



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Quantifikation der arbeitsbedingten persönlichen UV-
Strahlenexposition in Österreich“

verfasst von / submitted by

Florian Lubitz, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2023 / Vienna 2023

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 855

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Geographie

Betreut von / Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Robert Peticzka

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Kurzfassung

Die hochenergetische UV-Strahlung ist Teil des solaren, auf die Erdoberfläche treffenden, Spektrums. Außenarbeiter sind berufsbedingt, zwangsläufig der UV-Strahlung ausgesetzt. UV-Strahlenexposition schädigt die DNA und bedingt ein gewisses Risiko, an nicht-melanozytären Hautkrebs (NMSC) zu erkranken. Das Risiko lässt sich über die Messung der persönlichen UV-Strahlenexposition (PE) quantifizieren. Um die NMSC-Art Plattenepithelkarzinom als Berufskrankheit, in das Allgemeine Sozialversicherungsgesetz (ASVG) aufnehmen zu können, ist die exakte Bestimmung der PE von Außenarbeitern notwendig.

Im Zuge der Masterarbeit wurde die PE von Außenarbeitern hochgradig UV-Strahlenexponierter Berufsgruppen und Tätigkeiten bestimmt. Die Messungen wurden mittels Polysulfonfilm-Dosimeter durchgeführt und durch Sekundärdaten ergänzt. So konnten, **1160 komplette Datensätze** generiert werden. Die Ergebnisse der Analyse zeigen hohe Variabilität der PE-Tagesdosen (0 – 45 *standard erythema dose* [SED]). Tage hoher PE (> 10 SED) wurden bei fast allen untersuchten Tätigkeiten gemessen. Probanden der klassischen Tätigkeiten des Baus erhielten die höchsten durchschnittlichen (Maßzahl = Median) PE-Tagesdosen (**11,69 SED/d**). Westösterreichische Außenarbeiter (**5,86 SED/d**) erhielten durchschnittlich doppelt so hohe PE-Tagesdosen wie ostösterreichische Außenarbeiter (**2,45 SED/d**).

Abstract

Highly energetic UV radiation is part of the solar spectrum that hits the earth's surface. Due to their occupation, outdoor workers are inescapably forced to endure UV radiation (UVR). UVR damages the DNA and poses a certain risk to develop non-melanoma skin cancer (NMSC), which can be estimated via personal UVR exposure (PE) measurements. The quantification of outdoor worker PE is necessary to justify the inclusion of the NMSC-type squamous-cell carcinoma (SCC) into the "Allgemeine Sozialversicherungsgesetz (ASVG)", as an occupational disease.

The determination of PE of highly UV exposed occupational groups and their work activities was undertaken as part of the master's thesis. The measurements were performed using polysulphone film (PSF) dosimeters and augmented by collecting secondary data. Thus, **1160 complete records** could be generated. The results of the analysis show high variability of daily PE (0 – 45 standard erythemal dose [SED]). Days of high PE (>10 SED) were measured in nearly all work activities studied. Study subjects performing classical construction activities received the highest median daily PE (**11,69 SED**). West Austrian outdoor workers (**5,86 SED/d**) received twice the median amount of daily PE compared to east Austrian outdoor workers (**2,45 SED/d**).

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vi
1 Einleitung und Relevanz.....	1
2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	2
3 Theoretische Grundlagen.....	6
3.1 Erdsystem	6
3.2 Strahlungshaushalt	9
3.2.1 Solare und optische Strahlung	9
3.2.2 UV-Strahlung.....	11
3.2.3 Parameter und Wechselwirkungen des (UV) Strahlungshaushalt.....	13
3.2.3.1 Streuung.....	13
3.2.3.2 Absorption	14
3.2.3.3 Reflexion/Albedo	15
3.2.3.4 Astronomische Parameter	16
3.2.3.5 Atmosphärische Parameter	18
3.2.3.6 Topgraphische Parameter	21
3.2.4 Strahlung und Bestrahlung	23
3.2.4.1 Direkte Strahlung.....	23
3.2.4.2 Diffuse Strahlung.....	24
3.2.4.3 Albedo Strahlung/reflektierte Strahlung	25
3.2.4.4 Globale Strahlung.....	27
3.2.4.5 Ambiente Strahlung.....	28
3.3 Lebewesen im Strahlungsfeld.....	29
3.4 Wirkungsweise der UV-Strahlung auf den Menschen.....	30
3.4.1 Erythem	31
3.4.1.1 Wirkungsspektrum des Erythems	31
3.4.1.2 Personal Exposure (PE)	35
3.4.1.3 Exposure Ratio To Ambient (ERTA)	35
3.4.1.4 Minimal Erythema Dose (MED).....	35
3.4.1.5 Standard Erythema Dose (SED)	35
3.4.1.6 High Risk Day (HRD).....	36
3.4.2 UVR-Expositionsrichtwerte.....	36
3.4.3 Hauttypen	37

3.4.4	Fakultative Bräunung	39
3.4.4.1	Sofortpigmentierung.....	39
3.4.4.2	Spätpigmentierung	40
3.4.5	Hyperplasia.....	40
3.4.6	Vitamin D.....	40
3.4.7	Nicht-melanozytärer Hautkrebs	41
3.4.7.1	Basalzellkarzinom BCC.....	43
3.4.7.2	Aktinische Keratose.....	44
3.4.7.3	Plattenepithelkarzinom SCC	44
3.4.8	Zusammenfassung Wirkungsweise der UV-Strahlung auf den Menschen	45
3.5	Strahlungsmessung	45
3.5.1	Spektralradiometer.....	46
3.5.2	Pyranometer.....	47
3.5.3	Dosimeter.....	47
3.5.3.1	Chemische Dosimeter	47
3.5.3.2	Biologische Dosimeter	49
3.5.3.3	Elektronische Dosimeter	49
3.5.3.4	Dosimetervergleich.....	49
4	Methodik.....	50
4.1	Literaturrecherche.....	51
4.2	Forschungsdesign.....	51
4.2.1	Messaufbau, Messablauf	52
4.2.2	Messstandorte.....	54
4.2.2.1	Sommer 2022	55
4.2.2.2	Winter 2023.....	57
4.3	Messdaten	57
4.3.1	PSF	57
4.3.2	X-2000	58
4.3.3	Testo 174T und Testo 174H	59
4.3.4	Weitere aufgenommene Daten	59
4.3.5	Daten der ambienten Bestrahlung	61
4.3.6	Datenbearbeitung.....	62
4.4	Statistische Analyse	65
5	Ergebnisse.....	66
5.1	Grundlegende Übersicht der Datenbasis.....	67
5.2	Ergebnisse nach erklärenden Variablen.....	69

5.2.1	Messdauer, Arbeitszeit	69
5.2.2	Jahresverlauf	72
5.2.3	Monate	73
5.2.4	Körperstelle der Messung.....	75
5.2.5	Beschattungsindex	81
5.2.6	Regionen.....	84
5.2.7	Seehöhe und Höhenstufen	89
5.3	Berufsgruppen	93
5.4	Tätigkeiten	95
5.5	Jahresexposition	99
6	Diskussion	102
6.1	Implikationen der Messdauer.....	103
6.2	Implikationen der Pause.....	104
6.3	Die Implikationen der statistischen Tests und Modellrechnungen	104
6.4	Implikationen der Gewichtung und Normierung.....	107
6.5	Implikationen der Stichprobengröße	107
6.6	Beantwortung der Forschungsfragen.....	108
6.7	Limitationen verwendeter Messgeräte.....	110
6.8	Statistische Limitationen der Datengrundlage	112
6.9	Limitationen der Methode	114
7	Schlussfolgerungen.....	115
8	Ausblick.....	116
9	Literaturverzeichnis	116
10	Abbildungsverzeichnis	131
11	Tabellenverzeichnis.....	134

1 Einleitung und Relevanz

Die grundsätzliche Notwendigkeit dieser Studie ist, dass das Plattenepithelkarzinom (SSC), ein nicht-melanozytärer Hautkrebs und dessen Vorerkrankung, die aktinische Keratose, in Österreich nicht als Berufskrankheiten klassifiziert sind. Viele Arbeiter und Arbeiterinnen (e.g., Bauarbeiter, Gärtner, Erntehelfer, Skilehrer) müssen sich zwangsläufig in Freien aufhalten, um ihrer Tätigkeit nachgehen zu können. Das gegebene Strahlungsfeld, sowie die typische Berufsbekleidung, bedingen hohe UV-Strahlenexpositionen der Beschäftigten (Siani et al., 2011; Vernez et al., 2012).

In den 1970er Jahren begannen Wissenschaftler diverser Disziplinen die Zusammenhänge zwischen ultravioletter Strahlung (UV-Strahlung), arbeitsbedingter UV-Exposition und den Körperstellen, des gehäufteten Auftretens von Hautkrebsen zu erforschen. Als Pionier gilt Frederick Urbach, der in seinen 1969 und 1971 erschienenen Studien „Geographic pathology of skin cancer“ und „*Geographic distribution of skin cancer*“ beschrieb, dass Plattenepithelkarzinome an den Stellen des Kopfes auftreten die meist UV-Strahlenexponiert sind (Urbach 1971; Schmalwieser et al., 2021). Davis et al. (1976) zeigten die Fähigkeit von Polysulfon als tragbares, leichtes Dosimeter zu fungieren. Corbett et al. (1978) führten Messungen der persönlichen UV-Strahlenexposition (*Personal Exposure* [PE]) und der ambienten UV-Bestrahlung (UVR) durch, um die *Exposure Ratio to Ambient* (ERTA), das Verhältnis von PE und ambienter UVR, zu bestimmen. Weiters entwickelten sie erste Tagebücher zur systematischen Erfassung und Gewichtung sekundärer Parameter. Aus der Weiterentwicklung dieser entwickelten sich Algorithmen die heute als Beurteilungsgrundlage zur Anerkennung von berufsbedingten, nicht-melanozytären Hautkrebsen (NMSC) verwendet werden (Elsner et al., 2014; Wittlich et al., 2016; DGUV, 2020; Schmalwieser et al., 2021). Seit 2015 sind multiple aktinische Keratosen (MAK) und Plattenepithelkarzinome (SSC) in Deutschland anerkannte Berufskrankheiten (DGUV, 2020). Es ist wissenschaftlicher Konsens, dass UV-Strahlung die ätiologische Bedingung, der Entwicklung der Hautkrebsart SSC ist (Narayanan et al., 2010; Didona et al., 2018). Quantifizierungsmöglichkeiten der persönlichen UV-Strahlenexposition, Strahlungsräume topographisch, klimatisch vielfältiger Regionen, statistische Analyse und hautbiologische Vorgänge treffen, bei der Belegung von MAK und SSC, als Berufskrankheiten in Österreich zusammen. Der geographische Aspekt ist von großer Bedeutung (Urbach, 1971; Krishnamurthy, 1992; Narayanan et al., 2010; Schmalwieser et al., 2010; Schmalwieser & Siani 2018). Die Höhenlage und gebirgige Topographie beeinflussen Strahlungsräume allgemein und UV-Exposition im Speziellen, sowie damit verbundene Gesundheitsrisiken. Der Höheneffekt der UV-Strahlung ist gut erforscht, gilt, als bewiesen und findet sich in Kalibrationsmodellen von UV-

Expositionsmessgeräten und UV-Expositionsmodellen wieder (Knuschke & Barth, 1996; Blumthaler et al., 1997; Krins et al., 2001; Narayanan et al., 2010; Wang et al., 2014; WHO, 2016; Schmalwieser et al., 2021). Die komplexen Strahlungsräume in gebirgigen Regionen sind bekannt. Die Quantifizierung der Bestrahlungskomponenten, atmosphärischen Parametern und volatilen Wetterbedingungen sowie die Erfassung der humanbiometeorologischen Effekte und das Zusammenspiel aller Komponenten gestaltet sich als Herausforderung (Dirnhirn, 1964; Rieder et al., 2010; Podesser, 2007; McGregor, 2011).

Um die, der UV-Strahlenexposition geschuldeten Hauterkrankungen, sprich das Plattenepithelkarzinom (SSC), sowie dessen Vorerkrankung, die multiple aktinische Keratose (MAK) als Berufskrankheiten anerkennen zu können, fehlen breite und lange Messreihen der UV-Strahlenexposition vieler Berufsgruppen und Berufe. Im Rahmen des, von dem Autor mitbetreuten, AUVA-Projektes „SEDiment“ soll diese Datenlücke gefüllt werden. Das Interesse der AUVA besteht (derzeit) darin, durchschnittliche jährliche, an den Probanden gemessene, UV-Strahlenexpositionswerte zu katalogisieren, um den Bezug zwischen berufsbedingter UVR-Exposition und dem Ausbrechen der Hauterkrankungen herzustellen, und im Krankheitsfall bessere Konditionen bieten zu können.

2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Primär behandelt die Masterarbeit die PE-Messwerte der Feldmessungen und die aufgenommenen erklärenden Variablen im statistischen Sinn. Statistisch berechnete Maßzahlen werden definierten Schwellenwerten gegenübergestellt, der Erklärungsgehalt der erklärenden Variablen wird beleuchtet. Dafür müssen grundlegende Zusammenhänge definiert und daraus resultierende Gesetzmäßigkeiten quantifizierbar begründet werden.

Das Plattenepithelkarzinom (SSC) sowie die Vorerkrankung multiple Aktinische Keratose (MAK) werden ätiologisch durch Überexposition der auf die Haut einwirkenden UV-Strahlung bedingt (Narayanan et al., 2010; Didona et al., 2018). Das UVR-induzierte Erythem ist die photobiologische Reaktion der Haut bei Überexposition (DGUV, 2020). Die in der Haut erythemwirksame Energie der UV-Strahlenexposition kann quantifiziert und in den Einheiten J_{Ery}/m^2 sowie SED ($1 \text{ SED} = 100 J_{Ery}/m^2$) angegeben werden. Die, auf die Haut einwirkenden, kumulativen, erythemwirksame Energie der UV-Strahlenexposition steht in direktem Zusammenhang mit dem Risiko an SSC zu erkranken (Schmitt et al., 2010; Schmitt et al., 2011; GMBI, 2013; Calzavara-Pinton et al., 2015; Moan et al., 2015; DGUV, 2020). Die persönliche UVR-

Exposition kann mit geeigneten Messgeräten (e.g., Polysulfonfilm-Dosimetern) gemessen werden (Diffey, 2002; Schmalwieser et al., 2021; Strehl et al., 2021). Es existieren begründete Schwellenwerte der erythemwirksamen UVR-Exposition, die das Risiko, an den Hautkrankheiten MAK und SSC zu erkranken, definieren. Das unbedenkliche UV-Expositionslimit eines 8-Stunden Arbeitstages wird mit **1 – 1,3 SED/d** angegeben (Moehrle et al., 2000; ICNIRP, 2004; Schmalwieser et al., 2021). Überschreitet die PE eines Probanden **10 SED pro Tag**, wird von einem *High Risk Day (HRD)* gesprochen, welcher im Verdacht steht besonders ausschlaggebend für die Erkrankung an bestimmten Hautkrebsen zu sein (Schmalwieser et al., 2010; Schmalwieser et al., 2021). Der Richtwert der arbeitsbedingten Jahresexposition von Außenarbeitern, auf Basis von UVR-Expositionsmessungen von Bauarbeitern (stark UV-exponiert), wird von der DGUV (2020) mit **300 SED/y** angegeben.

Die erythemwirksame UV-Bestrahlung nimmt **pro 1000 m**, um **10 – 20 %** zu (**Höheneffekt**) (Blumthaler et al., 1997; Schmucki und Philipona, 2002; Narayanan et al., 2010; WHO, 2016; IFA, 2021). Die **Beschattungsverhältnisse** haben einen signifikanten Einfluss auf die persönliche UVR-Exposition. Beschattete Umfelder verringern die erythemwirksame PE um **30 – 95 %**, im Vergleich zu stark exponierten Umfeldern (Gies et al., 1995; Narayanan et al., 2010; Siani et al., 2011; Schmalwieser et al., 2021).

Aufbauend auf den eben beschriebenen Definitionen und Zusammenhängen beschreiben die folgenden **Forschungsfragen** die Zielsetzung der Masterarbeit:

1. Wie hoch ist die erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter?

H1: Die durchschnittliche, erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter überschreitet, den Schwellenwert **HRD** von **10 SED/d**, da sich die Arbeiter, um ihrer Arbeit nachzugehen, im Freien aufhalten müssen und die meisten PE-Messungen im Alpenraum stattfinden.

2. Welchen Einfluss hat der Höheneffekt auf die erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter?

H2: Der Höheneffekt hat einen Einfluss auf die erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter. Pro **1000 m** erhöht sich die erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter um mindestens **10 %**.

3. Welchen Einfluss hat die ermittelte Beschattung des Arbeitsplatzes (Messort) auf die erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter?

H3: Die Beschattung des Arbeitsplatzes (Messort), definiert mit dem, durch Beobachtung und Expertenwissen ermittelten, Beschattungsindex, hat keinen Einfluss auf die durchschnittliche, erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter.

Neben der konkreten Beantwortung der Forschungsfragen, ist es das Ziel dieser Masterarbeit, die Ergebnisse der Feldmessungen aus dem Sommer 2022 und dem Winter 2023 zu präsentieren. Die kontinuierlichen Verbesserungen des Studiendesigns und der Erklärungsgehalt der Ergebnisse werden mittels geographischer, methodenkritischer, sowie statischer Perspektive beleuchtet, um ein holistisches Bild der UV-Strahlenexposition (UVR-Exposition) der österreichischen Arbeiterschaft zu vermitteln. Besonderer Fokus liegt auf der kritischen Auseinandersetzung mit dem Forschungsdesign. Die Brauchbarkeit zur statistischen Analyse und die Limitationen der Aussagekraft, der generierten persönlichen UVR-Expositionsdaten und Sekundärdaten werden mittels methodenkritischer Gesichtspunkte untersucht.

Hauptaugenmerk der Masterarbeit ist die Quantifizierung des wichtigsten, primären Parameters des NMSC, die persönliche UV-Strahlenexposition (Wittlich et al., 2016; Didona et al., 2018). Die Risikoanalyse des NMSC, von österreichischen Außenarbeitern kann als übergeordnetes, zukünftiges Ziel, an dem neben dem Autor einige weitere Kollegen arbeiten, betrachtet werden. Die Arbeit an so einem umfangreichen Thema kann grob in **drei Teilbereiche** geteilt werden. **Erstens**, die vorangegangene, keinesfalls abgeschlossene Grundlagenforschung, welche die Wirkung solarer Strahlung auf die menschliche Haut analysiert und klassifiziert. **Zweitens**, die tatsächlichen Möglichkeiten der direkten und indirekten UV-Strahlenexpositionsquantifizierung, sowie die statistische Analyse jener. **Drittens**, die Verortung der durch Messung und Analyse gewonnenen Erkenntnisse im System menschlicher Körper, und den kausalen und korrelaten Zusammenhängen mit der Zellbiologie der menschlichen Haut.

Diese Studie baut auf den primären Erkenntnissen des ersten Teilbereiches (Grundlagenforschung) auf und ist in erster Linie dem zweiten Teilbereich (Messung und Analyse der UV-Strahlenexposition) zuzuordnen. Der dritte Teilbereich (Verortung im System menschlicher Körper) wird in diesem Text tangential erörtert.

Der vorliegende Text ist im Wesentlichen in 5 große **Teilbereiche** aufgegliedert. **(i)** Im anschließenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen besprochen. **(ii)** Es folgt eine genaue Beschreibung der verwendeten Methoden. **(iii)** Die Ergebnisse, der statischen Analyse, der überwiegend eigen aufgenommenen Daten, werden anschaulich präsentiert. **(iv)** In der Diskussion werden die Forschungsergebnisse im derzeitigen Stand der Wissenschaft verortet. Weiters wird das Forschungsdesign und dessen Limitation kritisch besprochen und ähnlichen Studien sowie Forschungsprojekten gegenübergestellt. **(v)** Abschließend werden die empirischen Forschungsergebnisse und gewonnen Erkenntnisse zusammengefasst, sowie ein Ausblick in die zukünftige Forschungsarbeit des Autors und des Projektes „SEDiment“ gegeben.

Die theoretischen Grundlagen sind relativ ausführlich betrachtet. Solare Strahlung ist eine wichtige Komponente der Klimatologie und eine Steuergröße aller biologischen und physikalischen Prozesse des Erdsystems (Dirmhirn, 1964; Podesser, 2007). Da es außerhalb des engen Bereichs der medizinischen Strahlenforschung keine Studienangebote gibt, ist es an der Zeit, das Thema Strahlenforschung von einem geographischen Blickwinkel aus zu betrachten und die spezifischen, in der Geographie vermittelten Erkenntnisse zu nutzen. Dennoch ist es dem Autor wichtig, grundlegende hautbiologische und hautmedizinische Prozesse zu verstehen und vorzustellen. Deshalb liegt der Fokus im folgenden Kapitel „Theoretische Grundlagen“, neben dem Strahlungshaushalt und den zur Bestahlungsmessung verwendeter Messgeräte, auf eben jenen hautbiologischen Prozessen.

Da die empirische Datenerhebung, Datenbereinigung und die Standardisierung der persönlichen UVR-Expositions-Daten (PE-Daten) und Daten der ambienten UV-Bestrahlung, sehr umfangreich waren, ist das Kapitel Methode ausführlich bearbeitet.

Die Ergebnisse der Analyse, der realen PE-Messdaten, sowie durch Gewichtung (mittels der Variable Messdauer) und Normierung (mittels der Variablen Messdauer und ambienter Bestrahlung) generierter UVR-Expositionsdaten, sind im Kapitel Ergebnisse vorgestellt. Der Erklärungsgehalt der naturräumlichen und behavioristischen, unabhängigen Variablen wurde analysiert, die Ergebnisse der Analyse sind im Kapitel Ergebnisse zu finden.

Im Kapitel Diskussion werden die präsentierten Ergebnisse kritisch diskutiert und vergleichbaren vorangegangenen Studien gegenübergestellt. Besondere Fokus liegt auf zwei Punkten. Erstens, dem **Erklärungsgehalt** der unabhängigen, erklärenden Variablen bezüglich UVR-Exposition und den inhärenten Wechselwirkungen der unabhängigen, erklärenden Variablen untereinander. Zweitens, der **methodenkritischen Auseinandersetzung** mit den die Ergebnisse beeinflussenden

Limitationen bezüglich der verwendeten Messgeräte, der generierten Datengrundlage und den angewandten Methoden im Feld und während der Analyse.

3 Theoretische Grundlagen

Durch solare Strahlung erhält die Erde Energie, sie ist ausschlaggebend für das Entstehen des Lebens auf unserem Planeten, der Motor aller atmosphärischer Prozesse und der Antrieb des gesamten Klimasystems (Dirnhirn, 1964; Kallenrode, 2006). Neben geologischen Voraussetzungen ist das Klima die wichtigste Steuergröße der physischen Umwelt. Die antreibende Größe ist die solare Strahlung (Goudie, 2008).

Die Themen solare Strahlung, Strahlungshaushalt und -dynamik, sowie deren Auswirkungen auf Klima- und Wettersysteme, Flora und Fauna füllen ganze Bibliotheken. All diese Facetten nehmen direkt oder indirekt Einfluss auf die UV-Strahlenexposition österreichischer Außenarbeiter (i.e., Beschäftigte und Selbstständige, die sich berufsbedingt zwangsläufig im Freien aufhalten müssen). In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen der solaren Strahlung, des atmosphärischen Strahlungshaushalts und der Strahlungsfelder kurz und prägnant zusammengefasst. Weiters werden die Komponenten der UV-Strahlung (e.g., UVA, UVB, UVC; sowie direkt, diffus, global, gesamt, persönlich, ambient) und die wichtigsten Einflussfaktoren (e.g., Ozon, Zenitwinkel der Sonne, Albedo, Bewölkung, etc.) auf jene, komprimiert erörtert. Weiters werden hautbiologisch entscheidende Wirkungsspektren (*Action Spectra*) der UV-Strahlung, nach neuestem Kenntnisstand, definiert und hautbiologische Prozesse erörtert. Schließlich werden (Be)Strahlungsmessgeräte vorgestellt.

3.1 Erdsystem

Die Erde erhält praktisch die gesamte, in der Atmosphäre wirksame Energie, durch solare Strahlung. Der Energiehaushalt ist durch kurzwellige Einstrahlung, von der Sonne, und langwelliger Ausstrahlung von der Erdoberfläche gekennzeichnet. Daneben bestimmen Reflektions- Streuungs- und Absorptionsprozesse der Strahlung, sowie Umwandlungs- und Transportprozesse den Energiehaushalt im Erdsystem (Goudie, 2008; Monteith & Unsworth, 2013).

Die Strahlungsbilanz und damit die Energiebilanz des Erde-Atmosphären-Systems (Klimasystems) steht mit der Umwelt (Weltall) mittelfristig gesehen im Gleichgewicht. Langfristig

gesehen kam es über die letzten 700 Mio. Jahre zu gravierenden Veränderungen des Strahlungshaushalts des Klimasystems, verursacht durch Änderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre (e.g., Sauerstoffgehalt), Polverlagerungen und Kontinentalverschiebungen (e.g., Albedo) und Bewegungsänderungen des Erdballs und der Erdbahn (Milanković-Zyklen). Während des Quartärs kam es zu gemittelten Temperaturfluktuationen von 7°C. Kurzfristig gesehen, wird die Strahlungsbilanz des Klimasystems mit der Zunahme von anthropogen eingebrachten Treibhausgasen verändert. Die Strahlungsbilanz des Klimasystems ist, durch im langwelligen atmosphärischen Fenster absorbierenden und streuenden Treibhausgasen, derzeit aus dem Gleichgewicht. Der Überschuss an Strahlenenergie im Erd-Atmosphärensystem verursacht einen erhöhten Strahlungsantrieb, dieser erhöht die Temperatur der Atmosphäre, des Festlands und der Ozeane, lässt Eisschilde und Gletscher schmelzen, erhöht den gasförmigen Anteil des Erdwassers und verursacht Rückkopplungseffekte, die allesamt zu einer Erhöhung der Temperatur, sowie zur Beeinträchtigung oder dem Zusammenbruch von Klimasystemkomponenten und Ökosystembestandteilen führen (Kraus, 2004; Goudie, 2008; Monteith & Unsworth, 2013; Forster et al., 2021; Rockström & Gaffney, 2021).

Die Strahlungsbilanz des Erd-Atmosphären-Systems ist neben der kurzwelligen, solaren Einstrahlung und langwelligen, terrestrischen Ausstrahlung von den inneratmosphärischen Energietransferprozessen der latenten und fühlbaren Wärmeflüsse geprägt (siehe Abbildungen 1 und 2). Der Vergleich der Abbildungen 1 und 2 macht deutlich, dass Unterschiede der Strahlungsbilanz, zwischen wolkenfreiem und durchschnittlichem Himmel, bezüglich der Gesamtbilanz, und der Komposition der Strahlungskomponenten bestehen. Der Energieüberschuss, auf Abbildung 1 mit *imbalance* gekennzeichnet, auch *radiative forcing* genannt, ist für die derzeitige Klimaerwärmung verantwortlich. Der Unterschied der Gesamtbilanz, der Strahlenenergie, zwischen den beiden atmosphärischen Zuständen ist einer der Antriebe des Klimasystems.

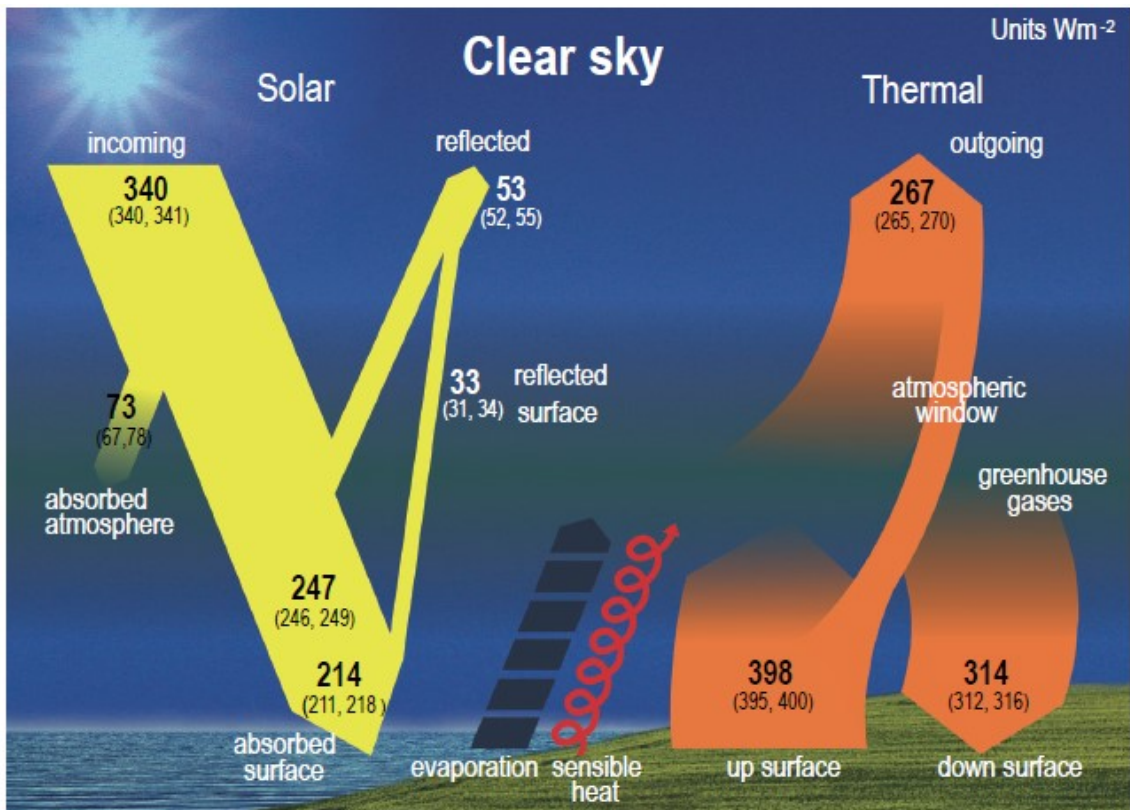


Abbildung 1 Strahlungsbilanz und Energietransferprozesse bei klarem Himmel (Forster et al., 2021)

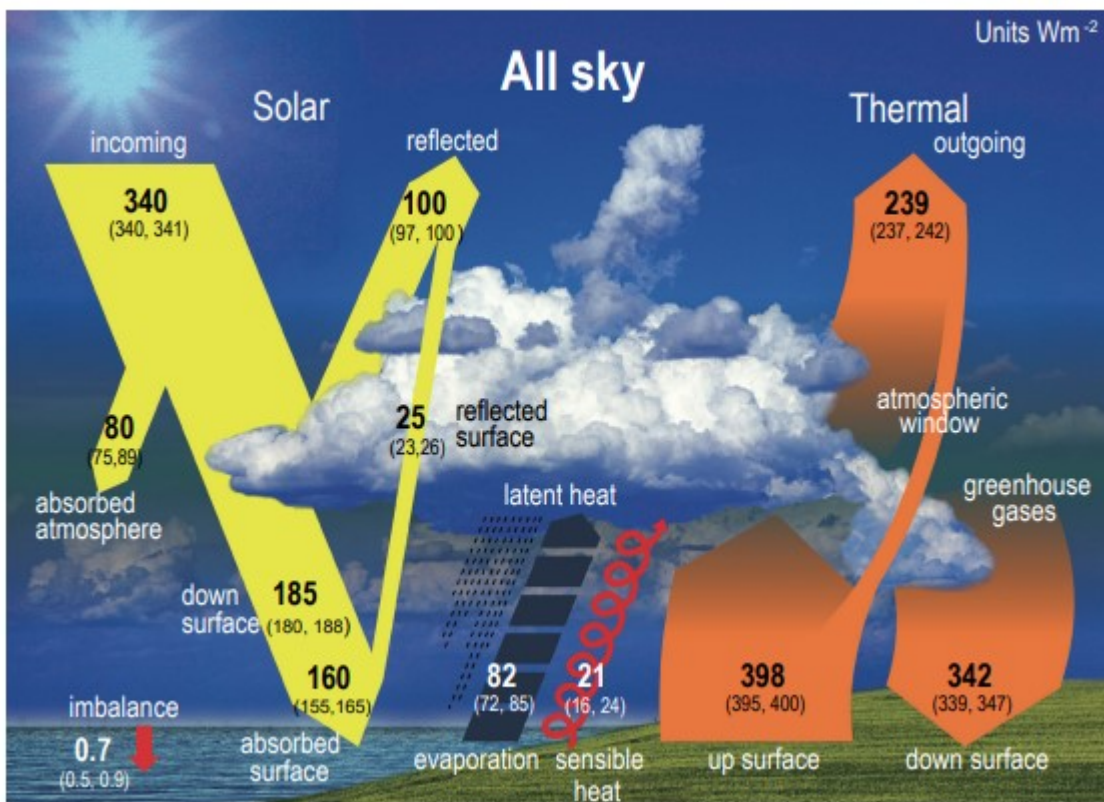


Abbildung 2 Strahlungsbilanz und Energietransferprozesse bei durchschnittlichem Himmel (Forster et al., 2021)

3.2 Strahlungshaushalt

3.2.1 Solare und optische Strahlung

Die Sonne emittiert ein breites elektromagnetisches Spektrum, von langwelligen Radiowellen bis zu hochenergetischer, kurzwelliger Röntgenstrahlung (Iqbal, 1983). Elektromagnetische Strahlung ist eine, von oszillierenden magnetischen und elektrostatischen Feldern stammende Energie. Die Wellenlängenbereiche der ultravioletten (UV) Strahlung, des sichtbaren Lichts und der infraroten (IR) Strahlung werden als optische Strahlung bezeichnet, emittiert die Sonne den Bereich der optischen Strahlung, wird er als solare optische Strahlung bezeichnet (DGUV, 2020) Solare Strahlung interagiert mit Molekülen und suspendierten Partikeln, in der Erdatmosphäre, sowie der Erdoberfläche, bei Auftreffen auf jene (Iqbal, 1983; Kraus, 2004). Das Spektrum der auf der Erdoberfläche ankommenden Solarstrahlung wird von atmosphärischen Molekülen und Partikeln, durch Absorption, Streuung und Reflexion, in gewissen Wellenlängenbereichen beeinflusst (Lacis & Hansen, 1974; Bai & Zong, 2021) (siehe Abbildungen 3, 4 und 6). Die tatsächliche, an der Erdoberfläche messbare, solare Bestrahlung wird von geographischen, topographischen, saisonalen und meteorologischen Faktoren beeinflusst (Koronakis et al., 2002). In Tabelle 1 sind wichtigsten strahlungsrelevanten Größen, Einheiten und Beziehungen eingetragen, die für empfängerseitigen Größen Bestrahlungsstärke und Bestrahlung sind mittels Dosimetern messbar.

