

**Simulation der solaren Globalstrahlung im
Spektralbereich 280-800 nm für die
Umweltforschung**

Von der Fakultät für Mathematik und Physik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

Doktor der Naturwissenschaften

Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation von

Diplom Physiker (Univ.) Anton Kopatsch

Erscheinungs- bzw. Druckjahr 2022

Referent: Prof. Dr. Gunther Seckmeyer

Korreferent: Prof. Dr. Alexander Heisterkamp

Korreferent: Prof. Dr. Jörg-Peter Schnitzler

Tag der Promotion 03.11.2022

Abstract

A newly developed LED-based solar simulator makes it possible to simulate the near-ground solar spectral irradiance of mid-latitudes in a wavelength range of 280-800 nm. The solar simulator, which is integrated into the ceiling of a climate chamber for plant physiology research, irradiates an area of 1.44 m². In the simulation for a summer day at midday in middle latitudes, solar zenith angle (SZA) of 28.7° and for a cloudless day, the solar simulator produces an integrated spectral irradiance (300-800 nm) of 554 Wm⁻², which corresponds to a percentage deviation of - 2.0 % compared to a spectrum modelled with the uvspec radiation transfer software, with an integrated spectral irradiance of 565 Wm⁻². The mean absolute spectral deviation between the generated spectrum and the reference spectrum, at a spectral resolution of 1 nm, is in maximum of 14 % for solar zenith angles between 29° and 80°, for both cloudless and fully overcast skies. The mean normalized spectral deviation in the same wavelength range is 16 % for the cloudless sky and 17 % for the fully overcast sky, respectively. The horizontal mean inhomogeneity of the integrated irradiance (300-800 nm) is 8.8 %. The maximum irradiance of the new solar simulator is 725 Wm⁻², with an electrical connected load of 16.6 kW. A simulation of the near infrared was dispensed with in favour of saving electrical energy. According to current knowledge, the near infrared cannot be used by plants for photosynthesis, but it does have thermal effects. However, this means that the spectral range of 300-800 nm can be simulated with only half the running energy costs of the existing system. By using the new solar simulator in a climate chamber, the simulation of global radiation, defined as the sum of direct solar irradiance and sky irradiance, can be carried out under laboratory conditions. Since the spatial and diurnal or seasonal changes in global radiation, in terms of spectral distribution and irradiance, influence photobiological processes and have a formative effect on the phenotype of organisms, the simulation of solar global radiation represents an important component for environmental research. To meet these requirements, 23 individually controllable LED types, with peak wavelengths of 360-950 nm, were used for this solar simulator in combination with two different types of UV tubes, with peak wavelengths at 313 and 340 nm, in combination with filter glasses. The calculation of the ideal linear combination of the different radiation sources, to generate a desired spectrum, was realized by a "Non Negative Least Square" algorithm. In total, the developed solar simulator contains 2938 high-power LEDs or "chip on board" LEDs distributed over 110 light engines, 100 digitally addressable constant current sources, 96 UV tubes, filter glasses and actively cooled heat sinks for the light engines. By using such a solar simulator, the knowledge gained through basic research can contribute to the general understanding of the complex processes of biological organisms in a changing environment.

Sunsimulator, LED, plant research, sun radiation

Zusammenfassung

Ein neu entwickelter Sonnensimulator auf LED-Basis erlaubt es die bodennahe solare spektrale Bestrahlungsstärke mittlerer Breiten in einem Wellenlängenbereich von 280-800 nm zu simulieren. Der in die Decke einer Klimakammer für die pflanzenphysiologische Forschung integrierte Sonnensimulator bestrahlt dabei eine Fläche von 1,44 m². Bei der Simulation für einen Sommertag zur Mittagszeit in mittleren Breiten, also einem Sonnenzenitwinkel (SZA) von 28,7° und für einen wolkenlosen Tag, erzeugt der Sonnensimulator eine integrierte spektrale Bestrahlungsstärke (300-800 nm) von 554 Wm⁻², was im Vergleich zu einem mit der Strahlungstransfer-Software uvspec modellierten Spektrum, mit einer integrierten spektralen Bestrahlungsstärke von 565 Wm⁻², einer prozentualen Abweichung von - 2,0 % entspricht. Die mittlere absolute spektrale Abweichung zwischen dem erzeugten Spektrum und dem Referenzspektrum, liegt bei einer spektralen Auflösung von 1 nm bei maximal 14 % für solare Zenitwinkel zwischen 29° und 80°, sowohl für den wolkenlosen als auch für einen vollständig bedeckten Himmel. Die mittlere normierte spektrale Abweichung liegt im gleichen Wellenlängenbereich bei 16 % für den wolkenlosen Himmel und bei 17 % für den vollständig bedeckten Himmel. Die horizontale mittlere Inhomogenität der integrierten Bestrahlungsstärke (300-800 nm) beträgt 8,8 %. Die maximale Bestrahlungsstärke des neuen Sonnensimulators beträgt 725 Wm⁻², bei einer elektrischen Anschlussleistung von 16,6 kW. Auf eine Simulation des nahen Infrarots wurde zugunsten der Einsparung elektrischer Energie verzichtet. Das nahe Infrarot kann nach gegenwärtigem Wissensstand von den Pflanzen nicht zur Photosynthese verwendet werden, hat aber thermische Wirkungen. Dadurch kann jedoch der Spektralbereich von 300 bis 800 nm mit nur halb so hohen laufenden Energiekosten simuliert werden wie beim Bestandssystem. Durch die Verwendung des neuen Sonnensimulators in einer Klimakammer, kann die Simulation der Globalstrahlung, definiert als Summe von direkter Sonnenbestrahlungsstärke und Himmelsbestrahlungsstärke, unter Laborbedingungen durchgeführt werden. Da die räumlichen und tages- bzw. jahreszeitlichen Veränderungen der Globalstrahlung, hinsichtlich der Spektralverteilung sowie der Bestrahlungsstärke, photobiologische Prozesse beeinflussen und eine prägende Kraft auf den Phänotyp von Organismen haben, stellt die Simulation der solaren Globalstrahlung eine wichtige Komponente für die Umweltforschung dar. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden für diesen Sonnensimulator 23 individuell ansteuerbare LED Typen, mit Peakwellenlängen von 360-950 nm, in Verbindung mit zwei verschiedenen Typen von UV-Röhren, Peakwellenlänge 313 und 340 nm, in Kombination mit Filtergläsern verwendet. Die Berechnung der idealen Linearkombination der verschiedenen Strahlungsquellen, zur Erzeugung eines gewünschten Spektrums, wurde durch einen „Non Negative Least Square“ Algorithmus realisiert. Insgesamt beinhaltet der Sonnensimulator 2938 Hochleistungs LEDs bzw. „Chip on Board“ LEDs, die auf 110 Light Engines verteilt sind, 100 digital adressierbare Konstantstromquellen, 96 UV-Röhren, Filtergläser und aktiv gekühlte Kühlkörper für die Light Engines. Durch die Verwendung eines solchen Sonnensimulators können die durch Grundlagenforschung gewonnenen Erkenntnisse zum generellen Verständnis der komplexen Vorgänge von biologischen Organismen in einer sich verändernden Umwelt beitragen.

Sonnensimulator, LED, Pflanzenforschung, Sonnenstrahlung

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i>	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziele der Arbeit	3
2	<i>Stand der Wissenschaft und Technik</i>	4
2.1	Definition der Strahlungsgrößen	4
2.2	Einflussfaktoren auf die Globalstrahlung und deren Variabilität.....	5
2.2.1	Solarkonstante	10
2.2.2	Sonnenhöhe bzw. solarer Zenitwinkel	11
2.2.3	Diffuse und direkte Strahlung	13
2.2.4	Wolken	13
2.2.5	Boden-Albedo.....	15
2.2.6	Ozon	16
2.2.7	Höhe des Messstandorts.....	17
2.3	Bedeutung der spektralen Bestrahlungsstärke für Pflanzen.....	18
2.4	Simulation der spektralen Bestrahlungsstärke in Klimakammern	19
3	<i>LED-System zur Simulation der solaren Globalstrahlung im Bereich 360 - 800 nm</i>	25
3.1	Methoden & Material.....	25
3.1.1	Array-Radiometer.....	25
3.1.2	“Non Negative Least Square” NNLS-Algorithmus	25
3.1.3	Untersuchung der am Markt verfügbaren Hochleistungs-LEDs	26
3.1.4	Entwicklung eines LED-Kühlsystems	30
3.1.5	Entwicklung der „Light Engines“	30
3.1.6	Schema des gesamten LED-Felds	32
3.1.7	Konstantstromquellen für „Light Engines“	33
3.1.8	Steuerung der verschiedenen „Light Engines“ mittels DALI	34
3.2	Ergebnisse.....	35
3.2.1	Aufbau eines LED-Sonnensimulators	35
3.2.2	Charakterisierung der verschiedenen LED-Typen.....	36
3.2.3	Zusammengesetztes Spektrum zur Simulation der spektralen Bestrahlungsstärke.....	39
3.2.4	Inhomogenitätsverteilung der Bestrahlungsstärke für verschiedene Wellenlängenbereiche im Prototyp	42

Inhaltsverzeichnis

3.2.5	Simulation eines Tagesgangs der solaren Globalstrahlung im Bereich 360-800 nm für wolkenlosen Himmel.....	44
3.2.6	Simulation von Spektren für verschiedene Anwendungsbereiche.....	46
3.3	Diskussion	47
4	<i>Hybrid-System zur Simulation der solaren Globalstrahlung im Bereich 280-800 nm in einer Klimakammer.....</i>	51
4.1	Methoden & Material.....	51
4.1.1	Umbau der Klimakammer	51
4.1.2	Verwendete Glasfilter und deren Transmissionseigenschaften	53
4.2	Ergebnisse.....	55
4.2.1	Realisierung eines Hybrid-Sonnensimulators	55
4.2.2	Charakterisierung der verschiedenen Strahlungsquellen im Hybrid-Sonnensimulator.....	56
4.2.3	Simulation der solaren Globalstrahlung für wolkenlosen Himmel.....	59
4.2.4	Inhomogenitätsverteilung der Bestrahlungsstärke für die Bereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 280 – 800 nm	62
4.2.5	Simulation der solaren Globalstrahlung für vollständig bedeckten Himmel.....	67
4.2.6	„Proof of concept“ Pflanzenversuch	69
4.2.7	Elektrische Energieaufnahme des Hybrid-Sonnensimulators.....	73
4.3	Diskussion	77
5	<i>Vergleich und Einordnung</i>	81
6	<i>Zusammenfassung und Ausblick.....</i>	85
	<i>Literaturverzeichnis.....</i>	87
	<i>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....</i>	98

1 Einleitung

1.1 Motivation

Seit Entstehung der Erde, vor etwa 4,5 Milliarden Jahren (Allegre, Manhès, & Göpel, 1995), ist die Sonne der Hauptlieferant von Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung. Die Sonne erzeugt in ihrem Inneren die Energie durch Kernfusion. Daraus resultiert eine extraterrestrische Solarstrahlung, die von ca. 200 nm bis 3200 nm reicht (Tevini & Häder, 1985). Die extraterrestrische Bestrahlungsstärke für diesen Wellenlängenbereich beträgt $1360,8 \pm 0,5 \text{ Wm}^{-2}$ oberhalb der Erdatmosphäre, in Abhängigkeit vom Sonnenzyklus (Kopp & Lean, 2011). Durch die photochemische Evolution, getrieben von der energiereichen Strahlung der Sonne, entstanden in der frühen Geschichte der Erde lichtabsorbierende Pigmente (Chlorophylle, Carotinoide), mit denen bakterienähnliche Organismen die Energie der Solarstrahlung in chemische Energie umwandeln konnten, die sogenannte Photosynthese (Blankenship, 2010; Stirbet, Lazár, Guo, & Govindjee, 2020). In den weiteren Prozessen der Evolution entstanden aus diesen Organismen niedere und höhere Pflanzen. Bei der Photosynthese grüner Pflanzen werden mit Hilfe der Strahlungsenergie der Sonne durch photochemische Prozesse aus Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) hochwertige Kohlenhydrate synthetisiert, zudem entsteht bei diesem endergonischen Prozess reiner Sauerstoff (O_2) (Tevini & Häder, 1985). Durch die über Millionen Jahre erfolgte Anreicherung von O_2 in der Atmosphäre und die Entstehung einer atmosphärischen Ozonschicht konnte hochenergetische extraterrestrische UV-Strahlung soweit durch Absorption des Ozons reduziert werden, dass auch höheres terrestrisches Leben auf der Erde ermöglicht wurde und die Evolution fortschreiten konnte (Kasting, Zahnle, Pinto, & Young, 1989; Zeeshan & Prasad, 2009).

Daher verwundert es nicht, dass die meisten der heute auf der Erde lebenden Organismen, Menschen, Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen, sich im Laufe der Evolution an die solare Globalstrahlung angepasst haben (Bass, 2012; Rapf & Vaida, 2016; Wurtman, 1975). Die solare Globalstrahlung, die die Erdoberfläche erreicht, ist jedoch nicht identisch mit der extraterrestrischen solaren spektralen Bestrahlungsstärke über der Erdatmosphäre und änderte sich im Laufe der Erdgeschichte dynamisch (Steinhilber, Beer, & Fröhlich, 2009) mit deutlichen jährlichen und tageszeitlichen Schwankungen (Seckmeyer, 1991). Atmosphärische Gase, die die Erde umgeben, wie Wasserdampf, CO_2 , Ozon und andere Spurengase wie $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$, führen zu einer Abschwächung der Globalstrahlung in einigen Spektralbereichen (Iqbal, 1983). Optische Eigenschaften von Wolken und Aerosolen sowie die Reflexion an der Erdoberfläche verändern ebenfalls die solare Globalstrahlung und deren Spektralverteilung (Seckmeyer, 1991). Darüber hinaus beeinflussen Absorption und Reflexion in Pflanzenbeständen die bodennahe solare spektrale Bestrahlungsstärke stark (Reitmayer, Werner, & Fabian, 2002; Théry, 2001). Das Wasser von Ozeanen, Seen und Flüssen modifiziert

ebenfalls die solare Globalbestrahlungsstärke (R. C. Smith & Mobley, 2008). Einige Studien beschäftigen sich mit der spektralen Bestrahlungsstärke in flachen Gewässern (Cruz, Calado, Serodio, & Cartaxana, 2013; Gerringa, Rijkenberg, Timmermans, & Buma, 2004; Shaw & Purdie, 2001).

In vielen Forschungsbereichen, von der Photobiologie (inkl. z. B. Photosynthese, Photomorphogenese, usw.) über die Atmosphärenforschung bis hin zu den Material- und Chemiewissenschaften, werden Beleuchtungssysteme unterschiedlicher Lampentypen, Bestrahlungsstärken und Bauformen für Experimente eingesetzt. So wurde beispielsweise im Projekt EDEN-ISS ein Gewächshauscontainer, in dem Pflanzen mit Licht-Emitternden-Dioden (LED)-Beleuchtung kultiviert wurden, in der Antarktis neben der deutschen Neumayer-Station III erfolgreich getestet (Maiwald et al., 2020). Die US-amerikanische NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) arbeitet bereits seit den 50er Jahren daran, wie man in einem Raumschiff oder einer Raumstation Pflanzen anbauen kann, um die Besatzung mit frischem Gemüse zu versorgen (Wheeler, 2017). In der Atmosphärenforschung werden Wolkensimulationskammern genutzt, um in einer kontrollierbaren Umgebung, unter Verwendung von Beleuchtungssystemen, photochemische Prozesse in der Atmosphäre zu untersuchen (A. M. Fankhauser et al., 2020; Lehtipalo et al., 2018).

Darüber hinaus werden Lichttherapien mittels Fluoreszenzröhren seit vielen Jahren erfolgreich zur Behandlung von bipolaren Depressionen eingesetzt (Tseng et al., 2016). In städtischen Gebieten werden „Indoor“ und „Vertical Farming“ in Zukunft von großer Bedeutung sein, um die Lebensmittelversorgung der Menschen zu verbessern und natürliche Ressourcen wie Wasser zu schützen (Pattison, Tsao, Brainard, & Bugbee, 2018).

In der Abteilung für Experimentelle Umweltsimulation (EUS) des Helmholtz Zentrums München wird seit über 35 Jahren Grundlagenforschungen an Pflanzen betrieben (Roy et al., 2021). Dafür werden Pflanzenexperimente unter Laborbedingungen in Klimakammern, in denen die Zusammensetzung der Luft, Temperatur, Luftfeuchte und die Bestrahlungsstärke reguliert werden können, durchgeführt. In der Literatur werden solche Klimakammern auch als Phytotron bezeichnet (Went, 1949). Zu den Forschungsbereichen der Abteilung gehören der Einfluss des Klimawandels auf Pflanzen und Ökosysteme, Pflanzenkommunikation mittels VOCs (Volatile Organic Compounds), Stressfaktoren für Pflanzen, Einfluss der UV-B Strahlung und Emission von Spurengasen der Pflanzen unter verschiedenen Umweltbedingungen (Díaz-Pinés et al., 2017; Kaling et al., 2015; Niederbacher, Winkler, & Schnitzler, 2015; Rosenkranz, Pugh, Schnitzler, & Arneth, 2015; Schweier et al., 2017; Willing et al., 2016). Die aus diesen Experimenten gewonnenen Erkenntnisse tragen zum generellen Verständnis der komplexen Vorgänge und des Verhaltens von Pflanzen in sich ändernden Umwelten bei. Daraus entstehen wiederum wichtige Folgerungen, zum Beispiel für den Umgang mit Pflanzenkrankheiten, Dünger und Wasserverbrauch in der Agrarwirtschaft und Forstwirtschaft.

Um die Aussagen möglichst belastbar und auf natürliche Verhältnisse übertragbar zu machen sollen die Pflanzenexperimente so gut wie möglich unter realistischen Bedingungen, wie sie

in der Natur vorkommen durchgeführt werden. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Simulation der hochvariablen und sich ständig zeitlich ändernden solaren Globalstrahlung.

Die solare Globalstrahlung und deren zeitliche und räumliche Variationen haben vielfältige Auswirkungen auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen, von der zellulären bis zur ökologischen Ebene. Beim Menschen spielt z. B. das Melatonin-Wirkungsspektrum, das sein Wirkungsmaximum um 460 nm hat, eine wichtige Rolle als Zeitgeber für den zirkadianen Rhythmus (Brainard et al., 2001). Die solare Globalstrahlung hat eine prägende Kraft auf den Phänotyp von Organismen, liefert die Energie für die photochemische Umsetzung von Kohlenstoffverbindungen in Photosynthese betreibenden Organismen und wirkt prädisponierend auf Interaktionen in Lebensgemeinschaften (Carvalho & Castillo, 2018). Viele Zusammenhänge bezüglich der spektralen Verteilung der Globalstrahlung und deren Auswirkungen auf Pflanzen, Menschen, Tiere und Materialien sind jedoch noch nicht ausreichend verstanden (Verdaguer, Jansen, Llorens, Morales, & Neugart, 2017). Ein tiefgreifendes funktionelles Wissen über biologische Wirkungen der solaren Globalstrahlung (Abbildung 2.3a) im Wellenlängenbereich von 280-800 nm und insbesondere der spektralen Verteilung der die Erdoberfläche erreichenden Bestrahlungsstärke ist daher in vielen Bereichen der Umweltforschung von großer Bedeutung. Daher würde die photobiologische Forschung von Experimenten unter umweltkontrollierten Bedingungen, einschließlich eines Beleuchtungssystems, enorm davon profitieren, dass die „natürliche“ solare Globalstrahlung simuliert werden kann.

1.2 Ziele der Arbeit

1. Entwicklung eines LED basierenden Sonnensimulators zur Verwendung in einer Klimakammer für die Umweltforschung.
 - 1.1. Simulation der solaren Globalstrahlung im Wellenlängenbereich von 280 nm bis 800 nm für verschiedene SZA's, sowohl für wolkenlosen wie auch vollständig bedeckten Himmel.
 - 1.2. Geringe horizontale Inhomogenität < 20 % in der Versuchsfläche.
 - 1.3. Aufnahme an elektrischer Energie soll reduziert werden im Vergleich zu dem Bestandssystem.
2. Generierung von Referenzspektren durch Modellierung mit uvspec.
3. Charakterisierung des Sonnensimulator-Prototypen und Hybrid-Sonnensimulators.
4. "Proof of principle" Experiment mit der in der Pflanzenforschung wichtigen Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* (Ackerschmalwand).

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Definition der Strahlungsgrößen

Im Folgenden werden einige, für diese Arbeit, relevante Strahlungsgrößen nach der Norm DIN 5031 Teil 1 März 1982 definiert.

Die Energie q [Ws oder J] eines einzelnen Photons mit der Frequenz f [s^{-1}] beziehungsweise der Wellenlänge λ [m] wird mit der Formel:

$$q = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

beschrieben. Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum und c die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit. Aus der Formel 2.1 folgt, je größer die Frequenz beziehungsweise je kleiner die Wellenlänge ist, desto größer ist die Energie des Photons.

Die Strahlungsenergie Q [Ws oder J] beschreibt die Energie einer bestimmten Anzahl von Photonen integriert über alle Wellenlängen:

$$Q = h \int_0^{\infty} \frac{dN}{d\lambda} \frac{c}{\lambda} d\lambda \quad (2.2)$$

Die Strahlungsleistung ϕ [W oder Js^{-1}] ist definiert als Strahlungsenergie pro Zeiteinheit dt :

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.3)$$

Die spezifische Ausstrahlung M [Wm^{-2}] ist die Strahlungsleistung pro effektiver Senderfläche dA_s :

$$M = \frac{d\phi}{dA_s} \quad (2.4)$$

Die Bestrahlungsstärke E [Wm^{-2}] ist die Strahlungsleistung pro effektiver Empfängerfläche dA_e :

$$E = \frac{d\phi}{dA_e} \quad (2.5)$$

Die spektrale Bestrahlungsstärke E_λ [$Wm^{-2}nm^{-1}$] ist definiert als Bestrahlungsstärke pro Wellenlängenintervall $d\lambda$:

$$E_\lambda = \frac{dE(\lambda)}{d\lambda} \quad (2.6)$$

In dieser Arbeit werden für die Wellenlängenbereiche Ultraviolett-B (UV-B), Ultraviolett-A (UV-A), Photosynthetisch Aktive Strahlung (PAR) und FarRed die Bestrahlungsstärken berechnet, indem die spektrale Bestrahlungsstärke E_λ für die *Tabelle 2.1* angegebenen Wellenlängenbereiche jeweils integriert wird.

Tabelle 2.1: Definition der Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR und FarRed (Ji et al., 2019; Legendre & van Iersel, 2021).

UV-B	280 - 315 nm
UV-A	315 - 400 nm
PAR	400 - 700 nm
FarRed	700 - 800 nm

So wird zum Beispiel zur Berechnung der energetischen PAR-Bestrahlungsstärke [Wm^{-2}] die spektrale Bestrahlungsstärke E_λ von 400 nm bis 700 nm integriert:

$$E_{PAR} = \int_{400 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} E_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (2.7)$$

Diese energetische PAR-Bestrahlungsstärke E_{PAR} wird in der Biologie oft in der Einheit als PAR-Photonen-Bestrahlungsstärke pro mol angegeben:

$$E_{PPAR} = \frac{1}{N_A} \int_{400 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} \frac{\lambda}{hc} E_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

mit N_A [mol^{-1}] als Avogadro-Konstante. Im Englischen wird die Größe E_{PPAR} als „Photosynthetic Photon Flux Density“ (PPFD) bezeichnet und hat die Einheit $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Aphalo et al., 2012).

2.2 Einflussfaktoren auf die Globalstrahlung und deren Variabilität

In der Realität sind die sich zeitlich verändernden Strahlungsverhältnisse am Erdboden so komplex, dass Modellierungen und Simulationen stets nur eine eingeschränkte Momentaufnahme darstellen. Speziell die Simulation der solaren Globalstrahlung in einer Klimakammer ist auf Grund technischer und finanzieller Möglichkeiten stark begrenzt. Eine deutliche Grenze der Simulation stellt die spektrale Strahldichtevertelung dar. Diese wellenlängenabhängige Größe beschreibt die direkte Sonnenstrahlung und die Himmelsstrahlung (Seckmeyer, 1991), die ebenfalls stetigen Veränderungen unterliegen.

Allein zur Messung dieser Veränderungen ist ein hoher technischer Aufwand nötig (Foster, Weide, Niedzwiedz, Duffert, & Seckmeyer, 2021). Daher kann die Simulation der solaren Globalstrahlung in einer Klimakammer immer nur eine begrenzte Näherung der sich zeitlich und räumlich verändernden natürlichen Strahlungsverhältnisse am Erdboden darstellen. Andererseits sind aus diesen Gründen photobiologische Versuche im Freiland im strengen Sinne nicht wiederholbar, da stets andere Strahlungsverhältnisse vorherrschen. In einer Klimakammer mit Sonnensimulator können dagegen photobiologische Versuche im Prinzip unter konstanten Laborbedingungen durchgeführt und wiederholt werden.

Die solare Globalstrahlung ändert sich ständig und hängt von verschiedensten Parametern wie Standort, Atmosphäre, Bewölkung, Bodenbeschaffenheit, Uhrzeit und Jahreszeit etc. ab. Daraus folgt, dass es nur sehr schwer möglich ist, bestimmte Strahlungsverhältnisse, die in einem Experiment angewendet werden sollen, anhand von Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke im Freiland zu simulieren. Für die Erzeugung von Referenzspektren, die bestimmte Strahlungsverhältnisse darstellen sollen, wurde daher in dieser Arbeit die Strahlungstransfermodell-Software libRadtran verwendet (Emde et al., 2016; Bernhard Mayer & Kylling, 2005; Bernhard Mayer, Kylling, Emde, Hamann, & Buras, 2022). Durch die Nutzung dieser Software wird es möglich, näherungsweise verschiedene „natürliche“ Strahlungsbedingungen für wolkenlosen und vollständig bedeckten Himmel zu modellieren, die dann als Zielspektrum für den Sonnensimulator dienen können.

Teil des Software Pakets libRadtran ist uvspec (B. Mayer, Seckmeyer, & Kylling, 1997), mit dessen Hilfe die spektrale Bestrahlungsstärke in Wellenlängenbereichen von 120 nm bis 100 μm modelliert werden kann.

Dafür wurden in dieser Arbeit folgende Eingabeparameter für einen wolkenlosen Himmel verwendet: Strahlungstransfer Gleichungslöser disort, US Standard Atmosphere Profiles (Krueger & Minzner, 1976) (US Standardatmosphäre von 1976), Extraterrestrische spektrale Bestrahlungsstärke mit 1 nm Auflösung (Kurucz, 1994) (dadurch wird die spektrale Auflösung der modellierten spektralen Bestrahlungsstärke definiert), Aerosol Parameter (Shettle, 1989), wellenlängenunabhängige Albedo = 0,2, Höhe 0,483 km (für Neuherberg), Tag 138 des Jahres (Datum: 19.05.2007), Ozonsäule 325 Dobson Einheit (Dobson Unit,DU), Sonnenzenitwinkel (SZA) 28,7°, Luftdruck 1013 mbar, Wellenlängenbereich 280-800 nm.

In Abbildung 2.1a ist die mit uvspec modellierte spektrale Bestrahlungsstärke dargestellt, sowie ein Spektrum, das am 19.05.2007 um 12:18 Uhr mit einem Bentham Doppelmonochromator am Standort Neuherberg bei München mit einer spektralen Auflösung von 1 nm im Wellenlängenbereich 290-800 nm aufgenommen wurde. Der Wert der Ozonsäule von 325 DU wurde für diesen Standort und Tag von der Internetseite <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/neubrew/SatO3DataTimeSeries.jsp> entnommen (Datum der Abfrage: 18.05.2021).

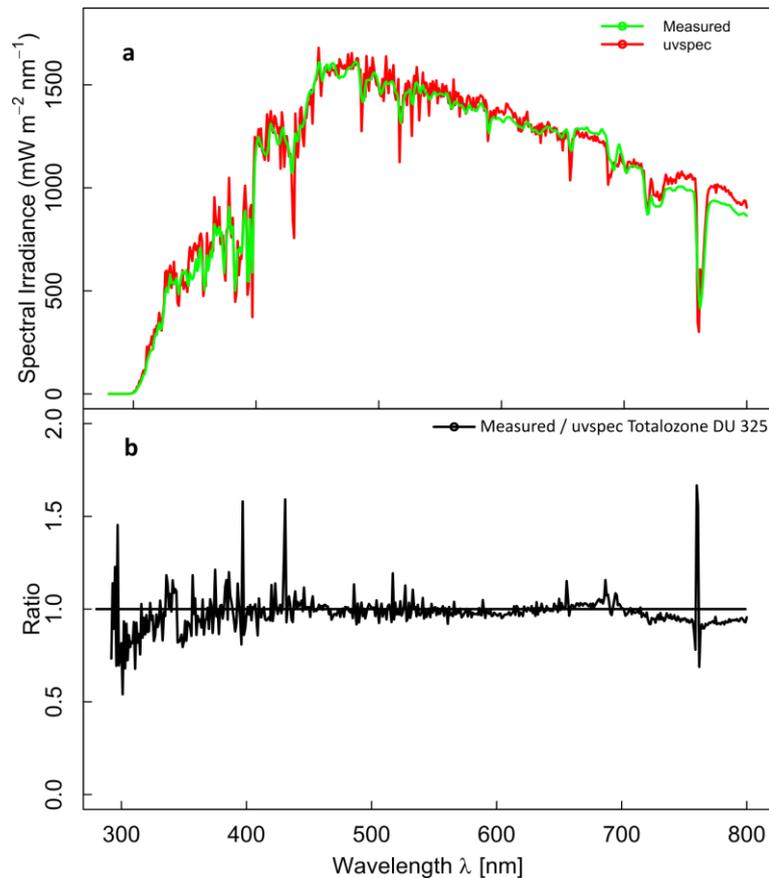


Abbildung 2.1: Gemessenes Spektrum im Vergleich zu der Modellierung mit der Strahlungstransfer-Software uvspec für den Wellenlängenbereich 290 – 800 nm. (a) Gemessene spektrale Bestrahlungsstärke am 19.05.2007 um 12:18 Uhr in Neuherberg bei München und die mit uvspec modellierte spektrale Bestrahlungsstärke. (b) Quotient aus gemessener zu modellierter spektralen Bestrahlungsstärke. Die spektrale Auflösung der Spektren beträgt 1 nm.

Abbildung 2.1b zeigt den Quotienten von gemessenem Spektrum zu modelliertem Spektrum. Im UV-B-Bereich sowie im FarRed-Bereich zeigt sich eine leichte Erhöhung des modellierten Spektrums gegenüber dem gemessenen Spektrum. Im UV-A und PAR-Bereich sind die Abweichungen geringer. Für eine quantitative Bewertung sind in der Tabelle 2.2 die integrierten spektralen Bestrahlungsstärken für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300-800 nm für das mit uvspec modellierte Spektrum sowie für das im Freiland gemessene Spektrum und deren Abweichungen zueinander in Prozent angegeben. Im UV-B-Bereich ergibt sich eine prozentuale Abweichung von -18,6 %, im UV-A-Bereich von -4,0 %, im Par-Bereich von -0,2 %, im FarRed-Bereich von -5,1 % und im Bereich 300-800 nm von -1,4 %.

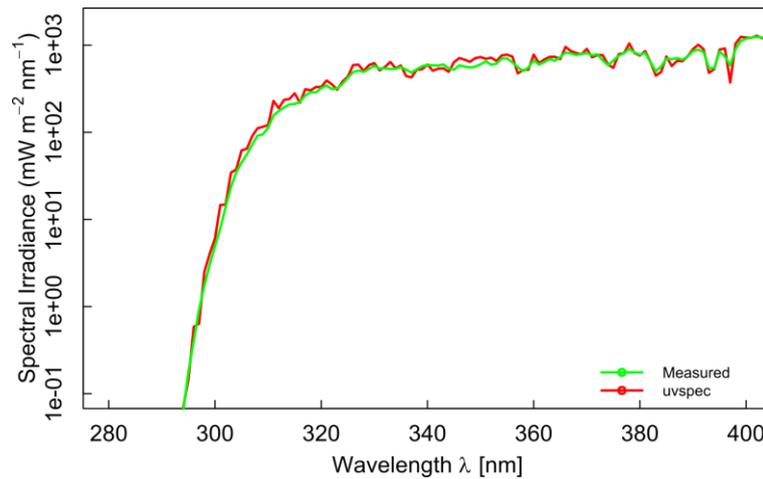


Abbildung 2.2: Gemessenes Spektrum im Vergleich zu der Modellierung mit der Strahlungstransfer-Software uvspec, die y-Achse ist logarithmisch aufgetragen.

Zur Beurteilung der mittleren absoluten spektralen Abweichung SPD (relative Spectral Deviation), definiert in der internationalen Standard IEC 60904-3 Norm zur Beurteilung von Sonnensimulatoren, zwischen dem uvspec Referenz-Spektrum $E_{Ref}(\lambda)$ und gemessenen Spektrum $E_{measured}(\lambda)$ wurde folgende Formel (2.9) auf die Wellenlängenbereiche UV-B ($\lambda_1=280$ nm; $\lambda_2=315$ nm), UV-A ($\lambda_1=315$ nm; $\lambda_2=400$ nm), PAR ($\lambda_1=400$ nm; $\lambda_2=700$ nm), FarRed ($\lambda_1=700$ nm; $\lambda_2=800$ nm sowie $\lambda_1=300$ nm; $\lambda_2=800$ nm) mit einer spektralen Auflösung $\Delta\lambda$ von 1 nm angewendet:

$$SPD(\lambda_1, \lambda_2) = \left(\frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} |E_{measured}(\lambda) - E_{Ref}(\lambda)| * \Delta\lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{Ref}(\lambda) * \Delta\lambda} \right) * 100\% \quad (2.9)$$

Es ergaben sich unterschiedliche SPD-Werte für die jeweiligen Wellenlängenbereiche, siehe Tabelle 2.2. Am größten ist SPD mit einem Wert von 23,2 % im UV-B-Bereich. Dies könnte an dem für die Modellierung verwendeten über den Tag gemittelten Ozon-Wert von 325 DU liegen. Für den UV-A-Bereich ergab sich ein SPD-Wert von 9,7 %, für den PAR-Bereich von 3,1 % und für den FarRed-Bereich ergab sich ein SPD-Wert von 6,2 %. Über den Wellenlängenbereich von 300-800 nm ergab sich ein SPD-Wert zwischen Messung und Modell von 4,3 %.

Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung der spektralen Anpassung zwischen Referenz-Spektrum und dem simulierten bzw. gemessenen Spektrum wird mit der Formeln (2.10), (2.11) und (2.12) erreicht. Dafür wird mit der Formel (2.10) die normierte spektrale Abweichung (NSA) berechnet, in der alle Wellenlängen gleich gewichtet sind. Der mit der Formel (2.11) berechnete Mittelwert aus NSA (MNSA), mit $n = 500$, entspricht einer spektralen Auflösung von 1 nm im Wellenlängenbereich zwischen 300-800 nm, ist dann ein Maß für die mittlere Abweichung pro 1 nm in Prozent. Mit der Formel (2.12) wird dann die mittlere

quadratische Abweichung (MQA) von NSA berechnet und dient damit als Maß für die Streuung von NSA.

$$NSA(\lambda) = \left| \frac{E_{measured}(\lambda) - E_{Ref}(\lambda)}{E_{Ref}(\lambda)} \right| * 100\% \quad (2.10)$$

$$MNSA = \frac{1}{n} \sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=800\text{ nm}} \left| \frac{E_{measured}(\lambda) - E_{Ref}(\lambda)}{E_{Ref}(\lambda)} \right| * 100\% \quad (2.11)$$

$$MQA = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=800\text{ nm}} (NSA(\lambda) - \overline{MNSA})^2} \quad (2.12)$$

Für die Bewertung der spektralen Anpassung, zwischen den mit uvspec modelliertem Spektrum und dem im Freiland gemessenen Spektrum, ergab sich ein Wert für MNSA von 5,6 % und für MQA ergab sich ein Wert von 7,3 %.

Tabelle 2.2: Integrierte spektrale Bestrahlungsstärken für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300 – 800 nm jeweils für das mit uvspec modellierte Spektrum und das im Freiland gemessene Spektrum, sowie die prozentualen Abweichungen der gewichteten Bestrahlungsstärken für die jeweiligen Wellenlängenbereiche in Prozent. Zusätzlich wurde die mittlere absolute spektrale Abweichung (SPD) für die jeweiligen Wellenlängenbereiche mit der Formel (2.9) berechnet, die spektrale Auflösung für das modellierte Spektrum und das gemessene Spektrum betrug 1 nm.

	UV-B	UV-A	PAR	FarRed	300 – 800 nm
uvspec [Wm ⁻²]	1,7	54,8	411	98,2	565
Messung [Wm ⁻²]	1,4	52,6	410	93,2	557
Abweichung [%]	-18,6	-4,0	-0,2	-5,1	-1,4
SPD [%]	23,2	9,7	3,1	6,2	4,3

Die Strahlungstransfer-Modellierung ist eine komplexe Aufgabe und beinhaltet einige Unsicherheiten bezüglich der vorhandenen Eingabeparameter für das Modell. Bei dem Vergleich von Messung zu Modellierung entstehen zusätzlich Unsicherheiten, die durch die Messung verursacht werden. Systematische Untersuchungen der Abweichung zwischen

Modell und Messungen haben gezeigt (Bernhard & Seckmeyer, 1999; Forster, Shine, & Webb, 1995; Bernhard Mayer & Kylling, 2005; B. Mayer et al., 1997), dass uvspec, im Rahmen der Unsicherheiten, robuste Ergebnisse liefert. Diese Untersuchungen wurden hauptsächlich im UV-B- und UV-A-Wellenlängenbereich durchgeführt, dabei wurden bei den Messungen weitere Korrekturen, wie Kosinus Korrektur des Diffusers, Wellenlängenanpassung, Schlitzfunktion des Messgeräts, zum Teil angewendet. Die Eingabeparameter von uvspec wurden zum Teil durch Messungen der direkten spektralen Bestrahlungsstärke und der daraus berechneten optischen Dicke, sowie der Ozonsäule angepasst und der Sonnenzenitwinkel (Solar Zenit Angle) SZA für jede Wellenlänge spezifiziert.

Zur Verwendung der mit uvspec modellierten Spektren als Zielspektren bzw. Referenzspektren für einen Sonnensimulator zeigen die hier erzielten Ergebnisse sowie die Verweise auf die Literatur (siehe Absatz darüber), dass die Modellierung mit uvspec dafür geeignet ist.

Uvspec bietet zudem die Möglichkeit die spektrale Bestrahlungsstärke zu modellieren, wie sie bei vollständig bedecktem Himmel und homogener Bewölkung vorliegt. Definiert wird dafür (i) die Höhe in km, in der sich die Wolkendecke befindet, (ii) Dicke der Wolkendecke, (iii) der Flüssigwassergehalt in Gramm pro Kubikmeter der Wolkendecke und der (iv) effektive Tröpfchenradius der Wasserpartikel in Mikrometer. Zusätzlich können in uvspec Einflussparameter der spektralen Bestrahlungsstärke wie SZA, Boden-Albedo, Ozonsäule, Höhe etc. variiert werden. Dies wird in Kapitel 4 zur Erzeugung von Referenzspektren zur Simulation der Globalstrahlung in einer Klimakammer genutzt, um „natürliche“ Strahlungssituationen näherungsweise zu simulieren. Im Folgenden wird auf einige Einflussgrößen, die mit uvspec modellierbar sind, eingegangen und deren Zusammenhang mit den Streu- und Absorptionsprozessen in der Erdatmosphäre in Bezug gebracht.

2.2.1 Solarkonstante

Im Inneren der Sonne werden durch Kernfusion von Wasserstoffatomen zu Heliumatomen, bei Temperaturen von mehreren Millionen Grad Celsius, große Mengen an Energie erzeugt. Diese Energie resultiert aus dem Massenverlust der Sonne nach dem Einstein-Gesetz $E = mc^2$, wobei pro Kernfusion die Massendifferenz m der vier Wasserstoffatome zu der Masse des Heliumatoms und c die Lichtgeschwindigkeit ist. Pro Sekunde werden so etwa fünf Millionen Tonnen Wasserstoff in Wärmeenergie umgewandelt, die dann an der Sonnenoberfläche in Form von elektromagnetischer Strahlung abgestrahlt wird (Liou, 1980). An der Sonnenoberfläche ergibt sich, durch die Kernfusion im Inneren der Sonne, eine gemittelte Temperatur von circa 5800 K. In Abbildung 2.3 wird die mit dem Planckschen Strahlungsgesetz (Meschede, 2015) berechnete Schwarzkörperstrahlung gezeigt, die sich bei einem Sonnenradius von $6,98 \times 10^8$ m und ein Abstand von Sonne zu Erde von $1,5 \times 10^{11}$ m ergibt. Des Weiteren wird ein extraterrestrisches Sonnenspektrum (Kurucz, 1994), das oberhalb der

Erdatmosphäre gemessen wurde, gezeigt und im Vergleich dazu ein Spektrum, wie es an der Erdoberfläche gemessen werden könnte.

