W. L., Paek, K. Y. (2006). Influence of mixed LED radiation on the growth of annual plants. *Journal of Plant Biology*, 49 (4): 286-290.
- Hering, E., Bressler, K., Gutekunst, J. (2005). *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 4 Aufl. *Springer-Verlag* Berlin Heidelberg New York: 241-244.
- Hine, R. S., Martin, E. (2004). *A dictionary of biology* :5th ed. *Oxford Univ. Press*.
- Hoenecke, M. E., Bula, R. J., Tibbitts, T. W. (1992). Importance of 'blue' photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. *HortScience*, 27 (5): 427-430.
- Hogewoning, S. W., Trouwborst, G., Engbers, G. J., Harbinson, J., van Ieperen, W., Ruijsch, J., van Kooten, O., Schapendonk, A. H. C. M. and Pot, C. S. (2007). Plant physiological acclimation to irradiation by Light-Emitting Diodes (LEDs). *Acta Hort. (ISHS)*, 761: 183-191.
- Hosokawa, K., Oikawa, Y., Yamamura, S. (1998). Mass propagation of ornamental gentian in liquid medium. *Plant Cell Reports*, 17 (10): 747-751.

- Hovi-Pekkanen, T. und Tahvonen, R. (2008). Effects of interlighting on yield and external fruit quality in year-round cultivated cucumber. *Scientia Horticulturae*, 116 (2): 152-161.
- Hovila, J., Toivanen, P. und Ikonen, E. (2004). Realisation of the unit for luminous flux at the HUT using the absolute integrating-sphere method. Institute of Physics Publishing, *Metrologia*, 41: 407-413.
- Ilieva, I., Ivanovaa, T., Naydenova, Y., Dandolovala, I. und Stefanov, D. (2010). Plants experiments with Light-Emitting Diode module in svet space greenhouse. *Advances in Space research*, 46: 840-845.
- Inada, K. (1976). Action spectra for photosynthesis in higher plants. *Plant and Cell Physiology*, 17 (2): 355-365. In: Nishio: Nishio, J., N. (2000). Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. *Plant, Cell & Environment*, 23 (6): 539-548.
- Jao, R.-C., Fang, W. (2002). Development of a flexible lighting system for plant related research using super bright red and blue light emitting diodes. *Acta Hort.* (ISHS), 578:133-139
- Jao, R.-C., Fang, W. (2003). An adjustable light source for photo-phyto related research and young plant production. *Applied engineering in agriculture*, 19 (5): 601-608.
- Jao, R.-C., Fang, W. (2004). Growth of potato plantlets in vitro is different when provided concurrent versus alternating blue and red light photoperiods. *HortScience*, 39 (2): 380-382.
- Jao, R.-C., Lai, C.-C., Fang, W., Chang, S.-F. (2005). Effect of red light on the growth of zantedeschia plantlets in vitro and tuber formation using Light-Emitting Diodes. *HortScience* 40 (2): 436-438.
- Jackson, M. B., Abbott, A. J., Belcher, A. R., Hall, K. C. and Butler, R. (1991). Ventilation in plant tissue cultures and effects of poor aeration on ethylene and carbon dioxide accumulation, oxygen depletion and explants. *Ann. Bot.*, 67: 229-237.
- Jo, E.-A., Tewari, R. K., Hahn, E.-J. und Paek, K.-Y. (2008). Effect of photoperiod and light intensity on in vitro propagation of *Alocasia amazonica*. *Plant Biotechnology Reports*, 2 (3): 207-212.
- Johnsen, G. N., Young, A. J., Scholes, J. D. und Horton, P. (1993). The dissipation of excess excitation energy in British plant species. *Plant, Cell & Environment*, 16: 673-679.

- Kasahara, M., Swartz, T.E., Olney, M.A., Onodera, A., Mochizuki, N., Fukuzawa, H., Asamizu, E., Tabata, S., Kanegae, H., Takano, M., Christie, J.M., Nagatani, A., Briggs, W.R. (2002). Photochemical properties of the flavin mononucleotide-binding domains of the phototropins from *Arabidopsis*, rice, and *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiology*, 129 (2), pp. 762-773
- Kawai, S., Watanabe, H., Yoshino, T., Tanaka, F. und Suzuki, M. (1996). Light Emitting Diodes as the light source for plant growth regulation. 4. Flowering regulation of chrysanthemum by irradiation of LEDs in summer. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.*, 65 (1): 454-455.
- Kim, A., Götz, W., Steigerwald, D., Wierer, J., Gardner, N., Sun, J., Stockman, S., Martin, P., Krames, M., Kern, R. und Steranka, F. (2001), Performance of high-power AlInGaN Light Emitting Diodes. *physica status solidi (a)*, 188: 15-21.
- Kim, H.-H., Goins, G. D., Wheeler, R. M., Sager, J. C. (2004a). Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red-and blue-light-emitting diodes. *HortScience*, 39 (7): 1617-1622.
- Kim, S.-J., Hahn, E.-J., Heo, J.-W. und Paek, K.-Y. (2004b). Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro. *Scientia Horticulturae*, 101 (1-2): 143-151.
- Kim, H.-H., Norikane, J., Wheeler, R. M., Sager, J. C., Yorio, N. C. (2006). Electric lighting considerations for crop production in space. *Acta Horticulturae*, 761: 193-202.
- Kovac, J., Peternai, L., Lengyel, O. (2003). Advanced Light Emitting Diodes structures for optoelectronic applications. Proceedings from the 12th International Conference on Thin Films, Elsevier Science. *Thin Solid Films*, 433, (1-2): 22-26.
- Kozai, T., Kubota, C. und Jeong, B. R. (1997). Environmental control for large scale production of plants through in vitro technics. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 51 (1): 49-56.
- Krückeberg, J. (2007). Hochleistungs-LEDs in der Praxis. *Franzis Verlag GmbH*, 85586 Poing.
- Kubota, C. und Kozai, T. (1995). Low-temperature storage of transplants at the light compensation point: air temperature and light intensity for growth suppression and quality preservation. *Scientia Horticulturae*, 61 (3-4): 193-204.
- Kurilčik, A., Miklušytė-Čanová, R., Dapkūnienė, S., Žilinskaitė, S., Kurilčik, G., Tamulaitis, G., Duchovskis, P., Žukauskas, A. (2008). In vitro culture of Chrysanthemum plantlets using light-emitting diodes. *Cent. Eur. J. Biol.* 3(2): 161–167.

- Lee, S.-H., Tewari, R. K., Hahn, E.-J. und Paek, K.-Y. (2007). Photon density and light quality induce changes in growth, stomatal development, photosynthesis and transpiration of *Withania Somnifera* (L.) Dunal. Plantlets. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 90 (2): 141-151.
- Lian, M.-L., Murthy, H. N., Paek, K.-Y. (2002). Effects of Light Emitting Diodes (LEDs) on the in vitro induction and growth of bulblets of *Lilium oriental* hybrid 'Pesaro'. *Scientia Horticulturae*, 94 (3-4): 365-370.
- Lichtenthaler, H. K., Langsdorf, G., Lenk, S., Buschmann, C. (2005). Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity with the fluorescence imaging system. *Photosynthetica*, 43: 355-369.
- Lin, C. (2000). Photoreceptors and regulation of flowering time. *Plant Physiol.*, 123: 39-50.
- Lin, C., Shalitin, D. (2003). Cryptochrome structure and signal transduction. *Annu Rev Plant Biol*, 54: 469-496.
- Lin, M.-J. und Hsu, B. D. (2004). Photosynthetic plasticity of Phalaenopsis in response to different light environments. *Journal of Plant Physiology*, 161 (11): 1259-1268.
- Liu, M.-Q., Zhou, X.-L., Li, W.-Y., Chen, Y.-Y., Zhang, W.-L. (2008). Study on methodology of LEDs luminous flux measurement with integrating sphere. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41 (14): 144012.
- Lloyd, G, and McCown, B. (1980). Commercially feasible micropropagation of mountain laural (*Kalmia latifolia*) by use of shoot tip cultures. Combined Proceedings of the International Plant Propagators' Society, 30: 421-427.
- Lot-Oriel (2010a). Ulbrichtkugeln – Einleitung. Öffentliche Downloads der Firma LOT-Oriel GmbH & Co. KG, Darmstadt. <http://www.lot-oriel.com/files/downloads/optosol/de/introduction.pdf?phpMyAdmin=gjwRNLwKd0p%2C%2CaCaCB54evpHoQ2>, Stand 14.12.2010.
- Lot-Oriel (2010b). Standard-Ulbrichtkugel, BaSO₄. Öffentliche Downloads der Firma LOT-Oriel GmbH & Co. KG, Darmstadt. http://www.lot-oriel.com/files/downloads/optosol/en/standard_integrating_spheres_baso4_en.pdf, Stand: 14.12.2010.
- Massa, G. D., Emmerich, J. C., Morrow, R. C., Bourget, C. M. und Mitchell, C. A. (2006). Plant-growth lighting for space life support: a review. *Gravitational and Space Biology*, 19 (2): 19-29.
- Massa, G. D., Kim, H.-H., Wheeler, R. M., Mitchell, C. A. (2008). Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*, 43 (7): 1951-1956.

