

Aus dem Department für Biomedizinische Wissenschaften
der Veterinärmedizinischen Universität Wien

Departmentsprecher: O.Univ.-Prof. Dr.med.vet. Mathias Müller

Institut für Physiologie und Biophysik

Solare UVB, UVA und Gesamt-Strahlung in Bezug auf Vögel

Diplomarbeit

Veterinärmedizinische Universität Wien

vorgelegt von
Raymond Adamec

Wien, am 9. Februar 2023

Betreuer: **Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Alois Schmalwieser**

Gutachterin: AO Prof. Dr. Alexandra Scope

Inhalt

1	Motivation	4
2	Aktueller Stand des Wissens	5
2.1	Solare UV-Strahlung.....	5
2.1.1	UV-Strahlung in der Atmosphäre	5
2.1.2	UV-Verteilung im Himmel	6
2.1.3	Bewölkung	8
2.1.4	Einfluss von Bäumen auf die UV-Strahlung	11
2.2	Bedeutung von UV-Strahlung für Vögel	12
2.2.1	Sehfeld im Vergleich	12
2.2.2	Grundlagen des Sehens beim Vogel	12
2.2.3	Spektrale Empfindlichkeiten der Photorezeptoren.....	13
2.2.4	UVS- und VS-Sehen bei Vögeln mit Bezug zur Augengröße.....	13
2.2.5	Farbwahrnehmung.....	14
2.2.6	Von-Kries-Adaptation	15
2.2.7	Adaptive Farbdiskriminierung des Vogelauges.....	16
2.2.8	Unstimmigkeiten von UV-Strahlung als Magnetkompass bei Vögeln.....	18
2.3	Aspekte für die Vogelhaltung bezüglich UV-Strahlung.....	18
2.3.1	Futterauswahl	18
2.3.2	Partnerauswahl	19
2.3.3	Reflexionsvermögen unterschiedlich gefärbter Federn.....	19
2.3.4	Eier	20
2.3.5	Jungvögel bis hin zu adulten Vögeln	21
2.3.6	Schädigungen	22
2.4	Aspekte unterschiedlicher Glastypen und die Beleuchtung bezüglich UV-Strahlung 22	
2.4.1	Einflussfaktor Glas bei behausten Vögeln	22
2.4.2	Beleuchtung durch künstliches Licht	25
3	Materialien und Methoden	26
3.1	Messzeitraum.....	26
3.2	Stationsbeschreibung	26
3.3	Messgeräte	26
3.3.1	Allgemein:	26
3.3.2	UVA-Sensor mit und ohne Schattenband:	27
3.3.3	UVB-Sensor mit und ohne Schattenband:	27
3.3.4	TSS-Sensor mit und ohne Schattenband:	28

3.4	Kalibrierung.....	29
3.5	Berechnung der direkten Bestrahlungsstärke	30
3.6	Berechnung der Tagesdosis	30
4	Ergebnisse	31
4.1	UVA-Tagesdosen	31
4.1.1	Tageshöchstwerte	31
4.1.2	Monatsübersicht für die UVA-Tageshöchstwerte.....	31
4.1.3	Verlauf der UVA-Tagesdosen	33
4.1.4	Monatsübersicht für die UVA-Tagesdosen.....	35
4.1.5	Stündlicher Verlauf der UVA-Strahlung im Juni.....	37
4.2	Anteile der diffusen und direkten UVA-Strahlung an der globalen UVA-Strahlung	39
4.3	Vergleiche mit den erythemgewichteten Tagesdosen	40
4.3.1	Monatsübersicht für die erythemgewichteten Tagesdosen.....	43
4.3.2	Stündlicher Verlauf der erythemgewichteten Strahlung im Juni.....	45
4.4	Vergleich mit der totalen solaren Strahlung.....	47
4.4.1	Monatsübersicht für Tagesdosen der totalen Strahlung	51
4.4.2	Stündlicher Verlauf der GSR-Strahlung im Juni	54
4.5	Übersicht 2013 bis 2018	56
5	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	58
6	Zusammenfassung	61
7	Summary	62
8	Literaturverzeichnis.....	63
8.1	Links	75
8.2	Abbildungsverzeichnis	76
8.3	Tabellenverzeichnis:	80
8.4	Abkürzungsverzeichnis	81
9	Danksagung	84

1 Motivation

Meine Motivation für diese Diplomarbeit war die Faszination für Strahlung, wobei das kurzwellige ultraviolette (UV) Spektrum dabei im Fokus der Diplomarbeit steht.

Das Ziel der Diplomarbeit ist einerseits die umfangreiche Bedeutung der UV-Strahlung für Vögel zu untersuchen, andererseits möchte ich genaue UV-Strahlungsergebnisse über eine längere Zeitperiode vergleichen als normalerweise in der Literatur üblich ist.

Es existieren kaum wissenschaftliche Publikationen, die sich mit dem Vergleich von UVA, UVB und totaler solarer Strahlung (TSS) befassen. Insbesondere reichen die Zeitspannen der Untersuchungen nur über wenige Jahre und die Messgeräte werden zudem selten kalibriert, wodurch Ungenauigkeiten entstehen. Dieses Problem versuche ich mit Messungen genau kalibrierter Messgeräte über mehrere Jahre zu lösen.

Den Bezug der UV-Strahlung zur Tierwelt stelle ich anhand von Vögeln her, da auch hier nur wenig Literatur zu dieser Thematik zu finden ist, obwohl abgesehen von der Fähigkeit UV-Strahlung wahrzunehmen zahlreiche weitere strahlungsrelevante Aspekte bei Vögeln feststellbar sind.

Dem Wandel der UV-Strahlung in der Umwelt und in weiterer Folge im Tierreich wird im praktischen Teil dieser Arbeit nachgegangen, wo ich mich mit der Quantifizierung der Daten von UVA-, UVB-Strahlung und TSS beschäftigt habe. Die Daten wurden im Zeitraum Anfang Juli 2013 bis Ende Juni 2018 jeweils mit und ohne Schattenband in Wien gemessen.

2 Aktueller Stand des Wissens

2.1 Solare UV-Strahlung

2.1.1 UV-Strahlung in der Atmosphäre

Das Spektrum der Sonnenstrahlung wird eingeteilt in ultraviolette Strahlung – UV (100-400 nm), sichtbare Strahlung – VS (400-780 nm) und infrarote Strahlung – IR (780-3500 nm) (LITYŃSKA *et al.*, 2002). Die totale solare Strahlung – TSS setzt sich aus der Summe von UVB, UVA und VIS zusammen (GRANT *et al.*, 2002).

UV-Strahlung wird in UVC (< 280 nm), UVB (280-315 nm) und UVA (315-400 nm) unterteilt. Folgende Eigenschaften nehmen Einfluss auf die UV-Strahlung an der Erdoberfläche:

- i) Solare Aktivität,
- ii) Distanz der Erde zur Sonne,
- iii) optische Weglänge durch die Atmosphäre beeinflussbar durch:
 -) den Solaren-Zenitwinkel (geographische Position, Datum, Uhrzeit),
 -) die geographische Höhe,
 -) Absorption durch Ozon,
 -) Absorption durch Wolken,
 -) Absorption und Streuung an Luftmolekülen,
 -) Streuung und Absorption durch Aerosole.
- iv) und Albedo (Reflexionen an der Erdoberfläche).

Die UVC-Strahlung wird von Sauerstoff-, Ozon- und Stickstoffmolekülen in der oberen Atmosphäre absorbiert (LITYŃSKA *et al.*, 2002). 90 % des atmosphärischen Ozons befinden sich in der Stratosphäre 10 bis 50 km über der Erdoberfläche. Die restlichen 10 % des atmosphärischen Ozons sind in der darunterliegenden Troposphäre zu finden, welche die unterste Schicht der Erdatmosphäre darstellt (JORDAN, 2017).

Die UVB-Strahlung wird von der Ozonschicht in der Stratosphäre und vom Ozon in der Troposphäre stark absorbiert, weshalb nur geringe Anteile der UVB-Strahlung die Erdoberfläche erreichen können.

Die UVA-Strahlung wird schwächer vom Ozon absorbiert als die UVB-Strahlung, sodass vor allem UVA-Strahlung an die Erdoberfläche gelangen kann und biologische Effekte wie die

Alterung, Selbst-Reparatur und den Schutz der Haut beeinflusst (LITYŃSKA *et al.*, 2002).

In der Abb. 1 wird im Sonnenspektrum der Verlauf der extraterrestrischen Strahlungsintensitäten bei einer Luftmasse von 0 (AM0) bzw. einer Strahlung ohne Abschwächung durch die Atmosphäre mit den Strahlungsintensitäten bei einer Luftmasse von 1,5 (AM1,5), einer Strahlung mit einem Einfallswinkel von 48° bezogen auf die Senkrechte, in Abhängigkeit von der Wellenlänge verglichen. Das Maximum der Strahlungsintensitäten beim idealen Schwarzkörper mit 5900 K, welche der Temperatur auf der Sonnenoberfläche entspricht, befindet sich bei 500 nm und ist deutlich höher als das Maximum der terrestrischen Sonnenstrahlung. Die extraterrestrische Sonnenstrahlung ähnelt in ihrem Verlauf und Höhepunkt dem idealen Schwarzkörper. Das Maximum der terrestrischen Sonnenstrahlung ist in den langwelligeren Bereich bei 600 nm verschoben.

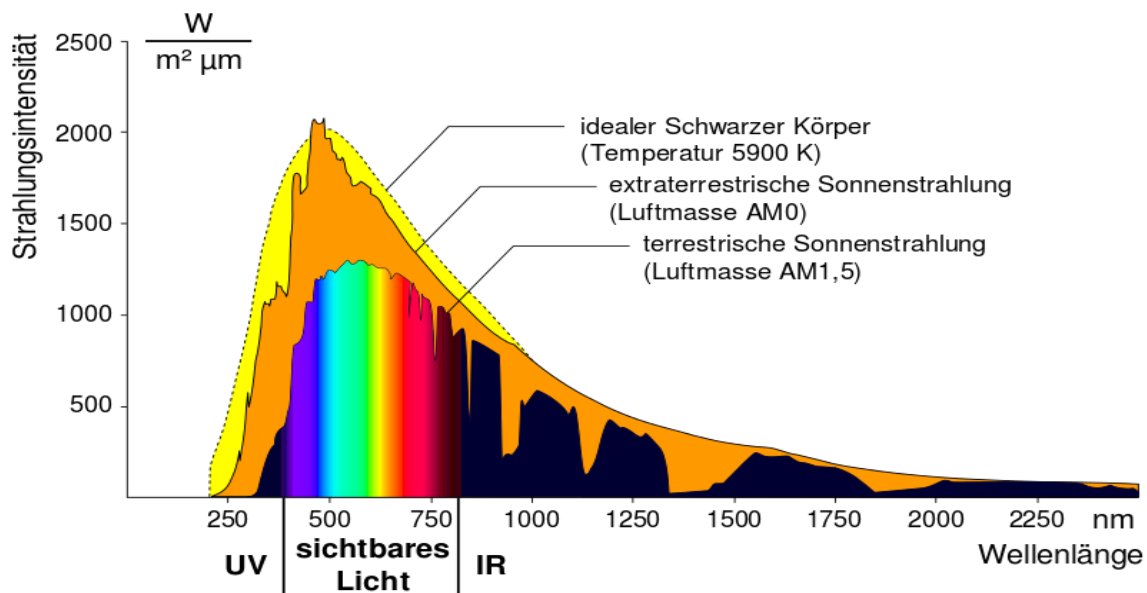


Abb. 1: Sonnenspektrum
(aus Wikipedia, 2018).

2.1.2 UV-Verteilung im Himmel

Die eintreffende Strahlung auf der Erdoberfläche wird als Globalstrahlung bezeichnet und kann in direkte und diffuse Strahlung unterteilt werden (SCHAUBERGER, 1992):

- Direkte Strahlung („Sonnenstrahl“) erreicht die Erdoberfläche fast ohne Streuung.
- Diffuse Strahlung („Himmelsstrahlung“) entsteht durch die Streuung an den Molekülen und Aerosolen der Atmosphäre und aufgrund der Streuung und Transmission durch die Wolken (GRANT *et al.*, 1997). Zieht man den Beitrag der diffusen Strahlung von der Globalstrahlung

ab, erhält man die direkte Strahlung. Das Verhältnis dieser beiden Strahlungsarten ist nicht konstant. Beeinflusst wird das Verhältnis von der Wellenlänge, Sonnenhöhe, Wolkenmenge und deren räumlichen Verteilung, Aerosolen, Oberflächenalbedo und vom Gesamtzongehalt.

Die Abbildung 2 zeigt das Verhältnis zwischen diffuser und globaler erythemgewichteter UV-Bestrahlungsstärke am 30. Juni 2018 in Wien (48 ° N, 16 ° O), Österreich, wo die Sonnenhöhe mittags 65 ° erreicht. Erkennbar ist die Abnahme des relativen Anteils der diffusen Strahlung zu Mittag und die erneute langsame Zunahme am Nachmittag bis hin zum Abend. Die verwendeten Breitbandmessgeräte zur Messung der UV-Bestrahlungsstärke mit und ohne Schattenband sind ebenfalls in Abb. 2 dargestellt (SCHMALWIESER, 2020).

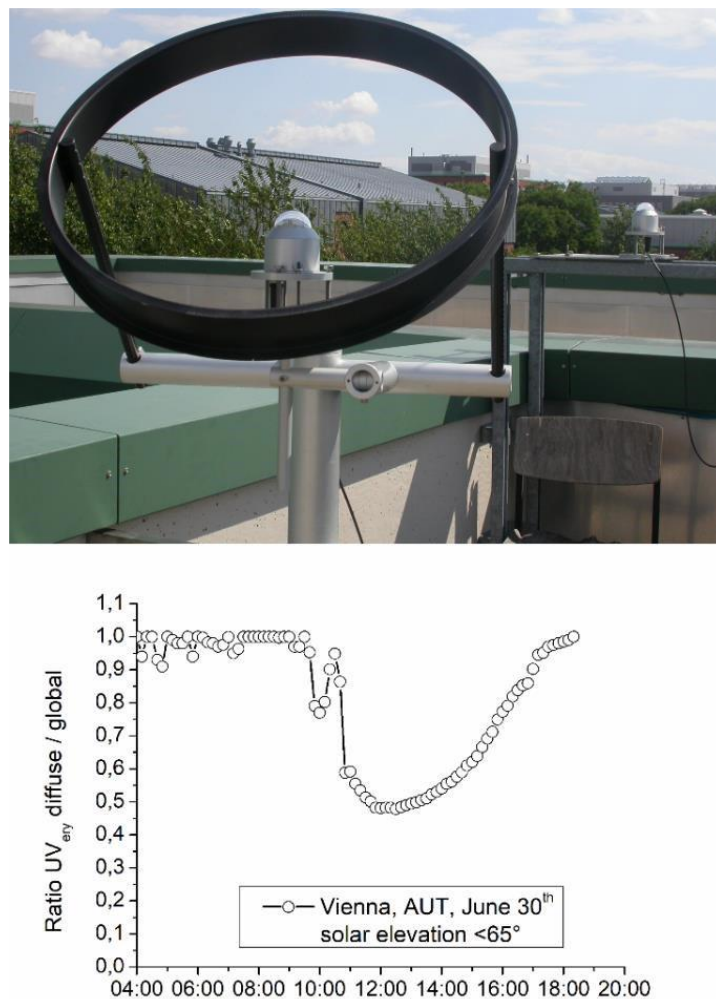


Abb. 2: Breitbandmessgeräte zur Messung der UV-Bestrahlungsstärke mit und ohne Schattenband (oben) und das Verhältnis zwischen diffuser und globaler erythemgewichteter UV-Bestrahlungsstärke an einem Sommertag mit unterschiedlicher Bewölkung in Wien, Österreich (unten).

(aus SCHMALWIESER, 2020).

c) Die zirkumsolare Strahlung stellt jene Strahlung dar, die aus der Vorwärtsstreuung in Sonnenscheibennähe entsteht (SCHAUBERGER, 1992). Aufgrund des längeren Wegs der Strahlung durch die Atmosphäre tritt die Horizontverdunkelung auf, welche das Ergebnis einer stärkeren Abschwächung der kurzwelligen Strahlung (UV) als der langwelligen Strahlung (VIS, IR) ist. Messungen belegen, dass der Anteil der diffusen solaren UV-Strahlung an der gesamten UV-Strahlung bei wolkenlosem Himmel über 50 % ausmacht, wie auch in der Abb. 2 zu erkennen ist. Je größer der Zenitwinkel ist, desto höher wird dieser Anteil. Im Gegensatz dazu ist im VIS und IR der diffuse Anteil an der Gesamtstrahlung deutlich geringer und weniger stark von der Sonnenhöhe abhängig (IRELAND und SACHER, 1996).

2.1.3 Bewölkung

Dünne Wolken reduzieren die Intensität der direkten UV-Strahlung an der Erdoberfläche und verstärken die Umwandlung der direkten in diffuse UV-Strahlung, sodass die Globalstrahlung (Summe beider Bestandteile) nur geringfügig verringert wird. Bei dickeren Wolken werden die diffusen Anteile der UV-Strahlung zur Erdoberfläche nur mehr teilweise transmittiert, wodurch sich insgesamt die Globalstrahlung auf der Erde stark reduziert.

Den Einfluss der Bewölkung im Vergleich zur Seehöhe kann man in einer Studie von SCHMALWIESER *et al.* (2019) leicht nachvollziehen. Obwohl die UVA-Strahlung pro 1000 m Höhe um 8 bis 9 % zunimmt, wurden im Sommer annähernd gleiche Werte bei den Messstationen in Wien (153 m asl) und am Berg Gerlitz (1540 m asl) gemessen. Dies lässt sich auf die schwache Bewölkung im Sommer in Wien zurückführen (SCHMALWIESER *et al.*, 2019).

Wolken können die diffuse UV-Strahlung durch Streuung und Reflexion der UV-Strahlung kurzzeitig erhöhen (LITYŃSKA *et al.*, 2002; SIMIC *et al.*, 2011). In einer Studie von SANDMANN und STICK (2014) wurden Messungen der Bestrahlungsstärken an einer Küstenregion unter klarem Himmel und minimaler Bewölkung durchgeführt, um die Verteilung der Strahldichte über der oberen Hemisphäre zu berechnen. Diese Messungen wurden im Sommer zum Zeitpunkt des höchsten Sonnenstandes durchgeführt. Repräsentativ für UVB wurden 307 nm, für UVA 350 nm und für das sichtbare Spektrum (VIS) 550 nm angenommen. Als besonderes Merkmal der Atmosphäre der untersuchten Küstenregion wurden wenige Aerosole und dünne Wolken festgestellt, die zu vermehrten Anteilen der diffusen UV-Strahlung führten.

Die Abb. 3 und 4 stellen die Verteilungen der Strahldichte gemessen mit einer all-sky camera

bei klarem Himmel (Abb. 3) und bei leichter Bewölkung (Abb. 4) in $\text{mW m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$ dar. Die kleinen Punkte repräsentieren die Messpunkte und der dicke Punkt zeigt die Sonnenposition an. Gleiche Messwerte wurden anhand von Isolinien gekennzeichnet. a) stellt mit 550 nm das VIS dar, b) repräsentiert mit 350 nm UVA und c) wird mit 307 nm für UVB dargestellt. Grau schattiert sind jene Bereiche mit $\geq 70 \text{ mW m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$ bei 550 und 350 nm und bei 307 nm sind es jene Bereiche mit $\geq 10 \text{ mW m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$. Die wahre Sonnenzeit (TST), der Sonnenzenitwinkel (SZA) und der Sonnenazimutwinkel (SAA) stellen jeweils Mittelwerte über die Messdauer dar. In der Abb. 1 sind die Bestrahlungsstärken des VIS und der UVA-Strahlung deutlich größer als die UVB-Strahlung. Dieses Verhältnis wird auch bei leichter Bewölkung in der Abb. 4 beibehalten, jedoch wurden aufgrund der Mie-Streuung der Wolken größere Bestrahlungsstärken als bei einem klaren Himmel gemessen (SANDMANN und STICK, 2014).

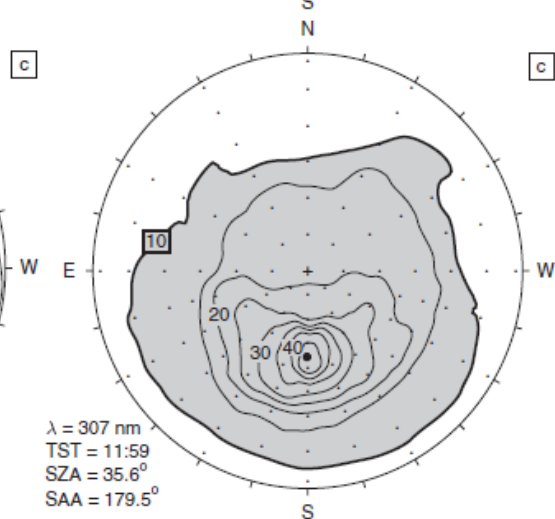
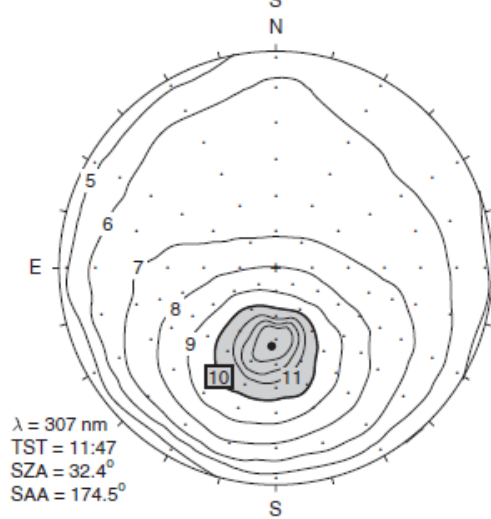
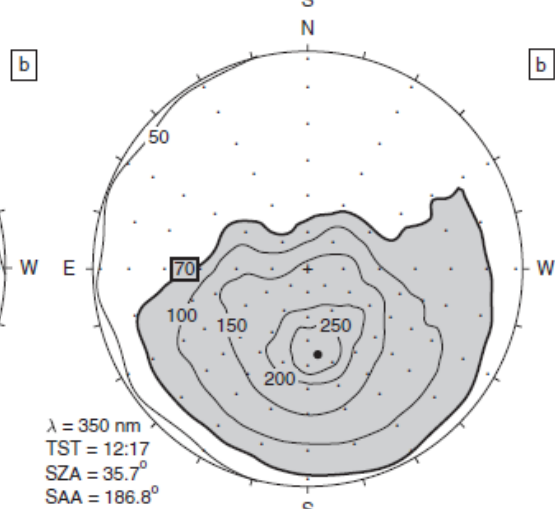
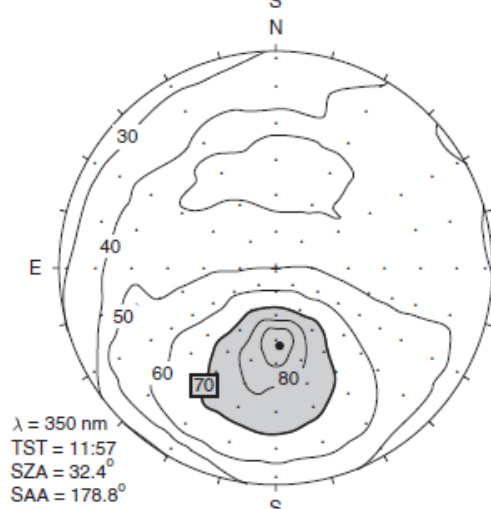
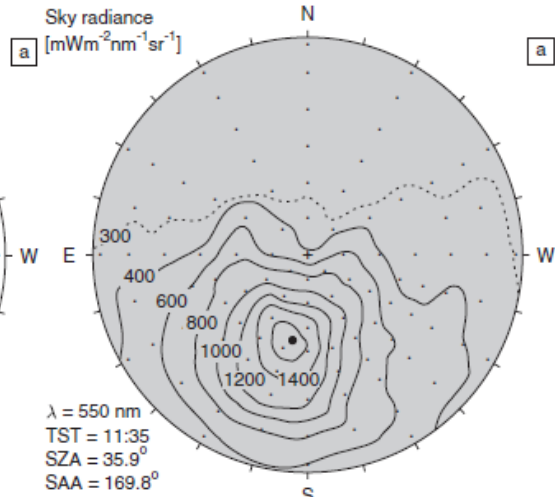
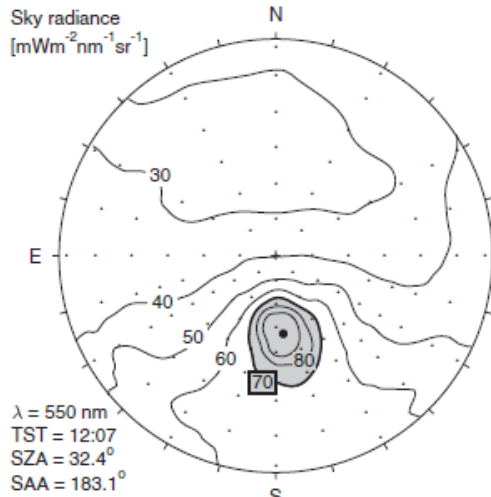


Abb. 3: Himmelsstrahlung bei klarem Himmel Abb. 4: Himmelsstrahlung bei leicht bewölktem Himmel

(aus SANDMANN und STICK, 2014).

(aus SANDMANN und STICK, 2014).

2.1.4 Einfluss von Bäumen auf die UV-Strahlung

Bäume und deren Blätter absorbieren UVB-Strahlung stärker als UVA und TSS. Dadurch verringert sich der Anteil der UVB- und UVA-Strahlung relativ zur TSS, weil sich die TSS aus der Summe von UVB, UVA und VIS zusammensetzt (GRANT *et al.*, 2002). Unterschiedliche Studien zur spektralen Extinktion, Reflexion und Transmission von Baumblättern stellen fest, dass unabhängig von der Baumart etwa 90-95 % der UV-Strahlung absorbiert, 5-9 % reflektiert und < 0,1 % durch die Blätter transmittiert werden (YANG *et al.*, 1994; GRANT *et al.*, 2003; QI, Y.; HEISLER, G.M.; GAO, W.; VOGELMANN *et al.*, 2010). Eine Studie von GRANT *et al.* (2003) belegt, dass die UV-Reflexion an der Blattoberfläche mit Filament- oder Plattenwachstum größer ist als die UV-Reflexion an Blättern mit glatter Oberfläche. Dabei ist der Durchmesser, die Form und die Verteilung der Oberflächenstruktur der Blätter ausschlaggebend.

Eine Studie von TEDORE und NILSSON (2019) belegt, dass die entstehenden Kontraste zwischen den oberen und unteren Blattoberflächen durch die UV-Strahlung stärker hervorgehoben werden als im sichtbaren Bereich. Dies verbessert die Wahrnehmung der Silhouetten von Blättern und Blatträndern, sowie auch das Erkennen der Geometrie der Vegetation. Die Vögel können dadurch effizienter durch Baumkronen navigieren, um Beute zu lokalisieren, sich zu verstecken oder eine geeignete Stelle zum Nestbau und zur Eiablage zu finden.

Mit der Blattreife nimmt das spektrale Reflexionsvermögen und die Durchlässigkeit für UV-Strahlung ab und die Absorption der UV-Strahlung zu. Fertig entwickelte Blätter weisen das höchste Absorptionsvermögen für UV-Strahlung auf. Bis zur Endreife zwischen April und Juli erhöhen sich der Blattchlorophyllgehalt, die Blattdicke und die UVB-absorbierenden Bestandteile, hauptsächlich Flavonoiden und ähnliche Phenolverbindungen. Die Blattdicke und die Flavonoide stellen die wichtigsten Prädiktoren für das UVB-Reflexionsvermögen dar (QI *et al.*, 2003; SCHMALWIESER *et al.*, 2018).