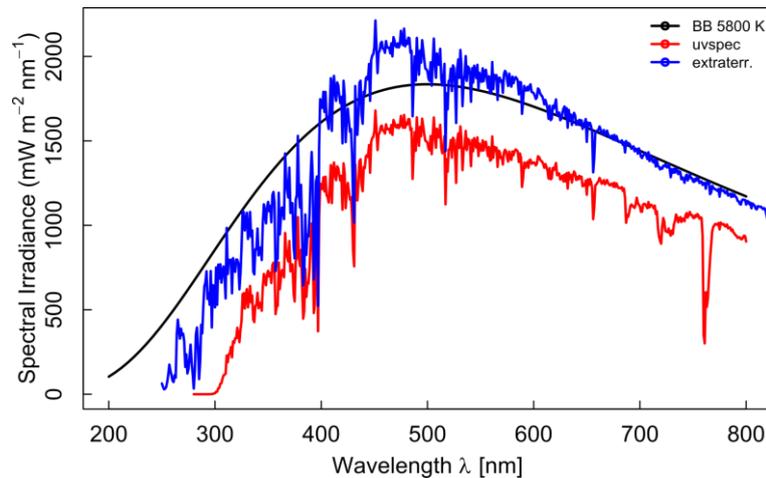


Abbildung 2.3: Extraterrestrische Solarstrahlung (Kurucz, 1994), Schwarzkörperstrahlung $T = 5800\text{ K}$ (BB 5800 K), spektrale Bestrahlungsstärke am Erdboden, modelliert mit *uvspec*.

Der Unterschied aus extraterrestrischem Solarspektrum und dem Spektrum, das an der Erdoberfläche gemessen werden kann, resultiert aus Streu- und Absorptionsprozessen in der Erdatmosphäre. Wird das extraterrestrische Solarspektrum über alle Wellenlängen integriert, ergibt sich die sogenannte Solarkonstante mit einem Wert von $1360,8 \pm 0,5\text{ Wm}^{-2}$ (Kopp & Lean, 2011). Vergleicht man die berechnete Schwarzkörperstrahlung für 5800 K und das extraterrestrische Sonnenspektrum, ist zu erkennen, dass die Sonnenstrahlung nur annähernd als „schwarz“ bezeichnet werden kann, da die äußeren, kühleren Schichten der Sonne die Fraunhofer-Linien absorbieren und zum Ausgleich andere Spektralgebiete verstärken (Meschede, 2015).

2.2.2 Sonnenhöhe bzw. solarer Zenitwinkel

Den größten Einfluss auf die spektrale Bestrahlungsstärke am Erdboden hat der Sonnenzenitwinkel (Solar Zenit Angle) SZA. Dieser bestimmt auch die optische Weglänge der Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre. Bei einem SZA von 0° steht die Sonne direkt im Zenit, für diesen Fall ist die optische Weglänge der elektromagnetischen Strahlung am kürzesten. Dadurch finden weniger Streu- und Absorptionsprozesse in der Atmosphäre statt, und die gemessene Bestrahlungsstärke am Erdboden ist für diesen Fall maximal. In Abbildung 2.4a sind spektrale Bestrahlungsstärken gezeigt die mit *uvspec* für folgende SZA modelliert wurden: $10^\circ - 85^\circ$, Abbildung 2.4b zeigt die Quotienten der spektralen Bestrahlungsstärke SZA $30^\circ - 85^\circ$ zur spektralen Bestrahlungsstärke bei SZA 10° .

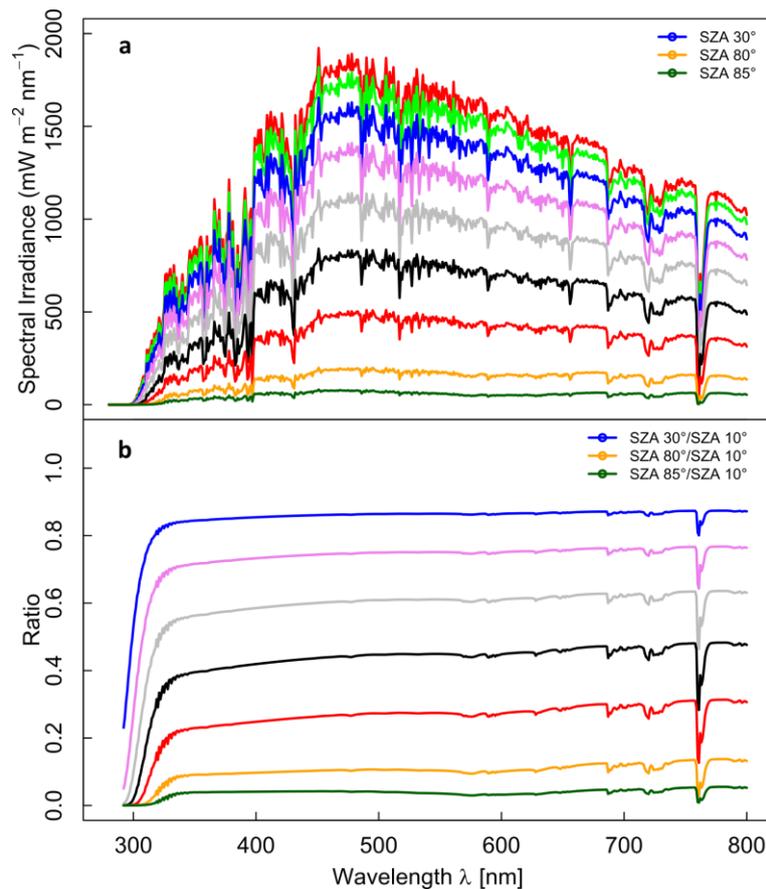


Abbildung 2.4: Sonnenzenitwinkel SZA. (a) Spektrale Bestrahlungsstärke für verschiedene SZA, modelliert mit uvspec. (b) Quotient der spektralen Bestrahlungsstärke SZA 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° und 85° zur spektralen Bestrahlungsstärke bei SZA 10°. Man erkennt, dass für größer werdende SZA der Quotient zu SZA 10° kleiner wird, allerdings werden einige Spektralbereiche stärker beeinflusst als andere, und für unterschiedliche SZA ergeben sich unterschiedliche spektrale Verteilungen.

Für größer werdende SZA steigt die optische Weglänge, und Streu- und Absorptionsprozesse nehmen zu. Dies führt wiederum zu einer Verringerung der Bestrahlungsstärke. Durch die verschiedenen Haupt- und Spurengase in der Atmosphäre werden für verschiedene SZA beziehungsweise verschiedene optische Weglängen bestimmte Spektralbereiche stärker oder schwächer beeinflusst. Daraus resultiert, dass die spektrale Verteilung sich ebenfalls, für unterschiedliche SZA, verändert. Bei einem SZA von 90° ist die Sonne direkt am Horizont, und die Strahlung hat einen langen optischen Weg durch die Atmosphäre. Dadurch, dass die Streuung an atmosphärischen Spurengasen in Abhängigkeit von der Wellenlänge in guter Näherung λ^{-4} beträgt, wird die Strahlung kleinerer Wellenlängen stärker gestreut als die Strahlung großer Wellenlängen (Iqbal, 1983). Als Folge erscheint die untergehende Sonne rötlich (Liou, 1980).

2.2.3 Diffuse und direkte Strahlung

Die Summe von diffuser und direkter spektraler Bestrahlungsstärke auf einer horizontal stehenden Fläche wird als Globalstrahlung bezeichnet (Seckmeyer et al., 2001). Abbildung 2.5 zeigt die mit uvspec für SZA 28,7° modellierte diffuse, direkte spektrale Bestrahlungsstärke auf die ebene Fläche und die daraus resultierende Globalbestrahlungsstärke.

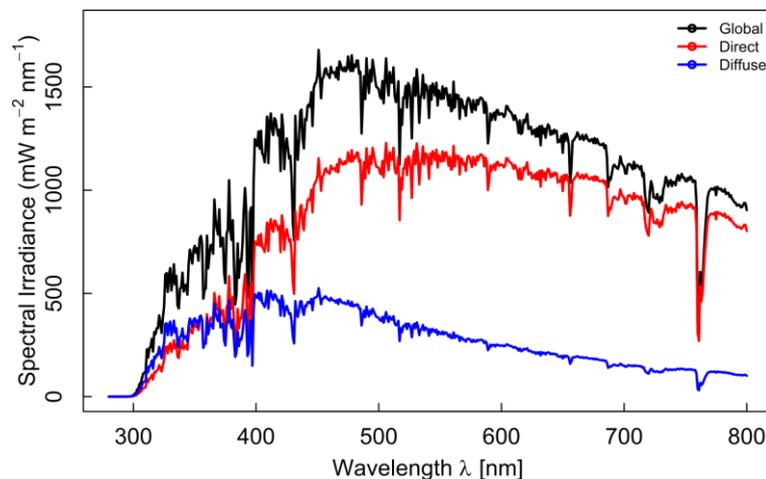


Abbildung 2.5: Globale, diffuse und direkte spektrale Bestrahlungsstärke, modelliert mit uvspec für einen SZA von 28,7°.

Die diffuse spektrale Bestrahlungsstärke entsteht durch Streuung der elektromagnetischen Wellen an Teilchen in der Atmosphäre. Dabei wird die Streuung an Teilchen, deren Durchmesser 1/10 der Wellenlänge beträgt, dies sind Spurengase der Atmosphäre wie Stickstoff und Sauerstoff, mit Hilfe der wellenlängenabhängigen Rayleigh-Streuung beschrieben. Die Streuung an größeren kugelförmigen Teilchen wird als Mie-Streuung bezeichnet. Mit Hilfe der Mie-Streuung kann die Streuung an Aerosolen sowie an festen und flüssigen Partikeln näherungsweise berechnet werden. Sie ist ebenfalls wellenlängenabhängig und beschreibt den im Realen nicht existierenden Fall, dass die Streukörper ausschließlich aus idealen Kugeln bestehen (Iqbal, 1983).

2.2.4 Wolken

Eine weitere wichtige Einflussgröße auf die Globalstrahlung sind Wolken, diese bedecken regelmäßig etwa 50 % der Erde (Liou, 1980). Neben der Streuung an Aerosolen und Spurengasen wird die direkte Strahlung auf dem Weg zum Erdboden durch Wolken abgeschwächt und diffus gestreut. Diese Vorgänge hängen stark von der Beschaffenheit der Bewölkung ab, es wird unterschieden zwischen durchgehender und gebrochener Bewölkung. Weitere Eigenschaften der Wolken sind die Größe, der Wassergehalt, der effektive Wasser-

Tröpfchenradius, die Höhe, in der sich die Wolken befinden, Anzahl der Wolkenschichten etc., die einen Einfluss auf die Globalstrahlung haben. Zudem kommt es auf Grund des Reflektionsvermögens der Wolken zu Vielfachreflektionen zwischen Erdboden und Wolken (Iqbal, 1983). Eine durchbrochene Bewölkung kann zu einer Erhöhung der UV-Strahlung auf Grund von Reflektionen an Wolken führen (Seckmeyer et al., 1997).

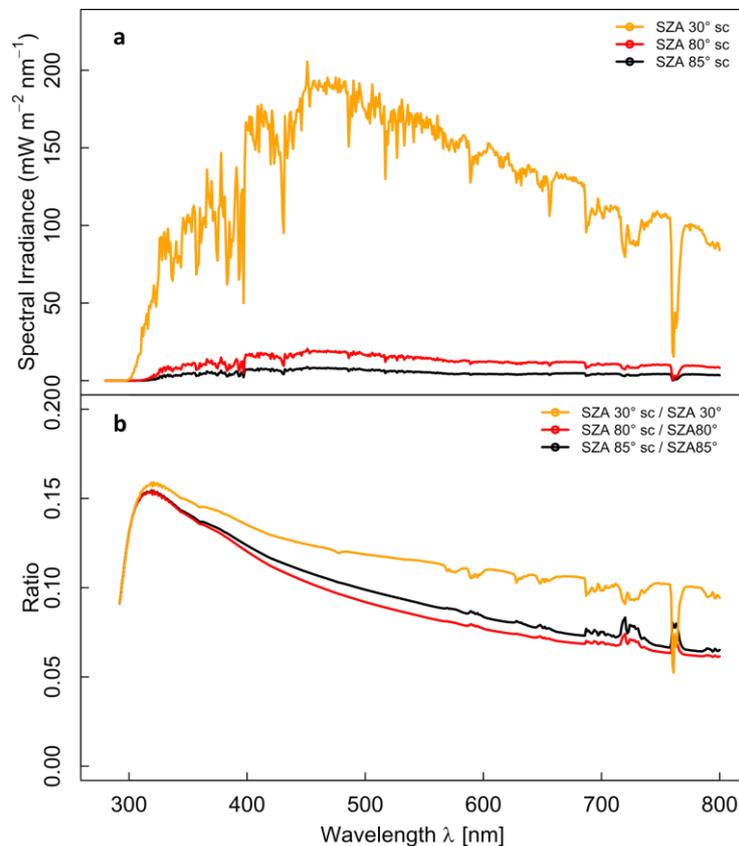


Abbildung 2.6: (a) Spektrale Bestrahlungsstärke für vollständig bedeckten Himmel bei SZA 30°, 80° und 85°, modelliert mit uvspec. (b) Quotient der spektralen Bestrahlungsstärke von vollständig bedecktem Himmel zu spektraler Bestrahlungsstärke bei wolkenlosem Himmel für SZA 30°, 80° und 85°. Modelliert mit uvspec. Die Spektren haben eine Auflösung von 1 nm.

Abbildung 2.6a zeigt die mit uvspec modellierten spektralen Bestrahlungsstärken für SZA 30°, 80° und 85° bei komplett bedecktem Himmel mit folgenden Parametern der Wolkendecke: Bewölkung Fraktionsfaktor 1, Bewölkung zwischen 3000-4000 Meter Höhe mit $0,2 \text{ gm}^{-3}$ Wassergehalt und effektivem Tröpfchenradius von $3,4 \mu\text{m}$. In Abbildung 2.6b werden die Quotienten aus spektralen Bestrahlungsstärken für SZA 30°, 80° und 85° bei komplett bedecktem Himmel zu spektralen Bestrahlungsstärken bei wolkenlosem Himmel für SZA 30°, 80° und 85° dargestellt.

Meist führt eine Bewölkung zu einer wellenlängenabhängigen Abschwächung der Globalstrahlung. Allerdings wurde in (Seckmeyer et al., 1997) gezeigt, dass es zu einer Strahlungsüberhöhung durch Wolken im UV-Bereich kommen kann.

2.2.5 Boden-Albedo

Eine weitere Einflussgröße auf die spektrale Bestrahlungsstärke am Erdboden ist das Reflexionsvermögen der Erdoberfläche. Dieses Reflexionsvermögen der Erdoberfläche wird im Zusammenhang mit der Solarstrahlung als Albedo bezeichnet, die mit der folgenden Formel definiert wird (Seckmeyer et al., 2001):

$$a = \frac{M_G}{E_G} \quad (2.13)$$

wobei E_G die Globalstrahlung ist und M_G die spezifische Ausstrahlung der Erdoberfläche, daher das Verhältnis zwischen Strahlungsleistung ϕ reflektiert von der Oberfläche im Wellenlängenbereich 300 – 3000 nm und der Fläche A der Oberfläche. Je nach Bodenbeschaffenheit wird ein Teil der eintreffenden Strahlung diffus reflektiert und verändert somit die Globalstrahlung (siehe Abbildung 2.7a). Für unterschiedliche Erdoberflächen wie Wasser, Gras, Sand und Schnee ändert sich die wellenlängenabhängige Albedo (Feister & Grewe, 1995; Iqbal, 1983). In Abbildung 2.7b sind die Verhältnisse der Globalstrahlung für verschiedene wellenlängenabhängige Albedo zu der Globalstrahlung für eine konstante Albedo von 0,2 dargestellt.

Man erkennt, dass die Globalstrahlung, wenn die Erdoberfläche aus Pflanzenvegetation (in diesem Fall Gras) besteht, im Bereich von 290 bis 750 nm geringer ist als die Globalstrahlung für eine konstante Albedo von 0,2. Dies kann erklärt werden durch die Absorption der Strahlung durch Pflanzen, die diese absorbierte Strahlung zu photochemischen und biologischen Prozessen (wie z.B. die Photosynthese) nutzen, siehe Kapitel 2.3.

Bei Schnee an der Erdoberfläche zeigt sich, dass die Globalstrahlung erhöht ist im Vergleich zur Globalstrahlung mit konstanter Albedo von 0,2. Besonders stark ist die Erhöhung im UV-Bereich, diese Erhöhung kann bis zu 50 % betragen (Lenoble, 1998). Dies resultiert aus der hohen Reflektivität von Schnee, die aber sehr stark von der Schneebeschaffenheit wie Körnigkeit, Temperatur, Feuchtigkeit, Dichte und der Dicke der Schneedecke abhängt (Perovich, 2007).

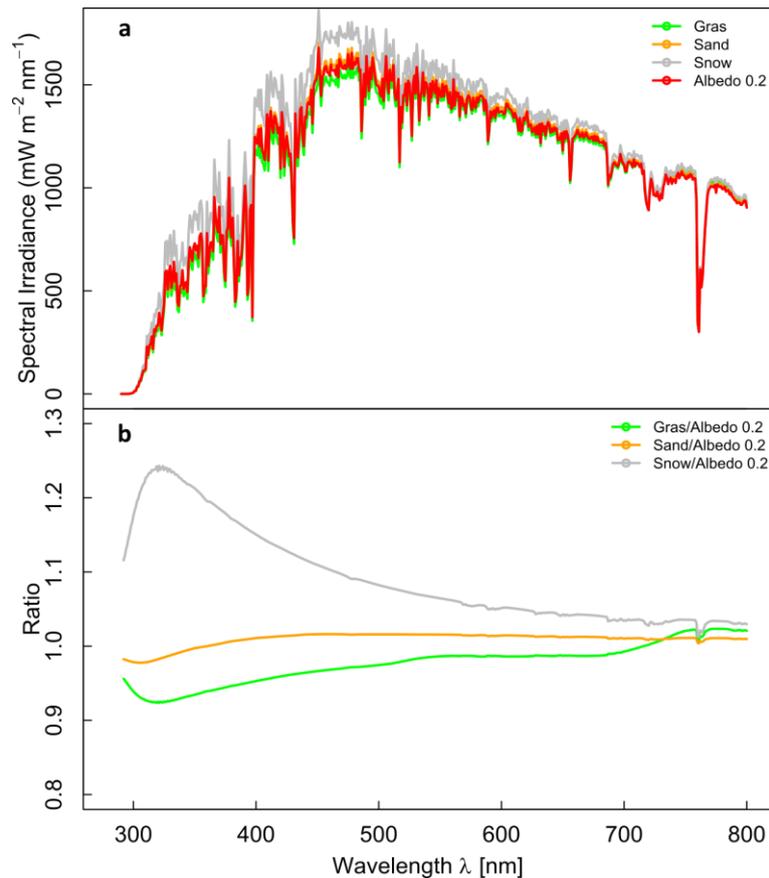


Abbildung 2.7: (a) Spektrale Bestrahlungsstärken bei SZA $28,7^\circ$ für wellenlängenabhängige Albedo von Gras, Sand und Schnee (Feister & Grewe, 1995), modelliert mit uvspec. (b) Quotient der spektralen Bestrahlungsstärke von wellenlängenabhängiger Albedo von verschiedenen Erdoberflächen wie Gras, Sand oder Schnee zur spektralen Bestrahlungsstärke konstanter Albedo von 0,2. Wellenlängenbereich 290–800 nm.

2.2.6 Ozon

Ein wichtiges Spurengas der Atmosphäre ist das aus drei Sauerstoffatomen bestehende Ozon (O_3). Der Volumenanteil von Ozon an der Atmosphäre beträgt etwa $1\text{--}12 \times 10^{-4} \%$ (U.S. Standard Atmosphäre), dies entspricht bei Normaltemperatur ($T = 273 \text{ K}$) und Normaldruck ($p = 1013 \text{ hPa}$) einer gemittelten Schichtdicke von etwa $0,34 \text{ cm}$ beziehungsweise $340 \text{ Dobson Units (DU)}$. Hauptsächlich befindet sich das Ozon in der Stratosphäre in einer Höhe zwischen 10 und 35 km und zu einem geringeren Anteil als Folge von Luftverschmutzung in der Troposphäre bei einer Höhe zwischen 0 und 10 km . Abbildung 2.8 zeigt die mit uvspec modellierten spektralen Bestrahlungsstärken bei SZA $28,7^\circ$ für die Ozonwerte von 100 DU , 300 DU und 500 DU . Bis zu einer Wellenlänge von 285 nm wird praktisch die gesamte UV-Strahlung in der atmosphärischen Ozonschicht absorbiert, dadurch wird verhindert, dass diese schädliche UV-Strahlung den Erdboden erreicht. Ab einer Wellenlänge von 350 nm ist die Ozonschicht fast transparent für Strahlung (Iqbal, 1983). Werden alle Strahlungs-Parameter, bis auf Ozon, konstant gehalten, zeigt sich bei der Modellierung mit uvspec, dass die UV-B-

Bestrahlungsstärke stark von der Ozonsäule abhängt. Je größer die Ozonkonzentration ist, desto kleiner wird die UV-B-Bestrahlungsstärke. Für Ozonwerte von 100 DU, 300 DU und 500 DU ergeben sich UV-B-Bestrahlungsstärken von $4,1 \text{ Wm}^{-2}$, $1,9 \text{ Wm}^{-2}$ und $1,1 \text{ Wm}^{-2}$. Zudem verschiebt sich die Wellenlänge, bis zu der die UV-Strahlung komplett absorbiert wird, hin zu größeren Wellenlängen.

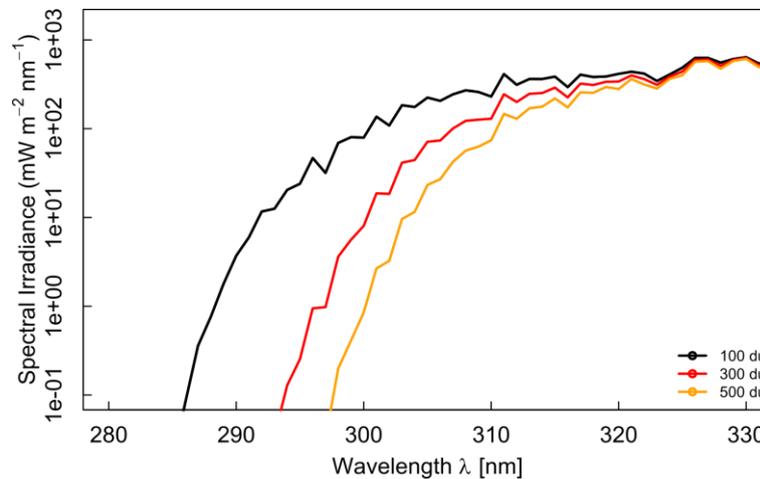


Abbildung 2.8: Spektrale Bestrahlungsstärke, modelliert mit *uvspec* bei SZA $28,7^\circ$ für Ozonwerte von 100 DU, 300 DU und 500 DU. Die y-Achse ist logarithmisch aufgetragen.

Die Verteilung der Ozonschicht in der Atmosphäre ist hoch variabel und ändert sich mit der geografischen Position sowie mit der Jahreszeit, was zu einer ebenfalls variablen UV-Strahlung führt.

2.2.7 Höhe des Messstandorts

Die Erdatmosphäre besitzt ein vertikales Profil und ist in die Bereiche Troposphäre ($\approx 0-15$ km), Stratosphäre ($\approx 15-50$ km), Mesosphäre ($\approx 50-80$ km) und Thermosphäre ($\approx 80-500$ km) eingeteilt (Sissenwine, Dubin, & Wexler, 1962). Mit steigender Höhe ändern sich Druck, Temperatur, Dichte und Zusammensetzung der Atmosphäre. Zudem ändert sich das vertikale Profil der Atmosphäre mit der geografischen Position und mit der Jahreszeit (Iqbal, 1983). Diese Faktoren haben einen direkten Einfluss auf die spektrale Bestrahlungsstärke, siehe Abbildung 2.9. Den größten Einfluss mit steigender Höhe in der Troposphäre hat die vertikale Verteilung von Ozon. So nimmt mit steigender Höhe die Gesamtschichtdicke von Ozon ab, dies führt zu steigender UV-Bestrahlungsstärke bei steigender Höhe über dem Meeresspiegel (Pfeifer, Koepke, & Reuder, 2006).

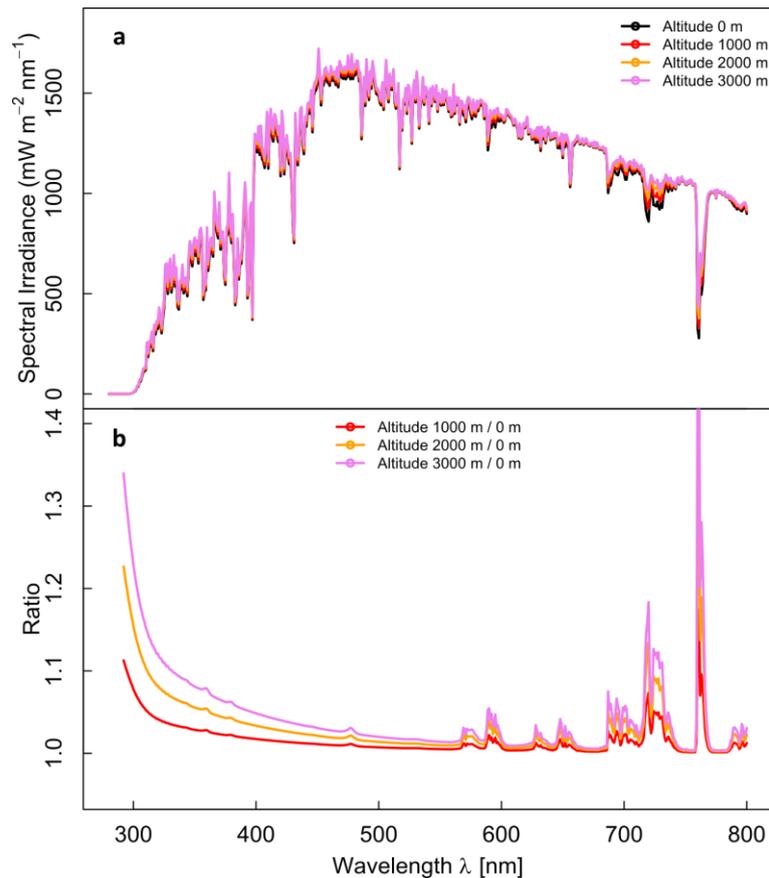


Abbildung 2.9: (a) Einfluss der Höhe auf die spektrale Bestrahlungsstärke bei SZA $28,7^\circ$, modelliert mit *uvspec* für Altitude 0 = Meereshöhe, Altitude 1000 m, Altitude 2000 m und Altitude 3000 m über Meereshöhe. (b) Quotient der spektralen Bestrahlungsstärke SZA $28,7^\circ$ von 1000 m, 2000 m und 3000 m zu spektraler Bestrahlungsstärke SZA $28,7^\circ$ bei Meereshöhe, modelliert mit *uvspec*.

2.3 Bedeutung der spektralen Bestrahlungsstärke für Pflanzen

Pflanzen sind sessile Organismen und können sich daher der wechselnden Bestrahlungsstärke in ihrem Lebensraum nicht entziehen. Um die spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke zu erkennen und für photochemische und biologische Prozesse zu nutzen, haben Pflanzen viele verschiedene strahlungsabsorbierende Pigmente und Chromophore entwickelt, die in verschiedene Photorezeptoren und photosynthetische Systeme integriert sind (Pattison et al., 2018) (Abbildung 3.4.b), wie z. B. Kryptochrome (Ahmad et al., 2002), Photochrome (C. Fankhauser, 2001), Phototropine (Briggs & Christie, 2002), Phycoerythrin (Pattison et al., 2018), Carotinoide (Pattison et al., 2018) und Chlorophyll a und b (Atwell, Kriedemann, & Turnbull, 1999). Mit ihrer Hilfe wandeln Pflanzen, photosynthetisch aktive Algen und Cyanobakterien elektromagnetische Energie in chemische Energie um und nutzen ihre Photorezeptoren, um sich an zeitliche und räumliche Veränderungen der spektralen Bestrahlungsstärke anzupassen. Dies ist besonders wichtig in dichter Vegetation, wo die Konkurrenz um Licht der Hauptantrieb für die Pflanzenentwicklung ist, oder bei plötzlich

auftretenden Lichtlücken, wo das Sammeln von Informationen über die Bestrahlungsdosis und die spektrale Verteilung eine wesentliche Maßnahme für Pflanzen ist, um auf die neuen Bedingungen zu reagieren bzw. sich anzupassen oder einen Weg zur Verbesserung ihrer Situation zu finden (Pierik, Mommer, Voeselek, & Robinson, 2013).

Die spektrale Verteilung der Bestrahlungsstärke hat einen großen Einfluss auf den morphologischen und chemischen Phänotyp der Pflanzen (metabolische Zusammensetzung), die Emission von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs „Volatile Organic Compounds“), die Keimung der Samen und die Blütezeit sowie die Schattenvermeidung und den Phototropismus (Carvalho & Castillo, 2018; de Wit, Galvao, & Fankhauser, 2016). Zum Beispiel hat bei Basilikum (*Ocimum basilicum*) das Verhältnis der Bestrahlungsstärke bei 669 nm (aktives Phytochrom Pfr) zu 465 nm (Blaulichtphotorezeptor) einen großen Einfluss auf das Pflanzenwachstum, den Nährstoffgehalt, den Terpenoidgehalt der Blattdrüsen und die Spaltöffnung (Pennisi et al., 2019).

Kürzlich schlugen Zhen und Bugbee (2020) vor, den PAR-Bereich, der derzeit mit 400-700 nm definiert ist, auf 750 nm zu erweitern, da sie zeigen konnten, dass Photonen dieser Wellenlänge auch zur Photosynthese in verschiedenen Pflanzenarten beitragen (Zhen & Bugbee, 2020).

Eine aktuelle Studie über den Einfluss von grünem Licht (Battle & Jones, 2020) unterstreicht das Potenzial der LED-Technologie für die photobiologische Forschung. Sie zeigt, dass niedrige Bestrahlungsstärken von grünem Licht ausreichen, um die zirkadianen Rhythmen in Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) zu induzieren und aufrechtzuerhalten, und dass Cryptochrome zu dieser Reaktion beitragen.

Pflanzen sind dreidimensionale Absorber optischer Strahlung, daher wäre die Messung der Strahldichte die ideale Größe, die für die Pflanze relevanten Strahlungsverhältnisse abbildet. Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, stellt allein die Messung der Strahldichte einen hohen technischen Aufwand dar (Foster et al., 2021). Eine weitere Möglichkeit besteht mit der Messung der Raumbestrahlungsstärke (Seckmeyer, 1991), dies setzt allerdings eine kugelförmige Gestalt des Empfängers voraus. Daher wird in dieser Arbeit die Messung und Simulation der Globalbestrahlungsstärke mit horizontal stehendem Empfänger verwendet.

2.4 Simulation der spektralen Bestrahlungsstärke in Klimakammern

In der Abteilung Experimentelle Umweltsimulation (EUS) am Helmholtz Zentrum München, Neuherberg existieren vier große Klimakammern mit einem experimentellen Raum von jeweils $3,4 \times 2,8 \times 2,5 \text{ m}^3$ (Länge x Breite x Höhe), zwei mittelgroße Klimakammern mit einem experimentellen Raum von $1,4 \times 1,4 \times 1,0 \text{ m}^3$, sowie eine kleine Klimakammer mit einem experimentellen Raum von $1,2 \times 1,2 \times 0,3 \text{ m}^3$ (Thiel et al., 1996). All diese Kammern haben oder hatten eine Bestrahlungsanlage, den sogenannten „Sonnensimulator“, die auf die

Entwicklung der „Simulation der Globalstrahlung für Pflanzenversuche“ von Herrn Professor Dr. Seckmeyer während seiner Promotion bei EUS zurückgeht (Seckmeyer, 1991). Der Aufbau der Bestrahlungsanlage ist dabei in verschiedene Ebenen aufgeteilt, siehe Abbildung 2.10. Die oberste Ebene befindet sich in der Decke der Klimakammer, dem sogenannten Lampenraum. Hier sind in den kleinen Klimakammern 36 Stück Metallhalogenidlampen HQI 400 W, 27 Stück Halogenglühlampen 500 W, 20 Stück Leuchtstofflampen TLD 40 W/18 verbaut unter Verwendung von speziell entwickelten Lampen-Reflektoren. Zudem gibt es verschiedene Glasfilter direkt unter den Lampen, um die spektrale Bestrahlungsstärke zu modifizieren (Willing et al., 2016). Unter dem Lampenraum befindet sich ein Wasserbecken, mit dem überschüssige InfraRot-Strahlung entfernt wird. Für einen definierten Anteil von IR-Strahlung sind unter dem Wasserbecken 5 Stück Halogenglühlampen mit jeweils 500 W angebracht.

An den Wänden unterhalb des Wasserfilters befinden sich an jeder Wandseite jeweils 25 Stück UV-Leuchtstofflampen (Peakwellenlänge 313 nm) mit jeweils 40 W. Die nächste Ebene befindet sich unterhalb der UV-Leuchtstofflampen und oberhalb des experimentellen Raums und hat im Wesentlichen zwei Aufgaben: (i) den experimentellen Raum möglichst gasdicht zum UV-Leuchtstofflampenraum abzuschließen und (ii) mit Hilfe von speziellen Filtergläsern die UV-B-Strahlung zu modifizieren und die UV-C-Strahlung komplett zu absorbieren (Seckmeyer, 1991). Laut Literatur beträgt die elektrische Gesamtleistungsaufnahme der Bestrahlungsanlage 28 kW, bei einer produzierten Bestrahlungsstärke von 1000 Wm^{-2} (Seckmeyer & Payer, 1993). Ein Großteil der für die Erzeugung der Bestrahlungsstärke aufgewendeten Energie fällt in Form von Wärmeenergie an und muss durch eine leistungsstarke Kühlanlage entfernt werden. Dieser, damals neu entwickelte, Sonnensimulator diente als Vorlage für die oben beschriebenen Klimakammern am Helmholtz Zentrum München.

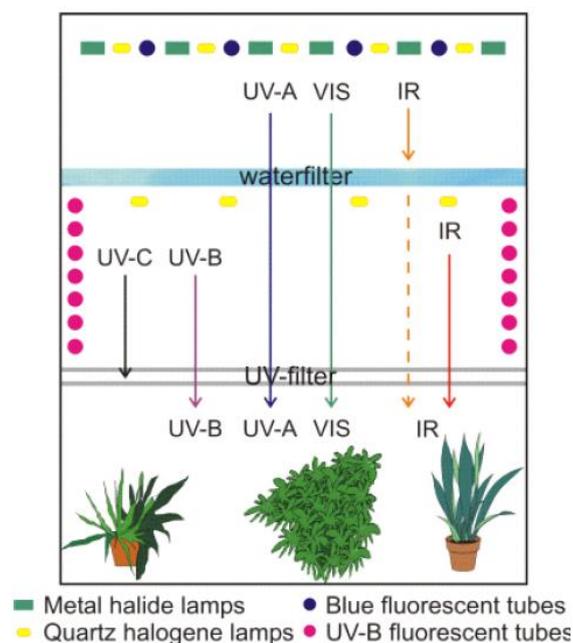


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung des traditionellen Sonnensimulator-Systems am Helmholtz Zentrum München, Neuherberg aus (Albert, Seidlitz, & Winkler, 2006)

Die bestehende kleine Klimakammer mit dem beschriebenen „traditionellen“ Sonnensimulator wurde für diese Arbeit genutzt und in einen LED-basierenden Sonnensimulator umgebaut. Um den neuen mit dem traditionellen Sonnensimulator vergleichen zu können, wurden vor dem Umbau umfangreiche Messungen zur spektralen Bestrahlungsstärke und zur elektrischen Leistungsaufnahme durchgeführt.

In Abbildung 2.11 sind die spektralen Bestrahlungsstärken der verschiedenen Strahlungsquellen des traditionellen Sonnensimulators gezeigt. Für die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke wurde ein Array-Radiometer (Newport OSM400, Newport Spectra-Physics GmbH, Darmstadt, Deutschland mit einem UV/VIS-Bereich von 200-800 nm, spektraler Auflösung von 1 nm, einem Sony CCD-Sensor (Sony Germany GmbH, Stuttgart, Deutschland) mit 2046 Pixeln und einem Spalt mit 50 μm) verwendet. Die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke wurden in der Klimakammer ohne Filterglas durchgeführt und die jeweils maximale Anzahl der individuellen Strahlungsquellen eingeschaltet. Für die Auswertung der spektralen Bestrahlungsstärken wurde die Transmissionskurve von dem Filterglas Sanalux® 4,0 mm mit den Messwerten der spektralen Bestrahlungsstärke ohne Filterglas multipliziert.

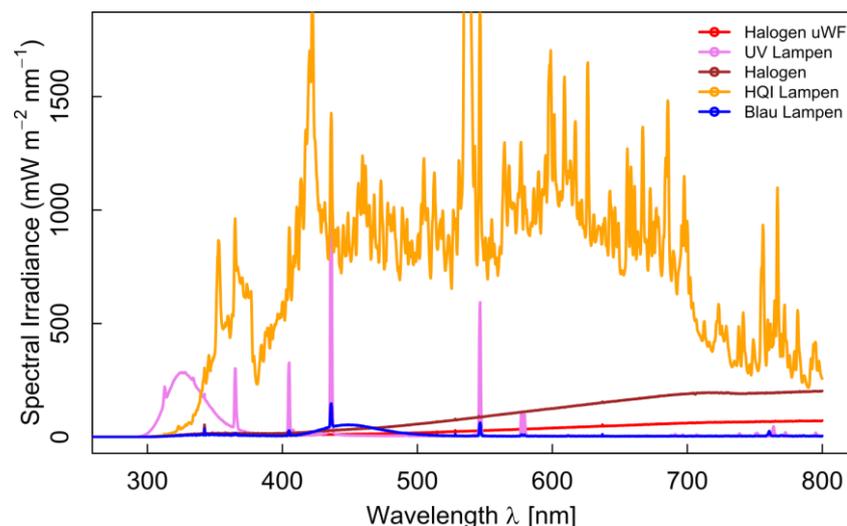


Abbildung 2.11: Spektrale Bestrahlungsstärken der einzelnen Lampentypen des traditionellen Sonnensimulators. Gemessene Spektren der (i) Halogenlampen, die sich unterhalb des Wasserfilters befinden (Halogen uWF), der (ii) UV-Lampen, der (iii) Halogenlampen, der (iv) HQI-Lampen und der blauen Leuchtstofflampen. Die ohne Filterglas gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken wurden mit der Transmissionskurve des Filterglases Sanalux® 4,0 mm multipliziert. Die spektrale Auflösung der Messungen beträgt 1 nm.

Die Messung der elektrischen Leistungsaufnahme ergab für die Gruppe UV-Leuchtstofflampen einen Wert von 3,6 kW, für die Metallhalogenidlampen einen Wert von 19,6 kW, für die Halogenlampen in der Lichtdecke einen Wert von 5,8 kW, für die Blau-Leuchtstofflampen einen Wert von 0,42 kW und einen Wert von 1,8 kW für die Halogenlampen unterhalb des Wasserfilters. Die verschiedenen Strahlungsquellen des traditionellen Sonnensimulators waren in einzelne Schaltgruppen unterteilt, die unabhängig voneinander separat geregelt

werden konnten. Dadurch war es möglich, die spektrale Bestrahlungsstärke eines Zielspektrums mit Hilfe der fünf verschiedenen Strahlungsquellen anzupassen.

In der Abbildung 2.12a ist die solare spektrale Bestrahlungsstärke für Albedo = 0,2, Höhe 0,483, Tag 138 des Jahres, Ozon 325 DU, SZA 28,7°, Luftdruck 1013 mbar, modelliert mit uvspec, gezeigt (siehe Kapitel 2.2). Zudem wird die gemessene maximale spektrale Bestrahlungsstärke des traditionellen Sonnensimulators dargestellt. Dabei wurde die maximal zur Verfügung stehende Anzahl aller Lampen eingeschaltet und die Transmissionskurve von Sanalux® 4,0 mm verwendet. Es ergab sich eine gemessene elektrische Gesamtleistungsaufnahme, ohne das Kühlsystem, von 31 kW, bei einer gemessenen Bestrahlungsstärke (300-800 nm) von 460 Wm^{-2} .