- Matsuda, R., Ohashi-Kaneko, K., Fujiwara, K., Goto, E. und Kurata, K. (2004). Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light. *Plant and Cell Physiology*, 45 (12): 1870-1874.
- Maxwell, K. und Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence - A practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51 (345): 659-668.
- McCamy, C. S. (1992). Correlated colour temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. *Color Research and Application*, 17 (2): 142-144. In: Poudel, P. R., Kataoka, I., Mochioka, R. (2008). Effect of red- and blue-Light-Emitting Diodes on growth and morphogenesis of grapes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 92 (2): 147-153.
- McCree, K. J. (1972a). The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.*, 9: 191-216.
- McCree K. J. (1972b): Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.*, 10: 443-453.
- Miller, C. C., Ohno, Y. (2001). Luminous Flux Calibrations of LEDs at NIST. In Proc. 2nd CIE Expert Symposium on LED Measurement, 45.
- Miyashita, Y., Kimura, T., Kitaya, Y., Kubota, C., Kozai, T. (1997). Effects of red light on the growth and morphology of potato plantlets in vitro: using Light Emitting Diodes (LEDs) as a light source for micropropagation. *Acta Hort. (ISHS)*, 418: 169-176.
- Monteith J. L. und Unsworth M. H. (1990). Principles of Environmental Physics. 2. Auflage, *Edward Arnold*, London: 241
- Moon, H. K., Park, S.-Y., Kim, J. W., Kim, C. S. (2006). Growth of Tsuru-rindo (*Tripterispermum japonicum*) Cultured in Vitro under Various Sources of Light-Emitting Diode (LED) Irradiation. *Journal of Plant Biology*, 49(2): 174-179.
- Morgan, E. R., Butler, R. M., Bicknell, R. A. (1997). In vitro propagation of *Gentiana cerina* and *Gentiana corymbifera*. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 25 (1): 1-8.
- Morini, S., Sciutti, R., Muleo, R., Fortuna, P. (1991). Growth patterns of in vitro cultured shoot tips as influenced by different light-dark regimes. *Acta Hort.*, 289: 137-138.
- Morini, S. und Perrone, S. (2006). Effect of short light-dark regimes on in vitro shoot rooting of some fruit rootstocks. *Biologia Plantarum*, 50 (3): 429-432.
- Morrow, R. C. (2008). LED lighting in horticulture. *HortScience*, 43 (7): 1947-1950.

- Müller, E. K., Lee, S. M., Van de Workeen, B. C. und Müller, O. M. (2001). Comparison of improved operating parameters of five different wavelength LEDs for significantly brighter illumination. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 4285: 23-32.
- Muleo, R., Morini, S. und Casano, S. (2001). Photoregulation of growth and branching of plum shoots: Physiological action of two photosystems. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 37 (5): 609-617.
- Muleo, R. und Morini, S. (2006). Light quality regulates shoot cluster growth and development of MM106 apple genotype in in vitro culture. *Scientia Horticulturae*, 108 (4): 364-370.
- Murashige, T., Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco cultures. *Physiol. Plant*, 15: 473-497.
- Nguyen, Q. T. und Kozai, T. (1998). Environmental effects on the growths of plantlets in micropropagation. *Environment Control in Biology*, 36 (2): 59-75.
- Nhut, D. T., Takamura, T., Watanabe, H., Okamoto, K. und Tanaka, M. (2003a). Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue Light-Emitting Diodes (LEDs). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 73 (1): 43-52.
- Nhut, D. T., Takamura, T., Watanabe, H. und Tanaka, M. (2003b). Efficiency of a novel culture system by using Light-Emitting Diode (LED) on in vitro and subsequent growth of micropropagated banana plantlets. *Acta Hort. (ISHS)*, 616: 121-127.
- Nhut, D. T., Takamura, T., Watanabe, H. und Tanaka, M. (2005). Artificial light source using Light Emitting Diodes (LEDs) in the efficient micropropagation of *Spathiphyllum* plantlets. *Acta Hort. (ISHS)*, 692: 137-142.
- Nhut, D. T., Thao, L. T. P., Suong, N. T. T., Lien, V. H. (2006). Effect of some artificial light sources on the photomorphogenesis of callus-induced embryo and the plantlet regeneration of *Phalaenopsis amabilis* and its applications in micropropagation. *Proceedings of International Workshop on Biotechnology in Agriculture*: 122-126.
- Nhut, T. D., Nam, N. B. (2010). Light Emitting Diodes (LEDs): an artificial light source for biological studies. *Proceedings of the 3rd international conference on the development of BME in Vietnam*, 11 – 14th Jan 2010: 133-138.
- Nishio, J., N. (2000). Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. *Plant, Cell & Environment*, 23 (6): 539-548.
- Nolting, J. und Dittmar, G. (2005). Photometrische Grundbegriffe. Deutsche Optikerzeitung Heidelberg, *DOZ Optometrie*, Heft 11/05: 32-34.

- Nolting, J. (2006). Radiometrische und photometrische Messungen. *DOZ Optometrie*, 11: 30-37.
- Ocean Optics (2008). USB4000 Fiber optic spectrometer - installation and operation manual. Document Number 211-00000-000-02-0908. Usermanual. Ocean Optics, Inc.
- Ohashi-Kaneko, K., Matsuda, R., Goto, E., Fujiwara, K. und Kurata, K. (2006). Growth of rice plants under red light with or without supplemental blue light. *Soil Science and Plant Nutrition*, 52 (4): 444-452.
- Ohno, Y. (1994). Integrating sphere simulation - application to total flux scale realization. *Applied Optics* 33 (13): 2637-2647.
- Ohno, Y. (1999). OSA Handbook of Optics, Volume III Visual Optics and Vision Chapter for Photometry and Radiometry. Optical Technology Division, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland USA: 3-9
- Ohno, Y., Daubach, R. O. (2001). Integrating sphere simulation on spatial nonuniformity errors in luminous flux measurement. *Journal of the Illuminating Engineering Society*. Proceedings for IESNA Annual Conference. 30 (1).
- Osmond, C. B. (1994). What is photoinhibition? Some insights from comparisons of sun and shade plants. In: Baker, N.R., Bowyer, J.R., Photoinhibition of photosynthesis: from molecular mechanisms to the field. Bios Scientific Publishers, Oxford, UK: 1-24.
- Ostermann, F. (2007). Physikalische Eigenschaften - Anwendungstechnologie Aluminium. VDI-Buch, Springer Berlin Heidelberg: 221-226.
- Philips Application Brief (2007). LUXEON K2 Assembly Guide. Application brief AB29. Anwendungsbeschreibung von LUXEON® K2. Philips Lumileds Lighting Company. <http://www.philipslumileds.com/support/documentation/application-briefs,Stand 14.03.2011>.
- Philips Datenblatt (2008). Technical Datasheet DS 56, LUXEON® Rebel. Technisches Datenblatt von LUXEON® Rebel. Philips Lumileds Lighting Company. http://www.luxeon.hu/docs/luxeon_rebel.pdf, Stand 14.03.2011
- Philips Datenblatt (2011). <http://www.philipslumileds.com/uploads/265/DS68-pdf, Stand 28.05.2011> LUXEON® Rebel. Technisches Datenblatt von LUXEON® Rebel und LUXEON® Rebel ES. Philips Lumileds Lighting Company.
- Pierik, R. L. M. (1997). In vitro culture of higher plants. *Kluwer Academic Pub*.
- Poikonen, T., Manninen, P., Karha, P. und Ikonen, E. (2010). Multifunctional integrating sphere setup for luminous flux measurements of Light Emitting Diodes. *Review of scientific instruments*, 81 (2): 023102.