Tabelle 1 Strahlungsrelevante Größen und Einheiten (Hering et al., 2001)

Größe	Symbol	Einheit	Beziehung	Erklärung
Strahlungsenergie bzw. -menge	Q_e	Ws	$Q_e = \int \phi_e dt$	Durch elektromagnetische Strahlung übertragene Energie.
Strahlungsleistung bzw. -fluß	ϕ_e	W	$\phi_e = dQ_e/dt$	Mit der Strahlung übertragene Leistung.
senderseitige Größen				
spezifische Ausstrahlung	M_e	W/m ²	$M_e = \phi_e/A_1$	Auf die Senderfläche bezogene Strahlungsleistung des Senders.
Strahlstärke	I_e	W/sr	$I_e = \phi_e/\Omega$	Quotient aus dem in einer bestimmten Richtung vom Sender ausgehenden Strahlungsfluß und dem durchstrahlten Raumwinkel.
Strahldichte	L_e	W/m ² sr	$L_e = \frac{I_e}{A_1 \cos \varepsilon_1}$	Quotient aus Strahlstärke und Projektion der Senderfläche auf eine Ebene senkrecht zur betrachteten Richtung.
empfängerseitige Größen				
Bestrahlungsstärke	E_e	W/m ²	$E_e = \phi_e/A_2$	Auf einen Empfänger fallende Strahlungsleistung, bezogen auf die Empfängerfläche.
Bestrahlung	H_e	Ws/m ²	$H_e = \int E_e dt$	Quotient aus auftreffender Strahlungsenergie und Empfängerfläche.

Solare UV-Strahlung ist nur ein kleiner Teil des gesamten solaren Spektrums. ~9 % der solaren Energie sind dem Spektralbereich UV (100 – 400 nm) zuzuordnen (Zerefos et al., 2023). Diese Photonen erleben beim Eintritt und Durchlauf der Erdatmosphäre eine Reihe photochemischer Reaktionen. Im Wellenlängenbereich unterhalb von 330 nm nimmt die Bestrahlungsstärke drastisch ab, man spricht von der UV-B Kante (DGUV, 2020). Das Spektrum der UVC-Strahlung (100 – 280 nm) definiert sich durch die vollständige Absorption durch die erdgebundene Ozonschicht und Atmosphäre (siehe Abbildung 3) (ISO, 2007; Monteith & Unsworth, 2013).

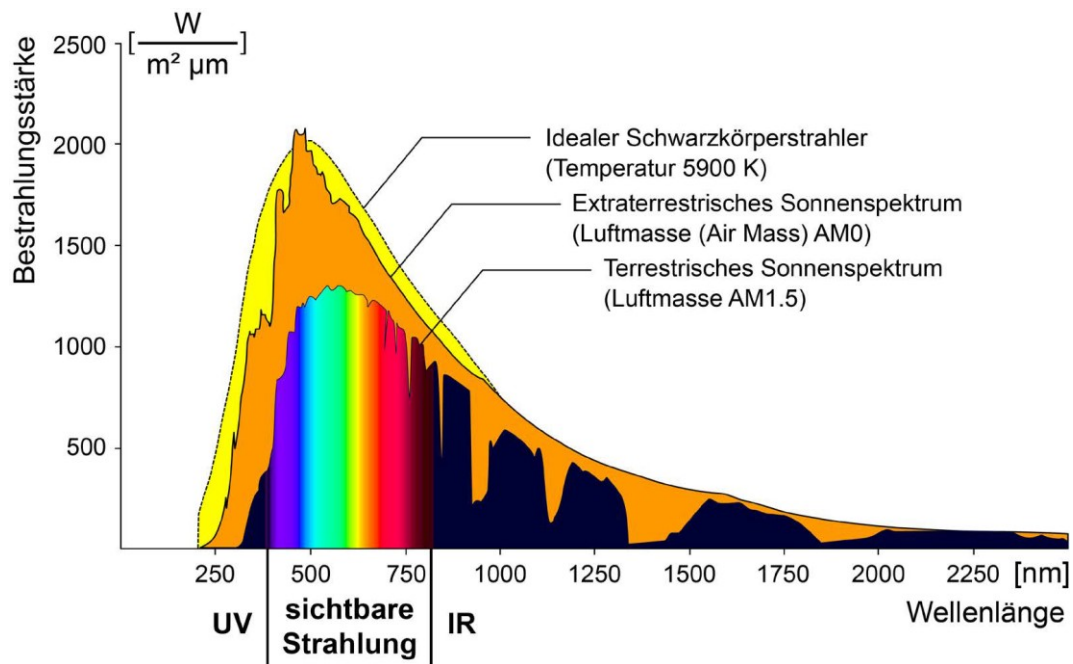


Abbildung 3 Gegenüberstellung des extraterrestrischen und des terrestrischen Sonnenspektrums; (DGUV, 2020)

Auf der Erdoberfläche ankommende, durch die Ozonschicht und Atmosphäre gefilterte und über den Erdball gemittelte Sonnenstrahlung setzt sich laut Kurz et al. (2022) zu 38,9 % aus sichtbarem Licht, 54,3 % Infrarot-Strahlung (IRR), 6,3 % UV-A und 0,5 % UV-B zusammen. Diffey (2002) spricht von einem UVR-Anteil des terrestrischen Sonnenlichtes von rund 5 %. Weder Kurz et al. (2022) noch Diffey (2002) referenzieren, wie sie zu den genannten Werten kommen. Die Standardwerke der WHO, IARC (1992) und IRAC (2012) geben den auf der Erdoberfläche ankommenden Teil der solaren Strahlung wie folgt an: ~5 % UV-Strahlung, ~40 % sichtbares Licht, 55 % IR-Strahlung der Globalstrahlung. Die IRAC bezieht sich auf Foukal & Lean (1990), die ein empirisches Modell entwickelten, welches mittels der Solarkonstante (i.e., *total solar irradiance*: globale Bestrahlung des gesamten Sonnenspektrums im Abstand einer Astronomischen Einheit [AE] an der Obergrenze der Erdatmosphäre) und abgeleitet aus dieser die auf die Erdoberfläche auftretende solare Strahlung (Bestrahlung, Bestrahlungsstärke), bemerkenswert gut approximieren kann (siehe Abbildungen 3 und 4).

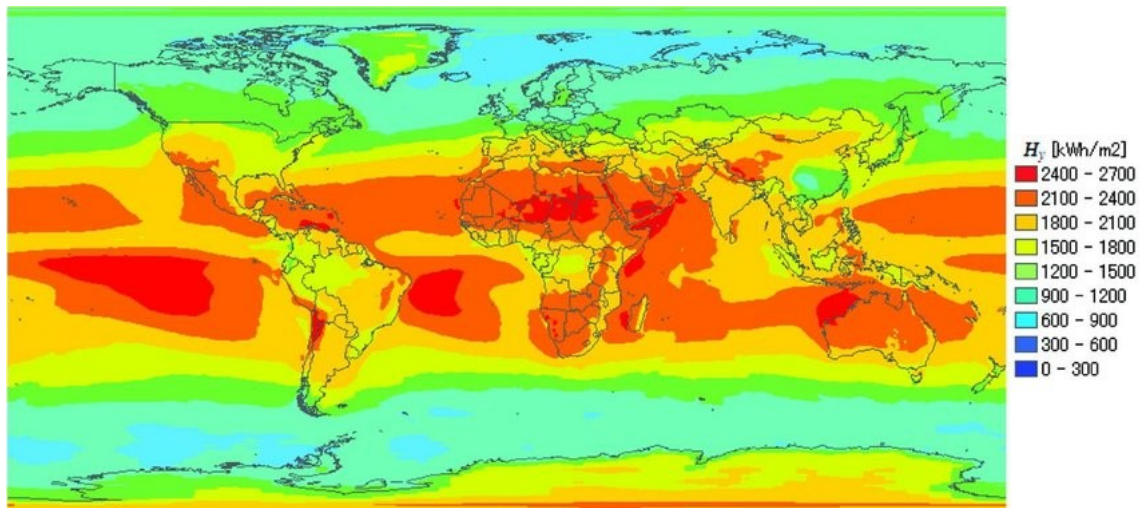


Abbildung 4 Jahressummen der solaren Bestrahlung (Gajipra, 2015)

3.2.2 UV-Strahlung

Die UV-Strahlung wird anhand der Wellenlänge in drei Komponenten unterteilt, UV-A Strahlung (315 – 400 nm), UV-B Strahlung (280 – 315 nm) und UV-C Strahlung (100 – 280 nm) (Schmalwieser et al., 2021). Während solare UV-C Strahlung, in der Stratosphäre, von Sauerstoff und Ozon vollkommen absorbiert wird, dringen UV-B und UV-A Strahlung in die Troposphäre ein und erreichen die Oberfläche der Erde, den Lebensraum des Menschen (Frederick & Lubin, 1988; Cheng et al. 2020; Schmalwieser et al., 2021; Zerefos et al., 2023). Die Wellenlängenbereiche der drei UV-Strahlungskomponenten orientieren sich an optischen Eigenschaften der Atmosphäre und der Wirkungsweise der Wellenlängenbereiche auf Lebewesen (Diffey, 2002; Weihs et al., 2013). In Abhängigkeit des Forschungsgegenstands wird die Obergrenze der Wellenlänge, der UV-A Strahlung zwischen 380 – 400 nm angegeben. Das menschliche Auge kann ab ~380 nm sichtbares Licht wahrnehmen (Gross et al., 2008), während die Obergrenze des Wirkungsbereichs für Erythem (AS_{Ery}) bei ~400 nm liegt (Schmalwieser et al., 2012). Die erythemwirksame UV-Strahlung trifft in unterschiedlicher Intensität auf die Regionen der Erde (siehe Abbildung 5). Die Intensität ist abhängig von atmosphärischen Parametern (e.g., Bewölkung, optischer Aerosoldicke, Gesamtozon), astronomischen Parametern (e.g., Sonnen-Erd-Abstand, optische Luftmasse, Zenitwinkel der Sonne) und topographischen Parametern (e.g., Seehöhe, Neigung des Untergrunds, Albedo) (Simic et al., 2008; Monteith & Unsworth, 2013). Die erwähnten Wirkungsgrößen der drei Parametergruppen stehen miteinander in Wechselwirkung und können je nach Betrachtungsweise und Disziplin verschoben werden.

Die Grenze zwischen UV-B und UV-A wird zeitweise mit 315 nm, manchmal mit 320 nm angegeben. In und um diesen Wellenlängenbereich ist eine große Zu- bzw. Abnahme der

Wirkungsstärke wichtiger strahlungsinduzierter, zellbiologischer Vorgänge (e.g., Vitamin-D Produktion, Erythem-Induktion, DNA-Schaden-Induktion) zu beobachten (siehe Abbildungen 17, 18 und 19) (Parrish et al., 1982; Schmalwieser et al., 2012). Die Untergrenze der Wellenlänge, der UVC-Strahlung wird mit 100 nm oder 200 nm angegeben. Schlussendlich sind die Unterteilungen der UV-Strahlenkomponenten willkürlich und disziplinabhängig (Diffey, 2002). Die Sonne emittiert ein kontinuierliches Strahlenspektrum, der Mensch unterteilt, nach subjektiven Gesichtspunkten.

Die UV-C Strahlung (Wellenlängenbereich 100 nm – 280 nm) ist höherenergetisch als UV-B und UV-A Strahlung. Trifft UV-C Strahlung auf die menschliche Haut oder das Auge, treten gravierende, gesundheitsschädliche Konsequenzen auf. Hessling et al. (2021) beschrieben in einer Literaturrecherche die Wirkung der Far-UVC-Strahlung (200–230 nm) auf Pathogene, Zellen, Haut und Augen. Anstoß der intensiven Auseinandersetzung mit den Auswirkungen dieses Wellenlängenbereiches, der elektromagnetischen Strahlung war die 2019 beginnende Coronavirus (Covid-19) Pandemie. Hochenergetische Strahlung besitzt die (positive) Eigenschaft, Pathogene zu zerstören und kann somit als Desinfektionsmittel genutzt werden.

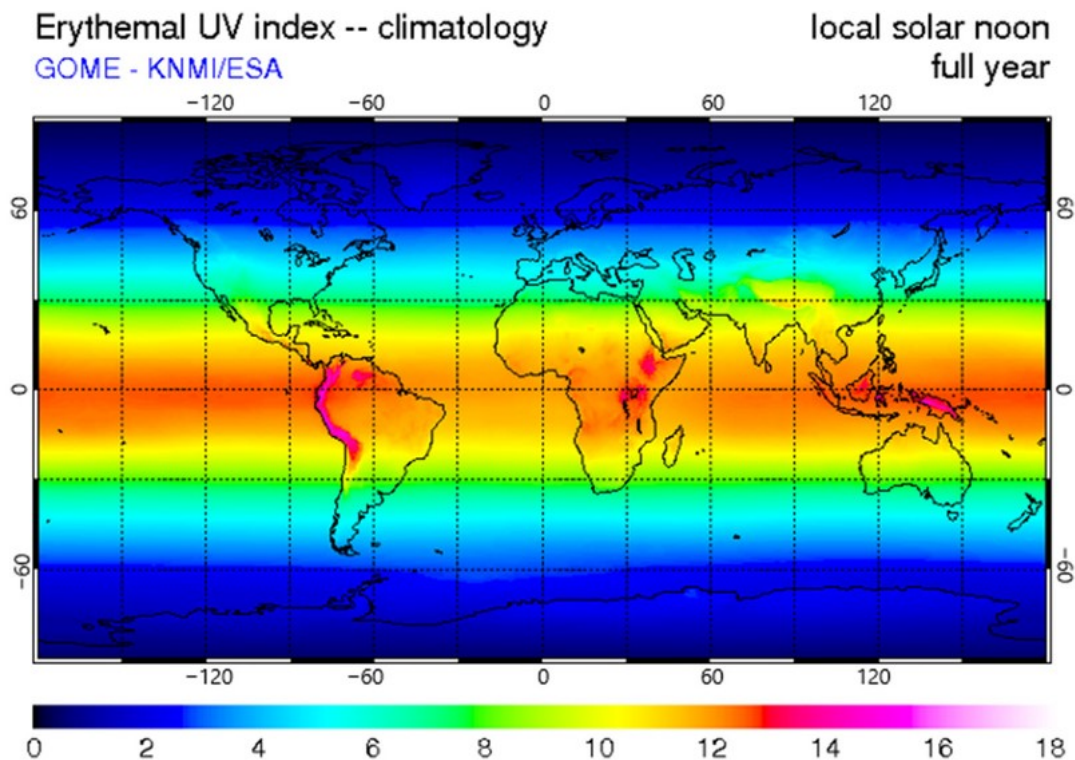


Abbildung 5 erythemwirksamer jährlicher UV-Index, gemittelt 1996 – 2002 (Jie et al., 2022)

3.2.3 Parameter und Wechselwirkungen des (UV) Strahlungshaushalt

Die in der Erdatmosphäre befindliche UV-Strahlung wurde und wird durch eine Reihe von Wechselwirkungen mit Materie und Interaktionen mit Parametern beeinflusst. Treffen UVR-Photonen auf Materie bewirken sich energetische Wechselwirkungen verschiedener Art, nämlich Reflexion, Absorption, Transmission, Streuung und die durch die Energie der Strahlung angeregte Emission (siehe Abbildung 6). Die energetischen Wechselwirkungen detektierbarer Wellenlängen(bereiche) müssen sich nicht ausschließen (Wesselak & Voswinkkel, 2012; Monteith & Unsworth, 2013; Weihs et al., 2013). Energetische Wechselwirkungsprozesse elektromagnetischer Strahlung betreffen, im Detail betrachtet, die Quantenphysik (Wesselak & Voswinkkel, 2012; Someda, 2017). Bei der Absorption eines Photons (oder Photonen-Paares) durch Materie (e.g., Molekül), geht die Energie nicht verloren, sie wird umgewandelt (e.g., thermische Energie, chemische Energie), das Photon wird vernichtet, die Intensität der (detektierbare) Wellenlänge wird verringert (Hau et al., 1999; Krudy & Ladunga, 2001; Monteith & Unsworth, 2013).

Die Intensität, die Zusammensetzung und die Richtung der auf der Erdoberfläche ankommenden UV-Strahlung ist durch astronomische, atmosphärische und topographische Parameter, die wiederum untereinander agieren und voneinander abhängig sind, beeinflusst. Astronomische und atmosphärische Parameter bestimmen die UV-Strahlungsfelder, in jeder Region der Welt. Durch das gebirgige Relief bedingt, beeinflussen neben den erwähnten, besonders topographische Parameter und die Wechselwirkungen zwischen astronomischen, atmosphärischen und topographischen Parametern, die Strahlungsfelder in Österreich (Dirmhirn, 1964; Podesser 2007).

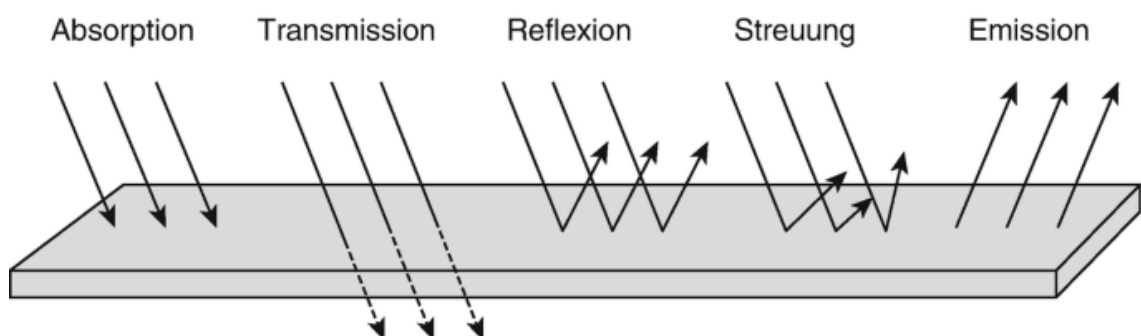


Abbildung 6 Wechselwirkung der Strahlung und Materie (Wesselak & Voswinckel, 2012)

3.2.3.1 Streuung

In der Atmosphäre beeinflussen zwei Arten von Streuung den Weg und die Intensität der UV-Strahlung, die Rayleigh Streuung und die Mie Streuung. Die Ablenkung des Strahls kann dabei in

jede Richtung erfolgen. Die Streuung der UV-Strahlung ist sehr effektiv, sodass UV-induzierte Erytheme bei bewölktem Himmel, sowie in beschatteten Räumen auftreten können (siehe Abbildung 7) (Podesser, 2007; Monteith & Unsworth, 2008).

Rayleigh Streuung. Die Streuung durch Streuer (Moleküle) mit deutlich kleinerem Durchmesser als die betreffende, gestreute Wellenlänge wird Rayleigh Streuung genannt (Monteith & Unsworth, 2008).

Mie Streuung. Sind die Streuer größer als die betreffende, gestreute Wellenlänge spricht man Streuung durch Aerosole oder Mie Streuung (Monteith & Unsworth, 2008). Als Aerosole werden jegliche flüssige oder feste, im Gas (e.g., Atmosphäre) suspendierte Partikel bezeichnet (Kolb & Worsnop 2012).

3.2.3.2 Absorption

Bei der Absorption wird die Energie der Strahlung, beim Auftreffen auf ein Medium umgewandelt. In der Atmosphäre wird UV-Strahlung von Molekülen (e.g., O₃, O₂) absorbiert und in thermische Energie umgewandelt. Weiters führt die Energie der UV-Strahlung, durch Aufspaltung molekularen Sauerstoffs zur Bildung von Ozon. Trifft die UV-Strahlung auf die Haut von Menschen und Tieren oder auf die Blätter von Pflanzen, kann thermische Energie erzeugt werden, biochemische Reaktionen können angestoßen werden, die beispielsweise zum Aufbrechen von DNA-Verbindungen führen und Hautschädigungen verursachen, oder die Photosynthese beeinträchtigen, oder kann als Licht, einer anderen Wellenlänge emittiert wird (Weihs et al., 2013). Beim Auftreffen auf die Erdoberfläche führt Absorption zur Erwärmung des Mediums und initiiert chemische Reaktionen (Kraus, 2004).

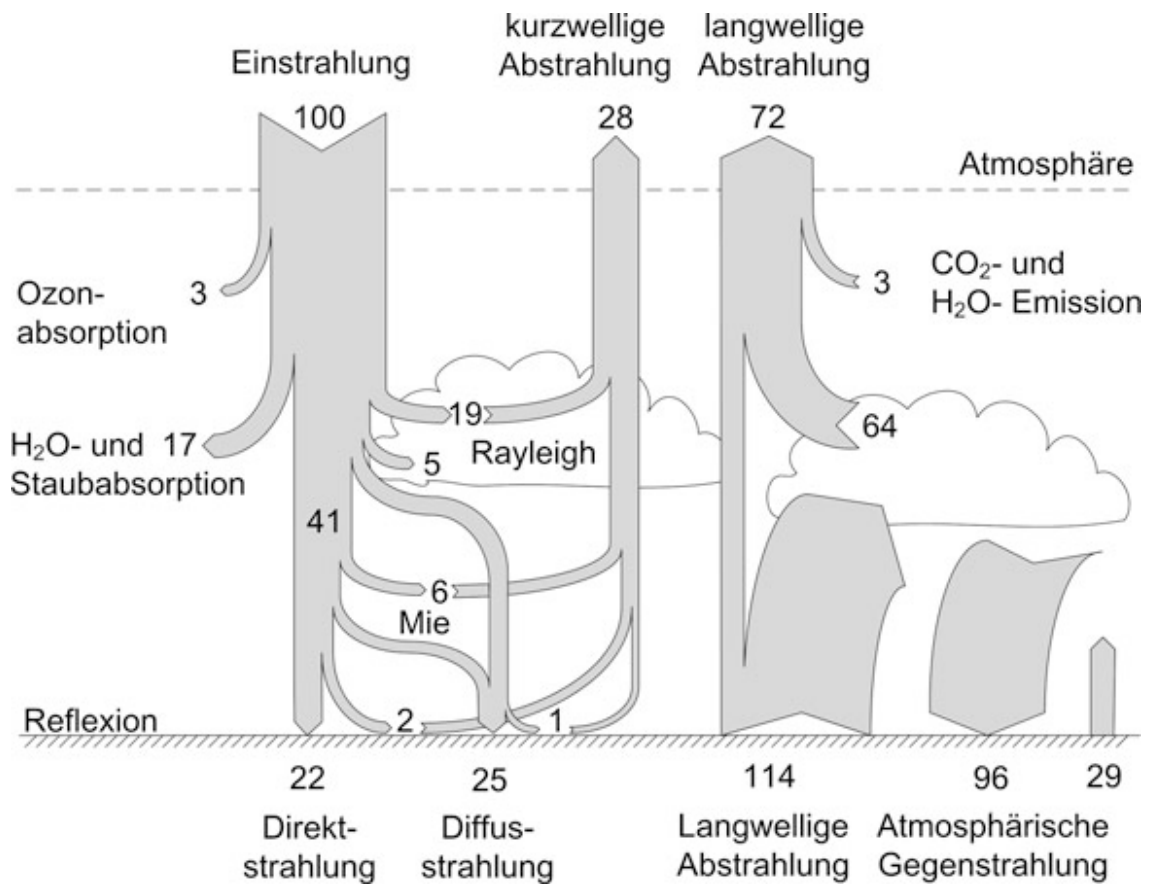


Abbildung 7 Solare Strahlungsbilanz der Erde in Prozent (Wesselak & Voswinckel 2012)

3.2.3.3 Reflexion/Albedo

Die Reflexion ist definiert als das Verhältnis der einfallenden Strahlstärke und der reflektierten Strahlstärke derselben Wellenlänge. Einfallende Strahlung kann gespiegelt oder diffus reflektiert werden. Die Art der Reflexion eines Objekts ist komplex, sie ist abhängig von Oberflächenbeschaffenheit (e.g., Rauigkeit, Benässung) und elektrischen Eigenschaften (Monteith & Unsworth, 2013). Reflexion findet in der Atmosphäre, besonders an der Wolkenoberfläche (starke Abhängigkeit der Wolkenart), und an der Erdoberfläche statt (siehe Abbildungen 7 und 8). Außerdem gilt es, die gestreute Strahlung im Medium, die über die Oberfläche ausstrahlt (kurzwellige Rückstrahlung), bei Reflexionsberechnungen zu beachten (Dirnhirn, 1964).

Die gespiegelte, auch gerichtete Reflexion genannt, ist im Erdsystem eher ein Sonderfall, es gilt das Gesetz Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel. Nähert sich der Einfallswinkel der Strahlung 90° (vom Zenit betrachtet), ist gespiegelte Reflexion oder annähernd gespiegelte Reflexion an offenen, ruhigen Wasseroberflächen, hochgradig cuticulären Blättern und anderen glatten Oberflächen, zu beobachten (Monteith & Unsworth, 2013; Weihs et al., 2013). Diffuse (nach

allen Seiten gerichtete) Reflexion ist, im Erd-Atmosphärensystem weitaus häufiger zu beobachten. Summiert man die Reflexionskomponenten auf, erhält man den Verhältniswert Albedo. Die Albedo, der Oberfläche eines Mediums, kann Werte von 0 (keine Reflexion) bis 1 (vollständige Reflexion) annehmen, sie gibt Aufschluss über die Absorption (Energietransfer) eines Mediums. Reflexion, ist wie Absorption und Streuung, abhängig von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung (siehe Abbildung 8), die drei Einflussgrößen der Strahlung und die Wechselwirkungen jener, sind entscheidend für den Energiehaushalt, das Klimasystem und biochemische Vorgänge bei Lebewesen (Dirnhirn, 1964; Monteith & Unsworth, 2013; Weihs et al., 2013; Forster et al., 2021).

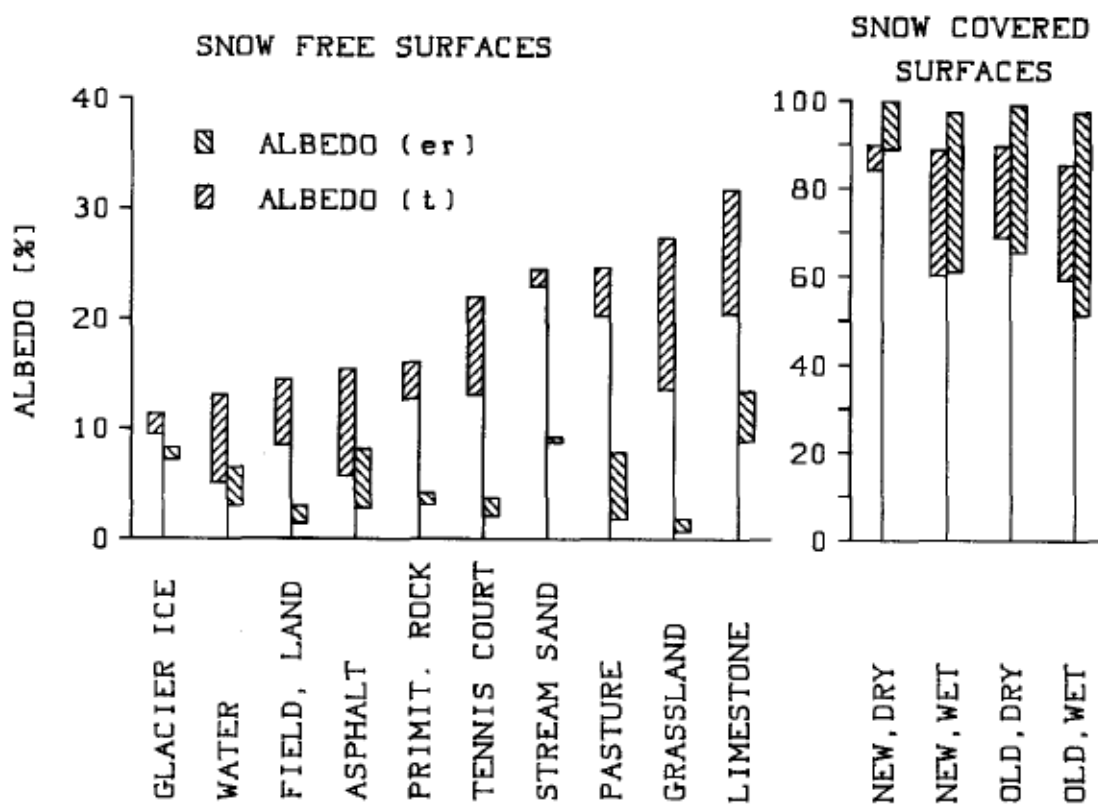


Abbildung 8 Albedo der gesamten solaren Strahlung (t) und Albedo der erythemgewichteten solaren Strahlung (er) von Oberflächen; schraffierte Box zeigt die Variation zwischen minimal und maximal gemessenem Wert (Blumthaler & Ambach, 1988)

3.2.3.4 Astronomische Parameter

Die Einflussgrößen der astronomischen Parameter, der ins Erdsystem eindringenden UV-Strahlung, sind Emission und Immission (siehe Abbildung 11), die Geometrie und die Zeit (Wald, 2007). Lässt man die Erdatmosphäre und Topographie außer Acht, ließe sich die UVR-Exposition eines Punktes auf der Erde relativ einfach, durch die Sonnen-Erd-Entfernung, den Zenitwinkel

der Sonne (*solar zenith angle*) und das, an die Temperatur gekoppelte, Emissionsspektrum der Sonne (ähnlich dem eines idealen Schwarzkörperstrahlers [siehe Abbildung 3]), sowie der quasi-zyklisch veränderlichen Sonnenaktivität berechnen (Diffey, 2002; Usoskin, 2017; DGUV, 2020; Zhang et al., 2021).