Der Abstand der Blätter zum Boden und die Blattdichte sind ausschlaggebend für die Intensität der auf die Erdoberfläche auftreffenden UV-Strahlung. Zum Beispiel transmittieren niedrige Bäume mit einem großen Baumkronenvolumen wie der Mangobaum weniger UV-Strahlung bei gleicher Schattenfläche als die Königinblume.

Die UV-Strahlung im Schatten der Bäume ist vom Sonnenstand abhängig, weil dadurch unterschiedliche Intensitäten an UV-Strahlung die Erdoberfläche erreichen können (BHOUMICK *et al.*, 2009; SCHMALWIESER *et al.*, 2018).

Vögel sind somit nicht nur verschiedenen Lichtverhältnissen auf baumlosen und baumreichen Flächen ausgesetzt, sondern auch unter Baumkronen. Die Lichtverhältnisse unter der Baumkrone sind abhängig vom Baumtyp und der Jahreszeit, sowie von der Bewegung der Blätter durch den Wind, was zu einer entsprechenden Anpassung des Sehens bei Vögeln geführt hat, um diesen wechselhaften Veränderungen gerecht zu werden.

2.2 Bedeutung von UV-Strahlung für Vögel

2.2.1 Sehfeld im Vergleich

JONES *et al.* (2007) beschreiben den Schwinkel einer Taube, *Columbidae*, mit bis zu 300 °, wobei das Sehfeld des schärfsten Sehens nur 24 ° der 300 ° beträgt. Bei Raubvögeln, *Falconidae*, beträgt das Sehfeld 150 ° und das Sehfeld des schärfsten Sehens beträgt zwischen 60 ° und 70 °. Ein großes Sehfeld dient zur Lokalisation von Bewegungen der Angreifer, ein kleineres Sehfeld mit überlappenden Sehfeldern ermöglicht ein dreidimensionales Sehen und ist insbesondere bei der Jagd und zum Umgreifen der Beutetiere bedeutsam (JONES *et al.*, 2007). Dementsprechend entwickelten sich bei Vögeln den Verhaltensweisen bei Nahrungssuche, Jagd, Flucht oder Abwehr angepasste Sehfelder.

2.2.2 Grundlagen des Sehens beim Vogel

Das Sehen wird Vögeln durch sechs verschiedene Photorezeptorentypen ermöglicht, bestehend aus Stäbchen, vier Zapfenarten und Doppelzapfen (zwei Zapfen mit entweder gleichen oder unterschiedlichen Absorptionsmaxima) (HART, 2001). Die Sehspanne reicht bei Vögeln von 300 nm bis 700 nm (BENNETT und THERY, 2007; HART, 2001). Zur Wahrnehmung des UV-Lichts muss das Auge einerseits UV-empfindliche (UVS) Photorezeptoren aufweisen und es sind okulare Medien mit der Fähigkeit zur UV-Transmission notwendig (NORREN und VOS, 1974). Die okularen Medien Hornhaut, Linse, Wasser- und Glaskörperflüssigkeit absorbieren bereits einen Teil der kurzwelligen UV-Strahlung und reduzieren somit den auf die sensiblen visuellen Pigmente auftreffenden Anteil der UV-Strahlung in Intensität und Wellenlänge (e.g. OLSSON *et al.*, 2016). Die visuelle Empfindlichkeit der Photorezeptoren gegenüber UV-Licht wird durch den Transmissionsgrad des Auges (OMT) durch die okularen Medien bestimmt.

OMT gibt jene Wellenlänge $\lambda_{T0.5}$ an, bei der 50 % des einfallenden Lichts transmittiert werden. Je langwelliger $\lambda_{T0.5}$ ist, desto weniger UV-Licht transmittiert auf die Netzhaut (HART, 2001; LIND *et al.*, 2013).

In einer Studie von OLSSON *et al.* (2021) wurden die Durchlässigkeiten der Augenmedien gegenüber kurzwelliger UV-Strahlung gemessen. Dabei wurde festgestellt, dass die Linsen $\lambda_{T0.5}$ Werte zwischen 315 und 400 nm variieren und somit im Vergleich zu den Cornea $\lambda_{T0.5}$ Werten, welche sich nur zwischen 300 und 345 nm unterscheiden, neben der Augengröße den limitierenden Faktor für den OMT darstellen. Die Wissenschaftler/innen vermuten, dass die großen Unterschiede in den Linsen aufgrund von Pigmentation entstehen, die dem Schutz vor UV-Schäden und einer chromatischen Aberration dienen.

2.2.3 Spektrale Empfindlichkeiten der Photorezeptoren

Die spektrale Empfindlichkeit der UV-empfindlichen Photorezeptoren ist von der Augengröße abhängig und somit artspezifisch (HART, 2001; ÖDEEN und HÅSTAD, 2013). In den Augen der UV-empfindlichen (UVS) Vögel weisen die UV-empfindlichen Photorezeptoren ein Empfindlichkeitsmaximum ($\lambda_{\max}$) zwischen 355 nm und 380 nm auf, bei den violett-empfindlichen (VS) Vögeln liegt dieses zwischen 400 nm und 425 nm (*e.g.* OLSSON *et al.*, 2016; LIND *et al.*, 2013; HART und HUNT, 2007).

Die $\lambda_{\max}$ wird mit Hilfe der Mikrospektrophotometrie (MSP) (JANE und BOWMAKER, 1988) untersucht oder aus der gesamten DNS (*e.g.* WILKIE *et al.*, 2000) abgelesen. Anhand der DNS bzw. MSP-Ergebnisse ergeben sich Rückschlüsse auf die Wellenlängen eines optischen Systems oder auf die Unterscheidbarkeit von Farben bei den einzelnen Tierarten und -rassen (VOROBYEV und OSORIO, 1998; ENDLER und MIELKE, 2005). Darauf aufbauend lassen sich Verhaltensstudien erstellen, um die Auswirkungen eines optischen Systems und deren funktionelle Bedeutung zu untersuchen (O'DANIELS *et al.*, 2017).

2.2.4 UVS- und VS-Sehen bei Vögeln mit Bezug zur Augengröße

Die evolutionäre Entwicklung des UVS- und VS-Systems bei Vögeln ist noch ungeklärt (ÖDEEN und HÅSTAD, 2013; LIND und DELHEY, 2015), jedoch wurde bereits nachgewiesen, dass UVS-Zapfen überwiegend bei Vögeln mit relativ kleinen Augen vorkommen (LIND *et al.*, 2013). Eine Studie von Lind *et al.* (2013) belegt, dass der OMT mit

der axialen Länge des Auges korreliert. Da $\lambda_{T0.5}$ in kürzeren Augen kleiner ist als in längeren, fällt mehr kurzwelliges Licht auf die Netzhaut und somit ist eine hohe UV-Empfindlichkeit der UVS-Zapfen nur bei Vögeln mit kleinen Augen sinnvoll (LIND *et al.*, 2013).

2.2.5 Farbwahrnehmung

Die Kombinationen aller Photorezeptoren und deren Farbeindrücke beim Vogel werden von EVANS *et al.* (2006) eingeteilt:

Primärfarben: UV, Blau, Grün, Rot

Sekundärfarben (Farben aus je zwei Primärfarben): UV-Blau, UV-Grün, UV-Rot, Blau-Grün, Blau-Rot, Grün-Rot

Tertiärfarben (Farben aus je drei Primärfarben): UV-Grün-Rot, UV-Blau-Grün, UV-Blau-Rot, Grün-Blau-Rot

Weiß/Grau: alle vier Photorezeptortypen werden gleich stark stimuliert

Schwarz: kein Photorezeptor wird stimuliert

UV und Farbkombinationen mit UV können technisch nicht realisiert werden oder dieser Farbeindruck ist für den Menschen nicht nachvollziehbar (*e.g.* STEIGERWALD, 2006).

Weil die Sekundär- und Tertiärfarben von den Primärfarben abhängig sind, würde die Abwesenheit nur einer Primärfarbe den gesamten Farbeindruck verändern. Daher müssen bei künstlicher Beleuchtung alle Photorezeptoren inklusive der UV-Anteile für eine naturgetreue Farbwahrnehmung der Umwelt stimuliert werden können. Es fehlen jedoch Verhaltensuntersuchungen bei Vögeln, die den Zusammenhang eines unvollständigen Spektrums und dadurch verursachte Verhaltensstörungen bestätigen (BLECHSCHMIDT, 2013).

In der Abb. 5 werden die Farbempfindlichkeiten des Menschen (oben) mit denen von Staren (unten) bei unterschiedlichen Wellenlängen verglichen. Es wurden die Absorptionsmaxima für die Farben Blau (437 nm), Grün (533 nm) und Rot (564 nm) beim Menschen gemessen. Bei den Staren wurden die Absorptionsmaxima für die Farben Ultraviolett (362 nm), Blau (449 nm), Grün (504 nm) und Rot (563 nm) festgestellt. Die Farbempfindlichkeiten der Menschen und Stare unterscheiden sich dahingehend, dass die Rezeptoren der Stare UV

absorbieren und somit auch wahrnehmen können und dem Menschen die Möglichkeit dazu fehlt.

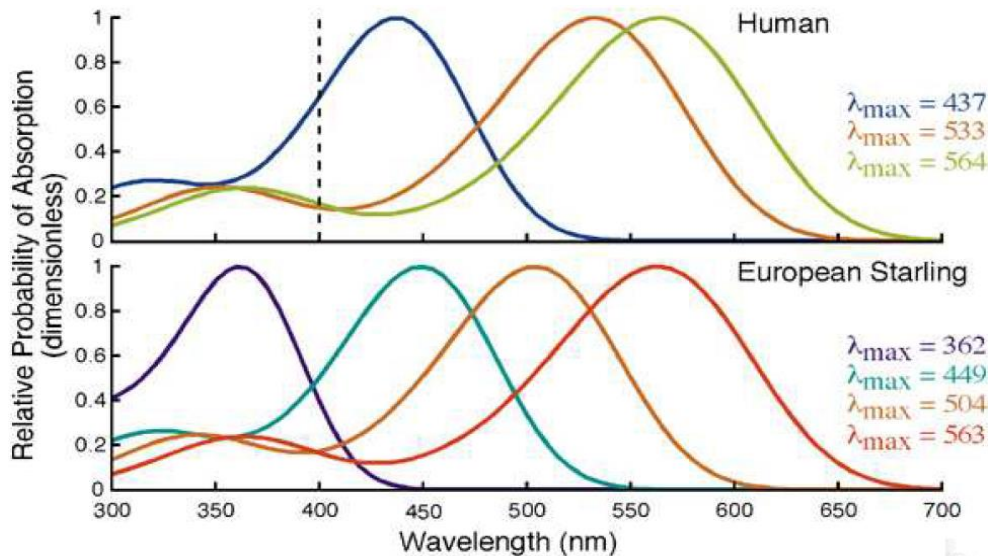


Abb. 5: Farbempfindlichkeiten beim Menschen im Vergleich zum Star

(aus der Lehre der Veterinärmedizinischen Fakultät – Leipzig, 2018).

2.2.6 Von-Kries-Adaptation

Photorezeptoren können sich den Lichtverhältnissen (Tageszeit, konstant bzw. variierend) aktiv adaptieren (LAND und NILSSON, 2012). Untersuchungen des Farbsehens belegen, dass sich die Zapfen selbständig der Hintergrundbeleuchtung anpassen können, was als die nach dem Entdecker benannte Von-Kries-Adaptation bezeichnet wird (KELBER *et al.*, 2003). Durch die Überlappung zweier unterschiedlicher Strahlungsspektren mit unterschiedlichen Empfindlichkeitsmaxima wird nach einem Konditionierungsreiz ein konstanter Farbeindruck erzeugt je nachdem welcher Rezeptortyp mehr gereizt wird. Die Photorezeptoranpassung ist verantwortlich für die Farbkonstanz, indem sie das Erscheinungsbild der Objektfarben unabhängig vom Beleuchtungsspektrum erhält. Daher erscheint beispielsweise eine weiße Karte im Sonnenlicht gleichermaßen weiß wie im grünen Waldlicht (KELBER *et al.*, 2003). Die Rezeptoradaptation und das damit verbundene konstante Farbsehen wirkt sich vorteilhaft auf die Objektklassifizierung und -identifikation aus (OSORIO und VOROBYEV, 2005).

2.2.7 Adaptive Farbdiskriminierung des Vogelauges

Der Farbwahrnehmung liegen die visuellen Pigmente zugrunde, die aus einem am Opsinprotein gebundenen Retinoidchromophor bestehen (YOKOYAMA, 2000). Aufgrund der Lichtabsorption des Chromophors kommt es zur Konformationsänderung (räumliche Strukturänderung eines Proteins) und Initiierung einer Signalkaskade. Die spektrale Empfindlichkeit des visuellen Pigments auf eine bestimmte Wellenlänge ist abhängig von der Aminosäurezusammensetzung des Opsins und der Struktur des Chromophors (YOKOYAMA, 2000; WANG *et al.*, 2014; BRIDGES, 1972). Anhand weiterer Zapfen und deren Rezeptorstimulationen wird die Farbwahrnehmung durch die Farbdiskriminierung der überlappenden Empfindlichkeitsspektren nach dem Prinzip der Von-Kries-Adaptation angepasst (GOVARDOVSKII *et al.*, 2000; DYER, 1999; OSORIO und VOROBIEV, 1998; VOROBIEV, 2003). Vögel sind in der Lage, die spektrale Bandbreite bestimmter Photorezeptoren durch pigmentierte Zapfenöltröpfchen zu verringern, um der Empfindlichkeitsüberlappung zwischen spektral benachbarten Zapfentypen entgegenzuwirken. Die Zapfenöltröpfchen liegen im Lichtweg des Rezeptors und dienen als Filter. Die Filterwirkung verbessert die Farbdiskriminierung und Farbkonstanz (VOROBIEV und OSORIO, 1998; VOROBIEV, 2003). Die Zapfenöltröpfchen enthalten Carotinoide und deren Lichtabsorptionseigenschaften können im Labor mittels Elektronenkonjugationen gut bestimmt werden (GOLDSMITH *et al.*, 1984; CHÁBERA *et al.*, 2009). Vögel können diese Carotinoide nicht selbstständig neu synthetisieren, sondern müssen sie durch die Nahrung aufnehmen (MCGRAW, 2006). Jedoch können sie die Carotinoide metabolisieren, die chemische Konjugation anpassen und somit das Absorptionsspektrum in Richtung lang- oder kurzweiliger Strahlung verschieben (SCHIEDT, 1998; BHOSALE *et al.*, 2007). Im Gegensatz dazu existieren auch Einzelzapfen mit Öltröpfchen, denen das Carotinoid fehlt, wodurch die Zapfen gegenüber dem UV-Licht empfänglich bleiben (LIEBMAN und GRANDA, 1975; GOLDSMITH *et al.*, 1984; HART, 2001; WILBY *et al.* 2015).

Abb. 6 a) zeigt die Darstellung einer Hühnerretina mit den Öltröpfchen der Farben Rot, Grün, Blau und Violett.

Die vier für das Farbsehen der Vögel verantwortlichen Einzelzapfen-Photorezeptoren sind in Abb. 6 b) mit der Position des Öltröpfchens in der Zelle (oben) und einer Veranschaulichung der spektralen Filtergrenzeffekte der Öltröpfchen (unten) zu erkennen. Die T-, C-, Y- und R-Öltröpfchen stellen die verschiedenen Subtypen der Öltröpfchen mit unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten dar. In Abb. 6 sind die spektralen Empfindlichkeiten der

Einzelzapfen-Photorezeptoren von c) Hühnern und d) Zebrafinken mit Filterung durch die Zapfenöltröpfchen (durchgezogene Linie) und ohne diese Filterung (unterbrochene Linie) dargestellt. Als einziger Zapfentyp enthält der SWS1-Zapfen ein transparentes Öltröpfchen. Somit hängt die kurzwellige Filterung des SWS1-Zapfens nur mehr von den Okularmedien ab (LIND *et al.*, 2013).

Überraschenderweise haben Eulen die SWS1-Genexpression evolutionsbedingt vollständig verloren, aber aufgrund der niedrigen $\lambda_{T0.5}$ Werte und der erhöhten UV-Sensitivität der Stäbchen können sie dennoch UV-Strahlung wahrnehmen (HÖGLUND *et al.*, 2019).

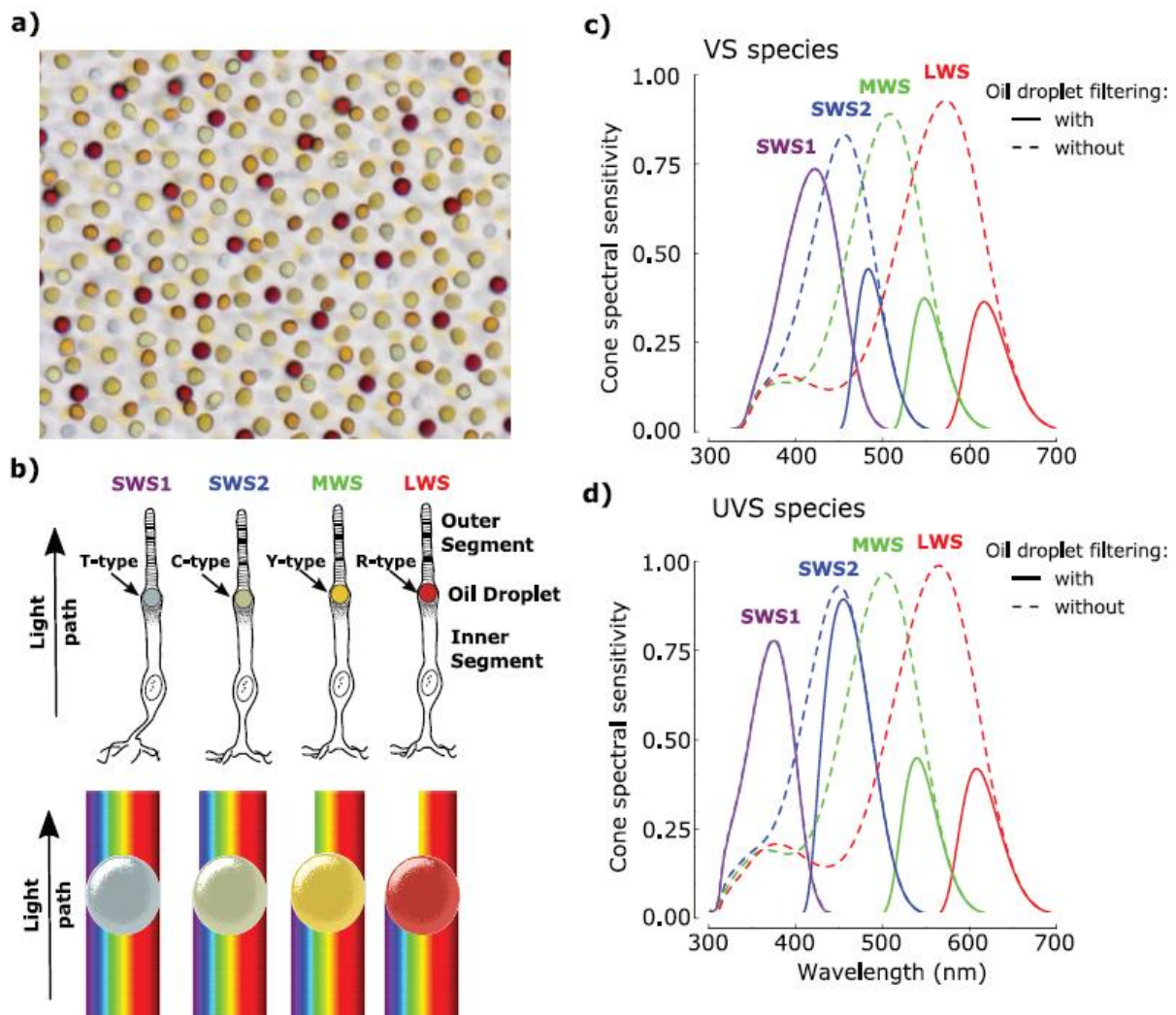


Abb. 6: a) Öltröpfchen in der Hühnerretina; b) Einzelkegel-Photorezeptoren und c) deren Empfindlichkeiten bei VS- und d) UVS-Spezies

(aus TOOMEY *et al.*, 2016).

2.2.8 Unstimmigkeiten von UV-Strahlung als Magnetkompass bei Vögeln

Vögel orientieren sich am Erdmagnetfeld. Dabei nutzen sie den axialen Verlauf der Feldlinien und deren Neigung im Raum. Dieser Prozess steht im Zusammenhang mit kurzwelliger Strahlung und dem verantwortlichen Cryptochrom als Rezeptormolekül. Der Chromophor von Cryptochrom, Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD), durchläuft in einem Photozyklus abwechselnd eine Photoreduktion und Reoxidation mit einer Bildung von Radikalpaaren, welche für die Richtungsorientierung entscheidend sind. Vögel besitzen fünf Arten von Cryptochromen in der Netzhaut: Cryptochrom 1a (Cry1a), Cryptochrom 1b, Cryptochrom 2, Cryptochrom 4a und Cryptochrom 4b. Aufgrund der UV-Transparenz und der Lage in den äußeren Kegeln wird Cry1a als wahrscheinlichstes Rezeptormolekül für magnetische Kompassinformationen angenommen (WILTSCHEK et al., 2021).

In neueren Studien wurde diese Annahme jedoch widerlegt, indem Zebrafinken unterschiedlichen Wellenlängen ausgesetzt wurden und es anschließend zu keiner Richtungsänderung gekommen ist, weil die exprimierten Radikalpaare von einem zirkadianen Rhythmus abhängig sind und nicht von äußeren Reizen. Dennoch wird der exklusiven Lage von Cry1a auf den äußeren Kegelsegmenten und deren UV-Transparenz eine bestimmte, jedoch gegenwärtig unbekannte, Bedeutung zugesprochen (PINZON-RODRIGUEZ und MUHEIM, 2021; KAVET und BRAIN, 2021).

2.3 Aspekte für die Vogelhaltung bezüglich UV-Strahlung

2.3.1 Futterauswahl

Je nach Vogelart und Erfahrung des Individuums wird UV-Licht unterschiedlich zur Nahrungsselektion verwendet. In einer Studie wurden wilden Truthühnern, *Meleagris gallopavo*, Abführmittel mit UV-absorbierenden Eigenschaften (0,5-4 % Anthrachinon) zum Futter zugegeben. Bei 75 % bis 98 % der weiblichen- und 78 % bis 99 % der männlichen Truthühner wurde nach der Zugabe Meideverhalten beobachtet. Die Aufnahme von über 200 mg bzw. 100 mg Anthrachinon führte bei den konditionierten Truthühnern dazu, dass sowohl die weiblichen als auch die männlichen Truthühner anschließend Nahrungsmittel mieden, die mit einem UV-absorbierenden Repellent behandelt wurden. Im Unterschied dazu

wurden bei unkonditionierten weiblichen Truthühnern mit dem UV-absorbierenden Repellent behandelte Nahrungsmittel im Vergleich zur unbehandelten Nahrung um 58 % vermehrt aufgenommen. Dies deutet darauf hin, dass unabhängig von der Erfahrung UV-absorbierende Futtermittel bis zum Zeitpunkt des Auftretens negativer Erfahrungen bevorzugt werden (WERNER *et al.*, 2014).

In einer anderen Studie wurde nachgewiesen, dass unkonditionierte Helmspechte, *Dryocopus pileatus*, sich gleichermaßen von UV-absorbierenden und UV-reflektierenden Futtermitteln ernähren. Sie bevorzugten UV-reflektierende, krümelige, alte Kiefersubstrate zur Nahrungssuche gegenüber gesunden und neuen Kiefersubstraten, die weniger UV reflektieren, weil die alten Kiefersubstrate auf das Vorhandensein von Würmern hindeuten. In Anbetracht der Futteraufnahme aus UV-absorbierenden Futtersubstraten wäre eine Interaktion zwischen Spechten und Pilzen aufgrund der UV-absorbierenden Eigenschaften anzunehmen (O'DANIELS *et al.*, 2017).

2.3.2 Partnerauswahl

Bei vielen Vogelarten steht die Gefiederfarbe im starken Kontrast mit der Umgebung. Der Farbenreichtum dient u.a. dazu, Paarungspartner zu finden oder Konkurrenten einzuschüchtern (ANDERSSON und AMUNDSEN, 1997; BENNETT *et al.*, 1997; HUNT *et al.*, 1997; ANDERSSON *et al.*, 1998; BENNETT und CUTHILL, 1994; BENNETT und THÉRY 2007). Zebrafinken und wilde Truthähne zeigen eine Präferenz für stark UV-reflektierende Artgenossen (e.g. HUNT *et al.*, 1997; e.g. HUNT *et al.*, 1999; e.g. HILL *et al.*, 2005). Die UV-Reflexion bei diesen beiden Arten an Gefieder- oder an Integumentmerkmalen signalisiert die männliche Fitness für den Ressourcenerwerb oder die allgemeine Gesundheit (e.g. HILL *et al.*, 2005; SIEFFERMAN und HILL, 2005).

2.3.3 Reflexionsvermögen unterschiedlich gefärbter Federn

Untersuchungen an Nektarvögeln, *Nectariniidae*, zufolge hat Brustgefieder das höchste Reflexionsvermögen und Kappengefieder das geringste. Das Gefieder der weiblichen Vögel hat ein höheres Reflexionsvermögen als das der männlichen Artgenossen. Carotinoid-basierte Farben wiesen die größte Reflexivität auf, gefolgt von den nicht-irisierenden und anschließend von den irisierenden Melanin-basierten Farben. Melanosome bilden, speichern und

transportieren Melanin und sind deshalb für die Farbentstehung verantwortlich. Die Nanostrukturierung der Melanosome beeinflusst das Reflexionsvermögen (SHAWKEY *et al.*, 2017). Natal-Daunenfedern von weißgefiederten Truthühnern weisen unter UVA-Licht eine intensive gelblich-grüne Fluoreszenz auf. Die UVA-Strahlung wird von intakten Federn der weißen Mastputen reflektiert und geschorene Federn zeigen eine im Vergleich zur vorherigen Feder-Generation intensivere UVA-Reflexivität. Die UVA-Strahlung wird von den Bronzetruthühnern auch an den hellen Endnähten der dunklen Körper- und Steuerfedern sowie auch an den hellen Banden der primären und sekundären Schwungfedern reflektiert. Weiße und schwarze Eintagsküken zeigen durch UVA-Strahlung starke Fluoreszenz an den Schuppenplatten der Beine und Zehen. Im höheren Alter der weißen und schwarzen männlichen Truthühner entwickeln sich an der federlosen Kopfregion UVA-reflektierende Anteile (BARTLES *et al.*, 2017).