- Poudel, P. R., Kataoka, I., Mochioka, R. (2008). Effect of red- and blue-Light-Emitting Diodes on growth and morphogenesis of grapes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 92 (2): 147-153.
- Pousset, N., Rougié, B., Razet, A. (2010). Impact of current supply on LED colour. *Lighting Research and Technology*, 42 (4): 371-383.
- Professional Lighting (2010). Professional Lighting - Licht der neuen Generation. Produktbroschüre, DHLicht GmbH, Wülfrath: 18 – 23. <http://www.dhlicht.de/downloads/PL2011.pdf>, Stand 04.07.2011.
- Rajapakse, N. C. und Shahak, Y. (2007). Light-quality manipulation by horticulture industry. In Light and Plant Development. *Blackwell Publishing* Kapitel 12: 290-312.
- Raven P. H., Evert, R. F., Eichhorn, S. E. (2000). Biologie der Pflanzen. 3. Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin: 137-147.
- Robin, C., Hay, M. J. M., Newton, P. C. D. und Greer, D. H. (1994). Effect of light quality (red:far-red ratio) at the apical bud of the main stolon on morphogenesis of *Trifolium repens* L.. *Annals of Botany*, 74 (2): 119-123.
- Roitsch, T. und Sinha, A. K. (2002). Application of photoautotrophic suspension cultures in plant science. *Photosynthetica*, 40: 481-492.
- Saebo, A., Krekling, T. und Appelgren, M. (1995). Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets in vitro. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 41 (2): 177-185.
- Saher, S. Piqueras, A., Hellin, E. und Olmos, E. (2005). Prevention of hyperhydricity in micropropagated carnation shoots by bottom cooling: implications of oxidative stress. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 81 (2): 149-158.
- Seyring, M. (2002). In vitro cloning of *Helleborus niger*. *Plant Cell Report*, 20 (10): 895-900.
- Schloupf, R. M., Barringer, S. A. und Splittstoesser, W. E. (1995). A review of hyperhydricity (vitrification) in tissue culture. *Plant Growth Regul. Soc. of Amer. Quarterly*, 23(3): 149-158.
- Schuerger, A. C., Brown, C. S. und Stryjewski, E. C. (1997). Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red Light-Emitting Diodes supplemented with blue or far-red light. *Annals of Botany*, 79 (3): 273-282.
- Schuerger, A. C., Brown, C. S. (1997). Spectral quality affects disease development of three pathogens on hydroponically grown plants. *HortScience*, 32 (1): 96-100.
- Sciutti, R., Morini, S. (1995). Water loss and photosynthesis of plum plantlets is influenced by relative humidity during rooting in vitro. *Journal of Horticultural Science*, 70 (2): 221-228.

- Senger, H. (1982). The effect of blue light on plants and microorganisms. *Photochemistry and Photobiology*, 35 (6): 911-920.
- Shin, K. S., Murthy, H. N., Heo, J. W., Hahn, E. J. und Paek, K. Y. (2008). The effect of light quality on the growth and development of *in vitro* cultured *Doritaenopsis* plants. *Acta Physiol Plant*, 30: 339-343.
- Simmons, A. M., Chu, C.-C. und Henneberry, T. J. (2004). Yellow sticky cards equipped with Light-Emitting Diodes: a natural enemies compatible management tool for whiteflies (Homoptera: Aleyrodidae) and other greenhouse vegetable pests. *Journal of Entomological Science*, 39 (2): 298-300.
- Singer, C., Brückner, S. und Khan, T. Q. (2007). Messungen von Lichtstrom und Lichtausbeute an modernen Hochleistungsleuchtdioden. *Forschung und Technik – Licht*, 09/2007: 714-718.
- Sitte, P., Ziegler, H., Ehrendorfer, F. und Bresinsky, A. (1998). Strasburger – Lehrbuch der Botanik. 34. Auflage, *Gustav Fischer Verlag*, Stuttgart: 229-239.
- Somers, D. E., Devlin, P. F. und Kayet, S. A. (1998). Phytochromes and cryptochromes in the entrainment of the arabidopsis circadian clock. *Science*, 282 (5393): 1488-1490.
- Sommer, A. P., Franke, R.-P. (2006). Plants grow better if seeds see green. *Naturwissenschaften*, 93 (7): 334-337.
- Somsri, K., Pinyopich, P. und Mohammed, W. S. (2010). Effects of fluorescent lighting on *in vitro* micropropagation of *lemna minor*. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 7743: 77430G-77430G6.
- Steigerwald, D. A., Bhat, J. C., Collins, D., Fletcher, R. M., Holcomb, M. O. Ludowise, M. J., Martin, P. S. und Rudaz, S. L. (2002). Illumination with solid state lighting technology. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8 (2): 310-320.
- Sutton, N. (2001). The radiometry of Light Emitting Diodes. *Labsphere Technical Guide*. Labsphere, Inc.: 7
- Taguchi, T. (2008). Present status of energy saving technologies and future prospect of white LED lighting. *Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 3: 21-26.
- Taiz, L. und Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology*. *Sinauer Associates*, 3rd edition.
- Talbott, L. D., Nikolova, G., Ortiz, A., Shmayevich, I. und Zeiger, E. (2002). Green light reversal of blue-light-stimulated stomatal opening is found in a diversity of plant species. *American Journal of Botany*, 89: 366-368.

- Tamulaitis, G., Duchovskis, P., Bliznikas, Z., Breive, K., Ulinskaite, R., Brazaityte, A., Novičkovas, A. und Žukauskas, A. (2005). High-power Light Emitting Diode based facility for plant cultivation. *Journal of Physica D: Applied Physics*, 38: 3182-3187.
- Tanaka, K., Fujiwara, K. und Kozai, T. (1992). Effect of rel humidity in the culture vessels on transpiration and photosynthetic rates in vitro. *ISHS Acta Horticulturae 319*: International Symposium on Transplant Production Systems.
- Tennessen, D., Singaas, E. und Sharkey, T. (1994). Light-Emitting Diodes as a light source for photosynthesis research. *Photosynthesis Research*, 39 (1): 85-92.
- United States Patent PP18767, 2008. *Gentiana* plant named 'Alpine Success Blue 05'
Inventors: Von Rundstedt, Friederike (Bremen, DE), Application Number: 11/648869.
- Vacin, E. and Went, F. (1949). Some pH change in nutrient solution. *Botan Gaz.* 110: 605-613.
- Vanderschaeghe, A. M. und Debergh, P. C. (1987). Technical aspects of the control of the relative humidity in tissue culture containers. In: *Plant Micropropagation in Horticultural Industries*, Proc. Symp. Florizel, Arlon, Belgium: 68–76.
- Van Huylenbroeck, J. M., Piqueras, A. und Debergh, P. C. (1998). Photosynthesis and carbon metabolism in leaves formed prior and during ex vitro acclimatization of micropropagated plants. *Plant Science*, 134 (1): 21-30.
- Wheeler, R. M. und Tibbitts, T. W. (1987). Utilization of potatoes for life support systems in space: III. Productivity at successive harvest dates under 12-h and 24-h photoperiods. *American Potatoe Journal*, 64: 311-320.
- Whitelam, G. C. und Halliday, K. J. (2007). Light and Plant development. *Blackwell Publishing Ltd*.
- Williams, R. R., Taji, A. M. und Winney, K. A. (1990). The effect of Ptilotus plant tissue culture on pH of in vitro media. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 22 (3): 153-158.
- Winkelmann, T., Geier, T. und Preil, W. (2006). Commercial *in vitro* plant production in Germany in 1985-2004. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 86 (3): 319-327.
- Wongnok, A., Piluek, C., Techasilpitak, T. und Tantivivat, S. (2008). Effects of light emitting diodes on micropropagation of *Phalaenopsis* orchids. *Acta Horticulturae*, 788: 149-156.
- Wu, M.-C., Hou, C.-Y., Jiang, C.-M., Wang, Y.-T., Wang, C.-Y., Chen, H.-H. und Chang, H.-M. (2007). A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings. *Food Chemistry*, 101 (4): 1753-1758.