Die ellipsoide Bahn, die die Erde um die Sonne nimmt, bedingt einen Distanzunterschied von 3,4 % der Sonnen-Erd-Entfernung zwischen dem Minimum am Perihel (um den 3. Jänner) und dem Maximum am Aphel (um den 5. Juli). Daraus resultiert eine etwas höhere sommerliche UVR-Belastung der Südhemisphäre als der Nordhemisphäre (Diffey, 2002).

Der Zenitwinkel der Sonne hängt von Tageszeit, Jahreszeit und geographischer Lage (Breitengrad) ab (siehe Abbildung 9). Ein Zenitwinkel der Sonne von 0° liegt vor, wenn die Sonne direkt im Zenit steht, direkt lotrecht, oberhalb eines Standortes (Diffey, 2002; Zhang et al., 2021).

Das Emissionsspektrum und die Emissionsintensität der Sonne, sowie des eines idealen Schwarzkörperstrahlers (Approximierung) hängen von der Temperatur der Photosphäre ab. Die Photosphärentemperatur der Sonne wird durch die Anzahl der Sonnenflecken beeinflusst, unterliegt zyklischen Änderungen (~11-Jähriger-Schwabe-Zyklus) und wird von Diffey (2002) und der DGUV (2020) mit ~5900 K, von Usoskin (2017) mit ~5800 K angegeben und von Kraus (2004) mit 5776 K (nach Planckschem Strahlungsgesetz berechnet) angegeben.

Die optische Luftmasse ist ein berechnetes Maß, das die Weglänge, die der Strahl in der Atmosphäre zurücklegen muss, um an einem Punkt anzukommen, beschreibt. Das Maß ist neben den beschriebenen astronomischen Parametern, von dem topographischen Parameter Seehöhe abhängig. Je länger der Weg des Strahls ist, desto größer ist die Extinktion der Energie der Strahlung, durch Wechselwirkungen mit Materie (Kasten & Young, 1989; Monteith & Unsworth, 2008).

Die, die UVR-Exposition beeinflussenden astronomischen Parameter sind langfristig gesehen nicht stabil, sie unterliegen chronischen Veränderungen (e.g., Milanković-Zyklen) und akuten Veränderungen (e.g., *Giant-impact hypothesis*).

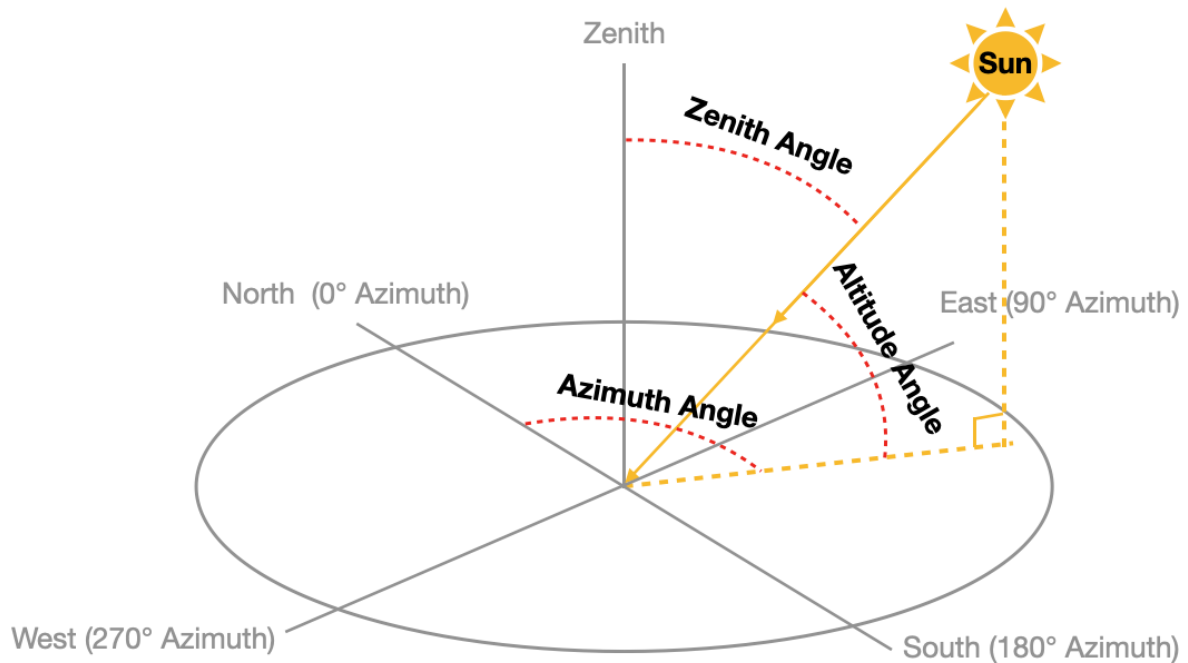


Abbildung 9 Schematische Darstellung des Zenitwinkels der Sonne (zenith angle), des Höhenwinkels des Sonnenstands (altitude angle) und des Azimutwinkels (azimuth angle) (Zhang et al., 2021)

3.2.3.5 Atmosphärische Parameter

Die Einflussgrößen der atmosphärischen Parameter, der ins Erdsystem eindringenden UV-Strahlung, sind die Streuung, die Absorption und die Reflexion. In der Stratosphäre (~10 – 50 km über NN) wird die solare UV-Strahlung vornehmlich durch Ozon (O_3) absorbiert und durch Moleküle (e.g., NO_2 , O_2) gestreut. In der Troposphäre wird die solare UV-Strahlung durch Schadstoffe (teilweise anthropogenen Ursprungs) wie Ozon, Stickstoffdioxid (NO_2), und Schwefeldioxid (SO_2) absorbiert. Suspendierte Partikel (e.g., Ruß, Feinstaub) und die in Wolken enthaltenen Wassertröpfchen und Eiskristalle streuen die UV-Strahlung in der Troposphäre (siehe Abbildung 11 und Tabelle 2) (Diffey, 2002; Monteith & Unsworth, 2008). Verschiedene Wolkentypen beeinflussen den solaren Strahlungstransfer zur Erdoberfläche differenziert (Iqbal, 1983; Monteith & Unsworth, 2008).

Ozon (O_3) und Sauerstoff (O_2). Ozon ist das wichtigste, die UVB-Strahlenabsorption betreffende, Ozon und molekularer Sauerstoff, die entscheidendsten die UVC-Strahlenabsorption betreffenden atmosphärischen Stoffe (siehe Abbildung 11). Die Energie, die durch Absorption betroffenen Wellenlängenbereiche wird (fast) vollständig aus dem solaren Strahlungsspektrum entfernt. Die, aus dem Strahlungsspektrum entfernte Energie erhitzt die Atmosphäre stark (Wald, 2007; Monteith & Unsworth, 2008). Der Temperaturgradient dreht sich in der Stratosphäre um, die Temperatur nimmt von Tropopause zu Stratopause um $\sim 50^\circ C$ zu. Im Zuge

des Klimawandels nimmt die stratosphärische Temperatur ab, Steiner et al. (2020) fanden eine robuste Temperaturabnahme über die gesamte Stratosphäre von 1 – 3 K, von 1979 bis 2018, im selben Zeitraum beziffern sie die Temperaturzunahme der Troposphäre mit 0,6 – 0,8 K. Die Reduktion des stratosphärischen Ozons bedingt die Erhöhung der erythemwirksamen UV-Strahlung, der *radiation amplication factor* (RAF) quantifiziert den Zusammenhang. Eine 1-prozentige Abnahme der Ozonsäule (in Dobson Unit [DU]) führt zu einer 1,2-prozentigen Zunahme der erythemwirksamen UV-Strahlung (=1,2 RAF) (Simic et al., 2009). Auf Abbildung 10 ist der Zusammenhang von RAF und dem Zenitwinkel der Sonne dargestellt. Abbildung 10 verdeutlicht den Zusammenhang von astronomischen und atmosphärischen Parametern.

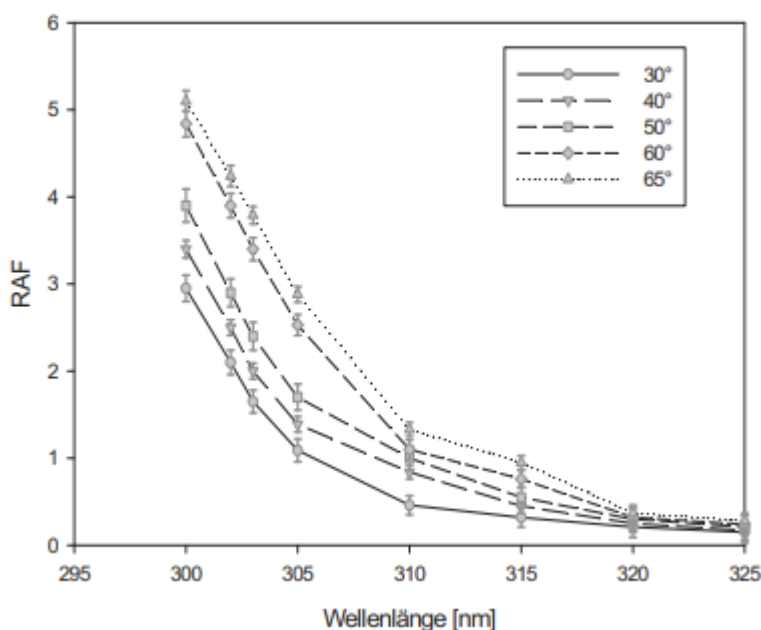


Abbildung 10 Verhältnis von RAF und Zenitwinkel der Sonne (Simic et al., 2009)

Die Summe des gesamten Energieverlust der (UV) Strahlung beim Durchlauf eines Mediums (e.g., Atmosphäre) wird als Extinktion bezeichnet. Das, die Atmosphäre betreffende Maß ist die Optische Dicke, die sich aus dem Energieverlust der Strahlung, durch Absorption und Streuung zusammensetzt und von der optischen Luftmasse (Weglänge der Strahlung) abhängig ist (Kasten & Young, 1989; Monteith & Unsworth, 2008). Der Extinktion steht die Transmission gegenüber. Der Transmissionskoeffizient ist jener Anteil der einfallenden Strahlung, die das Medium, in der Richtung des Strahls, verlässt (Monteith & Unsworth, 2008; Wesselak & Voswinckel, 2012).

Tabelle 2 Beschreibung der, zur Extinktion der solaren Strahlung beitragende, atmosphärischen Bestandteile (Wald, 2007)

Type of constituent	Scattering	Absorption
Ozone	Can be neglected	Strong for λ less than $0.3 \mu\text{m}$
Gases (other than ozone)	Strong (λ^{-4}). Increases as the wavelength decreases	Small
Water vapour	Can be neglected	Noticeable for λ greater than $0.65 \mu\text{m}$
Aerosols	In λ^a with $0 < a < 4$	Small
Clouds	Strong and independent of λ in a first approximation	Small

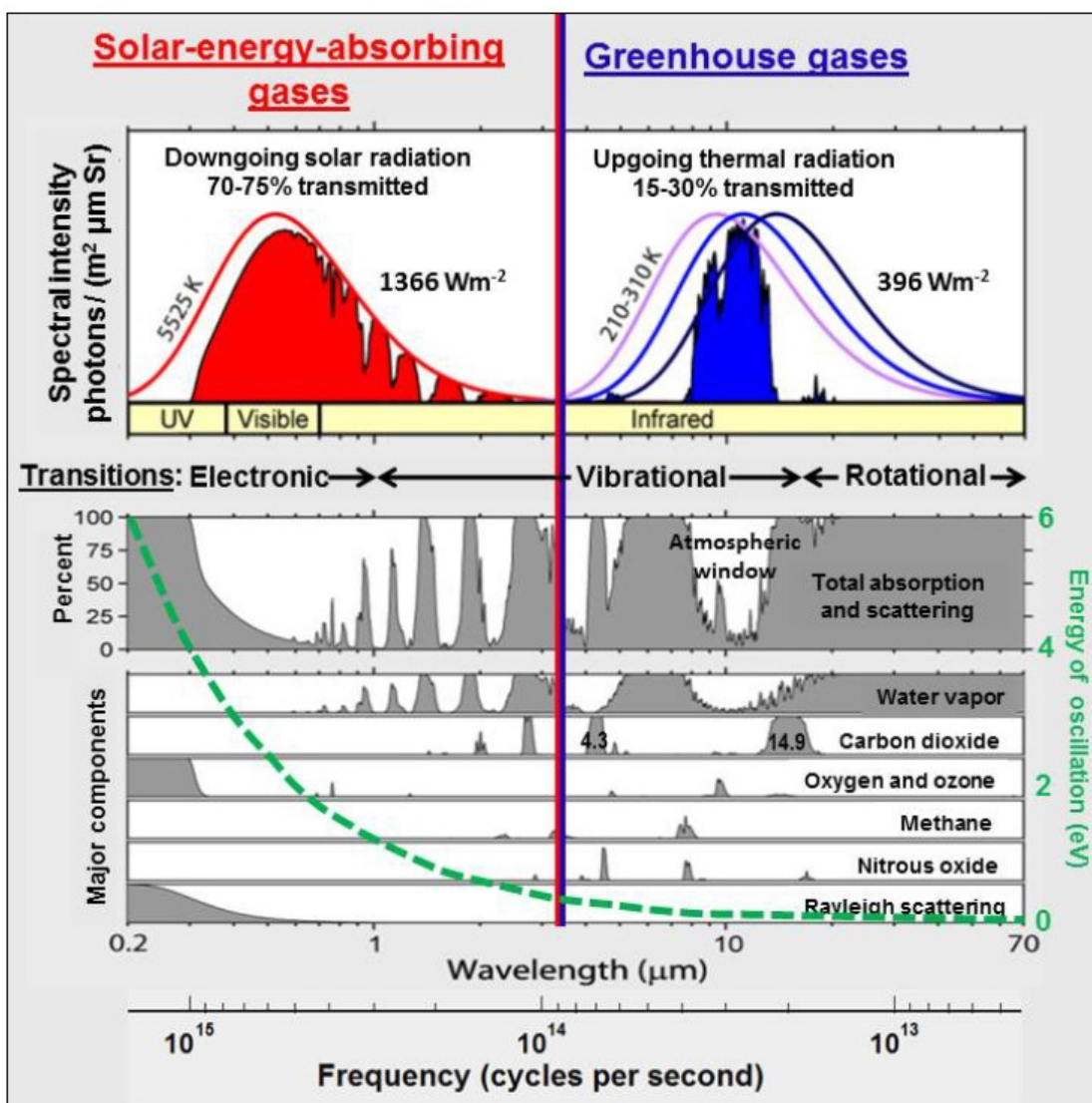


Abbildung 11 Absorptionsbanden und Streubanden der Atmosphäre (Ward, 2021)

3.2.3.6 Topographische Parameter

UVR-Exposition ist durch topographische Parameter gravierend beeinflusst. Im regionalen und besonders im lokalen Maßstab betrachtet, ist die Topographie ein wichtiger, beziehungsweise der vorrangige Parameter, der UV-Strahlungsverhältnisse und UVR-Expositionsmessung (Batlles et al., 2008). In gebirgigen Regionen spielen, neben dem Breitengrad, die Seehöhe, die Neigung und Ausrichtung (Azimut), die Albedo und Abschattungseffekte des umliegenden Terrains gewichtige Rollen, bezüglich der UV-Bestrahlungsverhältnisse (Blumthaler et al., 1997; Batlles et al., 2008; Podesser, 2007).

Die Geländehöhe des Reliefs stellt bei niedrigem Sonnenstand ein Hindernis der direkten UV-Strahlung dar. Weiters wird das Gesichtsfeld eines (Mess)Punktes verkleinert, das verringert die Optionen des Einfalls diffuser Strahlung. Andererseits ist die optische Luftmasse eines hoch gelegenen Gebiets geringer und führt so zu weniger Möglichkeiten der Extinktion von (UV) Strahlung. Letztlich ist, besonders auf Österreich bezogen, die Albedo in hoch gelegenen Region generell höher als im Flachland, da mehr Schnee fällt und länger oder ganzjährig liegen bleibt und einige Gebiete (noch) vergletschert sind. Die Neigung der Erdoberfläche beeinflusst die UV-Exposition im Gebirge deutlich mehr als im Flachland, gegebenenfalls kann die Neigung zu einer Erhöhung der direkten und gesamten Bestrahlung führen (Podesser, 2007; Rieder et al., 2010). Gebirgige Topographie beeinflusst folglich, die Berechnung von Einflussgrößen, die klassischerweise den astronomischen und atmosphärischen Parametern zugeordnet werden können. Die Folgen sind, kleinräumig sehr differenzierte Strahlungsräume, ein deutlicher Mehraufwand an Messungen, zu beachtenden Einflussgrößen und eine komplizierte Modellbildung, um die Strahlungsräume approximieren zu können, gehaltvolle Aussagen treffen zu können, Gesetzmäßigkeiten zu bestimmen und Vorhersagen zu treffen, als im Flachland (Gale, 1972; Podesser, 2007; Rieder et al., 2010).

Bezüglich der erthemwirksamen UVR-Exposition, gilt es den Höheneffekt zu beachten. Der Höheneffekt der erythemwirksamen UV-Strahlung ist 10 – 12 % (Zunahme) pro 1000 m (Narayanan et al., 2010; WHO, 2016). Blumthaler et al. (1997), beziffern die Zunahme der erythemeffektiven Bestrahlung mit $18 \% \pm 2 \%$ pro 1000 m, während des Sommers, und $21 \% \pm 2 \%$ pro 1000 m, während des Winters. Die korrespondierenden Bestrahlungsmessungen fanden im Alpenraum statt.

Weiters führen topographische Parameter, in gebirgigen Regionen, der mittleren Breiten, zu diversen Mikroklimaregimen. Räumlich nahe Gebiete weisen differenzierte, jahreszeitlich unterschiedliche Sonnenscheindauern (siehe Abbildung 12) und Bewölkungsregime auf (Batlles

et al., 2008; Podesser, 2007). Diese Parameter beeinflussen solare Strahlungsregime (siehe Abbildung 13) und UV-Strahlungsregime signifikant.

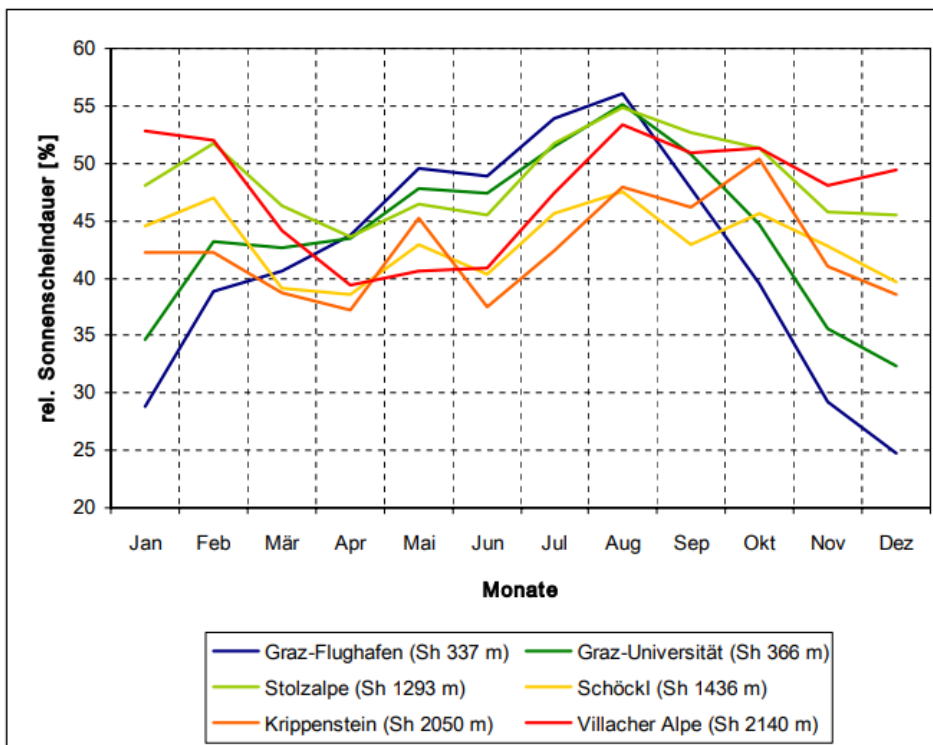


Abbildung 12 Jahrgang der relativen Sonnenscheindauer in Prozent (Podesser, 2007)

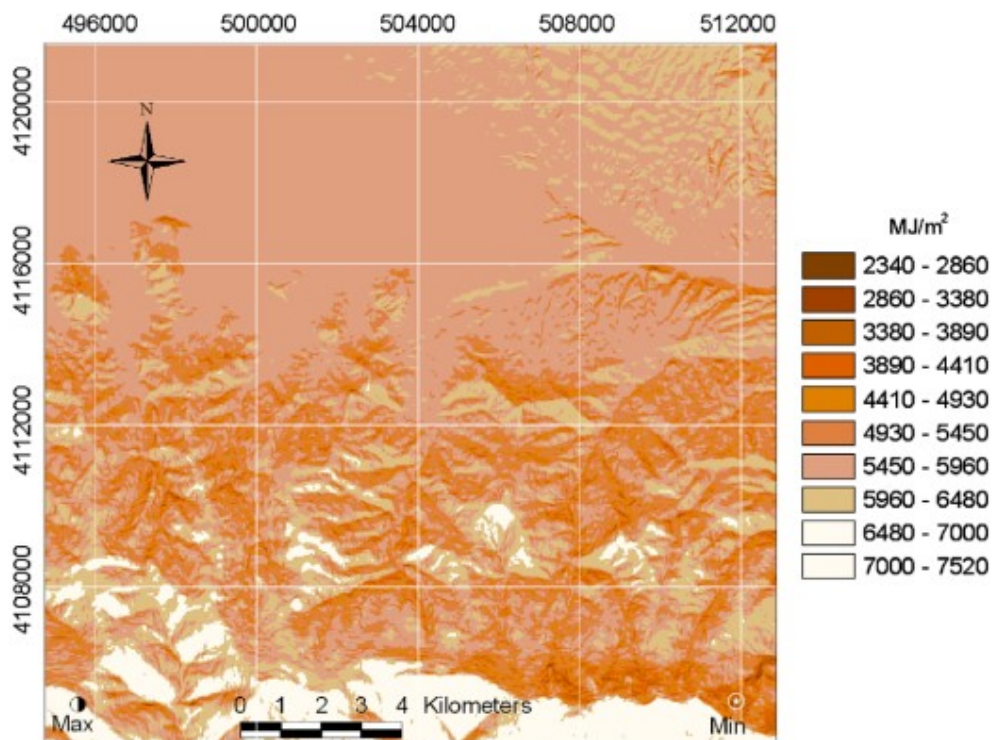


Abbildung 13 Jährliche globale solare Strahlung, Sierra Nevada (Spanien) (Batlles et al., 2008)

3.2.4 Strahlung und Bestrahlung

Solare Strahlung allgemein, sowie UV-Strahlung kann berechnet, aber nicht gemessen werden (siehe Abbildung 16). Solare Bestrahlung kann gemessen werden. Selbst in der Fachliteratur werden die Begriffe Strahlung und Bestrahlung (Englisch: *radiation* und *irradiance*) manchmal synonym verwendet. Im Endeffekt handelt es sich um dieselbe Menge von Photonen, einmal von einem Körper abgestrahlt, einmal auf eine Fläche auftreffend.

Bestrahlung wird in der SI-Einheit der Energie (Joule) angegeben. Ein weiterer, in der Literatur auftauchender und Besitzern von Photovoltaikanlagen bekannter Begriff ist die Bestrahlungsstärke (Einbezug des Faktors Zeit), angegeben in W/m^2 (Leistung).

Weiters muss beachtet werden, dass teilweise andere Formelzeichen für die Bestrahlung (e.g., S) und unterschiedliche Suffixe verwendet werden. Von demselben Problem sind beinahe alle zur Beschreibung der Strahlung, Bestrahlung und Wirkungsspektrum verwendeten Begriffe betroffen. Um Konfusionen vorzubeugen hat es sich in der Fachliteratur durchgesetzt, die Begriffe auszuschreiben und wenn nötig genau zu umschreiben.

Jede Strahlung kann in Komponenten aufgeteilt werden. Besonders bei der Befassung, Messung und Analyse mit solarer UV-Strahlung ist Kenntnis über die Strahlungs- beziehungsweise Bestrahlungskomponenten von höchster Notwendigkeit. Globale (Be)Strahlung ist die Summe aus direkter (Be)Strahlung und diffuser (Be)Strahlung (Monteith & Unsworth, 2008; Schmalwieser 2020). Ein gewisser Prozentsatz der direkten (Be)Strahlung ist zwangsläufig diffuse (Be)Strahlung, die genauso gestreut und/oder reflektiert wurde, dass sie im Winkel der direkten (Be)Strahlung (i.e., direkter Strahl der Sonne) landet.

3.2.4.1 Direkte Strahlung

Als direkte Strahlung wird die, aus der Richtung der Sonnenscheibe (oder jedes Körpers, mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt) kommende Strahlung bezeichnet. Diese kann berechnet werden, gemessen werden kann nur die direkte Bestrahlung (H_{dir}) in der SI-Einheit J/m^2 . Wird die Bestrahlung normal zum Strahl gemessen, wird sie mit H_p bezeichnet (Monteith & Unsworth, 2008; Schmalwieser, 2020; DGUV, 2020).

3.2.4.2 Diffuse Strahlung

Die gesamte gestreute Strahlung wird als diffuse Strahlung bezeichnet. Die messbare diffuse Bestrahlung wird mit H_{dif} bezeichnet. Die Verhältnisse diffuse Bestrahlung/direkte Bestrahlung und diffuse Bestrahlung/globale Bestrahlung sind von atmosphärischen Parametern, dem Winkel der Messung, dem Zenitwinkel der Sonne (Jahreszeit, Tageszeit, Breitengrad) und der Topographie abhängig. Diffuse Strahlung kommt aus allen Himmelsrichtungen und wird im Gegensatz zu direkter Strahlung weniger von schattenspendenden Strukturen (e.g., Bäume, Häuser, Schirme) geblockt (Schmalwieser, 2020). Der vom Himmel einfallende Anteil der diffusen Strahlung wird als Himmelsstrahlung bezeichnet. Die Himmelsstrahlung ist jener Anteil der diffusen Strahlung, der mit der Atmosphäre in Wechselwirkung stand (Dirnhirn, 1964). Der Anteil der diffusen UV-Strahlung, beziehungsweise UV-Bestrahlung, liegt bei etwa 30 %, über die gesamte Erde gemittelt (Goudie, 2008). Von Vernez et al. (2012) wird der Anteil der diffusen UV-Strahlung, für den ozeanisch-klimatischen Bereich West- und Mitteleuropas, mit über 50 % beziffert, die jährliche kumulierte Menge der UV-Expositions-dosis eines modellierten Körpers ohne UV-Strahlenschutzmaßnahmen wird gar mit 80 % beziffert. Bei bedecktem Himmel ist (fast) die gesamte UV-Strahlung diffuse UV-Strahlung (Diffey, 2002; Monteith & Unsworth, 2008). In Region geringerer jährlicher Bewölkung und langer Sonnenscheindauer (e.g., Südspanien) ist der Anteil der direkten Bestrahlung an der globalen Bestrahlung generell höher als der Anteil der diffusen Bestrahlung (Batlles et al., 2008). Dennoch ist anzunehmen, dass auch in derartigen Region die persönliche UVR-Exposition von der diffusen Strahlung dominiert wird (Vernez et al., 2012). Um den Anteil der diffusen Bestrahlung an der globalen Bestrahlung zu messen, können zwei baugleiche, kalibrierte Bestahlungsmessgeräte, an der gleichen Position, mit gleicher Exposition verwendet werden. Der Sensor eines Messgeräts wird dabei mittels Schattenband oder Schattenkugel beschattet, während der Sensor des zweiten nicht künstlich beschattet wird. Aus der Differenz der Messwerte kann das Verhältnis von diffuser und globaler Bestrahlung berechnet werden (siehe Abbildung 14) (Schmalwieser, 2020).

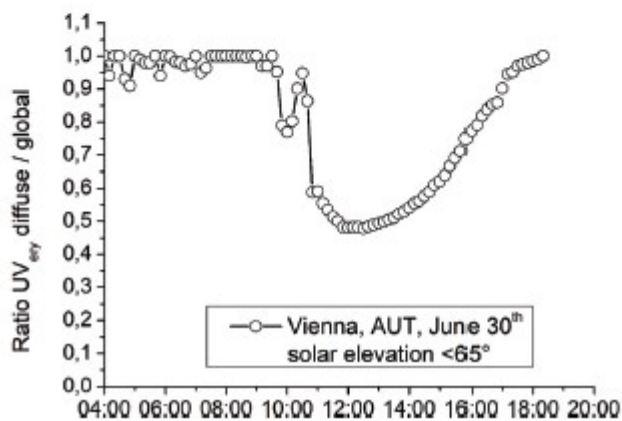


Abbildung 14 oben: 2 baugleiche, kalibrierte Breitband-UV-Bestrahlungsmessgeräte, mit Schattenband (im Vordergrund) und ohne Schattenband (im Hintergrund); unten: Verhältnis der diffusen und globalen erythemgewichteten UV-Bestrahlung, an einem Sommertag mit wechselnden Bewölkungsverhältnissen in Wien Donaustadt, Österreich (Schmalwieser, 2020)

3.2.4.3 Albedo Strahlung/reflektierte Strahlung

Die Erdalbedo ist ein entscheidender Parameter des Klimas. Die Albedo (Be)Strahlung ist ein diffus reflektierter Anteil der einfallenden/bestrahlenden diffusen und globalen (Be)Strahlung. Albedo ist abhängig von dem Einfallswinkel der Strahlung, der umgebenden Topographie und den Reflexionseigenschaften des bestrahlten Mediums (i.e., in der Atmosphäre: Wolken; an der Oberfläche: Landbedeckung, Schnee(höhe)). Mittels Albedometer kann die Albedo(Bestrahlung) gemessen werden (Stephens et al., 2015; Rieder et al., 2010). Ein Albedometer besteht aus zwei baugleichen, kalibrierten Bestrahlungsmessgeräten, meist Pyranometern. Eines misst die globale Bestrahlung, eines die globale Albedobestrahlung (Ausrichtung in der Lotrechten, Sensor um

180° versetzt). Aus dem Verhältnis der Messungen kann die Albedo(Bestrahlung) berechnet werden (Botero-Valencia et al., 2022).