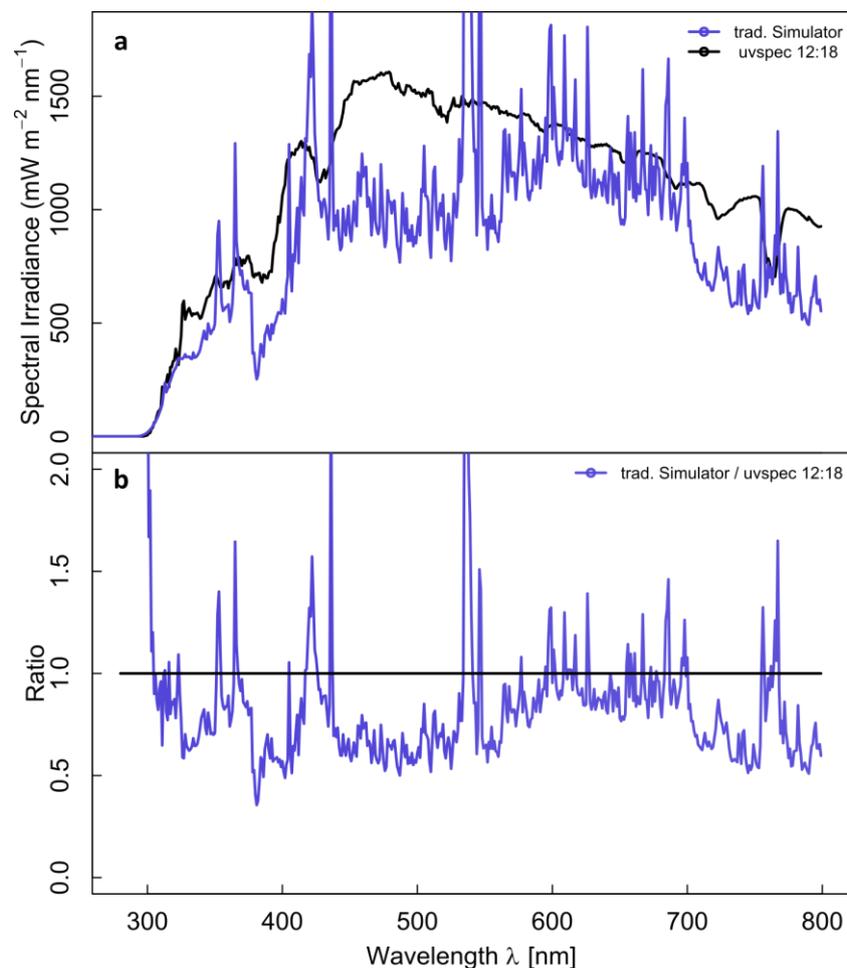


Abbildung 2.12: Vergleich traditioneller Simulator und modellierter spektraler Bestrahlungsstärke für SZA 28,7°. (a) Spektrale Bestrahlungsstärke bei SZA 28,7° modelliert mit uvspec, mit einer Auflösung im Wellenlängenbereich 280 – 330 nm von 1 nm, im Bereich 331 – 800 nm gemittelt über ein Intervall von 10 nm zur entsprechenden Zentralwellenlänge. Gemessene spektrale Bestrahlungsstärke des traditionellen Simulators in der Abteilung EUS am Helmholtz Zentrum München mit einer Auflösung von 1 nm im Wellenlängenbereich von 280-800 nm mit Sanalux® 4,0 mm als Filterglas. (b) Quotient gemessene spektrale Bestrahlungsstärke zu mit uvspec modellierter spektraler Bestrahlungsstärke.

In der Tabelle 2.3 sind die integrierten spektralen Bestrahlungsstärken für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300-800 nm für das mit uvspec modellierte Referenz-Spektrum sowie für das vom traditionellen Sonnensimulator erzeugte Spektrum mit Filterglas Sanalux 4,0 mm dargestellt. Die Werte zeigen, dass bei Verwendung von Sanalux® 4,0 mm als Filterglas die Bestrahlungsstärken im Vergleich zum Referenz-Spektrum nicht erreicht werden. Die Messungen des Spektrums ohne Filterglas, die in der praktischen Anwendung nicht vorkommen, zeigen hingegen, dass im UV-B-Bereich Bestrahlungsstärken von $3,81 \text{ Wm}^2$ erreicht werden können. Die anderen Bereiche UV-A, PAR, FarRed und 300-800 nm können selbst ohne Glasfilter nicht erreicht werden.

Tabelle 2.3: Bestrahlungsstärken für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300 – 800 nm jeweils für das mit uvspec modellierte Spektrum und das in der Klimakammer gemessene Spektrum mit Filterglas Sanalux® 4,0 mm, sowie die prozentuale Abweichungen der gewichteten Bestrahlungsstärken für die jeweiligen Wellenlängenbereiche in Prozent. Zusätzlich wurde die mittlere absolute spektrale Abweichung (SPD) für die jeweiligen Wellenlängenbereiche mit der Formel (2.9) berechnet, die spektrale Auflösung für das modellierte Spektrum und das gemessene Spektrum betrug 1 nm.

	UV-B	UV-A	PAR	FarRed	300 – 800 nm
uvspec [Wm^{-2}]	1,7	54,8	411	98,2	565
Messung [Wm^{-2}]	1,6	41,5	348	68,6	460
Abweichung [%]	-7,6	-24,3	-15,3	-30,1	-18,6
SPD [%]	17,6	29,3	26,5	32,9	27,9

Zusätzlich gibt die Tabelle 2.3 die prozentuale Abweichung der Bestrahlungsstärken für die verschiedenen Wellenlängenbereiche zwischen mit uvspec modellierten und den gemessenen Bestrahlungsstärken des traditionellen Simulators an. Es zeigt sich dabei im Vergleich zu dem modellierten Referenzspektrum eine Abweichung der Bestrahlungsstärken von -7,6 % im UV-B-Bereich, -24,3 % im UV-A-Bereich, -15,3 % im PAR-Bereich, -30,1 % im FarRed-Bereich und -18,6 % im 300-800 nm Bereich, mit Sanalux® 4,0 mm als Filterglas.

Neben der Bestrahlungsstärke gibt es auch große spektrale Abweichungen (SPD) für die einzelnen Wellenlängenbereiche im Vergleich zu dem Referenzspektrum. Am stärksten sind diese im FarRed-Bereich mit 32,9 %, gefolgt von 29,3 % im UV-A-Bereich, 26,5 % im PAR-Bereich, 17,6 % im UV-B-Bereich und 27,9 % im 300-800 nm Bereich. In Tabelle 2.3 sind die berechneten Werte für SPD (Formel (2.9)) für die jeweiligen Wellenlängenbereiche angegeben. Bei der Berechnung der mittleren normierten spektralen Abweichung (MNSA) mit den Formeln (2.10) und (2.11) ergibt sich ein Wert von 30,9 %.

Wie oben beschrieben besteht der traditionelle Simulator aus fünf verschiedenen Strahlungsquellen, die separat in Gruppen geschaltet werden können. Dies ermöglichte es, dass die Zusammensetzung des simulierten Spektrums partiell verändert werden konnte. Durch die begrenzte Anzahl von schaltbaren Lampengruppen und die Verwendung von vier verschiedenen Lampentypen war die Möglichkeit, verschiedene Bestrahlungsszenarien herzustellen, jedoch stark begrenzt. Zudem zeigt sich bei dem erzeugten Spektrum, mit Sanalux 4,0 mm als Filterglas, bei 537 nm eine stark überhöhte spektrale Bestrahlungsstärke mit einem maximalen Wert von $6093 \text{ Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$. Dieser Peak bei 537 nm liegt im visuell grünen Bereich. In diesem Spektralbereich ist die Absorption von Pflanzen etwas geringer als im Vergleich zu den anderen visuellen Bereichen (Zhen & Bugbee, 2020). Untersuchungen zu dem Einfluss von grünem Licht auf Pflanzen zeigen, dass zwar die Absorption geringer ist, aber die Eindringtiefe bzw. Penetration von grünem Licht in das Pflanzenblatt tiefer ist und somit sehr wirksam in Bezug auf die Photosynthese-Leistung und andere photobiologische Effekte (H. L. Smith, McAusland, & Murchie, 2017).

Da die verwendeten Lampen direkt mit der 230 V, 50 Hz Netzspannung betrieben wurden beziehungsweise die 50 Hz Welligkeit der Netzspannung direkt von den Lampen-Vorschaltgeräten an die Lampen übertragen wurde, resultiert bei dem traditionellen Simulator eine Welligkeit der spektralen Bestrahlungsstärke.

Die in dieser Arbeit gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken des traditionellen Simulators weichen von den in der Literatur angegebenen Werten, PAR-Bereich 399 Wm^{-2} und 300-800 nm Bereich 543 Wm^{-2} , teilweise stark ab (Seckmeyer & Payer, 1993). Eine mögliche Ursache dafür könnte sein, dass die Hersteller der verwendeten Lampen, über die Zeit, die Herstellungsprozesse, Materialien und Lampenspezifikation geändert haben. Diese Änderungen könnten sich auf die spezifische Ausstrahlung der Lampen ausgewirkt haben und somit die spektrale Bestrahlungsstärke der kleinen Klimakammer geändert haben.

3 LED-System zur Simulation der solaren Globalstrahlung im Bereich 360-800 nm

3.1 Methoden & Material

3.1.1 Array-Radiometer

Die spektrale Bestrahlungsstärke wurde in dieser Arbeit mit einem Array-Radiometer (Newport OSM400, Newport Spectra-Physics GmbH, Darmstadt, Deutschland, mit einem UV/VIS-Bereich von 200-800 nm, spektraler Auflösung von 1 nm, einem Sony CCD-Sensor (Sony Germany GmbH, Stuttgart, Deutschland) mit 2046 Pixeln und einem Spalt mit 50 μm) gemessen. Zur Kalibrierung des Array-Radiometers wurden am Bundesamt für Strahlenschutz, Neuherberg, Deutschland Referenzmessungen an einer Lampe der Physikalisch Technischen Bundesanstalt PTB durchgeführt. Zudem wurden Vergleichsmessungen im Freiland in Neuherberg zu mit uvspec modellierten Spektren durchgeführt. Bedingt durch die Spezifikation des Array-Radiometers, seiner Auflösung und Empfindlichkeit, ergeben sich mittlere Abweichungen in der spektralen Bestrahlungsstärke im UV-B-Bereich von $\pm 35\%$, im UV-A-Bereich von $\pm 25\%$ und im Wellenlängenbereich 400 – 800 nm von $\pm 15\%$.

3.1.2 "Non Negative Least Square" NNLS-Algorithmus

Aus einzelnen LED-Spektren kann durch Überlagerung der einzelnen LED-Spektren $LED_i(\lambda)$ ein gewünschtes Zielspektrum als Linearkombination von Einzelspektren multipliziert mit einem Anteilkoeffizienten x_i konstruiert werden (Formel (3.1)). Die Anzahl von x_i und $LED_i(\lambda)$ ist davon abhängig, wie viele LED-Einzelspektren vorhanden sind; in dieser Arbeit wurde die Anzahl der LED-Typen auf 23 beschränkt, $i = 1, \dots, 23$. Das gewünschte Zielspektrum kann je nach experimenteller Anwendung beliebig sein, z. B. ein Sonnenspektrum zu einem bestimmten Zeitpunkt oder Sonnenzenitwinkel oder am Boden eines dichten Walddaches. Das simulierte Spektrum $S_{\text{simulated}}$ ergibt sich aus der folgenden Formel:

$$S_{\text{simulated}}(\lambda) = \sum_{i=1}^n x_i LED_i(\lambda) \left[\frac{W}{m^2 nm} \right] \quad (3.1)$$

Die Anteilkoeffizienten x_i wurden durch die Methode "Nicht-negative kleinste Quadrate zur Lösung der linearen Regression mit mehreren Koeffizienten" unter Verwendung eines Algorithmus berechnet.

Der Algorithmus wurde mit R v3.5.1 (R core Team, 2021) programmiert, welches in dem Paket 'nnls' enthalten ist. Dieses NNLS-Paket (Non Negative Least Square) ist eine Implementierung von Lawson-Hanson (Lawson & Hanson, 1995) zur Lösung des Problems $\min ||Ax - b||_2$ mit der Nebenbedingung $x \geq 0$, wobei $x \in \mathbb{R}^n$, $b \in \mathbb{R}^m$ und A eine m mal n Matrix ist.

In dieser Arbeit wird der (i) Vektor b_i , $i = 1, \dots, m$, die spektrale Bestrahlungsstärke des Zielspektrums $S_{\text{target}}(\lambda)$ [$\text{Wm}^{-2} \text{nm}^{-1}$], z.B. $b_1 = S_{\text{target}}(280 \text{ nm})$ und $b_2 = S_{\text{target}}(281 \text{ nm})$ bis $b_{1020} = S_{\text{target}}(1300 \text{ nm})$ in 1 nm Einheiten gerechnet. (ii) L_{11} bis L_{m1} ist die spektrale Bestrahlungsstärke von $\text{LED}_1(\lambda)$ [$\text{Wm}^{-2} \text{nm}^{-1}$], im Bereich von 280-1300 nm in 1 nm Einheiten, (iii) L_{11} bis L_{1n} sind die n - $\text{LED}(\lambda)$ [$\text{Wm}^{-2} \text{nm}^{-1}$], in dieser Arbeit ist die Zahl n , die Anzahl der einzelnen LED-Typen, auf 23 beschränkt. Daraus ergibt sich ein lineares Regressionsmodell (Gleichung (3.2)) mit r , einem n -Vektor der Residuen, und x , einem n -Vektor der berechneten Koeffizienten. Durch Einsetzen der berechneten Koeffizienten in die Formel (3.1) errechnet sich das simulierte Spektrum.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & \dots & L_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{m1} & \dots & L_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + r \quad (3.2)$$

3.1.3 Untersuchung der am Markt verfügbaren Hochleistungs-LEDs

Für die Entwicklung eines LED basierenden Sonnensimulators war es notwendig, eine umfangreiche Untersuchung durchzuführen, welche LEDs am Markt (Stand 2019) verfügbar und geeignet sind. Die größte Auswahl an LED-Emittern bieten Internet-Distributoren für elektronische Bauteile. So werden zum Beispiel bei der Suche nach LEDs bei dem Distributor Mouser 40740 verschiedene LED-Emitter angezeigt (Mouser, 2019). Zur ersten Eingrenzung der großen Auswahl an verschiedensten LEDs wurden folgende Bedingungen bei der Suche angewendet: (i) Strahlungsleistung größer 100 mW, (ii) Bauteilform „Surface Mount Devices“ (SMD), (iii) Abstrahlwinkel größer gleich 120 °. Als zweite Einschränkung für die „monochromatischen“ LEDs wurden nur Hersteller in Betracht gezogen, bei denen möglichst viele verschiedene Peakwellenlängen angeboten wurden. Dadurch konnten zwei LED-Hersteller gefunden werden, die mit ihren LEDs den Wellenlängenbereich von 450-730 nm und 840 - 960 nm abdecken. Für den Wellenlängenbereich von 360- 420 nm wurde ebenfalls die Auswahl auf zwei Hersteller reduziert. Für den Bereich von 760- 820 nm wurden spezielle Hochleistungs-LEDs eines japanischen Herstellers gefunden. Für „weiße“ LEDs (Wellenlängenbereich ca. 400-750 nm) wurde die Suche auf sogenannte „Chip on Board“ (COB)-LEDs eingeschränkt. Diese COB-LEDs bestehen bereits aus einer Kombination von einzelnen LEDs, die zusammengeschaltet sind. Dadurch bieten diese COB-LEDs eine große Strahlungsleistung, die für den Wellenlängenbereich 430-700 nm eine Art Grundstrahlungsleistung erzeugen. Auch für die COB-LEDs konnte die Anzahl der Hersteller auf zwei reduziert werden, wobei der Hersteller Seoul Semiconductor eine besondere LED-

Technik und Leuchtstoffe verwendet, die zu einer spektralen Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich von 440-700 nm führen. In der Tabelle 3.1 sind die 23 verschiedenen LED-Typen aufgelistet. Zusätzlich sind die im Datenblatt der jeweiligen LEDs angegeben Werte für die Peakwellenlänge, Strahlungsleistung in mW bzw. Lumen, thermischer Widerstand R_{th} und den sogenannten „Footprint“, der den äußeren Maßen der Lötstellen entspricht, angegeben.

Tabelle 3.1: Verwendete LED-Typen mit Datenblatt Werten

LED #		Hersteller	Order Code	Peak Wellenlänge Datenblatt	Typ.mW / Luminus Flux	Footprint [mm]
1		Lite-On	LTPL-C034UVH365	typ. 365 nm	492@25°C, 500 mA	3.3x3.3
2		Würth	15335338AA350	typ. 385 nm	600@25°C, 500 mA	3.3x3.3
3		Würth	15335339AA350	typ. 395 nm	700@25°C, 500mA	3.3x3.3
4		Würth	15335340AA350	typ. 405 nm	700@25°C, 500mA	3.3x3.3
5		TSLC	C3535U-UNL1-A1G11H-410	410-420 nm	792@25°C, 500mA	3.3x3.3
6		Cree	XPEBRY-L1-0000-00N01	Royal Blue, 450-465 nm	450@25°C, 350mA	3.3x3.3
7		Cree	XPEBBL-L1-0000-00301	Blue, 465-485 nm	31 lm@25°C, 350mA	3.3x3.3
8		Osram	LV CQBP	Verde, 498-512 nm	71 lm@25°C, 350mA	3x3
9		Cree	XPEBGR-L1-R250-00D01	Green, 520-535 nm	87.4 lm@25°C, 350mA	3.3x3.3
10		Cree	XPEBPA-L1-0000-00D01	PC-Amber, typ. 590 nm	87.4 lm@25°C, 350mA	3.3x3.3
11		Cree	XPEBAM-L1-0000-00802	Amber, 585-595 nm	62 lm@25°C, 350mA	3.3x3.3
12		Cree	XPEBRO-L1-R250-00D02	Red Orange, 610-625 nm	67.2 lm@25°C, 350mA	3.3x3.3
13		Cree	XPEBRD-L1-0000-00801	Red, 620-630 nm	56.8 lm@25°C, 350mA	3.3x3.3

14		Cree	XPEEPR-L1-0000-0090	Photo Red, 650-670 nm	350@25°C, 350mA	3.3x3.3
15		Ushio	SMBB690D	680-700 nm	520@25°C, 600mA	4.4x5.2
16		Osram	GF CSSPM1.24	FarRed, 710-740nm	383@25°C, 350mA	3x3
17		Ushio	SMBB760D	750-770 nm	400@25°C, 800mA	4.4x5.2
18		Ushio	SMBB780D	770-790 nm	500@25°C, 800mA	4.4x5.2
19		Ushio	SMBB810D	800-820 nm	520@25°C, 800mA	4.4x5.2
20		Luminus	CVM-32-56-95-54-AC00-F2-3	White 5600 K	24800lm@85°C,5000mA,	38x38
21		Seoul Semiconductor	SAWS1566A	White 5000 K	2655lm@85°C, 720mA,	19x19
22		Osram	SFH 4714A	Typ. 860 nm	745@25°C, 1000mA	3x3
23		Osram	SFH 4726AS	Typ. 950 nm	1340@25°C, 1000mA	3x3

3.1.4 Entwicklung eines LED-Kühlsystems

Anfängliche Berechnungen und Simulationen ergaben, dass eine sehr hohe Dichte von Hochleistungs-LEDs erforderlich ist, um eine integrierte spektrale Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich von 360-800 nm von etwa 580 Wm^{-2} in einem Abstand von 1,6 Metern und einer Fläche von mindestens einem Quadratmeter zu erreichen. Die von den LEDs erzeugte Strahlungsleistung beschreibt den Anteil der Energie, der in Form von elektromagnetischen Wellen abgestrahlt wird. Der größte Teil der Restenergie wird (abhängig von der Effizienz der einzelnen LED-Typen) durch Wärmeleitung und thermische Konvektion abgegeben. Daraus resultiert, dass für einen LED-basierten Simulator die LEDs mit einem sehr effizienten Kühlsystem ausgestattet werden müssen. (i) Der innere Hauptkühlkörper des Kühlsystems wurde durch eine Eigenentwicklung und Fertigung eines ca. 14 kg schweren aktiven, wassergekühlten Kühlkörpers realisiert (Abbildung 3.1 g). Mit einer Größe von 53 cm x 53 cm bietet der Kühlkörper Platz für 81 Leiterplatten „Light Engines“ und deren Verkabelung (Abbildung 3.1.a). (ii) Zusätzlich sind sechs kleine Kühlkörper, die ebenfalls aus Eigenentwicklung und Produktion stammen, im System verbaut. Diese äußeren Kühlkörper bieten jeweils Platz für drei „Light Engines“. Die Kühlkörper sind aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit von $220 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-2}$ aus Aluminium gefertigt (Kuchling, 1994). In Abbildung 3.2 ist das Schema gezeigt, wie der innere Kühlkörper und die äußeren Kühlkörper angeordnet sind und die Position der verschiedenen „Light Engines“ durch eine Farbcodierung, Zuordnung siehe Tabelle 3.1.

3.1.5 Entwicklung der „Light Engines“

Um für den LED-basierten Simulator die benötigte hohe Dichte an Hochleistungs-LEDs zu erreichen, wurden von jeder LED-Type eine definierte Anzahl von LEDs zu einer Reihenschaltung zusammengefasst. Bei der Reihenschaltung der LEDs addieren sich die einzelnen Vorwärtsspannungen der LEDs zu einer Gesamtspannung, die an der LED-Reihenschaltung anliegt. Dies hat den Vorteil, dass jede LED in der Reihenschaltung mit demselben Strom betrieben wird und damit typischerweise auch die Strahlungsleistung der einzelnen LEDs identisch ist. Da praktisch alle "monochromatischen" Hochleistungs-LEDs Surface Mounted Device (SMD) sind, war es notwendig, eine Leiterplatte (PCB Printed Circuit Boards) zu entwickeln, auf der die LEDs verlötet und in Reihe geschaltet werden konnten (siehe Abbildung 3.1 d, e, f). Diese mit LEDs bestückten Leiterplatten werden im Folgenden als „Light Engines“ bezeichnet. Zu diesem Zweck wurden drei verschiedene Leiterplatten bzw. Layouts mit der Software AUTODESK-EAGLE Version 9.4.1 (AUTODESK, San Rafael, USA) entwickelt. Allen Layouts ist gemeinsam, dass die LEDs symmetrisch auf kleinem Raum angeordnet und in Reihe geschaltet sind. Um die ohmschen Verluste auf den Leiterplatten möglichst gering zu halten, wurde eine Leiterbahndicke von $105 \mu\text{m}$ gewählt und die Breite

der einzelnen Anschlüsse (LED-Pads) der LEDs von der Kathode zur Anode, der nächsten LED, auf die Breite der LEDs vergrößert. Das Basismaterial der Leiterplatten ist 1,6 mm dickes Aluminium. Ein weißer Lötstopplack verhinderte das Verlaufen des Lotes während des Lötvorgangs und dient weiterhin als reflektierende Oberfläche beim Einsatz als Light Engine.

Nach der Herstellung der Leiterplatten wurde die Lötpaste mit einer Schablone exakt auf die Löt pads von Anoden und Kathoden aufgetragen. Nachdem die LEDs auf den Leiterplatten bestückt waren, wurden in einem Plasma-SMD-Lötverfahren die LEDs fest gelötet. Die Produktion der Leiterplatten und die Bestückung und Verlotung der LEDs wurde von einer Fremdfirma (Deim Electronic Production GmbH, Ottobrunn Deutschland) durchgeführt.

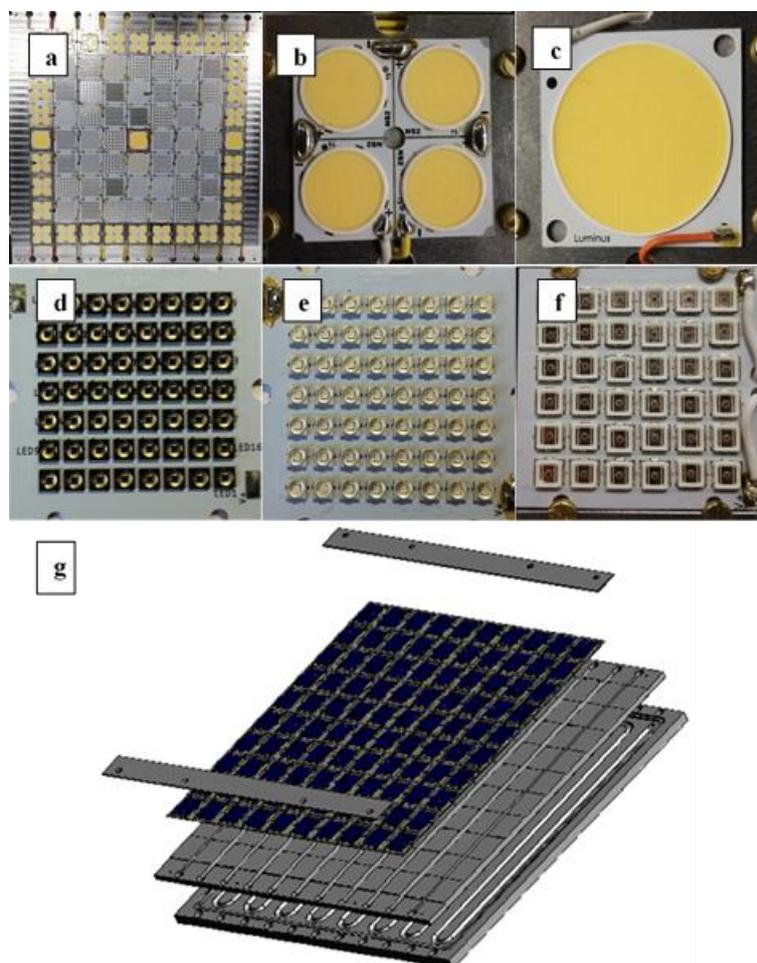


Abbildung 3.1: Aufbau des inneren Haupt-LED-Feldes. (a) Bild des inneren LED-Feldes, in dem 81 Leiterplatten montiert sind. (b) Leiterplatte für die „weiße“ Haupt-LED #21 (Seoul Semiconductor, Seoul, Korea), vier in Reihe geschaltete COB-LED (Chip On Board). (c) Leiterplatte für die zweite „weiße“ LED #20. (d) Platine für 56 SMD (Surface Mounted Device)-LEDs mit einer Grundfläche von 3,0 x 3,0 mm. (e) Platine für 56 SMD-LEDs mit einer Grundfläche von 3,3 x 3,3 mm. (f) Leiterplatte für 36 SMD-LEDs mit einer Grundfläche von 4,4 x 5,2 mm. (g) Explosionszeichnung des inneren LED-Feldes beziehungsweise des Kühlkörpers, der Platz für 81 Leiterplatten aufweist.

Insgesamt wurden 5 verschiedene Designs von Light Engines entwickelt (Abbildung 3.1 b, c, d, e, f). Für die High-Power-SMD-LED-Typen, Abbildung 3.1.e, mit einer Grundfläche von 3,3 x 3,3 mm wurden 56 LEDs auf einer Platine in Reihe geschaltet. Für die LED-Typen, Abbildung 3.1.d, mit einer Grundfläche von 3,0 x 3,0 mm wurde ein spezielles Layout mit ebenfalls 56 in Reihe geschalteten LEDs auf einer Platine verwendet. Bei den LED-Typen, Abbildung 3.1.f, mit einer Grundfläche von 4,4 x 5,2 mm wurden 36 LEDs auf einem speziellen Platinenlayout in Reihe geschaltet.

Die Anzahl der in Reihe geschalteten LEDs ist abhängig von den verwendeten LED-Treibern. Diese haben einen definierten Spannungsbereich, in dem sie die LEDs mit konstantem Strom versorgen können.

3.1.6 Schema des gesamten LED-Felds

In Abbildung 3.2 ist ein Schema des gesamten LED-Felds gezeigt. Dieses besteht (i) aus dem inneren Hauptkühlkörper, auf dem 81 Light Engines aufgebracht sind, (ii) aus sechs äußeren kleinen Kühlkörpern, auf denen jeweils drei Light Engines aufgebracht sind.

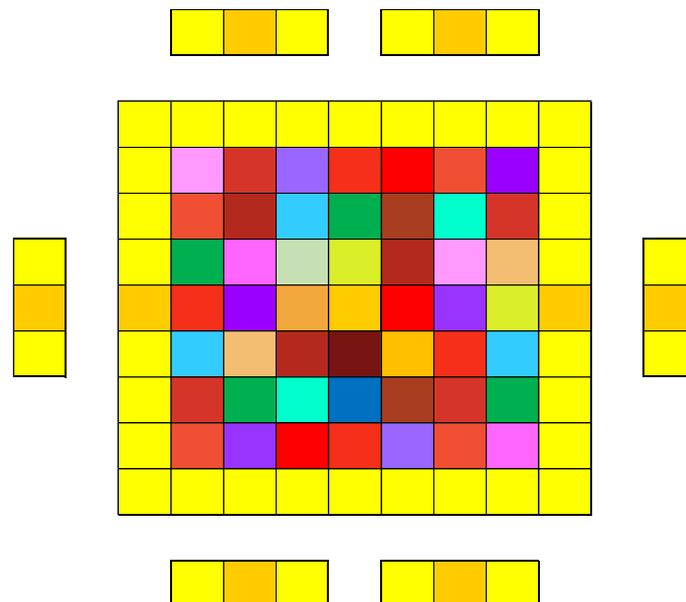


Abbildung 3.2: Schema des inneren Haupt-LED-Felds und der äußeren LED-Felder. In Tabelle 3.1 ist die Farbcodierung der verschiedenen LED-Typen angegeben.

Ziel der äußeren LED-Felder ist es, die Bestrahlungsstärke zu erhöhen und die Inhomogenität der Bestrahlungsstärke zu verringern. In Tabelle 3.1 ist die Farbcodierung der verschiedenen LED-Typen bzw. Light Engines angegeben.

3.1.7 Konstantstromquellen für „Light Engines“

Eine kleine Änderung der Spannung an der LED führt zu einer großen Änderung des Stroms. Aus diesem Grund wurden für diese Arbeit elektronische Vorschaltgeräte verwendet, die als Konstantstromquellen ausgelegt sind. Je nach Aufbau der Light Engines und der Anzahl und Art der LEDs muss ein Vorschaltgerät ausgewählt werden, das sowohl die erforderliche Vorwärtsspannung der in Reihe geschalteten LEDs als auch den benötigten Strom liefert. Es wurden sechs verschiedene Typen von Vorschaltgeräten verwendet (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Verwendete Konstantstromquellen von dem Hersteller MEAN WELL (New Taipei Industrial Park, Taiwan)

<i>Model</i>	<i>Ausgangsleistung [W]</i>	<i>Konstantstrom Bereich [V]</i>	<i>Konstantstrom [mA]</i>	<i>Steuerung</i>	<i>Anzahl im System verwendet</i>
ELG-150-C700DA	150	107-214	700	DALI	29
ELG-150-C1050DA	150	72–143	1050	DALI	2
Das ELG-150-C500DA	150	150-300	500	DALI	12
HLG-320-H-C3500B	320	46–91	3500	0-10 V	10
Hlg-320H-C1400B	320	114–229	1400	0-10 V	12
HLG-480H-C1400B	480	171– 343	1400	0-10 V	15

Die Vorschaltgeräte haben als Schutzfunktionen eine Leerlauf-, Kurzschluss- und Übertemperaturabschaltung. Laut Herstellerprotokoll haben sie eine Lebensdauer von mehr als 50.000 Stunden bei einer Gehäusetemperatur unter 75°C. Ein sehr wichtiger Aspekt, den diese Vorschaltgeräte erfüllen, ist die Steuerung der LED-Strahlungsleistung, nicht durch Pulsweitenmodulation (PWM), sondern durch Steuerung der Stromstärke. Unabhängig davon, ob das Dimmsignal über die DALI-Schnittstelle (siehe Abschnitt 3.1.8) oder über 0 - 10 V an die Konstantstromquelle gesendet wird, ist das Dimmverhalten bzw. die Änderung der Stromstärke annähernd linear zum Dimmsignal. Allerdings hat jeder Stromausgang einer Konstantstromquelle einen bestimmten Wechselstrom-Anteil, dieser wird als "Restwelligkeit"

bezeichnet und ist für diese LED-Vorschaltgeräte mit weniger als 5% spezifiziert. Eigene Messungen mit einem Oszilloskop haben ergeben, dass die Restwelligkeit bei 60 % Last kleiner 2 % beträgt. Die Frequenz des Wechselstromanteils liegt im Bereich über 2 kHz. Diese Restwelligkeit kann im Vergleich zu herkömmlichen, mit Wechselspannung betriebenen Lichtquellen als gering angesehen werden (Seckmeyer & Payer, 1988). Die Versorgungsspannung der Vorschaltgeräte wird über das 230 V AC-Netz realisiert.

3.1.8 Steuerung der verschiedenen „Light Engines“ mittels DALI

Das Lichtsteuersystem DALI (Digital Addressable Lighting Interface, industriegenormtes Protokoll, spezifiziert in IEC 62386) (Shaima & Microchip Technology, 2012) ist ein serielles Bussystem, das auf zwei Leitungen zur Steuerung von Lampen basiert. Das DALI-System ist Teil der IEC 62386, die ein Standardprotokoll für die Kommunikation zwischen Lampen, Sensoren und Vorschaltgeräten definiert. Der Controller / Master sendet einen 16-Bit-Manchester-Code, die Vorschaltgeräte antworten mit einem 8-Bit-Manchester-Code. Ein Controller / Master kann bis zu 64 Vorschaltgeräte auf dem seriellen Bus steuern. Es ist auch möglich, mehrere Master zu verwenden und die Anzahl der digital adressierbaren Vorschaltgeräte zu erhöhen. In dieser Arbeit wurde ein Controller verwendet, der vier Master enthält und somit 256 Vorschaltgeräte einzeln ansteuern kann. Eine DALI-Linie erlaubt die Verwaltung von 16 verschiedenen Gruppen und 16 verschiedenen Szenen. Eine Szene enthält bis zu 64 verschiedene Vorschaltgeräte und einen bestimmten Dimmwert für jedes Vorschaltgerät (Shaima & Microchip Technology, 2012).

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Aufbau eines LED-Sonnensimulators

Der neuentwickelte LED-basierte Simulator besteht im Wesentlichen aus folgenden drei Hauptkomponenten: (i) Erstens das innere Haupt-LED-Feld, (Abbildung 3.1) bestehend aus einem aktiv mit Wasser gekühlten Aluminiumkörper, auf dem insgesamt 81 Light Engines montiert und angeschlossen sind. Auf jeder dieser Light Engines ist nur eine Type der 23 verschiedenen LED-Typen aufgebracht. (ii) Zweitens wurden symmetrisch um das Haupt-LED-Feld herum sechs weitere kleine LED-Felder, auf denen insgesamt 18 Light Engines montiert sind angebracht. Die Summe aller verwendeten Hochleistungs-LEDs und COB (Chip On Board)-LEDs beträgt 2530 Stück, die in das System integriert sind. (iii) Drittens die regulierbaren Konstantstromquellen für die Stromversorgung (Tabelle 3.2) der 99 Light Engines. (iv) Viertens die Software basierte Steuerung mittels DALI, die es ermöglicht, den Konstantstrom für die Light Engines einzustellen und damit die spezifische Strahlungsstärke der verschiedenen LED-Typen individuell zu regeln.

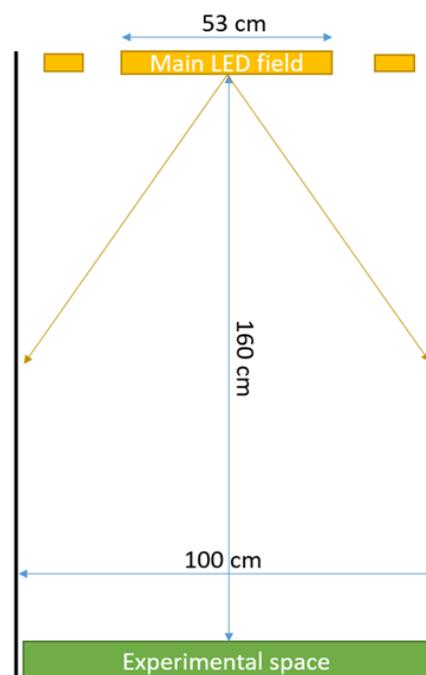


Abbildung 3.3: Schema der Testkammer mit dem integrierten LED-Sonnensimulator. Die Wände der Testkammer bestanden aus hochreflektierendem Aluminiumblech.

Für die Charakterisierung des LED-Sonnensimulator-Prototypen wurde eine Testkammer aufgebaut, siehe Abbildung 3.3. Diese Testkammer hatte eine Grundfläche von einem Quadratmeter, eine Höhe von zwei Metern und die Wände bestanden aus hochreflektierenden Aluminiumblechen (Seckmeyer, 1991). Der Sensorkopf des Array-Radiometers befand sich für die Messungen 1,6 m unterhalb des LED-Lichtfeldes.

3.2.2 Charakterisierung der verschiedenen LED-Typen

Die Abbildung 3.4 c zeigt die gemessenen Einzelspektren von 21 verschiedenen LED-Typen, die bei etwa 70 % des von den LED-Herstellern angegebenen Maximalstroms in der Testkammer aufgenommen wurden. Die Spektren von zwei weiteren LED-Typen mit den Zentralwellenlängen 850 nm und 940 nm konnten aufgrund der Einschränkungen des Array-Radiometers nicht messtechnisch ausgewertet werden.

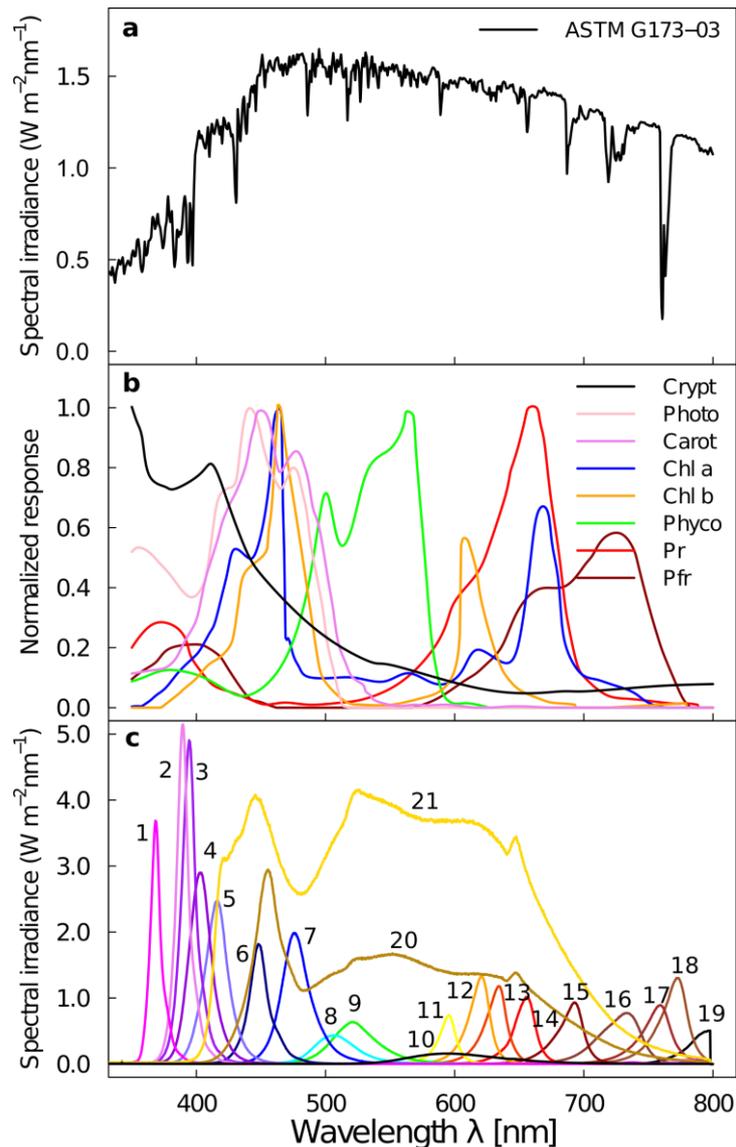


Abbildung 3.4: ASTM G173-03 Standard Referenz Solar Spektrum, Pflanzen-Aktions-Spektren und gemessene individuelle LED-Spektren des Sonnensimulators. (a) ASTM G173-03 Standard Referenz Solar Spektrum von der American Society for Testing and Materials. (b) Pflanzen-Aktions-Spektren für Cryptochrome, Carotenoide, Phototropine, Chlorophyll b, Phycoerythrin, Chlorophyll a, Photochrome Pr und Phytochrome Pfr. (c) Gemessene LED-Spektren bei einem Abstand von 1,6 Meter, mit den folgenden Peakwellenlängen (nm): 1 = 368, 2 = 389, 3 = 394, 4 = 402, 5 = 416, 6 = 448, 7 = 476, 8 = 507, 9 = 520, 10 = 590, 11 = 595, 12 = 621, 13 = 634, 14 = 656, 15 = 693, 16 = 733, 17 = 760, 18 = 773, 19 = >800. Zusätzlich zwei Typen von "weißen" LEDs # 20 und # 21.

In der Tabelle 3.3 sind alle verwendeten LED-Typen aufgeführt, dabei ist jeweils die typische Peakwellenlänge beziehungsweise der Wellenlängenbereich, indem sich die Peakwellenlänge laut Herstellerangaben befindet angegeben. Des Weiteren sind in der Tabelle die in der Testkammer gemessenen Peakwellenlängen der verschiedenen LED-Typen aufgezeigt. Durch Integration der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken der einzelnen LED-Typen wurde die LED spezifische Bestrahlungsstärke berechnet. Werden die LED-spezifischen Bestrahlungsstärken addiert, ergibt sich eine System-Bestrahlungsstärke von 2183 Wm^{-2} , dabei sind die LED-Typen mit einer Peakwellenlänge von 860 nm und 950 nm nicht enthalten.