-
- Yanagi, T., Okamoto, K. und Takita, S. (1996). Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. *Acta horticulturae*, 440: 117-122.
- Yeh, N. und Chung, J-P. (2009). High-brightness LEDs - energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (8): 2175-2180.
- Zhang, Z., Leung, D. W. M. (2000). A comparison of *in vitro* with *in vivo* flowering of gentian. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 63: 223-226
- Zhang, Z., Leung, D. W. M. (2002). Factors influencing the growth of micropropagated shoots and *in vitro* flowering of gentian. *Plant Growth Regulation*, 36 (3): 245-251.
- Zimmerman, T. W., Scorza, R. (1994). Benzyladenine and shortened light/dark cycles improve *in vitro* shoot proliferation of peach. *HortScience*, 29: 698.
- Zong, Y., Miller, C. C., Lykke, K. R., Ohno, Y. (2004). Measurement of total radiant flux of UV LEDs. Proc., CIE Expert Symposium on LED Light Sources, June 2004, Tokyo.
- Zyablova, N. V., Berkovich, Yu. A., Erokhin, A. N. und Skripnikov, A. Y. (2010). The gravitropic and phototropic responses of wheat grown in a space greenhouse prototype with hemispherical planting surface. *Advances in Space Research*, 46: 1273-1279.

Internetquellen

www.cvrl.ioo.ucl.ac.uk, 2011

www.flowmagic.nl/folder/clusterled32.pdf Stand 05.03.2011

www.flowmagic.nl (2010). Agro LED system test card. Flowmagic BV, Niederlande.
http://www.flowmagic.nl/index.php?s=p_2&p=411. Stand 27.06.2010.

www.growlight.cn/288W-grow-lights.asp, Stand 05.03.2011

www.in-vitro.pl/oferta.php?p=6; Stand 28.04.2011 und 18.05.2011

www.led-info.de/grundlagen.html, Stand 12.12.2010 und 17.12.2010

www.ledlight.osram-os.com/reports/hort/4-LH_CDPD_Pb-free.pdf, Stand 04.07.2011

www.led-professional.com/technology/light-generation/new-method-for-manufacturing-the-elusive-green-led-with-higher-efficacy, Stand 28.04.2011

www.ledshift.com/Funktion%20German.html, Stand 17.12.2010

www.led-tech.de/de/Leuchtdioden-c_1_0.html, Stand 17.12.2010

www.lemnislighting.com/en/about_greenhouse.html, Stand 05.03.2011

www.lemnislighting.com/pdf/65259%20Lemnis%20Folder%20Greenhouse%20ENG.pdf, Stand 04.07.2011

[www.omarshantedtrail.com/Props/Prop%20Idea %20Files/Lighting/Lighting%20-%20LEDs/Light%20Emitting%20Diodes.pdf](http://www.omarshantedtrail.com/Props/Prop%20Idea%20Files/Lighting/Lighting%20-%20LEDs/Light%20Emitting%20Diodes.pdf); Stand, 28.12.2010

www.oceanoptics.com/Products/usb4000.asp. Produktbeschreibung USB4000 Miniature Fiber Optic Spectrometer. Stand 04.2011

www.philipslumileds.com/products/luxeon-rebel/luxeon-rebel-white#datasheets, Stand 04.07.2011

www.pur-led.de/LED-Einzel-Highpower/, Stand 17.12.2010

Anhang

A.1 Radiometrische Bewertung von Hochleistungs-LEDs

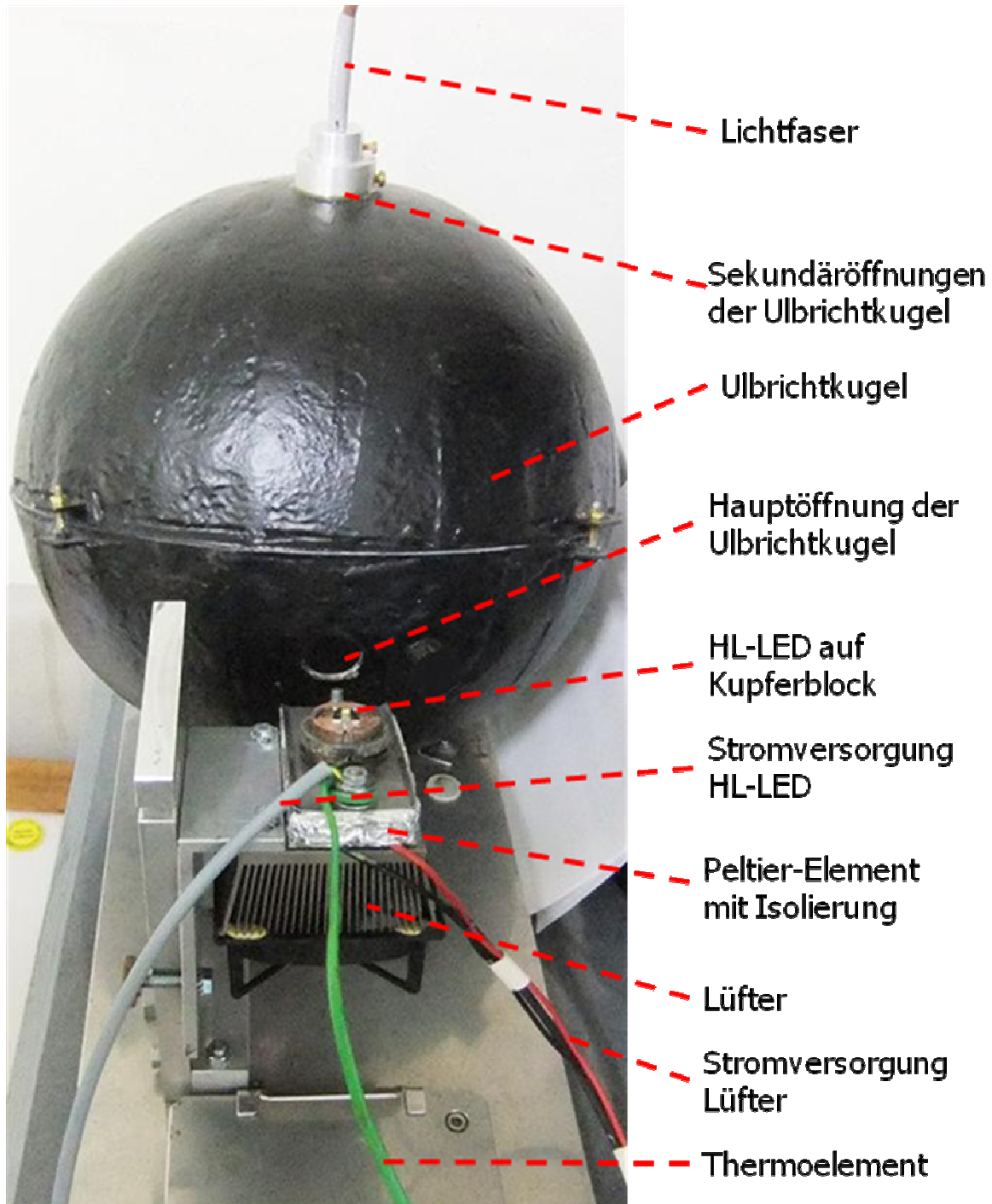


Abb. A.1.1 Bild der Ulbrichtkugel mit HL-LED-Halterung (Kupferblock, Peltier-Element, Lüfter).