Betrachtet man einen idealisierten Ausschnitt der Erdoberfläche (i.e., ungekrümmte Ebene) und teilt den Raum parallel zur Erdoberfläche, in gewisser Höhe, oberhalb der Erdoberfläche, in 2 Halbräume, dann ist die Himmelsstrahlung jener Anteil der diffusen Strahlung aus dem oberen Halbraum und die Albedo Strahlung jener Anteil der diffus reflektierten Strahlung aus dem unteren Halbraum (Havlik, 1972). In der Realität findet immer eine Vermischung der diffusen Strahlungskomponenten statt (e.g., Reflexion und Gegenreflexion, Streuung durch erdoberflächennahe atmosphärische Bestandteile). Besonders in gebirgigen Regionen kann, die von der überhöhten Umgebung stammende Albedostrahlung schwer von der Himmelsstrahlung getrennt werden.

Diffuse Strahlung und globale Strahlung beinhalten teilweise Albedo Strahlung (Topographie der Umgebung). Somit beinhalten Messungen der diffusen Bestrahlung teilweise die Albedo Bestrahlung. Genaue Messung der Komponente Albedo Bestrahlung, als Anteil der diffusen Bestrahlung ist möglich, aber anspruchsvoll (Batlles et al., 2007; Schmalwieser, 2020). Der im Kapitel „Diffuse (Be)Strahlung“ beschriebene Versuchsaufbau kann um ein weiteres baugleiches, kalibriertes Bestrahlungsmessgerät erweitert werden. Die Ausrichtung des Sensors, des dritten Messgeräts ist um 180° verschoben (i.e., direkt gen Erdoberfläche gerichtet). Rieder et al. (2010) analysierten die Verhältnisse von erythemgewichteter UV-Dosis und den Parametern: Gesamtmenge an Ozon der Luftsäule, Oberflächenalbedo und Bewölkung. Die Studie kommt völlig ohne Messungen der Albedo und dem Verhältnis diffuse/globale kurzwellige Bestrahlung aus. Das wird einerseits als Limitation der Studie angesehen, andererseits ist es ein Hinweis auf den anspruchsvollen Charakter, der Messung und Modellierung der Bestrahlungskomponenten (Schmalwieser, 2020).

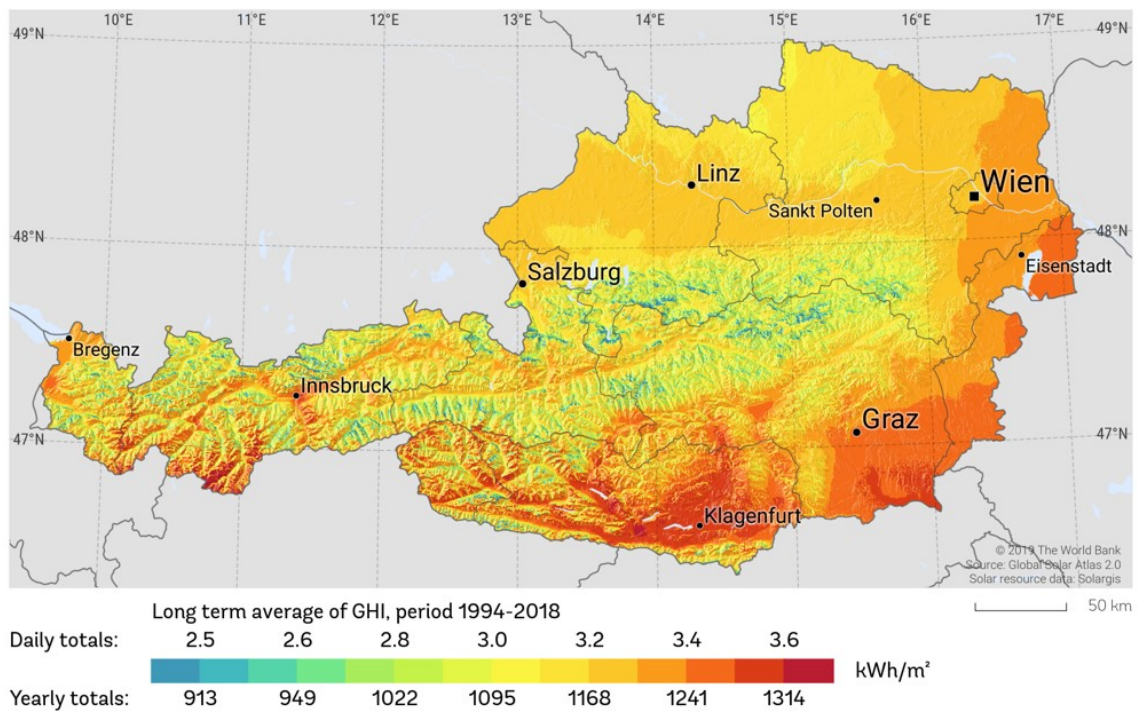


Abbildung 15 Gemittelte tägliche und jährliche globale Bestrahlung in Österreich, Zeitraum 1994 - 2008 (© 2020 The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data: Solargis)

3.2.4.4 Globale Strahlung

Globale oder totale Strahlung ist die Summe der direkten und diffusen Strahlung. Gleich den oben beschriebenen Komponenten, kann nur die globale Bestrahlung gemessen werden, die globale Strahlung (Globalstrahlung) kann berechnet, modelliert oder durch Messung impliziert werden (siehe Abbildungen 15 und 16) (Vernez et al., 2012).

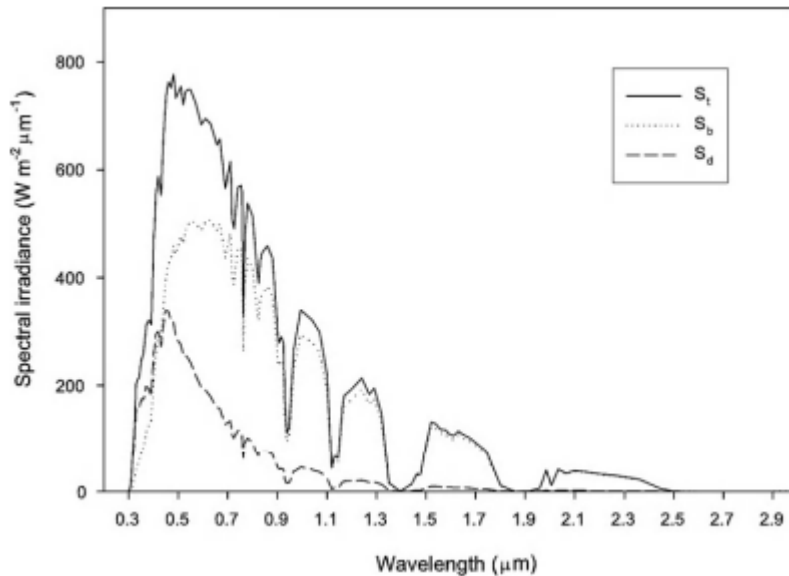


Abbildung 16 Spektrale Distribution der berechneten globalen (S_t), direkten (S_b) und diffusen Strahlung (S_d); wolkenlos, Zenitwinkel der Sonne 60° , niederschlagsbares Wasser 20 mm, Ozondicke 3 mm, aerosoloptische Dicke 0,2; (Monteith & Unsworth, 2008)

3.2.4.5 Ambiente Strahlung

Ambiente (Be)Strahlung ist die globale (Be)Strahlung am Messstandort einer weiteren Expositionsmessung. Ambiente Bestrahlung setzt sich ergo aus ambierter direkter Bestrahlung und ambierter diffuser Bestrahlung (und ambierter reflektierter Bestrahlung) zusammen. Führt man beispielsweise persönliche UVR-Messungen (Primärmessungen) durch und möchte sich bei der Analyse nicht ausschließlich auf die absoluten Daten der Primärmessungen beziehen, sondern die Primärdaten zur besseren, fortschrittlicheren Analyse (e.g., ERTA) vergleichbar machen oder in eine Modellrechnung einfließen lassen, sind Daten der ambienten Bestrahlung notwendig (Schmalwieser, 2020).

Die Generierung der Daten echter ambienter Bestrahlung ist mit immensem Aufwand und hohen Kosten, oder mit Abstrichen der Genauigkeit der ambienten Bestrahlungsmessung verbunden. Für die Messung exakter, nach Komponenten differenzierter ambienter Bestrahlung ist ein Messaufbau, wie, oder ähnlich dem in den Kapiteln „Diffuse (Be)Strahlung“ und „Albedo (Be)Strahlung, reflektierte (Be)Strahlung“ beschrieben, notwendig (Schmalwieser, 2020). Ein derartiger Messaufbau ist, besonders bei wechselnden Standorten der Feldmessungen, unrealistisch.

Eine weniger aufwendige, kostengünstiger Methode der Messung der ambienten Strahlung ist, die gleichen, wie bei den Primärmessungen benutzten, Bestrahlungsmessgeräte (e.g., PSF-

Dosimeter), an dem Messort, horizontal auszulegen und zu spezifischen Zeiten einzusammeln (i.e., Messung der globalen Bestrahlung) (Siani et al., 2011; Siani et al., 2014). Da PSF-Dosimeter, bei horizontaler Ausrichtung, die UV-Bestrahlung wahrscheinlich überschätzen, empfiehlt es sich zusätzlich ein leicht portables UV-Radiometer zur Modellierung der ambienten UV-Bestrahlungskurve einzusetzen. Die Kalibration auf dasselbe Wirkungsspektrum, dieselbe Ausrichtung und Positionierung des Sensors, des portablen UV-Radiometer, sind notwendig (Siani et al., 2011).

Mittlerweile können portable UV-Radiometer (e.g., sglux UV Radiometer), bei Feldmessungen zur Messung der ambienten UV-Bestrahlung eingesetzt werden (Cadet et al., 2020). Über das Vermögen von portable UV-Radiometer ist im Moment noch wenig bekannt, die fachliche Auswertung findet zurzeit statt. Als Approximation der ambienten UV-Bestrahlung eignen sich Messungen der globalen UV-Bestrahlung. Besonders in Mitteleuropa ist, durch die räumlich engmaschige Distribution von überwachten UV-Bestrahlungsmessgeräten, eine ausreichend gute Abdeckung gewährleistet (Schmalwieser, 2020).

3.3 Lebewesen im Strahlungsfeld

Natürliche Solarstrahlungsfelder zeichnen sich, in Regionen mit großer topographischer Variabilität (e.g., Österreich, Alpenraum), durch enorme Varianz aus. Die solare (UV) Strahlenexposition der menschlichen Haut, die zu Sonnenbrand (Erythem) führt, wird durch grundsätzlich durch 2 Kennwerte (Schwellenwerte) bestimmt: (i) *minimal erythema dose (MED)* und (ii) *standard erythema dose (SED)* (Schmalwieser et al., 2021). Der Kennwert MED hängt von Hauttyp und Hautdicke ab und liegt gemittelt für verschiedene Gruppen vor, kann aber für Individuen, innerhalb der definierten Gruppen weit von dem Mittelwert abweichen. 1 SED sind $100 \text{ J}_{\text{Ery}}/\text{m}^2$.

Ein stiefmütterlich behandelter Aspekt der UVR-Exposition ist die Beschattung. Topographische, klimatische (e.g., Bewölkungsgrad, Art der Wolken), naturräumliche (e.g., Ökosysteme, Landnutzung) und anthropogene Parameter (e.g., Bebauung, Änderung des Klimasystems) haben direkten Einfluss auf die Beschattung an einem Ort, im Raum (Monteith & Unsworth, 2013; Weihs et al., 2013). Die Beschattung hat mehrere Facetten. In gebirgigen Regionen verändert das Relief das Verhältnis von direkter und diffuser Bestrahlung, das ist durch Messungen bestätigt (Podesser, 2007; Schmalwieser, 2020). Schattenspendende Strukturen halten direkte Strahlung besser ab als diffuse (Schmalwieser, 2020). Die Quantifizierung der Beschattung, der erythemalen UV-Bestrahlung, ist ein vernachlässigtes Thema, Sacri-Bosanac et

al. (2019) zeigten, dass die Beschattung durch ein dichtes Blätterdach vom Bäumen effektiver ist als Beschattung durch Sonnenschirme. Bigelbach et al. (2023) beschäftigen sich derzeit mit der UVR-expositionsbedingtem Erythem von felllosen Schweinen (AS_{Ery} vergleichbar mit hellhäutigen Menschen) und der Wirkung schattenspendender Tücher (siehe Abbildung 17). Die in der Fachliteratur auffindbaren Zahlen, der UV-Bestrahlungsverminderung durch Beschattung, sind meist impliziert durch PE-Messungen und nicht eigentliches Ziel der Forschung (Siani et al., 2011; Schmalwieser et al., 2021). Die Spannweite, der publizierten Werte des Beschattungseffekts ist deshalb groß, sie reichen von 30 % bis 95 % Verminderung der UVR-Exposition (Gies et al., 1995; Narayanan et al., 2010; Milon et al., 2013).



Abbildung 17 Deutsches Weißes Edelschwein mit Sonnenbrand, AS_{Ery} wie bei heller menschlicher Haut (Bigelbach et al., 2023)

3.4 Wirkungsweise der UV-Strahlung auf den Menschen

Es ist wissenschaftlicher Konsens, dass übermäßige, solare UV-Exposition schädliche akute und chronische Effekte in der ungeschützten Haut hervorrufen kann. Diese können deterministischen (e.g., Erythem) oder stochastischen (e.g., Hautkrebs) Charakter haben. Andererseits ist (mäßige) UVB-Strahlenexposition für die Aktivierung der hauteigenen Vitamin-D-Produktion notwendig (Didona et al., 2018; Schmalwieser et al., 2012). Die biologische Rolle der UVR-Exposition ist zweiseitiger, beinahe paradoxer Art. In diesem Kapitel wird die breite Wirkungsweise der UV-Strahlung auf die menschliche Haut, beginnend mit der gängigsten, dem UVR-induziertem Erythem, abgehandelt. Der Fokus liegt auf hellen Hauttypen, da diese in Österreich dominieren und einen schlechteren Eigenschutz gegenüber adversen Effekten der UV-Strahlung aufweisen (Harrison & Young, 2002).

3.4.1 Erythem

Der Begriff Erythem bezeichnet in der Medizin jegliche sichtbare Hautrötung (Abeck, 2020). Ist in dem, in dieser Studie vorgestellten Kontext von Erythem die Rede, handelt es sich um solares, **UVR-induziertes Erythem**, geläufig als Sonnenbrand bezeichnet. Erytheme sind akute Verletzungen der Haut, die Rötung wird durch erhöhten Blutgehalt ausgelöst. Die Dilation der oberflächlichen Blutgefäße in der Dermis, hauptsächlich der *rete subpapillare*, führt zu dem geröteten Erscheinungsbild (Schmalwieser et al., 2012). Verschiedene Hauttypen reagieren unterschiedlich auf UVR-Exposition (siehe Kapitel Hauttypen). Der, Erythem hervorrufende, auf der Erdoberfläche ankommende, Wirkungsbereich (AS_{Ery}) der solaren Strahlung, ist vorrangig die UVB-Strahlung (IRAC, 2012; DGUV, 2020). Bei Hauttypen I – II nach Fitzpatrick kann eine hohe Dosis UVA-Strahlung (primär UVA2) zu Erythem führen. Während solare Strahlung im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts, bei dunklen Hauttypen (V – VI) Erythem induzieren kann (Sklar et al., 2012). Die systematische Detektion von strahlungsinduziertem Erythem ist nicht standardisiert und (teilweise) subjektiv (Schmalwieser et al., 2012).

3.4.1.1 Wirkungsspektrum des Erythems

Die Messung, Bestimmung, Festlegung und Quantifizierung des erythemalen Wirkungsspektrum (AS_{Ery}) hat eine 100-jährige Geschichte und ist bis heute nicht vollständig abgeschlossen. Schmalwieser et al. (2012) verglichen mittels Literaturrecherche observierte, gemessene und berechnete AS_{Ery} der menschlichen Haut, beginnend in den 1920er Jahren. Die maximale Wirkungsstärke des AS_{Ery} liegt zwischen 295 – 300 nm, eine starke Abnahme kann im Wellenlängenbereich 305 – 330 nm beobachtet werden (Parrish et al., 1982). Aus diesem Grund sind Werte, die strahlungsinduziertes Erythem der menschlichen Haut bewerten, meistens auf eine Wellenlänge zwischen 295 nm und 300 nm normalisiert. Ältere Studien, aus den 1920er und 1930er Jahren (e.g., Hausser & Vahle, 1921; CIE1935/1; Coblentz & Stair, 1934) normalisieren die Werte des AS_{Ery} auf 296,7 nm, eine Emissionslinie der verwendeten Hg-Lampen an der der gemessene (beobachtbare) Wirkungsgrad, nach Erythem-Induktion maximal war (Schmalwieser et al., 2012).

Bestimmung des Wirkungsspektrums. Durch die Entwicklung von Höchstdruck-Xenon-Gasentladungslampen erhielt die Erforschung des AS_{Ery} in den 1960er-Jahren einen Schub. Lampen dieser Art können Strahlung hoher Intensität über ein kontinuierliches Spektrum emittieren. In Kombination mit einem hochwertigen Monochromator war es nun möglich, die

menschliche Haut gezielt mit jeglicher Wellenlänge und gewünschter Intensität zu bestrahlen (Schmalwieser et al., 2012).

Die exakte Bestimmung der Reaktion, der menschlichen Haut nach der Bestrahlung, gestaltete sich weiterhin als schwierig. Seit den Anfängen der AS_{Ery} -Bestimmung wird der Schwellenwert *minimal erythema dose* (MED) verwendet. MED beschreibt jene Dosis (Energie), eines bestimmten Wellenlängenspektrums, die notwendig ist, um eine, mit dem menschlichen Auge, detektierbare Hautrötung (Erythem) zu verursachen. MED ist abhängig von Hauttyp, Körperstelle der Bestrahlung, Lichtverhältnissen der Umgebung, Betrachtungswinkel des Beobachters und Zeitspanne zwischen Induktion und Beobachtung. (Diffey, 2002; Schmalwieser et al., 2012). Ohne geeichtes, hochwertiges Chromatometer waren substantielle Vergleiche verschiedener Studienstudienenergebnisse heikel (Magnus, 1964). Seit der Anfangszeit bis in 1980er-Jahre der AS_{Ery} -Bestimmung wurden das Expertenauge in Kombination mit Schablonen und Thermosäulen, als Chromatometer eingesetzt (Magnus, 1964; Parrish et al., 1982; Schmalwieser et al., 2012). Westerhof et al. (1986) gelang es erstmals UV-induziertes Erythem, mittels computergesteuertem Chromameter (Colorimeter) zu quantifizieren und im CIE-Normvalenzsystem festzulegen (Anders et al., 1994).

Zahlreiche Studien (>50) versuchten in den letzten 100 Jahren das AS_{Ery} für diverse Hauttypen festzulegen. Dabei kamen verschiedenste Messaufbauten und Evaluierungsprinzipie zum Einsatz. In Abbildung 18 sind AS_{Ery} -Kurven, von Studien nach 1987 eingezeichnet, bei früheren Studien unterscheiden sich die AS_{Ery} deutlich stärker.

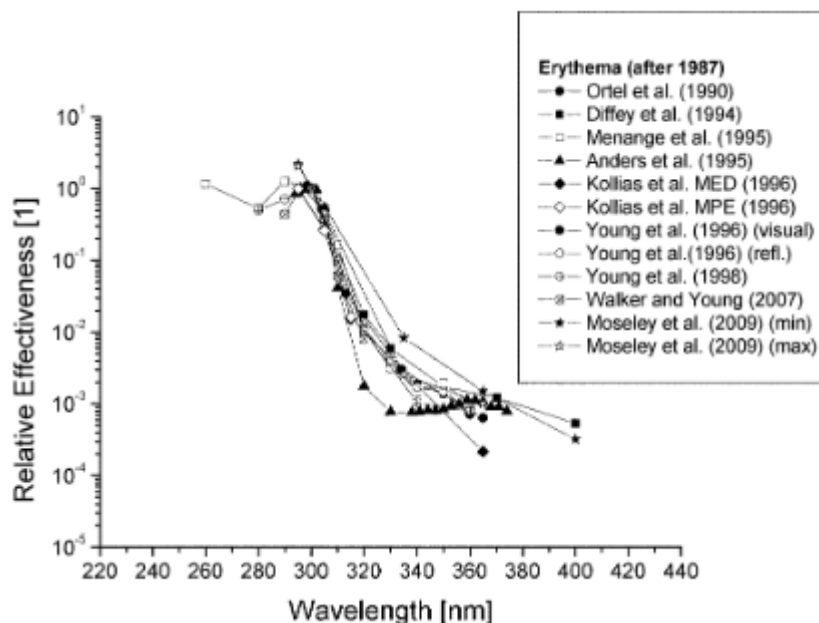


Abbildung 18 Wirkungsspektren des UV-induzierten Erythems; (Schmalwieser et al., 2012)

Festlegung des Wirkungsspektrums. Um Studien des UV-induzierten Erythems vergleichbar zu machen, musste ein Standardwirkungsspektrum festgelegt werden. McKinlay und Diffey wurden beauftragt den Standard des AS_{Ery} publiziert von CIE 1935 zu überarbeiten. Sie beschrieben AS_{Ery} mittels 3 Funktionen für 3 Spektralbereiche (Formel 1):

$$\begin{array}{ll} S_{Ery}(\lambda) = 1,0 & \text{für } 250 \leq \lambda \leq 298 \text{ nm} \\ S_{Ery}(\lambda) = 10^{0,094(298 - \lambda)} & \text{für } 298 \leq \lambda \leq 328 \text{ nm} \\ S_{Ery}(\lambda) = 10^{0,015(139 - \lambda)} & \text{für } 328 \leq \lambda \leq 400 \text{ nm} \end{array}$$

Formel 1

$ser(\lambda)$ = spektraler Wirkungsfaktor

Der neue Standard wurde von der *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) als CIE1987 festgelegt. Das AS_{Ery} (CIE1987) hat bis heute Gültigkeit und wird von internationalen Organisationen (WHO, WMO, EU, DIN, COLIPA), wie auch dem deutschen GENESIS-UV Projekt, empfohlen und angewandt (Schmalwieser et al., 2012; DGUV, 2020).

Ein Problem des CIE1987 ist, dass die Wirkungsstärke wegen der Vorzeichenwahl (\leq) bei 328 nm 2 verschiedene Werte annehmen kann (Webb et al. 2011; Schmalwieser et al., 2012). Deshalb wurde der CIE1987 Standard im CIE1998 Standard überarbeitet. Das AS_{Ery} im CIE1998 ist repräsentiert mit 3 Funktionen über definierte Wellenlängenbereiche (Formel 2):

$$\begin{array}{ll} S_{Ery}(\lambda) = 1,0 & \text{für } 250 \leq \lambda \leq 298 \text{ nm} \\ S_{Ery}(\lambda) = 10^{0,094(298 - \lambda)} & \text{für } 298 < \lambda \leq 328 \text{ nm} \\ S_{Ery}(\lambda) = 10^{0,015(140 - \lambda)} & \text{für } 328 < \lambda \leq 400 \text{ nm} \end{array}$$

Formel 2

$ser(\lambda)$ = spektraler Wirkungsfaktor

Beide CIE Standards (CIE1987 und CIE1998) sind heute in Verwendung und bieten gewisse Vor- und Nachteile (Webb et al. 2011; Schmalwieser et al., 2012). Ein systematischer Unterschied zwischen den standardisierten Wirkungsspektren besteht, der Gewichtungsfaktor des Wellenlängenbereiches > 328 nm unterscheidet sich. Dadurch überschätzt der CIE1998 Standard die Wirkung systematisch um 3,4 %, im Wellenlängenbereich 329 – 400 nm, im Vergleich zu dem Wirkungsspektrum CIE1987 (Webb et al., 2011).

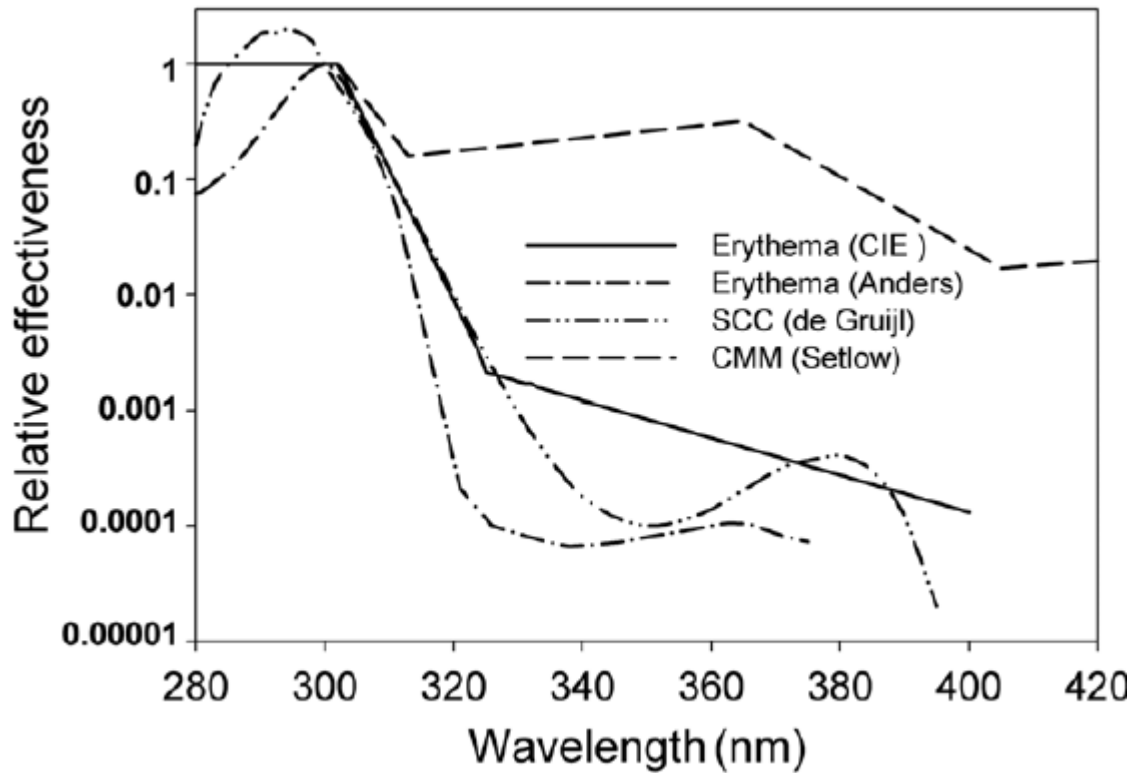


Abbildung 19 Wirkungsspektren für Erythem nach dem CIE1998 Standard und nach Anders et al. (1995), für SCC in der Haut von Mäusen nach de Gruijl et al. (1993) und für Malignes Melanom in der Haut von Fischen nach Setlow et al. (1993) (Juzeniene et al., 2011)

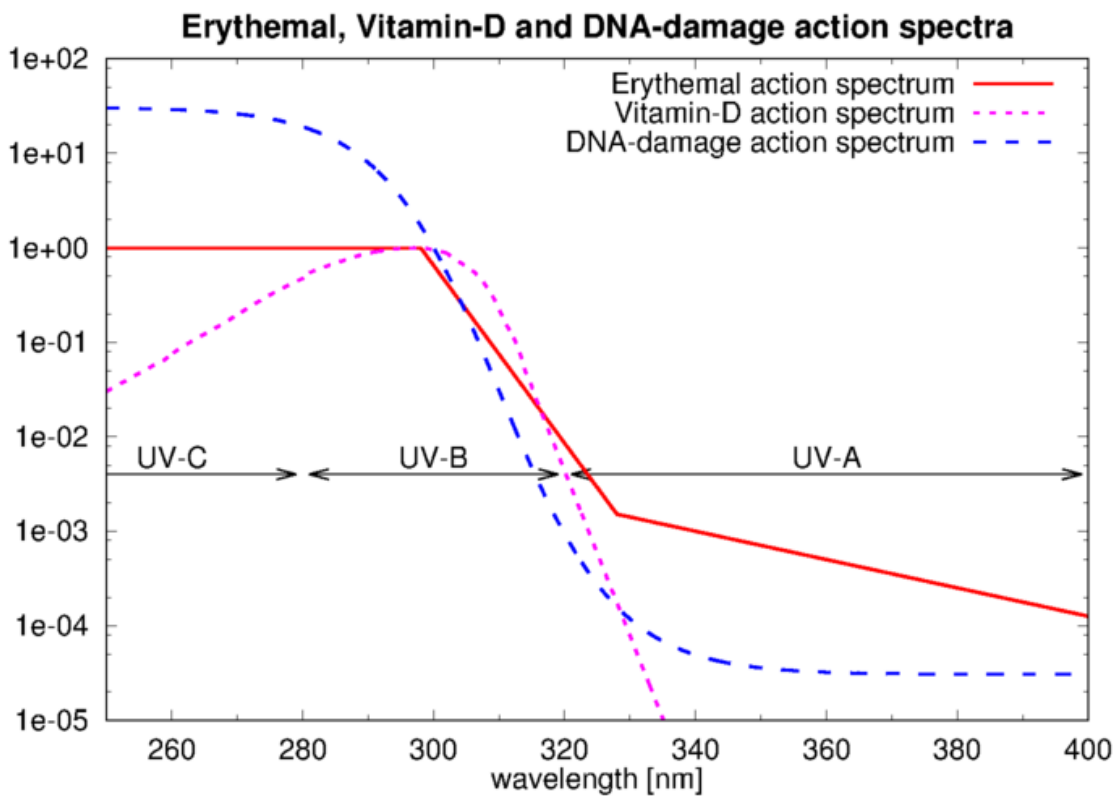


Abbildung 20 Wirkungsspektren für Erythem nach CIE1998 Standard, Vitamin-D nach CIE1974 Standard und DNA-Schäden nach Setlow (1974) (KNMI 2020, © KNMI/ESA)

Auf den Abbildungen 19 und 20 sind diverse Wirkungsspektren hautbiologischer Vorgänge zu erkennen. UVR-Exposition hat mannigfaltige, der Gesundheit abträgliche Eigenschaften. Auf Abbildung 19 werden zwei, in den 1990er-Jahren entwickelte AS_{Ery} verglichen, die Wirkungsgrade sind im UVB- und UVA-Bereich der Strahlung relativ unterschiedlich bestimmt.

3.4.1.2 Personal Exposure (PE)

Die persönliche Exposition wird als *Personal Exposure* (PE) bezeichnet. Wenn in diesem Text von PE die Rede ist, ist immer die persönlich UVR-Exposition, gewichtet auf das AS_{Ery} gemeint.

3.4.1.3 Exposure Ratio To Ambient (ERTA)

Exposure Ratio To Ambient (ERTA) ist ein Verhältniswert, meist ausgedrückt als Prozentwert, des Anteils von PE an ambienter Bestrahlung (horizontal gemessen) oder an Globalbestrahlung. Unter bestimmten Umständen (e.g., hohe Albedo, Expositionswinkel zur Sonne) kann ERTA höher sein als der Wert der Umgebungsstrahlung (Weihs et al., 2013; Schmalwieser, 2020).