2.3.4 Eier

Vitamin D regelt u.a. den Phosphor- und Calciumhaushalt im Körper. Für die Eiproduktion muss ein Vogel ungefähr 10 % des körpereigenen Calciums pro Ei aufwenden (*e.g.* DACKER *et al.*, 2015). Um die Eierzeugung zu ermöglichen, behalten reproduktiv aktive Vögel eine Reserve an Calcium innerhalb des Markknochens (*e.g.* HARRISON und LIGHTFOOT, 2006). Nach Bestrahlung der Eier und Küken mit künstlichem UVB- oder Sonnenlicht ist eine Erhöhung der Vitamin-D₃-Menge festzustellen (*e.g.* SCHUTKOWSKI *et al.*, 2013; *e.g.* KÜHN *et al.*, 2014). In Eiern gibt es eine nichtlineare Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen UVB-Expositionsdosis und Gesamtgehalt an Vitamin D (*e.g.* KÜHN *et al.*, 2014). Hühnereier haben nach einer täglichen dreistündigen UVB-Licht Exposition der Eier 4- bis 5-fach höhere Vitamin-D-Mengen im Eigelb als Eier von nicht exponierten, jedoch diätetisch adäquat versorgten Hühnern. Das in der exponierten Haut entstehende Vitamin D₃ wird in den Blutkreislauf überführt und anschließend in das Eigelb als nicht hydroxyliertes Vitamin D₃ gespeichert (*e.g.* SCHUTKOWSKI *et al.*, 2013).

2.3.5 Jungvögel bis hin zu adulten Vögeln

Bei Säugetieren und Vögeln wird das in der Haut enthaltene Provitamin D₃ (7-Dehydrocholesterol) nach der UVB-Bestrahlung zwischen 280 nm und 315 nm zum Prävitamin D₃ umgewandelt und schließlich zum Vitamin D₃ (Cholecalciferol) metabolisiert (*e.g.* DACKÉ *et al.*, 2015; *e.g.* HOLICK *et al.*, 2007). Küken zeigen aufgrund der endogenen Vitamin-D₃-Synthese in der Haut nach einer UV-Exposition insbesondere an ihren nicht gefiederten Beinen vermehrt 7-Dehydrocholesterol (7-DHC) auf (*e.g.* SCHUTKOWSKI *et al.*, 2013; *e.g.* TIAN *et al.*, 1994). Das Prävitamin D₃ wird durch das Blut zur Leber transportiert, wo es zu 25(OH)D₃ umgebaut wird, das als Speicherhormon fungiert und wiederum von der Niere zu Calcitriol 1,25(OH)₂D₃ metabolisiert wird, dem aktiven Hormon, das die Ca-Absorption aus dem Darm und den Knochen fördert (*e.g.* DACKÉ *et al.*, 2015; *e.g.* HOLICK *et al.*, 2007). In einer Studie von SCHAFTENAAR und VAN LEEUWEN (2015) an fünf Störchen der Gattung *Marabus*, von denen zwei Vögel ohne UVB-Strahlung aufwuchsen, zeigten jene mit UVB-Licht bestrahlte Vögel einen höheren Vitamin-D-Plasmaspiegel im Vergleich zu denjenigen ohne UVB-Bestrahlung. Zudem entwickelten sich bei den UVB-unbestrahlten Störchen metabolische Knochenerkrankungen. Da beide Gruppen mit dem Gistocal-Supplement (reich an Vitaminen und Mineralstoffen) und mit einem angenommenen korrekten Ca:P-Verhältnis und ausreichend Vitamin D₃ gefüttert wurden und es trotzdem bei der Gruppe ohne UVB-Exposition zu schweren klinischen Erkrankungen gekommen ist, ist davon auszugehen, dass das Fehlen von UVB-Strahlung die schwerwiegenden Störungen herbeigeführt hatte. Die Knochendeformitäten bei den Störchen ohne UVB-Exposition weisen auf eine Hypovitaminose D hin, welche zu einer unzureichenden Ca-Aufnahme aus dem Darmtrakt, einer Erhöhung der PTH-Produktion und folglich zu einer Zunahme der osteoklastischen Aktivitäten und renalen Ausscheidung von P führte.

Auf die Notwendigkeit von UV-Licht zur Knochenfestigkeit der Hühnerküken bei kurzzeitiger UV-Bestrahlung anstatt reiner oraler Verabreichung wies bereits STEIGERWALD (2006) hin. Weitere Untersuchungen an Löfflern bestätigen die Annahme, dass Nahrungsergänzungen mit Vitamin D₃ unzureichend für einen adäquaten Vitamin-D- und Calcium-Status sind (RICK und WOODHOUSE, 2016).

2.3.6 Schädigungen

In der folgenden Tab. stehen wichtige Eigenschaften und u.a. schädigende Effekte der UV-Strahlung für den Menschen, die auch beim Vogel angenommen werden könnten:

UVA (315-380 nm)	UVB (280-315 nm)
• ~95 % der gesamten UV-Strahlung auf der Erde ist UVA	• ~5 % der gesamten UV-Strahlung auf der Erde ist UVB
• 20-30 % der UVA-Strahlung dringt bis zur Dermis durch, der Rest gelangt nur zur Epidermis	• dringt nur bis zur Epidermis durch
• bewirkt eine schnelle und kurzfristige Pigmentierung	• Verursacht nach 72 Stunden eine langanhaltende Pigmentierung durch Melaninbildung in der Oberhaut
• geringfügig Erythem erzeugend	• stärker Erythem erzeugend als UVA
• schädigt Kollagene, sorgt für verringerte Spannkraft, erhöhte Alterung der Haut und Faltenbildung	• Kanzerogene Wirkung für die Entstehung von Basalzellkarzinomen und Plattenepithelkarzinomen
• schädigt DNA wenig	• schädigt DNA stark

(WIKIPEDIA, 2018; DR. JETSKE ULTEE, 2019)

2.4 Aspekte unterschiedlicher Glastypen und die Beleuchtung bezüglich UV-Strahlung

2.4.1 Einflussfaktor Glas bei behausten Vögeln

Die moderne Glasindustrie stellt Glastypen mit unterschiedlicher Absorption von UVA- und UVB-Strahlung her. Das Transmissionsvermögen von Glas wird beeinflusst durch Art, Farbe, Dicke, Anzahl der Schichten und Beschichtung. Klares Fensterglas ist transparent und farblos (TUCHINDA *et al.*, 2006). Mit 74,3 % zeigt es das höchste Transmissionsvermögen für UV-Strahlung (DUARTE *et al.*, 2009). Verbundglas besteht aus zwei Glasschichten mit einer dazwischen liegenden Kunststoffschicht aus Polyvinylbutyral (PVB), das bei Brüchen des

Glas es dieses zusammenhält und so das Splittern der Glasstücke verhindert, weshalb PVB auch bevorzugt in der Fahrzeugindustrie verwendet wird. PVB absorbiert etwa 99 % der UV-Strahlung, ohne die Transmission für sichtbares Licht zu verringern. Gehärtetes Glas entsteht aus erhitztem und wieder abgekühltem Glas. Beim Bruch zersplittert es in sehr kleine und unscharfe Stücke. Die Dicke des Glases trägt eine geringere Bedeutung für die Transmission der UV-Strahlung als die Art, Farbe, Anzahl der Schichten und der Beschichtung selbst (TUCHINDA *et al.*, 2006).

In Abb. 7 ist die Transmission von verschiedenen Glasarten bei unterschiedlichen Wellenlängen dargestellt. Reflektierende Metalloxide verursachen eine erhöhte Reflexion der UV-Strahlung und des visuellen Lichts. Die Low-E-Variante (Low-emissivity) hat zwischen den antireflektierenden Metallschichten eine mikroskopisch dünne Schicht aus Silber und ermöglicht dadurch die Transmission des sichtbaren Lichtspektrums und verringert gleichzeitig den transmittierten Anteil an UV-Strahlung.

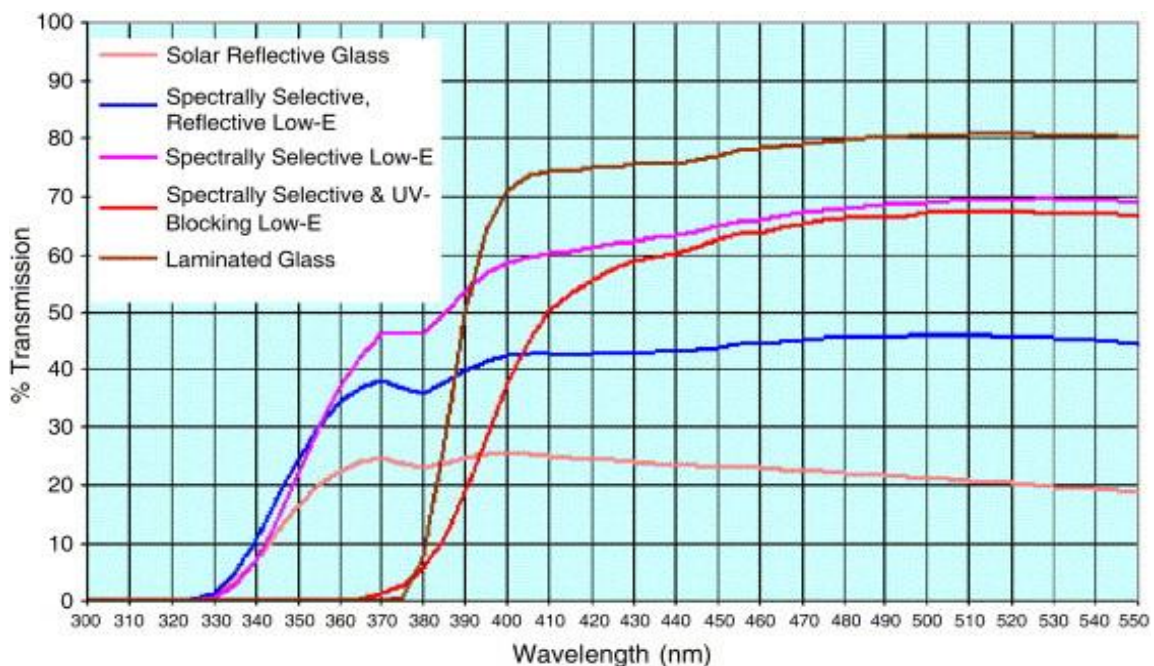


Abb. 7: UV-Strahlung und kurzwelliges Licht (300-550 nm) und deren Transmission bei verschiedenen gewöhnlichen Glasarten (Daten von Guardian Industries Corp, Auburn Hills, Mich)

(aus TUCHINDA *et al.*, 2006)

Glas mit speziellen farbigen Komponenten kann bis zu 50 % des einfallenden Lichts absorbieren und die Menge an transmittiertem UV- und sichtbarem Licht stärker reduzieren als unbehandeltes Glas (TUCHINDA *et al.*, 2006). Blaues Glas transmittiert mit 56,8 % den größten Anteil der UV-Strahlung (DUARTE *et al.*, 2009). Grünes Glas blockiert die UV-

Strahlung vollständig und gelbes Glas transmittiert nur 1,3 % der UVA-Strahlung, wofür die tönenden Pigmente verantwortlich sind. Farbige Additive wie Fe^{3+} , das zu einer bräunlich-gelben Färbung führt, und Mischungen aus Fe^{3+} und Fe^{2+} , die wiederum eine grüne Farbe erzeugen, werden bei der Glasherstellung verwendet. Das Fe^{2+} -Ion wirkt dabei im Infrarot-Bereich und absorbiert die langwellige Strahlung während Fe^{3+} im UV-Spektrum die kurzwellige Strahlung absorbiert. Daher ist die Verringerung der Transmission von UVA-Strahlung bei Glas mit alleinigem Fe^{3+} wirksamer (DUARTE *et al.*, 2009).

Abb. 8 zeigt die spektrale Transmission von gewöhnlichem Glas, sowie mit verschiedenen additiven Farbzusätzen und unterschiedlichem Eisengehalt. Ein geringerer Eisengehalt führt mit 80% Transmission zur höchsten Transmission für UV-Strahlung. Mit 76% Transmission der UV-Strahlung liegt unbehandeltes Fensterglas an zweiter Stelle. Grüne Farbzusätze verringern die Transmission von UV-Strahlung auf 60%. Blaues Glas weist eine Transmission für UV-Strahlung mit 55% auf. Ein hoher Eisengehalt hat mit 53% die niedrigste Transmission im UV.

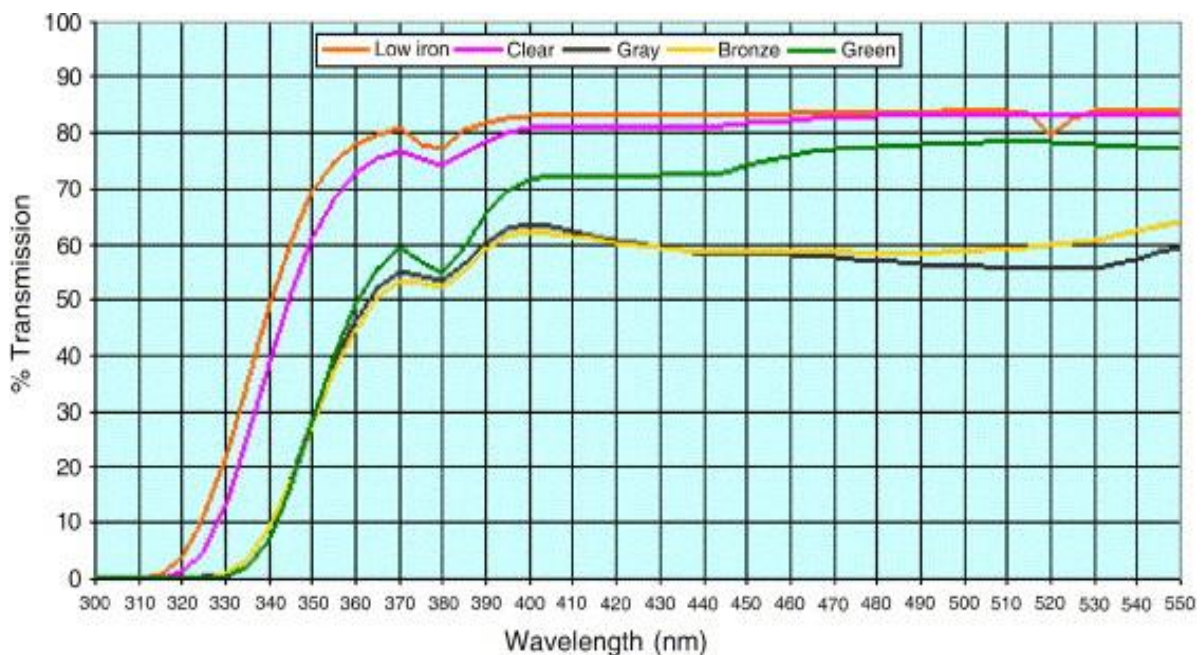


Abb. 8: Transmission von UV-Strahlung und kurzwelliges Licht (300-550 nm) bei gewöhnlichem Glas und verschiedenen Farben (Daten von Guardian Industries Corp, Auburn Hills, Mich)
(aus TUCHINDA *et al.*, 2006)

Bei gewöhnlichem Glas, Verbundglas und bei gehärtetem Glas wird die UVB-Strahlung vollständig absorbiert (KULLAVANIJAYA und LIM, 2005).

2.4.2 Beleuchtung durch künstliches Licht

Bei Störungen der natürlichen Lichtverhältnisse können sich bei Vögeln Verhaltensstörungen wie Federrupfen, erhöhte Aggression (Schreien, Beißen), Panikattacken, Müdigkeit oder Unruhe, physische Konsequenzen wie Mauser- oder Fruchtbarkeitsprobleme und folglich Unfruchtbarkeit oder Legenot entwickeln. Davon sind vor allem äußerst flugaktive Arten betroffen, die sich im natürlichen Habitat bei intensiven und variierenden Lichtbedingungen mit rascher Hell-Dunkel-Adaptation unter den Baumkronen bewegen. Weniger flugaktive Vögel wie Hühner leben hingegen unter Lichtbedingungen ohne große Schwankungen, weil das Blätterdach im natürlichen Habitat große Anteile der kurz- und langwelligen Strahlung absorbiert. Vögel haben eine höhere Einzelbildauflösung als der Mensch. Bei einer Flickerfrequenz zwischen 100 und 120 Hz tritt bei ihnen der Stroboskopeffekt ein. Zusammenfassend muss für eine artgerechte Haltung die Dauer, Übergangsphase (Tag-Nacht), Intensität, Kontinuität (kein Flackern) und das Farbspektrum der künstlichen Beleuchtung an die jeweilige Art angepasst werden (BLECHSCHMIDT, 2013).

Nach STEIGERWALD (2006) sollten für die richtige Beleuchtung in Räumen mit Vögeln folgende Maßnahmen getroffen werden:

- Das Licht umfasst das gesamte sichtbare Spektrum des Vogels und hat mindestens eine Wellenlänge von 360 nm.
- Eine Dämmerungsphase sollte vor der Einleitung der Dunkel- oder Helligkeitsphase nach zwölf Stunden stattfinden.
- Ein stark gedimmtes Nachtlicht dient Sperlings- und Papageienvögeln zur nächtlichen Orientierung.
- Kunstlicht muss kontinuierlich emittiert werden.
- Ein Fernseher oder PC-Monitor in einsehbarer Nähe zum Vogelkäfig wird aufgrund des Stroboskopeffekts als tierschutzwidrig betrachtet.

3 Materialien und Methoden

3.1 Messzeitraum

Die Messstation der Veterinärmedizinischen Universität Wien sammelt seit 1996 UVA, UVB und TSS Messdaten, von denen jene Daten im Zeitraum vom 1.7.2013 bis 30.6.2018 für diese Diplomarbeit analysiert wurden.

3.2 Stationsbeschreibung

Station: Veterinärmedizinische Universität Wien, Veterinärplatz 1, 1210 Wien

Länge: 48 ° 15,7 ' N

Breite: 16 ° 25,98 ' O

Seehöhe: 153 m asl

(SCHMALWIESER, 2016).

3.3 Messgeräte

3.3.1 Allgemein:

Die Messgeräte werden einmal pro Jahr recalibriert und dreimal jährlich auf Funktionstüchtigkeit und Feuchtigkeit überprüft bzw. mit Trockenmitteln ausgestattet.

Aus den Primärdaten werden UVA-, UVB- und TSS-Minuten-, Zehnminuten- und Stunden-Mittelwerte sowie auch Tagesdosen und Tageshöchstwerte berechnet. Die UVA-, UVB- und TSS-Zehnminutenmittelwerte werden an die Medizinische Universität Innsbruck gesendet und dort bearbeitet auf der Website <http://www.uv-index.at> veröffentlicht.

3.3.2 UVA-Sensor mit und ohne Schattenband:

Typ: J033 von CMS-Schreder (6322 Kirchbichl, Österreich)

Seriennummer: 9822 und 9823

Kalibrierfaktor: $34,059 \text{ [mW/m}^2\text{]/[V]}$ und $32,010 \text{ [mW/m}^2\text{]/[V]}$ beim UVA Sensor mit Schattenband

Das Schattenband wird ein- bis zweimal pro Woche nachjustiert.

Richtungsempfindlichkeit: Maximale Abweichungen von 5 % des idealen Cosinus

Umgebungstemperatur: -40 bis 50 °C



Abb. 9: UVA-Sensoren auf der Messplattform

(aus SCHMALWIESER, 2020)

Abb. 9 zeigt zwei UVA-Sensoren, wobei der vordere UVA-Sensor zusätzlich von einem Schattenband umgeben ist.

3.3.3 UVB-Sensor mit und ohne Schattenband:

Das Messgerät misst die erythemgewichtete UV-Strahlung. Die erythemgewichtete UV-Strahlung kann als Proxy bzw. Stellvertreter für UVB-Strahlung verwendet werden, weil die Gewichtung ihr Maximum im UVB hat und der UVA-Anteil fast vernachlässigbar ist.

Die erythemgewichtete UV-Strahlung wird auch als Proxy bzw. Stellvertreter für die biologisch effektive UV-Strahlung verwendet, da sie eine sehr ähnliche Gewichtung für die Vitamin D Synthese, DNS-Schädigung und die Entstehung von nicht-melanotischem

Hautkrebs aufweist (SCHMALWIESER *et al.*, 2020).

Typ: Modell 501 von Solar Light (19038 Philadelphia, United States of America)

Spektralbereich: 280-315 nm

Messbereich: 0-5 mW/cm²

Winkelantwort: Maximale Abweichungen von 5 % des idealen Cosinus

Umgebungstemperatur: -40 bis 50 °C

3.3.4 TSS-Sensor mit und ohne Schattenband:

Die Globalstrahlung wird mit einem Sternpyranometer mit Hilfe von Temperaturdifferenzen an zwölf im Kreis abwechselnd schwarz- und weiß lackierten Kupferplättchen gemessen, die von einer Quarzkuppel geschützt werden. Im Inneren des Gerätes schützt ein Trockenbehälter mit Silicagel vor Kondensation.

Typ: Sternpyranometer 8102 von SCHENK (1210 Wien, Österreich)

Messbereich: 0-1500 Wm⁻²

Spektrale Empfindlichkeit: 0,3-3 µm

Ausgang: ca. 15 µV/Wm⁻² oder 4-20 µA für 0-1500 Wm⁻²

Impedanz: ca. 35 Ohm

Umgebungstemperatur: -40 bis 60 °C

Auflösung: < 1 Wm⁻²

Stabilität: < 1 % pro Jahr (temporärer Betrieb)

Kosinusantwort: < 3 % des Wertes, Zenitwinkel 0 bis 80 °

Azimutantwort: < 3 % des Wertes

Abweichende Linearität: < 0,5 % im Bereich 0,5-1330 Wm⁻²

(SCHENK, 2018).

3.4 Kalibrierung

Die Sensoren liefern auch bei Dunkelheit ein Grundsignal S_{dark} in der Größenordnung von einigen mV. Der Dunkelstrom S_{dark} muss vom Messsignal S_{mess} abgezogen werden.

$$S = S_{mess} - S_{dark}$$

Die Bestrahlungsstärke E berechnet sich aus dem gemessenen Signal S in [Volt], einem generellen Umrechnungsfaktor c_0 in Einheiten von $[W/m^2/V]$ und einer dimensionslosen Kalibriermatrix c_1 . Die Kalibriermatrix ermöglicht die Berücksichtigung von Unterschieden oder Abweichungen von idealen spektralen Empfindlichkeiten sowie eine Korrektur der Winkelempfindlichkeit. Die Kalibriermatrix ist eine Funktion von Sonnenhöhe sh und Gesamtozonsäule O_3 .

$$E = S * c_0 * c_1(sh, O_3)$$

Die Ozonwerte stammen vom „Ozone Monitoring Instrument“ der NASA (OMI) und werden zu Mittag gemessen. Sie stehen mit einer zeitlichen Verzögerung von zwei bis drei Tagen zur Verfügung. Wenn keine Ozonwerte vorhanden sind, werden die Ozonwert aus den beiden Nachbartagen interpoliert.

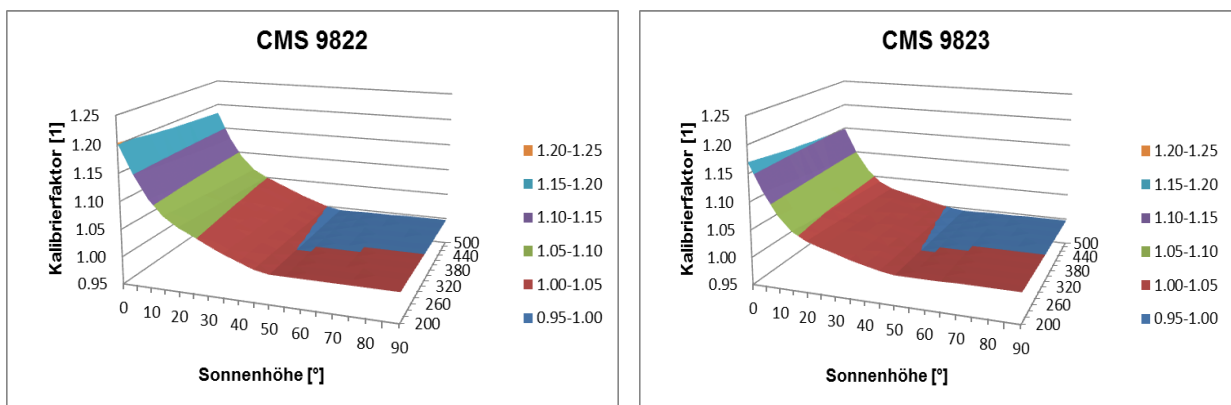


Abb. 10: Beispiel für die Kalibriermatrix des UVA-Sensors ohne (links) und mit Schattenband (rechts) (aus SCHMALWIESER, 2016)

In Abb. 10 ist die Kalibriermatrix c_1 in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe $[\circ]$ und der Gesamtozonsäule [DU] für den UVA-Sensor ohne (links) und mit Schattenband (rechts) dargestellt.

3.5 Berechnung der direkten Bestrahlungsstärke

Aus der gesamten UVA-Bestrahlungsstärke E_{total} und der diffusen Bestrahlungsstärke E_{dif} kann die direkte Bestrahlungsstärke E_{dir} berechnet werden (SCHMALWIESER, 2016).

$$E_{dir} = E_{total} - E_{dif}$$

3.6 Berechnung der Tagesdosis

Die Tagesdosis H berechnet sich aus der Summe der Bestrahlungsstärke E vom Sonnenaufgang t_0 bis Sonnenuntergang t_1 im 10 min-Mittel.

$$H = \sum_{t_0}^{t_1} E_{10 \text{ min}}(t) * 600s$$

4 Ergebnisse

4.1 UVA-Tagesdosen

4.1.1 Tageshöchstwerte

Global: Die höchsten Zehnminutenmittelwerte der globalen UVA-Strahlung im Zeitraum von 2013 bis 2016 wurden mit ca. 60 W/m^2 in den Monaten Mai, Juni und Juli erreicht. In der Zeitspanne von 2016 bis 2018 wurden in den gleichen Monaten etwas höhere Bestrahlungsstärken von bis zu 65 W/m^2 gemessen.

Diffus: Die Zehnminutenmittelwerte der diffusen UVA-Strahlung liegen im Zeitraum von 2013 bis 2017 mit 45 W/m^2 in den Monaten Juli, August und September am höchsten. In der Zeitperiode zwischen 2017 und 2018 wurden etwas höhere Werte bis zu 55 W/m^2 im Juli 2017 gemessen.

Direkt: Die höchsten Zehnminutenmittelwerte der direkten UVA-Strahlung zwischen 2013 und 2015 liegen im Bereich von 40 W/m^2 und wurden in den Monaten Mai, Juni und Juli berechnet. Im Zeitintervall von 2015 bis 2016 wurden in den Monaten Juni, Juli und August höhere Höchstwerte bis zu 48 W/m^2 festgestellt. In der Zeitperiode von 2016 bis 2018 wurden in den Monaten Juni und Juli niedrigere Höchstwerte bis zu 41 W/m^2 gemessen.

4.1.2 Monatsübersicht für die UVA-Tageshöchstwerte

In Abb. 11-13 sind für jedes Kalendermonat zwischen 2013 und 2018 der kleinste (Min), der mittlere (Mittel) und der größte (Max) gemessene Tageshöchstwert, sowie die Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte der globalen UVA-Strahlung (Abb. 11), der diffusen UVA-Strahlung (Abb. 12) und der direkten UVA-Strahlung (Abb. 13) dargestellt. Der Jahresgang wiederholt sich ähnlich. In den Sommermonaten findet man relativ zu den anderen Jahreszeiten die größten Abweichungen. In den Monaten Juni, Juli und August werden relativ zu den Monaten November, Dezember und Jänner höhere Werte gemessen. Der Mittelwert der globalen UVA-Strahlung (Abb. 11) liegt im Sommer bei 60 W/m^2 . Der Mittelwert der diffusen UVA-Strahlung (Abb. 12) liegt im Sommer bei 25 W/m^2 . Der

Mittelwert der direkten UVA-Strahlung (Abb. 13) liegt im Sommer bei 20 -25 W/m².