Tabelle 3.3: Vermessung der verwendeten LED-Typen. Aufgelistet sind die im Datenblatt angegebenen Peakwellenlängen, gemessene Peakwellenlängen und die gemessene Bestrahlungsstärke der verschiedenen LED-Typen.

LED #		Peak Wellenlänge Datenblatt [nm]	Peak Wellenlänge Messung [nm]	Bestrahlungsstärke Messung [Wm^{-2}]
1		typ. 365 nm	368 nm	57
2		typ. 385 nm	389 nm	72
3		typ. 395 nm	394 nm	73
4		typ. 405 nm	402 nm	59
5		410-420 nm	416 nm	56
6		Royal Blue, 450-465 nm	448 nm	40
7		Blue, 465-485 nm	476 nm	62
8		Verde, 498-512 nm	507 nm	19
9		Green, 520-535 nm	520 nm	29
10		PC-Amber, typ. 590 nm	590 nm	15
11		Amber, 585-595 nm	595 nm	14
12		Red Orange, 610-625 nm	621 nm	32
13		Red, 620-630 nm	634 nm	29
14		Photo Red, 650-670 nm	656 nm	25
15		680-700 nm	693 nm	27

16		FarRed, 710-740nm	733 nm	33
17		750-770 nm	760 nm	30
18		770-790 nm	773 nm	40
19		800-820 nm	> 800 nm	13
20		White 5600 K	430-750 nm	421
21		White 5000 K	ca.(400-750 nm)	1037
22		Typ. 860 nm	-	_***
23		Typ. 950 nm	-	_***

Die Messungen zeigten, dass fast alle pflanzenrelevanten Spektralbereiche, mit Ausnahme der UV-B-(280-315 nm) und UV-A-Strahlung (315-360 nm) (Abbildung 3.4), von den verschiedenen LEDs mit ausreichender Bestrahlungsstärke abgedeckt werden. Durch die Kombination verschiedener LEDs und deren Bestrahlungsstärken sind somit photobiologische Experimente in einzelnen Wellenlängenbereichen oder in Bereichen, in denen bestimmte Photorezeptoren aktiv sind, möglich. Beispielsweise löst das Verhältnis (Pr/Pfr) von Phytochrom Pr (inaktive Form absorbiert bei 660 nm) zu Photochrom Pfr (aktive Form, absorbiert bei 730 nm) photomorphogene Reaktionen aus (Pierik et al., 2013) und kann in diesem System gezielt eingestellt werden.

Schließlich umfasst der LED-Sonnensimulator 23 verschiedene LED-Typen und ermöglicht die Simulation der solaren Globalstrahlung im Bereich 360-800 nm.

3.2.3 Zusammengesetztes Spektrum zur Simulation der spektralen Bestrahlungsstärke

Um zu definieren, wie viele verschiedene LEDs mit welcher Wellenlänge benötigt werden, um ein Sonnenspektrum oder ein anderes Zielspektrum möglichst genau zu simulieren, wurde ein Algorithmus programmiert und angepasst, der die Lawson-Hanson-Methode (Lawson & Hanson, 1995) „Non-Negative Least Square“ NNLS verwendet, siehe Kapitel 3.1.2.

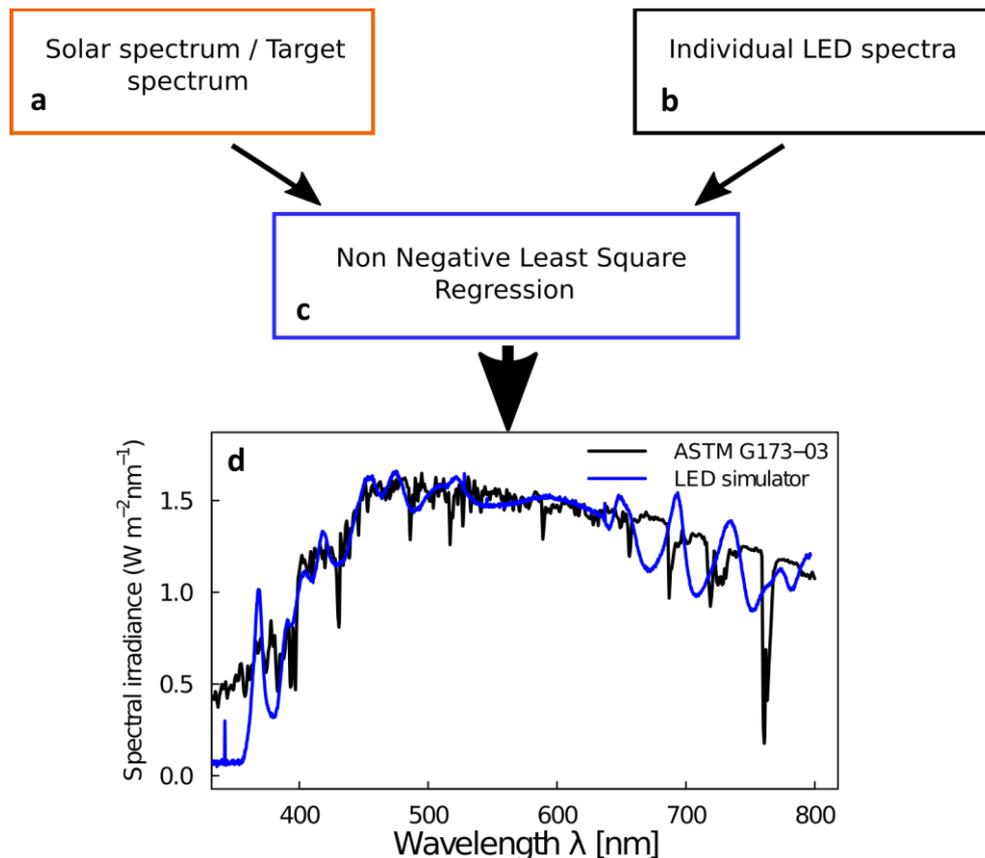


Abbildung 3.5: Arbeitsprozess zur Erzeugung bestimmter spektraler Bestrahlungsstärken. **(a)** Zielspektrum, das simuliert werden soll: Dies kann eine natürliche spektrale Bestrahlungsstärke zu einer bestimmten Tageszeit, Jahreszeit und Standort, oder ein künstliches Spektrum sein. **(b)** Einzelne in Abbildung 3.4 c dargestellte LED-Spektren oder die theoretisch berechneten Spektren mit den Parametern aus den entsprechenden Herstellerdatenblättern. **(c)** Multilineare nichtnegative Regression, basierend auf der Methode der „Non-Negative Least Square“ NNLS des Lawson-Hanson-Algorithmus. **(d)** Ergebnis des Workflows, Zielspektrum ist das ASTM G173-03-Spektrum und das erzeugte LED-Spektrum.

Mit diesem NNLS-Algorithmus kann die optimale Zusammensetzung des gewünschten Zielspektrums berechnet werden, indem die einzelnen gemessenen LED-Spektren als Eingabeparameter verwendet werden. Abbildung 3.5 zeigt beispielhaft den Vergleich des Zielspektrums ASTM G173-03

(Standard-Referenzspektrum der American Society for Testing and Materials: <https://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=solar%20spectral%20irradiance&>) und des generierten Spektrums. Das generierte Spektrum setzt sich ausfolgender Linearkombination der einzelnen LED Spektren zusammen (Formel (3.1)).

$$S_{simulated}(\lambda) = 0,18 * LED_{368} + 0,09 * LED_{389} + 0,00 * LED_{394} + 0,29 * LED_{402} + \\ 0,15 * LED_{416} + 0,00 * LED_{448} + 0,31 * LED_{476} + 0,63 * LED_{507} + 0,00 * LED_{520} + \\ 0,00 * LED_{590} + 0,18 * LED_{595} + 0,00 * LED_{621} + 0,00 * LED_{634} + 0,19 * LED_{656} + \\ 0,70 * LED_{693} + 1,00 * LED_{733} + 0,39 * LED_{760} + 0,41 * LED_{773} + 1,0 * LED_{>800} + \\ 0,16 * LED_{lumi} + 0,26 * LED_{seoul}$$

Zu beachten ist, dass bei der Berechnung des optimal zusammengesetzten Spektrums, der Algorithmus nicht alle vorhandenen Einzelspektren der LEDs nutzt und der Koeffizient dieser LED-Typen Null ist. Daraus folgt, dass die Simulation dieses Spektrums mit weniger LED-Typen als verbaut möglich ist. Für ein anderes Spektrum, zum Beispiel ein Spektrum, das zu einer anderen Tageszeit gemessen wurde, ändern sich die berechneten Koeffizienten und die vorher nicht benötigten LED-Typen werden dann, je nach zu generierendem Spektrum, unter Umständen vom Algorithmus mit einem Wert größer Null berechnet. Dennoch werden bei der Simulation sonnenähnlicher Spektren einige LED-Typen nie benötigt beziehungsweise mit einem Koeffizienten kleiner 0,03 berechnet, z.B. der LED-Typ mit der Peakwellenlänge von 394 nm. Trotz dessen wurden auch diese nicht benötigten LED-Typen mit in den LED-basierten Sonnensimulator aufgenommen. Dadurch wird ermöglicht, dass Funktionsstudien zu photobiologischen Effekten in diesen Wellenlängenbereichen zusätzlich umgesetzt werden können.

Das simulierte Spektrum in Abbildung 3.5 erreichte eine Bestrahlungsstärke von 439 Wm^{-2} im Wellenlängenbereich von 400-700 nm (PAR-Bereich), was einer photosynthetischen Photonenflussdichte (PPFD) von $2.020 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ entspricht. Das ASTM G173-03 Spektrum hat in diesem PAR-Bereich eine Bestrahlungsstärke von 430 Wm^{-2} , was einer Abweichung von 2 % des simulierten gegenüber dem Zielspektrum entspricht. Integriert über den Bereich von 360-800 nm erzeugt der LED-Sonnensimulator, in einem Abstand von 1,6 m, eine Bestrahlungsstärke von 571 Wm^{-2} im Vergleich zu 580 Wm^{-2} des ASTM G173-03-Spektrums, was einer Abweichung zwischen beiden Spektren von -1,6 % entspricht. Im Bereich von 400-500 nm betrug die Abweichung zu ASTM G173-03 -1,2 %, bei 500-600 nm -4,3 %, bei 600-700 nm 0,9 % und von 700-800 nm 4,9 %. Die Bestrahlungsstärke der ASTM G173-03 im Spektralbereich von 800-1000 nm beträgt 150 Wm^{-2} , der LED-Sonnensimulator erreicht in diesem Spektralbereich eine berechnete Strahlungsleistung von 143 W. Zur Berechnung der mittleren absoluten spektralen Abweichung (relative Spectral Deviation, SPD) zwischen dem ASTM G173-03 und dem simulierten Spektrum wurde die Formel (2.9) mit einer spektralen Auflösung von 1 nm verwendet. Für den Spektralbereich von 360-800 nm ist der neue LED-

Sonnensimulator in der Lage, die spektrale Bestrahlungsstärke der ASTM G173-03 mit einer spektralen Abweichung (SPD) von 11,8 % zu reproduzieren, für den Wellenlängenbereich 300 – 800 nm ergeben sich 14,5 %.

Die Berechnung der mittleren normierten spektralen Abweichung (MNSA) mit den Formeln (2.10) und (2.11) ergibt einen Wert von 18,3 % für den Wellenlängenbereich 300-800 nm.

Zusätzlich zu den spektralradiometrischen Messungen wurde ein Pyranometer zur Messung der Globalbestrahlungsstärke eingesetzt. Im Vergleich zu den 729 Wm^{-2} , die vom LED-Sonnensimulator erzeugt werden, beträgt die Bestrahlungsstärke des ASTM-Spektrums 879 Wm^{-2} (im Spektralbereich von 300-1.300 nm). Die Differenz lässt sich durch die fehlende Bestrahlungsstärke in den Wellenlängenbereichen $> 950 \text{ nm}$ und $< 360 \text{ nm}$ des LED-Sonnensimulators erklären. Die maximal erreichbare Bestrahlungsstärke (360 – 800 nm) des LED-Sonnensimulators liegt bei 2.554 Wm^{-2} , allerdings ohne Übereinstimmung mit einem definierten Zielspektrum (Abbildung 3.10b).

Zeitliche Stabilität der Bestrahlungsstärke des LED-Feldes

Um die zeitliche Stabilität des LED-Beleuchtungsfeldes zu analysieren, wurden sieben Messungen in 10-Minuten-Intervallen während der Simulation des ASTM G173-03-Spektrums durchgeführt. Die Bestrahlungsstärke (360-800 nm) änderte sich während der 70 Minuten um nicht mehr als 0,2 %.

Temperatur einzelner LEDs und des inneren LED-Hauptfeldes

Die Temperatur der aktiven LEDs ist einer der Haupteinflussfaktoren (CREE, 2022; OSRAM, 2020) hinsichtlich Lebensdauer und der Konstanz der Strahlungsstärke. Daher wurde die Temperatur mit zwei verschiedenen Methoden gemessen. Zum einen wurde mit einem Thermoelementkabel vom Typ K (RS PRO Thermoelemente, Frankfurt am Main), das so nah wie möglich an das LED-Gehäuse geklebt wurde, gemessen. Zum anderen wurde die Temperatur mit einer Wärmebildkamera FLIR E8 (Teledyne FLIR, Wilsonville, OR, USA) ermittelt, siehe Abbildung 3.6. Beide Messungen ergaben, dass die Temperaturen einzelner LEDs und des gesamten LED-Beleuchtungsfeldes bei der Simulation des ASTM G173-03-Spektrums 45°C nicht überschritten.



Abbildung 3.6: Aufnahme mit einer Wärmebildkamera (FLIR) des LED-Feldes bei der Simulation des ASTM G173-03-Spektrums.

3.2.4 Inhomogenitätsverteilung der Bestrahlungsstärke für verschiedene Wellenlängenbereiche im Prototyp

Die bisherigen Messungen bezogen sich immer auf einen einzigen zentralen Punkt in der 1,6 m entfernten Messebene, aber ein wichtiger Aspekt für diese Arbeit und die spätere Verwendung ist, wie die spektrale Bestrahlungsstärke räumlich horizontal über die gesamte Versuchsfläche von einem m² verteilt war. Räumliche Inhomogenität ist ein Manko für alle Lichtsysteme in Klima- und Wachstumskammern. Sie bestimmt die Fläche, in dem Pflanzen/Objekte unter vergleichbaren spektralen Bestrahlungsstärkebedingungen behandelt werden können. Zur Bestimmung der Inhomogenität der spektralen Bestrahlungsstärke wurde dabei die spektrale Bestrahlungsstärke auf einem 9 x 9 Punktraster mit 0,1 m Abstand in der Fläche gemessen.

Für den Bereich von 360-800 nm betrug die gemittelte Bestrahlungsstärke $556 \pm 15 \text{ Wm}^{-2}$ Standardabweichung (sd: „standard deviation“). Um die spektrale räumliche Verteilung über den Versuchsraum, siehe Abbildung 3.3, zu bestimmen, wurden jeweils fünf Spektralintervalle (1-5) definiert (in nm): 360-400, 400-500, 500-600, 600-700 und 700-800. Aus den 81 Messungen wurde dann der Mittelwert für die jeweiligen Wellenlängenbereiche berechnet. Um die Inhomogenität in den jeweiligen Spektralintervallen zu beurteilen, wurde dann das Verhältnis des Wertes an jeder der xy-Positionen dividiert durch den Mittelwert berechnet. Abbildung 3.7 zeigt die Inhomogenitätsverteilungen der Bestrahlungsstärke für die spektralen Intervalle. Zusätzlich ist das zugehörige Histogramm dargestellt, in dem die Standardabweichung als Maß für die Streuung in der Versuchsfläche in Bezug auf das jeweilige Spektralintervall angegeben ist. Die Auswertung der spektralen Verteilung der Bestrahlungsstärke und der Inhomogenität über den Versuchsraum ist insofern wichtig, als dass nur so eine möglichst gleichmäßige Verteilung der spektralen Bestrahlungsstärke über die gesamte Versuchsfläche gewährleistet werden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass neben der Bestrahlungsstärke von 360-800 nm auch die einzelnen Spektralbereiche homogen in der Experimentalfläche verteilt sind.

Zusätzlich wurde zur Berechnung der Inhomogenitäts-Verteilung IHV, in Anlehnung zur „Non Uniformity“ NU Formel (definiert in der Internationalen Standard Norm IEC 60904-9), für die Wellenlängenbereiche 360-800 nm, 360-400 nm, 400-500 nm, 500-600 nm, 600-700 nm und 700-800 nm die folgende Formel angewendet:

$$IHV(x, y) = \left(\frac{E_{Max} - E(x, y)}{E_{Max} + E(x, y)} \right) * 100\% \quad (3.3)$$

Dabei ist E_{Max} die maximale Bestrahlungsstärke, für den jeweiligen Wellenlängenbereich, die in der Experimentierfläche gemessen wurde und $E(x,y)$ ist die Bestrahlungsstärke für den jeweiligen Wellenlängenbereich an einer der 81 Messpositionen. Im Mittel ergab sich aus den

81 berechneten Werten für IHV ein Wert von 2,1 % für 360-800 nm, 4,5 % für 360-400 nm, 4,4 % für 400-500 nm, 2,1 % für 500-600 nm, 2,1 % für 600-700 nm und 4,3 % für 700-800 nm. Dies zeigt, dass mit dem LED-Sonnensimulator Pflanzen (Objekte) auf einer Fläche von 1 m² homogen bestrahlt werden können.

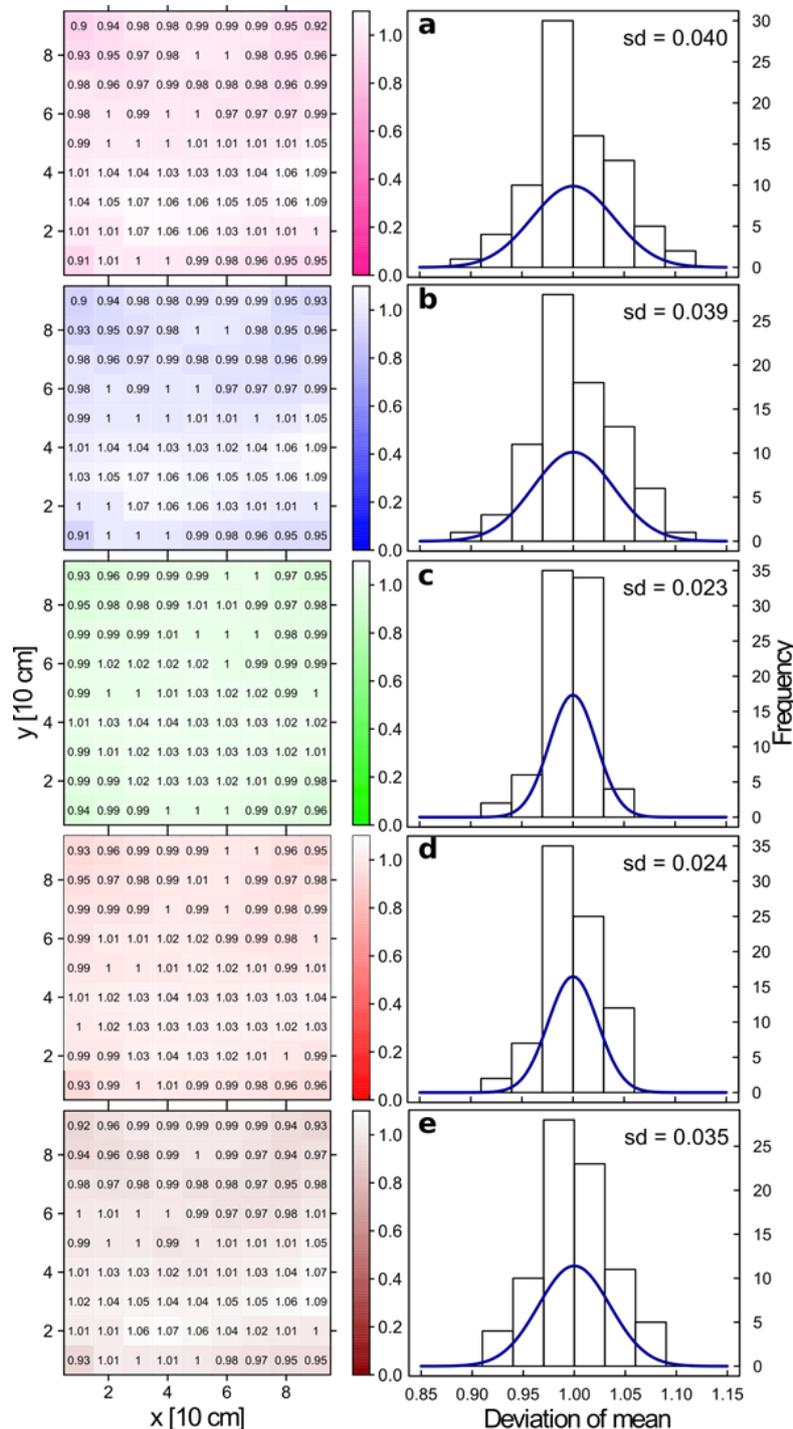


Abbildung 3.7: Quotient der spektralen Bestrahlungsstärke zu mittlerer spektraler Bestrahlungsstärke an verschiedenen Positionen in der Experimentierfläche für verschiedene Wellenlängenintervalle. Alle 10 cm in x-Richtung und 10 cm in y-Richtung wurde die spektrale Bestrahlungsstärke gemessen, wodurch sich eine Matrix mit 81 Positionen ergab. Diese 81 Werte wurden zusätzlich in einem Histogramm aufgetragen. Wellenlängenintervalle (nm.): 360-400 (a), 400-500 (b), 500-600 (c), 600-700 (d), and 700-800 (e), (sd: "Standard deviation")

3.2.5 Simulation eines Tagesgangs der solaren Globalstrahlung im Bereich 360-800 nm für wolkenlosen Himmel

Aufgrund der tageszeitlichen Variation des Sonnenstandes und der damit verbundenen Änderungen des optischen Weges durch die Atmosphäre ergeben sich Änderungen sowohl in der Bestrahlungsstärke als auch in deren spektralen Verteilung. Um zu zeigen, dass der neu entwickelte LED-Sonnensimulator in der Lage ist, diese tageszeitlichen Änderungen des Sonnenspektrums zu reproduzieren, wurde die Bestrahlungsstärke mit der Bestrahlungsstärke verglichen, die an einem sonnigen Tag zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang (19. Mai 2007; 48°13'13.1 "N 11°35'51.4 "E) gemessen wurde (siehe Abbildung 3.8).

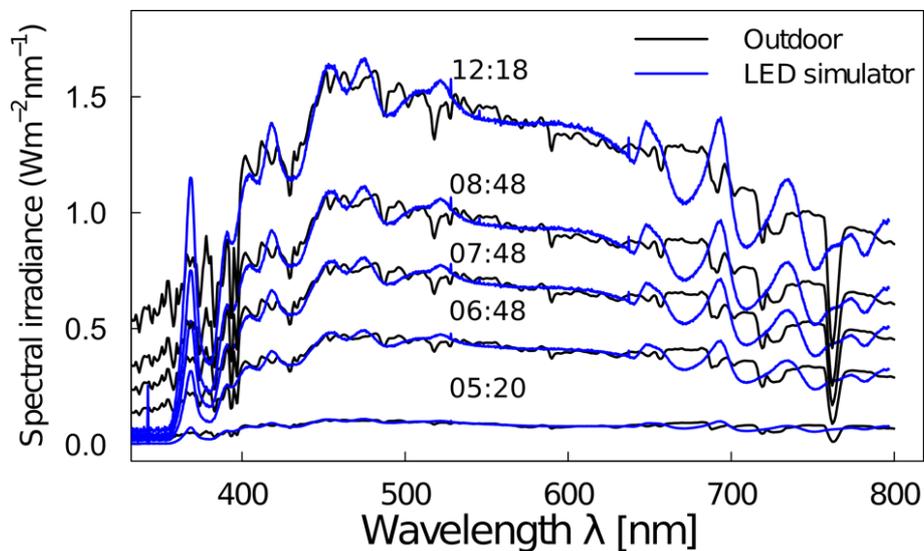


Abbildung 3.8: Gemessene spektrale Bestrahlungsstärken (19. Mai 2007; Neuherberg, 48°13'13.1 "N 11°35'51.4 "E von 05:20 bis 12:18 MEZ, Bentham Doppelmonochromatoren) im Vergleich zu den entsprechenden mit NNLS berechneten LED-Sonnensimulator-Spektren. 12:18 Uhr \triangleq SZA 28,8°, 08:48 Uhr \triangleq SZA 50°, 07:48 Uhr \triangleq SZA 60°, 06:48 Uhr \triangleq SZA 70°, 05:20 Uhr \triangleq SZA 85°.

Der Tagesverlauf der integrierten spektralen Bestrahlungsstärke von 360-800 nm ist in Abbildung 3.9 a dargestellt und mit einem Tagesverlauf verglichen, der durch den LED-Sonnensimulator in Verbindung mit dem NNLS-Algorithmus erzeugt werden kann. Aus Messungen ist ersichtlich, dass das neue System in der Lage ist, die in der Natur variabel vorkommende Bestrahlungsstärke zu erzeugen. Es ist zu erkennen, dass die integrierte Bestrahlungsstärke von 360-800 nm der simulierten Spektren fast vollständig mit den gemessenen natürlichen Spektren zu den verschiedenen Stunden von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang übereinstimmt, die Abweichung zwischen der simulierten und gemessenen Bestrahlungsstärke ist für jede Tageszeit kleiner als 1,5 %. Darüber hinaus wurden die simulierten Spektren in Wellenlängenbereiche zerlegt, die für die Absorption der

verschiedenen photosynthetischen Pigmente und Chromophore relevant sind (siehe Abbildung 3.4 b), um zu überprüfen, ob der LED-Sonnensimulator in der Lage ist, die täglichen Änderungen der Bestrahlungsstärke in den verschiedenen Wellenlängenbereichen zu simulieren, die für verschiedene biologische Aktivitäten und Prozesse entscheidend sind.

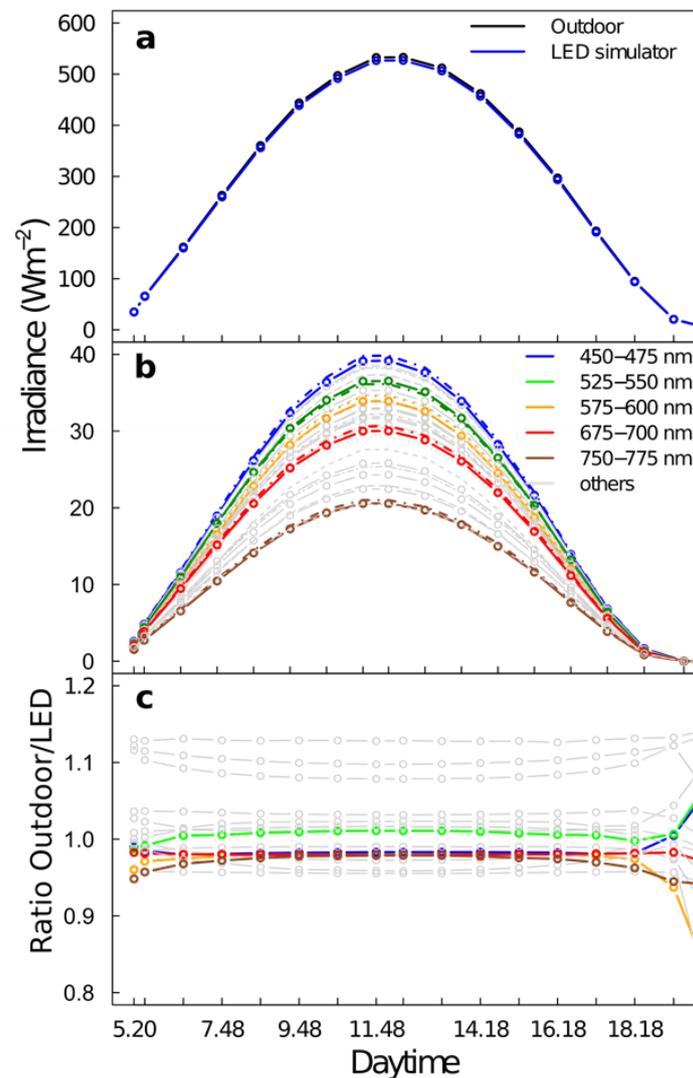


Abbildung 3.9: Tageszeitliche Schwankungen der gemessenen solaren Bestrahlungsstärke (19. Mai 2007; Neuherberg, 48°13'13.1 "N 11°35'51.4 "E von 05:20 bis 20:28 MEZ, Bentham Doppelmonochromatoren) und der simulierten Bestrahlungsstärke. (a) Tagesgang der integrierten solaren spektralen Bestrahlungsstärke von 360-800 nm im Vergleich zur berechneten Bestrahlungsstärke 360-800 nm des LED-Sonnensimulators. (b) Vergleich für das Intervall 360-400 nm und dann für jeweils 25 nm ein Intervall bis 800 nm. (c) Verhältnis zwischen den solaren Bestrahlungsstärken und den berechneten Bestrahlungsstärken des LED-Sonnensimulators für die verschiedenen Wellenlängenintervalle. 05:20 Uhr $\hat{=}$ SZA 85°, 06:48 Uhr $\hat{=}$ SZA 70°, 07:48 Uhr $\hat{=}$ SZA 60°, 08:48 Uhr $\hat{=}$ SZA 50°, 12:18 Uhr $\hat{=}$ SZA 28,8°, 14:18 Uhr $\hat{=}$ SZA 38,9°, 16:18 Uhr $\hat{=}$ SZA 56,6°, 18:18 Uhr $\hat{=}$ SZA 76,5°, 19:18 Uhr $\hat{=}$ SZA 85,5°, 20:28 Uhr $\hat{=}$ SZA 94,5°.

Dafür wurde ein Bereich definiert von 360-400 nm (z. B. zur Abdeckung der Absorption des UV-A/Blaulicht-Photorezeptors) und dann Bereiche in 25-nm-Intervallen von 400-800 nm; insgesamt 17 Spektralbänder. In Abbildung 3.9.b ist die tageszeitliche Variation der Sonneneinstrahlung für jedes der 17 Spektralbänder aufgetragen, wodurch eine Schar von Kurven entsteht. Wie in Abbildung 3.9.a wurden die berechneten Werte von dem LED-Sonnensimulator im Vergleich zu den Werten der Tagessonnenspektren aufgetragen. Um den Vergleich der Verhältnisse von natürlicher Bestrahlungsstärke zu simulierter Bestrahlungsstärke im jeweiligen Spektralbereich zu veranschaulichen, wurden die Kurvenverläufe der simulierten Bestrahlungsstärke in Bezug zu denen der gemessenen Bestrahlungsstärke in der Natur gesetzt (Abbildung 3.9.c). Die sich daraus ergebenden Kurvenverläufe ergaben bei einem Verhältnis von 1 eine nahezu horizontale Gerade über den gesamten Tag. So zeigt der Wellenlängenbereich von 475-500 nm eine Abweichung von weniger als 4 % über den gesamten Tag. Nur in den frühen Morgen- und Abendstunden bei Sonnenaufgang und Sonnenuntergang wichen die mit dem LED-Sonnensimulator simulierten Spektren etwas stärker von der natürlichen Bestrahlungsstärke ab. Dies ist mit den sehr geringen Bestrahlungsstärken zu erklären, die vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang vorherrschen (20-33 Wm⁻² im Vergleich zu 533 Wm⁻² am Mittag).

3.2.6 Simulation von Spektren für verschiedene Anwendungsbereiche

Die Einsatzmöglichkeiten eines solchen LED-basierten Sonnensimulators sind vielfältig. Um dies zu veranschaulichen, wurden vier verschiedene Szenarien als Beispiele ausgewählt: (i) spektrale Bestrahlungsstärke in gärtnerischen Produktionssystemen (He, Kozai, Niu, & Zhang, 2019; Joshi et al., 2019; Zhang, Wang, & Chen, 2019) (Abbildung 3.10 a); (ii) hohe Bestrahlungsstärke, die für die Prüfung von Alterungsprozessen von Materialien verwendet werden könnte (Masili & Ventura, 2016; Wang et al., 2018) (Abbildung 3.10 b); (iii) volles helles Sonnenlicht in einer sonnigen und wolkenfreien Situation (Eisenberg, Habib, Alcaraz, Thombs, & Fillion, 2020; Narla, Kohli, Hamzavi, & Lim, 2020; Volf et al., 2020) (Abbildung 3.10 c); (iv) die spektrale Bestrahlungsstärke für Unterwuchspflanzen unterhalb eines Baumkronendaches (Birke) (Crocco et al., 2015; Fraser, Hayes, & Franklin, 2016; Salter, Franklin, & Whitlam, 2003) (Abbildung 3.10 d). Abbildung 3.10 a zeigt ein Beispiel für "künstliches Licht" (eine LED mit 365 nm, 450 nm und 520 nm), das in gärtnerischen Produktionssystemen, z. B. in der vertikalen Landwirtschaft oder in Gewächshäusern, eingesetzt werden kann.

Weitere mögliche Anwendungen eines solchen LED-Sonnensimulators liegen in den Materialwissenschaften, wo die hohe Bestrahlungsstärke (in diesem Fall bis zu 2500 Wm⁻² im Bereich 360-800 nm), die mehr als doppelt so hoch ist wie die in Mitteleuropa auftretende maximale Bestrahlungsstärke, z. B. für Alterungstests verwendet werden könnte (Abbildung 3.10 b). Abbildung 3.10 c zeigt das Spektrum eines sonnigen Tages am 19. Mai 2007 um 12:18 Uhr, gemessen in Neuherberg am Helmholtz Zentrum München, im Vergleich zu dem durch

den LED-Sonnensimulator erzeugten Spektrum. Schließlich vergleicht Abbildung 3.10 d das im Schatten einer Birke gemessene Spektrum (Aphalo, 2015) mit dem simulierten Spektrum. Dies zeigt, dass der LED-Sonnensimulator in idealer Weise geeignet ist, verschiedene spektrale Bestrahlungsstärken, im Wellenlängenbereich 360-800 nm, für unterschiedliche Anwendungen zu simulieren.

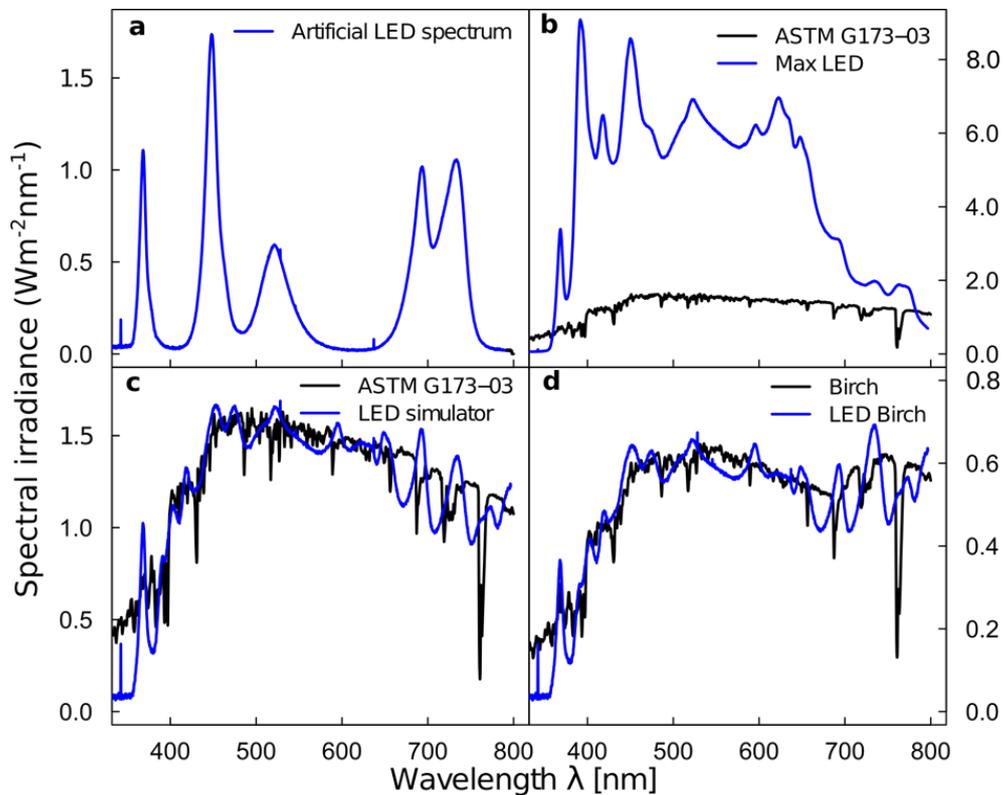


Abbildung 3.10: Verschiedene mögliche Anwendungen eines LED-basierten Sonnensimulators. (a) Künstliches Spektrum für die Innen-/Vertikallandwirtschaft oder Gewächshäuser. (b) Hohe spektrale Bestrahlungsstärke von 2554 Wm^{-2} (360-800 nm) für die Materialwissenschaft. (c) Spektrale Bestrahlungsstärke an einem wolkenlosen Tag (19. Mai 2007; $48^{\circ}13'13.1'' \text{N}$ $11^{\circ}35'51.4'' \text{E}$) um 12:18 MEZ für menschliches Wohlbefinden, Pflanzenforschung, Photovoltaik und Exobiologie im Weltraum. (d) Spektrale Bestrahlungsstärke unter einer Birke für die photobiologische Fragestellungen (Aphalo, 2015).

3.3 Diskussion

Der hier entwickelte LED-Sonnensimulator ermöglicht die Erzeugung von Spektren für die Bestrahlung von biologischen Proben/Organismen und Materialien in einem Wellenlängenbereich von 360-950 nm. Berücksichtigt man, dass die Strahlstärke jeder der 23 einzelnen LED-Typen in circa 100 Stufen reguliert werden kann, können theoretisch mehr als 100^{23} verschiedene Spektren erzeugt werden. Darüber hinaus erzeugt der LED-Sonnensimulator eine sehr hohe Bestrahlungsstärke (ca. 2500 Wm^{-2} im Bereich 360-800 nm) und erreicht oder übertrifft sogar die Bestrahlungsstärke auf der Erdoberfläche. Der Markt für LED-basierte Lampensysteme wächst rasant für die Pflanzenkultivierung in Gewächshäusern

(Choong, He, Qin, & Lee, 2018; Cocetta et al., 2017; Gómez & Gennaro Izzo, 2018; He et al., 2019; Jiang, Mohagheghi, & Moallem, 2020; Nelson & Bugbee, 2015) und in Klimakammern für Forschungszwecke an Zellkulturen und kleinen Pflanzen (Blanken, Cuaresma, Wijffels, & Janssen, 2013; Massa, Wheeler, Morrow, & Levine, 2016; Watson et al., 2018). Meist handelt es sich dabei um Lampensysteme, die nur mit wenigen LED-Typen bestückt sind. Die gängigsten Beleuchtungseinrichtungen für den Gartenbau sind Leuchtstoffröhren, Natriumhochdrucklampen und LEDs. Die Leuchtstoffröhren haben eine PAR-Effizienz von 1,25 $\mu\text{mol Photonen s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ ($\mu\text{mol PAR-Photonen pro Sekunde pro Watt Energie}$), die Natriumhochdrucklampen von 1,87 $\mu\text{mol Photonen s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ und LEDs von 1,91 $\mu\text{mol Photonen s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ (Blanken et al., 2013). Diese Standard-Beleuchtungsgeräte sind jedoch nicht vergleichbar mit dem hier vorgestellten LED-Sonnensimulator, der mit dem Ziel aufgebaut wurde, im Spektralbereich von 360-950 nm eine enge Übereinstimmung mit der solaren spektralen Bestrahlungsstärke zu erreichen.

Im Vergleich zur solaren Globalstrahlung ist zu beachten, dass der kurzwellige UV-Bereich (280-350 nm) von dem LED-Sonnensimulator ausgeschlossen wurde. Dies liegt daran, dass die Entwicklung von LEDs für diesen Spektralbereich noch nicht so weit fortgeschritten ist wie für andere Wellenlängen. Auch die UV-B-LEDs, z. B. eine 315-nm-LED, die mit einem Strom von 350 mA und einem typischen Strahlungsfluss von 26 mW betrieben wird, haben eine extrapolierte L70-Lebensdauer von < 3000 h (Knauer et al., 2019), was im Vergleich zu LEDs im UV-A (>360 nm) und im Spektralbereich von 400-950 nm gering ist. Integriert man die spektrale Bestrahlungsstärke der ASTM G173-03 von 280 -360 nm, so ergibt sich ein Wert von 19 Wm^{-2} . Bei Verwendung von UV-LEDs wären somit mindestens 730 Einzel-LEDs notwendig, um diese Bestrahlungsstärke in dem hier entwickelten LED-Sonnensimulator zu erreichen. Aus diesem Grund und der geringen Lebensdauer wurde entschieden, diese Gruppe von UV-LEDs noch nicht in den jetzigen Aufbau einzubeziehen. Bei der Auswahl der LEDs wurde darauf geachtet, LEDs mit einer möglichst langen und vergleichbaren Lebensdauer zu verwenden.