3.4.1.4 Minimal Erythema Dose (MED)

Die *Minimal Erythema Dose* (MED) ist jene UVR-Dosis welche eine sichtbare Hautrötung (Erythem) auslöst. MED ist abhängig vom Hauttyp, individueller Sensitivität gegenüber UV-Bestrahlung, den radiometrischen Eigenschaften der Bestrahlungsquelle, der anatomischen Körperstelle, der Zeitspanne zwischen UVR-Exposition und Observation der Haut sowie dem Winkel der Betrachtung (Diffey, 2002; Webb et al. 2011; Schmalwieser et al., 2012). UVR-Therapie mittels persönlich ermittelter MED kann zur Behandlung von Hautkrankheiten wie Akne oder Schuppenflechte eingesetzt werden (Heckman et al., 2013; Perez Feriols et al., 2014).

3.4.1.5 Standard Erythema Dose (SED)

Eine *Standard Erythema Dose* (SED) ist definiert als $100 J_{Ery}/m^2$ erythemgewichteter Bestrahlung (CIE, 2019; DGUV, 2020). Diffey et al. (1996) prägten und führten die hauttypenunabhängige Einheit SED ein, um erythemgewichtete Bestrahlungsmengen quantifizierbar zu machen und die bis zu diesem Zeitpunkt verbreitete „Maßeinheit“ MED abzulösen. Die *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) und Schmalwieser et al. (2021) empfehlen, das tägliche UVR-Expositionslimit von 1 – 1,3 SED nicht zu überschreiten (ICNIRP, 2004).





3.4.1.6 High Risk Day (HRD)

Überschreitet die PE eines Messobjekts 10 SED pro Tag, wird von einem *High Risk Day* (HRD) gesprochen (Schmalwieser et al., 2010; Schmalwieser et al., 2021). HRD stehen im Verdacht, besonders ausschlaggebend für das Ausbrechen bestimmter Arten des Hautkrebses (e.g., Basalzellkarzinom) zu sein (Arnold et al., 2018).

3.4.2 UVR-Expositionsrichtwerte

Welche UVR-Expositionssummen normal, durchschnittlich oder vertretbar sind, ist nur teils geklärt. Das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung gibt die jährliche UV-Belastung, in Brustposition, für den durchschnittlichen Bundesbürger mit 130 SED, in Brustposition (Faktor 1) an, für den Nacken gilt der Faktor 1,7 (DGUV, 2020; IFA, 2021). Weiters wird der als gesichert betrachtete Richtwert von 170 SED/y für den durchschnittlichen Beschäftigten im Außenbereich angegeben. Mit Bezug auf Studien von Diffey (1987) und Knuschke et al. (2007) geben die DGUV (2020) und Strehl & Wittlich (2021) einen versicherungstechnischen Referenzbestrahlungswert von 300 SED/y für Bauarbeiter an. Im „IFA Report 4/2020 Exposition von Beschäftigten gegenüber solarer UV-Strahlung: Ergebnisse des Projekts mit GENESIS-UV“ von der DGUV (2020) sind, für bestimmte Tätigkeiten höhere SED-Jahresbestrahlungswerte zu finden.

Die österreichische Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA) gibt keine Kennwerte in der Einheit SED an. In der Mitteilung „M 014 UV-Strahlenbelastung am Arbeitsplatz“ sind Referenzwerte für die Berechnung der MED für die Hauttypen nach Fitzpatrick I – IV angeführt (siehe Abbildung 21) (AUVA o.J.).

					
Hauttyp		I	II	III	VI
Körperliche Merkmale	Haut	sehr hell	hell	hellbraun	braun, oliv
	Sommersprossen	stark	selten	keine	keine
	Sommersprossen	rötlich	blond-braun	dunkelblond braun	dunkelbraun
	Augen	blau	blau, grün, braun	grau, braun	dunkel
Reaktionen auf die Sonne	Sonnenbrand	immer stark, schmerzhaft	immer stark, schmerzhaft	selten, mäßig	kaum
	Bräunung	keine, nur Rötung	kaum, Haut schält sich	durchschnittlich	schnell, tief
MED [J/m²] [23]		200	250	350	450

Die vier in Europa vorkommenden Hauttypen und ihre Charakterisierung.

Abbildung 21 Charakterisierungen und Referenzwerte der MED, der vier europäischen Hauttypen nach Fitzpatrick (AUVA, o.J.)

3.4.3 Hauttypen

Die Varianz menschlicher Hauttypen ist eine Anpassung an die Umwelt. Wahrscheinlich hatten die frühesten Hominiden-Vorfahren des Menschen un- oder leichtpigmentierte Haut und dichte Ganzkörperbehaarung, wie der moderne Schimpanse. Weiters wird angenommen, dass sich mit dem Verlust des Felles rasch stark pigmentierte Haut des Genus *Homo* entwickelt hat, um vor UV-induzierter Photolyse der Folsäure und Verletzung der Schweißdrüsen durch übermäßige UV-Strahlung zu schützen (Jablonki & Chaplin, 2000).

Es wird angenommen, dass helle Haut eine evolutionäre Anpassung an die Umwelt, nach der Emigration des Menschen aus Afrika darstellt, um ausreichende Vitamin-D-Produktion zu gewährleisten (Jablonki und Chaplin, 2000; Jablonki und Chaplin, 2010; Zerefos et al., 2023). Mit der Auswanderung in nördliche Gefilde (weiter vom Äquator entfernt) wurde die photoprotektive Eigenschaft dunkler Haut obsolet, sogar nachteilig (Vitamin-D-Produktion). Neben der sehr dunklen, schwarzen Haut entwickelten sich (grob gesagt) zwei weitere Hauttypen, durch natürliche Selektion. Bei frühmenschlichen Populationen, die sich in Regionen mit geringster UVB-Strahlenbelastung niederließen, setzte sich maximal depigmentierte Haut durch, bei Populationen, die sich zwischen 23° und 46° nördlicher Breite niederließen, war

fakultative (sich bräunende) Haut vorteilhaft und setzte sich mittels des Prinzips der natürlichen Auslese durch (siehe Abbildung 22). Fakultative Haut bedingt sich durch die großen jahreszeitlichen Unterschiede der UVB-Strahlenbelastung in der angesprochenen Zone (23°- 46°) (Zerefos et al., 2023).

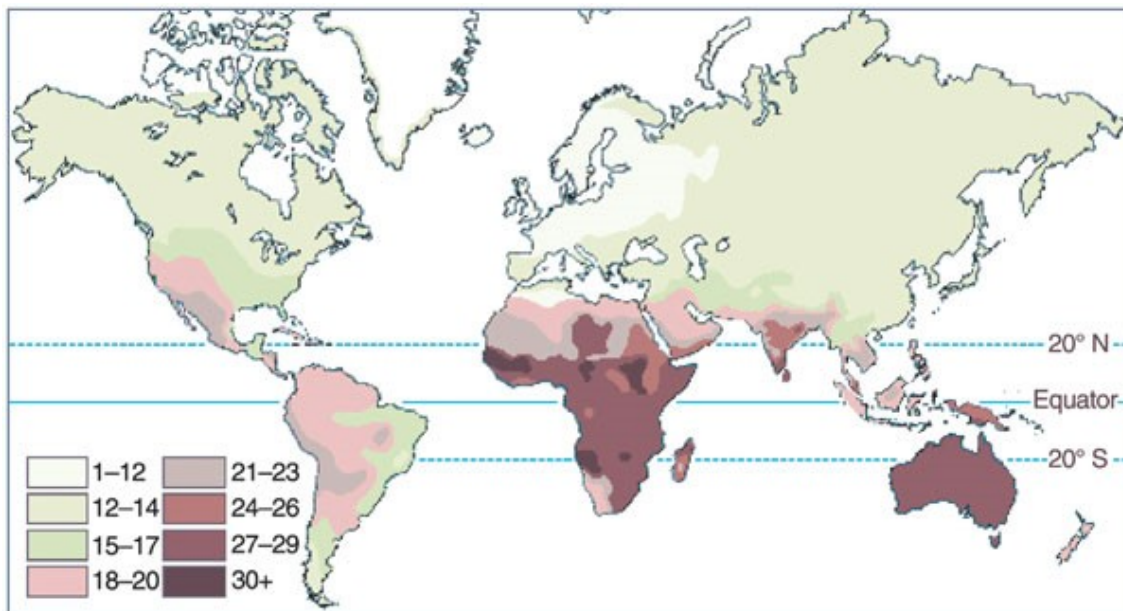


Abbildung 22 Weltweite Hauttypenverteilung, vor der europäischen Kolonisation, nach Renato Biasutti (Parra et al., 2004)

Morison (1985) kritisiert die weitverbreitete These der Hautpigmentierungsanpassung an veränderte UV-Strahlungsfelder, nach der Auswanderung des Frühmenschen aus Afrika. Einerseits stellt er die These auf, dass melaninreiche Haut dem Träger einen vorteilhaften Tarneffekt, im Lebensraum Wald bietet. Andererseits verweist er auf die Fähigkeit des Melanins als exzellenter amorpher Halbleiter. Melaninreiche Haut ist deshalb gut geeignet, Licht in Wärme umzuwandeln (Elektron-Phonon-Wechselwirkung). Außerdem könnte Melanin der originäre, evolutionäre Schutzmechanismus gegen Sauerstoffradikale sein (Morison, 1985).

Während es 20. Jahrhunderts wurden Hautkrebs und Sonnenschutz zu gesellschaftlichen Themen, in Europa, Nordamerika und Australien (i.e., den primären, heutigen Lebensräumen hellhäutiger Menschen). Aufgrund der Häufung von Erythemen bei gewissen, an der Hautfarbe zu unterscheidenden Gruppen entwickelte Fitzpatrick in Jahr 1975 ein **4-stufiges Hauttypenklassifizierungssystem** des hellhäutigen Phänotyps, welches in der Folge um 2 weitere Kategorien (afrikanischer Typ und asiatischer Typ) erweitert wurde (siehe Abbildung 14) (Gupta & Sharma, 2019). Eine Menge weitere Klassifizierungssystem, die den Fokus auf weitere Variablen, sowie auf nichtweiße Hauttypen legten, folgten (Ware et al., 2020). Baumann (2008)

identifizierte vier **Hautparameter**: **(i)** trocken-fettig, **(ii)** sensitiv-resistent, **(iii)** pigmentiert-nicht pigmentiert (bezogen auf ungewollte Hyperpigmentierung, die Behandlung erfordert), und **(iv)** faltig-straft. Diese 4 Charakteristika sind zu kombinieren und führen zu 16 Permutationen (Hauttypen nach Baumann) welche die Hautfarbe nicht beachten. Besonders die Parameter (i), (ii) und (iii) beeinflussen die das Auftreten von Erythem und den Ausbruch von Hautkrebs bei den Betroffenen.

Die Hauttypen (Phototypen) nach Fitzpatrick wurden klassifiziert, um die Hautreaktion bei *Psoralen plus ultraviolet A (PUVA) photochemotherapy* vorherzusagen und in weiterer Folge, um die Reaktion der Haut beim Sonnenbaden einzuschätzen. Neben den Messungen der persönlichen UVR-Exposition wurden im Zuge der Feldarbeit Hauttypenmessungen mit CR-300 Chroma Meter von Minolta durchgeführt. Die Auswertung dieser Ergebnisse und die Relation zu den Ergebnissen dieser Studie werden in einer Folgestudie vorgestellt. Neben dem unveränderlichen Hauttyp einer Person und den teilweise behandelbaren Hautcharakteristika nach Baumann, hat die veränderliche Hautdicke des *stratum corneum* maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschutzfunktion der menschlichen Haut (Schmalwieser et al., 2021).

3.4.4 Fakultative Bräunung

Ein Eigenschutzmechanismus der Haut ist die Bräunung nach der Exposition durch solare Strahlung. Der ausschlaggebende Bereich des solaren, die Erdoberfläche erreichenden Strahlenspektrums, der zur Veränderung der mess- und quantifizierbaren Hautbräunung beiträgt, reicht von der UVB-Strahlung, über die UVA-Strahlung bis in den Bereich des sichtbaren Lichtes. Die Hauttypen II – VI besitzen die Fähigkeit durch **Melanogenese** Melanin zu bilden und anzureichern (bei Hauttyp I ein vernachlässigbarer Effekt) (Saternus et al., 2018). Zwei Prozesse, der fakultativen Hautbräunung, sind zu unterscheiden: **(i)** Sofortpigmentierung (*Immediate Pigment Darkening* [IPD]) und **(ii)** Spätpigmentierung (*Delayed Tanning*).

3.4.4.1 Sofortpigmentierung

Sofortpigmentierung (IPD) genannt, ist ein vorübergehender Eigenschutzmechanismus der Haut. IPD wird durch Exposition der Haut, gegenüber der Strahlenbereiche UVA und sichtbarem Licht induziert (Rosen et al., 1990; Meffert & Meffert, 2000). Sofortpigmentierung tritt 5 – 10 Minuten nach der Exposition auf und verschwindet 1 – 2 Stunden nach der Exposition. Melanin Photochemie ist der ausschlaggebende Mechanismus von IPD (Schmalwieser et al., 2012). Das

Wirkungsspektrum (AS_{IPD}) ist unzureichend definiert, die Minimaldosis hängt vom Hauttyp ab (Wirkung bei dunklerer Haut stärker), der biologische Effekt von IPD ist kaum verstanden (Routaboul et al., 1999). Irwin et al. (1993) definieren AS_{IPD} mit 320 – 400 nm, die Maximalwirkung um 340 nm (Routaboul et al., 1999). Rosen et al. (1990) geben die Obergrenze (AS_{IPD}) um 470 nm an.

3.4.4.2 Spätpigmentierung

Spätpigmentierung ist der 1 – 2 Tage nach der UVR-Exposition auftretende Effekt der Bräunung der Haut. Je nach Hauttyp und UVR-Exposition bleibt die Spätpigmentierung einige Wochen bis Monate sichtbar. Wie umfangreich der Eigenschutzmechanismus der Spätpigmentierung, bei heller Haut tatsächlich ist, ist umstritten. De Gruijl (2017) berichtet in seiner Literaturrecherche von einer Erhöhung des Schutzes von 10 % bis zu 10-facher Schutzerhöhung, abhängig von den gewählten AS und MED der Studien. **Eine 2- bis 4-fache Erhöhung des Eigenschutzes**, durch solare UV-Strahlung kann bei ausreichender Spätpigmentierung angenommen werden (Schmalwieser et al., 2012; Gilchrest, 2011). Das für Spätpigmentierung verantwortliche AS ist mit dem AS_{Ery} (fast) kongruent, der maximale Wirkungsgrad beider liegt um 300 nm (de Gruijl, 2017). Ein Indiz für eine Ursache-Wirkungs-Beziehung (Gilchrest, 2011).

3.4.5 Hyperplasia

Die Verdickung (*Hyperplasia*) der äußersten Hautschicht (*stratum corneum*) ist der **effektivste Prozess**, auf den die menschliche Haut aller Hauttypen, zurückgreifen kann, um sich gegen negative Effekte der UVR-Überexposition (e.g., Erythem, NMSC) zu schützen. Kontinuierliche UVR-Exposition führt nach 4 bis 8 Wochen zur **3 – 5-fachen Verdickung** des *stratum corneum*. Langanhaltende Hautverdickung tritt nur bei jenen Personen auf, die kontinuierlich, über Jahre hinweg, der UV-Strahlung ausgesetzt sind (Jablonski & Chaplin, 2010; Schmalwieser et al., 2021). Berufserfahrene Außenarbeiter profitieren von diesem Effekt.

3.4.6 Vitamin D

Etwa 80 – 90 %, des im Körper gelagerten Vitamin D wird durch UVB-Strahlung produziert (Sahota, 2014). Das Wirkungsspektrum der UVR-induzierten, menschlichen Vitamin-D-Produktion (AS_{vitD}) ist mehr auf UVB-Strahlung gewichtet als AS_{Ery} (siehe Abbildung 23). Da solare UVB-Strahlung stark von stratosphärischem Ozon absorbiert wird, ist die Distanz (optische Luftmasse), welche die solare Strahlung zurücklegen muss, entscheidend, für das Verhältnis von

AS_{vitD} und AS_{Ery} . Die optische Luftmasse ist von Breitengrad, Jahres- und Tageszeit, beziehungsweise vom solarem Zenitwinkel und dem totalen Ozongehalt (Ozonsäule) abhängig. Fioletov et al., (2009) entwickelten eine empirische Formel, mittels Messungen des UV-Messnetzes (Brewer Spektralphotometer), welche das Verhältnis von AS_{vitD} und AS_{Ery} darstellen kann (Formel 3).

$$R = 0,323 + 6,93 * c - 5,29 * c^2 - 0,0123X * c * (1 - c)$$

Formel 3

R = Verhältnis von AS_{vitD} und AS_{Ery}

X = totalen Ozongehalt (Ozonsäule) in DU

c = Cosinus des solaren Zenitwinkels

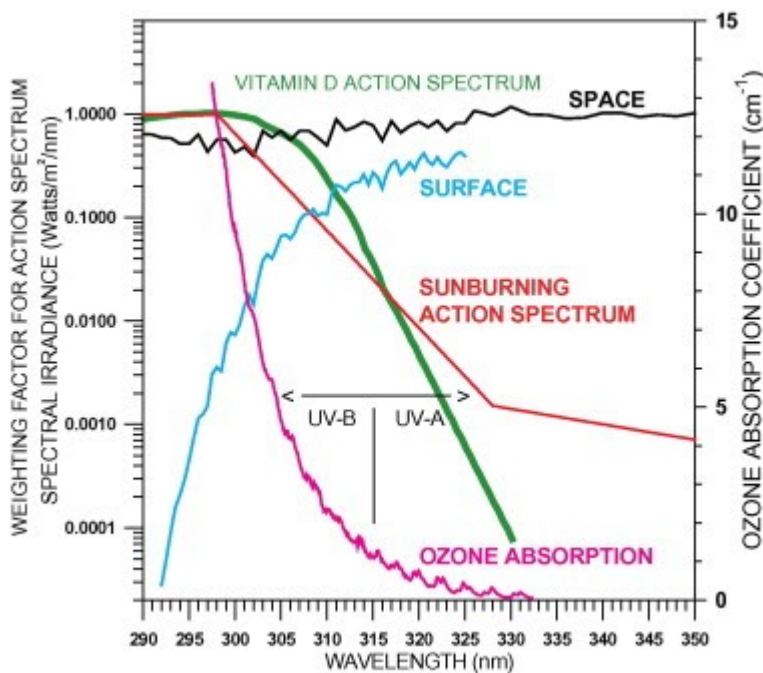


Abbildung 23 UV-Strahlung gemessen im All (schwarz), Erdboden (blau), Absorption von stratosphärischem Ozon (violett), AS_{vitD} (grün), AS_{Ery} (rot) (Fioletov et al., 2009)

3.4.7 Nicht-melanozytärer Hautkrebs

Exposition gegenüber UVA- und insbesondere UVB-Strahlung, sowie helle Haut, weitere genetische Faktoren, ungesunder Lebensstil (e.g., Rauchen, Übergewicht), Aufenthaltsdauer und Verhalten im Freien, längere Lebensdauer, Bekleidungsstil, Abbau der Ozonschicht, und supprimiertes Immunsystem sind determinierende Faktoren, für das Erkranken an nicht-melanozytären Hautkrebs (NMSC) (Leiter et al., 2015; Didona et al., 2018; DGUV, 2020; Schmalwieser et al., 2021).

NMSC ist wahrscheinlich der am häufigsten diagnostizierte Krebs, beim Menschen (Didona et al., 2018). Bei hellhäutigen Menschen ist es die verbreitetste Krebsart (Leitner et al., 2015; Findlay & Soufan, 2022). Trotz dieses Umstands wird NMSC nicht im Österreichischen Nationalen Krebsregister erfasst, da laut Statistik Austria der Aufwand in keinem Verhältnis zum Nutzen steht (Statistik Austria, 2020). Die Nichterfassung der NMSC-Inzidenz ist ein weltweites Problem und stellt ein Hindernis für die Erkenntnisgewinnung dar, auf Abbildung 23 ist eine grobe Schätzung der europaweiten NMSC-Inzidenzraten, der WHO (*World Health Organisation*) zu sehen.

Die zwei dominanten Arten von NMSC sind das Basal-Zell-Karzinom (*Epithelioma basocellulare*, basal cell carcinoma [BCC]), für 70 – 80 % aller NMSC-Diagnosen verantwortlich, und das Plattenepithelkarzinom (*Epithelioma spinocellulare*, *Squamous cell carcinoma* [SCC]), 20 – 25 % der Diagnosen (Wood et al., 2014; Didona et al., 2018). Wood et al. (2014) beobachteten eine jährliche Steigerungsrate von 2- 3 % der NMSC-Fälle in den USA. Moan et al. (2015) untersuchten den Zusammenhang von UVR-Exposition und diversen Hautkrebsarten in Norwegen und fanden eine Potenzgesetzmäßigkeit (Formel 4).

$$\ln(\text{relative tumor desity}) = A_b * \ln(\text{annual UV}_{\text{Ery}} \text{ dose})$$

Formel 4

A_b = Faktor des Nord-Süd-Gradienten (Breitengrad)

relative tumor desity = die Inzidenzrate des Hautkrebses

Die Gesetzmäßigkeit suggeriert einen statistisch signifikanten Zusammenhang des Ausbrechens von NMSC und UVR-Exposition (AS_{Ery}). Weiters kommen die Autoren zu dem Schluss, dass intermittierende UVR-Expositionsmuster bei BCC hochgradig cancerogen wirken. Dem Gegenüber scheint das Ausbrechen von SCC von der gesamten, auf die Haut einwirkenden UVR-Dosis (AS_{Ery}) abhängig zu sein (Moan et al., 2015).

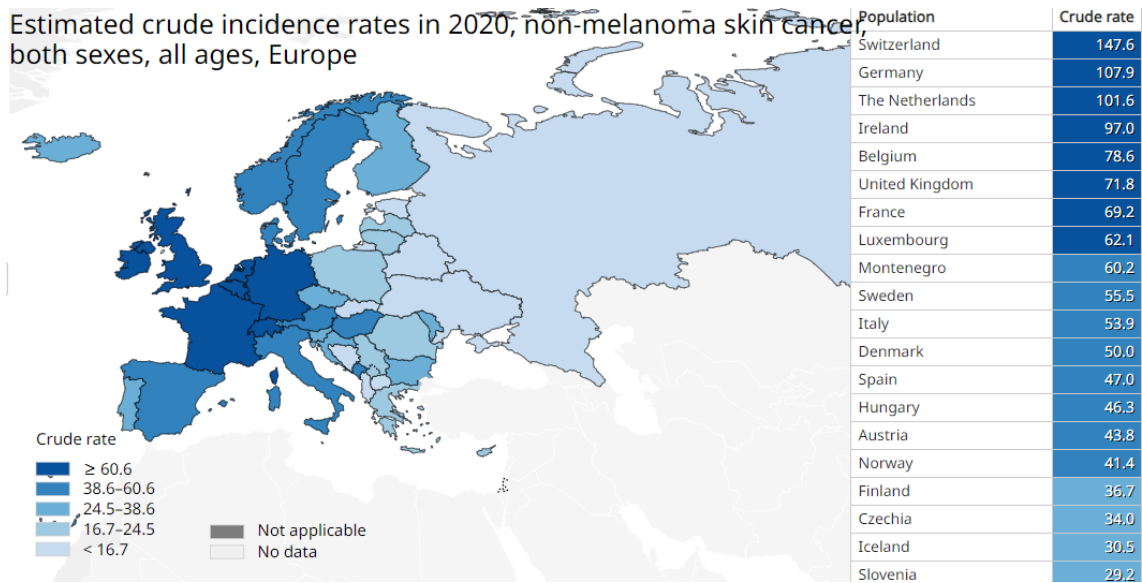


Abbildung 24 Schätzungen der NMSC-Inzidenz in Europa (© International Agency for Research on Cancer 2023)

3.4.7.1 Basalzellkarzinom BCC

BCC (siehe Abbildung 25) treten fast ausschließlich an exponierten oder intermittierend exponierten Körperstellen auf, ein wichtiges Indiz für den Zusammenhang zwischen dem Ausbreiten der Krankheit und der Überexposition der Haut durch solare UV-Strahlung. Zu ~80% tritt BCC im Kopf-Hals-Bereich auf (Wong et al. 2003; Breuniger et al., 2005).

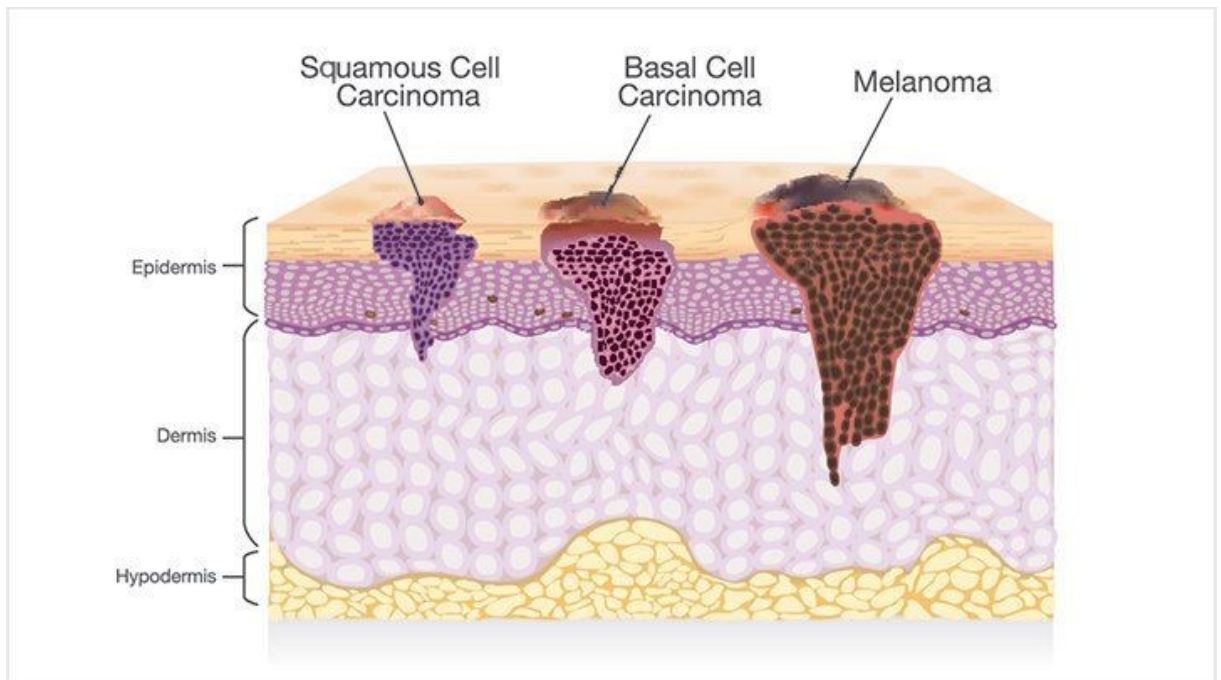


Abbildung 25 Hautkrebsarten, typisches Ausbreitung in Hautschichten (Kaufman, 2022)

3.4.7.2 Aktinische Keratose

Aktinische Keratose (AK) ist eine extrem häufig auftretende Hautveränderung bei hellhäutigen Menschen, für die Entstehung ist chronische, kumulative, erythemgewichtete UVR-Exposition verantwortlich (Calzavara-Pinton et al., 2015; Moan et al., 2015). AK hat das Potenzial, sich zu SCC zu entwickeln. Das Wirkungsspektrum ist folglich jenes von SCC, welches mit jenem des Erythems kongruent ist (Webb et al., 2011; Moan et al., 2015). AK manifestiert sich einzeln oder gehäuft (multiple aktinische Keratose [MAK]). Patienten, die an einzelnen AK-Läsionen leiden haben eine Chance von etwa 10 % an SCC zu erkranken, jene mit MAK haben eine etwa 20 %-Chance, bei immunsuppressiven Patienten steigt die Wahrscheinlichkeit auf 30 – 60 % (Leiter et al., 2020). AK manifestiert sich fast ausschließlich an chronisch UVR-exponierten Körperstellen wie Kopf, Gesicht, Hals, Nacken, Brust, oberer Rücken oder den Streckseiten der Extremitäten (Leiter et al., 2020).

Neben dem primären Risikofaktor (**chronische UVR-Exposition**) sind sekundäre, ableitbare Risikofaktoren, wie das Alter (längere Expositionsdauer) und das männliche Geschlecht (Männer halten sich häufiger im Freien auf und verlieren eher das Haupthaar) zu nennen. Weiters werden die Hauttypen I und II, der **Beruf** und ungesunder Lebensstil als Risikofaktoren beschrieben (Frost und Green, 1994; Siegel et al., 2017; Leiter et al., 2020).

Belastbare Daten zu Inzidenzzahlen sind rar, in Deutschland wurde die Prävalenz von AK bei 90800 Arbeitnehmern, basierend auf Daten der Krankenkassen, mit 2,7 % (11,5 % der 60- bis 70-Jährigen) angegeben (Leiter et al., 2020). Die tatsächliche Zahl der unter AK leidenden Menschen dürfte deutlich höher liegen. Siegl et al. (2017) schätzen die Prävalenz auf 40 Millionen in den USA, im Jahr 2004 (~13,6 % der Bevölkerung). Didona et al. (2018) schätzen, dass bis zu 40 – 50 % der adulten Bevölkerung von AK betroffen sind und verweisen auf die Überrepräsentation der Menschen mit Hauttypen I und II. Zunehmendes Alter (**kumulative UVR-Exposition**) ist ein entscheidender Faktor für das Auftreten von AK, die Krankheit tritt fast ausschließlich bei Personen über 45 Jahren auf (Siegel et al., 2017; Leiter et al., 2020).

3.4.7.3 Plattenepithelkarzinom SCC

AK ist der Vorbote oder Wegbereiter des Plattenepithelkarzinoms (SCC) (Calzavara-Pinton et al., 2015). Die jährliche Rate der AK, die sich zu SCC entwickeln wird mit 0,025 – 16 % angegeben. Da die Haut der Betroffenen normalerweise multiple aktinische Keratosen (MAK) aufweist, im Schnitt 6 – 8 AK pro Patienten, wird die jährliche Rate der Entwicklung zu SCC mit 0,15 – 80 % angegeben (Ratushny et al., 2012; Didona et al., 2018). Der **UVB-strahleninduzierte**

Mechanismus, der die Mutation des Tumorsuppressorgens p53 hervorruft, wurde bei Mäusen von Jiang et al. (1999) bestätigt. Derselbe Mechanismus ist mit hoher Wahrscheinlichkeit beim Menschen für das Ausbrechen von AK und der Folgeerkrankung SCC verantwortlich (Ratushny et al., 2012; Didona et al., 2018; DGUV, 2020). Die bei den Feldmessungen verwendeten PSF-Dosimeter, mit der biologisch effektiven Gewichtung AS_{Ery} sollten daher brauchbare Werte für das Auftreten von arbeitsbedingtem Erythem und die durch chronische UVR-Exposition ausgelösten Hauterkrankungen AK und SCC liefern (DGUV, 2020).

SCC ist die zweithäufigste Art von NMSC, die jährliche Inzidenzrate von NMSC wird in den USA mit 1 – 2 Mio. angegeben, 20 – 30 % der Erkrankungen sind SCC (Leiter et al., 2015; Wood et al., 2014). Für Deutschland wird die Rate der jährlichen NMSC-Erkrankungen mit 213000 (22 % SCC) angegeben (DGUV, 2020). Die klinischen Merkmale von SCC sind wie bei allen NMSC vielfältig (Marks, 1996).