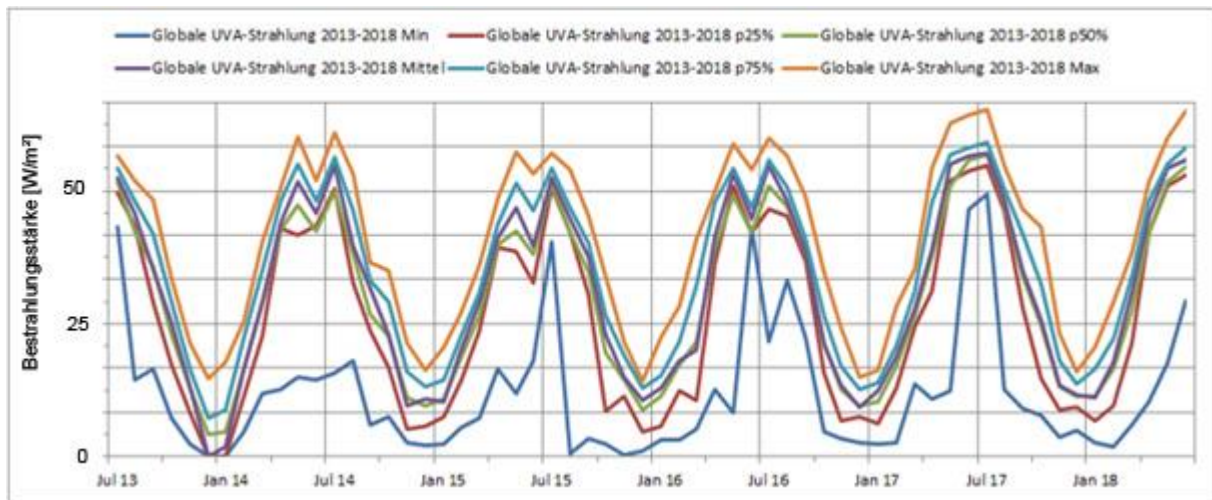


Abb. 11: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der globalen UVA-Tageshöchstwerte für jedes Kalendermonat

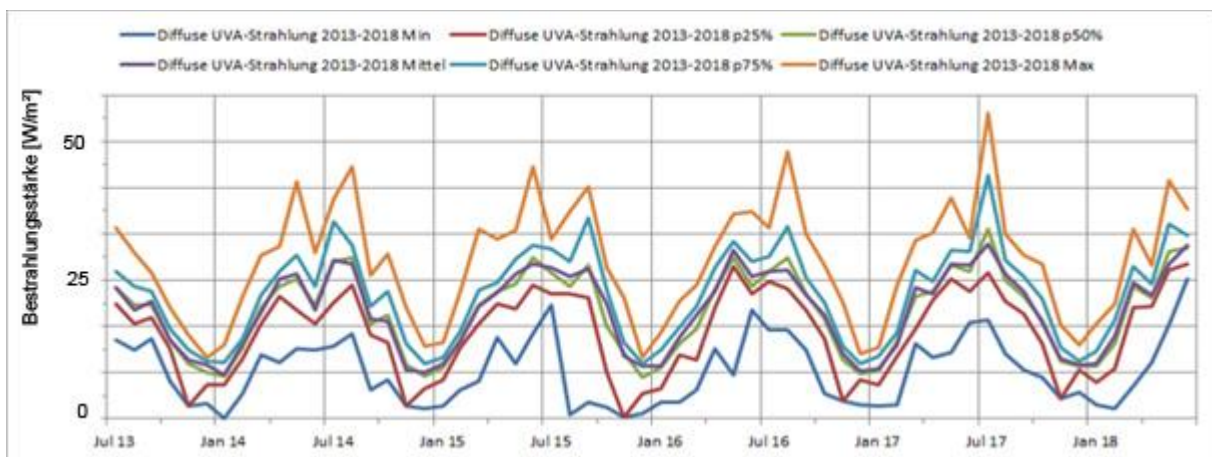


Abb. 12: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der diffusen UVA-Tageshöchstwerte für jedes Kalendermonat

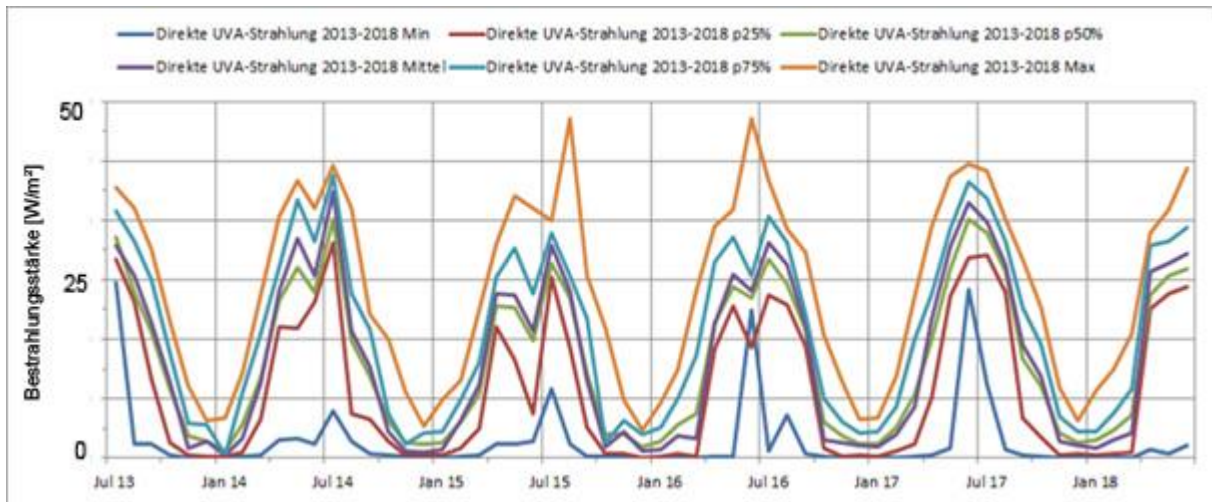


Abb. 13: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der direkten UVA-Tageshöchstwerte für jedes Kalendermonat

4.1.3 Verlauf der UVA-Tagesdosen

Aus 10-Minuten-Mittelwerten wurden Tagesdosen berechnet. Die Tagesdosen der globalen (ohne Schattenband) UVA-Strahlung sind in Abb. 14 dargestellt und die Tagesdosen der diffusen (mit Schattenband) UVA-Strahlung in Abb. 15.

Global: Die globalen Tagesdosen in Abb. 14 erreichen zwischen Mai und Juli ihre Höchstwerte von 1600 kJ/m² bis 1800 kJ/m² und fallen bis zu deren Tiefstwerten in den Wintermonaten auf annähernd 100 J/m² ab. Ab der Wintersonnenwende steigen die Tagesdosen wieder auf bis zu ähnlich hohen Tagesdosen wie im Sommer des Vorjahres an. Aufgrund der verkürzten Tageslänge von acht Stunden und des Wetters sind im Winter tageweise nur sehr geringe Tagesdosen messbar. Bei Schneefall gehen die Tagesdosen gegen Null.

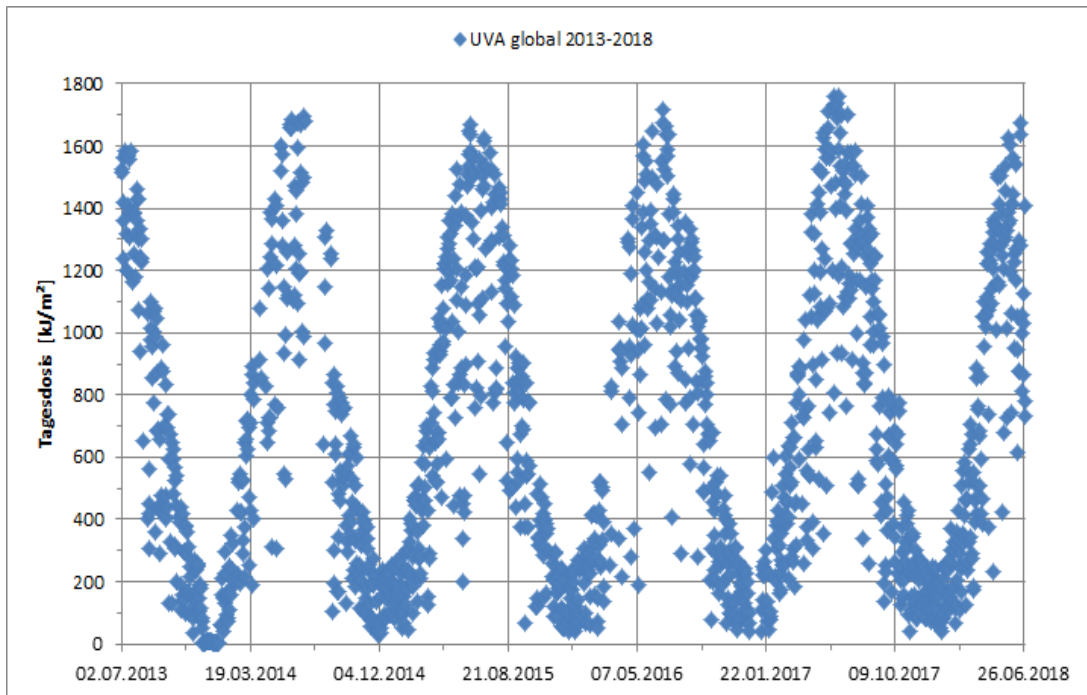


Abb. 14: Tagesdosen der globalen UVA-Strahlung (UVA-Sensor ohne Schattenband)

Diffus: Bei den Messungen der diffusen UVA-Strahlung mit einem Schattenband werden deutlich niedrigere Werte als bei der globalen UVA-Strahlung gemessen. Die Tagesdosen der Abb. 15 verhalten sich im Diagramm wie die Tagesdosen in Abb. 14, jedoch sind die diffusen Werte aufgrund des Schattenbandes bei den Höchstwerten um 700 kJ/m^2 niedriger und erreichen somit Werte von nur 900 kJ/m^2 bis 1100 kJ/m^2 . Der Unterschied zu den globalen Tagesdosen ist im Winter deutlich kleiner, da auch hier aufgrund der verkürzten Sonnenzeit und des Wetters Tagesdosen von annähernd 100 J/m^2 erreicht werden. Wenn keine direkte Sonnenstrahlung auf das Messgerät auftrifft, dann entspricht die Globalstrahlung der Diffusstrahlung.

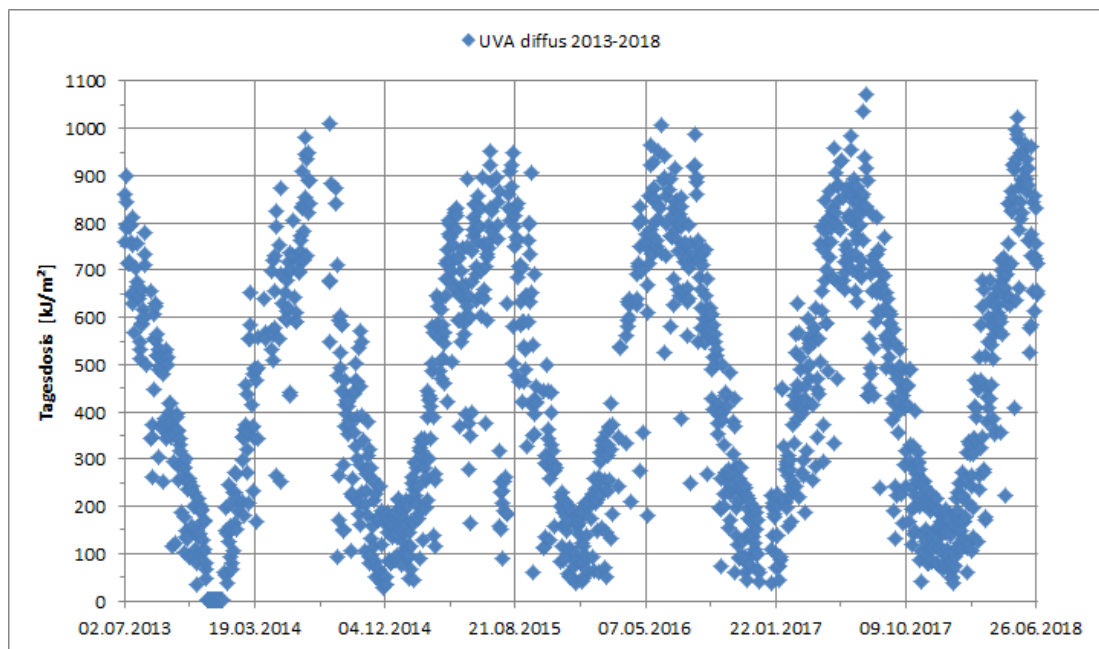


Abb. 15: Tagesdosen der diffusen UVA-Strahlung (UVA-Sensor mit Schattenband)

4.1.4 Monatsübersicht für die UVA-Tagesdosen

In Abb. 16-18 sind für jedes Kalendermonat zwischen 2013 und 2018 die kleinste (Min), die mittlere (Mittel) und die größte (Max) Tagesdosis, sowie die Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tagesdosen der globalen UVA-Strahlung (Abb. 16), der diffusen UVA-Strahlung (Abb. 17) und der direkten UVA-Strahlung (Abb. 18) dargestellt. Der Jahresgang wiederholt sich ähnlich. In den Sommermonaten findet man relativ zu den anderen Jahreszeiten die größten Unterschiede zwischen den Perzentilen. In den Monaten Juni, Juli und August werden relativ zu den Monaten November, Dezember und Jänner höhere Werte gemessen. Der Mittelwert der gesamten UVA-Strahlung (Abb. 16) liegt im Sommer bei 1400 kJ/m². Der Mittelwert der diffusen UVA-Strahlung (Abb. 17) liegt im Sommer bei 800 kJ/m². Der Mittelwert der direkten UVA-Strahlung (Abb. 18) liegt im Sommer bei 500 kJ/m².

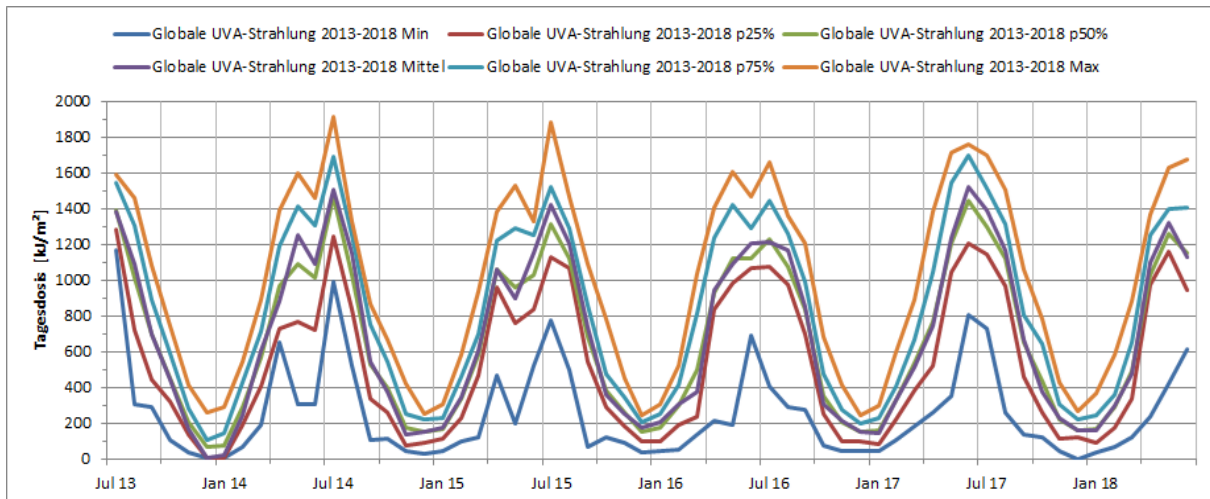


Abb. 16: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der gesamten UVA-Tagesdosis für jedes Kalendermonat

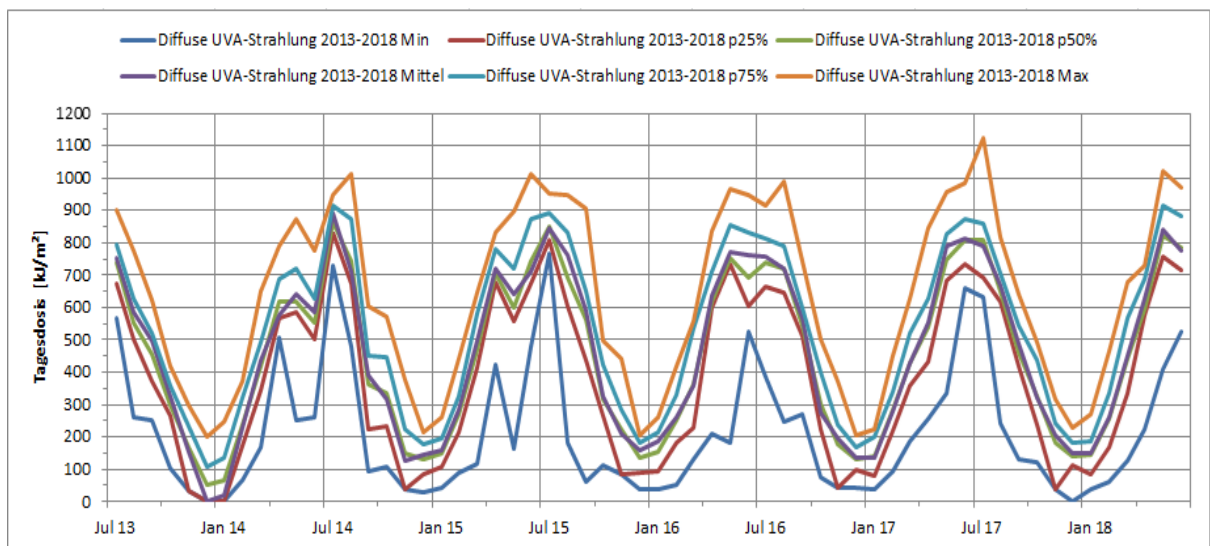


Abb. 17: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der diffusen UVA-Tagesdosis für jedes Kalendermonat

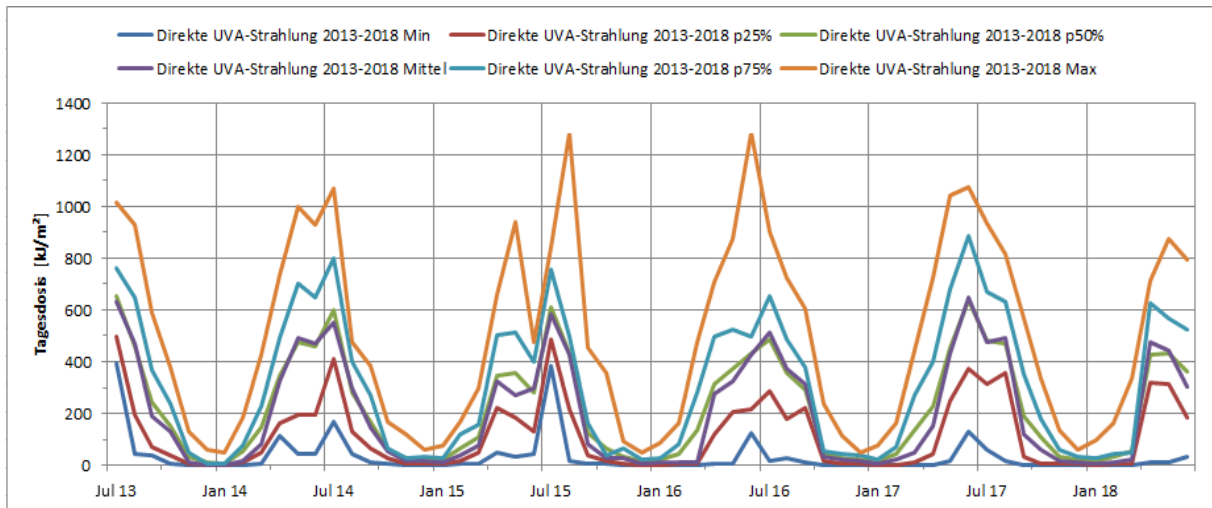


Abb. 18: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der direkten UVA-Tagesdosis für jedes Kalendermonat

4.1.5 Stündlicher Verlauf der UVA-Strahlung im Juni

Nachfolgend sind die durchschnittlichen Stundenwerte im Juni aus dem Messzeitraum 2014 bis 2018 der globalen UVA-Strahlung (Abb. 19) und der diffusen UVA-Strahlung (Abb. 20) dargestellt.

Global: Die ersten Messwerte wurden bei Sonnenaufgang um 5 Uhr und die letzten bei Sonnenuntergang um 21 Uhr gemessen. Die Höchstwerte wurden zwischen 10 und 15 Uhr verzeichnet und erreichten im Mittelwert etwa 50 W/m². Die höchsten Mittagswerte variieren im Zeitraum 2014 bis 2018 zwischen 55 W/m², gemessen im Juni 2016, und 65 W/m², gemessen im Juni 2017.

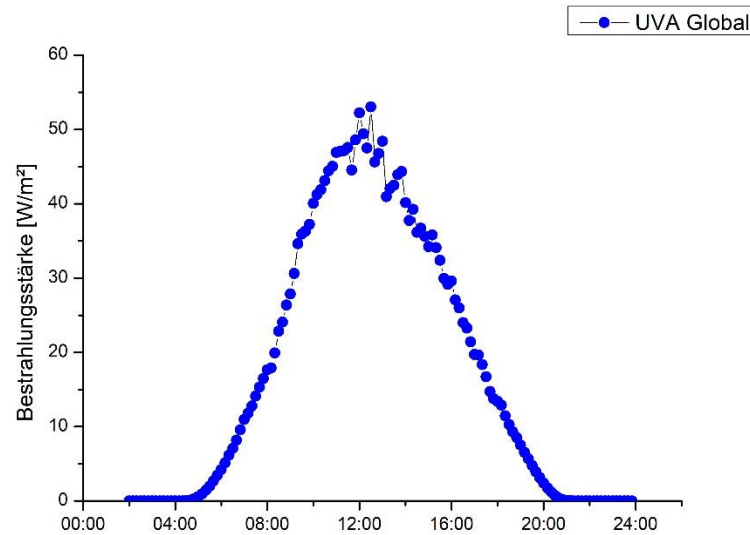


Abb. 19: Mittlere Bestrahlungsstärke der globalen UVA-Strahlung zu jeder Stunde im Juni ab 2014 bis 2018

Diffus: Die ersten Messwerte wurden bei Sonnenaufgang um 5 Uhr und die letzten bei Sonnenuntergang um 21 Uhr gemessen. Die Höchstwerte wurden zwischen 9 und 15 Uhr verzeichnet und erreichten im Mittelwert bis zu 21 W/m² (Abb. 20). Die höchsten Mittagswerte variieren im Zeitraum 2014 bis 2018 zwischen 25 W/m², gemessen im Juni 2014, und 28 W/m², gemessen im Juni 2018.

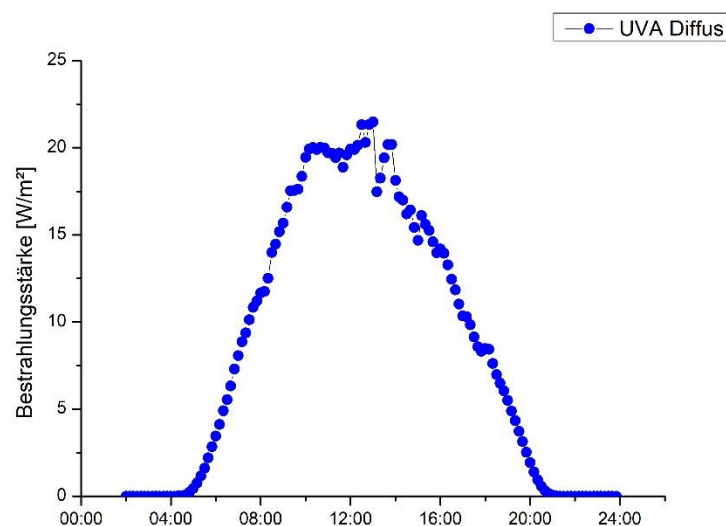


Abb. 20: Mittlere Bestrahlungsstärke der diffusen UVA-Strahlung zu jeder Stunde im Juni ab 2014 bis 2018

4.2 Anteile der diffusen und direkten UVA-Strahlung an der globalen UVA-Strahlung

Es wurden die Verhältnisse der direkten und diffusen UVA-Tagesdosen zu den totalen UVA-Tagesdosen berechnet und deren Verhältnisse zu den globalen Tagesdosen betrachtet. Bei einem bedeckten Himmel überwiegt die diffuse UVA-Strahlung, während die direkte UVA-Strahlung vernachlässigbar ist. Bei einem wolkenlosen Himmel sind die Umstände gegenläufig und die direkte UVA-Strahlung leistet einen Beitrag von bis zu 65 %, wobei die restlichen 35 % auf die diffuse UVA-Strahlung entfallen.

In Abb. 21 sind die Anteile der diffusen UVA-Strahlung an der globalen UVA-Strahlung von 2013 bis 2018 abgebildet. Mit nur 40% ist der Anteil der diffusen UVA-Strahlung an der globalen UVA-Strahlung im Sommer am geringsten und der Wert erreicht im Winter bis zu 100 % Anteil an der globalen UVA-Strahlung. Höhere Anteile als 100 % stellen Messfehler dar. Während in den Jahren von 2013 bis 2016 ein gleichmäßiger Anstieg und Abfall des Jahresgangs zu erkennen ist, vergrößern sich die Abweichungen der Messwerte über die darauffolgenden Jahre aufgrund wetterabhängiger Bedingungen wie einer vermehrten Bewölkung und Regens zunehmend.

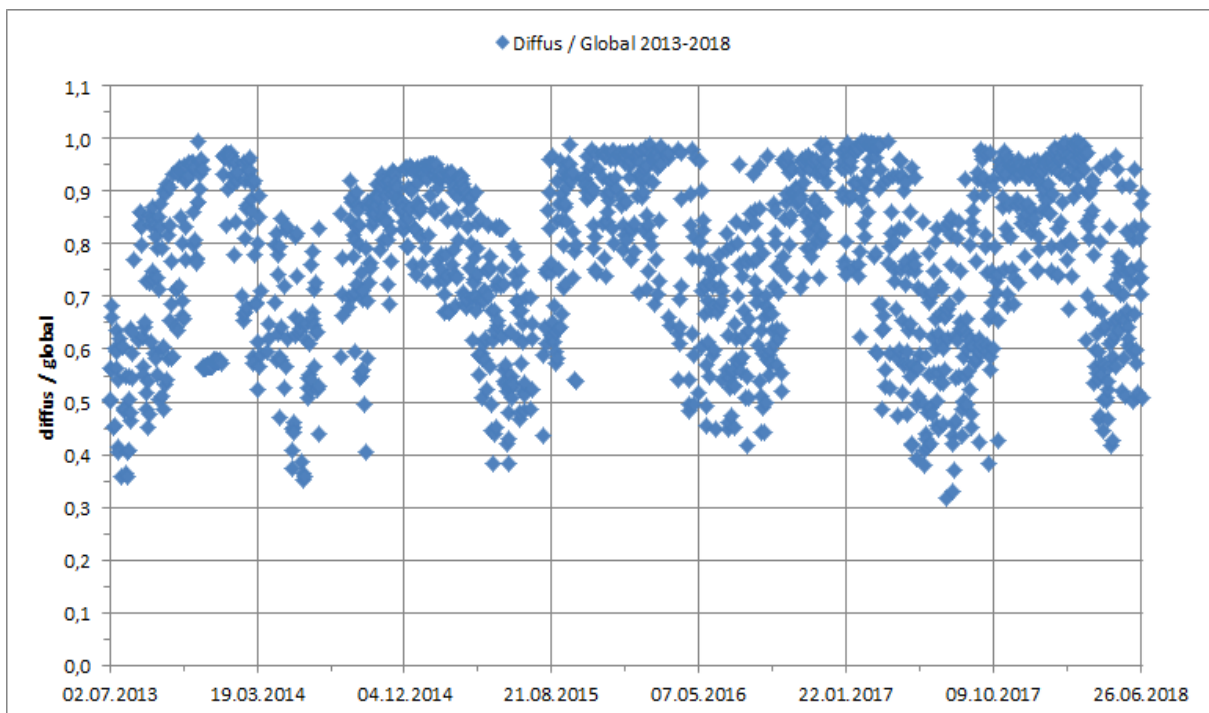


Abb. 21: Anteile der diffusen UVA-Strahlung an der globalen UVA-Strahlung

4.3 Vergleiche mit den erythemgewichteten Tagesdosen

Aus 10-Minuten-Mittelwerten wurden Tagesdosen berechnet. Die Tagesdosen der globalen (ohne Schattenband) erythemgewichteten Strahlung werden in Abb. 22 dargestellt und die Tagesdosen der diffusen (mit Schattenband) erythemgewichteten Strahlung sind in Abb. 23 zu sehen.