Es ist jedoch seit langem bekannt, dass die kurzwellige UV-Strahlung für Pflanzen, Menschen und Tiere sehr wichtig, aber auch schädlich ist (Paul & Gwynn-Jones, 2003). Der UV-B-Anteil der solaren spektralen Bestrahlungsstärke, der den Boden erreicht (280- 315 nm), ist sehr variabel und schwankt mit dem Sonnenstand, der Absorption/Reflexion von Wolken und der Dynamik der atmosphärischen Ozonschicht (Paul & Gwynn-Jones, 2003; Seckmeyer, 1991). Aktionsspektren zeigten schon früh, dass Organismen auf UV-B-Strahlung reagieren (Caldwell, Camp, Warner, & Flint, 1986). Dies hängt damit zusammen, dass Biomoleküle wie DNA und Proteine UV-Strahlung absorbieren, was zu Mutationen in bestimmten Bereichen des genetischen Materials (Willing et al., 2016) und zur Schädigung zellulärer Stoffwechselprozesse (Caldwell et al., 1986) führt. Neuere Arbeiten zeigen, dass Pflanzen einen UV-B-Photorezeptor besitzen (Liao, Liu, Yang, & Jenkins, 2020), der im Zusammenspiel mit Cryptochromen und Phytochromen eine dynamische Anpassung der Pflanzen an das vorherrschende „Lichtklima“ (spektrale Bestrahlungsstärke) ermöglicht (Tissot & Ulm, 2020). Dies zeigt, dass der Schwerpunkt der Weiterentwicklung dieses LED-Sonnensimulators in der Einbeziehung von UV-LEDs liegen könnte, wenn es technisch realisierbar ist.

Alternativ ist es möglich, den UV-Anteil der solaren spektralen Bestrahlungsstärke durch eine Kombination des LED-Sonnensimulators mit zwei Typen von konventionell verwendeten UV-Röhren mit einer Peak-Wellenlänge von 313 nm und 340 nm zu ergänzen.

Ein Vorbild für dieses Hybridsystem könnten die in der Abteilung für Experimentelle Umweltsimulation (EUS) am Helmholtz Zentrum München vorhandenen Sonnensimulatoren (<https://www.helmholtz-muenchen.de/eus/facilities/sun-simulators/index.html>) sein (Seckmeyer & Payer, 1993; Thiel et al., 1996) sein. Diese Sonnensimulatoren verwenden UV-Röhren mit einer Peakwellenlänge von 313 nm und spezielle Borosilikat- und Kalkglasfilter, um die spektrale Bestrahlungsstärke im UV-Bereich nahe am Sonnenspektrum zu gestalten. Durch den Austausch der bisherigen Lampen (blaue Leuchtstoffröhren sowie Halogen-Metaldampf- und Halogenlampen) gegen den hier beschriebenen LED-Sonnensimulator unter Beibehaltung der 313-nm-UV-Leuchtstoffröhren und Hinzunahme von 340-nm-Röhren kann ein hybrider Sonnensimulator mit einer spektralen Bestrahlungsstärke, die dem Sonnenspektrum von 280-950 nm sehr nahe kommt, entwickelt werden. Wenn es einen wissenschaftlichen Grund gibt, die Infrarot-Bestrahlungsstärke über 950 nm hinaus zu erhöhen, besteht zudem die Möglichkeit, zusätzliche Halogenlampen einzusetzen. Sie erzeugen Infrarotstrahlung sogar effizienter als LEDs. Ein solcher hybrider Sonnensimulator, der UV-Röhren (siehe Abbildung 2.10), LEDs und Halogenlampen enthält, könnte eine solare Globalstrahlung von 280-2500 nm simulieren.

Der in dieser Arbeit entwickelte LED-Sonnensimulator liefert alle Photonen in dem für Pflanzen wichtigen Spektralbereich (360-800 nm) (Sullivan & Deng, 2003) in ausreichender Menge und in einem ausgewogenen Mischungsverhältnis für die Aktivierung und Regulation von Photorezeptoren (UV-A- und Blaulichtrezeptor, Phytochromsystem Pr/Pfr, mit Ausnahme des UV-B-Rezeptors) sowie für die photochemische Energieumsetzung der Photosynthese (Carotinoide, Xanthophylle und Chlorophylle), siehe Abbildung 3.4. Der neue LED-Sonnensimulator erlaubt es also, das photobiologische Verhalten von Pflanzen im Wellenlängenbereich 360-950 nm gezielt zu manipulieren. Die Möglichkeit, das Verhältnis von UV-A / blauem Licht zu rotem und nahen IR, vor einem natürlichen PAR-Hintergrund, einzustellen, könnte eine der herausragenden Eigenschaften dieses LED-Systems sein.

Die Absorption von Photonen ist immer mit der Übertragung von thermischer Energie verbunden. Wenn Blätter/Oberflächen bestrahlt werden, erwärmen sie sich (Monson et al., 2020). Die Blatttemperaturen sind jedoch nicht konstant. Sie schwanken in hoher Frequenz aufgrund kurzfristiger Änderungen der Bestrahlungsstärke und schneller Blattbewegungen durch fluktuierende Windwirbel (Singsaas et al., 1999). Die Temperatur der Blattoberfläche unterscheidet sich fast immer von der Temperatur der Umgebungsluft. Im vollen, hellen „Sonnenlicht“ ist die Blatttemperatur meist etwas höher, während im Schatten die Blatttemperaturen niedriger sein können als die umgebende Lufttemperatur (Curtis, 1936). Die Blätter passen ihre Temperatur durch Verdunstung von Wasser über ihre Spaltöffnungen an und kühlen sich je nach Wasserverfügbarkeit innerhalb der Pflanze ab (Lin, Chen, Zhang, Fu, & Fan, 2017). Neben der Umgebungslufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der

Blattmorphologie (Tian, Yu, He, & Hou, 2016) hat die spektrale Bestrahlungsstärke einen entscheidenden Einfluss auf die Blattemperatur. Nahes und fernes IR (> 850 nm) der Globalstrahlung wird von Pflanzen nur als Wärmestrahlung wahrgenommen (Absorption durch Wassermoleküle, CO₂, Lignin) und hat nach heutigem Kenntnisstand keine direkte physiologische Wirkung. Die unterschiedlichen Blattemperaturen in Abwesenheit des nahen IR können jedoch zu indirekten physiologischen Wirkungen führen. In dem Wellenlängenbereich von ca. 730 - 1300 nm beträgt der Anteil der Reflexion von Pflanzen je nach physiologischem Zustand und Blattmorphologie ca. 80 - 90 % (Nelson & Bugbee, 2015). Diese charakteristischen Reflexionseigenschaften von Blättern werden in der Fernerkundung ausgenutzt, um Vegetationselemente zu differenzieren und physiologische Zustände (z. B. Trockenheit, Seneszenz) aus Satellitendaten abzuleiten (Herrmann et al., 2011). Konventionelle Beleuchtungssysteme in Klimakammern und Gewächshäusern haben einen hohen Anteil an langwelliger Strahlung, was zu einem starken, nicht natürlichen Wärmegradienten innerhalb des Pflanzendaches und zur Erwärmung der Triebspitzen führt. Um diesem thermischen Gradienten entgegenzuwirken, müssen Klimakammern und Gewächshäuser mit zusätzlicher Beleuchtung stark gekühlt und belüftet werden, was bedeutet, dass entweder relativ kalte Luft eingeblasen wird oder die Luftwechselrate sehr hoch ist. Beides kann zu sehr heterogenen Umweltbedingungen für die Pflanzen führen.

LED-Sonnensimulatoren, wie der hier vorgestellte, ermöglichen es, Pflanzen unter einer „kälteren“ Bestrahlungsstärke zu kultivieren, aber gleichzeitig die für physiologische und morphologische Prozesse wichtige spektrale Bestrahlungsstärke in natürlicher Dosierung aufzubringen, ohne die oberen Pflanzenteile zu überhitzen oder durch Luftbewegung mechanischen Stress zu verursachen. Gleichzeitig wird der Energiebedarf des LED-Sonnensimulators durch die bessere elektrische Leistungseffizienz der LEDs und die geringe erforderliche Kühlleistung der Klimakammern und Gewächshauskabinen reduziert. Der in dieser Arbeit entwickelte LED-Sonnensimulator ist für eine mögliche Bestrahlungsstärke im IR bis ca. 950 nm ausgelegt. Das bedeutet, dass weit weniger IR zur Verfügung steht als in der solaren Globalstrahlung enthalten ist, aber es ermöglicht die Kultivierung von Pflanzen unter „wärmerem Licht“ jenseits von 800 nm, das kontrolliert genutzt werden kann. Mit dem gleichen Konzept könnte ein echter großflächiger LED-Sonnensimulator realisiert werden, indem die Anzahl des Haupt-LED-Feldes erhöht wird. Die niedrige Betriebstemperatur (40 °C) des LED-Lichtfelds wird die Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Effizienz und Aufrechterhaltung der Bestrahlungsstärke erhöhen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entwicklung eines Sonnensimulators auf Basis der LED-Technologie den Weg in zukünftige Anwendungen von der Photobiologie bis zur Materialforschung ebnet, auch wenn es noch nicht möglich ist, die solare Globalstrahlung von 280-1500 nm effizient nur mit LEDs zu simulieren. Der hier vorgestellte LED-Sonnensimulator, der verschiedene Spektren von solar bis künstlich von UV-A (360 nm) bis zum nahen IR (950 nm) über eine Fläche von 1 m² homogen simulieren kann, stellt jedoch einen wichtigen Meilenstein in diese Richtung dar.

4 Hybrid-System zur Simulation der solaren Globalstrahlung im Bereich 280-800 nm in einer Klimakammer

4.1 Methoden & Material

4.1.1 Umbau der Klimakammer

Für die Verwendung des in Kapitel 3 beschriebenen LED-Sonnensimulators in einer Klimakammer, unter Hinzunahme von Strahlungsquellen für den UV-Bereich 280-360 nm, waren Anpassungen und Erweiterungen in der Klimakammer notwendig.

Dafür wurde in einem ersten Schritt die komplette Lampendecke, inklusive der Lampenvorschaltgeräte und Wasserfilter, des traditionellen Simulators (siehe Kapitel 2.4) demontiert. Im zweiten Schritt wurde das gesamte LED System in einer Rahmenkonstruktion mit den Maßen 169 x 158 x 42 cm (Länge, Breite, Höhe) zusammengefasst und montiert. Dabei wurde zusätzlich die Anzahl der kleinen äußeren Kühlkörper, siehe Kapitel 3.1.4 - 3.1.6, von sechs auf 12 Stück erweitert. Dadurch konnte die Anzahl der verwendeten Light Engines von 99 auf 110 erhöht werden. Abbildung 4.1 zeigt ein Schema, wie das gesamte LED-Feld in der Decke der Klimakammer aufgebaut ist. Für die 110 Light Engines wurden in der Rahmenkonstruktion insgesamt 100 LED-Konstantstromquellen integriert, die mittels DALI-Schnittstelle individuell angesteuert werden, siehe Kapitel 3.1.7.

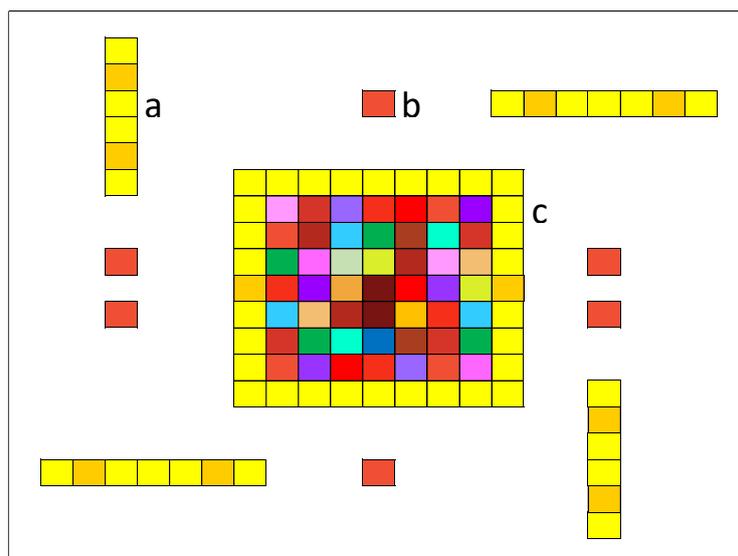


Abbildung 4.1: Schema des gesamten LED-Feldes in der Decke der Klimakammer. (a) Äußere kleine LED-Felder, bestückt mit Light Engines vom LED-Typ # 20 und # 21. (b) Äußere kleine LED-Felder, bestückt mit Light Engines vom LED-Typ # 16. (c) Inneres Haupt-LED-Feld, siehe Kapitel 3.1.3 - 3.1.6.

Von den 25 pro Seitenwand verbauten UV-Röhren (313 nm) des traditionellen Simulators wurden jeweils 7 Stück entfernt und durch sechs Stück 340 nm UV-Röhren ersetzt. Diese UV-A 340+ Leuchtstoffröhren stammen von der Firma Q-Labs (Ohio, USA) und haben bei 340 nm ihre Peakwellenlänge. Somit ergeben sich insgesamt 72 Stück 313 nm Leuchtstoffröhren, 24 Stück 340 nm Leuchtstoffröhren und 2938 LEDs / COBs, die im Hybrid-System verbaut wurden. Zum Schutz des LED-Feldes vor der hochenergetischen UV-Strahlung der UV-Leuchtstoffröhren wurde ein durchgehendes Einscheibensicherheitsglas (ESG 10mm) mit den Maßen 1300 x 1300 x 10 mm (Länge, Breite, Dicke) unterhalb des LED-Feldes angebracht.

Die sich unterhalb der UV-Röhren befindende Filterglasebene, hier Sanalux® 4,0 mm, zur Manipulation der UV-Strahlung wurde ohne Änderungen vom traditionellen Simulator übernommen. Abbildung 4.2 zeigt ein Foto der umgebauten Klimakammer und ein Foto des Hybrid-Systems zur Erzeugung einer spektralen Bestrahlungsstärke im Bereich 280-950 nm.

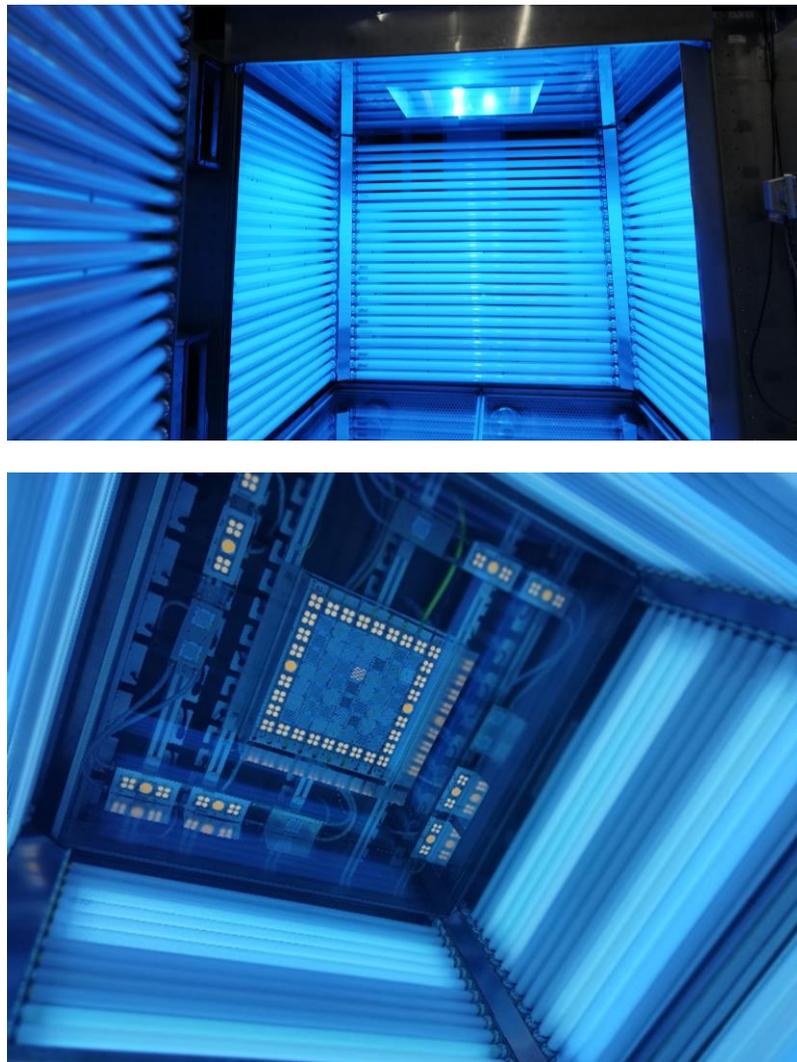


Abbildung 4.2: Foto der umgebauten Klimakammer und ein Foto des Hybrid-Systems in der Klimakammer zur Erzeugung der spektralen Bestrahlungsstärke im Bereich 280-950 nm.

4.1.2 Verwendete Glasfilter und deren Transmissionseigenschaften

Aus konstruktiven Gründen war es notwendig, das LED-Feld vor der hochenergetischen Strahlung der sich unterhalb befindenden UV-Leuchtstoffröhren zu schützen. Dafür wurde unterhalb des LED-Systems (siehe Abbildung 4.2 und Abbildung 4.5) ein durchgehendes Einscheibensicherheitsglas (ESG) (Glaserei R. Ditl & Co., München), mit den Maßen 1300 x 1300 x 10 mm (Länge x Breite x Dicke), in die Klimakammer eingebaut. In Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 sind die mit dem Spektrophotometer BIOCHROM 4060 (Biochrom Ltd., Cambridge, United Kingdom) gemessenen Transmissionskurven der verschiedenen Filtergläser gezeigt. Durch die Verwendung von ESG 10 mm im Hybrid-Sonnensimulator wird der nach oben abgestrahlte Anteil, der von den UV-Leuchtstoffröhren erzeugten UV-B-Strahlung, absorbiert und die LEDs vor dieser hochenergetischen Strahlung geschützt. Ein daraus resultierender Nachteil ist, dass die spezifische Ausstrahlung der einzelnen LEDs ebenfalls über den gesamten Wellenlängenbereich durch das Filterglas ESG 10 mm reduziert wird. Für den Wellenlängenbereich 360-400 nm ergibt sich eine mittlere Transmission von 75 %, für 400-700 nm ergibt sich 80 % und für den Bereich 700-800 nm ergibt sich eine mittlere Transmission von 72 %.

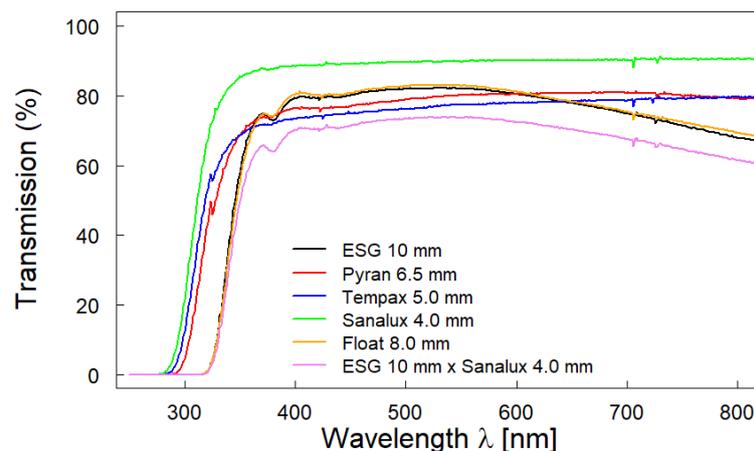


Abbildung 4.3: Messungen der Transmission von verschiedenen Filtergläsern. Zusätzlich wird die resultierende Transmissionskurve für die Kombination aus ESG (Einscheibensicherheitsglas) 10 mm und Sanalux® 4,0 mm Filterglas gezeigt.

Des Weiteren kommen Filtergläser zum Einsatz, die sich unterhalb der UV-Leuchtstoffröhren und oberhalb des Experimentierraums befinden, siehe Abbildung 4.2 und Abbildung 4.5. Eine Aufgabe, die diese Filtergläser dabei übernehmen, ist die gasdichte Abtrennung zwischen den Ebenen. Dadurch wird ermöglicht, dass im Experimentierraum die Temperatur, Luftfeuchte und die Gaszusammensetzung der Luft reguliert und eingestellt werden kann. Die zweite Aufgabe dieser Filtergläser ist die Manipulation der UV-Strahlung. In Abbildung 4.4 sind die Transmissionskurven der Filtergläser logarithmisch aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die individuellen Filtergläser unterschiedliche UV-Kanten aufweisen und es damit ermöglicht

wird, die UV-B-Bestrahlungsstärke einzustellen und die von den UV-Röhren produzierte UV-C-Strahlung nahezu komplett zu absorbieren.

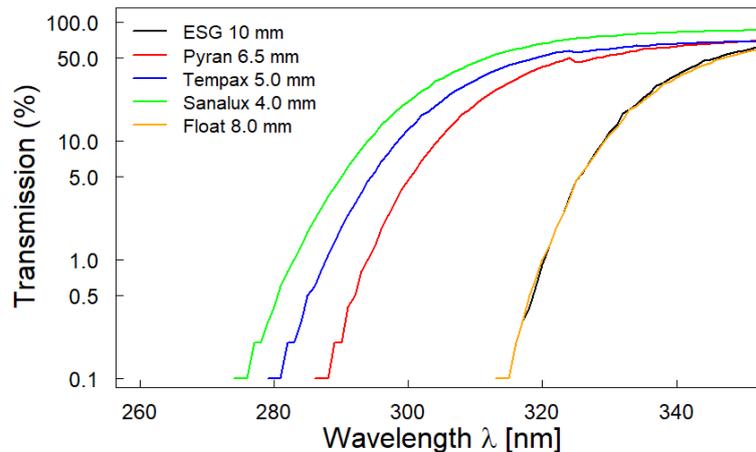


Abbildung 4.4: Messungen der Transmission von verschiedenen Filtergläsern im UV-Bereich. Die y-Achse ist logarithmisch aufgetragen.

Die von den LEDs erzeugte spezifische Strahlung muss auf dem Weg zur Experimentierfläche zwei Filterglasebenen (ESG 10mm, Sanalux® 4,00 mm) passieren. In Abbildung 4.3 ist die Transmissionskurve gezeigt, die aus der Kombination von ESG 10 mm und Sanalux® 4,0 mm entsteht. Im Wellenlängenbereich 360-400 nm ergibt sich eine mittlere Transmission von 66 %, für den PAR-Bereich 400 – 700 nm ergibt sich eine mittlere Transmission von 71,8 % und im FarRed-Bereich 700 – 800 nm eine mittlere Transmission von 64,6 %. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Verwendung der Filtergläser im Bereich 360-400 nm zu Verlusten von 34 %, im PAR-Bereich zu Verlusten von 28,2 % und im FarRed-Bereich zu Verlusten von 35,4 % führen.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Realisierung eines Hybrid-Sonnensimulators

Nach der Integration und Erweiterung des LED-Sonnensimulators in die umgebaute Decke der Klimakammer, besteht der neue Hybrid-Sonnensimulator am Helmholtz Zentrum München zur Simulation der Globalstrahlung aus folgenden Hauptkomponenten, siehe Abbildung 4.5: (i) Das LED-Feld, unterhalb dessen sich eine 1,3 x 1,3 Meter (ii) Filterglasscheibe (ESG 10 mm) zum Schutz des LED-Feldes vor UV-C- und UV-B-Strahlung befindet. (iii) Die vier Innenwände der Klimakammer, auf denen jeweils 313 nm und 340 nm UV-Röhren installiert sind. (vi) Ein Filterglassystem, hier Sanalux® 4,0 mm, das sich unterhalb der UV- Röhren beziehungsweise oberhalb der Experimentierkammer befindet, dadurch wird die UV-C Strahlung komplett absorbiert und die UV-B Strahlung kann gezielt manipuliert werden, zudem wird der Versuchsraum zum UV-Lampenraum gasdicht abgeschlossen. Die erzeugte Strahlung des LED-Feldes muss somit zwei Ebenen von Filtergläsern passieren, um den Experimentalraum beziehungsweise die Experimentierfläche zu erreichen. Die Strahlung der UV-Röhren muss dagegen nur eine Ebene des Filterglas-Systems passieren.

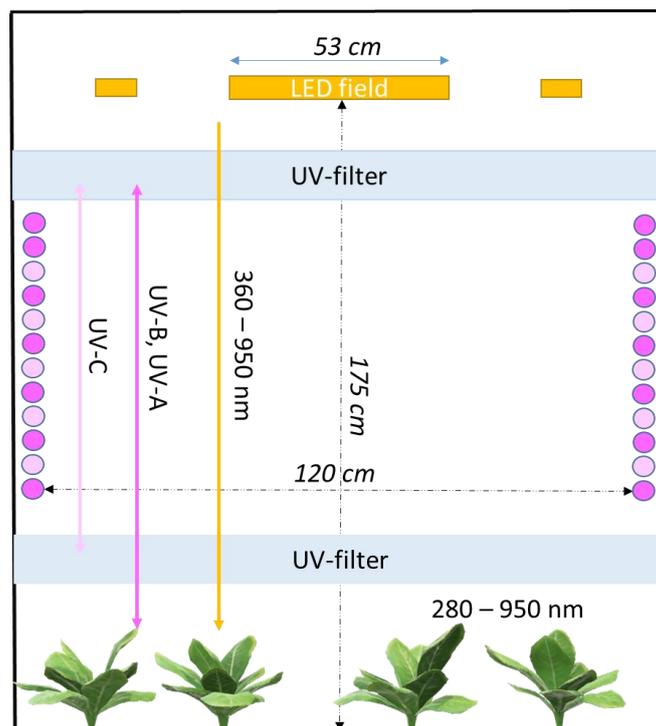


Abbildung 4.5: Schema der Klimakammer am Helmholtz Zentrum München mit integriertem Hybrid-Sonnensimulator

4.2.2 Charakterisierung der verschiedenen Strahlungsquellen im Hybrid-Sonnensimulator

In Abbildung 4.6 ist die spektrale Bestrahlungsstärke gezeigt, die durch die Kombination von 313 nm und 340 nm UV-B-Röhren, bei Verwendung von Sanalux® 4,0 mm als Filterglasscheibe, entsteht. Zudem zeigt die Abbildung 4.6 die einzelnen spektralen Bestrahlungsstärken der verschiedenen LED-Typen mit folgenden Peakwellenlängen, siehe Tabelle 3.1, in nm: 368, 389, 394, 402, 416, 448, 476, 507, 520, 595, 621, 634, 656, 693, 733, 760, 773, 810, 860, 950 und der zwei „weißen“ LEDs mit 5600 K und 5000 K, ebenfalls bei Verwendung von Sanalux 4,0 mm in Kombination mit der ESG 10 mm Filterglasscheibe unterhalb der LED-Lichtdecke. Die in Abbildung 4.6 gezeigten Spektren für die 810 nm, 860 nm und 950 nm LED-Typen sind theoretisch berechnet. Dafür wurden die in den Hersteller-Datenblättern gezeigten relativen spektralen Bestrahlungsstärken digitalisiert und über die spezifischen LED-Effizienzen entsprechend skaliert.

Der neuentwickelte Hybrid-Sonnensimulator beinhaltet somit insgesamt 25 verschiedene Strahlungsquellen, die einen Spektralbereich von 280-980 nm abdecken. Die Strahlungsleistung der 23 verschiedenen LED-Strahlungsquellen können separat mit DALI (Digital Addressable Lighting Interface) eingestellt werden. Die UV-Röhren sind in 5 Schaltgruppen eingeteilt. Diese lassen sich separat schalten und somit kann die Strahlungsleistung der UV-Röhren angepasst werden. Eine weitere Möglichkeit zur Manipulation der UV-B- und UV-A-Strahlung ist die Verwendung von verschiedenen Filtergläsern und deren Kombinationen, siehe Kapitel 4.1.2.

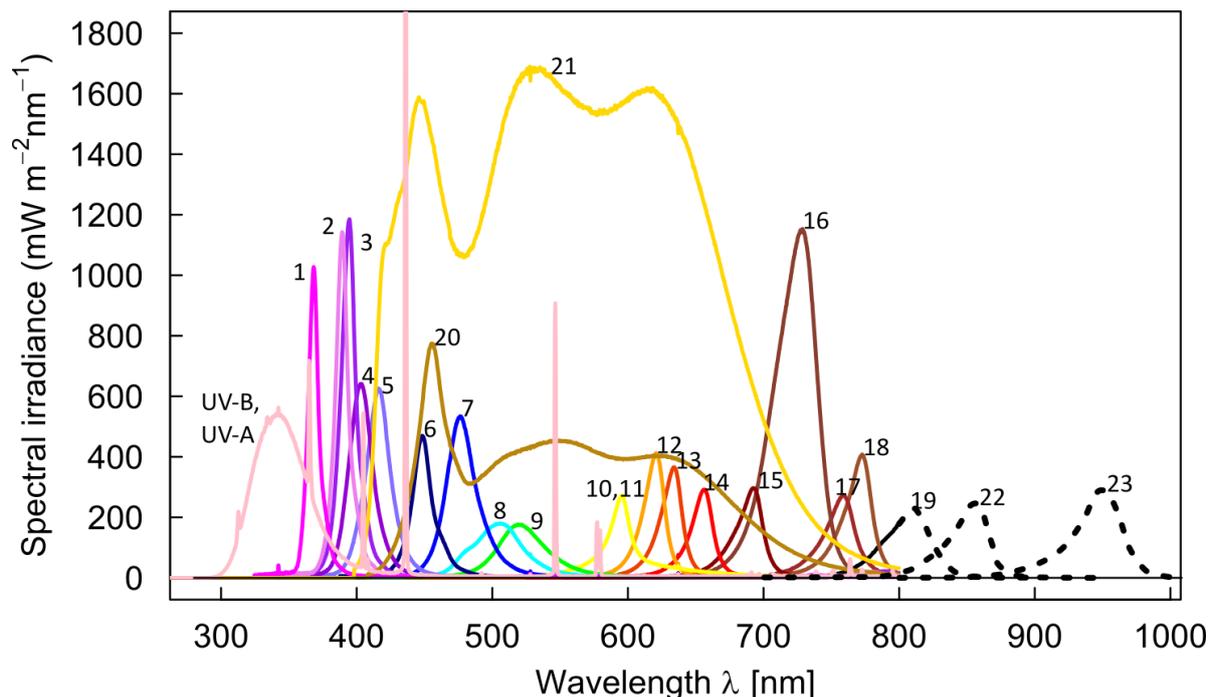


Abbildung 4.6: Gemessene spektrale Bestrahlungsstärken der im Hybrid-Sonnensimulator verwendeten individuellen Strahlungsquellen mit folgenden Peakwellenlängen (nm): 1 = 368, 2 = 389, 3 = 394, 4 = 402, 5 = 416, 6 = 448, 7 = 476, 8 = 507, 9 = 520, 10 = 590, 11 = 595, 12 = 621, 13 = 634, 14 = 656, 15 = 693, 16 = 733, 17 = 760, 18 = 773, 19 = 810, 22 = 850, 23 = 950, zusätzlich zwei Typen von "weißen" LEDs 20, 21 und das Spektrum aus der Kombination von 313 nm und 340 nm Leuchtstoffröhren (UV). Bei diesen Messungen waren ESG 10 mm und Sanalux 4 mm Filtergläser eingesetzt. Die LED-Spektren 19, 22 und 23 wurden ab 800 nm theoretisch berechnet.

In Tabelle 4.1 sind die maximalen Bestrahlungsstärken der 25 verschiedenen Strahlungsquellen angegeben, wie sie sich in der Experimentalfläche der Klimakammer ergeben. Werden die maximalen Bestrahlungsstärken der 25 Strahlungsquellen aufsummiert, ergibt sich eine berechnete maximale Gesamtbestrahlungsstärke von 786,8 Wm⁻².

Tabelle 4.1: Vermessung der verschiedenen Strahlungsquellen des Hybrid-Sonnensimulators.
*Die LED-Spektren 19, 22 und 23 wurden ab 800 nm theoretisch berechnet.

Nummer	Peakwellenlänge Datenblatt	Peak- wellenlänge Messung	Bestrahlungsstär. [Wm ⁻²] Messung	Footprint
UV-B, UV-A	313, 340 nm		27	Röhre
1	typ. 365 nm	368 nm	12	3.3x3.3 mm
2	typ. 385 nm	389 nm	15	3.3x3.3 mm
3	typ. 395 nm	394 nm	18	3.3x3.3 mm
4	typ. 405 nm	402 nm	14	3.3x3.3 mm
5	410-420 nm	416 nm	15	3.3x3.3 mm
6	Royal Blue, 450-465 nm	448 nm	10	3.3x3.3 mm
7	Blue, 465-485 nm	476 nm	17	3.3x3.3 mm
8	Verde, 498-512 nm	507 nm	8,7	3x3 mm
9	Green, 520-535 nm	520 nm	8,2	3.3x3.3 mm

10+11	Amber + PC Amber 585-595 nm	595 nm	7,5	3.3x3.3 mm
12	Red Orange, 610-625 nm	621 nm	8,9	3.3x3.3 mm
13	Red, 620-630 nm	634 nm	7,9	3.3x3.3 mm
14	Photo Red, 650-670 nm	656 nm	6,6	3.3x3.3 mm
15	680-700 nm	693 nm	7,9	4.4x5.2 mm
16	FarRed, 710-740 nm	733 nm	42	3x3 mm
17	750-770 nm	760 nm	8,1	4.4x5.2 mm
18	770-790 nm	773 nm	11	4.4x5.2 mm
19	800-820 nm	> 800 nm	9*	4.4x5.2 mm
20	White, 5600 K	430-750 nm	109	38x38 mm
21	White, 5000 K	400-750 nm	402	19x19 mm
22	typ. 860 nm	-	9*	3x3 mm
23	typ. 950 nm	-	13*	3x3 mm

4.2.3 Simulation der solaren Globalstrahlung für wolkenlosen Himmel

Die einzelnen individuellen spektralen Bestrahlungsstärken der verwendeten Strahlungsquellen bilden das Grundgerüst des neuen Hybrid-Sonnensimulators. Um mit ihnen möglichst genau ein „natürliches“ oder ein künstliches Zielspektrum zu erzeugen, wurde wieder die Methode der „Non Negative Least Square“ NNLS-Regression angewendet, siehe Kapitel 3.1.2. Das Ergebnis ist eine Linearkombination der einzelnen individuellen spektralen Bestrahlungsstärken der 25 Strahlungsquellen mit den durch den NNLS-Algorithmus berechneten Koeffizienten. Die Abbildung 4.7a zeigt das Simulationsergebnis des Hybrid-Sonnensimulators für drei verschiedene Zielspektren.

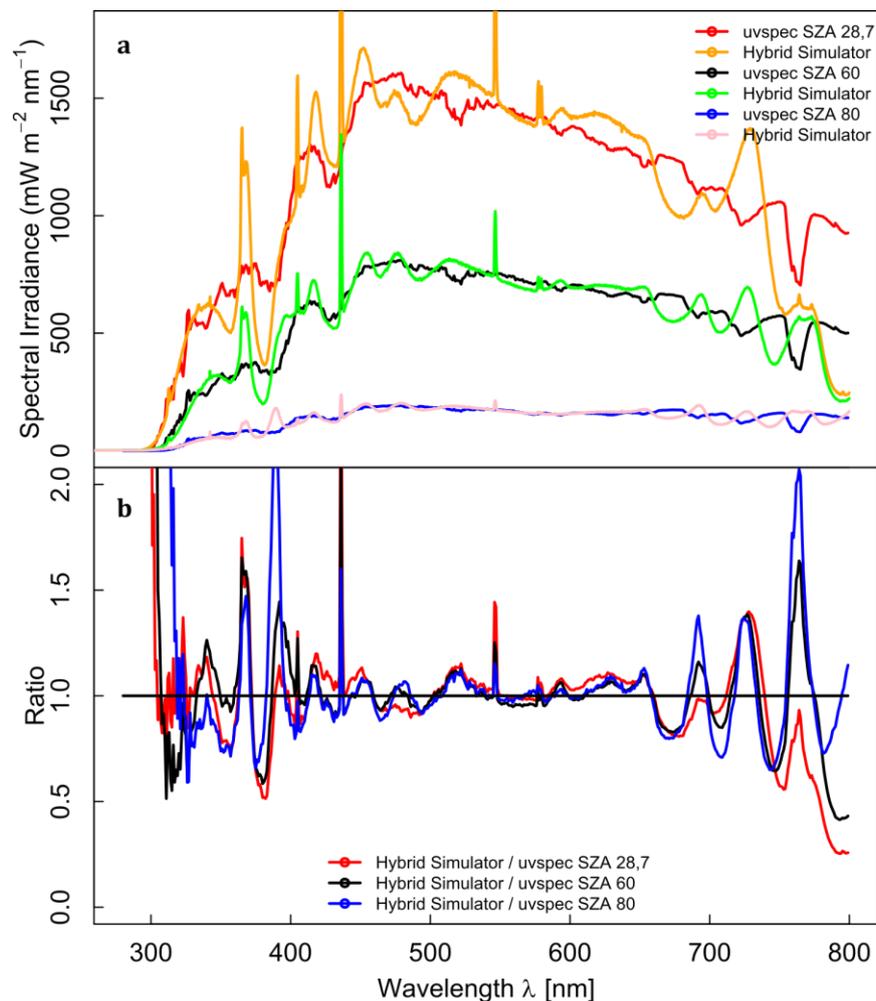


Abbildung 4.7: Simulation der solaren Globalstrahlung im Bereich 280 – 800 nm für einen wolkenlosen Himmel. (a) Vergleich zwischen gemessenen (Newport OSM400) spektralen Bestrahlungsstärken und den mit uvspec modellierten spektralen Bestrahlungsstärken für SZA 28,7°, SZA 60° und SZA 80°. (b) Quotienten aus gemessener spektraler Bestrahlungsstärke zu modellierter spektraler Bestrahlungsstärke für SZA 28,7°, SZA 60° und SZA 80°. Die modellierten Spektren haben eine spektrale Auflösung von 1 nm, im Bereich 331–800 nm wurde über ein Intervall von 10 nm zur entsprechenden Zentralwellenlänge gemittelt. Die gemessenen Spektren haben im Bereich 280–800 nm eine spektrale Auflösung von 1 nm. Als Filterglas wurde Sanalux® 4,0 mm verwendet.

In der Tabelle 4.2 sind die Bestrahlungsstärken für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300 – 800 nm der drei mit uvspec modellierten Spektren sowie die vom Sonnensimulator gemessenen Spektren angegeben. Ebenfalls wurde die prozentuale Abweichung und die mittlere absolute spektrale Abweichung (SPD) zwischen den gemessenen und modellierten spektralen Bestrahlungsstärken für die verschiedenen Wellenlängenbereiche berechnet.

Tabelle 4.2: Berechnete Bestrahlungsstärken für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR und FarRed für die mit uvspec modellierten Spektren sowie die vom Sonnensimulator erzeugten Spektren. Als Filterglas wurde Sanalux® 4,0 mm verwendet. Die mit uvspec modellierten Spektren repräsentieren die „natürliche“ spektrale Bestrahlungsstärke bei SZA 28,7°, 60° und 80°. Die Abweichungen der Bestrahlungsstärken für die jeweiligen Wellenlängenbereiche sind in Prozent angegeben. Zusätzlich wurde die SPD für die jeweiligen Bereiche mit der Formel (2.9) berechnet.

	UV-B	UV-A	PAR	FarRed	300 – 800 nm
uvspec SZA 28,7° [Wm ⁻²]	1,72	54,8	411	98,1	565
Messung [Wm ⁻²]	1,69	53,4	420	78,6	554
Abweichung [%]	-1,8	-2,6	2,2	-19,9	-2,0
SPD [%]	17,8	19,8	7,8	33,8	13,6
uvspec SZA 60° [Wm ⁻²]	0,4	25,2	209	52,0	287
Messung [Wm ⁻²]	0,35	26,5	211	47,2	285
Abweichung [%]	-14,3	5,2	1,0	-9,2	-0,7
SPD [%]	41,0	22,9	5,6	27,3	11,2
uvspec SZA 80° [Wm ⁻²]	-	5,6	49,4	13,8	69
Messung [Wm ⁻²]	-	5,9	49,5	13,5	69
Abweichung [%]	-	5,4	0,2	-2,2	0,0
SPD [%]	-	28,2	6,4	25,2	12,1

Für die Simulation der solaren Globalstrahlung für SZA 28,7° ergibt sich im UV-B-Bereich eine prozentuale Abweichung von -1,8 %, im UV-A-Bereich von -2,6 %, im PAR-Bereich von 2,2 % und im FarRed-Bereich von -19,9 %. Der SPD-Wert für die Simulation von SZA 28,7° beträgt im

UV-B-Bereich 17,8 %, im UV-A-Bereich 19,8 %, im PAR-Bereich 7,8 % und im FarRed-Bereich 33,8 %. Für den Wellenlängenbereich 300-800 nm ergab sich ein SPD-Wert von 13,6 % und eine prozentuale Abweichung von -2,0 %, dabei beträgt die integrierte spektrale Bestrahlungsstärke des modellierten Spektrums 565 Wm^{-2} und die im Simulator gemessene integrierte spektrale Bestrahlungsstärke 554 Wm^{-2} . Die Berechnung der mittleren normierten spektralen Abweichung (MNSA) ergab einen Wert von 16 % im Wellenlängenbereich von 300–800 nm. Im Vergleich zu dem mit dem Array-Radiometer gemessenen Bestrahlungsstärke von 554 Wm^{-2} (300-800 nm), ergaben Messungen mit einem Pyranometer (CM11 Sensor, Kipp & Zonen, Delft, Niederlande) einen Wert von 653 Wm^{-2} .