3.4.8 Zusammenfassung Wirkungsweiße der UV-Strahlung auf den Menschen

Die Inzidenzraten von BCC, AK und SCC steigen weltweit. Nur in Australien und Neuseeland scheinen Hautkrebserkrankungen zurückzugehen, ein Erfolg der jahrzehntelangen Präventionsmaßnahmen (DGUV, 2020). Welche Rolle die stratosphärischen Ozonverhältnisse (i.e., Ozonloch der Südhemisphäre) dabei spielen, ist unklar (Fabbrocini et al., 2010). Die Forschungsleistung zur Wirkungsweise der UV-Strahlung auf den Menschen ist einerseits immens, andererseits völlig unzureichend. Auftretende Probleme der Bestahlungsmessung und die Effekte jener sind teilweise ungeklärte biochemische Mechanismen und Wirkungsweißen auf und im Menschen (sowie Flora und Fauna generell), schwer generalisierbare Strahlungsfelder, besonders in geographisch diversen Gebieten wie Österreich und die große, inhärente Streuung der quantifizierbaren Messergebnisse, sowie die Sensibilität der Wirkungsweiße und die damit verbundene schlechte Reproduzierbarkeit und Kalibration von Messgeräten (Dirnhirn, 1964; Schmalwieser et al., 2021).

3.5 Strahlungsmessung

Isaac Newton beschrieb erstmals 1666 mittels eines triangulärem Glasprismas die farbigen Komponenten des sichtbaren Lichts und öffnete somit die Tür zur Erforschung der Strahlung. Im Jahr 1800 bewies William Herschel die Existenz von Infrarotstrahlung. Ein Jahr später 1801 entdeckte Johann Ritter die UV-Strahlung, als er zeigte, dass ein chemischer Vorgang von einer

Form von Energie, aus dem dunklen Spektralbereich, jenseits des sichtbaren violetten Lichts ausgelöst wurde (Barth, 1987; Diffey, 2002).

Zwei Bereiche der Strahlungsmessung sind zu unterscheiden, die **Photometrie** beschäftigt sich mit der Messung des sichtbaren Licht (bezieht Empfindlichkeit des Betrachters mit ein), die **Radiometrie** ist die Messung der elektromagnetischen Strahlung und beinhaltet somit die Photometrie. Die Messung ionisierter Strahlung hat mannigfaltige Anwendungen, von Überwachung und Gefahrenabschätzung radioaktiver Verstrahlung in Kernkraftwerken, über globale und persönliche UVR-Expositionsmessungen, bis zu geologischen und archäologischen Datierungsverfahren. In der Folge werden die zur UVR-Expositionsmessung verwendeten Messgeräte und deren Verfahren vorgestellt.

3.5.1 Spektralradiometer

Es existiert eine breite Palette von Spektralradiometern (Spektrometern) für die diversen spektralradiometrischen Anwendungen. Moderne Spektrometer (Mehrkanalinstrumente) können simultan alle notwendigen Datenpunkte eines Strahlenspektrums bestimmen (Skoog et al., 2017). In der UVR-Messung dienen Spektrometer der exakten Absorptionsmessung einzelner Wellenlängen (bis zu Zehntel von Nanometern) von Materialien der Bestrahlungsmessung (e.g., Polysulphon) oder der menschlichen und tierischen Haut, um Wirkungsspektren zu bestimmen, Dosimeter zu kalibrieren und auszuwerten (Knuschke & Barth 1996).

Außerdem werden Spektralradiometer benutzt, um die UV-Bestrahlung selbst zu messen. Spektrometer liefern detaillierte Messergebnisse der Bestrahlung von Spektralbänder, sie können die Energie jeder Wellenlänge, ganzer Spektren quantifizieren (Bais et al., 2001). Spektrometer mit hoher Auflösung (i.e., 0,1 nm) werden in Laboren zur Kalibration und Auswertung von UV-empfindlichem Material genutzt, und zu Langzeit-UV-Bestrahlungsmessungen an Messstationen (Schmalwieser et al., 2019). Portable Spektrometer, mit etwas geringerer spektraler Auflösung können für Feldmessungen eingesetzt werden (e.g., Messung der ambienten UV-Bestrahlung) (Julitta et al., 2016; Cadet et al., 2020).

Ständige Überprüfung der Messgenauigkeit, regelmäßige Wartung und gegebenenfalls Rekalibrierung an akzeptierte Standards, sowie Interkalibrierung baugleicher und verschiedener Spektrometer muss als prioritär angesehen werden, um konstant brauchbare Messergebnisse zu erzielen (Kiedron et al., 1999; Bais et al., 2001; Diffey, 2002, Schmalwieser et al., 2019, Schmalwieser, 2020).

3.5.2 Pyranometer

Pyranometer messen die solare Bestrahlung eines Spektralbands. Im Gegensatz zu Spektralradiometer können sie das bemessene Spektrum nicht aufteilen, sondern geben Summen über das ganze Band an (Breitband Radiometrie). Je nach Messaufbau können Pyranometer, oder kombinierte Pyranometer, Global-, Diffus-, Albedo- und Himmelsbestrahlung messen (Schmalwieser, 2020).

3.5.3 Dosimeter

Dosimeter messen Bestrahlungssummen über ein vorbestimmtes Spektralband und werden deshalb, wie Pyranometer, der Breitband Radiometrie zugeordnet. Während chemische und biologische Dosimeter vor und nach der Bestrahlung ausgewertet werden müssen, und somit Summen über eine Zeitspanne angeben, können elektronische Dosimeter, in Kombination mit einem Datenlogger, zeitlich hoch aufgelöste (sekündliche) Messergebnisse liefern (Strehl et al., 2021). Persönliche UVR-Exposition (personel exposure [PE]) wird mit Dosimetern gemessen. Die Messtechnik kann auf physikalischen, chemischen oder biologischen Vorgängen beruhen. Ordnungsgemäße Kalibrierung ist für die Genauigkeit, den Vergleich und die Brauchbarkeit der Messergebnisse aller Dosimetertypen von immanenter Wichtigkeit. (Diffey, 2002; Schmalwieser et al., 2021).

3.5.3.1 Chemische Dosimeter

Die chemische Methode der Strahlungsmessung ist die chemische Aktinometrie. Die Anzahl der, auf das im chemischen Dosimeter verwendeten Medium, auftreffenden Photonen, bedingt einen direkt ausgelösten chemischen Prozess (i.e., photochemische Umwandlung: Bildung oder Zerstörung von Molekülen). Der Grad der Veränderung kann durch Messung, vor und nach der Exposition, bestimmt werden (Kuhn et al., 2004).

Polysulfonfilm Dosimeter. Der thermoplastische Kunststoff Polysulfon (PS) kommt in Polysulfonfilm Dosimetern (PSF-Dosimeter) (siehe Abbildung 28) zum Einsatz. Ist Polysulfon der UV-Strahlung exponiert, erhöht sich die optische Absorption (Photodegradation) (Strehl et al., 2021). Das Absorptionsspektrum des PS ist dem erythemalen Wirkungsspektrum (AS_{Ery}) ähnlich, aber etwas in Richtung längerer Wellenlängen verschoben (siehe Abbildung 26) (Diffey, 2002; Kuhn et al., 2004). Ein Peak der Absorptionsänderung von PS, durch UV-Strahlung liegt bei 330

nm, eine Kalibration ist notwendig (Siani et al., 2014). Bei exakter Kalibration des PSF, können PSF-Dosimeter, aufgrund der kostengünstigen Herstellung und der einfachen Handhabung, als gute PE-Messgeräte dienen (Siani et al., 2014). Die Kalibrierungsfaktoren von PSF-Dosimetern, wie aller Breitband-Radiometer, die UVR-Exposition bemessen wollen, sind Gesamtmenge an Ozon der Luftsäule (total ozone [column]), Zenitwinkel der Sonne und das zu absorbierenden Strahlenspektrum (siehe Abbildung 27) (Krins et al., 2001; Schmalwieser et al., 2021). Seit den 1970er-Jahren sind PSF-Dosimeter weit verbreitete Messgeräte zur PE-Bestimmung.

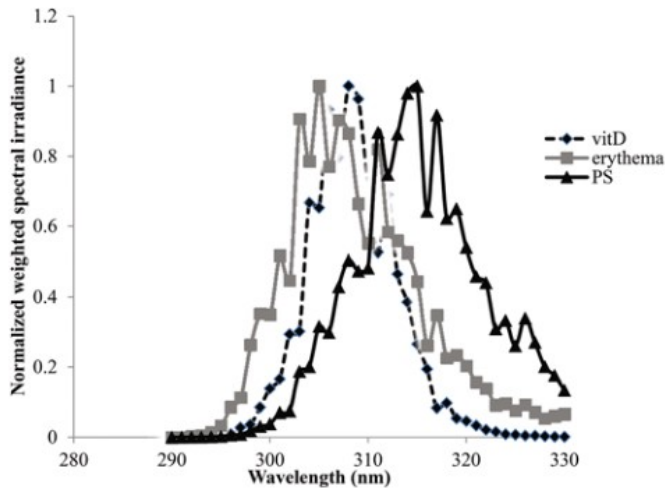


Abbildung 26 Erythem, Pro-Vitamin-D und PS gewichtete spektrale Bestrahlungsstärke, am 18.06.2007, 12:00 Uhr, Rom (Italien). $O_3 = 325$ DU, Zenitwinkel der Sonne = $18,6^\circ$, wolkenlos. (Siani et al., 2014)

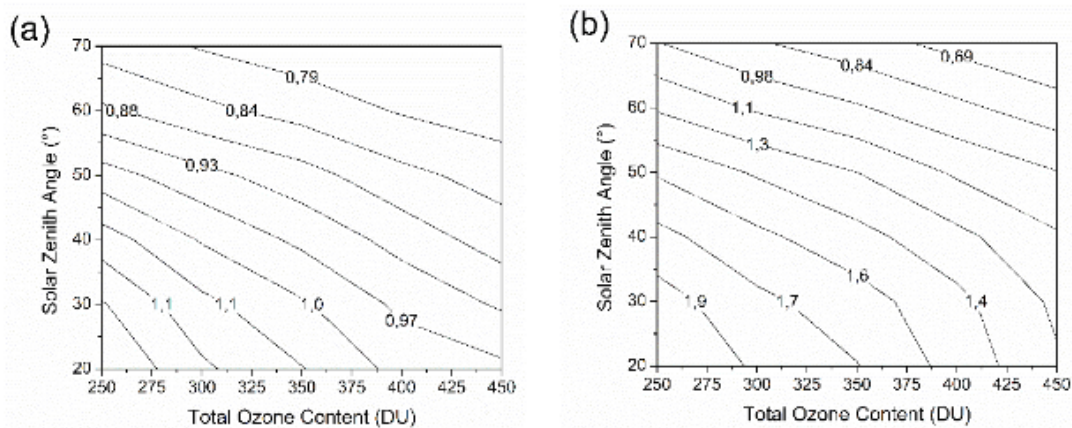


Abbildung 27 Beispiel für Korrelationsfaktoren (Kalibrationsmatrizen) von PSF für (a) AS_{Ery} und (b) AS_{VitD} . (Schmalwieser et al., 2021)

3.5.3.2 Biologische Dosimeter

Seit den 1990er-Jahren wird mit biologischen UVR-Dosimetern experimentiert (Diffey, 2002). Sporenfilm-Dosimeter des Typs VioSpor (siehe Abbildung 28) können, anhand der gehemmten Sporulation von *Bazillus Subtilis*, die UVR-Exposition quantifizieren (Moehrle et al., 2000). VioSpor-Dosimeter werden wegen ihrer adäquaten Fähigkeit UVR-Exposition zu bestimmen, ihrer guten Lagerbarkeit und dem leichten Gewicht (15 g) gerne als persönliche UVR-Dosimeter eingesetzt (Moehrle et al., 2000; Schmalwieser et al., 2021).

3.5.3.3 Elektronische Dosimeter

Elektronische oder physikalische Dosimeter (siehe Abbildung 28) können mittels elektro-optischer Sensoren (i.e., Fotodioden), bei ordnungsgemäßer Kalibrierung, die erythemwirksame UV-Strahlung messen (Diffey, 2002). Die Verbindung mit einem Datenlogger (Datenlogger-Dosimeter) macht es möglich, sekundliche UVR-Messwerte aufzuzeichnen und mittels geeigneter Software auszulesen und sofort graphisch darzustellen (DGUV, 2020).

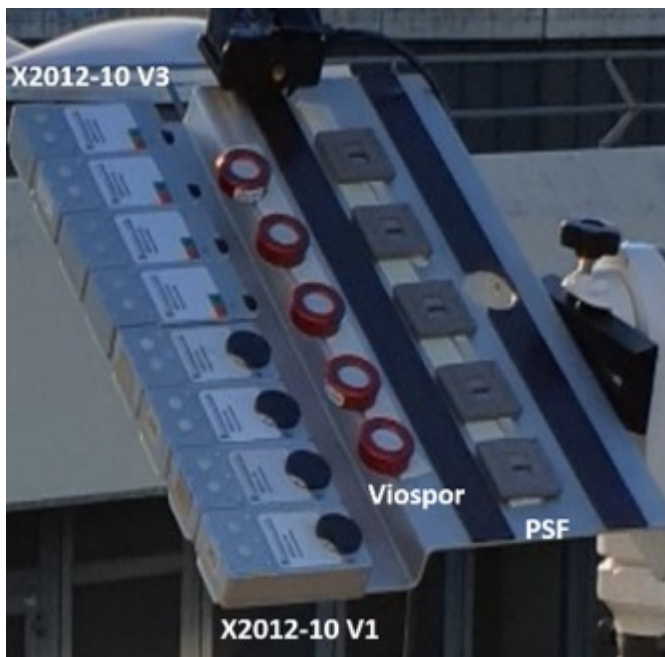


Abbildung 28 Dosimeter auf Suntracker, elektronische Dosimeter (links), Viospor (mittig), PSF (rechts) (Strehl et al. 2021)

3.5.3.4 Dosimetervergleich

Strehl et al. (2021) verglichen die Messeigenschaften chemische Dosimeter (PSF-Dosimeter der Technischen Universität Dresden), biologischer Dosimeter (VioSpor blue line type II und blue line

type III) und elektronischer Dosimeter (X2012-10 (V1) und (V3), von Gigahertz Optik GmbH, Türkenfeld, Deutschland) um die Interkorrelation der verschiedenen Typen zu bestimmen und Interkalibrationsverhältnisse zu beschreiben (siehe Abbildung 28). Bei (fast) senkrechtem Einfallswinkel der direkten Strahlung (solarer Zenitwinkel $\sim 0^\circ$) überschätzen PSF-Dosimeter die UVR-Exposition (Faktor 1,3) gegenüber den elektronischen Dosimetern, bei größeren Einfallswinkeln verschwindet ($>30^\circ$) verschwindet der Faktor. Für die biologischen Dosimeter konnte kein Interkorrelationsverhältnis bestimmt werden. Die getesteten elektronischen und PSF-Dosimeter eignen sich, um PE-Messung durchzuführen und erlauben Vergleiche (Strehl et al., 2021). Weitere Eigenschaften der Dosimeter wurden ausgewertet (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3 Eigenschaften verschiedener Dosimeter im Vergleich (Strehl et al., 2021)

Property	X2012-10	PSF	VioSpor
Price (short term)	---	+++	++
Price (long term)	++	0	--
Temporal resolution	+++	---	---
Reproducibility	++	+	-
Sampling rate	0	++	++
Measurement range	+++	-	---
Size and weight	0	+++	++
Ease of use (for subject)	+	++	++
Evaluation process	+++	-	-
Data validity	+++	+	+
Upgradability	+++	---	---

4 Methodik

Disclaimer: Die Methodik und die generierten Messergebnisse, wie auch grundlegenden Ergebnisse der Analyse wurden mit Kollege Alexander Dzwonek gemeinsam erarbeitet.

Als Zitierstil wurde „APA Format 7th Edition“ ausgewählt (© American Psychological Association) ausgewählt. Um die Vollbelege im Literaturverzeichnis zu erstellen, wurde zotero 6.0.27 verwendet.

Das angewandte Methodendesign dieser Masterarbeit kann als viergeteilt betrachtet werden. **Erstens**, eine ausgiebige **Literaturrecherche**, um sich mit Thema und dem derzeitigen Stand der Forschung vertraut zu machen. **Zweitens**, die Präzisierung des **Forschungsdesigns** und Durchführung der Feldmessungen, aufbauend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche und akribischer Überlegung, sowie ausgedehnter Diskussionen mit Kollege Alexander Dzwonek. **Drittens**, die **statistische Analyse** der, in den Feldmessungen, gewonnenen Daten. **Viertens**, die Diskussion der Ergebnisse und **kritische Auseinandersetzung** mit den gewonnenen Erkenntnissen, sowie dem Forschungsdesign, um Limitation aufzudecken, zu beschreiben.

4.1 Literaturrecherche

Eine umfangreiche Literaturrecherche soll klären, wie die solare Strahlung den Probanden im Lebensraum erreicht und welchen Einfluss UV-Strahlenexposition auf die biologischen Prozesse in der menschlichen Haut hat, speziell jene, die NMSC hervorrufen. Die Literaturrecherche betrachtet die Entwicklung der Messtechnik und Messgeräte zur UVR-Messung und verortet die Erklärungskraft der nun durchgeführten Messungen anhand vergleichbarer, vorangegangener Studien. Der Fokus liegt auf der persönlichen UVR-Exposition. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Methodenkritik. Die Limitation des Forschungsdesigns (i.e., Wahl der Messgeräte, statistische Limitation, unzureichende Referenzwerte der UVR-Messungen) werden mittels Literaturrecherche, sowie statistischen Auswertung aufgedeckt.

4.2 Forschungsdesign

Die von dem Autor und Kollegen Alexander Dzwonek (die Forschenden) durchgeführten UV-Strahlenexpositionsmessungen fanden im Sommer/Herbst 2022 und im Winter/Frühjahr 2023 statt.

Mittels PSF-Dosimetern wurde die persönliche Dosis in J/m^2 und SED/d ermittelt. Das Wirkungsspektrum (AS_{Ery}) ist normalisiert auf jenen Wert der die maximale biologische Reaktion (UV-Induziertes Erythem) hervorruft. Während der Messperioden Sommer 2022 (Juli – September) und Winter 2023 (März) wurden pro Betrieb (Messstandort) idealerweise an 3

aufeinanderfolgenden Tagen 8 Probanden bemessen. Weiters wurden zusätzliche erklärende Variablen aufgenommen und katalogisiert, um den Erklärungsgehalt der Studie zu steigern.

Die Forschenden haben die Messaufbauten durchgeführt und die Handhabe der Messgeräte vorgeführt, sodass die Probanden mit dem Messaufbau und Messablauf vertraut waren und gegebenenfalls die PSF-Dosimeter selbstständig an- und abnehmen konnten. Während der Wintermesskampagne 2023 haben die Forschenden den gesamten Messablauf betreut, die An- und Abnahme der PSF-Dosimeter übernommen und den Messstandort ständig überwacht.

4.2.1 Messaufbau, Messablauf

Das Studiendesign war so ausgelegt, dass die Probanden nach einer einleitenden Erklärung die Messungen selbst vornehmen konnten. Folgend wird beschrieben, wie die Feldmessungen (anfänglich) durchgeführt wurden.

Die Messgeräte (PSF-Dosimeter) wurden in grauen, beschrifteten Boxen zum Arbeitsplatz gebracht (siehe Abbildung 29). Eine Box enthielt im Optimalfall **24 Dosimeter, 3 pro Person bei 8 Probanden**, in individuell mit Namen markierten Umschlägen (siehe Abbildungen 30 und 31). Die Umschläge wurden mit den jeweiligen PSF-Nummern beschriftet (siehe Abbildung 30). In



Abbildung 29: Dosimeter Box

jedem Umschlag befanden sich 2 nummerierte, mit Namen beschriftete Druckverschlussbeutel. Einer befüllt mit unbenutzten Dosimetern, ein zweiter mit der Aufschrift „BENUTZT“ für die benutzten Dosimeter (siehe Abbildung 30). Schließlich enthielt jede Box eine Checkliste für den korrekten Ablauf der Messung mit dem gelieferten Material.

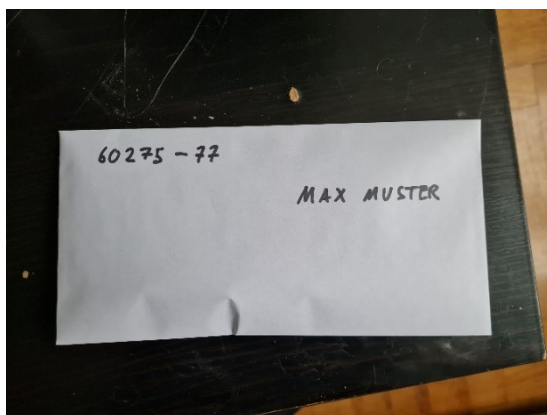


Abbildung 31 mit Nummer und Namen markierter Umschlag



Abbildung 30 Druckverschlussbeutel mit PSF-Dosimetern

Die unbenutzten Dosimeter waren im Druckverschlussbeutel zur einfachen Handhabung geordnet (siehe Abbildung 32). Das rot markierte (Messtag 1) oben, das blau markierte (Messtag 2) in der Mitte, das schwarz markierte (Messtag 3) unten. Die 3 Dosimeter waren immer so geschichtet, wie auf Abbildung 32 zu erkennen. Die „spezielle“ Schichtung war bei der Nachbearbeitung ein Indiz für die tatsächliche Benutzung.

Die Forschenden gingen die Checkliste Schritt für Schritt mit dem Vorarbeiter (Polier, Verantwortlicher, Chef), sowie mit möglichst vielen Probanden, durch. Es wurde vorgeführt, wie die Dosimeter an- und abmontiert werden. Es wurde auf die Empfindlichkeit der Messgeräte aufmerksam gemacht.

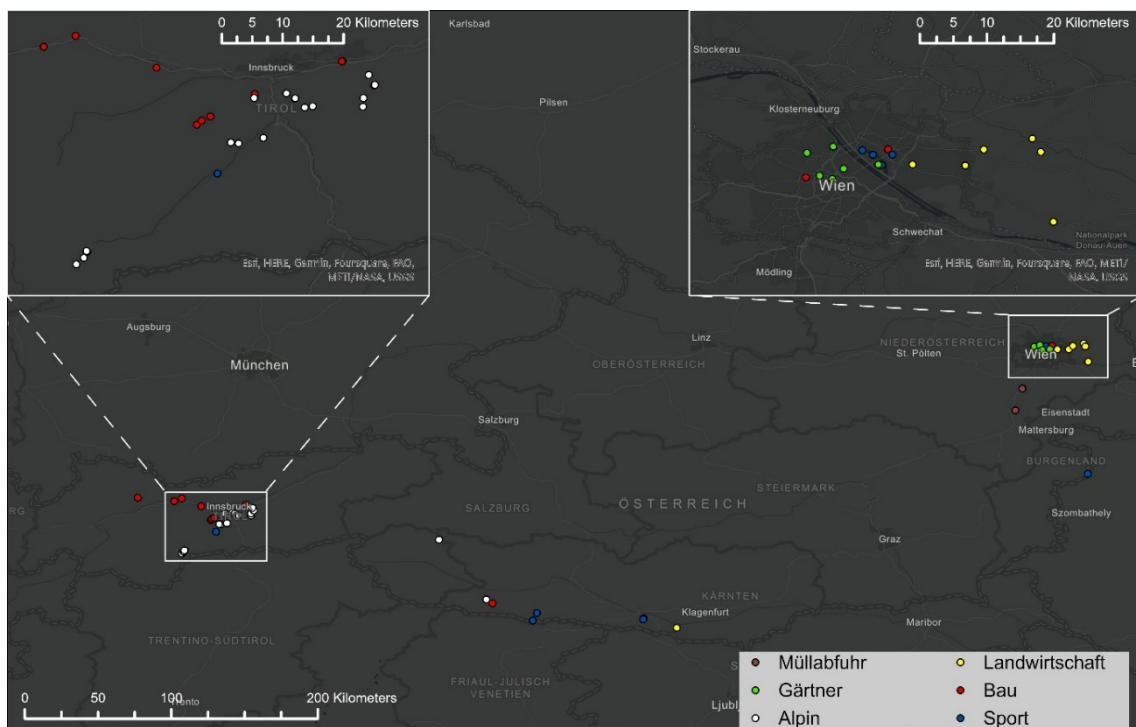


Abbildung 32 geschichtete, unbenutzte PSF-Dosimeter

Änderungen des Messablaufs. Um fehlerhafte Zuordnungen durch Probanden zu vermeiden und um generell mehr Kontrolle zu erhalten, wurde bei den Wintermessungen darauf verzichtet, dass die Probanden die PSF-Dosimeter selbst an- und abnehmen. Der Messaufbau wurde beibehalten, die PSF-Dosimeter wurden von den Forschenden befestigt und abgenommen sowie verwahrt. Die Boxen mit den PSF-Dosimetern wurden von den Forschenden einbehalten.

Während der Wintermesskampagne fanden weniger Messreihen parallel statt. Die **ambiente Bestrahlung** wurde mittels PSF-Dosimetern gemessen. Da es sich um die gleiche Charge PSF handelt, die auch bei den PE-Messungen zum Einsatz kam, sollten anhand eines, an Siani et al. (2011) angelehnten Messaufbaus passable Vergleichswerte erzielt werden. Jeweils 2 Dosimeter wurden an einem Stativ montiert. Eines horizontal nach oben gerichtet, eines horizontal nach unten gerichtet. So konnte die globale Strahlung beider Halbräume gemessen werden.

4.2.2 Messstandorte



Messorte Projekt SEDiment

Abbildung 33 Messstandorte aller Sommer- und Wintermessungen, Zuordnung der Tätigkeiten gegenüber der vorgegebenen Klassifikation verändert

Da die in dieser Arbeit generierten und analysierten Daten ebenfalls die Grundlage für das AUVA Projekt „SEDiment“ darstellen, galten gewisse Anforderungen bei der Auswahl der Messstandorte (siehe Abbildung 33). Von gewissen Berufsgruppen und Tätigkeiten sollten/mussten die UVR-Exposition gemessen werden, eine gewisse Varianz an Höhenstufen und geographischen und klimatischen Räumen in Österreich sollte abgedeckt werden. Genaue Vorgaben hat es nicht gegeben. Die Forschenden haben zu allen Firmen und Betrieben den Kontakt hergestellt.

Die geographische und topographische Auswahl der Messstandorte (i.e., der Betriebe und teilweise deren Außenstellen) war von zeitlichen und finanziellen Einschränkungen abhängig. Dennoch gelang eine ordentliche und brauchbare Abdeckung des österreichischen Bundesgebiets.

4.2.2.1 Sommer 2022

Während der Sommermesskampagne 2022 wurden persönliche UVR-Expositionsmessungen an 53 Standorten durchgeführt. Diese **53 Standorte** generierten **60 nummerierte Messreihen**. Der Standort „Patscherkofel Seilbahn“, an dem Seilbahnbeschäftigte vermessen wurden, wurde zweigeteilt, in „Patscherkofel Seilbahn Innenarbeiter“ und „Patscherkofel Seilbahn Außenarbeiter“. Bei den landwirtschaftlichen Betrieben: „Merschl“, „Magoschitz“ und „Prenner Beerenkultur“ erfolgten jeweils 2 Messreihen zu unterschiedlichen Zeitpunkten, an den jeweils selben Standorten. Bei dem abfallwirtschaftlichen Betrieb „Müllabfuhr Baden“ erfolgten 3 Messreihen. 2-mal wurden die Müllaufleger (i.e., Personen am Wagen) zu unterschiedlichen Zeitpunkten vermessen, 1-mal wurden die Arbeiter der Deponie und des Straßendienstes bemessen. Bei dem abfallwirtschaftlichen Betrieb „Müllabfuhr Wr. Neustadt“ wurden Müllaufleger, im Zuge von 2 Messreihen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten bemessen.

Geographische Lage. Um in der begrenzt zur Verfügung stehenden Zeit (Juli – September 2022) eine ordentliche geographische Abdeckung zu erreichen, haben die Forschenden bei der Auswahl der Standorte und Betriebe, das aus der Luftfahrt bekannte „**Hub and Spoke**“-Modell angewandt (Bryan & O’Kelly, 2002).

Als westösterreichischer Hub (i.e., Knotenpunkt, Drehscheibe) wurde Mieders im Stubaital gewählt. Die Ziele der Messungen an und um diesem Hub waren, (i) eine gute Abdeckung von Messstandorten in verschiedenen **klimatischen Höhenstufen** (e.g., montane Stufe, subalpine Stufe, alpine Stufe) zu erreichen, (ii) die in Westösterreich herrschenden, durch die Topographie bedingten, differenzierten **UV-Strahlungsräume** und UV-Strahlungsverhältnisse, mittels persönlicher UVR-Messungen, in die Studie miteinfließen zu lassen, und (iii) Messungen bei Probanden von Berufsgruppen durchzuführen, die in Tirol gehäuft und in Ostösterreich selten zu finden sind (e.g., Seilbahnbeschäftigte, Seilbahnbauer, Beschäftigte auf Berg- und Almhütten, Bergführer, Lawinenverbauer).



Abbildung 34 Dosimeter am Nacken befestigt, während der PE-Messung bei Seilbahnbeschäftigtem (Aufnahme 2022, Mutterer Alm)

Als südösterreichischer Hub wurde Feistritz im Rosental gewählt. Die Messziele an und um diesen Hub waren ähnliche, wie jene des westösterreichischen Hubs. Der Unterschied bestand darin, die **UV-Strahlungsverhältnisse südlich des Alpenhauptkamms**, mittels persönlicher UVR-Messungen, in die Studie miteinfließen zu lassen.

Als ostösterreichischer Hub wurde Wien gewählt. An und um diesen Hub galt es, (i) die **UV-Strahlungsverhältnisse des östlichen Flachlands**, mittels persönlicher UVR-Messungen, in die Studie miteinfließen zu lassen, (ii) und die stark UVR-exponierten Berufsgruppen „Erntehelfer“, „Gärtner“ und „Bademeister“ zu bemessen.

4.2.2.2 Winter 2023

Während der Wintermesskampagne 2023 wurden an 8 Standorten 9 Messreihen, der persönliche UVR-Expositionsmessungen generiert. Am Standort „Skischule Fulpmes“ fanden 2 parallele Messreihen der UVR-Exposition der dort beschäftigten Skilehrer statt. Skilehrer, Seilbahnbeschäftigte und das auf Skihütten arbeitende Personal wurde vermessen. Der westösterreichische Hub Mieders im Stubaital fungierte als einzige Drehscheibe der Wintermesskampagne.

4.3 Messdaten

4.3.1 PSF

Sommer. 1162 PSF-Messungen fanden im Sommer statt. 116 Messungen erbrachten kein Ergebnis ($n_{\text{Sommer}} = 1046$). 14 PSF-Messungen mussten wegen unsachgemäßer Benutzung der Messgeräte ausgeschlossen werden. Für die Mess-Körperstelle Nacken liegen 1020 PSF-Messungen vor ($n_{\text{Nacken}} = 1020$), 12 PSF-Messungen liegen für die Körperstelle Helm vor ($n_{\text{Helm}} = 12$), und 2 für die Körperstelle Hose ($n_{\text{Hose}} = 2$).