Global: Im Zeitraum von 2013 bis 2016 wurden Höchstwerte der globalen erythemgewichteten Strahlung mit bis zu 4200 J/m^2 gemessen. Die darauffolgende Zeitperiode von 2016 bis 2017 weist vermehrt noch höhere Werte bis zu 4500 J/m^2 auf. Im Zeitfenster zwischen 2017 und 2018 erreichen die Höchstwerte bis zu 4800 J/m^2 . Der Jahresgang zeigt einen Anstieg der erythemgewichteten Strahlung bis zu den Sommermonaten und einen Abfall in Richtung der Wintermonate. Abb. 22 der globalen erythemgewichteten Strahlung ähnelt Abb. 14 der globalen UVA-Strahlung, welche nicht einmal die Hälfte der erythemgewichteten Strahlung im Sommer erreicht.

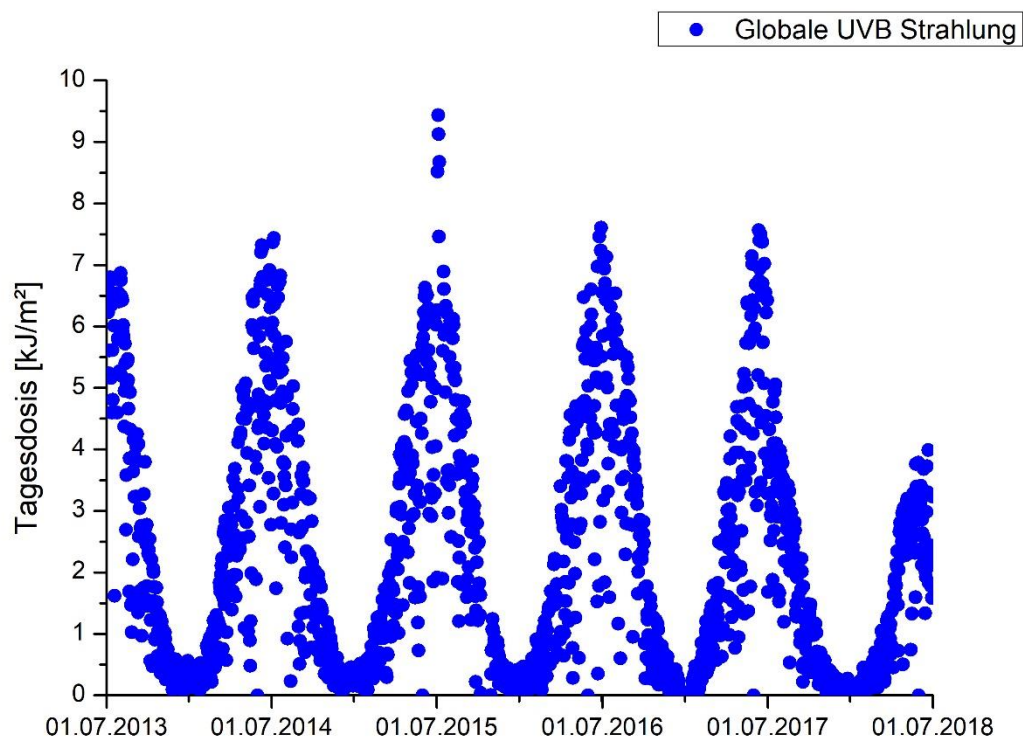


Abb. 22: Tagesdosen der globalen erythemgewichteten UV-Strahlung (Biometer ohne Schattenband)

Diffus: Die Tagesdosen der diffusen erythemgewichteten Strahlung erreichen im Zeitraum von 2013 bis 2015 Höchstwerte bis zu 2700 J/m². In den Folgejahren erhöhen sich die Höchstwerte auf 3000 J/m². Während im Zeitraum von 2014 bis 2016 vermehrt wetterbedingte Abweichungen zu messen waren, traten diese in den Jahren 2013, 2017 und 2018 vermindert auf. Abb. 23 der diffusen erythemgewichteten Strahlung korreliert mit den Werten in Abb. 15 der diffusen UVA-Strahlung, wobei die diffuse UVA-Strahlung verhältnismäßig wie die globale erythemgewichtete Strahlung zur globalen UVA-Strahlung die Hälfte der diffusen erythemgewichteten Strahlung nicht erreicht.

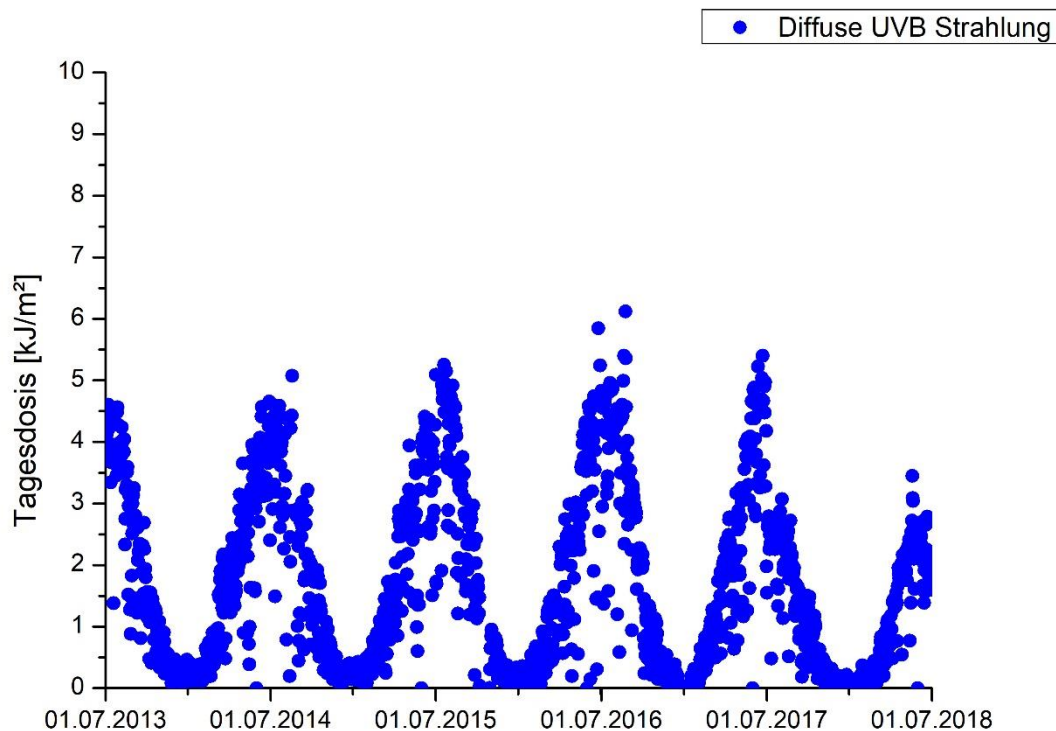


Abb. 23: Tagesdosen der diffusen erythemgewichteten Strahlung (Biometer mit Schattenband)

In Abb. 24 sind die Verhältnisse der diffusen erythemgewichteten Tagesdosen zu den globalen erythemgewichteten Tagesdosen dargestellt. Der diffuse Anteil an der globalen Strahlung beträgt im Sommer über 50 % und im Winter bis zu 100 %. Der diffuse Anteil von 2015 bis 2018 hat sich im Vergleich zu den Jahren von 2013 bis 2015 im Jahresgang um 5 % erhöht.

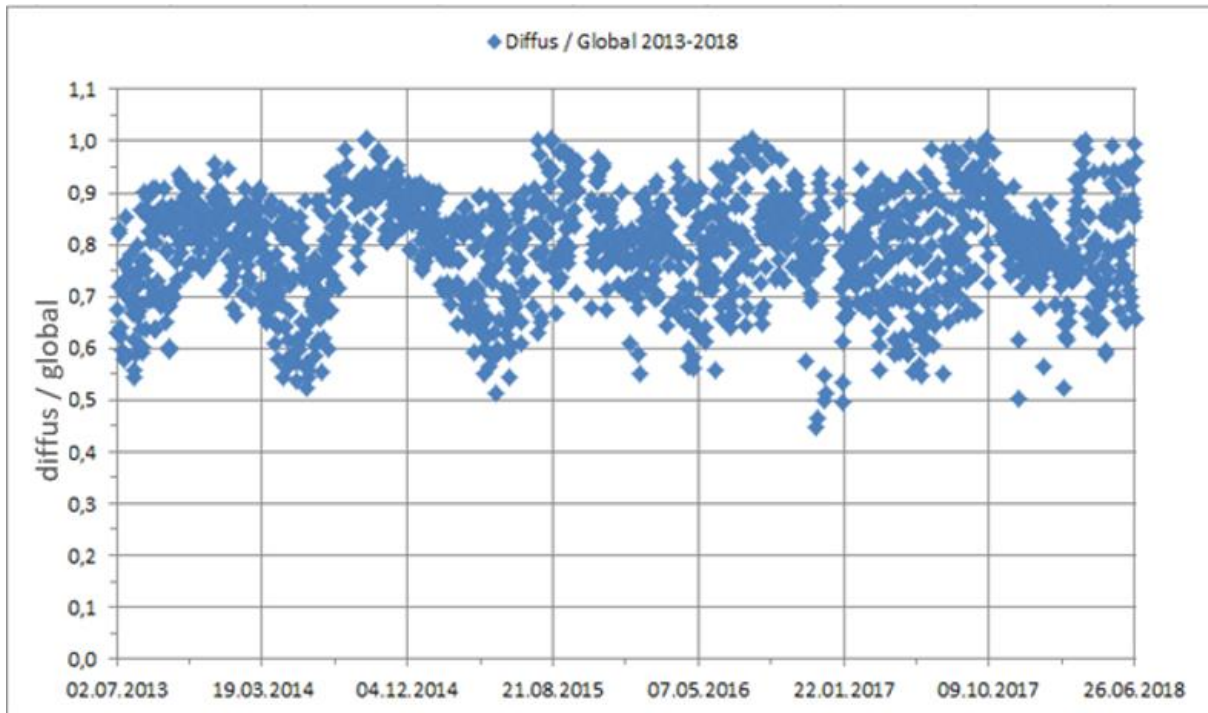


Abb. 24: Verhältnisse der diffusen und globalen erythemgewichteten Tagesdosen

Abb. 25 zeigt die Verhältnisse der globalen erythemgewichteten Tagesdosen zu den globalen UVA-Tagesdosen an. Die Verhältnisse sind in den Sommermonaten am höchsten und in den Wintermonaten am niedrigsten. Sie betragen im Zeitraum von 2013 bis 2017 in den Sommermonaten ca. 0,005 und in den Wintermonaten sinken sie konstant von 0,002 auf 0,001. In der Zeitspanne von 2017 bis 2018 erhöhen sich die Anteile der globalen erythemgewichteten Tagesdosen zu den globalen UVA-Tagesdosen in den Sommermonaten auf 0,0055 und in den Wintermonaten auf 0,0015.

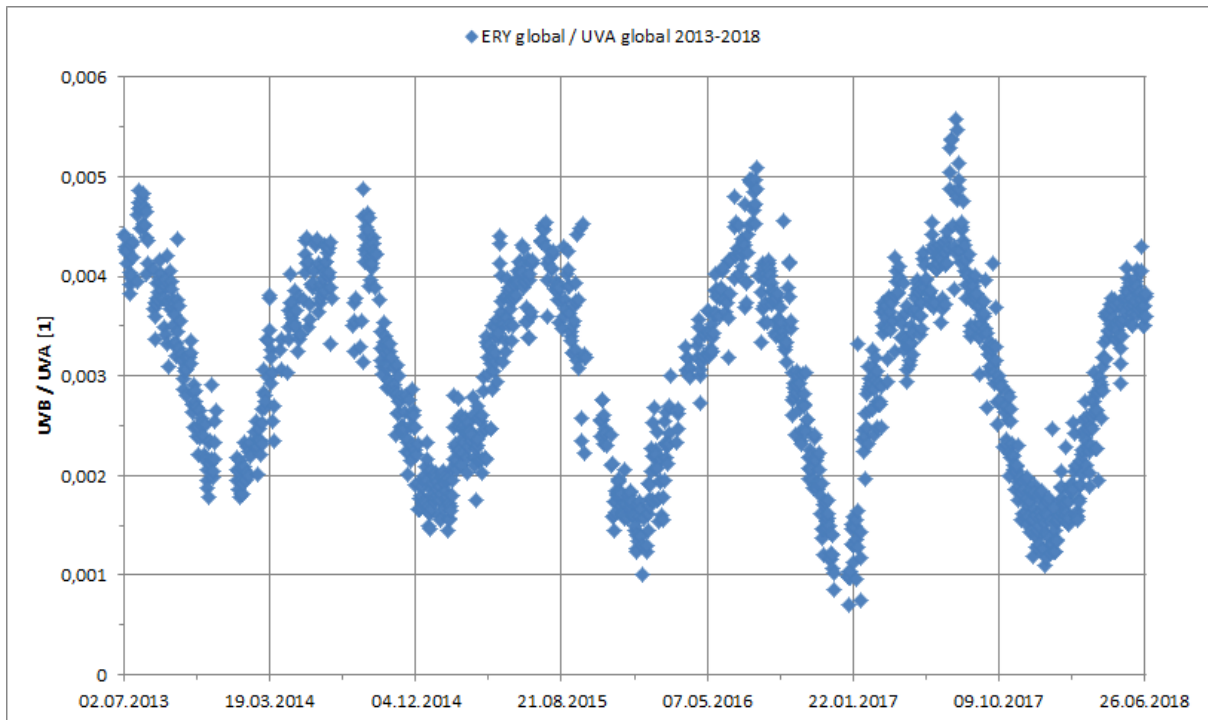


Abb. 25: Verhältnisse der globalen erythemgewichteten Tagesdosen zu den globalen UVA-Tagesdosen

4.3.1 Monatsübersicht für die erythemgewichteten Tagesdosen

In Abb. 26-28 sind für jedes Kalendermonat zwischen 2013 und 2018 die kleinste (Min), die mittlere (Mittel) und die größte (Max) Tagesdosis, sowie die Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tagesdosen der globalen erythemgewichteten UV-Strahlung, der diffusen erythemgewichteten UV-Strahlung und der direkten erythemgewichteten UV-Strahlung dargestellt. Die Werte korrelieren miteinander und der Jahresgang wiederholt sich ähnlich. In den Sommermonaten findet man relativ zu den anderen Jahreszeiten die größten Unterschiede zwischen den Perzentilen. In den Monaten Juni, Juli und August werden relativ zu den Monaten November, Dezember und Jänner höhere Werte gemessen. Der Mittelwert der globalen erythemgewichteten UV-Strahlung (Abb. 26) liegt im Sommer bei 6,0 kJ/m². Der Mittelwert der diffusen erythemgewichteten UV-Strahlung (Abb. 27) liegt im Sommer bei 4,5 kJ/m². Der Mittelwert der direkten erythemgewichteten UV-Strahlung (Abb. 28) liegt im Sommer bei 2,5 kJ/m².

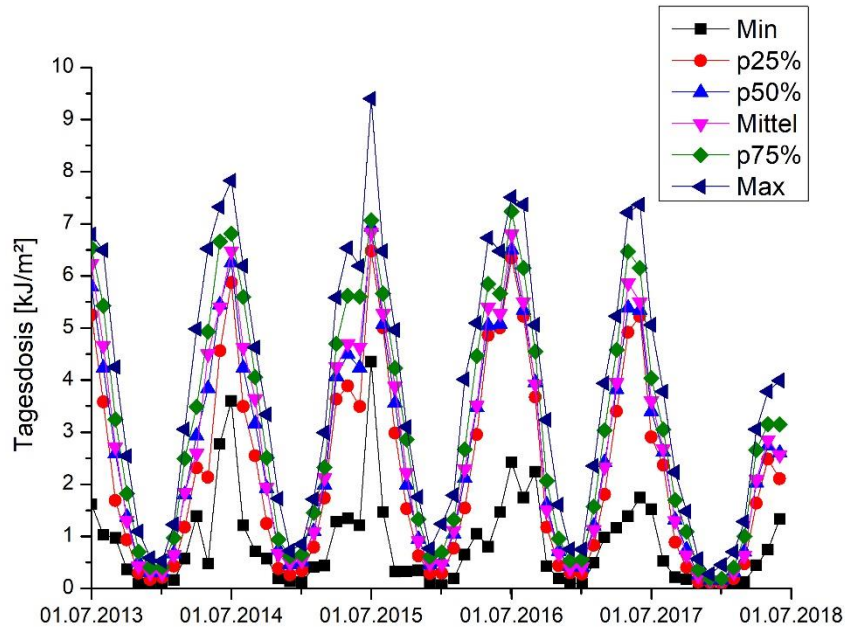


Abb. 26: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessene Tagesdosis, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % und Mittelwert (Mittel) der globalen erythemgewichteten UV-Strahlung für jedes Kalendermonat

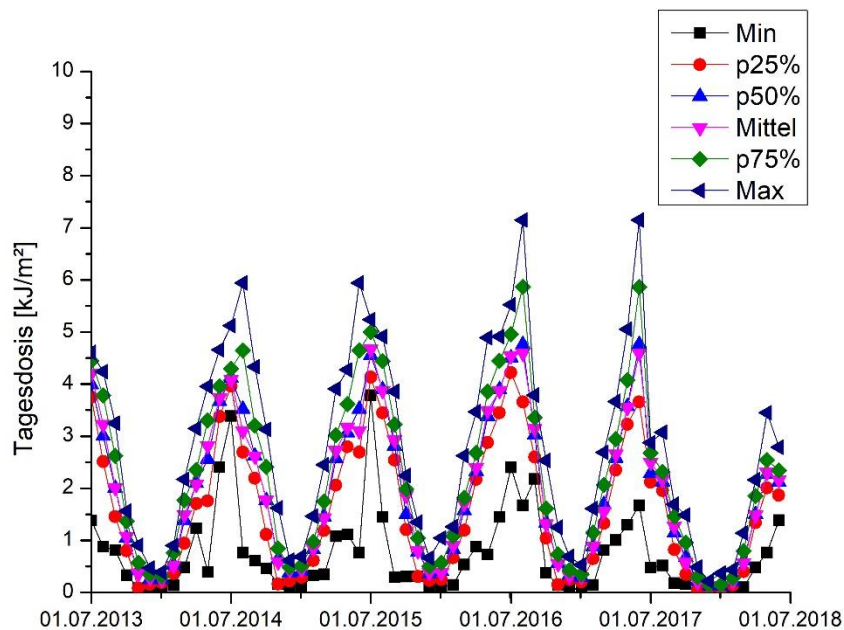


Abb. 27: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessene Tagesdosis, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % und Mittelwert (Mittel) der diffusen erythemgewichteten UV-Strahlung für jedes Kalendermonat

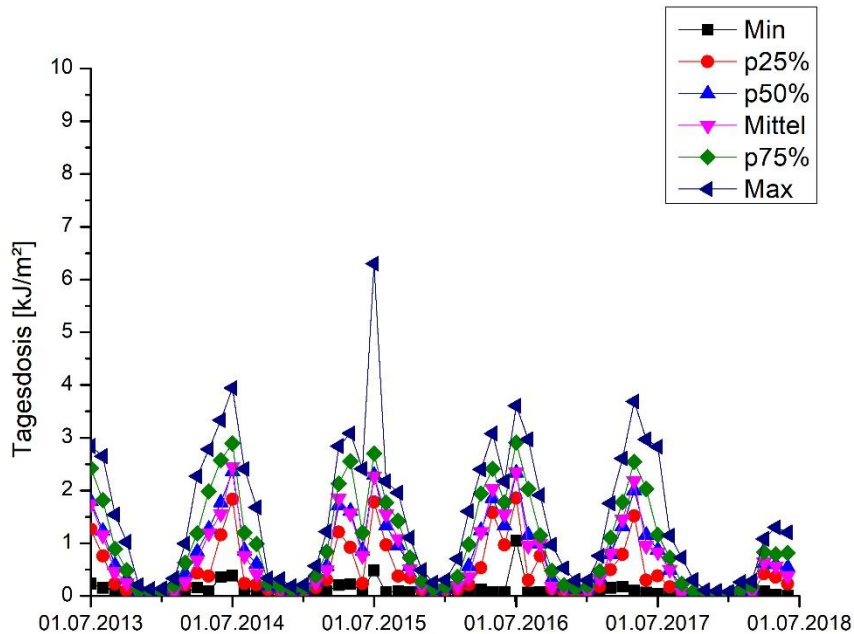


Abb. 28: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessene Tagesdosis, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % und Mittelwert (Mittel) der direkten erythemgewichteten UV-Strahlung für jedes Kalendermonat

4.3.2 Stündlicher Verlauf der erythemgewichteten Strahlung im Juni

Nachfolgend sind die durchschnittlichen Stundenwerte im Juni aus dem Messzeitraum 2014 bis 2018 der globalen UVB-Strahlung (Abb. 29) und der diffusen UVB-Strahlung (Abb. 30) dargestellt.

Global: Die ersten Messwerte wurden bei Sonnenaufgang um 5 Uhr und die letzten bei Sonnenuntergang um 21 Uhr gemessen. Die Höchstwerte wurden zwischen 11 und 13 Uhr verzeichnet und erreichten im Mittelwert bis zu $0,15 \text{ W/m}^2$ (orange Linie in der Abb. 29). Die höchsten Mittagswerte variieren im Zeitraum 2014 bis 2018 zwischen $0,17 \text{ W/m}^2$, gemessen im Juni 2018, und $0,20 \text{ W/m}^2$, gemessen im Juni 2017.

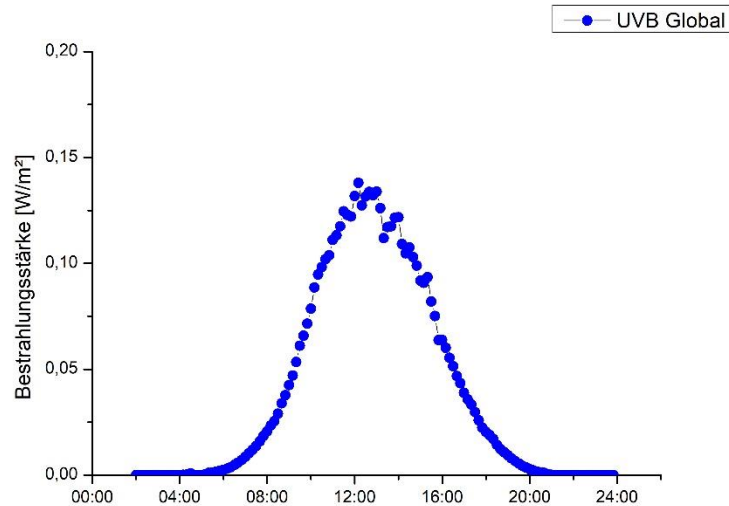


Abb. 29: Mittlere Bestrahlungsstärke der globalen UVB-Strahlung zu jeder Stunde im Juni ab 2014 bis 2018

Diffus: Die ersten Messwerte wurden bei Sonnenaufgang um 5 Uhr und die letzten bei Sonnenuntergang um 21 Uhr gemessen. Die Höchstwerte wurden zwischen 11 und 13 Uhr verzeichnet und erreichten im Durchschnitt bis zu $0,09 \text{ W/m}^2$. Die Höchstwerte variieren über den Zeitraum 2014 bis 2018 zwischen $0,012 \text{ W/m}^2$, gemessen im Juni 2016, und $0,013 \text{ W/m}^2$, gemessen im Juni 2017

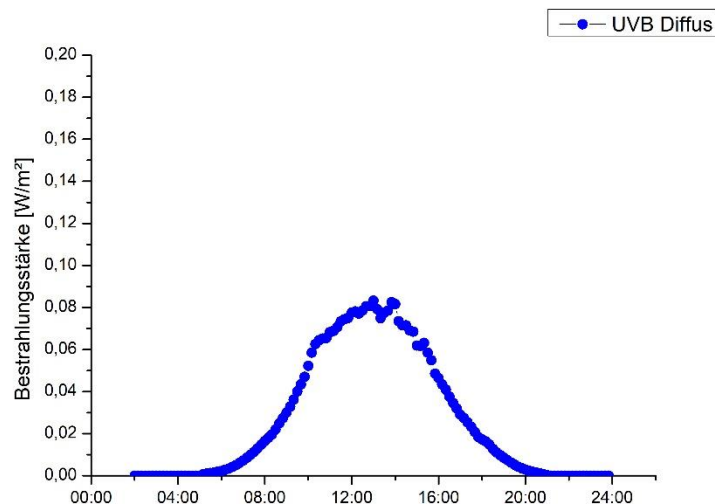


Abb. 30: Mittlere Bestrahlungsstärke der diffusen UVB-Strahlung zu jeder Stunde im Juni ab 2014 bis 2018

4.4 Vergleich mit der totalen solaren Strahlung

Aus 10-Minuten-Mittelwerten wurden Tagesdosen berechnet. Die Tagesdosen der globalen (ohne Schattenband) Strahlung werden in Abb. 31 dargestellt. Die Tagesdosen der diffusen (mit Schattenband) Strahlung sind in Abb. 32 und die direkten totalen Strahlungswerte (Differenzen) sind in Abb. 33 zu sehen.

Global: Im Zeitraum von 2014 bis 2016 wurden die höchsten Tagesdosen der totalen globalen Strahlung in den Monaten Juni und Juli mit Höchstwerten über 30000 kJ/m² gemessen. Ab 2016 entwickelt sich eine Regression, die im Folgejahr nur bis zu einem Wachstum von maximal 26000 kJ/m² führt, und in der Zeitperiode von 2017 bis 2018 Höchstwerte knapp unter 25000 kJ/m² aufweist. Vereinzelt treten wetterbedingte Abweichungen auf und im Winter liegen die Werte nahe 100 J/m².