Für die Simulation der Globalstrahlung für SZA 60° und SZA 80° befinden sich ebenfalls die berechneten Werte für die Bestrahlungsstärke, prozentuale Abweichung und spektrale Abweichung für die jeweiligen Wellenlängenbereiche in der Tabelle 4.2. Für die Simulation für SZA 60° ergibt sich im UV-B-Bereich eine prozentuale Abweichung von -14,3 % und eine spektrale Abweichung von 41 %. Für die UV-A-Strahlung ergibt sich eine prozentuale Abweichung von 5,2 % mit einer spektralen Abweichung von 22,9 %, bei der PAR-Strahlung ergibt sich eine prozentuale Abweichung von 1,0 % mit 5,6 % spektraler Abweichung (SPD) und für den FarRed-Bereich -9,2 % mit einer spektralen Abweichung von 27,3 %. Für den Wellenlängenbereich 300-800 nm ergab sich eine spektrale Abweichung von 11,2 % und eine prozentuale Abweichung von -0,7 %, dabei beträgt die integrierte Bestrahlungsstärke des modellierten Spektrums 287 Wm^{-2} und die im Simulator gemessene integrierte Bestrahlungsstärke 285 Wm^{-2} .

Bei der Simulation von SZA 80° wurde keine Auswertung für den UV-B-Bereich vorgenommen, da das mit uvspec modellierte Spektrum für SZA 80° praktisch keine UV-B-Strahlung aufweist. Für die Simulation von SZA 80° ergibt sich für den UV-A-Bereich eine prozentuale Abweichung von 5,4 % mit einer spektralen Abweichung (SPD) von 28,2 %, im PAR-Bereich beträgt die prozentuale Abweichung 0,2 % mit einer spektralen Abweichung von 6,4 %, und im FarRed-Bereich beträgt die prozentuale Abweichung -2,2 % mit einer spektralen Abweichung von 25,2 %. Für den Wellenlängenbereich 300-800 nm ergab sich eine spektrale Abweichung von 12,1 % und eine prozentuale Abweichung von 0 %, dabei beträgt die integrierte Bestrahlungsstärke des modellierten Spektrums 69 Wm^{-2} und die im Simulator gemessene integrierte Bestrahlungsstärke 69 Wm^{-2} .

Besonders hervorzuheben ist die Simulation im PAR-Bereich für die drei verschiedenen Sonnenzenitwinkel $28,7^\circ$, 60° und 80° , deren prozentuale Abweichung maximal 2,2 % und deren spektrale Abweichung maximal 7,8 % beträgt.

Unter Verwendung von Sanalux® 4,0 mm als Filterglas wurden folgende maximalen Bestrahlungsstärken des Hybrid-Sonnensimulators für die verschiedenen Wellenlängenbereiche erreicht: Für den UV-B-Bereich ergab sich eine maximale Bestrahlungsstärke von $1,69 \text{ Wm}^{-2}$, im UV-A-Bereich von $70,6 \text{ Wm}^{-2}$, im PAR-Bereich von 567 Wm^{-2} , im FarRed-Bereich von $85,4 \text{ Wm}^{-2}$ und im 300-800 nm Bereich ergab sich eine maximale Bestrahlungsstärke von 725 Wm^{-2} .

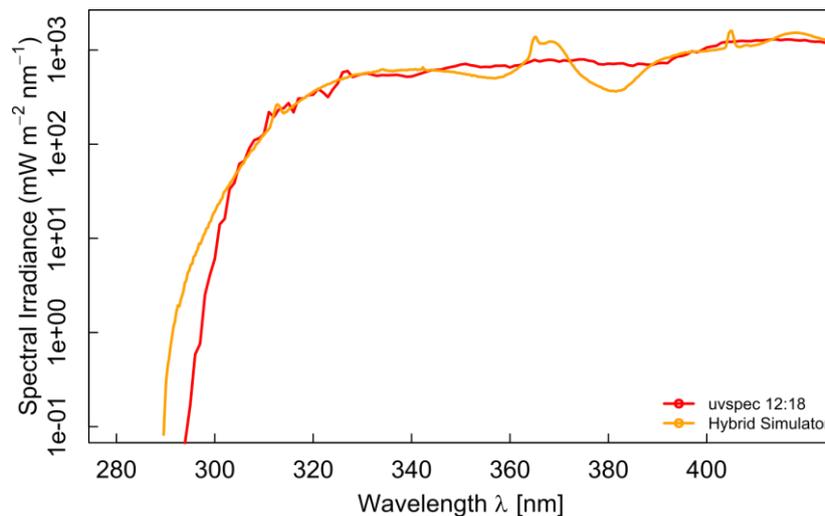


Abbildung 4.8: Vergleich von gemessener (Newport OSM400) spektralen Bestrahlungsstärke und mit uvspec modellierter spektraler Bestrahlungsstärke für SZA 28,7°, Ozon 325 DU im UV-B- und UV-A-Bereich, die y-Achse ist logarithmisch aufgetragen. Das mit uvspec modellierte Spektrum hat eine spektrale Auflösung von 1 nm, im Bereich 331-800 nm wurde über ein Intervall von 10 nm zur entsprechenden Zentralwellenlänge gemittelt. Das gemessene Spektrum des Hybrid-Sonnensimulators hat im Bereich 280-800 nm eine spektrale Auflösung von 1 nm. Als Filterglas wurde Sanalux® 4,0 mm verwendet.

4.2.4 Inhomogenitätsverteilung der Bestrahlungsstärke für die Bereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 280-800 nm

Für die Messungen der horizontalen Inhomogenitätsverteilung (IHV) wurde auf der Experimentierfläche in der Klimakammer ein Raster aufgezeichnet. Dafür wurde ausgehend von dem Mittelpunkt der Experimentierfläche jeweils alle 20 Zentimeter in x-Richtung und in y-Richtung eine Markierung aufgebracht, die die Position des Messkopfes definiert hat. Dadurch ergab sich eine Matrix bzw. ein Raster, das eine Fläche von 1,2 x 1,2 Meter aufspannt, mit insgesamt $7 \times 7 = 49$ Positionen, an denen jeweils die spektrale Bestrahlungsstärke gemessen wurde.

Anschließend wurden die für 49 Positionen gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300-800 nm integriert. Zur Berechnung der IHV für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300-800 nm wurde die Formel (3.3) angewendet.

Dabei ist E_{Max} die maximale Bestrahlungsstärke für den jeweiligen Wellenlängenbereich, die in der Experimentierfläche gemessen wurde und $E(x,y)$ ist die Bestrahlungsstärke an einer der 49 Messpositionen.

Abbildung 4.9 zeigt die Inhomogenitätsverteilung für die berechneten Werte in den Spektralbereichen UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300-800 nm. Dafür wurde ein „sonnenähnliches“ Spektrum mit 490 Wm^{-2} Bestrahlungsstärke (300-800 nm) in der Klimakammer vom Hybrid-Simulator erzeugt.

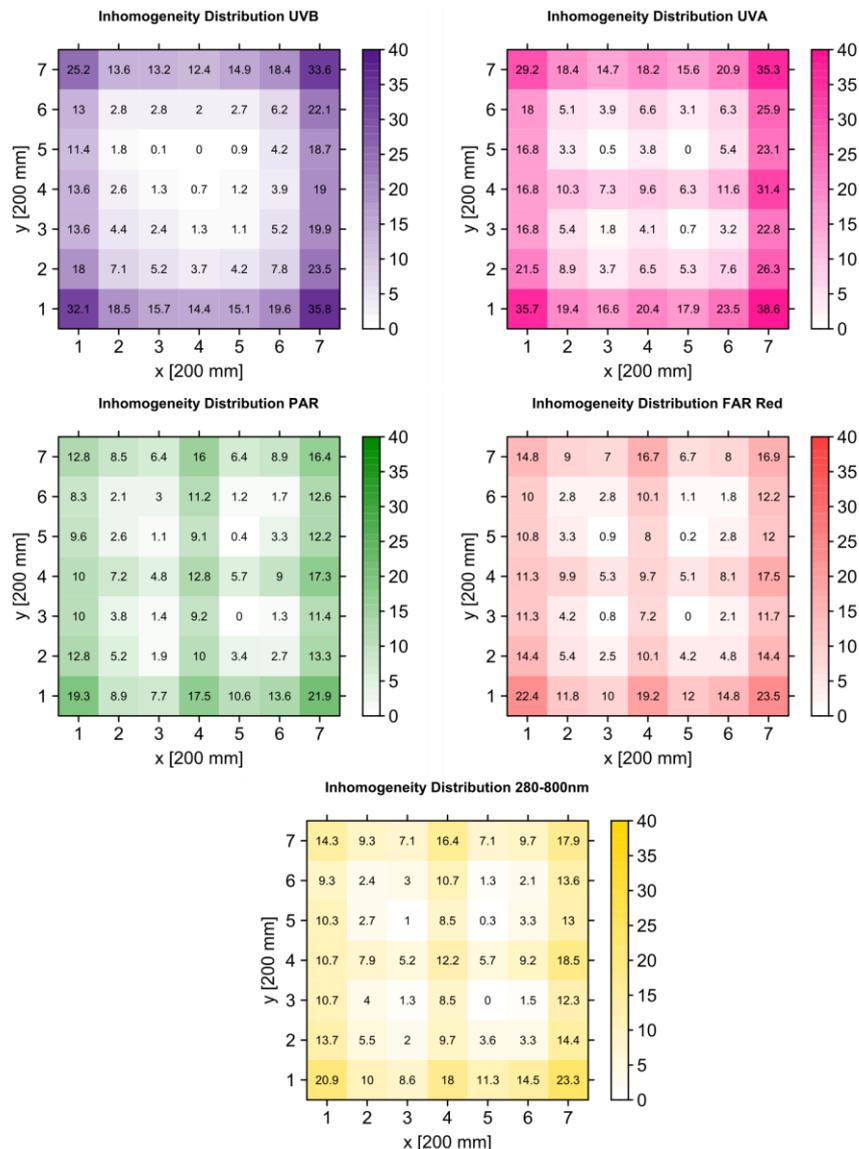


Abbildung 4.9: Inhomogenitätsverteilung IHV in der Versuchsfläche der Klimakammer für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR (400-700 nm), FarRed (700-800 nm) und 300-800 nm. Für diese Messungen erzeugte der Simulator ein Spektrum mit einer integrierten spektralen Bestrahlungsstärke von 490 Wm^{-2} (300-800 nm). Es wurden an 49 Positionen, entspricht der Fläche $1,2 \times 1,2 \text{ m}$, jeweils die spektrale Bestrahlungsstärke gemessen.

In der Abbildung 4.9 zeigt sich, dass an den Randpositionen in der Klimakammer die Bestrahlungsstärke sinkt. Diese Beschattungseffekte resultieren hauptsächlich aus den konstruktiven Randbedingungen der Klimakammer. Des Weiteren zeigt sich in der IHV von UV-A, PAR, FarRed und 300-800 nm, dass die kreuzförmige Halterung der Filterglasscheiben zu einer Verminderung der Bestrahlungsstärke direkt unterhalb der Halterung führt. Durch die

Positionierung der UV-Leuchtstofflampen an den Wänden und den daraus erhöhten Anteil an diffuser Strahlung ist dieser Beschattungseffekt der Filterglashalterung im UV-B-Bereich nicht vorhanden. Für den UV-B-Bereich konnte eine mittlere Inhomogenität (m.I.) von 10,8 % bestimmt werden. Für den UV-A-Bereich lag die m.I. bei 13,8 %. Für den PAR-Bereich ergab sich eine m.I. von 8,3 %. Für den FarRed-Bereich ergab sich eine m.I. von 8,8 %. Für den Bereich 300 - 800 nm ergab sich eine m.I. von 8,8 %.

Für die Beurteilung der Inhomogenitätsverteilung der inneren Fläche, 0,8 x 0,8 m, wurden die Mittelwerte aus 25 Positionen berechnet. Für den UV-B-Bereich ergab sich eine m.I. von 3,0 %. Für den UV-A-Bereich ergab sich eine m.I. von 5,2 %. Für den PAR-Bereich ergab sich eine m.I. von 4,6 %. Für den FarRed-Bereich ergab sich eine m.I. von 4,5 %. Für den Bereich 300-800 nm ergab sich eine m.I. von 4,6 %.

Um sicher zu stellen, dass die IHV für verschiedene Spektren ebenfalls gute Verteilungen aufweisen, wurde die oben beschriebene Prozedur zusätzlich für Spektren mit 257 Wm⁻², 156 Wm⁻² und 30 Wm⁻² Bestrahlungsstärke (300-800 nm) durchgeführt, siehe Tabelle 4.3.

In der Tabelle 4.3 wird ersichtlich, dass der neue Hybrid-Sonnensimulator eine gute Inhomogenitätsverteilung bei kleinen Bestrahlungsstärken, wie sie in der Natur in den Morgen- und Abendstunden, bei Bewölkung und im Pflanzenunterstand vorkommen können, erzeugen kann. Ebenfalls werden für hohe Bestrahlungsstärken, wie sie in Mitteleuropa im Sommer zur Mittagszeit erreicht werden, gute Inhomogenitätsverteilungen in der Experimentalfläche erreicht. Mittlere Bestrahlungsstärken von 257 Wm⁻² und 156 Wm⁻² können in der Natur vormittags oder nachmittags vorkommen und können ebenfalls mit einer guten Inhomogenitätsverteilung in der Klimakammer erzeugt werden.

Tabelle 4.3: Auswertung der Inhomogenitätsverteilung IHV für den UV-B-, UV-A-, PAR- und FarRed-Bereich für verschiedene Bestrahlungsstärken in der Klimakammer.

** Hier wurde nur der Bereich 360-400 nm ausgewertet.*

Bestrahlungsstärke 300 -800 nm	UV-B 1,44 m ²	UV-B 0,64 m ²	UV-A 1,44 m ²	UV-A 0,64 m ²	PAR 1,44 m ²	PAR 0,64 m ²	FarRed 1,44 m ²	FarRed 0,64 m ²
490 Wm ⁻²	10,8%	3,0%	13,8%	5,2%	8,3%	4,6%	8,8%	4,5%
257 Wm ⁻²	13,1%	4,6%	15,8%	6,7%	10,4%	6,1%	11,9%	7,1%
156 Wm ⁻²	13,7%	5,4%	15,6%	6,3%	8,1%	3,2%	10,7%	5,2%
30 Wm ⁻²	-	-	11,7% *	7,0% *	10,4%	6,2%	11,5%	6,7%

Bisher wurden für die IHV nur die Werte der integrierten spektralen Bestrahlungsstärke für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300-800 nm betrachtet. Deswegen

wurde zur Veranschaulichung der „spektralen Inhomogenitätsverteilung“ die Standardabweichung pro 1 nm, die sich aus den 49 Positionen für eine Fläche von 1,2 m x 1,2 m = 1,44 m² und die sich aus 25 Positionen für die innere Fläche von 0,8 m x 0,8 m = 0,64 m² ergibt, berechnet.

Dafür wurde in einem ersten Schritt die Formel (4.1) angewendet, um die spektralen Bestrahlungsstärken zu normieren, mit $\lambda = 300, 301, 302, \dots, 800$ nm, $E_j(\lambda)$ ist die spektrale Bestrahlungsstärke mit $j=1, \dots, 49$ für die Gesamtfläche und $j=1, \dots, 25$ für die innere Fläche, $E_{Max}(\lambda)$ ist die spektrale Bestrahlungsstärke, die in der Versuchsfläche der Klimakammer die größte Bestrahlungsstärke im Bereich 300-800 nm erreicht hat. Mit der Formel (4.2) konnte dann für $e_j(\lambda)$ die Standardabweichung pro 1 nm berechnet werden.

$$e_j(\lambda) = \frac{E_j(\lambda)}{E_{Max}(\lambda)} \quad (4.1)$$

$$S(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (e_j(\lambda) - \overline{e(\lambda)})^2} \quad (4.2)$$

Abbildung 4.10 zeigt die Standardabweichung $S(\lambda)$ in Abhängigkeit der Wellenlänge bei einer Bestrahlungsstärke von 490 Wm⁻² für die Gesamtfläche von 1,44 m² und die innere Fläche von 0,64 m². Dabei zeigt sich, dass $S(\lambda)$ in Abhängigkeit zur Wellenlänge steht und die Funktion $S(\lambda)$ für die innere Fläche geringere Werte in allen Wellenlängenbereichen aufzeigt.

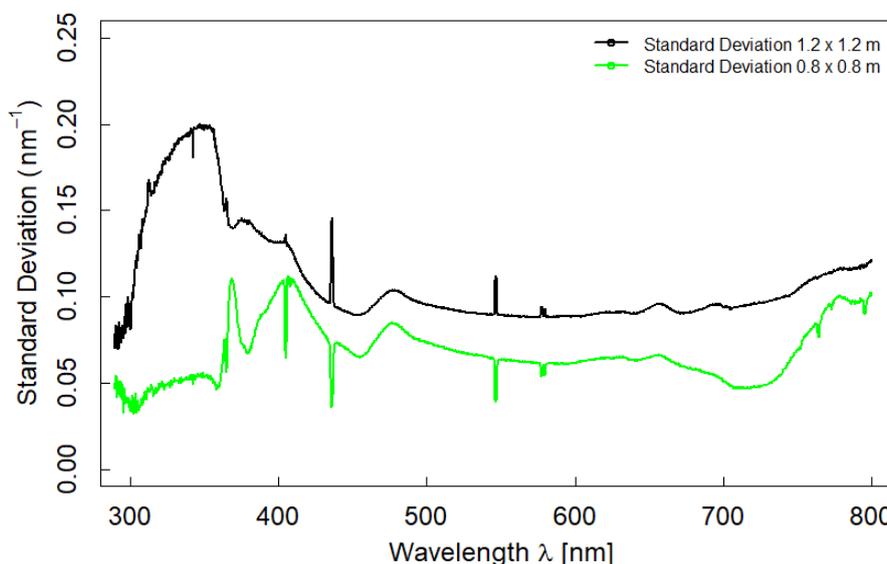


Abbildung 4.10: Standardabweichung pro 1 nm, berechnet aus 49 Positionen in der Gesamtfläche 1,2 m x 1,2 m = 1,44 m² und aus 25 Positionen in der inneren Fläche von 0,8 m x 0,8 m = 0,64 m². Die spektrale Auflösung beträgt 1 nm.

Generell resultiert die Wellenlängenabhängigkeit aus der unterschiedlichen Anzahl und der Verteilung der verwendeten Light Engines mit den individuellen LED-Typen und der

Anordnung der UV-Leuchtstoffröhren. So zeigt sich beispielsweise bei 368 nm eine erhöhte Standardabweichung für die innere Fläche, da nur insgesamt zwei Light Engines mit dieser Wellenlänge verbaut sind. Ähnliches gilt ebenfalls für die Bereiche um die 400 nm und für die Bereiche größer 740 nm. Durch die hohe Anzahl an verwendeten UV-B- und UV-A-Röhren zeigt sich hingegen im Bereich 290-350 nm eine im Vergleich zum Mittelwert geringere Standardabweichung für die innere Fläche. Für die Gesamtfläche steigt die Standardabweichung dagegen im Bereich 290-350 nm, da sich Teile der Gesamtfläche fast unterhalb der UV-Röhren befinden und es dort zu Beschattungseffekten kommt. Für den LED-Typ 733 nm wurden insgesamt 10 Light Engines verbaut, was zu einer geringeren Standardabweichung in diesem Wellenlängenbereich führt.

4.2.5 Simulation der solaren Globalstrahlung für vollständig bedeckten Himmel

Die folgenden Untersuchungen sollten die Machbarkeit der Simulation der solaren Globalstrahlung für einen vollständig bedeckten Himmel aufzeigen. Zur Erzeugung von Referenzspektren für einen vollständig bedeckten Himmel wurde wieder die Strahlungssimulations-Software uvspec eingesetzt. Für die Modellierung von zwei Spektren für bedeckten Himmel mit SZA 05° und 30° wurden dabei folgende Parameter verwendet: Ozon 325 DU, Höhe 0,483 km, Luftdruck 1014 mbar, Albedo 0,2, Bewölkung Fraktionsfaktor 1, Bewölkung zwischen 3000-4000 Meter Höhe mit 0,2 gm⁻³ Wasser und effektivem Tröpfchen-Radius von 3,4 µm, Tag 138 des Jahres. In Abbildung 4.11 sind die mit uvspec modellierten spektralen Bestrahlungsstärken und die in der Versuchsfläche der Klimakammer gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken von 280-800 nm aufgetragen.

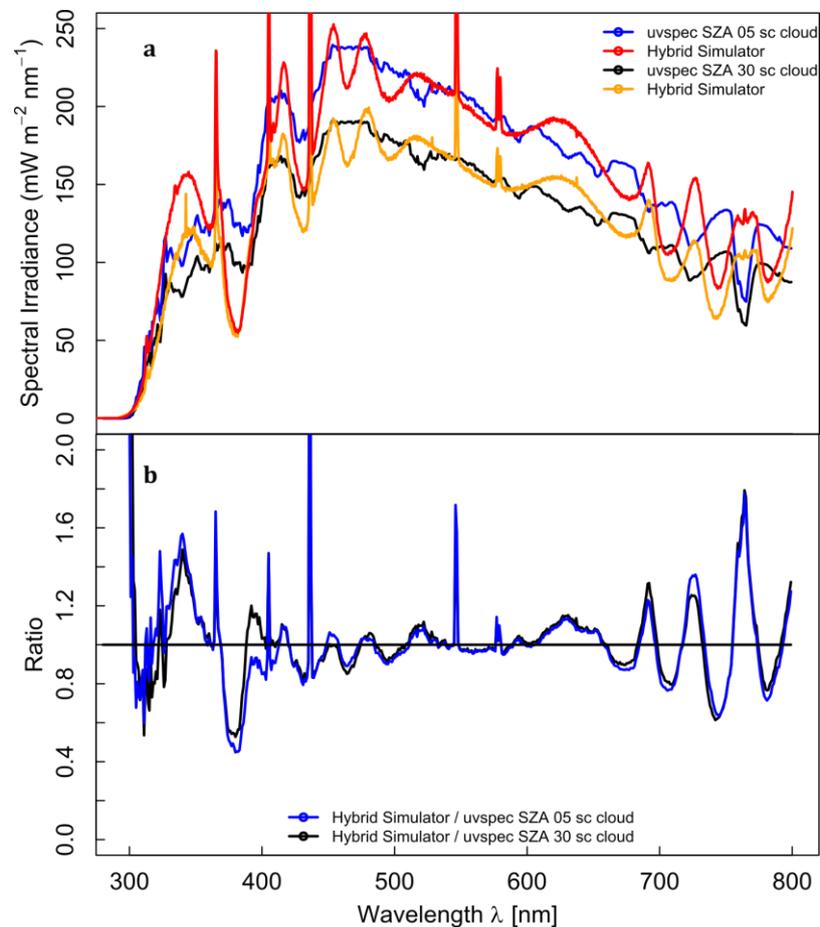


Abbildung 4.11: Simulation der solaren Globalstrahlung eines mit Wolken vollständig bedeckten Himmels. (a) Vergleich zwischen gemessenen (Newport OSM400) spektralen Bestrahlungsstärken und den mit uvspec modellierten spektralen Bestrahlungsstärken für SZA 5° und SZA 30°. (b) Quotienten aus gemessener spektraler Bestrahlungsstärke und modellierter spektraler Bestrahlungsstärke für SZA 5° und SZA 30°. Die modellierten Spektren haben eine Auflösung von 1 nm, im Bereich 331-800 nm wurde über ein Intervall von 10 nm zur entsprechenden Zentralwellenlänge gemittelt. Die gemessenen Spektren vom Hybrid-Sonnensimulator haben im Bereich 280 – 800 nm eine Auflösung von 1 nm. Als Filterglas wurde Sanalux® 4,0 mm verwendet.

In der Tabelle 4.4 sind die integrierten spektralen Bestrahlungsstärken für die Bereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300 – 800 nm für die mit uvspec modellierten Spektren und die vom Hybrid-Sonnensimulator erzeugten Spektren eingetragen. Zudem sind in der Tabelle 4.4 die prozentualen Abweichungen sowie die spektralen Abweichungen (SPD) für die jeweiligen Wellenlängenbereiche angegeben.

Tabelle 4.4: Bestrahlungsstärken für die Wellenlängenbereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300-800 nm jeweils für die mit uvspec modellierten Spektren uvspec SZA 05 sc, uvspec SZA 30 sc und die in der Klimakammer gemessenen Spektren mit Filterglas Sanalu®x 4,0 mm, sowie die prozentualen Abweichungen der gewichteten Bestrahlungsstärken für die jeweiligen Wellenlängenbereiche in Prozent. Zusätzlich wurde die spektrale Abweichung (SPD) für die jeweiligen Wellenlängenbereiche mit der Formel (2.9) berechnet, die spektrale Auflösung für die modellierten Spektren und die gemessenen Spektren betrug 1 nm.

	UV-B	UV-A	PAR	FarRed	300 – 800 nm
uvspec SZA 05 sc [Wm ⁻²]	0,36	9,9	58	12	80,4
Messung [Wm ⁻²]	0,32	10,0	59	12	80,3
Abweichung [%]	-11,1	1,0	1,7	0,0	-0,1
SPD [%]	20,3	27,7	8,4	23,5	13
uvspec SZA 30 sc [Wm ⁻²]	0,25	7,9	47	9,4	64,1
Messung [Wm ⁻²]	0,22	8,0	47	9,2	64,7
Abweichung [%]	-12	1,3	0,0	-2,1	0,9
SPD [%]	31,7	22,5	8,0	22,4	12

Für die Simulation der solaren Globalstrahlung für vollständig bedeckten Himmel bei SZA 5° ergab sich eine prozentuale Abweichung der Bestrahlungsstärke im UV-B-Bereich von -11 % und eine spektrale Abweichung von 20,3 %. Im UV-A-Bereich lag die prozentuale Abweichung bei 1,0 % mit einer SPD von 27,7 %. Der PAR-Bereich wurde mit einer prozentualen Abweichung von 1,7 % erzeugt, dabei betrug die SPD 8,4 %. Im FarRed-Bereich betrug die prozentuale Abweichung 0,0 %, und die SPD lag bei 23,5 %. Für den Wellenlängenbereich 300-800 nm ergab sich eine SPD von 13,0 % und eine prozentuale Abweichung von -0,1 %. Dabei betrug die integrierte Bestrahlungsstärke des modellierten Spektrums 80,4 Wm⁻² und die im Simulator gemessene integrierte spektrale Bestrahlungsstärke 80,3 Wm⁻².

Für die Simulation der solaren Globalstrahlung für vollständig bedeckten Himmel bei SZA 30° zeigten die Bereiche UV-B, UV-A, PAR und FarRed eine prozentuale Abweichung von -12 %, und die spektrale Abweichung (SPD) lag bei 31,7 %, 22,5 %, 8,0 % und 22,4 %.

1,3 %, 0,0 % und -2,1 %. Die spektrale Abweichung (SPD) lag für den UV-B-Bereich bei 31,7 %, für UV-A bei 22,5 %, für PAR bei 8,0 % und für FarRed bei 22,4 %. Über den Wellenlängenbereich 300-800 nm ergab sich damit eine SPD von 12,0 % und eine prozentuale Abweichung von 0,9 %. Dabei betrug die integrierte spektrale Bestrahlungsstärke des modellierten Spektrums $64,1 \text{ Wm}^{-2}$ und die im Simulator gemessene integrierte spektrale Bestrahlungsstärke $64,7 \text{ Wm}^{-2}$.

4.2.6 „Proof of concept“ Pflanzenversuch

Zur Überprüfung „Proof of concept“ seiner Eignung für Pflanzenstudien wurde ein Pflanzenversuch in der mit dem neuen Hybrid-Sonnensimulator umgerüsteten Klimakammer durchgeführt. Ziel dabei war, die Entwicklung von Pflanzen räumlich und zeitlich zu untersuchen, um festzustellen, wie homogen / inhomogen eine Anzucht in der Versuchsfläche der Klimakammer möglich ist. Dafür erfolgte eine Anzucht von 240 Acker-Schmalwand-Pflanzen (*Arabidopsis thaliana* L.), die in der Pflanzenforschung oft als Model-Pflanze dient (Meinke, Cherry, Dean, Rounsley, & Koornneef, 1998), in Einheitserde (Floragard Anzuchtsubstrat Typ B, Oldenburg, Deutschland) und Töpfen mit einer Höhe von 10 cm und einem Volumen von 0,32 l. Ab dem Tag 11 nach der Keimung wurden die 240 Pflanzen in der Versuchsfläche der Klimakammer verteilt, die Temperatur in der Klimakammer lag dabei bei $22 \pm 2^\circ\text{C}$. Jeweils 20 Pflanzen bzw. Töpfe waren dabei mit einer festen Position in einem nummerierten Träger gestellt. Somit ergaben sich insgesamt 12 nummerierte Träger, in denen jeweils jede Pflanze einen definierten festen Standort hatte. Die 12 Träger hatten ebenfalls einen festen definierten Standort in der Kammer, der für den gesamten Versuch nicht verändert wurde. Daraus folgt, dass jede Pflanze eine definierte und zuordnungsbar Position in der Versuchsfläche hatte. Der Hybrid-Sonnensimulator wurde so programmiert, dass ein „natürlicher“ Tagesgang mit einer Länge von 16 Stunden Bestrahlung und 8 Stunden Dunkelheit simuliert wurde. Die minimale PAR-Photonen-Bestrahlungsstärke lag dabei bei $72 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und die maximale bei $570 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Dies entspricht in etwa der PAR-Photonen-Bestrahlungsstärke bei der die Photosynthese bei *Arabidopsis thaliana* gesättigt ist (Salvucci, Portis Jr, & Ogren, 1986). Zur Beurteilung des Pflanzenwachstums und des Zustands des Photosynthese-Systems wurden Messungen mit einer RGB (Rot, Grün, Blau)-Kamera sowie Chlorophyll-Fluoreszenz (ChlF)-Messungen an den Tagen 28, 35 und 42 nach Keimung durchgeführt. Dafür wurden die Pflanzen-Träger nachts in eine automatische Pflanzenphänotypisierungs-Anlage (Photosystem Instruments PSI, Brünn, Tschechien) gebracht und am Morgen wieder an ihre definierte Position in der Klimakammer zurückgestellt. Am Tag 34 wurde jede zweite Pflanze entfernt, um Überlappungen der Blätter während der Messung zu vermeiden.

In Abbildung 4.12a sind die Bilder der RGB-Kamera von Tag 28 und 35 nach Keimung gezeigt, dabei wurden durch die Auswertungssoftware nur die Teile des Bildes ausgewertet, die sich

im grünen Farbraum befanden. Dadurch kann die Software die gesamte projizierte Blattfläche einer Pflanze berechnen. In Abbildung 4.12b sind die Blattflächen für jede Pflanze an ihrer definierten Position in der Experimentalfläche gezeigt. Abbildung 4.12c zeigt, wie die 240 Pflanzen in den 12 Trägern in der Experimentalfläche der Klimakammer verteilt waren.

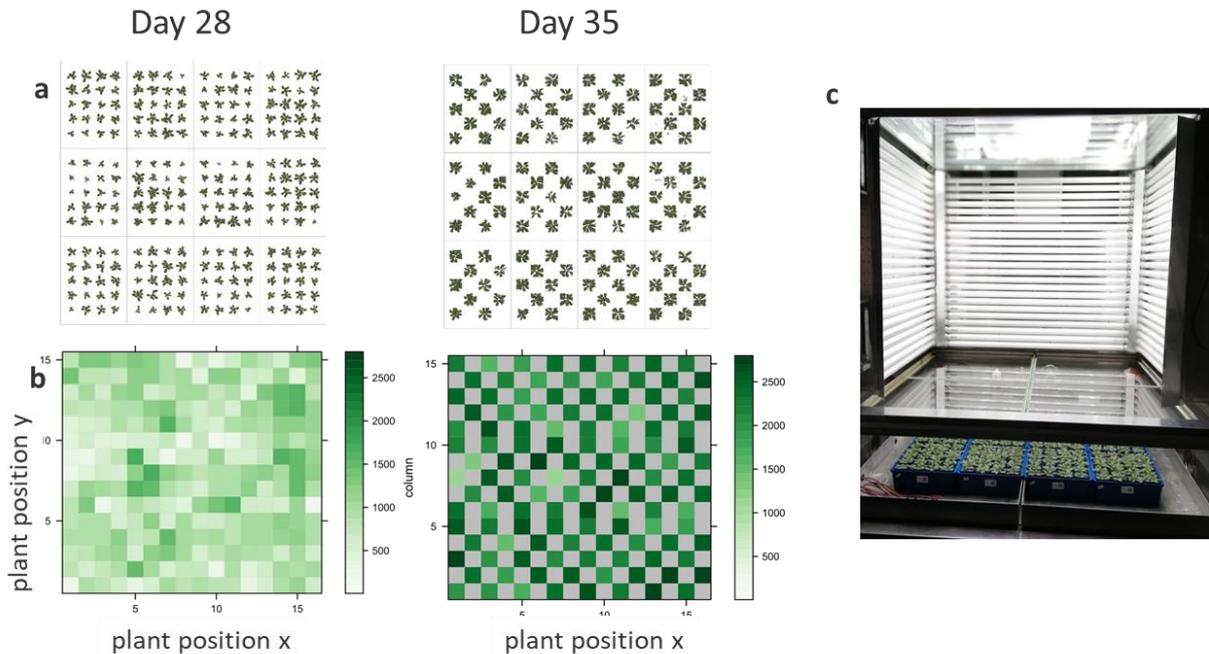


Abbildung 4.12: Wachstumsversuch mit *Arabidopsis thaliana* Pflanzen in der Klimakammer und Auswertung der RGB-Kamera-Bilder. (a) Aufnahmen der projizierten Blattflächen mit der RGB-Kamera von Tag 28 und 35 der Kultivierung. (b) Aus den RGB-Bildern berechnete projizierte Gesamtblattfläche. (c) Foto der Klimakammer, in der die 12 Träger mit insgesamt 240 Pflanzen belegt sind.

Im Rahmen der „Lichtreaktion“ der Photosynthese werden, von in die Chloroplastenmembranen eingebauten Lichtsammelkomplexen (LHC. „light harvesting complexes“) und zwei Photosystemen (Photosystem I (PS I) und Photosystem II (PS II) Photonen unterschiedlicher Wellenlängen von 400-700 nm absorbiert. Die dabei absorbierte Energie wird benutzt Elektronen entlang einer sogenannten „Elektronentransportkette“ zu transportieren und am Ende auf einen mobilen Elektronenakzeptor (NADP⁺, Nicotinamidadenindinukleotidphosphat) zu übertragen. Bei der Regeneration der „Elektronenlücke“ im PS I wird Wasser gespalten und Sauerstoff freigesetzt. Parallel dazu werden Protonen (H⁺) über die Thylakoidmembran verschoben und ein pH Gradient aufgebaut. Dessen Abbau liefert der Zelle Energieäquivalente in Form von ATP (Adenosintriphosphat). Beides zusammen, liefert der Zelle die Energie- und Elektronenäquivalente die benötigt werden CO₂ zu fixieren und Zuckermoleküle zu synthetisieren. Die Umwandlung von Strahlungsenergie in photochemische Energie ist hocheffizient: Bei gesunden nicht gestressten Pflanzen liegt der Wirkungsgrad bei circa 80 %.

Parallel zur Lichtreaktion der Photosynthese wird ein Teil, circa 17 %, der eingestrahlenen Energie in Wärme umgewandelt oder zu circa 3 % in Form von elektromagnetischer Strahlung im Wellenlängenbereich von ca. 680-740 nm von den Blättern in Form von Fluoreszenzstrahlung re-emittiert (Krause & Weis, 1991).

Das Prinzip der Chlorophyll-Fluoreszenz (Chf)-Messung besteht darin diese Fluoreszenz zu messen. Die nicht invasive Chf-Messung liefert Informationen über den Zustand und die Quanteneffizienz der Photosynthese, die wiederum eng verknüpft ist mit dem Gesundheitszustand einer Pflanze bezüglich äußerer Stressfaktoren (Awlia et al., 2016).

In Abbildung 4.13 sind die Chf-Parameter maximale Quanteneffizienz des PS2 (QY_max), effektive Quanteneffizienz des PSII (QY_iss) und nichtphotochemische Löschung (NPQ, „Non-Photochemical Quenching“) dargestellt (Roháček, 2002). Dabei ist NPQ ein Maß für die überschüssige Strahlungsenergie, die in Wärme umgewandelt wird (Roháček, 2002).

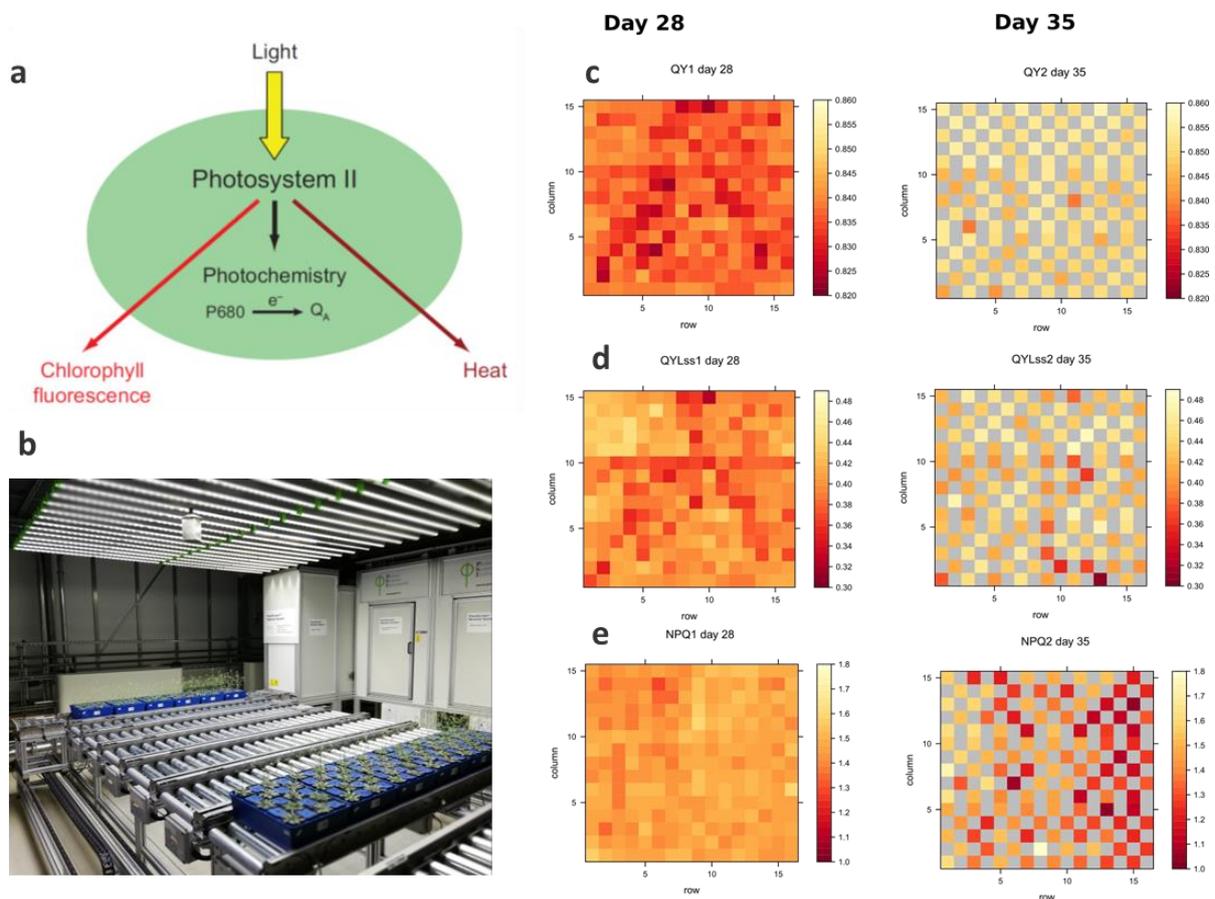


Abbildung 4.13: Chlorophyll-Fluoreszenz-Messung. (a) Prinzip der Chlorophyll-Fluoreszenz-Messung (Baker, 2008). (b) PSI-Anlage (Photosystem Instruments, Brünn Tschechien). Auswertung der Chf-Parameter für die Tage 28 und 35 nach Keimung. (c) QY_max: potential max. Quantum Yield of PSII. (d) QY_iss: effective Quantum Yield of PSII. (e) NPQ: „Non Photochemical Quenching“

In der Tabelle 4.5 sind die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen der Chf-Parameter QY_max, QY_iss und NPQ für die Tage 28 und 35 gezeigt. Für die maximale

Quanteneffizienz QY_max ergab sich ein Mittelwert von 0,84 mit einer Standardabweichung SD von 0,004. In der Literatur wird für nicht gestresste Pflanzen ein Wert von $0,83 \pm 0,004$ angegeben (Björkman & Demmig, 1987). Damit belegen die Messungen, dass die in der Klimakammer angezogenen Pflanzen mit den gewählten Bestrahlungsbedingungen gesund sind und keine Stressfaktoren aufweisen.