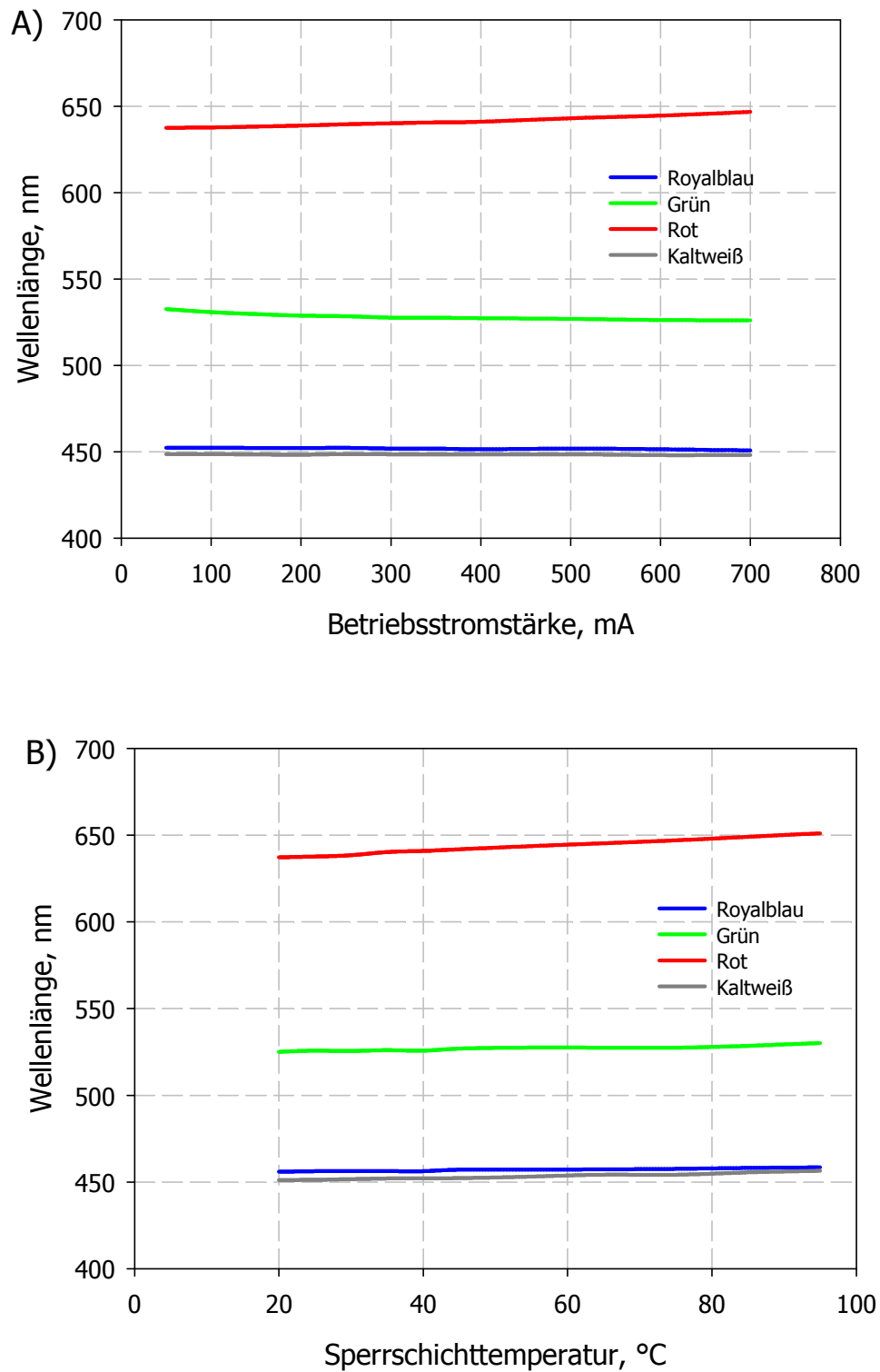


Abb. A.1.2 Veränderung der Peakwellenlänge unterschiedlicher HL-LEDs des Modells LUXEON® Rebel bei unterschiedlichen Betriebsstromstärken (A) und bei unterschiedlichen Sperschichttemperaturen (B).

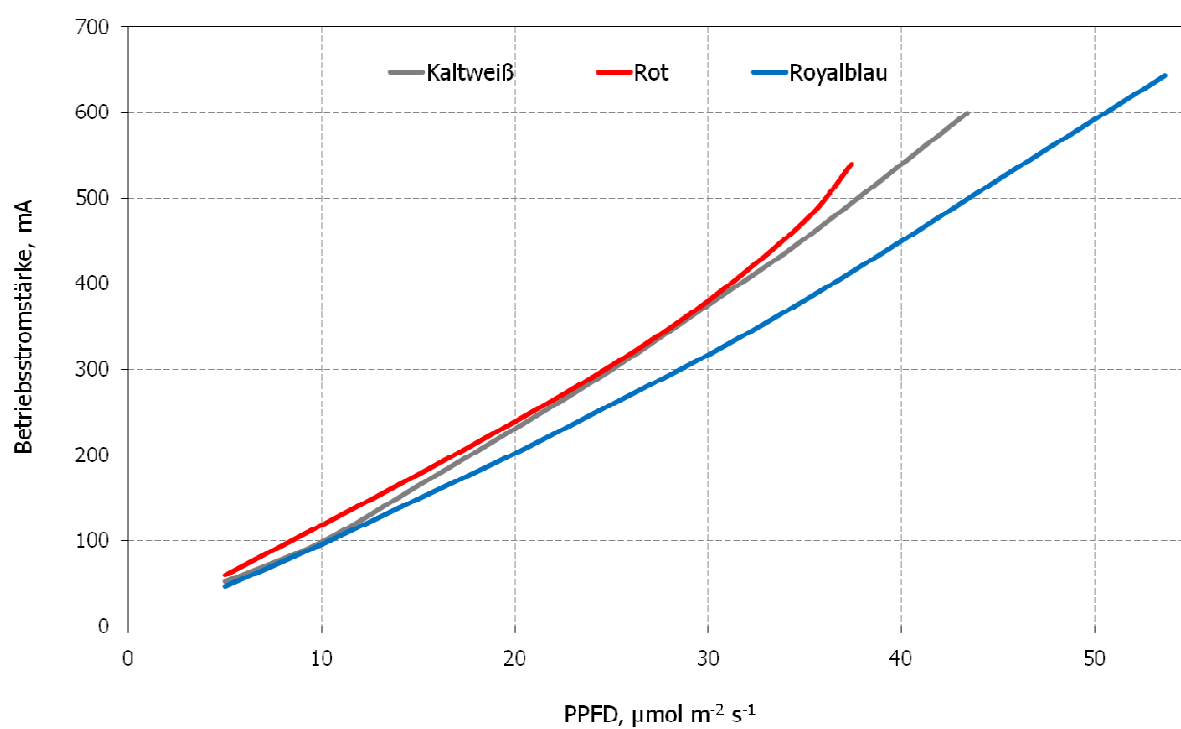


Abb. A.1.3 Abhängigkeit der Betriebsstromstärke von der durchschnittlichen PPFD einzelner HL-LED-Typen im HL-LED-Belichtungssystem.

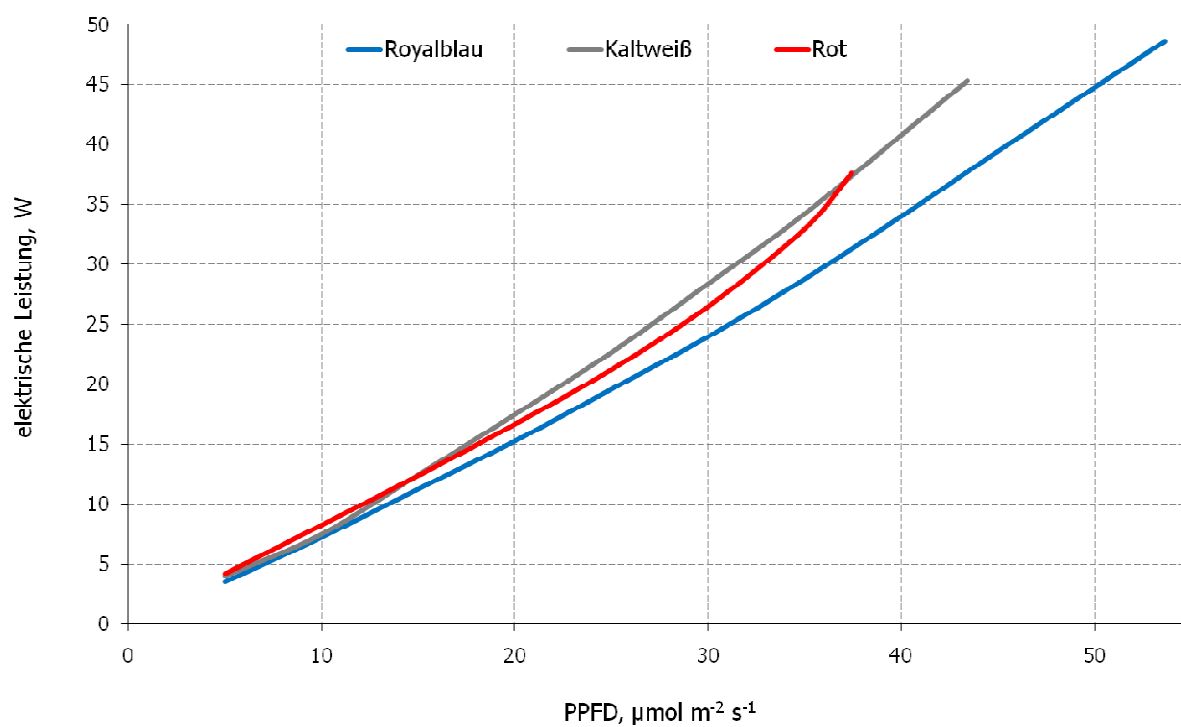


Abb. A.1.4 Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der durchschnittlichen PPFD einzelner HL-LED-Typen im HL-LED-Belichtungssystem.