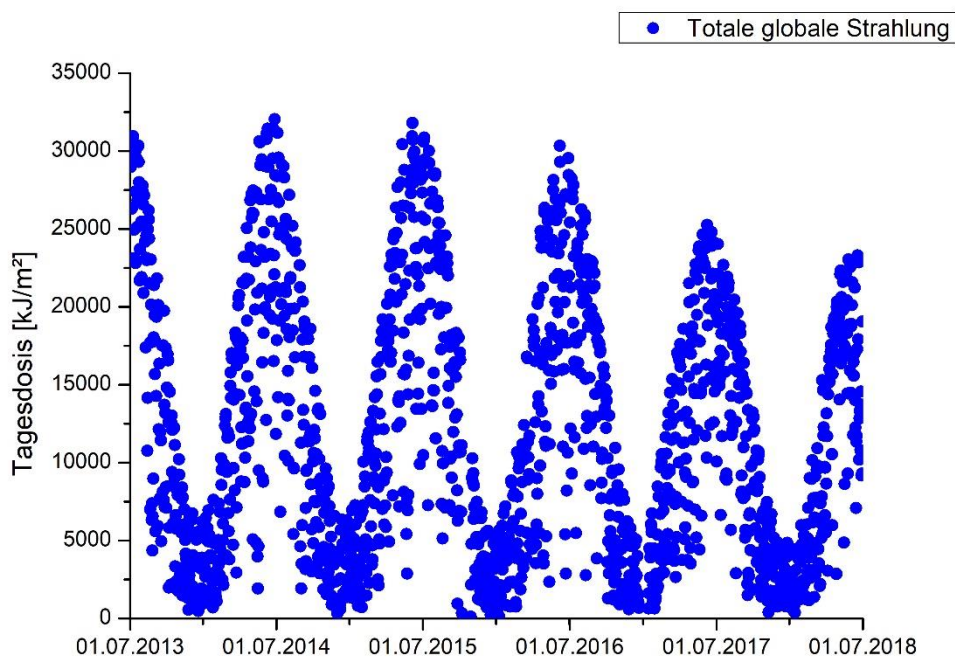


Abb. 31: Tagesdosen der globalen totalen Strahlung (Pyranometer ohne Schattenband)

Diffus: Die Tagesdosen der totalen diffusen Strahlung erreichten im Zeitraum von 2013 bis 2018 vereinzelt Höchstwerte über 15000 kJ/m², aber die Mehrheit der Höchstwerte befindet sich in den Sommermonaten bei 13000 bis 14000 kJ/m². Es wurde in den Sommermonaten eine große Streuung der Werte gemessen. In den Wintermonaten liegen die Höchstwerte bei 2000 J/m².

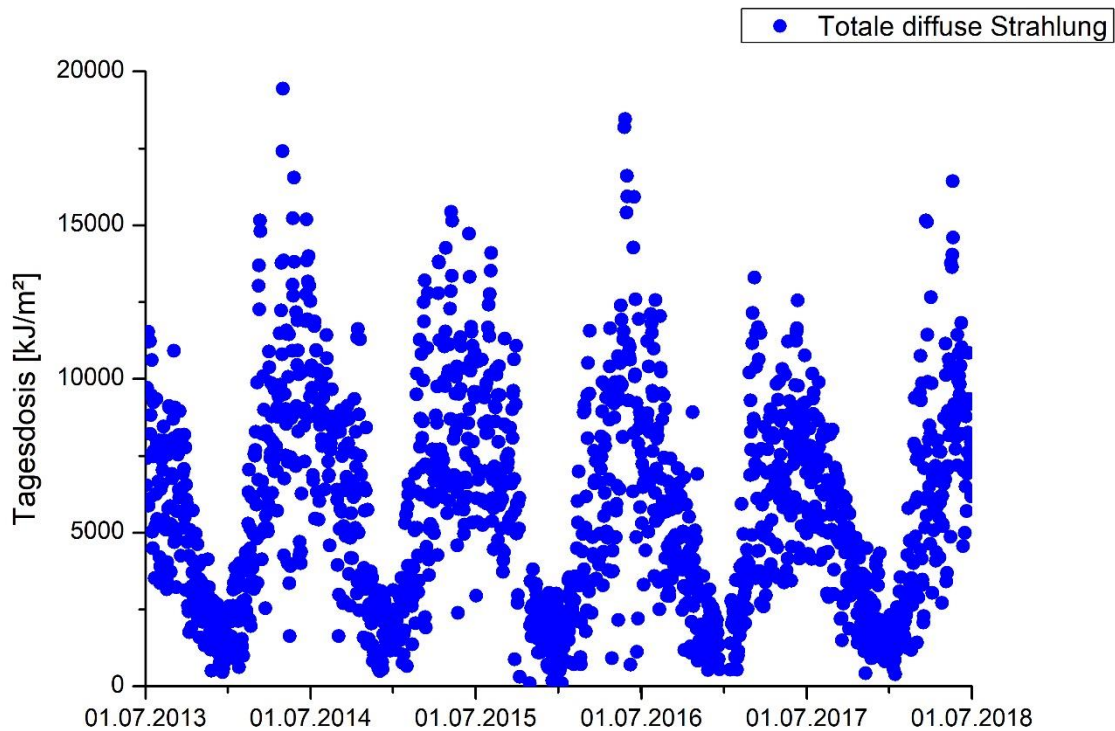


Abb. 32: Tagesdosen der diffusen totalen Strahlung (Pyranometer mit Schattenband)

Direkt: Die Tagesdosen der totalen direkten Strahlung erreichen in der Zeitperiode von 2013 bis 2017 ihre Höchstwerte bei 25000 kJ/m² und weisen in den Sommermonaten Juni und Juli vereinzelt noch höhere Werte auf. In der Zeitperiode von 2017 bis 2018 wurden maximal 20000 kJ/m² gemessen. Die Streuung ist zu hoch, um eine eindeutige Prognose erstellen zu können und es befinden sich deutlich mehr Werte unter 2500 J/m² als in Abb. 31 und Abb. 32.

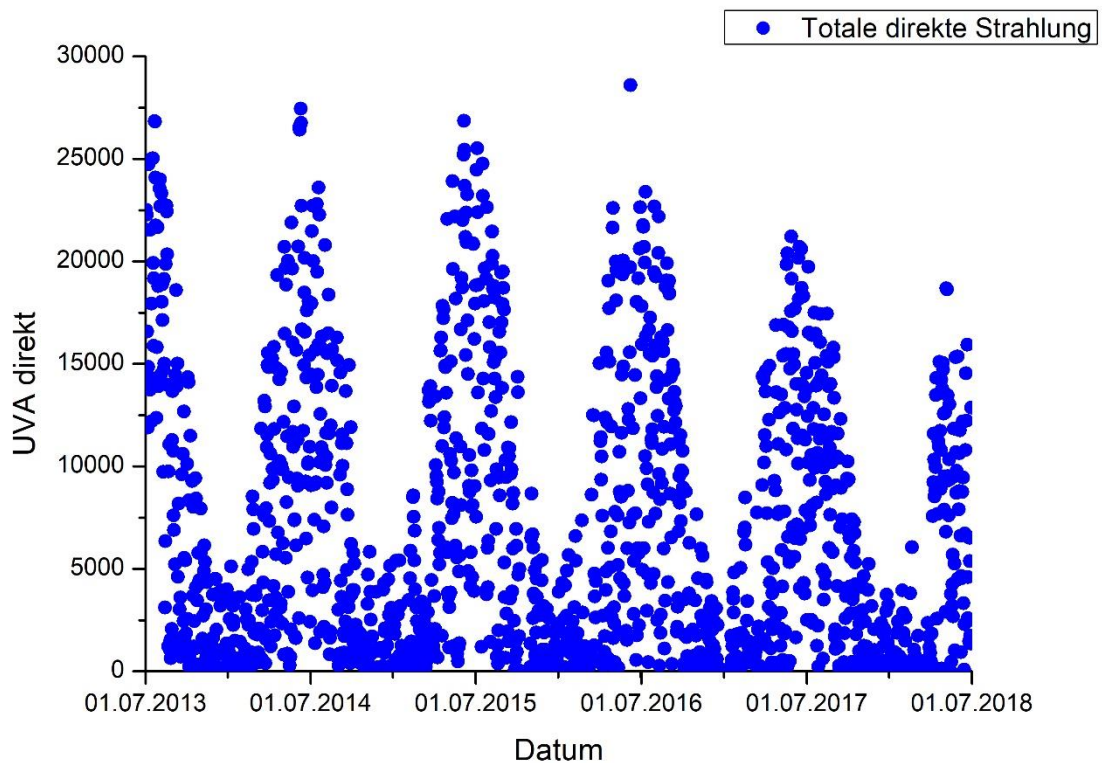


Abb. 33: Tagesdosen der direkten totalen Strahlung

In Abb. 34 sind die Verhältnisse der globalen UVA-Tagesdosen zu den globalen totalen Tagesdosen im Zeitraum von 2013 bis 2018 dargestellt. Die Verhältnisse liegen in den Sommermonaten größtenteils zwischen 0,0020 und 0,0025. In den Wintermonaten sind die Verhältnisse der Tagesdosen auf einen Wert von 0,0015 gesunken. Zum Jahresbeginn 2014 wurden stark reduzierte Werte unter 0,0010 festgestellt. Während sich in den Wintermonaten 2013 und 2014 eine Annäherung zu einem Verhältnis zwischen 0,0020 und 0,0015 zeigt, erkennt man in den Sommermonaten auch eine Tendenz in Richtung 0,0025 und 0,0030. In den Wintermonaten 2015 und 2016 verschob sich diese Tendenz zunehmend stärker nach 0,0025 und 0,0030 als zu 0,0020 und 0,0015. Zwischen 2016 und 2017 sowie zwischen 2017 und 2018 finden sich die Sommerwerte konzentriert im Bereich von 0,0020 bis 0,0030, während sich die Winterwerte zwischen 0,0015 bis 0,0035 gleichermaßen verteilen. Hervorgehoben sei noch die stärkste Annäherung zum Verhältnis 0,0030 jeweils im Juni 2017 und 2018.

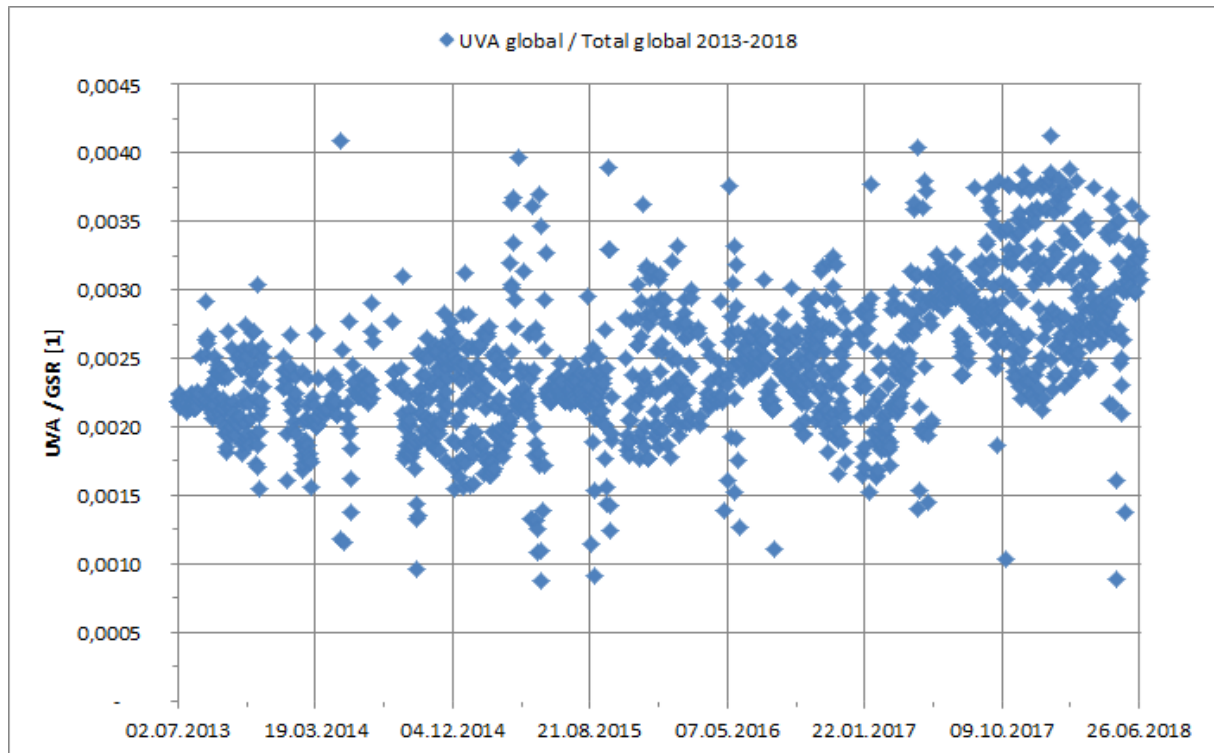


Abb. 34: Verhältnis der globalen UVA-Tagesdosen zu den globalen totalen Tagesdosen

In Abb. 35 sind die Verhältnisse der globalen erythemgewichteten Tagesdosen zu den globalen totalen Tagesdosen im Zeitraum von 2013 bis 2018 dargestellt. Zwischen 2013 und 2018 sieht man jährlich ähnliche Werte. Im Zeitintervall von 2013 bis 2018 sind Werte zwischen 0,00005 und 0,0004 gemessen worden. Durch die großen Unterschiede von UVB Tagesdosis (kJ-Bereich) und GSR Tagesdosis (10000kJ-Bereich) ist die Verhältnis-Bereich sensible auf Ungenauigkeiten.

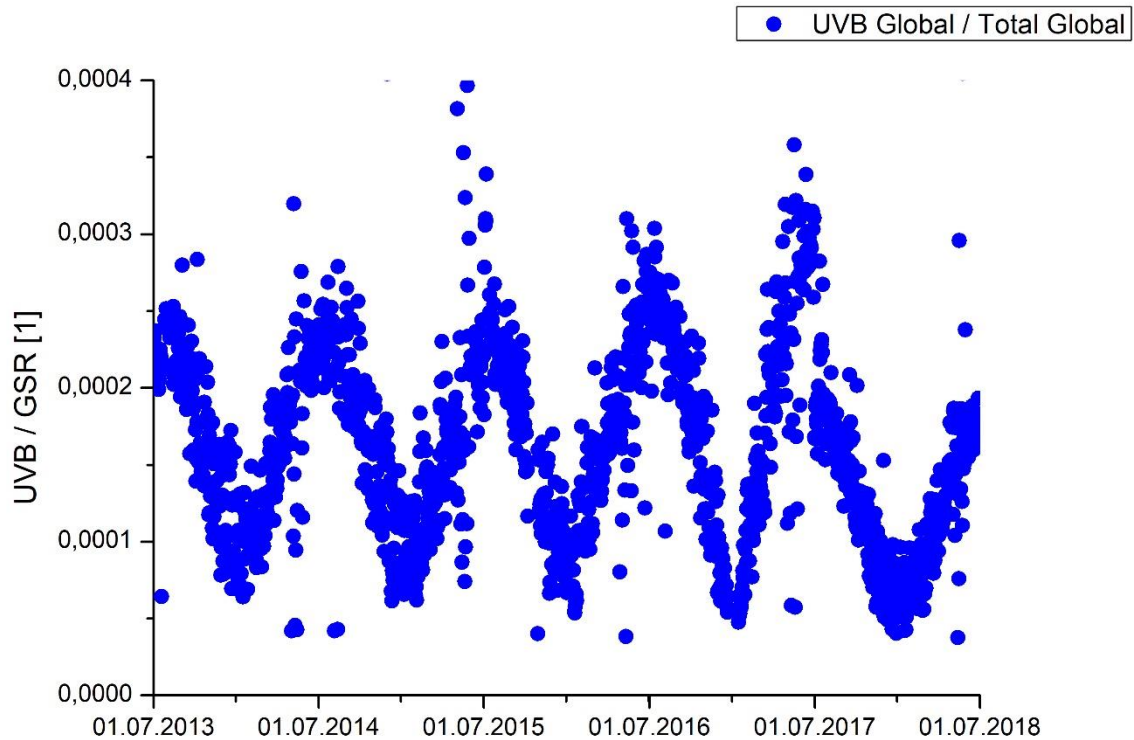


Abb. 35: Verhältnis der globalen erythemgewichteten Tagesdosen zu den globalen totalen Tagesdosen

4.4.1 Monatsübersicht für Tagesdosen der totalen Strahlung

In Abb. 36-38 sind für jedes Kalendermonat zwischen 2013 und 2018 die kleinste (Min), die mittlere (Mittel) und die größte (Max) Tagesdosis, sowie die Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tagesdosen der globalen totalen Strahlung (Abb. 36), der diffusen totalen UV-Strahlung (Abb. 37) und der direkten totalen Strahlung (Abb. 38) dargestellt. Die Werte korrelieren miteinander und der Jahresgang wiederholt sich ähnlich. In den Sommermonaten findet man relativ zu den anderen Jahreszeiten die größten Unterschiede zwischen den Perzentilen. In den Monaten Juni, Juli und August werden relativ zu den Monaten November, Dezember und Jänner höhere Werte gemessen. Der Mittelwert der globalen totalen Strahlung (Abb. 36) liegt im Sommer bei 25000 kJ/m². Der Mittelwert der diffusen totalen Strahlung (Abb. 37) liegt im Sommer bei 15000 kJ/m². Der Mittelwert der direkten totalen Strahlung (Abb. 38) liegt im Sommer bei 10000 kJ/m².

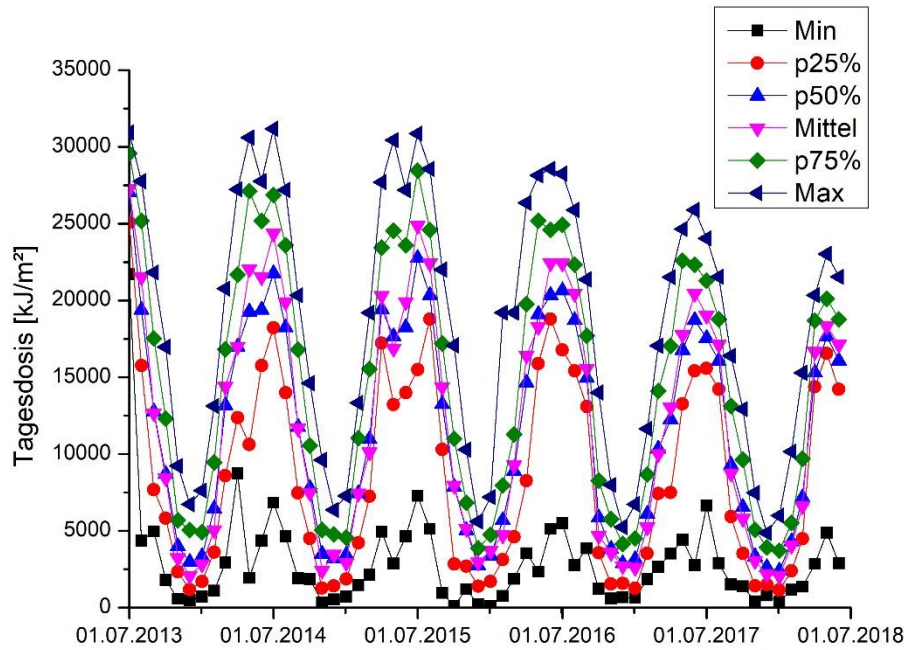


Abb. 36: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessene Tagesdosis, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % und Mittelwert (Mittel) der globalen totalen Strahlung für jedes Kalendermonat

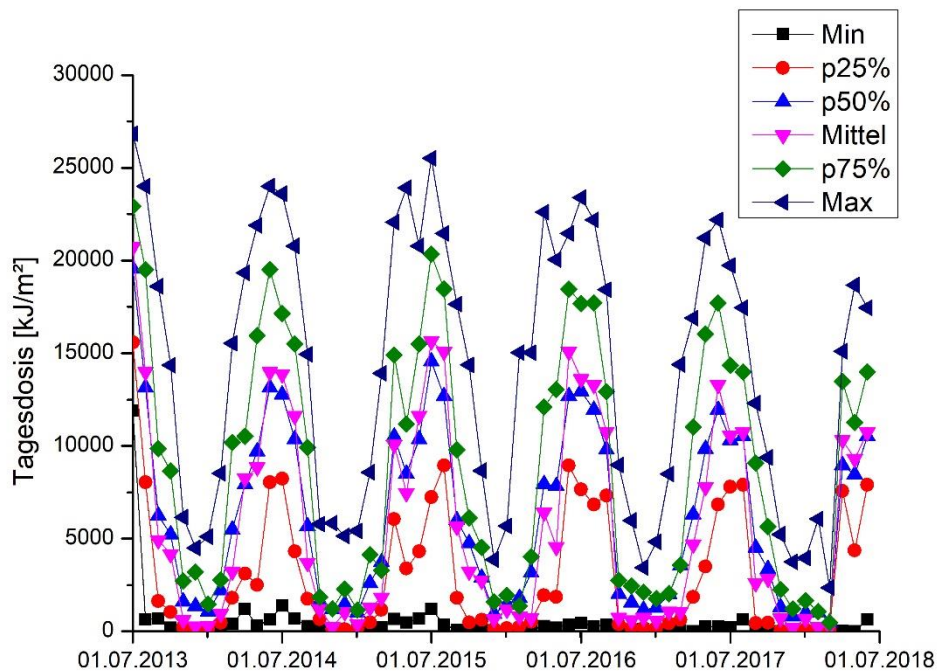


Abb. 37: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tagesdosis, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % und Mittelwert (Mittel) der diffusen totalen Strahlung für jedes Kalendermonat

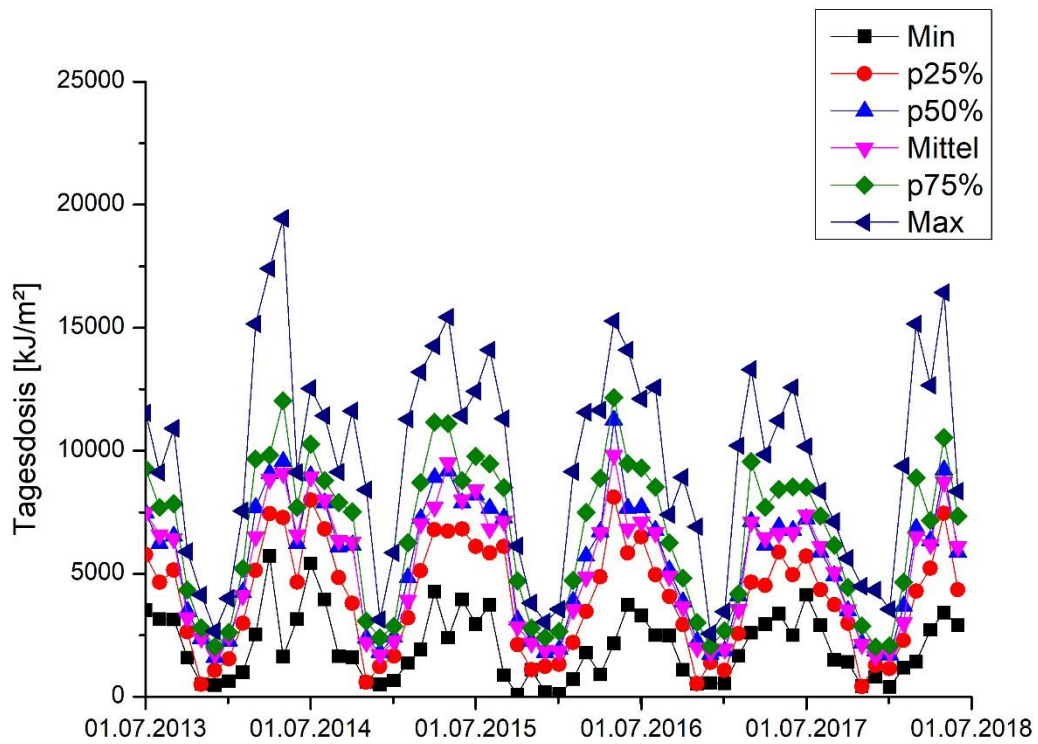


Abb. 38: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessene Tagesdosis, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % und Mittelwert (Mittel) der direkten totalen Strahlung für jedes Kalendermonat

4.4.2 Stündlicher Verlauf der GSR-Strahlung im Juni

Nachfolgend sind die durchschnittlichen Stundenwerte im Juni aus dem Messzeitraum 2014 bis 2018 der globalen GSR-Strahlung (Abb. 39) und der diffusen GSR-Strahlung (Abb. 40) dargestellt.

Global: Die ersten Messwerte wurden bei Sonnenaufgang um 5 Uhr und die letzten bei Sonnenuntergang um 21 Uhr gemessen. Die Höchstwerte wurden zwischen 11 und 13 Uhr verzeichnet und erreichten im Mittelwert bis zu 900 W/m^2 (Abb. 39). Die Mittagswerte variieren über den Zeitraum 2014 bis 2018 zwischen 1000 W/m^2 , gemessen im Juni 2018, und 1200 W/m^2 , gemessen im Juni 2014.

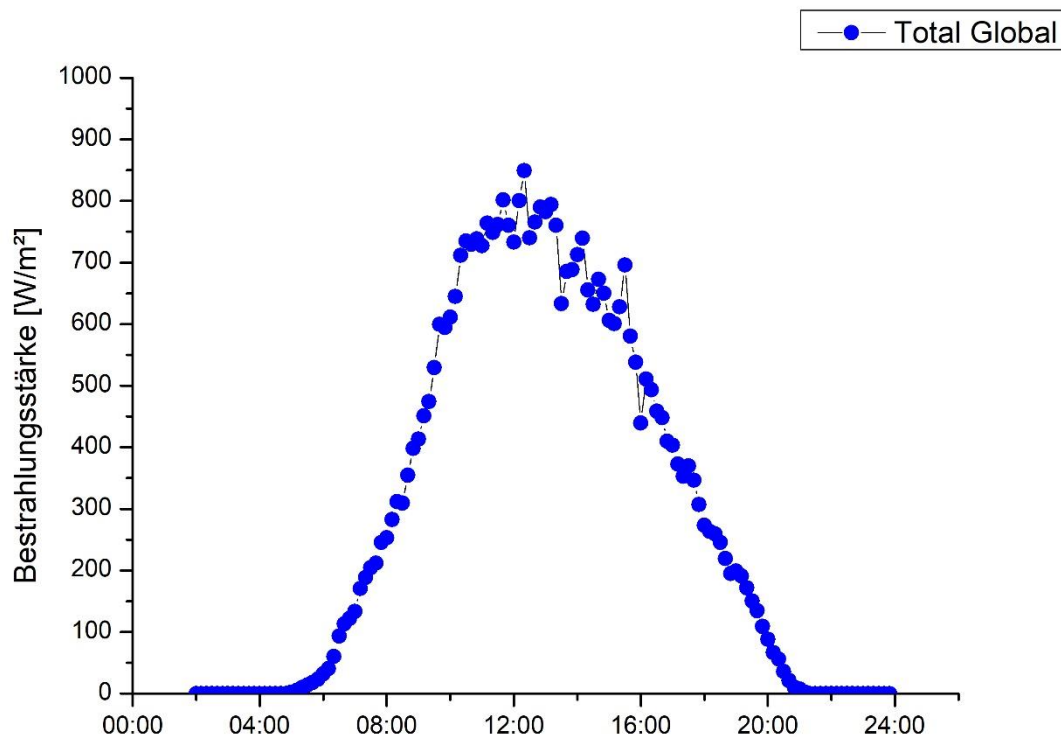


Abb. 39: Mittlere Bestrahlungsstärke der globalen GSR-Strahlung zu jeder Stunde im Juni .