Tabelle 4.5: Berechnete Mittelwerte und Standardabweichung (SD) der ChlF-Parameter QY_max, QY_iss und NPQ.

	Tag 28 nach Keimung	Tag 35 nach Keimung
QY_max: Mittelwert \pm SD	0,84 \pm 0,004	0,85 \pm 0,0034
QY_iss: Mittelwert \pm SD	0,4 \pm 0,021	0,43 \pm 0,028
NPQ: Mittelwert \pm SD	1,46 \pm 0,047	1,38 \pm 0,16

Nachdem die RGB-Messungen, ChlF-Messungen und Messungen zum Frischgewicht, Trockengewicht, sowie der Höhe der Blütenstängel abgeschlossen waren, wurden diese Parameter verwendet, um eine Korrelation zwischen den Parametern zu überprüfen. Zusätzlich wurden die Parameter x und y, entsprechend den Flächenkoordinaten der Experimentalfläche, eingeführt, sowie der Parameter R, der dem Radius vom Mittelpunkt der Experimentalfläche zu der jeweiligen Pflanze bzw. Position entspricht. Dadurch war es möglich, Pflanzenparameter und Raumkoordinaten zueinander auf Korrelation zu überprüfen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Raumkoordinaten x, y und R der in Kapitel 4.2.4 gezeigten räumlichen Verteilung der Bestrahlungsstärke entsprechen. In Abbildung 4.14 sind die Korrelations-Matrizen, die mit der Methode nach „Spearman“ berechnet wurden, für die Tage 28 und 35 gezeigt. Für den Tag 28 und Tag 35 nach Keimung bestehen demnach nur sehr kleine Korrelationen zwischen den Raumkoordinaten und den Pflanzenparametern. Diese kleinen Korrelationen sind in der Größenordnung der Homogenitätsverteilung der spektralen Bestrahlungsstärke in der Experimentalfläche. Somit konnte in diesem Versuch gezeigt werden, dass neben den gemessenen Strahlungsparametern auch die Anwendung des Hybrid-Sonnensimulators in einer Klimakammer für Pflanzenexperimente zu einer sehr homogenen Entwicklung der Pflanzen führte.

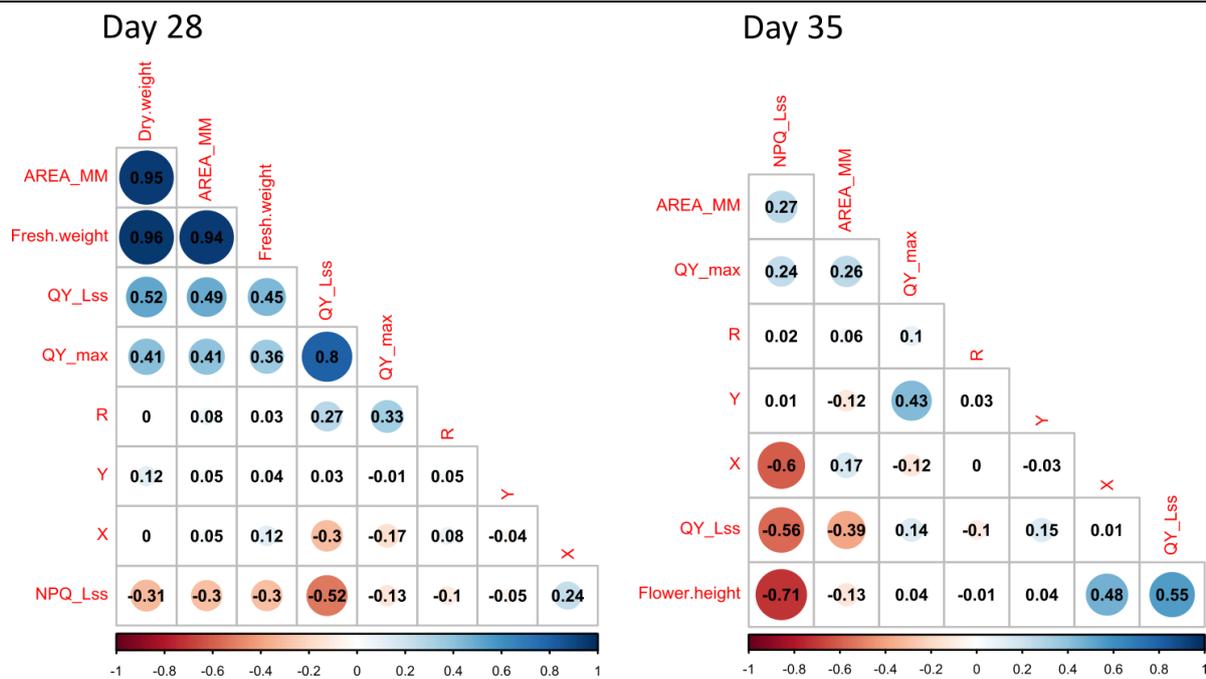


Abbildung 4.14: Korrelationsmatrix für die Tage 28 und 35 nach Keimung. Gezeigt werden folgende Parameter und deren Korrelation zueinander: QY_max = potential max. Quantum Yield, QY_Lss = effective Quantum Yield, NPQ_Lss = Non Photochemical Quenching, Area_MM = Gesamtblattfläche einer Pflanze, Fresh.weight = Frischgewicht, Flower.height = Höhe der Blütenstängel, X = x Position, Y = y Position, R = Radius zum Mittelpunkt der Klimakammer.

4.2.7 Elektrische Energieaufnahme des Hybrid-Sonnensimulators

In der Wissenschaft sowie in der Gesellschaft erhält der Energieverbrauch und der damit verbundene Fingerprint eine immer größere Bedeutung. Um den elektrischen Energieverbrauch für den Hybrid-Simulator zu ermitteln, wurde in der Zuleitung der Stromversorgung ein Drei-Phasen-Leistungsmessgerät angebracht.

Für die Leistungsmessung der UV-Röhren wurden alle in der Klimakammer verbauten UV-Leuchtstoffröhren eingeschaltet, dabei ergab sich eine Gesamtleistungsaufnahme der UV-Röhren von 3600 W. Für die LED-Typen 360-950 nm konnte die Leistungsmessung mit dem maximal spezifizierten Konstantstrom der Vorschaltgeräte durchgeführt werden. Für die Leistungsmessung der „weißen“ LEDs wurde der Konstantstrom auf 90 % beziehungsweise 71 % reduziert, um eine LED-Temperatur von 78 °C nicht zu überschreiten. In Tabelle 4.6 sind für die verschiedenen Strahlungsquellen die Werte der elektrischen Leistungsmessung angegeben. Zudem sind in der Tabelle 4.6 die gemessenen maximalen Bestrahlungsstärken der jeweiligen Strahlungsquellen aufgelistet. Die Messungen der elektrischen Leistungsaufnahme und die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärken wurden parallel durchgeführt. Dadurch war es möglich, die Bestrahlungsstärke zur elektrischen Leistungsaufnahme ins Verhältnis zu setzen, was als Maß für die spezifischen Systemeffizienzen der einzelnen Strahlungsquellen dient, siehe Abbildung 4.15.

Tabelle 4.6: Elektrische Leistungsaufnahme bei parallel gemessener Bestrahlungsstärke der verschiedenen Strahlungsquellen.

Nummer	Peakwellenlänge [nm]	Ansteuerung %	Bestrahlungsstärke [Wm^{-2}]	Elektrische-Leistung [W]
UV-B,UV-A	313, 340	100	27	3600
1	368	100	12	208
2	389	100	15	240
3	394	100	18	289
4	402	100	14	292
5	416	100	15	287
6	448	100	10	119
7	476	100	17	324
8	507	100	8,7	294
9	520	100	8,2	470
10+11	595	100	7,5	299
12	621	100	8,9	179
13	634	100	7,9	144
14	656	100	6,6	91
15	693	100	7,9	124
16	733	100	42	914
17	760	100	8,1	209
18	773	100	11	224
19	> 800	100	9*	138
20	ca. (430-750)	90	109	2014
21	ca. (400-750)	71	402	6844
22	typ. 860	100	9*	140
23	typ. 950	100	13*	199
Gesamt	-	-	787	14042

In der Abbildung 4.15 sind die Systemeffizienzen für die verschiedenen Strahlungsquellen gezeigt. Die niedrigste Systemeffizienz besitzen die UV-Röhren, wobei speziell bei den UV-Röhren im Wellenlängenbereich von UV-B und UV-A die Transmission des Filterglases Sanalux 4,0 mm die Effizienz reduziert.

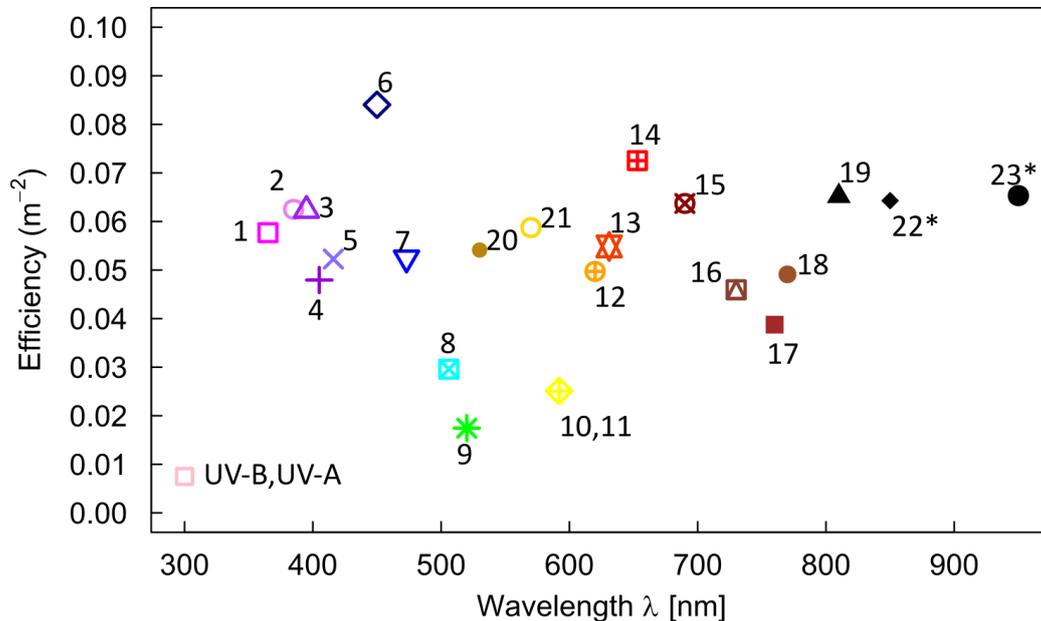


Abbildung 4.15: Berechnete Effizienz der einzelnen Strahlungsquellen im System. Parallel zu den Messungen der individuellen Bestrahlungsstärken der einzelnen Strahlungsquellen wurde die elektrische Gesamtleistungsaufnahme der einzelnen Strahlungsquellen gemessen. Zur Bestimmung der individuellen Effizienz im System wurde das Verhältnis von Bestrahlungsstärke [Wm^{-2}] zu elektrischer Leistungsaufnahme [W] bestimmt. Als Filterglas war Sanalux® 4,0 mm eingelegt. Verwendete individuelle Strahlungsquellen mit folgenden Peakwellenlängen (nm): UV-B,UV-A = 313,340, 1 = 368, 2 = 389, 3 = 394, 4 = 402, 5 = 416, 6 = 448, 7 = 476, 8 = 507, 9 = 520, 10 = 590, 11 = 595, 12 = 621, 13 = 634, 14 = 656, 15 = 693, 16 = 733, 17 = 760, 18 = 773, 19 = 810, 22 = 850, 23 = 940, zwei Typen von "weißen" LEDs 20, 21. Die zur Berechnung genutzten LED-Spektren 19, 22* und 23* wurden ab 800 nm theoretisch berechnet, siehe Tabelle 4.6.

Die größte Systemeffizienz bieten die 450 nm LED-Typen, gefolgt von den 653 nm LED-Typen. Wird das Verhältnis aus der Summe der einzelnen max. Bestrahlungsstärken (787 Wm^{-2}) zur Summe der einzelnen Gesamtleistungsaufnahmen (14042 W) gebildet, ergibt sich eine berechnete Systemeffizienz von $0,056 \text{ m}^{-2}$. Dies bedeutet, dass pro ein W elektrischer Leistung $0,056 \text{ Wm}^{-2}$ Bestrahlungsstärke in der Versuchsfläche der Klimakammer erzeugt werden. Bei der Versuchsfläche von $1,44 \text{ m}^2$ resultiert daraus ein Wert von $0,056 \text{ Wm}^{-2} \times 1,44 \text{ m}^2 = 0,081 \text{ W}$. Daraus folgt, dass ein W elektrische Leistung eine Systemstrahlungsleistung von $0,081 \text{ W}$ erzeugt. Bei einer elektrischen Gesamtleistungsaufnahme des Hybrid-Sonnensimulators von 14042 W ergibt sich somit eine System-Gesamtstrahlungsleistung von 1132 W auf der Versuchsfläche.

Bestimmung der elektrischen Leistungsaufnahme für spezifische spektrale Bestrahlungsstärken (Spektren)

Da die Messungen der individuellen spektralen Bestrahlungsstärken der verschiedenen Strahlungsquellen parallel zu den spezifischen elektrischen Leistungsaufnahmen erfolgte, konnte die Methode der „Non Negative Least Square“ (NNLS)-Regression auf die Bestimmung der elektrischen Leistungsaufnahme bei spezifischen spektralen Bestrahlungsstärken ebenfalls angewandt werden. Die berechneten Koeffizienten aus der NNLS-Regression, die bisher genutzt wurden, um ein Zielspektrum aus den verschiedenen Strahlungsquellen zu generieren, werden jetzt ebenfalls genutzt, um die spezifische elektrische Leistungsaufnahme für ein Zielspektrum zu berechnen.

Nimmt man die individuellen elektrischen Leistungsaufnahmen der verschiedenen Strahlungsquellen als Vektor e_i , mit $i=1,\dots,21$, und den mit NNLS berechneten Koeffizienten x_i , mit $i=1,\dots,21$, für ein spezifisches Zielspektrum, ergibt sich die spezifische Gesamtleistungsaufnahme G aus dem Skalarprodukt von e_i und x_i , Formel (4.3). Für diese Berechnungen wurden die LED-Typen Amber und PC Amber zusammengefasst, zudem wurden auch die UV-Leuchtstofflampen mit Peakwellenlänge 313 nm und 340 nm zusammengefasst. Die LED-Typen 850 nm und 950 nm wurden nicht in diese Berechnungen miteinbezogen.

$$G = e_i * x_i [W] \tag{4.3}$$

Tabelle 4.7 zeigt die berechneten Gesamtleistungsaufnahmen für verschiedene Zielspektren, die mit uvspec modelliert wurden.

Tabelle 4.7: Berechnete elektrische Leistungsaufnahmen für spezifische spektrale Bestrahlungsstärken. Die LED-Typen 850 nm und 950 nm wurden nicht in die Berechnungen miteinbezogen.

Zielspektrum uvspec	Wolkenlos SZA 28,7°	Wolkenlos SZA 60°	Wolkenlos SZA 80°	Bewölkt SZA 5°	Bewölkt SZA 30°	Bewölkt SZA 80°
Bestrahlungsstärke [Wm ⁻²] 300 -800 nm	546	286	69	80	64	6
Gesamtleistungsaufnahme G	12,3 kW	6,6 kW	1,6 kW	2,2 kW	1,7 kW	0,35 kW

4.3 Diskussion

Der neu entwickelte Hybrid-Sonnensimulator verwendet 23 verschiedene LED-Typen und zwei verschiedene Typen von UV-Röhren in Kombination mit Filtergläsern. Dadurch ist es möglich, den spektralen Bereich von 280-950 nm abzudecken und alle bisher bekannten Pflanzen-Photorezeptoren, inklusives des UV-B-Photorezeptors UVR8 (Ulm & Jenkins, 2015), anzusprechen, siehe Abbildung 3.4. Durch die Verwendung des NNLS-Algorithmus wird die bestmögliche Kombination der verschiedenen Strahlungsquellen zur Erzeugung eines bestimmten Zielspektrums erreicht.

Bei der Simulation der solaren Globalstrahlung für einen Sonnenzenitwinkel von $28,7^\circ$ und wolkenlosen Himmel werden gute Ergebnisse hinsichtlich der Bestrahlungsstärke und der spektralen Anpassung in den Spektralbereichen UV-B, UV-A und PAR erzielt. Im PAR-Bereich beträgt die vom Hybrid-Sonnensimulator erzeugte Bestrahlungsstärke 420 Wm^{-2} , was einer Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD) von $1910 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ entspricht. In (Roy et al., 2021) werden weltweit führende Klimmakammer-Einrichtungen beschrieben, bei denen eine maximale PPFD zwischen $340 - 1300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erreicht werden. Somit ist es in diesen Klimakammern nicht möglich PAR-Photonen-Bestrahlungsstärken zu erzeugen, wie sie an einem wolkenlosen Tag im Sommer in Mitteleuropa erreicht werden. Die maximale PPFD des Hybrid-Sonnensimulators beträgt $2600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Für den FarRed-Bereich und speziell zwischen 740-800 nm ist für die Simulation von einem SZA $28,7^\circ$ die Bestrahlungsstärke um 19,9 % zu gering im Vergleich zu der mit uvspec modellierten Bestrahlungsstärke in diesem Bereich. Dies könnte durch eine höhere Anzahl von LED-Typen bzw. Light Engines in diesem Wellenlängenbereich kompensiert werden. Die dafür notwendigen Kapazitäten an Kühlkörpern, elektrischer Stromversorgung und Ansteuerung sind prinzipiell im System vorhanden.

Für die Simulation der solaren Globalstrahlung mit einem Sonnenzenitwinkel von 60° und 80° konnte gezeigt werden, dass es nur geringe Einschränkungen bezüglich der Bestrahlungsstärke in den verschiedenen Spektralbereichen gibt. Daraus folgt, dass der Hybrid-Sonnensimulator spektrale Bestrahlungsstärken im Bereich 280-800 nm, wie sie bei wolkenlosem Himmel mit Sonnenzenitwinkel zwischen $28,7^\circ$ und bis 80° vorkommen können, erzeugen kann.

Für die Bewertung der spektralen Anpassung wurden die spektralen Bestrahlungsstärken in die Bereiche UV-B, UV-A, PAR, FarRed und 300-800 nm eingeteilt. Es sind dann fünf Werte nötig, 280-315 nm, 315-400 nm, 400-700 nm, 700-800 nm und 300-800 nm, um die spektrale Anpassung zu bewerten, dafür kann die spektrale Anpassung für die jeweiligen Spektralbereiche individuell bewertet werden. Bei der Simulation von SZA $28,7^\circ$ ergab sich zum Beispiel für den PAR-Bereich eine spektrale Abweichung von 7,8 %,

Werden die vom Hybrid-Sonnensimulator erzeugten spektralen Bestrahlungsstärken ins Verhältnis zu den mit uvspec modellierten spektralen Bestrahlungsstärken genommen (Abbildung 4.7b), zeigen sich Spektralbereiche, zum Beispiel bei 375 nm, bei denen das Verhältnis kleiner 1 ist. Das sind Bereiche, bei denen durch Hinzufügen eines weiteren LED-Typs, mit der passenden Wellenlänge, die spektrale Anpassung weiter verbessert werden könnte.

Bei der Bewertung der Inhomogenitätsverteilung (IHV) wurden die Messungen mit vier verschiedenen Bestrahlungsstärken (300-800 nm) mit den Werten 490 Wm^{-2} , 257 Wm^{-2} , 156 Wm^{-2} und 30 Wm^{-2} durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die IHV bezogen auf die Gesamtfläche ($1,44 \text{ m}^2$) für hohe Bestrahlungsstärken genauso wie für geringe Bestrahlungsstärken in den Bereichen UV-B, UV-A, PAR und FarRed zu Mittelwerten von kleiner gleich 13,7 %, 15,8 %, 10,4 % und 11,9 % führt. Für die innere Fläche ($0,64 \text{ m}^2$) ergeben sich Mittelwerte kleiner gleich 5,4 % für den UV-B-, 7,0 % für den UV-A-, 6,2 % für den PAR- und 7,1 % für den FarRed-Bereich. Bei einer Bestrahlungsstärke von 490 Wm^{-2} ergibt sich eine mittlere Inhomogenität bezogen auf den Wellenlängenbereich 300-800 nm für die Gesamtfläche von 8,8 % und für die innere Fläche von 4,6 %.

Die berechnete Standardabweichung pro nm zeigt bei der Gesamtfläche von $1,44 \text{ m}^2$ höhere Werte als bei der Standardabweichung pro nm der inneren Experimentalfläche mit $0,64 \text{ m}^2$. Bezogen auf die Gesamtfläche zeigt sich besonders im UV-Bereich eine erhöhte Standardabweichung, die ihr Maximum bei circa 350 nm hat, dies resultiert hauptsächlich aus den geringeren spektralen Bestrahlungsstärken, die am Rand der Versuchsfläche gemessen wurden. Dieser Effekt entsteht aus konstruktiven Gegebenheiten der Anlage, die 340 nm UV-Röhren befinden sich oberhalb der 313 nm Röhren, somit entsteht verstärkt für die 340 nm Röhren ein Abschattungseffekt am Rand der Experimentalfläche. Die Berechnung der Standardabweichung pro nm für die innere Fläche zeigt erhöhte Werte im Bereich 365-420 nm, 475 nm und für größer 750 nm. Eine Verbesserung könnte durch eine erhöhte Anzahl von Light Engines, mit den entsprechenden LED-Typen, in diesen Wellenlängenbereichen erreicht werden, indem z.B. weitere äußere LED-Felder, siehe Abbildung 4.1, in das gesamte LED-Feld integriert werden.

Die elektrische Gesamtleistungsaufnahme des Hybrid-Systems, ohne Kühlung, beträgt 12,3 kW bei einer erzeugten Bestrahlungsstärke (300-800 nm) von 546 Wm^{-2} . Für ein mit uvspec modelliertes Sonnenspektrum, wolkenlos und Sonnenzenitwinkel $28,7^\circ$, ergibt sich im Bereich 300 – 1500 nm eine Bestrahlungsstärke von 834 Wm^{-2} . Um mit dem Hybrid-Sonnensimulator eine gleichwertige Bestrahlungsstärke zu erzeugen, wäre es notwendig, circa 40 weitere Light Engines, bestückt mit Infrarot LEDs, zu installieren. Die elektrische Gesamtleistungsaufnahme würde dann um circa 4,4 kW erhöht werden, was einer Gesamtleistungsaufnahme von dann 16,7 kW entsprechen würde.

In der Literatur werden meist LED-Sonnensimulatoren für die Solarzellenforschung oder für Solarzellentests unter Laborbedingungen beschrieben (Al-Ahmad et al., 2019; Kohraku & Kurokawa, 2003, 2006; Kolberg, Schubert, Lontke, Zwigart, & Spinner, 2011; Linden, Neal, &

Serreze, 2014; Novickovas, Baguckis, Mekys, & Tamosiunas, 2015; Stuckelberger et al., 2014). Diese Simulatoren sind mit ihren technischen Möglichkeiten und technischen Eigenschaften nicht für den Einsatz als Sonnensimulatoren in Klimakammern für die Umweltforschung geeignet. Beispielhaft wird in (Al-Ahmad et al., 2019) mit dem Titel „Modular LED arrays for large area solar simulation“ ein LED-Sonnensimulator beschrieben der sechs verschiedene LED-Typen (Peakwellenlängen zwischen 478-940 nm) verwendet und dabei eine Testfläche von 0,002 m² bestrahlt, der Abstand zwischen LEDs und der Testfläche betrug dabei 0,14 m. Im Vergleich zu dem in dieser Arbeit beschriebenen Hybrid-Sonnensimulator der unter Verwendung von 23 verschiedenen LED-Typen und zwei Typen von UV-Röhren eine Fläche von 1,44 m² bestrahlt, beträgt der Faktor zwischen den beiden Flächen 720.

An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB, Braunschweig, Deutschland) wurde von der Firma WVELABS Solar Metrology Systems GmbH (Leipzig, Deutschland) ein LED-basierter Sonnensimulator zur Vermessung von Solarmodulen aufgebaut. Laut Herstellerdatenblatt (Wavelabs, 2022) hat der Sonnensimulator eine Abmessung von 6,70 x 4,88 x 2,91 m, bei einem Gewicht von ca. 1600 kg. Die maximale elektrische Leistungsaufnahme beträgt 60 kW. Es wird eine Testfläche von 2,0 m x 1,0 m bestrahlt, dabei beträgt der benötigte Abstand vom Sonnensimulator zur Testfläche 4,8 m. Das vom Sonnensimulator emittierte „Lichtfeld“ hat eine Rechteckform und wird von ca. 16000 LEDs erzeugt, die durch Mikrolinsen auf der Testfläche fokussiert werden (Sträter, Riechelmann, Neuberger, & Winter, 2019), dadurch kann eine mittlere Inhomogenität von kleiner 2% bezogen auf die Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich 360-1100 nm erzielt werden. Mit 18 individuell ansteuerbaren LED-Typen wird das AM1.5g Spektrum (definiert im Internationalen Standard IEC 60904-3 Norm) im Wellenlängenbereich 360-1100 nm simuliert, und es kann eine Bestrahlungsstärke bis zu 1200 Wm⁻² für einige ms bis zu mehreren Stunden erreicht werden (Sträter et al., 2019). Für die relative spektrale Abweichung SPD (Formel (2.9)) mit AM1.5g als Referenzspektrum wird ein Wert von 24,8 % angegeben (Sträter et al., 2019).

Aufgrund (i) des hohen Gewichts von 1600 kg des PTB-Sonnensimulators, (ii) der Abmessungen von 6,70 x 4,88 x 2,91 m, (iii) der elektrischen Leistungsaufnahme von 60 kW, (iv) der fehlenden UV-B- und UV-A-Bestrahlungsstärke wäre ein solcher Sonnensimulator zur Verwendung in einer Klimakammer für die Umwelt-Grundlagenforschung nicht geeignet und nicht realisierbar.

Für den in dieser Arbeit entwickelten reinen LED-basierten Sonnensimulator, siehe Kapitel 3, mit 23 individuell ansteuerbaren LED-Typen, ergibt sich bei einer spektralen Auflösung von 1 nm und dem ASTM G173-03 als Referenzspektrum ein Wert für SPD von 14,5 % für den Wellenlängenbereich von 300 – 800 nm, dabei beträgt die mittlere Inhomogenität (m.l.) 2,1 %.

Der in Kapitel 4 beschriebene Hybrid-Sonnensimulator in einer Klimakammer, 23 individuell ansteuerbaren LED-Typen und 313 nm und 340 nm UV-Röhren, hat einen SPD-Wert von 13,6 %, ebenfalls bei einer spektralen Auflösung von 1 nm im Wellenlängenbereich 300 – 800 nm

und einem mit uvspec modellierten Referenzspektrum für SZA 28,7°, Ozon 325 DU. Die m.l. beträgt 8,8 % in der Experimentierfläche der Klimakammer.

Der Vergleich der SPD-Werte von dem in dieser Arbeit beschriebenen LED-Sonnensimulator und dem Hybrid-Sonnensimulator zeigen eine Schwäche der Formel (2.9). Der UV-B- und UV-A-Bereich sind in dieser Formel nicht gewichtet, was zur Folge hat, dass diese wichtigen Bereiche unterrepräsentiert sind, dies gilt auch bei der Bewertung der Inhomogenität, wenn nur die integrierte Bestrahlungsstärke des gesamten Spektralbereichs ausgewertet wird. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit die Beurteilung der Bestrahlungsstärke, der spektralen Abweichung und der Inhomogenität zusätzlich auf die Bereiche UV-B, UV-A, PAR und FarRed angewendet.

5 Vergleich und Einordnung

In diesem Kapitel werden die drei verschiedenen Typen von Sonnensimulatoren, traditioneller Sonnensimulator, LED-Sonnensimulator und Hybrid-Sonnensimulator, gegenübergestellt und deren Strahlungsgrößen sowie technische Parameter miteinander verglichen. Eine Übersicht der wichtigsten Parameter wird in der Tabelle 5.1 gezeigt.

Tabelle 5.1: Vergleich der Sonnensimulatoren. Die Werte für SPD und MNSA beziehen sich bei dem traditionellen und Hybrid-Sonnensimulator auf die mit uvspec modellierte spektrale Bestrahlungsstärke bei SZA 28,7°, bei dem LED-Simulator auf das ASTM G173-03 Spektrum.

Sonnensimulator	traditionell siehe Abbildung 2.10	LED siehe Abbildung 3.3	Hybrid siehe Abbildung 4.5
Anzahl an Strahlungs- quellentypen	4	23	25
Wellenlängenbereich	280- ca. 2500 nm	360-960 nm	280-960 nm
bestrahlte Fläche [m ²]	1,44	1,0	1,44
Abstand [m]	1,6	1,6	1,6
UV-B max [Wm ⁻²]	1,6	-	1,7
UV-A max [Wm ⁻²]	41,5	194	70,6
PAR max [Wm ⁻²]	348	1854	567
FarRed max [Wm ⁻²]	69	196	85,4
SPD UV-B	17,6 %	-	17,8 %
SPD UV-A	29,3 %	54,8 %	19,8 %
SPD PAR	26,5 %	7,2 %	7,8 %
SPD FarRed	32,9 %	25,1 %	33,8 %
SPD 300 – 800 nm	27,9 %	14,5 %	13,6 %
MNSA 300 – 800 nm	30,9 %	18,3 %	16,0 %
m.l.	-	2,1 %	8,8 %
Max. Gesamtleistungsaufnahme	31 kW	< 12 kW	16,6 kW

Abbildung 5.1 zeigt den Vergleich einer mit uvspec modellierten spektralen Bestrahlungsstärke bei einem SZA von $28,7^\circ$ und die gemessene maximale spektrale Bestrahlungsstärke des traditionellen Simulators, sowie die gemessene spektrale Bestrahlungsstärke zur Simulation der solaren Globalstrahlung bei SZA $28,7^\circ$ des Hybrid-Sonnensimulators.

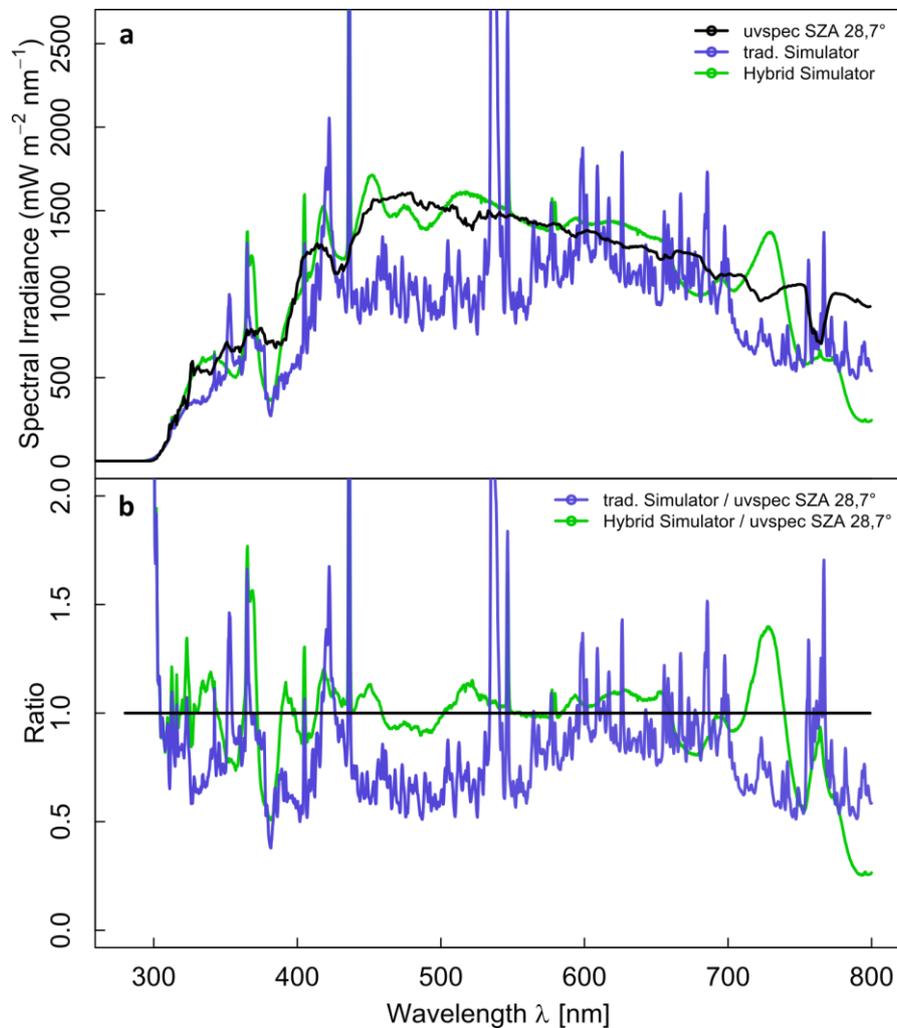


Abbildung 5.1: Vergleich zwischen einem mit uvspec modellierten Spektrum und den gemessenen Spektren vom traditionellen Simulator und Hybrid-Simulator. (a) Vergleich zwischen gemessenen (Newport OSM400) spektralen Bestrahlungsstärken des traditionellen und des Hybrid-Simulators und die mit uvspec modellierte spektrale Bestrahlungsstärke für SZA $28,7^\circ$. (b) Quotienten aus gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken des traditionellen und des Hybrid-Simulators zu mit uvspec modellierter spektraler Bestrahlungsstärke für SZA $28,7^\circ$. Das modellierte Spektrum hat eine Auflösung von 1 nm, im Bereich 331 – 800 nm wurde über ein Intervall von 10 nm zur entsprechenden Zentralwellenlänge gemittelt. Die Spektren von den Simulatoren haben eine Auflösung von 1 nm. Als Filterglas wurde Sanalux® 4,0 mm verwendet.

Da es keine einzelne Strahlungsquelle gibt, die eine sonnenähnliche spektrale Bestrahlungsstärke erzeugen kann, ist die Art und Anzahl der verwendeten Strahlungsquellen ein grundlegender Parameter eines Sonnensimulators. Der traditionelle Sonnensimulator am

Helmholtz Zentrum München verwendet vier verschiedene Strahlungsquellen, 313 nm UV-Röhren, blaue Leuchtstoffröhren, Metallhalogenidlampen (HQI) und Halogenlampen. Der LED-Sonnensimulator verwendet 23 verschiedene LED-Typen, deren Peakwellenlängen von 368 nm bis 950 nm reichen. Bei dem Hybrid-Sonnensimulator werden die 23 verschiedenen LED-Typen mit 313 nm UV-Röhren, des alten Systems, und 340 nm UV-Röhren kombiniert, somit ergeben sich für den Hybrid-Sonnensimulator 25 verschiedene Strahlungsquellen.

Zur Erzeugung eines bestimmten Zielspektrums werden bei den drei unterschiedlichen Sonnensimulatoren deren einzelne Strahlungsquellen so miteinander kombiniert, dass eine möglichst gute Anpassung an das Zielspektrum erreicht wird. Je größer die Anzahl der verwendeten Strahlungsquellen ist, desto größer wird die Komplexität, ein Zielspektrum durch deren Kombination möglichst genau zu erzeugen. Rein von der Anzahl der verwendeten Strahlungsquellen, zeigt der Hybrid-Sonnensimulator mit 25 verschiedenen Strahlungsquellen die größte Komplexität. Zur Regelung der spezifischen Strahlungsleistung werden bei dem traditionellen Sonnensimulator einzelne Lampengruppen aus- beziehungsweise zugeschaltet. Bei dem LED-Sonnensimulator kann dagegen direkt die Strahlungsleistung der verschiedenen LED-Typen über den Strom geregelt werden. Im Vergleich zu dem traditionellen Sonnensimulator kann dadurch eine feinere Abstimmung der spektralen Bestrahlungsstärke in der Versuchsfläche erreicht werden. Dies gilt ebenfalls für den Hybrid-Sonnensimulator für Wellenlängen größer 350 nm. Für den Bereich unterhalb von 350 nm ist es wie beim traditionellen Sonnensimulator notwendig, die spezifische Strahlungsleistung durch Schalten einzelner Lampengruppen zu realisieren.

Durch Verwendung von Temperaturstrahlern (Halogenlampen) deckt der traditionelle Sonnensimulator mit 280-ca.2500 nm den größten Wellenlängenbereich ab. Der LED-Sonnensimulator deckt einen Wellenlängenbereich von 360-950 nm ab. Um unterhalb von 360 nm den Wellenlängenbereich mit LEDs zu vergrößern, wäre ein großer technischer Aufwand nötig, da LEDs in diesen Wellenlängenbereichen eine deutlich geringere Effizienz und Lebensdauer besitzen (Knauer et al., 2019). Deswegen werden beim Hybrid-Sonnensimulator, zusätzlich zu den LEDs, UV-Röhren eingesetzt, die eine Peakwellenlänge von 315 nm und 340 nm besitzen. Dadurch kann der Hybrid-Sonnensimulator einen Wellenlängenbereich von 280-950 nm abdecken.

Bei den erreichbaren maximalen Bestrahlungsstärken in den Spektralbereichen UV-B, UV-A, PAR und FarRed ist zu beachten, dass der traditionelle und der Hybrid-Sonnensimulator eine Fläche von jeweils 1,44 m² bestrahlen, während der LED-Sonnensimulator eine Fläche von 1 m² bestrahlt hat. Aufgrund der kleineren Fläche, der hochreflektierenden Seitenwände und der nicht benötigten Filtergläser erreicht der LED-Sonnensimulator, in den Wellenlängenbereichen in denen LEDs vorhanden sind (360-800 nm), die größten Bestrahlungsstärken, siehe Tabelle 5.1.

Die für die Simulation der solaren Globalstrahlung bei SZA 28,7° benötigte UV-B-Bestrahlungsstärke von 1,7 Wm⁻² wird nur von dem traditionellen und dem Hybrid-Sonnensimulator erreicht. Vergleicht man den LED- mit dem Hybrid-Sonnensimulator, wird

deutlich, dass selbst wenn die Bestrahlungsstärken des LED-Sonnensimulators bezüglich der Fläche mit dem Faktor 1,44 korrigiert werden, die Erzeugung der UV-B-Strahlung mit großen Verlusten und technischem Aufwand für den Hybrid-Sonnensimulator verbunden ist. Vergleicht man den traditionellen und den Hybrid-Sonnensimulator bezüglich der maximalen Bestrahlungsstärken in den Bereichen UV-A, PAR und FarRed, so zeigt sich, dass der Hybrid-Sonnensimulator deutlich größere Bestrahlungsstärken erreicht, siehe Tabelle 5.1.

Die spektrale Abweichung im UV-B-Bereich, bei der Simulation der solaren Globalstrahlung in Mitteleuropa mit einem Sonnenzenitwinkel von $28,7^\circ$ und einem Ozonwert von 325 DU, ist mit einem Wert von 17,6 % für den traditionellen und 17,8 % für den Hybrid-Sonnensimulator nahezu identisch. Der Hybrid-Sonnensimulator kann durch die Verwendung der 340 nm UV-Röhren und der LEDs mit den Peakwellenlängen 368, 389, 394 und 402 nm die geringste spektrale Abweichung von 19,8 % im UV-A-Bereich erreichen. Auch wenn der reine LED-Simulator die benötigte UV-A-Bestrahlungsstärke von $54,8 \text{ Wm}^{-2}$ erreicht, so ist doch die spektrale Abweichung mit einem Wert von 54,8 %, im Vergleich zu den anderen Sonnensimulatoren, relativ hoch. Diese relativ hohe spektrale Abweichung im UV-A-Bereich entsteht durch das Fehlen von Strahlungsquellen im Bereich von 315-360 nm.

Durch die hohe Anzahl von verschiedenen LED-Typen im PAR-Wellenlängenbereich ist die spektrale Abweichung mit 7,2 % bei dem LED- und mit 7,8 % bei dem Hybrid-Sonnensimulator beträchtlich geringer als die spektrale Abweichung vom traditionellen Sonnensimulator, der einen Wert von 26,5 % im PAR-Bereich aufweist. Im FarRed-Bereich zeigen sich keine gravierenden Unterschiede bezüglich der spektralen Abweichung zwischen den drei verschiedenen Sonnensimulatoren.