A.2 Hochleistungs-LED-Belichtungssystem

Tab. A.2.1 Energieeffizienz, berechnet aus elektrischer Leistung und durchschnittlicher PPFD ($PPFD_{\phi}$), bei unterschiedlichen Leuchtstofflampenvarianten und einem Etagenabstand von 300 mm.

Variante	Etagenabstand, mm	$PPFD_{\phi}$, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	elektrische Leistung, W_{el}	Energieeffizienz, $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$
LSL	300	35	$58 \pm 0,4$	0,61
LSL	300	30	$55 \pm 0,5$	0,54
LSL	300	25	$47 \pm 0,5$	0,53
LSL + Reflektor	300	35	$50 \pm 0,4$	0,70
LSL + Reflektor	300	30	$43 \pm 0,3$	0,70
LSL + Reflektor	300	25	$38 \pm 0,4$	0,66
LSL Reflex	300	35	$40 \pm 0,5$	0,88
LSL Reflex	300	30	$35 \pm 0,5$	0,87
LSL Reflex	300	25	$31 \pm 0,4$	0,80

Tab. A.2.2 Energieeffizienz des HL-LED-Belichtungssystems, berechnet aus elektrischer Leistung und durchschnittlicher PPFD ($PPFD_{\emptyset}$), mit der HL-LED-Variante RB 7:3 bei unterschiedlichen Etagenabständen.

Variante	Etagenabstand, mm	$PPFD_{\emptyset}$, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	elektrische Leistung, W_{el}	Energieeffizienz, $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$
RB 7:3	300	35	$36,0 \pm 0,5$	0,97
RB 7:3	300	30	$29,4 \pm 0,5$	1,02
RB 7:3	300	25	$23,6 \pm 0,5$	1,06
RB 7:3	270	35	$31,9 \pm 0,4$	1,10
RB 7:3	270	30	$26,9 \pm 0,4$	1,12
RB 7:3	270	25	$22,0 \pm 0,3$	1,13
RB 7:3	240	35	$26,0 \pm 0,3$	1,35
RB 7:3	240	30	$22,7 \pm 0,4$	1,32
RB 7:3	240	25	$18,2 \pm 0,4$	1,38
RB 7:3	210	35	23,8 0,4	1,47
RB 7:3	210	30	19,8 0,4	1,52
RB 7:3	210	25	16,2 0,4	1,54
RB 7:3	180	35	22,6 0,5	1,55
RB 7:3	180	30	19,1 0,3	1,57
RB 7:3	180	25	15,7 0,4	1,59

Tab. A.2.3 Energieeffizienz des HL-LED-Belichtungssystems, berechnet aus elektrischer Leistung und durchschnittlicher PPFD ($PPFD_{\emptyset}$), mit der HL-LED-Variante RB 3:7 bei unterschiedlichen Etagenabständen.

Variante	Etagenabstand, mm	$PPFD_{\emptyset}$, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	elektrische Leistung, W_{el}	Energieeffizienz, $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$
RB 3:7	300	35	$32,6 \pm 0,5$	1,08
RB 3:7	300	30	$27,4 \pm 0,5$	1,09
RB 3:7	300	25	$22,3 \pm 0,6$	1,12
RB 3:7	270	35	$31,3 \pm 0,4$	1,12
RB 3:7	270	30	$26,3 \pm 0,5$	1,14
RB 3:7	270	25	$21,1 \pm 0,3$	1,18
RB 3:7	240	35	$25,7 \pm 0,5$	1,36
RB 3:7	240	30	$22,1 \pm 0,3$	1,36
RB 3:7	240	25	$18,0 \pm 0,2$	1,39
RB 3:7	210	35	23,4 0,5	1,50
RB 3:7	210	30	19,8 0,4	1,51
RB 3:7	210	25	16,3 0,5	1,53
RB 3:7	180	35	22,8 0,5	1,54
RB 3:7	180	30	18,8 0,4	1,59
RB 3:7	180	25	15,5 0,5	1,61

Tab. A.2.4 Energieeffizienz des HL-LED-Belichtungssystems, berechnet aus elektrischer Leistung und durchschnittlicher PPFD ($PPFD_{\emptyset}$), mit der HL-LED-Variante RW 5:5 bei unterschiedlichen Etagenabständen.

Variante	Etagenabstand, mm	$PPFD_{\emptyset}$, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	elektrische Leistung, W_{el}	Energieeffizienz, $\mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1}$
RW 5:5	300	35	$36,1 \pm 0,5$	0,97
RW 5:5	300	30	$29,7 \pm 0,5$	1,01
RW 5:5	300	25	$24,6 \pm 0,5$	1,02
RW 5:5	270	35	$33,5 \pm 0,5$	1,04
RW 5:5	270	30	$28,4 \pm 0,5$	1,06
RW 5:5	270	25	$23,2 \pm 0,4$	1,08
RW 5:5	240	35	$30,0 \pm 0,4$	1,17
RW 5:5	240	30	$24,8 \pm 0,6$	1,21
RW 5:5	240	25	$21,6 \pm 0,5$	1,16
RW 5:5	210	35	28,8 0,4	1,22
RW 5:5	210	30	23,9 0,6	1,26
RW 5:5	210	25	20,4 0,5	1,23
RW 5:5	180	35	27,6 0,5	1,27
RW 5:5	180	30	23,7 0,5	1,27
RW 5:5	180	25	16,1 0,4	1,55

A.3 Pflanzenbauliche Untersuchungen

A)



B)

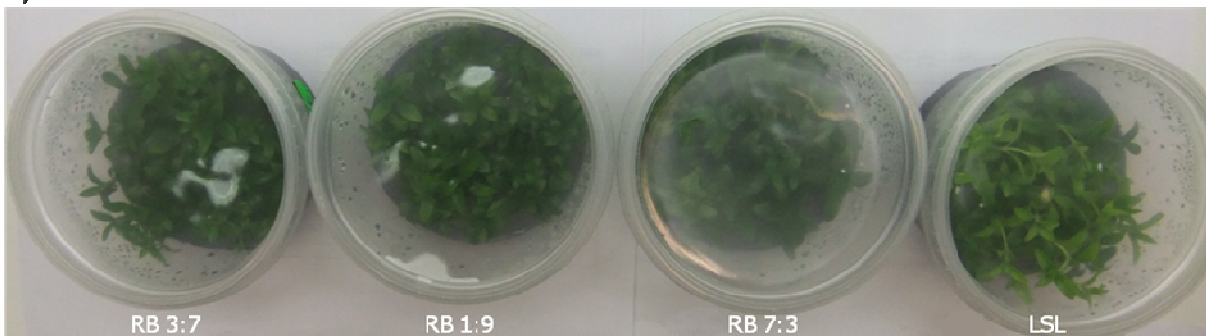


Abb. A.3.1 Seitenansicht (A) und Aufsicht (B) von Kulturgefäßen mit *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05', die unter drei HL-LED-Varianten, mit unterschiedlichen PPFD-Verhältnissen aus Rot und Royalblau, und einer Leuchtstofflampenvarianten (LSL) kultiviert wurden.



Abb. A.3.2 Einzelne Pflanzen von *Gentiana* am Ende der Kulturpassage 4. Links: Pflanze kultiviert unter RB 7:3. Rechts: Pflanze kultiviert unter LSL.