Diffus: Die ersten Messwerte wurden bei Sonnenaufgang um 5 Uhr und die letzten bei Sonnenuntergang um 21 Uhr gemessen. Die Höchstwerte wurden zwischen 12 und 14 Uhr verzeichnet und erreichten im Mittelwert bis zu 300 W/m^2 (Abb. 39). Die Mittagswerte variieren über den Zeitraum 2014 bis 2018 zwischen 350 W/m^2 , gemessen im Juni 2015, und

400 W/m², gemessen im Juni 2014.

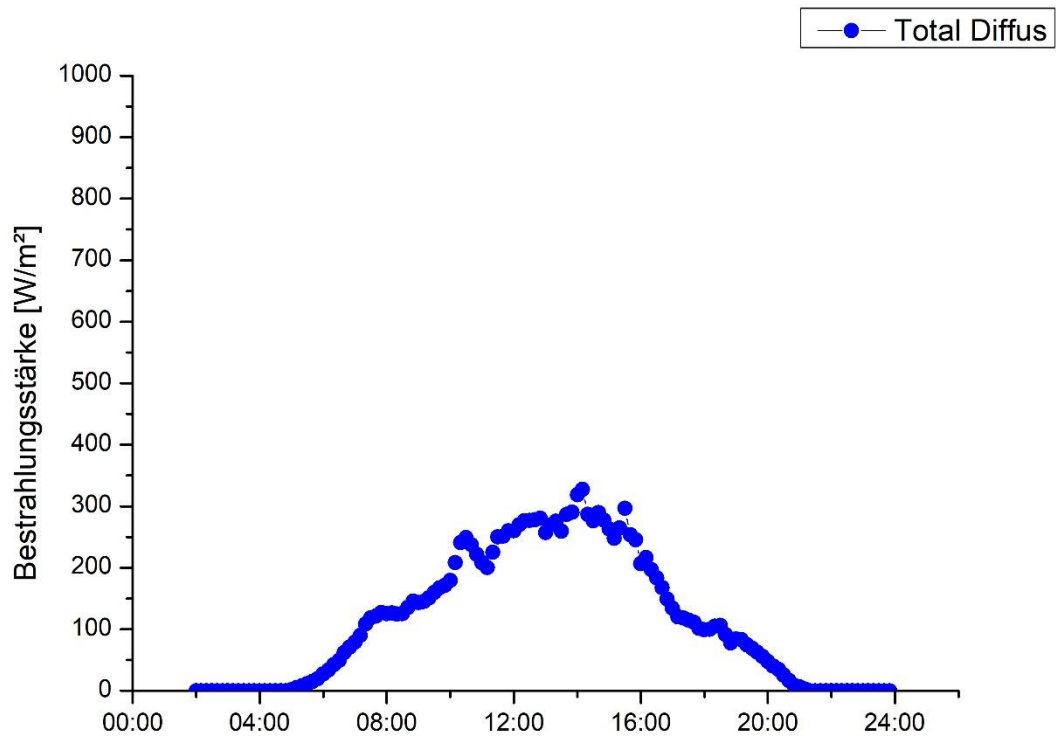


Abb. 40: Mittlere Bestrahlungsstärke der diffusen GSR-Strahlung zu jeder Stunde im Juni.

4.5 Übersicht 2013 bis 2018

Die mittleren Tagesdosen der totalen und diffusen Strahlungsanteile wurden im Zeitraum von 2013 bis 2018 berechnet und die maximalen sowie die minimalen mittleren Tagesdosen aus der Messperiode ermittelt. Abb. 41 stellt die mittleren Tagesdosen der totalen und der diffusen UVA-Strahlung grafisch dar. Die dazugehörigen Werte befinden sich in Tab. 1. Der totale Strahlungsanteil ist jeden Monat höher als der diffuse Strahlungsanteil. Beide Strahlungsanteile weisen in den Sommermonaten die höchsten Werte und zugleich größten Unterschiede auf und in den Wintermonaten sind diese am niedrigsten und am kleinsten.

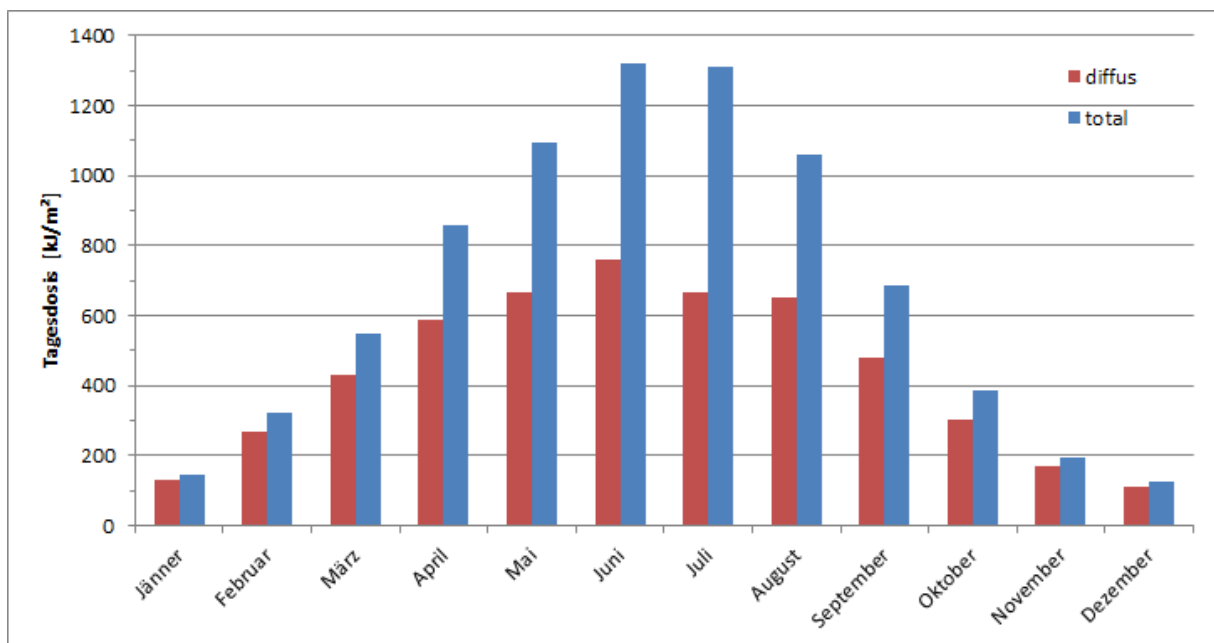


Abb. 41: Mittlere Tagesdosen der totalen und diffusen UVA-Strahlung

Monat	Tagesdosis total			Tagesdosis diffus		
	Mittel	von	bis	Mittel	von	bis
	[kJ]	[kJ]	[kJ]	[kJ]	[kJ]	[kJ]
Jänner	145,8	72,8	176,9	130,8	66,9	156,2
Februar	321,1	299,0	344,1	270,0	243,9	287,9
März	549,7	498,3	586,9	429,4	385,1	474,8
April	860,0	710,6	1059,3	586,1	490,8	709,4
Mai	1093,7	953,7	1194,4	668,4	575,3	728,4
Juni	1319,1	1059,8	1442,3	759,2	631,2	816,7
Juli	1308,3	1226,4	1393,5	664,7	526,5	739,7
August	1059,7	985,3	1119,3	653,7	555,0	718,0
September	685,6	536,8	838,5	480,2	369,4	557,2
Oktober	387,7	352,2	438,2	303,5	260,8	341,5
November	196,0	163,6	246,7	168,2	138,9	210,3
Dezember	126,4	58,3	156,7	110,7	49,9	134,8

Tab. 1: Mittlere Tagesdosen der totalen und diffusen UVA-Strahlung

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Sonnenstrahlung, insbesondere solare UV-Strahlung, hat vielfältige Auswirkungen auf die Entwicklung und das Leben von Vögeln. Trotzdem findet man in der Literatur keine Arbeiten, die die natürlichen Strahlungsverhältnisse in Bezug auf Vögel beschreiben. Auch in der 2. Tierhaltungsverordnung gibt es bezüglich der Vogelhaltung keine Vorgaben über die UV-Bestrahlungsverhältnisse für eine artgerechte Haltung. Im zweiten Teil dieser Diplomarbeit wurden daher Messwerte der solaren UVB- und UVA-Strahlung in Bezug auf Vögel analysiert und in Relation zu Messwerten der Gesamt-Strahlung – auch totale solare Strahlung (TSS) genannt – gestellt.

Dafür wurden die gemessene globale- und diffuse- UV-Strahlung und die berechneten direkten Anteile der UVA-, UVB- und TSS-Tagesdosen herangezogen und als Monats- und Tagesübersichten in tabellarischer und grafischer Form dargestellt. Dies ermöglicht eine genaue quantitative Beschreibung der natürlichen Strahlungsverhältnisse im Laufe des Jahres östlich der Alpen in Österreich.

Die globale Strahlung stellt daher die Strahlungsverhältnisse in der „prallen“ Sonne und die diffuse Strahlung jene Strahlung im beschatteten Bereich dar. Demzufolge entspricht die globale Strahlung den Verhältnissen auf freiem Feld oder freier Wiese und die diffuse Strahlung den Verhältnissen in lockerer höherer Vegetation (Umgebung von Büschen oder Bäumen). In dichter und hoher Vegetation, wo auch der Himmel verdeckt ist, können die Strahlungswerte bis auf 0,1 % der globalen Strahlung reduziert sein.

Die Tagesdosen sind für permanent notwendige photobiologische Effekte wie die Vitamin D Synthese, die von der UVB-Strahlung initiiert wird, relevant. Für das Wachstum und die Entwicklung von Vögeln sowie auch der Eier wird Vitamin D benötigt. Daher ist für eine physiologische Entwicklung UVB-Strahlung bei Vogelhaltung zugänglich zu machen. Bezugnehmend wurde bei den Messungen der globalen erythemgewichteten Strahlung Höchstwerte von 4200 J/m^2 bis 4800 J/m^2 gemessen. Die diffuse erythemgewichtete Strahlung wies Höchstwerte von 2700 J/m^2 bis 3000 J/m^2 auf. Im Winter bzw. zum Zeitpunkt der geringsten Sonnenzeit wurden meist Werte um 0 J/m^2 jeweils für die globale- und auch diffuse erythemgewichtete Strahlung erreicht.

In der Tagesübersicht wurden im Juni Werte zwischen 26 bis 35 W/m^2 für die globale- und

Werte zwischen 19 bis 23 W/m² für die diffuse UVB-Strahlung erreicht. Zwischen 21 und 5 Uhr entsprechen die Werte jeweils 0 W/m², weil keine Sonnenbestrahlung vorhanden ist.

Aufgrund der Fähigkeit von Glas die UVB-Strahlung komplett zu absorbieren und je nach Glasart, farbigen Additiven und Eisengehalt den transmittierten Anteil von UVA-Strahlung zu variieren, ist eine Vogelhaltung in Gefangenschaft innerhalb eines Raums mit nur Fenstern ohne besondere Anpassungen als gesundheitsgefährdend zu betrachten.

Die Bestrahlungsstärke entspricht der Helligkeit und die Verhältnisse von UVA-, UVB- und TSS-Bestrahlungsstärken zueinander stellen sich als Lichtfarben dar. Das Verständnis der Farbwahrnehmung bzw. des Sehens von Vögeln ist insbesondere von Bedeutung, weil der Mensch bei der Tierhaltung zum Teil starken Einfluss auf das Sehen der Vögel nehmen kann. Obwohl manche Aspekte wie die Flickerfrequenz zwischen 100 und 120 Hz in der 2. Tierhaltungsverordnung bereits berücksichtigt werden, gibt es seit der letzten Änderung der Mindestanforderungen an die Haltung von Vögeln im Jahr 2016 mittlerweile neuere Erkenntnisse zur Wahrnehmung der Vögel. Beispielsweise wird die Farbwahrnehmung der Vögel gesetzlich nicht geregelt bzw. wird auf die spektrale Verteilung der Beleuchtung keine Rücksicht genommen. Jedenfalls müsste das komplette UVA-Spektrum im Hinblick auf die Wahrnehmung zur Verfügung stehen.

Bezugnehmend auf die Helligkeit wurden Werte zwischen 60 bis 65 W/m² für die globale- und Werte zwischen 40 bis 45 W/m² für die diffuse globale UVA-Strahlung im stündlichen Vergleich im Juni gemessen. Zwischen 21 und 5 Uhr entsprechen die Werte jeweils 0 W/m², weil keine Sonnenbestrahlung vorhanden ist.

In Hinsicht auf die Farben wurden die Verhältnisse der globalen UVA-Strahlung zu den totalen Tagesdosen verglichen, wobei das Verhältnis der Bestrahlungsstärken im Bereich von 0,01 und darunter liegt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem wolkenlosen Himmel die diffuse UVA-Strahlung mit ca. 35 % beteiligt ist und die restlichen 65 % entsprechen der direkten UVA-Strahlung. Im Winter sowie auch bei einem bedeckten Himmel beträgt der diffuse Anteil nahezu immer 100 % und der direkte UVA-Strahlungsanteil ist vernachlässigbar.

Auf dem Boden erweisen sich Bäume mit der Fähigkeit etwa 90-95 % der UV-Strahlung zu absorbieren, 5-9 % zu reflektieren und < 0,1 % durch die Blätter zu transmittieren als besonders effektiv, um die UV-Strahlung auf der Erdoberfläche zu reduzieren. Eine

Absorption von 90-95 % der gemessenen stündlichen Höchstwerte der globalen UVA-Strahlung würde bei Werten bis zu 65 W/m^2 eine Messung von $3\text{-}4 \text{ W/m}^2$ auf der Erdoberfläche ergeben. Demzufolge haben sich Vogelarten u.a. der Vegetation angepasst. Das beinhaltet einerseits die Fähigkeit UV-Strahlung wahrzunehmen wie die kleinen Vogelarten, die sich durch die Baumkronen oder Gebüsche mit deren unterschiedlichen UV- bzw. Lichtverhältnissen manövrieren können.

Andererseits können Vögel durch die Von-Kries-Adaptation zwei sich überlappende unterschiedliche Strahlungsspektren zu einem konstanten Farbeindruck umwandeln. In dem Sinne verfügen Vögel auch über die Fähigkeit der Farbdiskriminierung mittels der Carotinoide in den Zapfenöltröpfchen, die eine Verschiebung der Farbwahrnehmung bewirken.

Vögel verfügen je nach Vogelart über unterschiedliche Anteile an Stäbchen fürs Sehen im Dunkeln und vier Zapfenarten und Doppelzapfen fürs Farbsehen und dementsprechend haben sie unterschiedliche Anforderungen an eine artgerechte Wahrnehmung. Zusätzlich können sie auch UV-Strahlung aufgrund jener Zapfen, denen die Carotinoide fehlen, wahrnehmen. Zudem ist die Wahrnehmung der UV-Strahlung auch von der Augengröße abhängig und somit nur kleineren Vögeln vorbehalten.

Ob und inwiefern UV-Strahlung mit Hilfe des Magnetismus zur Orientierung am Magnetfeld der Erde von Bedeutung ist, wird momentan noch erforscht. Dem gegenüber steht der zirkadiane Rhythmus, der erlernte Verhaltensweisen unabhängig von der UV-Strahlung macht. Der genaue Einfluss auf die Orientierung auf der Erde muss noch weiter untersucht werden.

Mit Sicherheit kann man davon ausgehen, dass UV-Strahlung für die Nahrungssuche bzw. Futteraufnahme und zur Partnerauswahl mitverantwortlich ist. Über die Schädigungen an Vögeln hervorgerufen durch die UV-Strahlung gibt es derzeit keine Studien.

6 Zusammenfassung

Solare UVB, UVA und die totale Strahlung sind maßgeblich an der Entwicklung des Vogelkörpers und seiner Erhaltung sowie auch der Vogelei, der Wahrnehmung, Nahrungssuche und Partnerauswahl beteiligt. Dazu wurden Messungen von direkter und diffuser Strahlung in einer Zeitspanne zwischen 2013 und 2018 durchgeführt und diese in Relation zueinander gesetzt. Auffallend ist, dass abgesehen von den größeren Unterschieden wie beispielsweise zwischen den globalen UVA-Tagesdosen und globalen erythemgewichteten Tagesdosen die Verhältnisse innerhalb der jeweiligen Kategorie und Wellenlänge über das fünfjährige Zeitfenster mit nur geringen Unterschieden gleichmäßig geblieben sind. Um klimatische Änderungen genauer festhalten zu können, müssten die Messungen über einen größeren Zeitraum verglichen werden. Die durchgeführten Messungen weisen aufgrund regelmäßiger und genauer Kalibrierungen eine hohe Genauigkeit auf und eignen sich daher sehr gut für zukünftige Vergleiche mit weiteren Jahren.

UVB-Strahlung ist beim Vogel in der Entwicklung der Eier und Küken von großer Bedeutung und kann bei einem Mangel zu Knochenmissbildungen führen. UVA-Strahlung ist hingegen eher an der Farbwahrnehmung des Vogels beteiligt. Kleine Vögel können UV-Strahlung sehen und alle Vögel sehen die Farben bei unterschiedlichen Wellenlängen als der Mensch. Bei der Nahrungssuche und -aufnahme sowie auch bei der Partnerauswahl ist die UV-Reflexion bedeutsam. Die Farbwahrnehmung bei geschlossenen Fenstern ist für den Menschen problemlos möglich, aber da Glas unterschiedlich gut UV-Strahlung absorbiert, ist bei einer artgerechten Haltung von Vögeln innerhalb von Räumen auch auf eine ausreichende Beleuchtung mit niedrigen Wellenlängen zu achten. Vögel haben sich ihrem Habitat angepasst und sind dazu befähigt, ihre Farbwahrnehmung im Flug anzupassen. Abschließend ist festzuhalten, dass Variationen der UV-Strahlung in der Atmosphäre kurzfristig zu einer Verhaltensänderung der Vögel führen und längerfristig sich in der Evolution widerspiegeln werden.

7 Summary

Solar UVB, UVA and total radiation are instrumental in the development of the bird's body and its conservation as well as bird eggs, perception, foraging and partner selection. For this purpose, measurements of direct and diffuse radiation were carried out in a period between 2013 and 2018 and put them in relation to each other. It is striking that apart from the larger differences, such as the global UVA daily doses and global erythema-weighted daily doses, the ratios within each category and wavelength have remained even with only minor differences over the five-year window of time. In order to be able to record climatic changes more precisely, the measurements would have to be compared over a longer period of time. The measurements carried out have a high level of accuracy due to regular and precise calibrations and are therefore very well suited for future comparisons with other years.

UVB radiation is of great importance in the development of eggs and chicks in birds and, if there is a deficiency, can lead to bone deformities. UVA radiation, on the other hand, is more involved in the color perception of the bird. Small birds can see UV radiation and all birds see colors at different wavelengths than humans. UV reflection is important in foraging, feeding and when choosing a partner. Color perception with closed windows is easily possible for humans, but since different types of glass absorb UV radiation to different extents, adequate lighting with low wavelengths must also be ensured if birds are kept indoors in a species-appropriate manner. Birds have adapted to their habitat and are able to adjust their color perception in flight. In conclusion, variations in UV radiation in the atmosphere will lead to behavioral changes in birds in the short term and will be reflected in evolution over the longer term.

8 Literaturverzeichnis

ANDERSSON, S.; AMUNDSEN, T. (1997): Ultraviolet color vision and ornamentation in bluethroats. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 264(1388): 1587-1591.

ANDERSSON, S.; ÖRNBORG, J., ANDERSSON, M. (1998): Ultraviolet sexual dimorphism and assortative mating in blue tits. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 265(1395): 445-450.

BARBER, C.L.; PRESCOTT, N.B.; JARVIS, J.R.; LE SUEUR C.; PERRY, G.C.; WATHES, C.M. (2006): Comparative study of the photopic spectral sensitivity of domestic ducks (*Anas platyrhynchos domesticus*), turkeys (*Meleagris gallopavo gallopavo*) and humans. *British Poultry Science* 47(3): 365-374.

BARTELS, T.; LÜTGEHARM, J.H.; WÄHNER, M.; BERK, J. (2017): UV reflection properties of plumage and skin of domesticated turkeys (*Meleagris gallopavo f. dom.*) as revealed by UV photography. *Poultry Science* 96(12): 4134-4139.

BEAGLEHOLE, D.; CARTER, G.G. (1992): Antarctic skies. 2. characterization of intensity and polarization of skylight in a high albedo environment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 97(D2): 2597-2600.

BENNETT, A.T.D.; CUTHILL, I.C. (1994): Ultraviolet vision in birds: what is its function?. *Vision Research* 34(11): 1471-1478.

BENNETT, A.T.D.; CUTHILL, I.C.; PARTRIDGE, J.C.; LUNAU, K. (1997): Ultraviolet plumage colors predict mate preferences in starlings. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94(16): 8618-8621.

BENNETT, A.T.D.; THÉRY, M. (2007): Avian color vision and coloration: multidisciplinary evolutionary biology. *The American Naturalist* 169(1): 1-6.

BERNSTEIN, E.F.; SCHWARTZ, M.; VIEHMEYER, R.; AROCENA, M.S.; SAMBUCCO,

C.P.; KSENZENKO, S.M. (2006): Measurement of protection afforded by ultraviolet-absorbing window film using an in vitro model of photodamage. *Lasers in Surgery and Medicine* 38(4): 337-342.

BHOUMICK, A.; PAUL, G.; PAL, S.; BHATTACHARYA, R. (2009): Surface Map of UV Radiation in Tree Shade and its Dependence on Canopy Parameters.

BHOSALE, P.; SERBAN, B.; ZHAO, D.Y.; BERNSTEIN, P.S. (2007): Identification and metabolic transformations of carotenoids in ocular tissues of the japanese quail *coturnix japonica*. *Biochemistry* 46(31): 9050-9057.

BLAUSTEIN, A.R.; BELDEN, L.K. (2003): Amphibian defenses against ultraviolet-B radiation. *Evolution and Development* 5(1): 89-97.

BLAUSTEIN, A.R.; HAYS, J.B.; HOFFMAN, P.D.; CHIVERS, D.P.; KIESECKER, J.M.; LEONARD, W.P.; MARCO, A.; OLSON, D.H.; REASER, J.K.; ANTHONY, R.G. (1999): DNA repair and resistance to UV-B radiation in western spotted frogs. *Ecological Applications* 9(3): 1100-1105.

BLAUSTEIN, A.R.; HOFFMAN, P.D.; HOKIT, D.G.; KIESECKER, J.M.; WALLS, S.C.; HAYS, J.B. (1994): UV repair and resistance to solar UV-B in amphibian eggs: a link to population declines?. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 91(5): 1791-1795.

BLAUSTEIN, A.R.; KIESECKER, J.M.; CHIVERS, D.P.; ANTHONY, R.G. (1997): Ambient UV-B radiation causes deformities in amphibian embryos. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94(25): 13735-13737.

BLECHSCHMIDT, J. (2013): Messungen von Flickerfrequenz, Beleuchtungsintensität und spektraler Bestrahlungsstärke in Labor und Praxis: ein Beitrag zur Verbesserung der Haltungsbedingungen von Ziervögeln unter Kunstlicht. Diplomarbeit, Veterinärmedizinische Universität Wien.

BLUMENTHALER, M.; GRÖBNER, J.; HUBER, M.; AMBACH, W. (1996): Measuring

spectral and spatial variations of UVA and UVB sky radiance. *Geophysical Research Letters* 23(5): 547-550.

BRIDGES, C.D.B. (1972): The rhodopsin-porphyrin visual system. *Photochemistry of Vision. Handbook of Sensory Physiology* 7(1): 417-480.

BURKHARDT, D. (1996): Die Ultra-Violett-Tauglichkeit des Vogelauges und einige Konsequenzen. *The Science of Nature* 83(11): 492-497.

BURTT, E.H.; SCHROEDER, M.R.; SMITH, L.A.; SROKA, J.E.; MCGRAW, K.J. (2010): Colourful parrot feathers resist bacterial degradation. *Biology Letters* 7(2): 214-216.

CHÁBERA, P.; FUCIMAN, M.; HRÍBEK, P.; POLÍVKA, T. (2009): Effect of carotenoid structure on excited-state dynamics of carbonyl carotenoids. *Physical Chemistry Chemical Physics* 11(39): 8795-8803.

CHURCH, S.C.; BENNETT, A.T.D.; CUTHILL, I.C.; PARTRIDGE, J.C. (1998): Ultraviolet cues affect the foraging behaviour of blue tits. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 265(1405): 1509-1514.

DACKE, C.G.; SUGIYAMA, T.; GAY, C.V. (2015): Chapter 25: The role of hormones in the regulation of bone turnover and eggshell calcification. *Sturkie's Avian Physiology* Cambridge: Academic Press 6: 549-575.

DE GRUIJL, F.R. (1995): Impacts of a projected depletion of the ozone layer. *Consequences* 1(2): 1-20.

DOUGLAS R.H.; MARSHALL N.J. (1999): A review of vertebrate and invertebrate ocular filters. *Adaptive mechanisms in the ecology of vision*: 95-162.

DUARTE, I.; ROTTER, A.; MALVESTITI, A.; SILVA, M. (2009): The role of glass as a barrier against the transmission of ultraviolet radiation: an experimental study. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine* 25(4): 181-184.

- DYER, A.G. (1999): Broad spectral sensitivities in the honeybee's photoreceptors limit colour constancy. *Journal of Comparative Physiology A* 185(5): 445-453.
- ENDLER, J.A.; MIELKE, P.W. (2005): Comparing entire colour patterns as birds see them. *Biological Journal of the Linnean Society* 86(4): 405-431.
- EVANS, J.E.; CUTHILL, I.C.; BENNETT, A.T.D. (2006): The effect of flicker from fluorescent lights on mate choice in captive birds. *Animal Behaviour* 72(2): 393-400.
- FAIN, G.L.; MATTHEWS, H.R.; CORNWALL, M.C.; KOUTALOS, Y. (2001): Adaptation in vertebrate photoreceptors. *Physiological Reviews* 81(1): 117-151.
- GARRISON, L.M.; MURRAY, L.E.; DODA, D.D.; GREEN, A.E.S. (1978): Diffuse-direct ultraviolet ratios with a compact double monochromator. *Applied Optics* 17(5), 827-836.
- GOLDSMITH, T.H. (1990): Optimization, constraint, and history in the evolution of eyes. *The Quarterly review of Biology* 65(3): 281-322.
- GOLDSMITH, T.H.; COLLINS, J.S.; LICHT, S. (1984): The cone oil droplets of avian retinas. *Vision Research* 24(11): 1661-1671.
- GOVARDOVSKII, V.I.; FYHRQUIST, N.; REUTER, T.; KUZMIN, D.G.; DONNER, K. (2000): In search of the visual pigment template. *Visual Neuroscience* 17(4): 509-528.
- GRANT, R.H.; HEISLER, G.M. (1997): Obscured overcast sky radiance distributions for ultraviolet and photosynthetically active radiation. *Journal of Applied Meteorology* 36(10):1336-1345.
- GRANT, R.H.; HEISLER, G.M.; GAO, W. (1997): Ultraviolet sky radiance distributions of translucent overcast skies. *Theoretical and Applied Climatology* 58: 129-139.
- GRANT, R.H.; HEISLER, G.M.; GAO, W. (2002): Estimation of pedestrian level UV exposure under trees. *Photochemistry and Photobiology* 75(4): 369-376.

GRANT, R.H.; HEISLER, G.M.; GAO, W.; JENKS, M. (2003): Ultraviolet leaf reflectance of common urban trees and the prediction of reflectance from leaf surface characteristics. *Agricultural and Forest Meteorology* 120(1): 127-139.

HÄDER, D.P.; KUMAR, H.D.; SMITH, R.C.; WORREST, R.C. (2007): Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochemical & Photobiological Sciences* 6(3): 267-285.

HARRISON, G.J.; LIGHTFOOT, T. (2006): *Clinical avian medicine: Volume I*. Palm Beach: Spix Publishing, Inc.

HART, N.S. (2001): The visual ecology of avian photoreceptors. *Progress in Retinal and Eye Research* 20(5): 675-703.