Bei den Messungen der maximalen elektrischen Gesamtleistungsaufnahme, ohne Kühlung, ergab sich ein Wert von 31 kW für den traditionellen Sonnensimulator und ein Wert von 16,6 kW für den Hybrid-Sonnensimulator, für den LED-Sonnensimulator kann nur eine Abschätzung von $< 12 \text{ kW}$ gegeben werden. Bei dem traditionellen Sonnensimulator muss dabei beachtet werden, dass die 31 kW sich auf die Erzeugung einer spektralen Bestrahlungsstärke beziehen, welche von 280–ca.2500 nm reicht und damit eine größere Globalbestrahlungsstärke erreicht wird als die $460,1 \text{ Wm}^{-2}$, die mit dem Array-Radiometer (300-800 nm) gemessen wurde. Auf der anderen Seite erzeugt der Hybrid-Sonnensimulator bei einer maximalen elektrischen Gesamtleistungsaufnahme von 16,6 kW eine deutlich höhere maximale Bestrahlungsstärke von 724 Wm^{-2} im Wellenlängenbereich von 300-800 nm. Für die Simulation der solaren Globalstrahlung für Sonnenzenitwinkel $28,7^\circ$ und Ozon 325 DU, im Bereich von 300-800 nm (546 Wm^{-2}) benötigt der Hybrid-Sonnensimulator eine elektrische Leistung von 12,3 kW. Um eine spektrale Bestrahlungsstärke zu erzeugen, die einer solaren Globalstrahlung für Sonnenzenitwinkel $28,7^\circ$ und Ozon 325 DU im Wellenlängenbereich von 300-1500 nm (834 Wm^{-2}) entspricht, wäre es notwendig, weitere Infrarot-LED-Typen zu installieren, die die elektrische Leistungsaufnahme dann um circa 4,4 kW auf 16,7 kW erhöhen würde.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse für einen neu entwickelten, dem Stand der Technik entsprechenden, Hybrid-Sonnensimulator am Helmholtz Zentrum München vorgestellt und beschrieben. Es konnte zum ersten Mal gezeigt werden, dass auch durch Verwendung von 23 verschiedenen LED-Typen in Kombination von 313 nm und 340 nm UV-Röhren mit Sanalux® als Filterglas, die Simulation der solaren Globalstrahlung im Wellenlängenbereich 280-800 nm für Flächen größer einem Quadratmeter realisiert werden kann. Im Vergleich zu hellstem Sonnenlicht im Sommer in Mitteleuropa, in dem Bestrahlungsstärken im UV-B-Bereich von $1,7 \text{ Wm}^{-2}$, im UV-A-Bereich von $54,8 \text{ Wm}^{-2}$, im PAR-Bereich von 411 Wm^{-2} und im FarRed-Bereich von 98 Wm^{-2} vorkommen, erreicht der neue Hybrid-Sonnensimulator eine gemessene Bestrahlungsstärke im UV-B-Bereich von $1,69 \text{ Wm}^{-2}$, im UV-A-Bereich von $53,4 \text{ Wm}^{-2}$, im PAR-Bereich von 420 Wm^{-2} und im FarRed-Bereich von $78,6 \text{ Wm}^{-2}$. Der Einsatz von 25 verschiedenen Strahlungsquellen, die individuell angesteuert werden können, ermöglicht eine bisher nie dagewesene spektrale Anpassung, im Wellenlängenbereich 300-800 nm der Simulation zur spektralen Verteilung von solaren spektralen Bestrahlungsstärken für verschiedene Sonnenzenitwinkel. So ergibt sich für den neuen Hybrid-Sonnensimulator bei der Simulation von SZA $28,7^\circ$ eine spektrale Abweichung (SPD) im Bereich 300-800 nm von nur 13,6% und bei der Simulation von SZA 80° von 12,1%. Daraus folgt, dass im Rahmen dieser spektralen Abweichungen der neue Hybrid-Sonnensimulator in der Lage ist, tages- und jahreszeitliche Variationen der solaren Globalstrahlung zu erzeugen.

Zudem wurden spektrale Bestrahlungsstärken erzeugt und gemessen, die die solare Globalstrahlung (280-800 nm) bei bewölktem Himmel simulieren. Auch dabei konnten geringe spektrale Abweichungen erzielt werden mit 13,0 % für SZA 5° und 12,0 % für SZA 30° . Des Weiteren ist es möglich, spektrale Bestrahlungsstärken zu simulieren, wie sie in einem Pflanzenbestand vorkommen. Neben der Simulation von sonnenähnlichen Spektren, können Funktionsstudien bezüglich photobiologischer Effekte in bestimmten Wellenlängenbereichen unter Laborbedingungen durchgeführt werden bei einer „natürlichen“ UV-B-, UV-A-, PAR- und FarRed-Hintergrundstrahlung.

Im Vergleich zum traditionellen am Helmholtz Zentrum München betriebenen Sonnensimulator wird die elektrische Leistungsaufnahme durch das neue LED-Konzept und den weitgehenden Verzicht einer Simulation des NIR-Bereichs bei der Simulation von SZA $28,7^\circ$ im Wellenlängenbereich von 280 – 800 nm, von 31 kW auf 12,3 kW reduziert, dies entspricht einer Reduzierung von 60 %.

Aufgrund von begrenzten Projektmitteln bzw. Projektzeit und der stetigen Weiterentwicklung der LED-Technologie gibt es dennoch aus Sicht des Autors einige Verbesserungen, die in der Zukunft durchgeführt werden können. Dazu zählt die Ansteuerung der 313 nm und 340 nm UV-Röhren, die bisher durch Schalten einzelner UV-Lampengruppen realisiert wird. Eine Verbesserung, hinsichtlich der spektralen Anpassung im UV-B- bzw. UV-A-Bereich, könnte

erzielt werden, indem die Vorschaltgeräte der UV-Röhren durch DALI kompatible Vorschaltgeräte ausgetauscht werden. Dadurch könnte die 313 nm UV-Röhrengruppe und die 340 nm UV-Röhrengruppe separat jeweils von ca. 7-100 % geregelt werden.

Die spektrale Anpassung im UV-A-Bereich kann durch Hinzunahme eines LED-Typs mit Peakwellenlänge 375 nm weiter verbessert werden. Wie in Kapitel 4 bereits erwähnt, ist die Bestrahlungsstärke im FarRed beziehungsweise im nahen Infrarot-Bereich für die Simulation von Sonnenzenitwinkeln kleiner gleich 60° im Vergleich zu natürlichen Bestrahlungsstärken zu gering. Dies kann durch Erhöhung der Anzahl an Light Engines in diesen Wellenlängenbereichen kompensiert werden. Eine andere Möglichkeit wäre die Verwendung von Temperaturstrahlern (Infrarotstrahlern) mit einer Farbtemperatur von 2800 K, um die fehlende Bestrahlungsstärke zu erzeugen. In dieser Arbeit wurde bewusst die nahe Infrarot-Strahlung im Vergleich zur solaren Bestrahlungsstärke verringert, um bei der Verwendung des Hybrid-Sonnensimulators in einer Klimakammer für Pflanzenexperimente eine übernatürliche Erhöhung der Blatttemperatur zu vermeiden (Hogewoning, Douwstra, Trouwborst, van Ieperen, & Harbinson, 2010; Nelson & Bugbee, 2015). Zudem kann dadurch die benötigte Energieaufnahme des Hybrid-Sonnensimulators und die benötigte Energieaufnahme zur Kühlung der Klimakammer deutlich verringert werden. Im Vergleich zu den traditionellen Strahlungsquellen werden sich in der Zukunft die LED-Technologien weiterentwickeln und zu noch besseren Effizienzen der LEDs führen (Pattison et al., 2018). Daher ist die Entwicklung eines rein auf LED basierenden Sonnensimulators in nächster Zukunft nicht abgeschlossen und kann stets weiterentwickelt und verbessert werden. Die traditionellen Sonnensimulatoren werden dagegen schon jetzt von den Verordnungen der EU-Kommission bezüglich des Verbotes bestimmter Leuchtmittel, zum Beispiel das Verbot von Hochvolt-Halogenlampen, betroffen.

Von Anfang an wurde bei der Konzeption und der Entwicklung des inneren LED-Feldes (Abbildung 3.1, Abbildung 3.3) mitberücksichtigt, dass eine spätere Übertragung auf größere Flächen oder Nutzräume realisiert werden kann. Das Konzept des inneren LED-Feldes erlaubt es, in Modulbauweise großflächige LED-Sonnensimulatoren aufzubauen. So könnte zum Beispiel durch richtige Anordnung von sechs inneren LED-Feldern eine Fläche von circa 10 m^2 bestrahlt werden. Die sich bei der Übertragung auf größere Flächen beziehungsweise auf größere Nutzräume ändernden Strahlungsverhältnisse wie Absorptions- und Reflexionsverhältnisse können durch gezielte Ansteuerung der verschiedenen LED-Typen angepasst werden.

Literaturverzeichnis

- Ahmad, M., Grancher, N., Heil, M., Black, R. C., Giovani, B., Galland, P., & Lardemer, D. (2002). Action spectrum for cryptochrome-dependent hypocotyl growth inhibition in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, *129*(2), 774-785. doi:10.1104/pp.010969
- Al-Ahmad, A. Y., Holdsworth, J., Vaughan, B., Sharafutdinova, G., Zhou, X., Belcher, W. J., & Dastoor, P. C. (2019). Modular LED arrays for large area solar simulation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *27*(2), 179-189. doi:10.1002/pip.3072
- Albert, A., Seidlitz, H. K., & Winkler, J. B. (2006). Solar simulators as a tool for assessing the impact of UV radiation on organisms and ecosystems. *UV News*, *8*, 17-19.
- Allegre, C. J., Manhès, G., & Göpel, C. (1995). The age of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *59*(8), 1445-1456. doi:https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00054-4
- Aphalo, P. (2015). The r4photobiology suite: spectral irradiance. *UV4Plants Bulletin*, *2015*(1), 21-29. doi:10.19232/uv4pb.2015.1.14
- Aphalo, P., Albert, A., Bjorn, L. O., McLeod, A., Robson, T. M., & Rosenqvist, E. (2012). *Beyond the visible: A handbook of best practice in plant UV photobiology*. Helsinki: University of Helsinki.
- Atwell, B. J., Kriedemann, P. E., & Turnbull, C. G. (1999). *Plants in action: adaptation in nature, performance in cultivation*. South Yarra: Macmillan Education AU.
- Awlia, M., Nigro, A., Fajkus, J., Schmoeckel, S. M., Negrão, S., Santelia, D., . . . Panzarová, K. (2016). High-throughput non-destructive phenotyping of traits that contribute to salinity tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 1414. doi:10.3389/fpls.2016.01414
- Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology* *59*, 89-113. doi:10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759
- Bass, J. (2012). Circadian topology of metabolism. *Nature*, *491*(7424), 348-356. doi:10.1038/nature11704
- Battle, M. W., & Jones, M. A. (2020). Cryptochromes integrate green light signals into the circadian system. *Plant, cell & environment*, *43*(1), 16-27. doi:10.1111/pce.13643
- Bernhard, G., & Seckmeyer, G. (1999). Uncertainty of measurements of spectral solar UV irradiance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *104*(D12), 14321-14345.
- Björkman, O., & Demmig, B. (1987). Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta*, *170*(4), 489-504. doi:10.1007/BF00402983

- Blanken, W., Cuaresma, M., Wijffels, R. H., & Janssen, M. (2013). Cultivation of microalgae on artificial light comes at a cost. *Algal Research*, 2(4), 333-340. doi:10.1016/j.algal.2013.09.004
- Blankenship, R. (2010). Early evolution of photosynthesis. *Plant Physiology*, 154(2), 434-438. doi:10.1104/pp.110.161687
- Brainard, G. C., Hanifin, J. P., Greeson, J. M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E., & Rollag, M. D. (2001). Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *The Journal of Neuroscience*, 21(16), 6405-6412. doi:10.1523/jneurosci.21-16-06405.2001
- Briggs, W. R., & Christie, J. M. (2002). Phototropins 1 and 2: versatile plant blue-light receptors. *Trends in plant science*, 7(5), 204-210. doi:10.1016/s1360-1385(02)02245-8
- Caldwell, M. M., Camp, L. B., Warner, C. W., & Flint, S. D. (1986). Action Spectra and Their Key Role in Assessing Biological Consequences of Solar UV-B Radiation Change. In (pp. 87-111). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Carvalho, S. D., & Castillo, J. A. (2018). Influence of Light on Plant-Phyllosphere Interaction. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1482. doi:10.3389/fpls.2018.01482
- Choong, T. W., He, J., Qin, L., & Lee, S. K. (2018). Quality of supplementary LED lighting effects on growth and photosynthesis of two different *Lactuca* recombinant inbred lines (RILs) grown in a tropical greenhouse. *Photosynthetica*, 56(4), 1278-1286. doi:10.1007/s11099-018-0828-2
- Cocetta, G., Casciani, D., Bulgari, R., Musante, F., Kołton, A., Rossi, M., & Ferrante, A. (2017). Light use efficiency for vegetables production in protected and indoor environments. *The European Physical Journal Plus*, 132(1). doi:10.1140/epjp/i2017-11298-x
- CREE. (2022). Cree® LED Components IES LM-80-2008 Testing Results. Retrieved from https://cree-led.com/media/documents/LM80_Results.pdf
- Crocco, C. D., Locascio, A., Escudero, C. M., Alabadi, D., Blazquez, M. A., & Botto, J. F. (2015). The transcriptional regulator BBX24 impairs DELLA activity to promote shade avoidance in *Arabidopsis thaliana*. *Nature Communications*, 6, 6202. doi:10.1038/ncomms7202
- Cruz, S., Calado, R., Serodio, J., & Cartaxana, P. (2013). Crawling leaves: photosynthesis in sacoglossan sea slugs. *Journal of experimental botany*, 64(13), 3999-4009. doi:10.1093/jxb/ert197
- Curtis, O. F. (1936). Leaf temperatures and the cooling of leaves by radiation. *Plant Physiology*, 11(2), 343-364. doi: 10.1104/pp.11.2.343
- de Wit, M., Galvao, V. C., & Fankhauser, C. (2016). Light-Mediated Hormonal Regulation of Plant Growth and Development. *Annual Review of Plant Biology* 67, 513-537. doi:10.1146/annurev-arplant-043015-112252

- Díaz-Pinés, E., Molina-Herrera, S., Dannenmann, M., Braun, J., Haas, E., Willibald, G., . . . Saiz, G. (2017). Nitrate leaching and soil nitrous oxide emissions diminish with time in a hybrid poplar short-rotation coppice in southern Germany. *Global Change Biology Bioenergy*, 9(3), 613-626. doi:10.1111/gcbb.12367
- Eisenberg, M. J., Habib, B., Alcaraz, M., Thombs, B. D., & Fillion, K. B. (2020). Bright light therapy for depressive symptoms in hospitalized cardiac patients: A randomized controlled pilot trial. *PLoS One*, 15(3), e0230839. doi:10.1371/journal.pone.0230839
- Emde, C., Buras-Schnell, R., Kylling, A., Mayer, B., Gasteiger, J., Hamann, U., . . . Bugliaro, L. (2016). The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1647-1672. doi:10.5194/gmd-9-1647-2016
- Fankhauser, A. M., Bourque, M., Almazan, J., Marin, D., Fernandez, L., Hutheesing, R., . . . McNeill, V. F. (2020). Impact of environmental conditions on secondary organic aerosol production from photosensitized humic acid. *Environmental Science & Technology*, 54(9), 5385-5390. doi:https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.9b07485
- Fankhauser, C. (2001). The phytochromes, a family of red/far-red absorbing photoreceptors. *Journal of Biological Chemistry*, 276(15), 11453-11456. doi:10.1074/jbc.R100006200
- Feister, U., & Grewe, R. (1995). Spectral albedo measurements in the UV and visible region over different types of surfaces. *Photochemistry and Photobiology*, 62(4), 736-744. doi: https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1995.tb08723.x
- Forster, P., Shine, K. P., & Webb, A. R. (1995). Modeling ultraviolet radiation at the earth's surface. Part II: Model and instrument comparison. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 34(11), 2426-2439. doi:https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<2426:MURATE>2.0.CO;2
- Foster, M. T., Weide, E. L., Niedzwiedz, A., Duffert, J., & Seckmeyer, G. (2021). Characterization of the angular response of a multi-directional spectroradiometer for measuring spectral radiance. *EPJ Techniques and Instrumentation*, 8(1), 12. doi:https://doi.org/10.1140/epjti/s40485-021-00069-4
- Fraser, D. P., Hayes, S., & Franklin, K. A. (2016). Photoreceptor crosstalk in shade avoidance. *Current Opinion in Plant Biology*, 33, 1-7. doi:10.1016/j.pbi.2016.03.008
- Gerringa, L. J., Rijkenberg, M. J., Timmermans, R., & Buma, A. G. (2004). The influence of solar ultraviolet radiation on the photochemical production of H₂O₂ in the equatorial Atlantic Ocean. *Journal of Sea Research*, 51(1), 3-10. doi:https://doi.org/10.1016/j.seares.2003.03.002
- Gómez, C., & Gennaro Izzo, L. (2018). Increasing efficiency of crop production with LEDs. *AIMS Agriculture and Food*, 3(2), 135-153. doi:10.3934/agrfood.2018.2.135
- He, D., Kozai, T., Niu, G., & Zhang, X. (2019). Light-Emitting Diodes for Horticulture. In *Light-Emitting Diodes* (pp. 513-547): Springer International Publishing AG.

- Herrmann, I., Pimstein, A., Karnieli, A., Cohen, Y., Alchanatis, V., & Bonfil, D. (2011). LAI assessment of wheat and potato crops by VEN μ S and Sentinel-2 bands. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 2141-2151. doi:10.1016/j.rse.2011.04.018
- Hogewoning, S. W., Douwstra, P., Trouwborst, G., van Ieperen, W., & Harbinson, J. (2010). An artificial solar spectrum substantially alters plant development compared with usual climate room irradiance spectra. *Journal of experimental botany*, 61(5), 1267-1276. doi:10.1093/jxb/erq005
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Toronto: Academic Press.
- Ji, Y., Ouzounis, T., Courbier, S., Kaiser, E., Nguyen, P. T., Schouten, H. J., . . . Heuvelink, E. (2019). Far-red radiation increases dry mass partitioning to fruits but reduces *Botrytis cinerea* resistance in tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 168, 103889. doi:https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103889
- Jiang, J., Mohagheghi, A., & Moallem, M. (2020). Energy-Efficient Supplemental LED Lighting Control for a Proof-of-Concept Greenhouse System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(4), 3033-3042. doi:10.1109/tie.2019.2912762
- Joshi, N. C., Ratner, K., Eidelman, O., Bednarczyk, D., Zur, N., Many, Y., . . . Charuvi, D. (2019). Effects of daytime intra-canopy LED illumination on photosynthesis and productivity of bell pepper grown in protected cultivation. *Scientia Horticulturae*, 250, 81-88. doi:10.1016/j.scienta.2019.02.039
- Kaling, M., Kanawati, B., Ghirardo, A., Albert, A., Winkler, J. B., Heller, W., . . . SCHNITZLER, J. P. (2015). UV-B mediated metabolic rearrangements in poplar revealed by non-targeted metabolomics. *Plant, cell & environment*, 38(5), 892-904. doi:10.1111/pce.12348
- Kasting, J. F., Zahnle, K., Pinto, J., & Young, A. (1989). Sulfur, ultraviolet radiation, and the early evolution of life. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 19(2), 95-108. doi:10.1007/BF01808144
- Knauer, A., Kolbe, T., Rass, J., Cho, H. K., Netzel, C., Hagedorn, S., . . . Weyers, M. (2019). High power UVB light emitting diodes with optimized n-AlGaIn contact layers. *Japanese Journal of Applied Physics*, 58(SC). doi:10.7567/1347-4065/ab0f13
- Kohraku, S., & Kurokawa, K. (2003). *New methods for solar cells measurement by LED solar simulator*. Paper presented at the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003.
- Kohraku, S., & Kurokawa, K. (2006). A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator. *Solar energy materials and solar cells*, 90(18-19), 3364-3370. doi:https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.09.024
- Kolberg, D., Schubert, F., Lontke, N., Zwigart, A., & Spinner, D. M. (2011). Development of tunable close match LED solar simulator with extended spectral range to UV and IR. *Energy Procedia*, 8, 100-105. doi:10.1016/j.egypro.2011.06.109

- Kopp, G., & Lean, J. L. (2011). A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, *38*(1). doi:10.1029/2010GL045777
- Krause, G., & Weis, E. (1991). Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, *42*(1), 313-349. doi:10.1146/annurev.pp.42.060191.001525
- Krueger, A., & Minzner, R. (1976). A mid-latitude ozone model for the 1976 US Standard Atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, *81*(24), 4477-4481. doi:10.1029/JC081i024p04477
- Kuchling, H. (1994). *Taschenbuch der Physik* (Vol. 17). Leipzig: Fachbuchverlag.
- Kurucz, R. L. (1994). *Synthetic infrared spectra*. Paper presented at the Symposium-International Astronomical Union.
- Lawson, C. L., & Hanson, R. J. (1995). *Solving least squares problems*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Legendre, R., & van Iersel, M. W. (2021). Supplemental far-red light stimulates lettuce growth: Disentangling morphological and physiological effects. *Plants*, *10*(1), 166. doi:https://doi.org/10.3390/plants10010166
- Lehtipalo, K., Yan, C., Dada, L., Bianchi, F., Xiao, M., Wagner, R., . . . Baccharini, A. (2018). Multicomponent new particle formation from sulfuric acid, ammonia, and biogenic vapors. *Science advances*, *4*(12), eaau5363. doi:10.1126/sciadv.aau5363
- Lenoble, J. (1998). Modeling of the influence of snow reflectance on ultraviolet irradiance for cloudless sky. *Applied optics*, *37*(12), 2441-2447. doi:https://doi.org/10.1364/AO.37.002441
- Liao, X., Liu, W., Yang, H.-Q., & Jenkins, G. I. (2020). A dynamic model of UVR8 photoreceptor signalling in UV-B-acclimated Arabidopsis. *New Phytologist*. doi:10.1111/nph.16581
- Lin, H., Chen, Y., Zhang, H., Fu, P., & Fan, Z. (2017). Stronger cooling effects of transpiration and leaf physical traits of plants from a hot dry habitat than from a hot wet habitat. *Functional Ecology*, *31*(12), 2202-2211. doi:10.1111/1365-2435.12923
- Linden, K. J., Neal, W. R., & Serreze, H. B. (2014). *Adjustable spectrum LED solar simulator*. Paper presented at the Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XVIII.
- Liou, K.-N. (1980). *An Introduction to Atmospheric Radiation*. New York: Academic Press.
- Maiwald, V., Vrakking, V., Zabel, P., Schubert, D., Waclavicek, R., Dorn, M., . . . Rosseti, V. (2020). From ice to space: a greenhouse design for Moon or Mars based on a prototype deployed in Antarctica. *CEAS Space Journal*, *13*(1), 17-37. doi:https://doi.org/10.1007/s12567-020-00318-4

- Masili, M., & Ventura, L. (2016). Equivalence between solar irradiance and solar simulators in aging tests of sunglasses. *BioMedical Engineering OnLine* 15(1), 86. doi:10.1186/s12938-016-0209-7
- Massa, G. D., Wheeler, R. M., Morrow, R. C., & Levine, H. G. (2016). *Growth chambers on the International Space Station for large plants*. Paper presented at the VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134.
- Mayer, B., & Kylling, A. (2005). The libRadtran software package for radiative transfer calculations-description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(7), 1855-1877. doi:https://doi.org/10.5194/acp-5-1855-2005
- Mayer, B., Kylling, A., Emde, C., Hamann, U., & Buras, R. (2022). libRadtran user's guide. *Edition for libRadtran version 2.0.4*. Retrieved from <http://www.libradtran.org/doku.php?id=documentation>
- Mayer, B., Seckmeyer, G., & Kylling, A. (1997). Systematic long-term comparison of spectral UV measurements and UVSPEC modeling results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D7), 8755-8767. doi: <https://doi.org/10.1029/97JD00240>
- Meinke, D. W., Cherry, J. M., Dean, C., Rounsley, S. D., & Koornneef, M. (1998). Arabidopsis thaliana: a model plant for genome analysis. *Science*, 282(5389), 662-682. doi: 10.1126/science.282.5389.66
- Meschede, D. (2015). *Gerthsen physik*: Springer-Verlag.
- Monson, R. K., Winkler, B., Rosenstiel, T. N., Block, K., Merl-Pham, J., Strauss, S. H., . . . Schnitzler, J.-P. (2020). High productivity in hybrid-poplar plantations without isoprene emission to the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(3), 1596-1605. doi:10.1073/pnas.1912327117
- Mouser. (2019). LED-Emitter. Retrieved from <https://www.mouser.de/c/optoelectronics/led-lighting/led-emitters/>
- Narla, S., Kohli, I., Hamzavi, I. H., & Lim, H. W. (2020). Visible light in photodermatology. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 19(1), 99-104. doi:10.1039/c9pp00425d
- Nelson, J. A., & Bugbee, B. (2015). Analysis of environmental effects on leaf temperature under sunlight, high pressure sodium and light emitting diodes. *PLoS One*, 10(10), e0138930. doi:10.1371/journal.pone.0138930
- Niederbacher, B., Winkler, J. B., & Schnitzler, J. P. (2015). Volatile organic compounds as non-invasive markers for plant phenotyping. *Journal of experimental botany*, 66(18), 5403-5416. doi:10.1093/jxb/erv219
- Novickovas, A., Baguckis, A., Mekys, A., & Tamosiunas, V. (2015). Compact Light-Emitting Diode-Based AAA Class Solar Simulator: Design and Application Peculiarities. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(4), 1137-1142. doi:10.1109/jphotov.2015.2430013

- OSRAM. (2020). Osram: Zuverlässigkeit und Lebensdauer von LEDs. *Applikationsschrift Nr. AN009*. Retrieved from <https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-10235708/Zuvelr%C3%A4ssigkeit%20der%20OSLON%C2%AE%20Produktfamilie.pdf>
- Pattison, P. M., Tsao, J. Y., Brainard, G. C., & Bugbee, B. (2018). LEDs for photons, physiology and food. *Nature*, *563*(7732), 493-500. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0706-x>
- Paul, N. D., & Gwynn-Jones, D. (2003). Ecological roles of solar UV radiation: towards an integrated approach. *Trends in Ecology & Evolution*, *18*(1), 48-55. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)00014-9)
- Pennisi, G., Blasioli, S., Cellini, A., Maia, L., Crepaldi, A., Braschi, I., . . . Gianquinto, G. (2019). Unraveling the Role of Red:Blue LED Lights on Resource Use Efficiency and Nutritional Properties of Indoor Grown Sweet Basil. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 305. doi:10.3389/fpls.2019.00305
- Perovich, D. K. (2007). Light reflection and transmission by a temperate snow cover. *Journal of Glaciology*, *53*(181), 201-210. doi:<https://doi.org/10.3189/172756507782202919>
- Pfeifer, M., Koepke, P., & Reuder, J. (2006). Effects of altitude and aerosol on UV radiation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *111*(D1). doi:10.1029/2005JD006444
- Pierik, R., Mommer, L., Voesenek, L. A. C. J., & Robinson, D. (2013). Molecular mechanisms of plant competition: neighbour detection and response strategies. *Functional Ecology*, *27*(4), 841-853. doi:10.1111/1365-2435.12010
- R core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. Retrieved from <https://www.R-project.org/>
- Rapf, R. J., & Vaida, V. (2016). Sunlight as an energetic driver in the synthesis of molecules necessary for life. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *18*(30), 20067-20084. doi:10.1039/c6cp00980h
- Reitmayer, H., Werner, H., & Fabian, P. (2002). A novel system for spectral analysis of solar radiation within a mixed beech-spruce stand. *Plant Biology*, *4*(2), 228-233. doi:10.1055/s-2002-25731
- Roháček, K. (2002). Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships. *Photosynthetica*, *40*(1), 13-29. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1020125719386>
- Rosenkranz, M., Pugh, T. A., Schnitzler, J. P., & Arneith, A. (2015). Effect of land-use change and management on biogenic volatile organic compound emissions—selecting climate-smart cultivars. *Plant, cell & environment*, *38*(9), 1896-1912. doi:10.1111/pce.12453

- Roy, J., Rineau, F., De Boeck, H. J., Nijs, I., Pütz, T., Abiven, S., . . . Brüggemann, N. (2021). Ecotrons: powerful and versatile ecosystem analysers for ecology, agronomy and environmental science. *Global change biology*, 27(7), 1387-1407. doi:10.1111/gcb.15471
- Salter, M. G., Franklin, K. A., & Whitlam, G. C. (2003). Gating of the rapid shade-avoidance response by the circadian clock in plants. *Nature*, 426(6967), 680-683. doi:10.1038/nature02178.
- Salvucci, M. E., Portis Jr, A. R., & Ogren, W. L. (1986). Light and CO₂ response of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase activation in Arabidopsis leaves. *Plant Physiology*, 80(3), 655-659. doi:10.1104/pp.80.3.655
- Schweier, J., Molina-Herrera, S., Ghirardo, A., Grote, R., Díaz-Pinés, E., Kreuzwieser, J., . . . Schnitzler, J. P. (2017). Environmental impacts of bioenergy wood production from poplar short-rotation coppice grown at a marginal agricultural site in Germany. *Gcb Bioenergy*, 9(7), 1207-1221. doi:10.1111/gcbb.12423
- Seckmeyer, G. (1991). *Simulation der Globalstrahlung für Pflanzenversuche*. Technische Universität München, München.
- Seckmeyer, G., Bais, A., Bernhard, G., Blumthaler, M., Booth, C., Disterhoft, P., . . . Roy, C. (2001). Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation Part 1: Spectral instruments. *WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION*(No. 125).
- Seckmeyer, G., Mayer, B., Bernhard, G., Erb, R., Albold, A., Jäger, H., & Stockwell, W. (1997). New maximum UV irradiance levels observed in Central Europe. *Atmospheric Environment*, 31(18), 2971-2976. doi:https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00104-0
- Seckmeyer, G., & Payer, H.-D. (1993). A new sunlight simulator for ecological research on plants. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 21(2-3), 175-181. doi:https://doi.org/10.1016/1011-1344(93)80180-H
- Seckmeyer, G., & Payer, H. (1988). Radiant intensity oscillations of lamps operated by alternating current. *Gartenbauwissenschaft (Germany, FR)*, 53, 188-191.
- Shaima, H., & Microchip Technology. (2012). Digitally Addressable Lighting Interface (DALI) Communication. *Microchip application note*. Retrieved from <https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/01465A.pdf>
- Shaw, P. J., & Purdie, D. A. (2001). Phytoplankton photosynthesis-irradiance parameters in the near-shore UK coastal waters of the North Sea: temporal variation and environmental control. *Marine Ecology Progress Series*, 216, 83-94. doi:10.3354/meps216083
- Shettle, E. (1989). *Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies*. Paper presented at the Conference on Atmospheric Propagation in the UV, Visible, IR and MM-Region and Related System Aspects, NATO Adv. Group for Aerosp.

- Singsaas, E. L., Laporte, M. M., Shi, J.-Z., Monson, R. K., Bowling, D. R., Johnson, K., . . . Sharkey, T. D. (1999). Kinetics of leaf temperature fluctuation affect isoprene emission from red oak (*Quercus rubra*) leaves. *Tree Physiology*, *19*(14), 917-924. doi:10.1093/treephys/19.14.917
- Sissenwine, N., Dubin, M., & Wexler, H. (1962). The US standard atmosphere, 1962. *Journal of Geophysical Research*, *67*(9), 3627-3630.
- Smith, H. L., McAusland, L., & Murchie, E. H. (2017). Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. *Journal of experimental botany*, *68*(9), 2099-2110. doi:10.1093/jxb/erx098
- Smith, R. C., & Mobley, C. D. (2008). Underwater light. In *Photobiology* (pp. 131-138): Springer.
- Steinhilber, F., Beer, J., & Fröhlich, C. (2009). Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysical Research Letters*, *36*(19). doi:10.1029/2009GL040142
- Stirbet, A., Lazár, D., Guo, Y., & Govindjee, G. (2020). Photosynthesis: basics, history and modelling. *Annals of Botany*, *126*(4), 511-537. doi:10.1093/aob/mcz171
- Sträter, H., Riechelmann, S., Neuberger, F., & Winter, S. (2019). *Characterizing the Angular Distribution of an LED-Based Solar Simulator for PV Modules*. Paper presented at the 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.
- Stuckelberger, M., Perruche, B., Bonnet-Eymard, M., Riesen, Y., Despeisse, M., Haug, F.-J., & Ballif, C. (2014). Class AAA LED-Based Solar Simulator for Steady-State Measurements and Light Soaking. *IEEE Journal of Photovoltaics*, *4*(5), 1282-1287. doi:10.1109/jphotov.2014.2335738
- Sullivan, J. A., & Deng, X. W. (2003). From seed to seed: the role of photoreceptors in *Arabidopsis* development. *Developmental biology*, *260*(2), 289-297. doi:10.1016/S0012-1606(03)00212-4
- Tevini, M., & Häder, D.-P. (1985). *Allgemeine Photobiologie*. New York: Georg Thieme Verlag Stuttgart.
- Théry, M. (2001). Forest light and its influence on habitat selection. *Plant Ecology*, *153*, 251-261. doi:https://doi.org/10.1023/A:1017592631542
- Thiel, S., Döhring, T., Köfferlein, M., Kosak, A., Martin, P., & Seidlitz, H. K. (1996). A Phytotron for Plant Stress Research: How Far Can Artificial Lighting Compare to Natural Sunlight? *Journal of Plant Physiology*, *148*(3-4), 456-463. doi:10.1016/s0176-1617(96)80279-3
- Tian, M., Yu, G., He, N., & Hou, J. (2016). Leaf morphological and anatomical traits from tropical to temperate coniferous forests: Mechanisms and influencing factors. *Scientific Reports*, *6*(1), 19703. doi:10.1038/srep19703

- Tissot, N., & Ulm, R. (2020). Cryptochrome-mediated blue-light signalling modulates UVR8 photoreceptor activity and contributes to UV-B tolerance in Arabidopsis. *Nature Communications*, *11*(1), 1323. doi:10.1038/s41467-020-15133-y
- Tseng, P. T., Chen, Y. W., Tu, K. Y., Chung, W., Wang, H. Y., Wu, C. K., & Lin, P. Y. (2016). Light therapy in the treatment of patients with bipolar depression: A meta-analytic study. *European Neuropsychopharmacology*, *26*(6), 1037-1047. doi:10.1016/j.euroneuro.2016.03.001
- Ulm, R., & Jenkins, G. I. (2015). Q&A: How do plants sense and respond to UV-B radiation? *BMC biology*, *13*(1), 1-6.
- Verdaguer, D., Jansen, M. A., Llorens, L., Morales, L. O., & Neugart, S. (2017). UV-A radiation effects on higher plants: Exploring the known unknown. *Plant science*, *255*, 72-81. doi:10.1016/j.plantsci.2016.11.014
- Volf, C., Aggestrup, A. S., Svendsen, S. D., Hansen, T. S., Petersen, P. M., Dam-Hansen, C., . . . Martiny, K. (2020). Dynamic LED light versus static LED light for depressed inpatients: results from a randomized feasibility trial. *Pilot and Feasibility Studies*, *6*, 5. doi:10.1186/s40814-019-0548-9
- Wang, Z., Lin, Q., Wenger, B., Christoforo, M. G., Lin, Y.-H., Klug, M. T., . . . Snaith, H. J. (2018). High irradiance performance of metal halide perovskites for concentrator photovoltaics. *Nature Energy*, *3*(10), 855-861. doi:10.1038/s41560-018-0220-2
- Watson, A., Ghosh, S., Williams, M. J., Cuddy, W. S., Simmonds, J., Rey, M. D., . . . Hickey, L. T. (2018). Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. *Nature Plants*, *4*(1), 23-29. doi:10.1038/s41477-017-0083-8
- Wavelabs. (2022). SINUS-2100. Retrieved from <https://wavelabs.de/products/sinus-2100-parachute/>
- Went, F. W. (1949). The phytotron. *Engineering and Science*, *12*(9), 3-6.
- Wheeler, R. M. (2017). Agriculture for Space: People and Places Paving the Way. *Open Agriculture*, *2*(1). doi:10.1515/opag-2017-0002
- Willing, E.-M., Piofczyk, T., Albert, A., Winkler, J. B., Schneeberger, K., & Pecinka, A. (2016). UVR2 ensures transgenerational genome stability under simulated natural UV-B in Arabidopsis thaliana. *Nature Communications*, *7*(1), 1-9.
- Wurtman, R. J. (1975). The effects of light on man and other mammals. *Annual Review of Physiology*, *37*(1), 467-483. doi:10.1146/annurev.ph.37.030175.002343
- Zeeshan, M., & Prasad, S. (2009). Differential response of growth, photosynthesis, antioxidant enzymes and lipid peroxidation to UV-B radiation in three cyanobacteria. *South African Journal of Botany*, *75*(3), 466-474. doi:10.1016/j.sajb.2009.03.003
- Zhang, Y., Wang, X. R., & Chen, J. (2019). Effects of light quality and photoperiod of light emitting LED on growth and biomass accumulation of shallot. *Journal of Horticulture and Forestry*, *11*(5), 78-83. doi:10.5897/JHF2019.0586

Zhen, S., & Bugbee, B. (2020). Far-red photons have equivalent efficiency to traditional photosynthetic photons: implications for re-defining photosynthetically active radiation. *Plant, cell & environment*, 1-14. doi:10.1111/pce.13730

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
ChIF	Chlorophyll-Fluoreszenz
COB	Chip On Board
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
DU	Dobson Unit
ESG	Einscheibensicherheitsglas
EUS	Experimentelle Umwelt-Simulation
HQI	Metallhalogenidlampen
IHV	Inhomogenitäts-Verteilung
IR	Infrarotstrahlung
LED	Licht Emittierende Diode
m.I.	mittlere Inhomogenität
MNSA	mittlere normierte spektrale Abweichung
MQA	mittlere quadratische Abweichung
NASA	National Aeronautics Space Administration
NIR	nahes Infrarot
NNLS	Non Negative Least Square
NSA	normierte spektrale Abweichung
NU	Non Uniformity
PCB	Printed Circuit Board
PAR	Photosynthetisch Aktive Strahlung 400 – 700 nm
Pfr	Phytochrome
Pr	Photochrome
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density 400 – 700 nm

PS2	Photo-System 2
PSI	Photo-System-Instrument
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt
PWM	Pulsweitenmodulation
RGB	Rot, Grün, Blau
sd	Standardabweichung (standard deviation)
SMD	Surface Mount Device
SPD	mittlere absolute spektrale Abweichung
SZA	Sonnenzenitwinkel
UV	Ultraviolettstrahlung
UV-A	Ultraviolettstrahlung 315 – 400 nm
UV-B	Ultraviolettstrahlung 280 – 315 nm
UV-C	Ultraviolettstrahlung 100 – 280 nm
uvspec	Teil der Strahlungstransfermodell-Software libRadtran
USA	United States of America
US	United States
VOC	Volatile Organic Compound
Symbol	Erklärung

Lateinische Symbole

E	Bestrahlungsstärke (irradiance)
E_{λ}	spektrale Bestrahlungsstärke (spectral irradiance)
E_{Max}	maximale Bestrahlungsstärke
$E(x,y)$	Bestrahlungsstärke an der Position (x,y)
i, j	Laufindizes
NPQ	nichtphotochemisches Quenching
QY_max	maximale Quanteneffizienz des PS2

QY_Iss effektive Quanteneffizienz des PS2

Griechische Symbole

λ Wellenlänge

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei folgenden Personen bedanken:

- Meinen Vorgesetzten, Betreuer und Doktorvater Herrn Prof. Dr. Jörg-Peter Schnitzler Abteilungsleiter für Experimentelle Umweltsimulation am Helmholtz Zentrum für die Idee und Möglichkeit zu dieser Promotion, der stets ein offenes Ohr für mich hatte und mich über die gesamte Promotionszeit unterstützt hat.
- Meinen Betreuer und Doktorvater Herrn Prof. Dr. Gunther Seckmeyer vom Institut für Meteorologie und Klimatologie an der Leibniz Universität Hannover der durch sein fachliches Wissen und der eigenen Erfahrung was es bedeutet einen Sonnensimulator in dieser Größe und Qualität zu entwickeln eine große Hilfe für mich war.
- Herrn Prof. Dr. Alexander Heisterkamp vom Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover für die Übernahme des Koreferats.
- Meiner Frau Ines und meinen Töchtern Mila und Rosa.
- Herrn Mustafa Özden der über viele Monate hinweg mit mir zusammen den Hybrid-Sonnensimulator aufgebaut hat. Herrn Peter Kary, Herrn Armin Richter, Herrn Josef Promoli und Herrn Alexandros Sigalas für die technische Unterstützung und die vielen netten Gespräche.
- Frau Dr. Barbro Winkler und Herrn Dr. Andrea Ghirardo für die Unterstützung bei biologischen Fragestellungen. Herrn Dr. Anton Schöffner für die Teilnahmen an meinen Thesis Committee und der Unterstützung bei dem „Proof of concept“ Pflanzenexperiment. Herrn Dr. Andreas Albert für die Betreuung der ersten Monate meiner Promotion. Frau Ina Zimmer für die Korrektur meiner Monographie. Frau Patrizia Thoma und Herrn Marco Bertic meinen Doktoranden-Kollegen und Freunden. Herrn Jens Duffert für die Unterstützung bei libRadtran. Herrn Marc Juarez von Seoul Semiconductor und Herrn Sebastian Olschowski von OSRAM. Dem gesamten Team von EUS und IMUK.

Die Arbeiten zu dieser Doktorarbeit wurden am Helmholtz Zentrum München - Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH) in der Abteilung für Experimentelle Umweltsimulation (EUS), Institut für Biochemische Pflanzenpathologie unter der Leitung von Prof. Dr. Jörg-Peter Schnitzler durchgeführt.