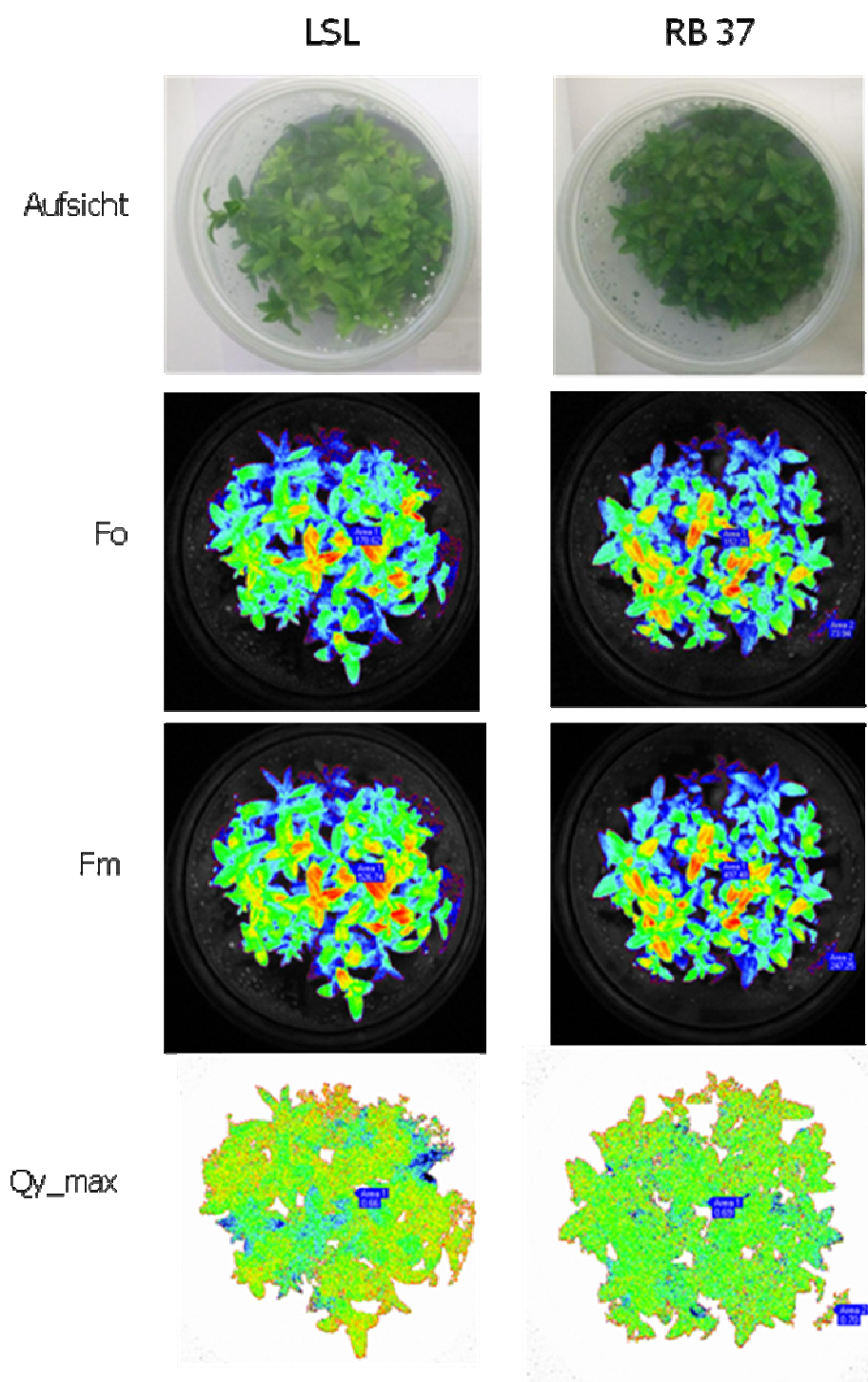


Abb. A.3.3

Aufsicht von *Gentiana cruciata* × *scabra* 'Alpine Success BLUE 05' aus der Kulturpassage 1 bei $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter einer Leuchtstofflampenbelichtung und einer HL-LED-Variante RB 3:7. Darunter sind jeweils die Abbildungen aus den Fluoreszenzmessungen mit der FluorCam FC 800-O/1010 von Photon Systems Instruments der gemessenen Parameter Fo, Fm und Qy_max, der aus den beiden vorherigen Parametern berechnet wird $((Fm - Fo)/Fm)$.

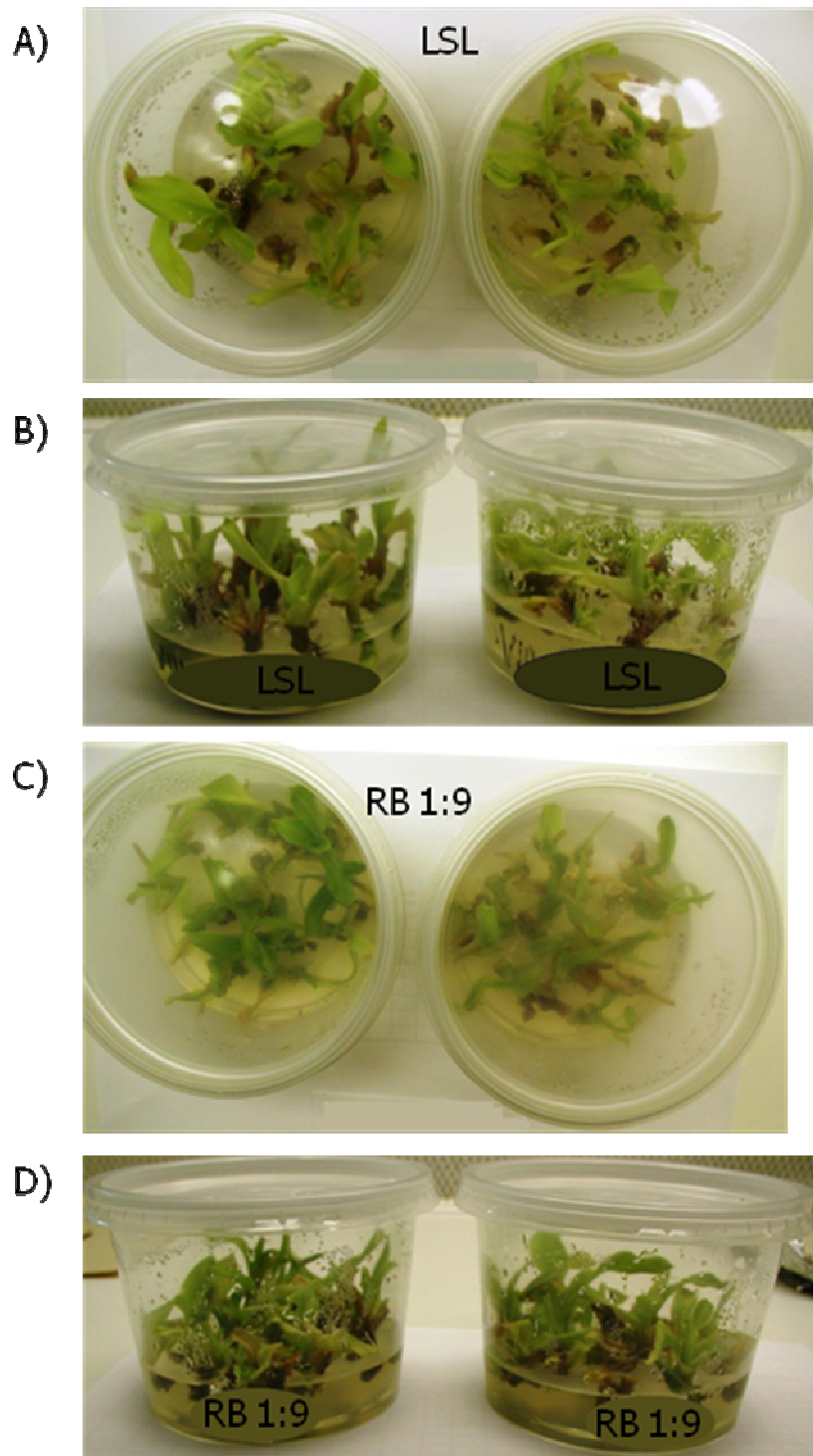


Abb. A.3.4 Seitenansicht und Aufsicht von Kulturgefäßen mit *Canna indica*, die (A, C) unter einer Leuchtstofflampenvariante (LSL) und (B, D) unter der HL-LED-Variante RB 1:9 kultiviert wurden.