Winter. 228 PSF-Messungen fanden während der Wintermesskampagne statt, 14 Messungen erbrachten kein Ergebnis ($n_{\text{Winter}} = 214$). 39 PSF-Dosimeter wurden verwendet, um die ambiente Bestrahlung zu messen. Ein Dosimeter wurde von einem Probanden während der Messung genommen und an der Brust montiert, eines erbrachte kein Ergebnis (**$n_{\text{Ambient}} = 37$**). 172 PSF-Messungen fanden an der Brust ($n_{\text{Brust}} = 172$), 3 am Rücken ($n_{\text{Rücken}} = 3$) der Probanden statt.

Messung der persönlichen UVR-Exposition. Jeder teilnehmende Proband wurde pro Messtag mit einem PSF-Dosimeter ausgestattet. Die gewählte Messstelle am Körper der Probanden soll die maximale persönliche UVR-Exposition approximieren. Vorangegangene Studien identifizieren den Nacken als höchst UVR-exponiert, für die überwiegenden Zahl von im Freien stattfindenden Tätigkeiten (Kimlin et al., 1998; Siani et al., 2011; Schmalwieser et al., 2021). Deshalb wurden 1130 der insgesamt 1354 PSF-Dosimeter am Nacken angebracht. 110 der 1130 Einzelmessungen am Nacken erbrachten kein Ergebnis (**$n_{\text{Nacken}} = 1020$**).

186 der 1450 Messungen fanden an der Körperstelle Brust statt. Hierbei handelt es sich um den Großteil der Wintermessungen im März 2023, da der Nacken zu dieser Jahreszeit bei Außenarbeitern meistens bedeckt ist. Die Körperstelle Brust wurde gewählt, um die UVR-

Exposition des Gesichtes zu approximieren (ähnlicher Winkel), im Gesicht selbst lassen sich die PSF-Dosimeter, bei Beibehaltung des für die Messung ausschlaggebenden Winkels, kaum oder nicht anbringen. 14 der 186 Messungen erbrachten kein Ergebnis (**nBrust = 172**).

18-mal wurden die PSF-Dosimeter seitlich am Helm montiert, da die Arbeitsbedingungen keine andere repräsentative Körperstelle der Messung zuließen. 6 der 18 Messungen erbrachten kein Ergebnis (**nHelm = 12**). 3 PSF-Dosimeter wurden am Rücken (bei gleichzeitiger UVR-Expositions-Brustmessung) montiert (**nRücken = 3**), 2 seitlich an der Hose (**nHose = 2**). 39 PSF-Dosimeter wurden verwendet, um die Globalbestrahlung oder Albedobestrahlung (schneebedeckter Arbeitsplatz) zu messen, eine Messung erbrachte kein Ergebnis. 1 PSF-Dosimeter wurde zur ambienten Bestrahlungsmessung ausgelegt und im Laufe der Messung (unbekannter Zeitpunkt) von einem Probanden an sich genommen und an der Brust montiert. 14 PSF-Dosimeter, welche die UVR-Exposition vom Paraglidern messen sollten, wurden nicht ordnungsgemäß verwendet und stellen einen Sonderfall dar (siehe Kapitel Diskussion).

Auswertung und Kalibration der PSF-Dosimeter Daten. Die PSF-Dosimeter wurden von Peter Knuschke auf das erythemale Wirkungsspektrum der menschlichen Haut (AS_{Ery}) kalibriert (Davis et al., 1976; Knuschke & Barth 1996). Die Auswertung erfolgte durch die Messung der optischen Eigenschaften der PSF vor und nach den PE-Messungen (Krins et al., 2001). Knuschke bezieht den Zenitwinkel der Sonne des wahren Mittags des Messtages, die Gesamtmenge an Ozon der Luftsäule des Messtages und die Seehöhe des Messstandortes in die Auswertung der PSF mit ein (Knuschke & Barth 1996; Krins et al., 2001).

4.3.2 X-2000

Mittels dreier Messgeräte, einem X-2000-3, einem X-2000-4, und einem X-2000-5 wurde ambiente erythemgewichtete UV-Strahlung an einigen Messorten gemessen. Die lang zurückliegende Kalibration, die überholte Technik und ständig auftretenden Funktionsfehler der Messgeräte machten die Daten unbrauchbar.



Abbildung 35 X-2000 Messgerät horizontal ausgerichtet und der Autor (Aufnahme 2022 Patscherkofel)

4.3.3 Testo 174T und Testo 174H

Mittels der Temperatur-Datenlogger Testo 174T und Testo 174H wurde versucht, die Temperaturdaten in die Datenanalyse miteinfließen zu lassen. Wegen des unzureichenden, zu variablen Messaufbaus und Messablaufs der Temperaturmessungen können die Daten nur qualitativ, episodisch zur generellen Beschreibung von Arbeitsbedingungen dienen.

4.3.4 Weitere aufgenommene Daten

Für jede PSF-Dosimetermessung wurden im Zuge der Arbeitsplatzbeschreibung **erklärende Sekundärdaten** aufgenommen, um die UVR-Expositionsmesswerte statistisch auswerten zu können. Der Arbeitsort wurde mittels Adresse und geographischer Koordinaten, sowie Seehöhe beschrieben. Die geographischen Variablen wurden mit Google Earth Pro Version 7.3.6.9345 bestimmt. Die Messdauer, der Beginn und das Ende der Messung und die Körperstelle der Messung wurden katalogisiert.

Zusätzlich wurde ein fünfstufiger **Beschattungsindex** (1 = Kein Schatten, 2 = wenig Schatten, 3 = Halbschatten, 4 = eher Schatten, 5 = Im Schatten) angewandt. Der Beschattungsindex (BS-Index) liegt für die Beschattungsverhältnisse während der Arbeit und während der Pause vor. Der BS-

Index (BSI) stützt sich auf das Expertenwissen der Forschenden, es handelt sich um eine subjektive Bewertung der Beschattungsverhältnisse am Arbeitsplatz und am Ort der abgehaltenen Pause. Eingang in den Beschattungsindex finden subjektive Bewertungen der umliegenden Geländeüberhöhung und damit verbundenen Expositionsverhältnisse im Arbeitstagesverlauf, natürlicher und baulicher schattenspendender Strukturen und damit verbundenen Expositionsverhältnisse im Arbeitstagesverlauf, sowie das typische Verhalten der Probanden, sprich nutzen sie die Beschattungsmöglichkeiten.

Unvollständige Daten. Die Dauer sowie die exakte zeitliche Einordnung der Pausen liegen nur lückenhaft vor. Jene Daten, welche einen spezifischen Probanden mit seiner spezifischen Messreihe in Verbindung setzten, liegen lückenhaft vor. Manche Messstandorte bedingen äußerst heterogene Arbeiten und somit Strahlungsverhältnisse. Deshalb liegen teilweise innerstandörtliche genauere Positionsbeschreibungen vor. Die unvollständigen Daten könnten dienen, um einzelne Standorte mittels Case Studies genauer unter die Lupe zu nehmen.

Klassifikation der Probanden. Die Klassifizierung der Probanden erfolgte durch ein von der AUVA vorgegebenes 2-stufiges hierarchisches System. Die erste Stufe ist die Berufsgruppe (BG_ALT), die zweite Stufe die Tätigkeit (TK_ALT) (siehe Tabelle 2). Zu beachten ist, dass einige Berufe/Beschäftigungen zusammengefasst sind. Für das Gros der statischen Analyse wurde diese Klassifikation verwendet.

Tabelle 4 vorgegebenes 2-stufiges Klassifizierungssystem

Berufsgruppe	Alpin	Bau klassisch	Landwirtschaft	Sport	Weiter mögliche gruppen
Tätigkeiten	Lawinenverbauer	Fassader, Dachdecker, Spengler	Erntehelfer	Bademeister	Müllabfuhr
	Kellner, Hüttenwirt	Tiefbau	Bauer	Sportler, Trainer	
	Seilbahnbeschäftigte	Gärtner		Skilehrer	

Da die oben beschriebene Klassifikation recht grob ist, wurde im Laufe der Analyse eine feinere Klassifikation erarbeitet. In der neuen Klassifikation wird die Art der Arbeit, der Probanden mittels 3-stufiger hierarchischer Klassifizierung bestimmt und codiert. Die erste hierarchische Klassifizierungsstufe beschreibt die Berufsgruppe allgemein (e.g., Sport/Freizeit [Codierung: 2]). Die zweite hierarchische Klassifizierungsstufe beschreibt den Arbeitsplatz beziehungsweise die

Arbeit allgemein (e.g., Bademeister [Codierung: 21] oder Lehrer/Trainer [Codierung: 22]). Die dritte hierarchische Klassifizierungsstufe beschreibt die spezifische Tätigkeit des Probanden (e.g., Bergsteigen [Codierung: 224], Skilehrer [Codierung: 225]). Wenn keine einzelne, spezifische Tätigkeit zugeordnet werden kann, jemand arbeitet in einem Resort beispielsweise als Tennislehrer und leitet Yogakurse, wird die Person als Trainer allgemein (Codierung: 221) klassifiziert. Das hierarchische Klassifizierungssystem stützt sich auf antizipierte Strahlungsfelder und gelistete Berufe der Wirtschaftskammer Österreich (WKÖ).

4.3.5 Daten der ambienten Bestrahlung

Die Daten der ambienten Bestrahlung stammen von dem **UV Messnetz Österreich**, ein Forschungsprojekt beinhalten die Messung und Analyse der solaren UV-Strahlung in Österreich, des Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Die Daten der ambienten Strahlung liegen als UV-Index (UVI) vor, welcher auf der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{Ery} beruht und als international normiertes Maß für die Intensität der UV-Strahlung, auf der Erboberfläche gilt (siehe Formel 5). Für die Berechnung des UV-Indexes verweist das BMK auf das deutsche Bundesamt für Strahlenschutz. Der UV-Index wird wie folgt ausgerechnet, das Ergebnis auf ganzen Zahlenwert gerundet.

$$\text{UV-Index} = \text{höchster gemittelter Halbstundenwert von } E_{\text{Ery}} [\text{W/m}^2] * 40$$

Formel 5

E_{Ery} = erythemgewichtete Bestrahlungsstärke

Das UV Messnetz Österreich gibt Werte mit 2 Kommastellen an, es wird vermutet, dass die präsentierte Formel zur Berechnung angewendet wird, auf eine Rundung auf ganze Zahlen verzichtet wird.

Aus dem UV Messnetz Österreich wurden Vergleichsmessdaten für die persönlichen UVR-Expositionsmessungen entnommen. Die passenden Daten (selber Tag wie PE-Messung) der jeweils **nächstgelegenen Messstelle** des UV Messnetz Österreichs entnommen. Scheinen die Vergleichsdaten der nächstgelegenen Messstelle unbrauchbar, da der Unterschied der Seehöhe, zwischen dem Messort der PE und dem Messort der ambienten Strahlung zu groß war, wurde eine Vergleichsmessstelle der ambienten Strahlung mit **ähnlicher Seehöhe** gewählt. Von den Messstationen Bad Vöslau, Gerlitz, Groß-Enzersdorf, Innsbruck, Klagenfurt, Sonnblick, Wien und Zugspitze wurden Daten entnommen. Für jede persönliche UVR-Expositionsmessung wurden dem UV Messnetz Österreich 3 Werte entnommen:

- (i) **Der UVI-Wert des Tages der persönlichen UVR-Expositionsmessung: UVI_real**
- (ii) **Der Median der UVI-Werte des Datums aller Jahre: UVI_ideal_median**
- (iii) **Der maximale UVI-Wert des Datums aller Jahre: UVI_ideal_max**

Bei den aus dem UV-Index übernommenen Werten handelt es sich **nicht** um „echte“ Werte der ambienten Bestrahlung, da nicht dieselben Messgeräte zur Messung der PE-Werte und der Werte der ambienten Bestrahlung verwendet worden sind, keine Daten zur Korrelation vorliegen und die Daten nicht in derselben Einheit vorliegen (i.e., PE-Messwerte liegen in SED/d vor, Quasi-Werte der ambienten Bestrahlung liegen im einheitslosen UV-Index vor). Diese Abstriche wurden mit UV-Strahlenexperten Prof. Dr. Alois Schmalwieser besprochen. Die Wahl der **Quasi-Werte** der **ambienten Bestrahlung**, sowie die präsentierten Formeln zur Normierung der PE-Messwerte (siehe Kapitel Datenbearbeitung) wurden von ihm für gut befunden und abgesegnet. So können die gewichteten und Werte der persönlichen Strahlenexposition zur Extrapolation genutzt werden. In jedem Fall sind durch die Datenmenge intrinsische Vergleiche und Analysen möglich.

Gemessene Daten der ambienten Bestrahlung. Während der Wintermesskampagne wurden anhand eines, an Siani et al. (2011) angelehnten, Messaufbaus Daten der ambienten Bestrahlung gemessen. Um konsistent zu bleiben, wurden die gemessenen Daten aus der Analyse dieser Studie exkludiert (siehe Kapitel Diskussion und Ausblick).

4.3.6 Datenbearbeitung

Data Culling. Um repräsentative Daten zu erhalten und Ergebnisse präsentieren zu können, mussten Daten aussortiert werden (*Data Culling*). Unterschritt oder war der Tageswert der persönlichen Exposition 0,05 SED (i.e., **SED/d \leq 0,05**) wurde angenommen, dass das PSF-Dosimeter nicht von dem Probanden benutzt wurde. Überschritt oder war der Tageswert der persönlichen Exposition 45 SED (i.e., **SED/d \geq 45**) wurde angenommen, dass das PSF-Dosimeter nicht ordnungsgemäß benutzt wurde. Eine *personal dose* (PD) von 45 SED/d ist aufgrund der in Österreich herrschenden UV-(Be)Strahlungsverhältnisse relativ unrealistisch (Schmalwieser et al., 2010). Zwei Erklärungen für einen SED-Tageswert \geq 45 SED scheinen plausibel: (i) dasselbe PSF-Dosimeter wurde an mehreren Tagen getragen, (ii) das PSF-Dosimeter wurde horizontal ausgelegt, und maß somit die globale Bestrahlung, nicht die persönliche Exposition (PE). Unter- oder überschritt eine SED-Tagesmessung die gewählten Schwellenwerte, wurde der gesamte Datensatz (i.e., die Datenreihe, beinhalten alle erklärenden und abhängigen Variablen) von der Analyse ausgeschlossen.

Gewichtung. Die jeweiligen PE-Messungen waren von unterschiedlicher Dauer. Um die PE-Messungen (UVR-Expositionsmessungen der Probanden) besser **quantifizierbar** und **vergleichbar** zu machen, wurden sie auf einen typischen **8-Stunden Arbeitstag** gewichtet. Mittels der erklärenden Variable „Messdauer“ (beinhalten die gesamte Arbeitszeit und Pausenzeit des jeweiligen Messtages) wurden die realen PE-Messwerte auf einen typischen 8-Stundenarbeitstag umgerechnet (siehe Formel 6).

$$\text{SED/d} / \text{Messdauer [in min]} * 480 = \text{SED/d+}$$

Formel 6

SED/d = gemessene reale Strahlenexposition pro Arbeitstag
 Messdauer = Arbeitszeit in der das Messgerät getragen worden ist
 480 = Gewichtungsfaktor für typischen 8-Stunden Arbeitstag
SED/d+ = Gewichtete UV-Strahlenexposition pro Arbeitstag

Normierung. Mittels der 3 aus der aus dem UV Messnetz Österreich übernommenen Datenmatrizen der ambienten, erythemgewichteten UV-Bestrahlung wurden die erythemgewichteten PE-Messungen der Probanden normiert und vergleichbar gemacht. Zwei Arten der Normierung wurden durchgeführt, (i) die **Mediannormierung**, und (ii) die **Maximalnormierung**. Die Normierungen beruhen auf der Annahme des folgenden Verhältnisses (siehe Formel 7).

$$\text{SED_real} / \text{SED_ideal} = \text{UVI_real} / \text{UVI_ideal}$$

Formel 7

SED_real = SED/d
SED_ideal = ideale Strahlenexposition, ohne Einfluss des Wetters am Messtag
UVI_real = UVI am konkreten Tag, gemessen an der räumlich nächsten UV-Messstation
UVI_ideal = Median/Maximum des UV-Indexes des Tages seit Aufzeichnung

Mittels des Verhältnisses ergeben sich folgende Berechnungen für die Mediannormierung (Md-Normierung), und die Maximalnormierung (Max-Normierung) (siehe Formeln 8 und 9).

$$\text{SED_real} * \text{UVI_ideal_median} / \text{UVI_real_median} = \text{SED_ideal_median/d}$$

$$\text{SED_real} * \text{UVI_ideal_max} / \text{UVI_real_max} = \text{SED_ideal_max/d}$$

Formel 8 und Formel 9

SED_ideal_median/d = SED pro Tag normiert nach dem Median des UV-Indexes des konkreten Tages seit Aufzeichnung
SED_ideal_max/d = SED pro Tag normiert nach dem Maximum des UV-Indexes des konkreten Tages seit Aufzeichnung

Kombination der Gewichtung und Normierung. Die durch die Normierungen berechneten Variable (i.e., SED_ideal_median/d und SED_ideal_max/d) stehen unter dem Einfluss der Messdauer. Mittels der 8-Stunden Arbeitstaggewichtung konnte der Einfluss der Messdauer, wie folgt, negiert werden (siehe Formeln 10 und 11).

$$\text{SED_ideal_median/d} / \text{Messdauer[in min]} * 480\text{min} = \text{SED_ideal_median/d+}$$

$$\text{SED_ideal_max/d} / \text{Messdauer[in min]} * 480\text{min} = \text{SED_ideal_max/d+}$$

Formel 10 und Formel 11

SED_ideal_median/d+ = SED pro Tag normiert nach Messdauer/UVI Median des konkreten Tages

SED_ideal_max/d+ = SED pro Tag normiert nach Messdauer/UVI Maximum des konkreten Tages

Nun stehen 4, die UVR-Exposition beschreibende, abhängige Variablen (**SED/d**; **SED/d+**; **SED_ideal_median/d+**; **SED_ideal_max/d+**), für die Datenanalyse zur Verfügung. Die 4 Variablen bilden das Grundgerüst der Datenbasis und der Analyse.

Extrapolation. Grundsätzlich können alle 4 abhängigen, die UVR-Exposition beschreibenden Variablen extrapoliert werden, um Aussagen über längere Zeiträume zu treffen (DGUV, 2020). Da die PE-Datenmengen einiger Tätigkeiten und Berufsgruppen klein sind, wurden mittels der gewichteten und normierten Variablen **UVR-Monatsexpositionsdaten** und **UVR-Jahresexpositionsdaten** berechnet. Folgende **Annahmen** wurden vorab getroffen.

- (i) **Die durchschnittlichen, gerundeten Monatswerte des UVI, der Wetterstation Wien (Groß-Enzersdorf) sind für ganz Österreich repräsentativ (siehe Tabelle).**
- (ii) **Der UVI-Wert aller Tage eines Monats ist derselbe.**
- (iii) **Der typische Arbeitsmonat hat 20 Arbeitstage.**
- (iv) **Das typische Arbeitsjahr hat, bei einer 5-Tagewoche und 15 Feiertagen, sowie 25 Urlaubstagen 220 Arbeitstage.**

Auf diese Annahmen stützen sich folgende Berechnungen (siehe Formeln 12, 13 und 14).

$$\text{SED_ideal_ [...] /d+} * 20 = \text{SED_ideal_ [...] /m+}$$

$$\text{SED_ideal_ [...] /m+} * [\text{Monats-Koeffizient}] = \text{SED_ideal_ [...] /y+}$$

$$\text{SED_ideal_ [...] /y+} * [\text{Arbeitsjahr-Koeffizient}] = \text{SED_ideal_ [...] /Oy+}$$

Formel 12, Formel 13, Formel 14

SED_ideal_ [...] /d+ = **SED_ideal_median/d+** oder **SED_ideal_max/d+**

SED_ideal_ [...] /m+ = Berechnete SED für einen typischen Arbeitsmonat mit 20 Arbeitstagen

[Monats-Koeffizient] = Gewichtung des Monats nach UVI-Jahresverlauf (siehe Tabelle 5)

SED_ideal_ [...] /y+ = Berechnete SED für ein Jahr (240 Tage) nach dem UVI-Jahresverlauf

[Arbeitsjahr-Koeffizient] = 220 (Arbeitstage im typischen Arbeitsjahr) / 240 (Tage von **SED_ideal_ [...] /y+**)

SED_ideal_ [...] /Oy+ = Berechnete SED für ein typisches Arbeitsjahr

Da nicht abgeschätzt werden kann, wann ein Proband frei hat/nimmt (e.g., untypische Arbeitszeiten, Urlaubstage, Fall der Feiertage, Krankenstandstage), fließt der Arbeitsjahr-Koeffizient aliquot in die Berechnung ein.

Tabelle 5 UV-Index und Gewichtungskoeffizienten der der Wetterstation Wien (Groß-Enzersdorf)

UV-Index und Gewichtungskoeffizienten		
Monat	UV-Index	Gewichtung
Jänner	1	0,017094017
Feber	2,5	0,042735043
März	4,5	0,076923077
April	6,5	0,111111111
Mai	7,5	0,128205128
Juni	8	0,136752137
Juli	8	0,136752137
Aug	7,5	0,128205128
Sep	6	0,102564103
Okt	4	0,068376068
Nov	2	0,034188034
Dezember	1	0,017094017
Summe	58,5	1

Die monatlichen Gewichtungsfaktoren (siehe Tabelle 5) wurden mit Prof. Dr. Alois Schmalwieser abgesprochenen, um aussagekräftige Monats- und Jahreswerte der UVR-Exposition, der Berufsgruppen und Tätigkeiten generieren zu können.

4.4 Statistische Analyse

Die statische Aufbereitung, Auswertung und Analyse erfolgte in R Version 4.3.1, RStudio Version 2023.06.0 und Excel Version 2308. Die R-Packages: *tidyverse*, *corrplot*, *dplyr*, *rioja*, *vegan*, *haven*, *readr*, *ggplot2*, *wesanderson*, *pals* und *viridis* wurden für Analyse und graphische Darstellung verwendet.

PE-Messungen sind in der Regel nicht normal verteilt, sondern zeichnet sich durch positive Schiefe und rechtseitig langem Verteilungsende aus. Als statistische Deskriptoren wurden, analog zu den Empfehlungen von Schmalwieser et al. (2021), Maximum, Minimum, Median und Perzentil-Paare verwendet. Deskriptive Statistiken der PE aller Berufsgruppen und Tätigkeiten sind im Kapitel Ergebnisse präsentiert. Weiters werden Statistiken der UVR-Exposition bezüglich Messdauer, Beschattung, Jahresverlauf, Monat der Messung, Körperstelle der Messung,

Seehöhe, Region und Jahresexposition gezeigt. Um den Erklärungsgehalt der Studie zu erhöhen, wurden statistische Tests und Modellrechnungen durchgeführt. An passender Stelle sind deskriptive Statistiken erklärender Variablen veranschaulicht. Um Zusammenhänge zu erkennen, wurden explorative statistische Methoden, in Form diverser graphischer Darstellung zur Analyse genutzt und sind im Kapitel Ergebnisse präsentiert.

Mittels der gewonnenen Erkenntnisse der deskriptiven und explorativen Statistik wurde die Durchführung mathematischer statistischer Methoden begründet. Die Ergebnisse der Analysen finden sich an passenden Stellen im Kapitel Ergebnisse. Die Forschungsergebnisse dieser Studie werden mit Ergebnissen vorangegangener Forschungsprojekte, zum Thema UVR-Exposition verglichen.

5 Ergebnisse

Disclaimer: Die in der Analyse verwendete und in den Ergebnissen, mittels Graphiken und Erklärungen, präsentierte Datenbasis wurde von dem Autor und Kollege Alexander Dzwonek gemeinsam in Microsoft Excel Version 2308 erstellt. Die Datenaufbereitung und Datenanalyse in Excel Version 2308, sowie die weitere Datenaufbereitung, Datenanalyse und der zugehörige R-Code, in R-Studio Version 2023.06.0 wurde teilweise gemeinsam durchgeführt beziehungsweise geschrieben. Aufgrund der genannten Gründe sind einige, der in diesem Text präsentierten Graphiken ähnlich oder ident mit jenen in Alexander Dzwoneks Masterarbeit.

Das Kapitel Ergebnisse präsentiert die aus der Analyse gewonnenen Erkenntnisse graphisch und tabellarisch, unterstützt von Erklärtexten, Modellrechnungen und statistischen Tests. Die Unterkapitel richten sich nach aufgenommen erklärenden Variablen. Die spezifische Auswahl der, in den Unterkapiteln beleuchteten Variablen, Modellrechnungen und statistischen Tests, ist halb-systematisch, eher an den jeweils besten Erklärungsgehalt, und somit an wissenschaftliche Papers, angelehnt.

Vier **grundlegende, abhängige Variablen** bilden das Grundgerüst der Datenbasis, **(i)** die tatsächlich gemessenen (realen) PE-Daten der UVR-Exposition (**SED/d**), **(ii)** die auf den typischen 8-Stunden Arbeitstag gewichteten Daten der PE-Messungen (**SED/d+**), **(iii)** die auf den typischen 8-Stunden Arbeitstag gewichteten und mediannormierten Daten der PE-Messungen (**SED_ideal_median/d+**), **(iv)** die auf den typischen 8-Stunden Arbeitstag gewichteten und maximalnormierten Daten der PE-Messungen (**SED_ideal_max/d+**).

Um Konfusion zu vermeiden, soll an dieser Stelle erwähnt sein, dass **SED/d** einerseits eine **Variable** ist, nämlich die der realen, durch die PSF-Dosimeter gemessenen UVR-Exposition. Andererseits ist **SED/d** die **Einheit** der erythemgewichteten UVR-Exposition. Dasselbe gilt für die drei anderen abhängigen Grundvariablen der Datenbasis.

5.1 Grundlegende Übersicht der Datenbasis

Auf Abbildung 36 sind alle PE-Messwerte ($n=1160$) der vier grundlegenden Variablen der Datenbasis und ihre Häufigkeitsverteilung dargestellt. Jede Säule, der Histogramme, ist ein SED/d (Einheit) breit. Die graphische Darstellung verdeutlicht 3 Dinge. **Erstens** enthält der *Bin* 1 der realen PE-Messwerte (oben links; Variable SED/d) deutlich mehr Beobachtungen als der korrespondierende *Bin* 1 der Variable SED/d+ (oben rechts). Durch die Gewichtung auf den typischen 8-Stunden Arbeitstag fallen viele kurze PE-Messungen aus dem genannten *Bin*. Der arithmetische Mittelwert, der Messdauer des *Bin* 1 beträgt nur 348 Minuten (typischer Arbeitstag = 480 min), der Median liegt bei 255 Minuten.

Zweitens wird deutlich, dass die Häufigkeit kleiner Werte, in der Häufigkeitsverteilung SED_ideal_max/d+ (unten rechts), im Vergleich zu den anderen 3 dargestellten Häufigkeitsverteilungen, drastisch abnimmt. Drittens wird die y-Achse in der Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Variable SED_ideal_max/d+ deutlich verlängert. UVR-Expositionsdaten, die den Schwellenwert 45 SED/d überschreiten, wurden aus den real gemessenen Daten entfernt, da sie als unrealistisch angesehen werden. Der Maximalwert der Variable SED_ideal_max/d+ ist 62,26, und liegt damit um 38,36 % über dem Schwellenwert.

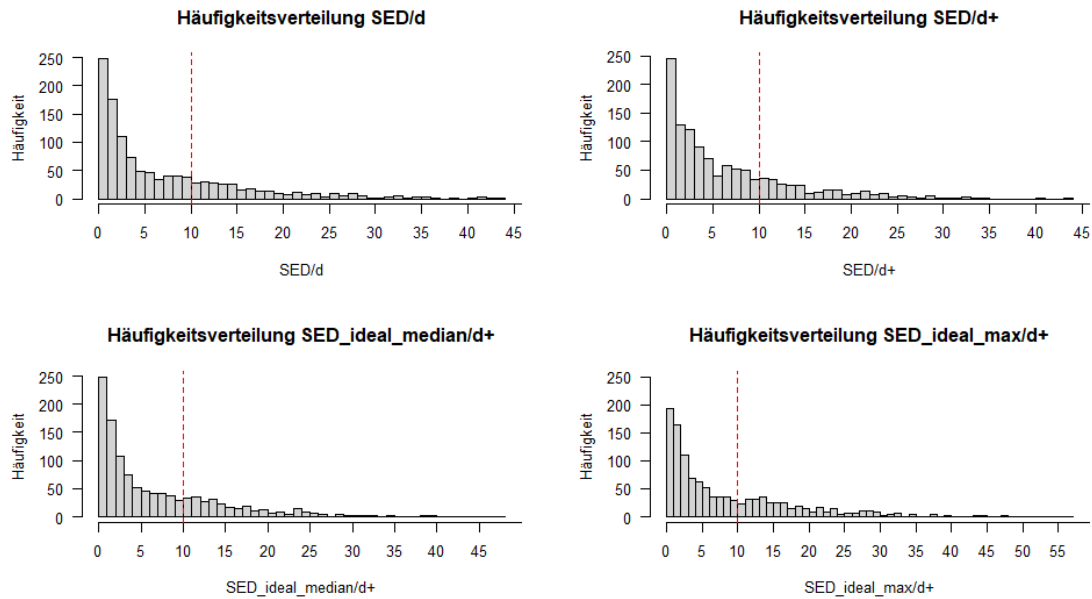


Abbildung 36 Häufigkeitsverteilung der PE-Messungen; oben links: reale Messwerte der PE-Messungen; oben rechts: auf 8-Stundentag gewichte PE-Messwerte; unten links: auf 8-Stundentag gewichtete und mediannormierte Messwerte der PE-Messungen; unten rechts: auf 8-Stundentag gewichtete und maximalnormierte Messwerte der PE-Messungen

Tabelle 6 fasst die wichtigsten deskriptiven Kennwerte der vier grundlegenden, abhängigen, die Datenbasis beschreibenden Variablen zusammen.

Tabelle 6 Deskriptive Statistik der 4 UVR-Exposition beschreibenden, abhängigen Variablen; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Daten gesamt										
Variable	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2,5	Q25	Q75	Q97,5	Max
SED/d	1160	304	0,05	3,72	7,13	0,14	1,20	10,56	30,37	43,74
SED/d+	1160	274	0,04	3,94	6,53	0,14	1,30	9,56	25,32	43,74
SED_ideal_median/d+	1160	264	0,04	3,89	6,33	0,14	1,34	9,41	24,38	44,65
SED_ideal_max/d+	1160	353	0,04	4,97	7,91	0,17	1,70	11,79	28,81	62,26

In Abbildung 37 ist die erste hierarchischen Stufe (Berufsgruppen) der ursprünglichen, durch die AUVA vorgegebenen, 2-stufigen hierarchischen Klassifikation, zur Analyse verwendet worden. Links der rot gestrichelten Linie sind PE-Messwerte zu finden, die den Schwellenwert HRD (PE-Messwert > 10 SED/d) überschreiten. Es wird deutlich, dass die meisten PE-Messwerte unter 5 SED/d liegen, aber in allen Berufsgruppen HRD gemessen wurden.