HART, N.S.; HUNT, D.M. (2007): Avian visual pigments: characteristics, spectral tuning, and evolution. *The American Naturalist* 169(1): 7-26.

HILL, G.E.; DOUCET, S.M.; BUCHHOLZ, R.; (2005): The effect of coccidial infection on iridescent plumage coloration in wild turkeys. *Animal Behaviour* 69(2): 387-394.

HÖGLUND, J.; MITKUS, M.; OLSSON, P.; LIND, O.; DREWS, A.; BLOCH, N.I.; KELBER, A.; STRANDH, M. (2019): Owls lack UV-sensitive cone opsin and red oil droplets, but see UV light at night: Retinal transcriptomes and ocular media transmittance. *Vision Research* 158: 109-119.

HOLICK, M.F.; CHEN, T.C.; LU, Z.; SAUTER, E. (2007): Vitamin D and skin physiology: a D-lightful story. *Journal of Bone and Mineral Research* 22(2): 288-33.

HUNT, S.; CUTHILL, I.C.; BENNETT, A.T.D.; GRIFFITHS, R. (1999): Preferences for ultraviolet partners in the blue tit. *Animal Behaviour* 58(4): 809-815.

HUNT, S.; CUTHILL, I.C.; SWADDLE, J.P.; BENNETT, A.T.D. (1997): Ultraviolet and band-colour preferences in female zebra finches, *Taeniopygia guttata*. *Animal Behaviour* 54(6): 1383-1392.

IRELAND, W.; SACHER, R. (1996): The Angular Distribution of Solar Ultraviolet, Visible and Near-Infrared Radiation from Cloudless Skies. *Photochemistry and Photobiology* 63(4): 483-486.

JANE, S.D.; BOWMAKER, J.K. (1988): Tetrachromatic colour vision in the duck (*Anas platyrhynchos* L.): microspectrophotometry of visual pigments and oil droplets. *Journal of Comparative Physiology A* 162(2): 225-235.

JONES, M.P.; PIERCE, K.E.; WARD, D. (2007): Avian vision: a review of form and function with special consideration to birds of prey. *Journal of Exotic Pet Medicine* 16(2): 69-87.

JORDAN, B. (2017): UV-B radiation and plant life: molecular biology to ecology/edited by Brian R. Jordan, Professor of Plant Biotechnology, Lincoln University, New Zealand. Wallingford: CABI.

KAVET, R.; BRAIN, J. (2021): Cryptochromes in Mammals and Birds: Clock or Magnetic Compass?. *Physiology (Bethesda)* 36(3):183-194.

KELBER, A.; VOROBYEV, M.; OSORIO, D. (2003): Animal colour vision: behavioural tests and physiological concepts. *Biological Reviews* 78(1): 81-118.

KEMP, D.J.; HERBERSTEIN, M.E.; FLEISHMAN, L.J.; ENDLER, J.A.; BENNETT, A.T.D.; DYER, A.G.; HART, N.S.; MARSHALL, J.; WHITING, M.J. (2015): An integrative framework for the appraisal of coloration in nature. *The American Naturalist*, 185(6): 705-724.

KIESECKER, J.M.; BELDEN, L.K.; SHEA, K.; RUBBO, M.J. (2004): Amphibian decline and emerging disease: What can sick frogs teach us about new and resurgent diseases in human populations and other species of wildlife?. *American Scientist* 92(2): 138-147.

KÜHN, J.; SCHUTKOWSKI, A.; HIRCHE, F.; BAUR, A.C.; MIELENZ, N.; STANL, G.I. (2014): Non-linear increase of vitamin D content in eggs from chicks treated with increasing exposure times of ultraviolet light. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 148: 7-13.

KULLAVANIJAYA, P.; LIM, H.W. (2005): Photoprotection. *Journal of the American Academy of Dermatology* 52(6): 937-958.

LAND, M.F.; NILSSON, D.E. (2012): *Animal eyes*. Oxford: Oxford University Press.

LIEBMAN, P.A.; GRANDA, A.M. (1975): Super dense carotenoid spectra resolved in single cone oil droplets. *Nature* 253(5490): 370-372.

LIND, O.; DELHEY, K. (2015): Visual modelling suggests a weak relationship between the evolution of ultraviolet vision and plumage coloration in birds. *Journal of Evolutionary Biology* 28(3): 715-722.

LIND, O.; MITKUS, M.; OLSSON, P.; KELBER, A. (2013): Ultraviolet vision in birds: the importance of transparent eye media. *Journal of Experimental Biology* 216(10): 1819-1826.

LIPINSKI, V.M.; DOS SANTOS, T.G.; SCHUCH, A.P. (2016): An UV-sensitive anuran species as an indicator of environmental quality of the Southern Atlantic Rainforest. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 165: 174-181.

LITYŃSKA, Z.; SCHMALWIESER, W.A.; BAIS, A.; ETTLER, K.; GRÖBNER, J.; KÖPKE, J.; KRZYŚCIN, J.; DEN OUTER, P.; VERDEBOUT, J.; ZIPOLI, G.; BISZCZUK-JAKUBOWSKA, J. (2002): COST Action 726 – UV Radiation and Life. Luxembourg: Publications office of the European Union.

MAIER, E.J. (1994): Das UV-Sehen der Vögel: Neue Ergebnisse über den spektralen Sehbereich der Vögel. *Journal of Ornithologie* 135(2): 179-192.

MCGRAW, K.J. (2006): *The mechanics of carotenoid coloration in birds*. Cambridge: Harvard University Press.

NA, H.R.; HEISLER, G.M.; NOWAK, D.J.; GRANT, R.H. (2014): Modeling of urban trees' effects on reducing human exposure to UV radiation in Seoul, Korea. *Urban Forestry & Urban Greening* 13(4): 785-792.

NORREN, D.V.; VOS, J.J. (1974): Spectral Transmission of the human ocular media. *Vision Research* 14(11): 1237-1244.

O'DANIELS, S.T.; KESLER, D.C.; MIHAIL, J.D.; WEBB, E.B.; WERNER, S.J. (2017): Functional visual sensitivity to ultraviolet wavelengths in the Pileated Woodpecker (*Dryocopus pileatus*), and its influence on foraging substrate selection. *Physiology & Behavior* 174: 144-154.

ÖDEEN, A.; HÅSTAD, O. (2013): The phylogenetic distribution of ultraviolet sensitivity in birds. *BMC Evolutionary Biology* 13: 36.

ÖDEEN, A.; HÅSTAD, O. (2003): Complex distribution of avian color vision systems revealed by sequencing the SWS1 opsin from total DNA. *Molecular Biology and Evolution* 20(6): 855-861.

ÖDEEN, A.; HÅSTAD, O.; ALSTRÖM, P. (2011): Evolution of ultraviolet vision in the largest avian radiation - the passerines. *BMC Evolutionary Biology* 11(1): 313-321.

OLSSON, P.; LIND, O.; MITKUS, M.; DELHEY, K.; KELBER, A. (2021): Lens and cornea limit UV vision of birds - a phylogenetic perspective. *Journal of Experimental Biology* 224(20): 243129.

OLSSON, P.; MITKUS, M.; LIND, O. (2016): Change of ultraviolet light transmittance in growing chicken and quail eyes. *Journal of Comparative Physiology A* 202(5): 329-335.

OSORIO, D.; VOROBYEV, M. (2005): Photoreceptor spectral sensitivities in terrestrial animals: adaptations for luminance and colour vision. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 272(1574): 1745-1752.

PINZON-RODRIGUEZ, A.; MUHEIM, R. (2021): Cryptochrome expression in avian UV cones: revisiting the role of CRY1 as magnetoreceptor. *Scientific Reports* 11(1):12683.

PUGH, E.N.; NIKONOV, S.; LAMB, T.D. (1999): Molecular mechanisms of vertebrate

photoreceptor light adaptation. *Current Opinion in Neurobiology* 9(4): 410-418.

QI, Y.; BAI, S.; HEISLER, G.M. (2003): Changes in ultraviolet-B and visible optical properties and absorbing pigment concentrations in pecan leaves during a growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*. 120(1-4): 229-240.

QI, Y.; HEISLER, G.M.; GAO, W.; VOGELMANN, T.C.; BAI, S. (2010): Characteristics of UV-B radiation tolerance in broadleaf trees in southern USA. In: GAO W., SLUSSER J.R., SCHMOLDT D.L. (eds): *UV Radiation in Global Climate Change*: 509-530. Berlin, Heidelberg: Springer.

RICK, M.; WOODHOUSE, S.J. (2016): The effect of UVB radiation on serum vitamin D and ionized calcium in the african spoonbill (*Platalea alba*). *Journal of Zoo and Wildlife Medicine* 47(2): 447-456.

SANDMANN, H.; STICK C. (2014): Spectral and spatial UV sky radiance measurements at a seaside resort under clear sky and slightly overcast conditions. *Photochemistry and Photobiology* 90(1): 225-232.

SCHAFTENAAR, W.; VAN LEEUWEN, J.P.T.M. (2015): The influence of ultraviolet-B radiation on the growth of Marabou stork (*Leptoptilos crumeniferus*) nestlings in relation to plasma calcium, phosphorus, and vitamin D₃ concentrations. *Journal of Zoo and Wildlife Medicine* 46(4): 682-690.

SCHAUBERGER, G. (1992): Anisotropic model for the diffuse biologically-effective irradiance of solar UV-radiation on inclined surfaces. *Theoretical and Applied Climatology*. 46: 45-51.

SCHIEDT, K. (1998): Absorption and metabolism of carotenoids in birds, fish and crustaceans. Basel: Birkhäuser Verlag.

SCHUCH, A.P.; DOS SANTOS, M.B.; LIPINSKI, V.M.; PERES, L.V.; DOS SANTOS, C.P., CECHIN, S.Z.; SCHUCH, N.J.; PINHEIRO, D.K.; DA S. LORETO, E.L. (2015): Identification of influential events concerning the Antarctic ozone hole over southern Brazil and the biological

effects induced by UVB and UVA radiation in an endemic treefrog species. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 118: 190-198.

SCHUCH, A.P.; LIPINSKI, V.M.; SANTOS, M.B.; SANTOS, C.P.; JARDIM, S.S.; CECHIN, S.Z., LORETO, E.L.S. (2015): Molecular and sensory mechanisms to mitigate sunlight-induced DNA damage in treefrog tadpoles. *Journal of Experimental Biology* 218(19): 3059-3067.

SCHUTKOWSKI, A.; KRÄMER, J.; KLUGE, H.; HIRCHE, F.; KROMBHOLZ, A.; THEUMER, T.; STANGL, G.I. (2013): UVB exposure of farm animals: study on a food-based strategy to bridge the gap between current vitamin D intakes and dietary targets. *Plos One* 8(7): e69418.

SCHMALWIESER, A. (2016): Messungen der solaren UVA-Strahlung und Vergleich zur erythemgewichteten UV-Strahlung und zur totalen solaren Strahlung am Standort Wien. Jahresbericht (1. Juli 2014 bis 30. Juni 2015), Veterinärmedizinische Universität Wien.

SCHMALWIESER, A. (2020): Possibilities to estimate the personal UV radiation exposure from ambient UV radiation measurements. *Photochem. Photobiol. Sci.* 19(10): 1249-1261.

SCHMALWIESER, A.; KLOTZ, B.; SCHWARZMANN, M.; BAUMGARTNER, D.; SCHREDER, J.; SCHAUBERGER, G.; BLUMTHALER, M. (2019): The Austrian UVA-Network. *Photochemistry and Photobiology* 95(5): 1258-1266.

SCHMALWIESER, A.; WEIHS, P.; SCHAUBERGER, G. (2018): UV Effects on Living Organisms. In: MEYERS R. (eds): *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. New York, New York: Springer.

SHAWKEY, M.D.; IGIC, B.; ROGALLA, S.; GOLDENBERG, J.; CLUSELLA-TRULLAS, S.; D'ALBA, L. (2017): Beyond colour: consistent variation in near infrared and solar reflectivity in sunbirds (*Nectariniidae*). *The Science of Nature* 104(9): 78-83.

SIEFFERMAN, L.; HILL, G.E. (2005): UV-blue structural coloration and competition for nestboxes in male eastern bluebirds. *Animal Behaviour* 69(1): 67-72.

SIITARI, H.; HONKAVAARA, J.; VIITALA, J. (1999): Ultraviolet reflection of berries attracts foraging birds: A laboratory study with redwings (*Turdus iliacus*) and bilberries (*Vaccinium myrtillus*). Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences 266(1433): 2125-2129.

SIMIC, S.; FITZKA, M.; SCHMALWIESER, A.; WEIHS, P.; HADZIMUSTAFIC, J. (2011): Factors affecting UV irradiance at selected wavelengths at Hoher Sonnblick. Atmospheric Research 101(4): 869-878.

SMITH, M.A.; KAPRON, C.M.; BERRILL, M. (2000): Induction of photolyase activity in wood frog (*Rana sylvatica*) embryos. Photochemistry and Photobiology 72(4): 575-578.

STEIGERWALD, K. (2006): Sehleistung des Vogelauges: Perspektiven und Konsequenzen für die Haltung von Zier- und Nutzgeflügel unter Kunstlichtbedingungen. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München.

TEDORE, C.; NILSSON, DE. (2019): Avian UV vision enhances leaf surface contrasts in forest environments. Nature Communications 361(10): 1-15.

THURMAN, L.L.; GARCIA, T.S.; HOFFMAN, P.D. (2014): Elevational differences in trait response to UV-B radiation by long-toed salamander populations. Oecologia 175(3): 835-845.

TIAN, X.Q.; CHEN, T.C.; LU, Z.; SHAO, Q.; HOLICK, M.F. (1994): Characterization of the translocation process of vitamin D₃ from the skin into the circulation. Endocrinology 135(2): 655-661.

TOOMEY, M.B.; COLLINS, A.M.; FREDERIKSEN, R.; CORNWALL, M.C.; TIMLIN, J.A.; CORBO, J.C. (2015): A complex carotenoid palette tunes avian colour vision. Journal of The Royal Society Interface 12(111): 20150563.

TOOMEY, M.B.; LIND O.; FREDERIKSEN R.; CURLEY R.W.JR.; RIEDL K.M.; WILBY D.; SCHWARTZ S.J.; WITT C.C.; HARRISON E.H.; ROBERTS N.W.; VOROBYEV M.; MCGRAW K.J.; CORNWALL M.C.; KELBER A.; CORBO J.C. (2016): Complementary shifts in photoreceptor spectral tuning unlock the full adaptive potential of ultraviolet vision in birds.

eLIFE 5: 15675.

TUCHINDA, C.; SRIVANNABOON S.; LIM, H.W. (2006): Photoprotection by window glass, automobile glass, and sunglasses. *Journal of the American Academy of Dermatology* 54(5): 845-854.

VOROBYEV, M. (2003): Coloured oil droplets enhance colour discrimination. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 270(1521): 1255-1261.

VOROBYEV, M.; OSORIO, D. (1998): Receptor noise as a determinant of colour thresholds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 265(1394): 351-358.

WANG, W.; GEIGER, J.H.; BORHAN, B. (2014): The photochemical determinants of color vision: revealing how opsins tune their chromophore's absorption wavelength. *BioEssays* 36(1), 65-74.

WERNER S.J.; BUCHHOLZ R.; TUPPER S.K.; PETTIT S.E.; ELLIS J.W. (2014): Functional significance of ultraviolet feeding cues in wild turkeys. *Physiology & Behavior* 123: 162-167.

WILBY, D.; TOOMEY, M.B.; OLSSON, P.; FREDERIKSEN, R.; CORNWALL, M.C.; OULTON, R.; KELBER, A.; CORBO, J.C.; ROBERTS, N.W. (2015): Optics of cone photoreceptors in the chicken (*Gallus gallus domesticus*). *Journal of The Royal Society Interface* 12(111): 20150591.

WILKIE, S.E.; ROBINSON, P.R.; CRONIN, T.W.; POOPALASUNDARAM, S.; BOWMAKER, J.K.; HUNT, D. (2000): Spectral tuning of avian violet- and ultraviolet-sensitive visual pigments. *Biochemistry* 39(27): 7895-7901.

WILTSCHKO, R.; NIEßNER, C.; WILTSCHKO, W. (2021): The Magnetic Compass of Birds: The Role of Cryptochrome. *Frontiers in Physiology* (12): 667000.

WYSZECKI, G.; STILES, W.S. (2000): Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae. New York: Wiley.

YANG, X.; HEISLER, G.M.; MONTGOMERY, M.E.; SULLIVAN, J.H.; WHEREAT, E.B.; MILLER, D.R. (1994): Radiative properties of hardwood leaves to ultraviolet irradiation. *International Journal of Biometeorology* 38(2): 60-66.

YOKOYAMA, S. (2000): Molecular evolution of vertebrate visual pigments. *Progress in Retinal Eye Research* 19(4): 385-419.

YOSHIMURA, H.; ZHU, H.; WU, Y., MA, R. (2009): Spectral properties of plant leaves pertaining to urban landscape design of broad-spectrum solar ultraviolet radiation reduction. *International Journal of Biochemistry* 54(2): 179-191.

8.1 Links

2. Tierhaltungsverordnung 2. Auflage §4 Abs. 4:

<https://www.ris.bka.gv.at/eli/bgbl/II/2004/486> (14.03.2019).

Chemie.de:

<http://www.chemie.de/lexikon/Fluoreszenz.html> (26.8.2018).

Dr. Jetske Ultee:

<https://www.dr-jetskeultee.de/produkt-beraten/wirkt-uva-strahlung-haut/> (19.1.2019).

Philipp SCHENK GmbH Wien:

<http://www.schenk.co.at/produkte/detail/produkt/sternpyranometer/> (28.10.2018).

Physiologische Besonderheiten bei Vögeln und Reptilien der Veterinärmedizinischen Fakultät – Universität Leipzig:

<http://www.vmf.uni-leipzig.de/ik/wphysiologie/Exoten2010.pdf> (14.7.2018).

Präzisions Glas & Optik GmbH:

<https://www.pgo-online.com/de/1737.html> (23.9.2018).

SCHOTT Technical Glass Solutions GmbH:

<https://www.schott.com/borofloat/german/attribute/optical/index.html> (23.9.2018).

Wikipedia zur Sonnenstrahlung:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenstrahlung> (23.9.2018).

Wikipedia zur Ultraviolettstrahlung:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Ultraviolettstrahlung> (7.7.2018).

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Sonnenspektrum

Wikipedia zur Sonnenstrahlung:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenstrahlung> (23.9.2018).

Abb. 2: Breitbandmessgeräte zur Messung der UV-Bestrahlungsstärke mit und ohne Schattenband (oben) und das Verhältnis zwischen diffuser und globaler erythemgewichteter UV-Bestrahlungsstärke an einem Sommertag mit unterschiedlicher Bewölkung in Wien, Österreich (unten).

SCHMALWIESER, A. (2020): Possibilities to estimate the personal UV radiation exposure from ambient UV radiation measurements. Photochem. Photobiol. Sci. 19(10): 1249-1261.

Abb. 3: Himmelsstrahlung bei klarem Himmel

SANDMANN, H.; STICK C. (2014): Spectral and Spatial UV Sky Radiance Measurements at a Seaside Resort Under Clear Sky and Slightly Overcast Conditions. Photochemistry and Photobiology 90(1): 225-232.

Abb. 4: Himmelsstrahlung bei leicht bewölktem Himmel

SANDMANN, H.; STICK C. (2014): Spectral and spatial UV sky radiance measurements at a seaside resort under clear sky and slightly overcast conditions. Photochemistry and Photobiology 90(1): 225-232.

Abb. 5: Farbempfindlichkeiten beim Menschen im Vergleich zum Star

Physiologische Besonderheiten bei Vögeln und Reptilien der Veterinärmedizinischen Fakultät
– Leipzig:

<http://www.vmf.uni-leipzig.de/ik/wphysiologie/Exoten2010.pdf> (14.7.2018).

Abb. 6: a) Öltröpfchen in der Hühnerretina; b) Einzelkegel-Photorezeptoren und deren Empfindlichkeiten bei c) VS- und d) UVS-Spezies

TOOMEY, M.B.; LIND O.; FREDERIKSEN R.; CURLEY R.W.JR.; RIEDL K.M.; WILBY D.; SCHWARTZ S.J.; WITT C.C.; HARRISON E.H.; ROBERTS N.W.; VOROBYEV M.; MCGRAW K.J.; CORNWALL M.C.; KELBER A.; CORBO J.C. (2016): Complementary shifts in photoreceptor spectral tuning unlock the full adaptive potential of ultraviolet vision in birds. *eLIFE* 5: 15675.

Abb. 7: UV-Strahlung und kurzwelliges Licht (300-550 nm) und deren Transmission bei verschiedenen gewöhnlichen Glasarten (Daten von Guardian Industries Corp, Auburn Hills, Mich)

TUCHINDA, C.; SRIVANNABOON S.; LIM, H.W. (2006): Photoprotection by window glass, automobile glass, and sunglasses. *Journal of the American Academy of Dermatology* 54(5): 845-854.

Abb. 8: Transmission von UV-Strahlung und kurzwelliges Licht (300-550 nm) bei gewöhnlichem Glas und verschiedenen Farben (Daten von Guardian Industries Corp, Auburn Hills, Mich)

TUCHINDA, C.; SRIVANNABOON S.; LIM, H.W. (2006): Photoprotection by window glass, automobile glass, and sunglasses. *Journal of the American Academy of Dermatology* 54(5): 845-854.

Abb. 9: UVA-Sensoren auf der Messplattform

SCHMALWIESER, A. (2020): Possibilities to estimate the personal UV radiation exposure from ambient UV radiation measurements. *Photochem. Photobiol. Sci.* 19(10): 1249-1261.

Abb. 10: Beispiel für die Kalibriermatrix des UVA-Sensors ohne (links) und mit Schattenband (rechts)

SCHMALWIESER, A. (2016): Messungen der solaren UVA-Strahlung und Vergleich zur erythem-gewichteten UV-Strahlung und zur totalen solaren Strahlung am Standort Wien.

Jahresbericht (1. Juli 2014 bis 30. Juni 2015), Veterinärmedizinische Universität Wien.

Abb. 11: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der globalen UVA-Tageshöchstwerte für jedes Kalendermonat

Abb. 12: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der diffusen UVA-Tageshöchstwerte für jedes Kalendermonat

Abb. 13: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der direkten UVA-Tageshöchstwerte für jedes Kalendermonat

Abb. 14: Tagesdosen der totalen UVA-Strahlung (UVA-Sensor ohne Schattenband)

Abb. 15: Tagesdosen der diffusen UVA-Strahlung (UVA-Sensor mit Schattenband)

Abb. 16: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der gesamten UVA-Tagesdosis für jedes Kalendermonat

Abb. 17: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der diffusen UVA-Tagesdosis für jedes Kalendermonat

Abb. 18: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der direkten UVA-Tagesdosis für jedes Kalendermonat

Abb. 19: Mittlere Bestrahlungsstärke der globalen UVA-Strahlung zu jeder Stunde im Juni ab 2014 bis 2018

Abb. 20: Mittlere Bestrahlungsstärke der diffusen UVA-Strahlung zu jeder Stunde im Juni ab

2014 bis 2018

Abb. 21: Anteile der diffusen UVA-Strahlung an der globalen UVA-Strahlung

Abb. 22: Tagesdosen der globalen erythemgewichteten UV-Strahlung (Biometer ohne Schattenband)

Abb. 23: Tagesdosen der diffusen erythemgewichteten Strahlung (Biometer mit Schattenband)

Abb. 24: Verhältnisse der diffusen und globalen erythemgewichteten Tagesdosen

Abb. 25: Verhältnisse der globalen erythemgewichteten Tagesdosen zu den globalen UVA-Tagesdosen

Abb. 26: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Bestrahlungsstärke, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der globalen erythemgewichteten UV-Strahlung für jedes Kalendermonat

Abb. 27: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Bestrahlungsstärke, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der diffusen erythemgewichteten UV-Strahlung für jedes Kalendermonat

Abb. 28: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Bestrahlungsstärke, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der direkten erythemgewichteten UV-Strahlung für jedes Kalendermonat

Abb. 29: Mittlere Bestrahlungsstärke der globalen UVB-Strahlung zu jeder Stunde im Juni ab 2014 bis 2018

Abb. 30: Mittlere Bestrahlungsstärke der diffusen UVB-Strahlung zu jeder Stunde im Juni ab 2014 bis 2018

Abb. 31: Tagesdosen der globalen totalen Strahlung (Pyranometer ohne Schattenband)

Abb. 32: Tagesdosen der diffusen totalen Strahlung (Pyranometer mit Schattenband)

Abb. 33: Tagesdosen der direkten totalen Strahlung

Abb. 34: Verhältnis der globalen UVA-Tagesdosen zu den globalen totalen Tagesdosen

Abb. 35: Verhältnis der globalen erythemgewichteten Tagesdosen zu den globalen totalen Tagesdosen

Abb. 36: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der globalen totalen UVA Strahlung für jedes Kalendermonat

Abb. 37: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der diffusen totalen UVA Strahlung für jedes Kalendermonat

Abb. 38: Kleinster (Min) und größter (Max) gemessener Tageshöchstwert, sowie Perzentile p-25 %, p-50 % (Median) und p-75 % der Tageshöchstwerte und Mittelwert (Mittel) der direkten totalen UVA Strahlung für jedes Kalendermonat

Abb. 39: Mittlere Bestrahlungsstärke der globalen GSR-Strahlung zu jeder Stunde im Juni ab 2014 bis 2018

Abb. 40: Mittlere Bestrahlungsstärke der diffusen GSR-Strahlung zu jeder Stunde im Juni ab 2014 bis 2018

Abb. 41: Mittlere Tagesdosen der totalen und diffusen UVA-Strahlung

8.3 Tabellenverzeichnis:

Tab. 1: Mittlere Tagesdosen der totalen und diffusen UVA-Strahlung

8.4 Abkürzungsverzeichnis

AM

Air mass

asl

above sea level

C

Konzentration des Öltröpfchen-Carotinoid-Pigments

Cry1a

Cryptochrom 1a

DNA/DNS

deoxyribonucleic acid/Desoxyribonukleinsäure

e.g.

exempli gratia – Zum Beispiel

E

ellipsoid

et al.

et alii – und andere (Personen)

FAD

Flavin-Adenin-Dinukleotid

GSR

Global solar radiation

H

Tagesdosis

IR

Infrared radiation

Low-E

Low-emissivity

LWS

long-wavelength-sensitive cone

MSP

Mikrospektrophotometrie

MWS

medium-wavelength-sensitive cone

NASA

National Aeronautics and Space Administration

OD

oil droplet

OMI

ozone monitoring instrument

OMT

ocular media transmittance

OS

outer segment

p-Elektronenkonjugation

Überlappung eines p-Orbitals mit dem eines anderen über eine σ -Bindung

PVB

Polyvinylbutyral

$s\text{-max}_\lambda$

Die Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit für einen Photorezeptor oder für ein photorezeptives Pigment

SWS

short-wavelength-sensitive cone

sws1

visual pigment of the UVS/VS cone

sws2

visual pigment of the SWS cone

SZA

solar zenith angle

TSS

Totale solare Strahlung

UV

ultraviolet light

UVS/VS

ultraviolet- or violet-sensitive cone

VIS

visible spectrum

$\lambda_{T0.5}$ -Wert

wavelength of 50% transmittance (of ocular media)

9 Danksagung

Ich bedanke mich herzlich bei meinem Betreuer **Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Alois Schmalwieser** für die Unterstützung während meiner Diplomarbeit.

Mein weiterer Dank geht an das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus für die zur Verfügung gestellten Daten.

Abschließend bedanke ich mich noch bei der Medizinischen Universität Innsbruck für die Bearbeitung der Daten.