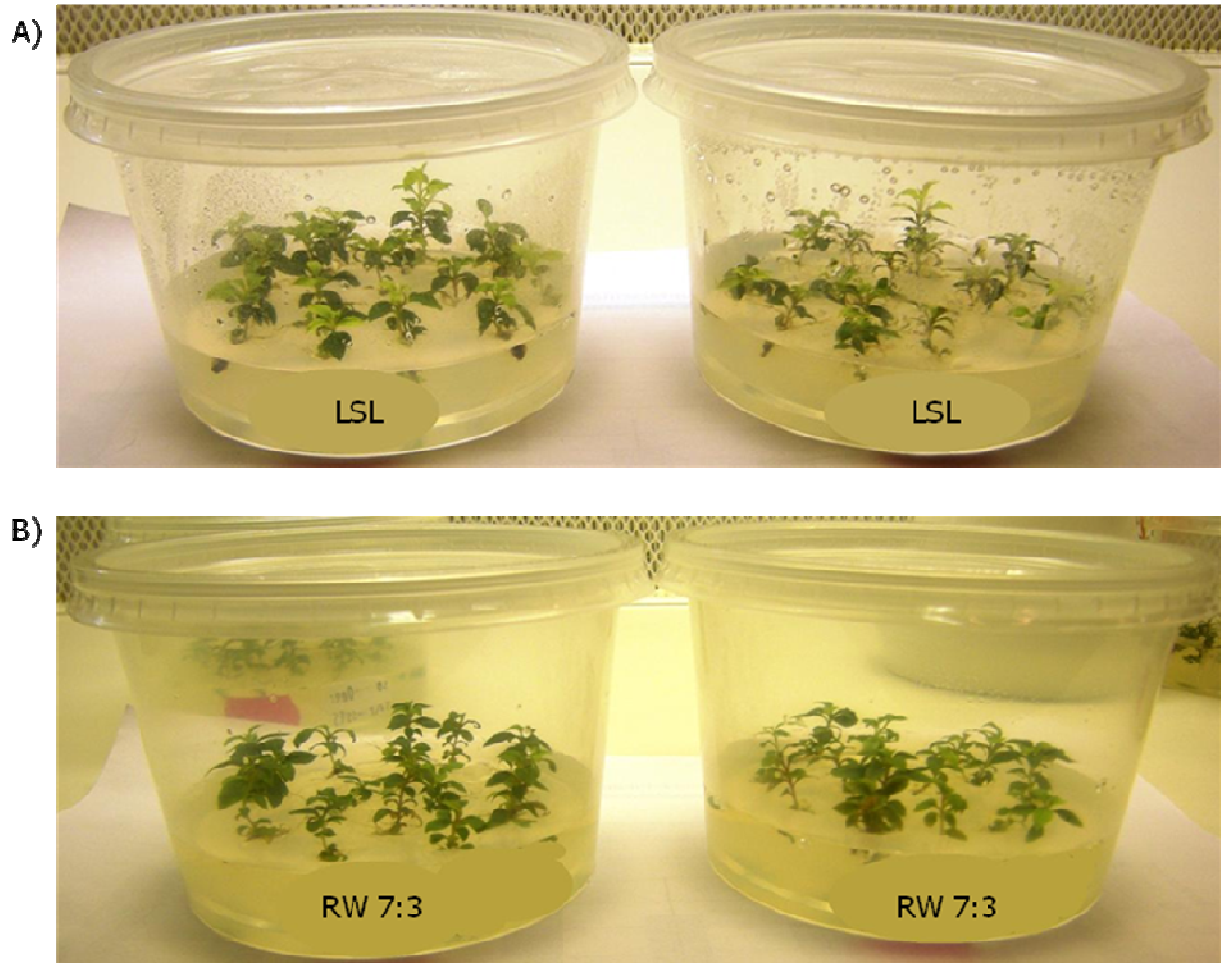


Abb. A.3.5 Seitenansicht von Kulturgefäßen mit *Kalmia latifolia* 'Corona', die unter einer Leuchtstofflampenvariante (A) und der HL-LED-Variante RW 7:3 (B) kultiviert wurden.

Curriculum Vitae

PERSÖNLICHE DATEN

Thorsten Bornwaßer

Name

04. Februar 1980

Geburtsdatum

Berlin

Geburtsort

SCHULISCHE UND BERUFLICHE AUSBILDUNG

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Institut für Biologische Produktionssysteme
Fachgebiet Biosystem- und Gartenbautechnik
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Promotionsstudent

BGT

seit 03/2008

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
M. Sc. Gartenbauwissenschaften am Institut
für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz

Studium

10/2005 bis 3/2008

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
B. Sc. Gartenbauwissenschaften am Institut
für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz

Studium

10/2002 bis 09/2005

Gärtnerei Ochel in Wiedenest
Ausbildung als Gärtner, Fachrichtung
Zierpflanzenbau

Berufsausbildung

08/2000 bis 08/2002

VERÖFFENTLICHUNGEN

LightSym2009 (Symposium of Light in Horticulture 2009), Japan
– Tsukuba "Evaluation of high power LEDs with an integrating
sphere for artificial lighting in horticulture"

"LED lighting systems in growing rooms – Optimization of the
energy efficiency"

KTBL-Tagung, Worms „LED-Belichtungssysteme mit PAR
(photosynthetic active radiation) zur Effizienzsteigerung von
pflanzlichen In-vitro-Kulturverfahren"

AG Biologischer Pflanzenschutz, Hannover „Optische Manipulation
von Schad- und Nutzinsekten - Die Bedeutung der UV-
Sensitivität im optischen System von Insekten"

Vorträge

DGG 2010 (Deutsche Gartenbauwissenschaftliche Gesellschaft),
Hohenheim „LED-Belichtungssysteme in Kulturräumen -
Optimierung der Energieeffizienz" „Bewertung von
Hochleistungs-LEDs für die Belichtung im Gartenbau"

IPM 2010

„LED-Belichtungssysteme – Effizienzsteigerung
pflanzenbaulicher Kulturverfahren"

DGG 2009, Berlin

„LED-Belichtungssysteme zur Effizienzsteigerung pflanzlicher
In-vitro-Kulturverfahren"

GreenSys2009 (International Symposium of High Technology for
Greenhouse System), Quebec, Canada
"LED lighting systems to increase the efficiency of in vitro
cultures"

Poster

TASPO Artikel, Ausgabe 03 / 2010

„LED-Einsatz lohnt sich noch nicht"

Fachzeitschrift Gemüse, Ausgabe 06 / 2010 „Klima- und
Regeltechnik im Gewächshaus: Anforderungen gestiegen"

Artikel

„Das Verhalten der Schwarzen Bohnenblattlaus *Aphis fabae*
Scopoli (Homoptera: Aphididae) auf unterschiedliche
Lichtqualitäten"

M.Sc. Arbeit

„Effekt von UV- absorbierenden Netzen auf die Orientierung der
Schwarzen Bohnenblattlaus *Aphis fabae* (Homoptera:
Aphididae)"

B.Sc. Arbeit

Danksagung

Dieses Kapitel gibt mir nun die Gelegenheit mich bei den vielen Menschen zu bedanken, die mir die Promotion überhaupt möglich gemacht haben.

Zu Allererst danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Hans-Jürgen Tantau für die Bereitstellung des Themas. Die stets freundliche, hilfsbereite und kompetente Unterstützung ermöglichte mir, bei allen Freiheiten, die mir dabei gegeben wurden, eine zielgerichtete Bearbeitung des Themas über die gesamte Zeit hinweg.

Für die Hilfe bei Fragestellungen zu Messtechniken und anregenden Gesprächen danke ich Dr. von Elsner. Mit seinen fachlichen Anregungen wies er mich stets in die richtige Richtung. Ein weiterer Dank für die kompetente Unterstützung gebührt Thilo Reeck vom Institut für Biophysik der Leibniz Universität Hannover.

Bei der Firma BockBioScience GmbH und den beteiligten Mitarbeitern möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung von Pflanzen und Materialien zur In-vitro-Kultivierung danken.

Die Mitarbeiter des Fachgebiets Biosystem- und Gartenbautechnik ermöglichten es in einer freundschaftlichen, sehr angenehmen Atmosphäre zu arbeiten und standen mit Rat und Tat zur Seite. Dabei bedanke ich besonders bei meiner Büronachbarin Dr. Stefanie Grade, die mich bei vielen Fragen unterstützen konnte und im Laufe der Zeit viele, viele Verbesserungen und Kontrollen meiner Ausarbeitungen durchgeführt hat.

Besonderer Dank gilt meiner Familie und Mariana. Sie haben mich fortwährend unterstützt, ausgehalten, an mich geglaubt und mir immer wieder Mut zugesprochen, um mein Ziel zu erreichen und das Studium erfolgreich abzuschließen.

Erklärung zur Dissertation

Hiermit erkläre ich, dass die Dissertation mit dem Titel „Energieeffizienzsteigerung pflanzlicher In-vitro-Kulturverfahren mit Hochleistungs-LED-Belichtungssystemen“ selbständig verfasst und die benutzten Hilfsmittel und Quellen sowie gegebenenfalls die zu Hilfsleistungen herangezogenen Institutionen vollständig angegeben habe. Die Dissertation wurde nicht schon als Masterarbeit, Diplomarbeit oder ähnliche Prüfungsarbeit verwendet.

Hannover