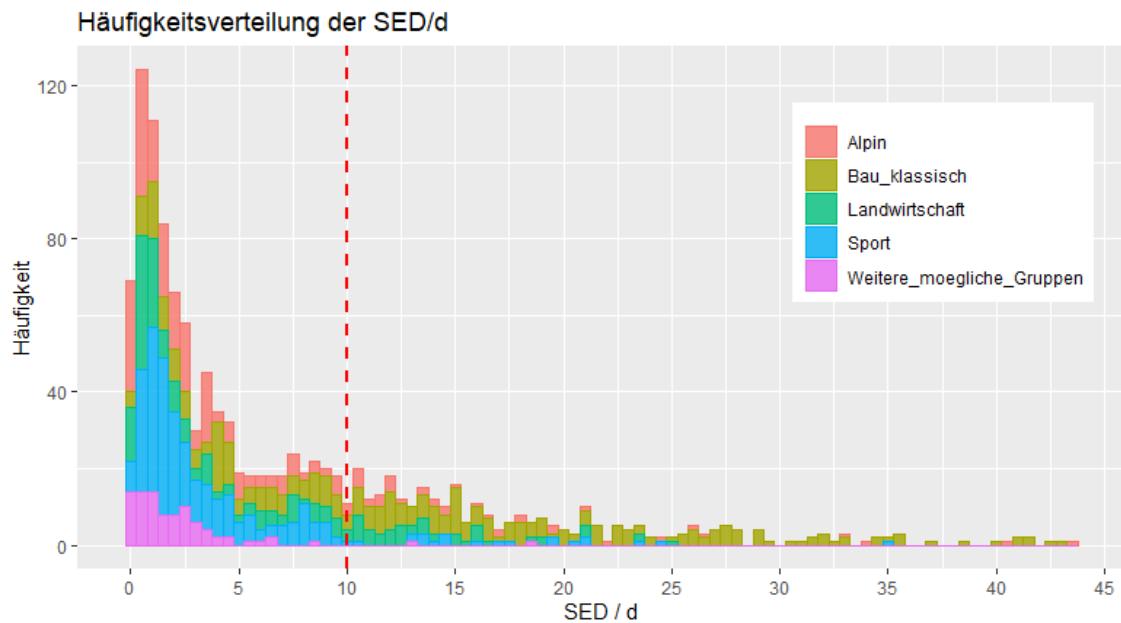


Abbildung 37 Häufigkeitsverteilung der SED/d-Messwerte nach Berufsgruppe; rot gestrichelte Linie = HRD

5.2 Ergebnisse nach erklärenden Variablen

5.2.1 Messdauer, Arbeitszeit

In Abbildung 38 ist die Häufigkeitsverteilung der Messdauer aller PE-Messungen präsentiert. Zur besseren Visualisierung wurden die Werte in Halbstundenschritten unterteilt. Die erste Kategorie (*Bin*) ist 15 – 45 min, für jede weitere Kategorie wurden 30 min addiert. Die kürzeste PE-Messung betrug 60 Minuten, die längste 900 Minuten. Der Median der Messdauer ist 540 Minuten. Der Modus der Messdauer ist 600 Minuten, entsprechend einem klassischen Arbeitstag eines Bauarbeiters oder anderen manuellen, körperlichen Berufes (Arbeitstag ist von 07:00 bis 17:00, Frühstückspause von 09:00 bis 09:15, Mittagspause von 12:00 bis 12:30). Die zweithäufigste Messdauer entspricht dem typischen 8-Stunden Arbeitstag.

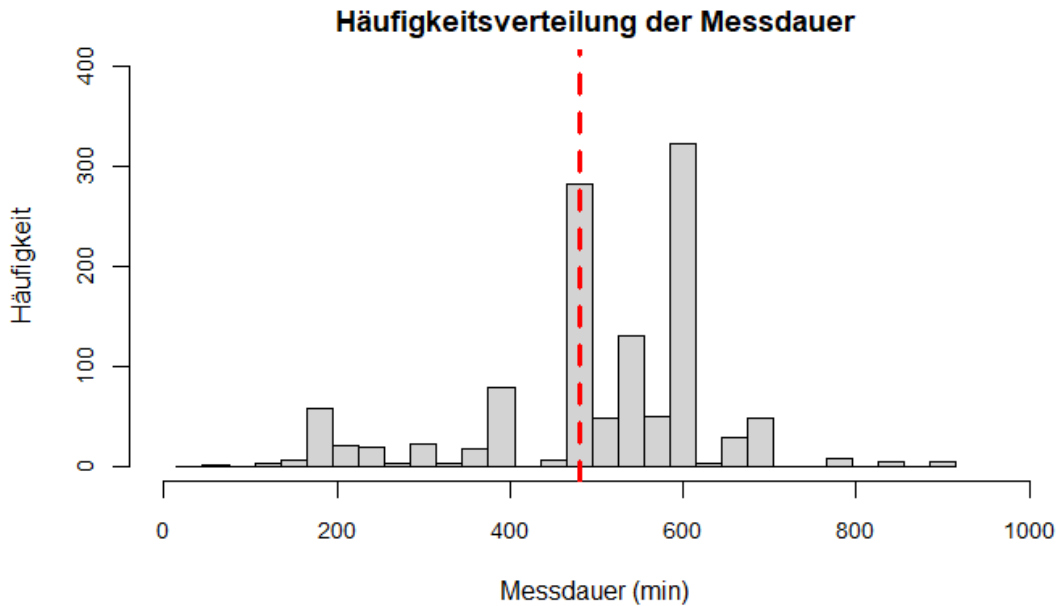


Abbildung 38 Häufigkeitsverteilung der Messdauer der PE-Messungen in Halbstundenschritten; rote gestrichelte Linie = 8-Stunden Arbeitstag

Die auf Abbildung 39 dargestellte, gemessene, persönliche UVR-Exposition lässt einen schwachen positiven Zusammenhang der Messdauer und der SED/d vermuten. Bei der Darstellung (Abbildung 39) muss beachtet werden, dass die Boxplot-Breite nicht mit der Anzahl der Messungen der *Bins* korrespondiert (die *Bins* sind analog zu Abbildung 38 gewählt). Um die Annahme des schwach positiven Zusammenhangs zu überprüfen, wurde ein lineares Regressionsmodell mit der erklärenden Variable Messdauer und der abhängigen Variable SED/d gebildet. Für die Modellbildung wurden die *Bins* entfernt.

R^2 des lineares Regressionsmodells von (SED/d) mit Messdauer = 0,09018

Das **Bestimmtheitsmaß R^2** gibt an das die Variable Messdauer **9,02 %** der Varianz der (SED/d)-Werte erklärt. Ein schwach-positiver Zusammenhang konnte nachgewiesen werden. Der p-Wert des F-Tests des linearen Regressionsmodells liegt deutlich unter dem Signifikanzniveau von 0,05; $F(1, 1158) = 114,8$; $p < 2,2e-16$. Bezüglich der Interpretation dieses linearen Regressionsmodells (sowie aller weiteren), siehe Kapitel Diskussion.

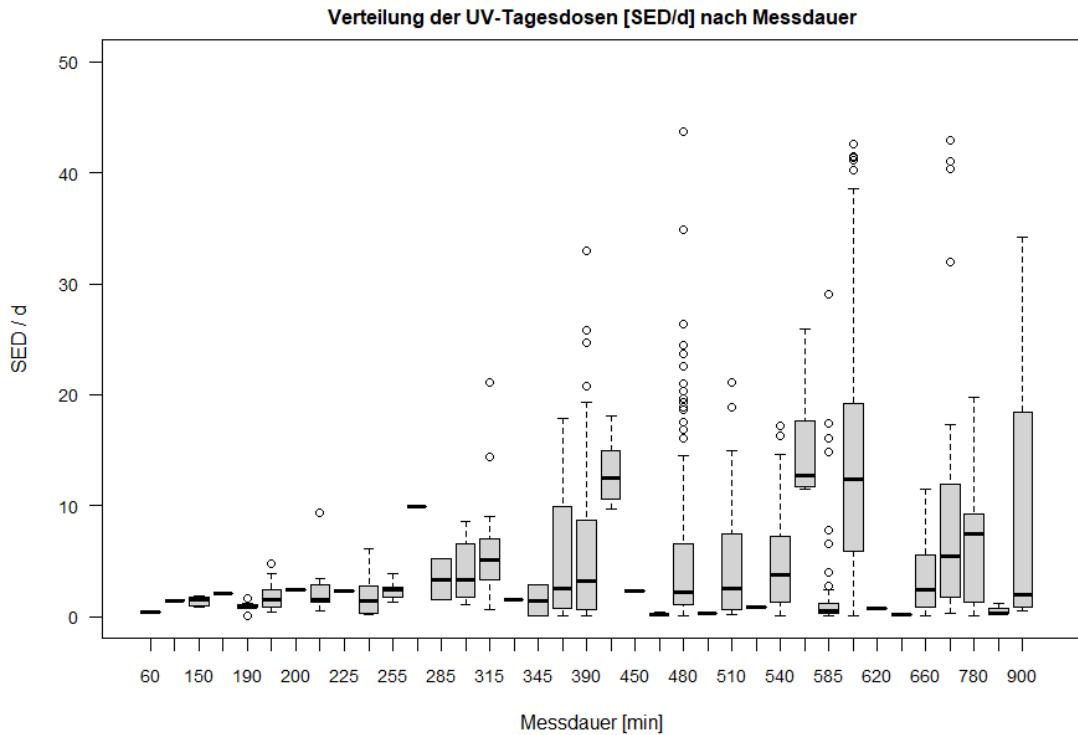


Abbildung 39 SED/d nach Messdauer; Binbreite = 30 min, beginnend bei 15 min

Auf Abbildung 40 ist zu erkennen, dass sich die Messdauer (i.e., Arbeitszeit) der Berufsgruppen (BG_ALT) deutlich unterscheidet, die Spannweite der Arbeitszeiten, der 5 bemessenen Berufsgruppen unterscheidet sich immens. Während die Arbeitszeit der Berufsgruppen „Bau klassisch“ und „Landwirtschaft“ nur wenig differiert, ist zu erkennen, dass die Spannweite der Arbeitszeiten der, in den Berufsgruppen Alpin und Sport Beschäftigten sehr weit ist. Beschäftigte der Berufsgruppe „Weitere mögliche Gruppen“ haben dieselbe Arbeitszeit.

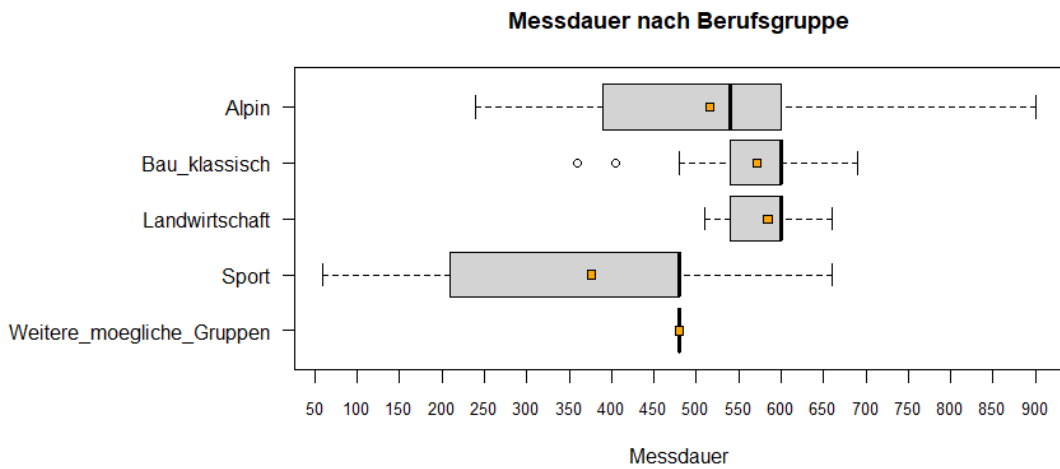


Abbildung 40 Messdauer nach Berufsgruppe

Auf Abbildung 41 wird deutlich, dass sich die Messdauer (i.e., Arbeitszeit) der Tätigkeiten (TK_ALT) deutlich unterscheidet. Die Arbeitszeiten einiger Berufsgruppen und Tätigkeiten waren, während der Feldmessungen, im Schnitt sehr kurz (Skilehrer), andere eher lang (Tiefbau, Erntehelfer). Auffallend sind die unterschiedlichen Spannweiten der Arbeitszeit. Die Arbeitszeitliche Spannweite der, gut bemessenen Tätigkeiten „Sportler, Trainer“, „Seilbahnbeschäftigte“ und „Hüttenwirt, Kellner“ ist sehr groß.

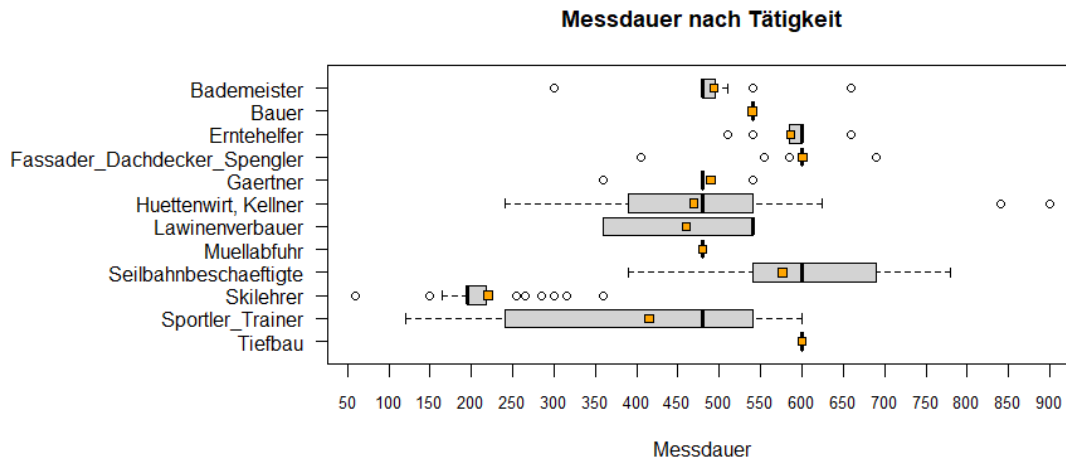


Abbildung 41 Messdauer nach Tätigkeit

5.2.2 Jahresverlauf

Abbildung 42 zeigt, wann die PE-Messungen stattgefunden haben, und gibt die Strahlenexposition der PE-Messungen in SED/d an. 991 PE-Messungen aus dem Sommer und 169 PE-Messungen aus dem Winter (nach *Data Culling*) sind in Abbildung 42 zu erkennen. Obwohl nicht alle PE-Messung bei Probanden durchgeführt wurden, die nach der typischen Arbeitswoche (Montag bis Freitag) arbeiten, sind besonders im Sommer die Wochenenden auf den in Abbildung 42 präsentierten Daten herauslesbar. Weiters sind viele hohe UVR-Expositionswerte in der ersten Augustwoche des Jahres 2022 zu erkennen.

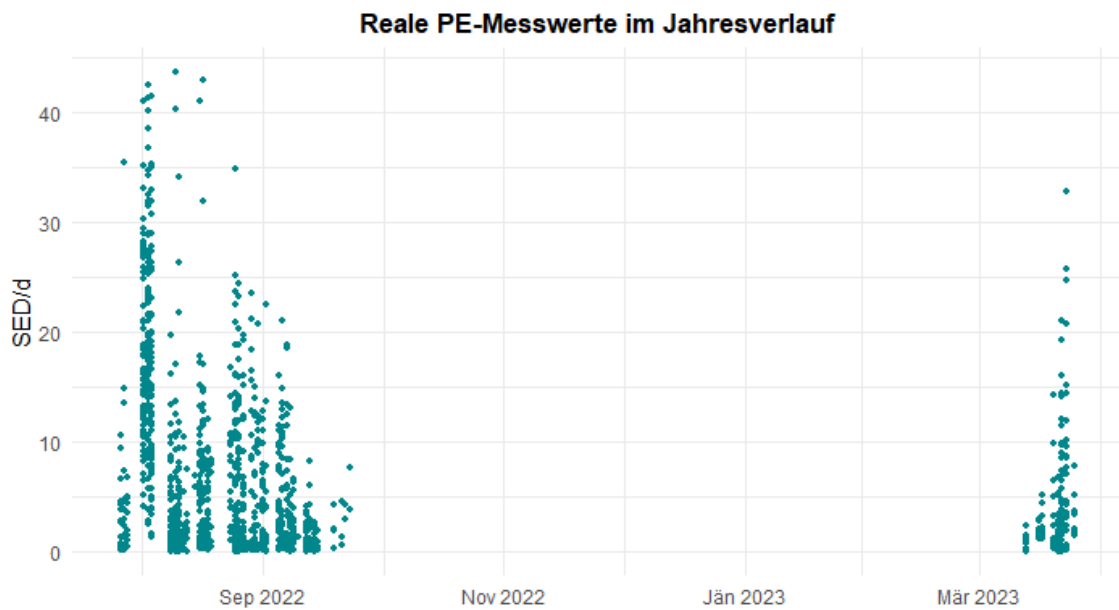


Abbildung 42 reale PE-Messwerte (SED/d) im Jahresverlauf

5.2.3 Monate

Auf Abbildung 43 ist die Verteilung der SED/d, auf Abbildung 44 die Verteilung der SED/d+ nach Monat dargestellt. Die höchsten absoluten, sowie durchschnittlichen SED/d-Werte wurden im August 2022 gemessen. Der Vergleich der Abbildungen 43 und 44 verdeutlicht, dass die Gewichtung, ausgedrückt durch SED/d+, die real gemessenen PE-Expositionswerte des Monats August 2022 verringert und jene des Monats März 2023 vergrößert.

Verteilung der SED/d nach Monat

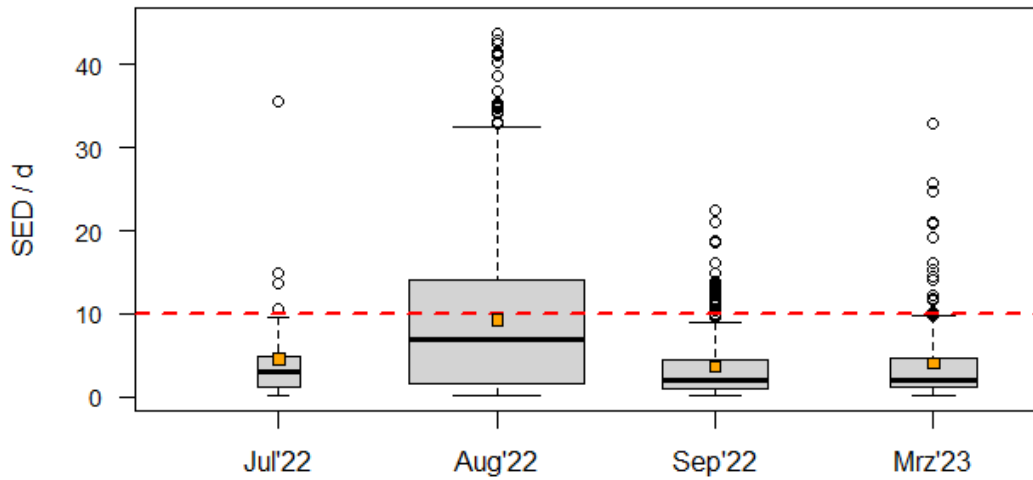


Abbildung 43 Verteilung der SED/d nach Messmonaten

Verteilung der SED/d+ nach Monat

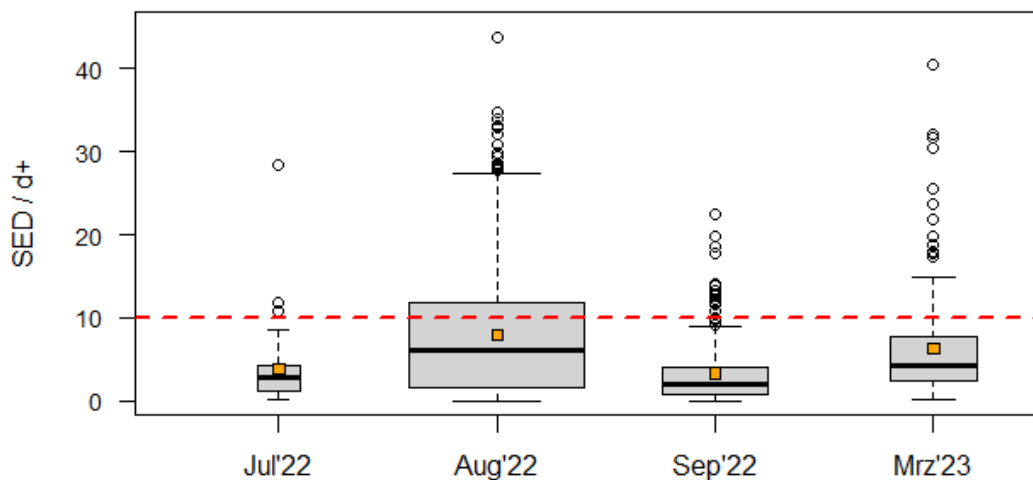


Abbildung 44 Verteilung der SED/d+ nach Messmonaten

Die Tabellen 7 und 8 enthalten die deskriptiven, statistischen Determinanten der Messmonate. Im August 2022 wurden sehr hohe UV-Strahlenexpositionen gemessen, der Anteil der HRD an allen PE-Messungen betrug 37,09 %. Der August-Median der Variable SED/d beträgt 6,9 SED/d, der Wert des dritten Quartils ist 14 SED/d. Im August wurden die meisten PE-Messungen durchgeführt, 60,43 % aller Messungen fanden im August 2022 statt. Durch die, in Tabelle 9

dargestellte prozentuelle Änderung, ist ersichtlich, dass in den Sommermonaten durchschnittlich längere PE-Messungen stattgefunden haben als im März 2023. Die relativ kurze Messdauer unterschätzt das Risiko von HRD, durch die Gewichtung auf den typischen 8-Stunden Arbeitstag vergrößert sich die Anzahl der HRD, im März 2023 um 75 %.

Tabelle 7 Deskriptive Statistik von der Verteilung der SED/d nach Monat; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED/d nach Monat										
Monat	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Jul22	39	4	0,14	3,04	4,58	0,24	1,13	4,84	15,91	35,54
Aug22	701	260	0,06	6,90	9,26	0,15	1,54	14,00	33,63	43,74
Sep22	251	24	0,05	2,09	3,64	0,13	0,91	4,39	13,74	22,55
Mär23	169	16	0,06	2,03	4,05	0,13	1,10	4,58	20,52	32,92

Tabelle 8 Deskriptive Statistik von der Verteilung der SED/d+ nach Monat; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED/d+ nach Monat										
Monat	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Jul22	39	3	0,13	2,85	3,82	0,23	1,14	4,30	12,73	28,43
Aug22	701	225	0,04	6,04	7,89	0,13	1,51	11,91	26,45	43,74
Sep22	251	18	0,04	2,03	3,35	0,13	0,78	4,11	13,13	22,55
Mär23	169	28	0,10	4,26	6,26	0,16	2,40	7,77	25,25	40,52

Tabelle 9 Relative Änderung in % von SED/d zu SED/d+ nach Monat; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Relative Änderung in % von SED/d zu SED/d+ nach Monat										
Monat	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max	
Jul22	-25,00	-5,88	-6,32	-16,53	-5,88	0,93	-11,04	-20,00	-20,00	
Aug22	-13,46	-38,46	-12,46	-14,81	-12,91	-2,10	-14,93	-21,35	0,00	
Sep22	-25,00	-12,73	-2,87	-7,95	0,00	-14,29	-6,31	-4,41	0,00	
Mär23	75,00	62,32	109,78	54,74	23,08	118,18	69,68	23,08	23,08	

5.2.4 Körperstelle der Messung

Abbildung 45 und Tabelle 10 zeigen die deskriptive Statistik der realen PE-Messwerte (SED/d) nach der Körperstelle des Messgeräts. Die Boxbreite im Boxplot zeigen die Anzahl der Messungen an. Weiters ist der Median (dicke schwarze Linie) und der Mittelwert (= arithmetisches Mittel) der PE-Messungen per Körperstelle (oranges Quadrat), sowie der Schwellenwert HRD (rot gestrichelte Linie) eingezeichnet. Das arithmetische Mittel der Körperstelle Brust ist um 99,51 % größer als der Median. Durch die Gewichtung auf einen typischen 8-Stunden Arbeitstag (SED/d+) (siehe Abbildung 46 und Tabelle 11) nähern sich arithmetisches Mittel und Median verhältnismäßig an, der prozentuelle Unterschied beträgt 46,95 %. Nach der Mediannormierung (SED_ideal_median/d+) (siehe Abbildung 47 und Tabelle 12) beträgt der prozentuelle Unterschied 49,75 %. In Tabelle 13 sind die prozentualen Veränderungen, von SED/d+ und SED_ideal_median/d+, mit der Basis SED/d der deskriptiven Parameter eingetragen. Auf die

Inklusion der Körperstellen Helm und Hose wird wegen der geringen Stichprobengrößen verzichtet. Durch die Gewichtung (SED/d+) und Mediannormierung (SED_ideal_median/d+) vergrößern sich die Werte aller deskriptiven Parameter der Körperstelle Brust, während die Werte der deskriptiven Parameter der Körperstelle Nacken meist etwas kleiner werden. 104 der 169 PE-Messungen an der Körperstelle Brust wurden bei Skilehrern durchgeführt. Die vergleichsweise kurze Arbeitszeit dieser Tätigkeit beeinflusst die Kategorie „Brust“ der kategoriale Variable „Körperstelle der Messung“ (siehe Diskussion der Ergebnisse).

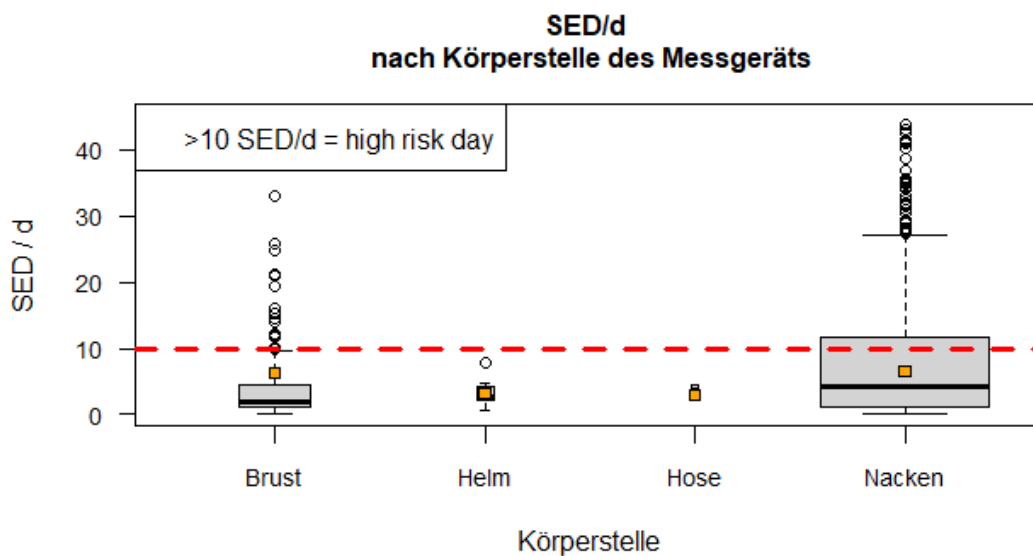


Abbildung 45 SED/d nach Körperstelle des Messgeräts

Tabelle 10 Deskriptive Statistik von SED/d nach Körperstelle des Messgeräts; Mittel = arithmetischer Mittelwert

SED/d nach Körperstelle des Messgeräts										
KdM	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Brust	169	16	0,06	2,03	4,05	0,13	1,10	4,58	20,52	32,92
Helm	10	0	0,62	2,75	3,26	0,78	2,17	4,24	7,04	7,74
Hose	2	0	2,75	3,64	3,64	2,79	3,19	4,08	4,48	4,52
Nacken	979	288	0,05	4,22	7,71	0,14	1,20	11,63	31,81	43,74

Die Tabellen 10, 11 und 12 zeigen, dass die meisten PE-Messungen am Nacken der Probanden erfolgten, gefolgt von PE-Messungen an der Brust, dem Helm und der Hose. Der Interquartilsabstand der bemessenen Körperstellen (in SED/d+) ist: Brust: 5,37 (25%-Perzentil: 2,40; 75%-Perzentil: 7,78); Helm: 1,03 (25%-Perzentil: 2,74; 75%-Perzentil: 3,77); Nacken: 8,84 (25%-Perzentil: 1,17; 75%-Perzentil: 10,01); für die Körperstelle Helm liegen zu wenige Daten vor. Das bedeutet der Interquartilsabstand der Körperstelle Nacken ist trotz der Gewichtung um 64,31 % höher als jener der Körperstelle Brust. Die analoge Berechnung mit den Werten von SED_ideal_median/d+ ergibt einen Unterschied von 77,87 %, mit SED_ideal_max/d+ ergibt sich

ein Unterschied von 38,30 %. Wahrscheinlich sind die UVR-Expositionsdaten weit gestreut wegen der großen Gruppengröße der Körperstelle Nacken und der damit verbundenen Varianz an Tätigkeiten und Arbeitsplätzen.

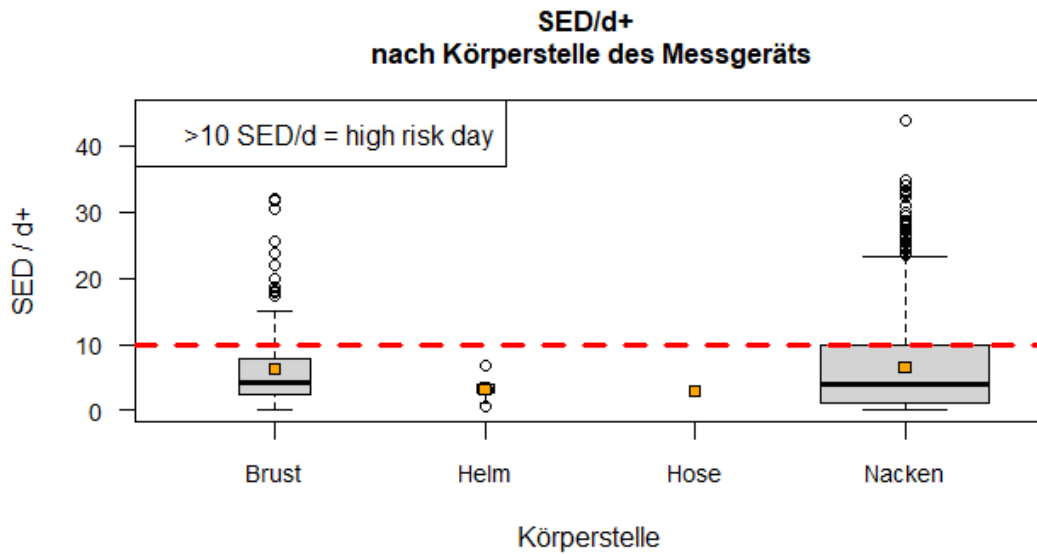


Abbildung 46 SED/d+ nach der Körperstelle des Messgeräts

Tabelle 11 Deskriptive Statistik von SED/d+ nach der Körperstelle des Messgeräts; Mittel = arithmetischer Mittelwert

SED/d+ nach Körperstelle des Messgeräts										
KdM	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Brust	169	28	0,10	4,26	6,26	0,16	2,40	7,77	25,25	40,52
Helm	10	0	0,55	3,17	3,20	0,70	2,74	3,77	6,26	6,88
Hose	2	0	2,20	2,91	2,91	2,24	2,55	3,26	3,58	3,62
Nacken	979	246	0,04	3,90	6,62	0,13	1,17	10,01	25,27	43,74

Auf den Abbildungen 45, 46 und 47 und in den Tabellen 10, 11 und 12 ist, besonders bei den Kategorien Brust und Nacken, der kategorialen Variable Körperstelle zu erkennen, dass die arithmetischen Mittelwerte deutlich größer sind als die Mediane, ein klassisches Symptom einer rechtsschiefen (positiven) Verteilung.

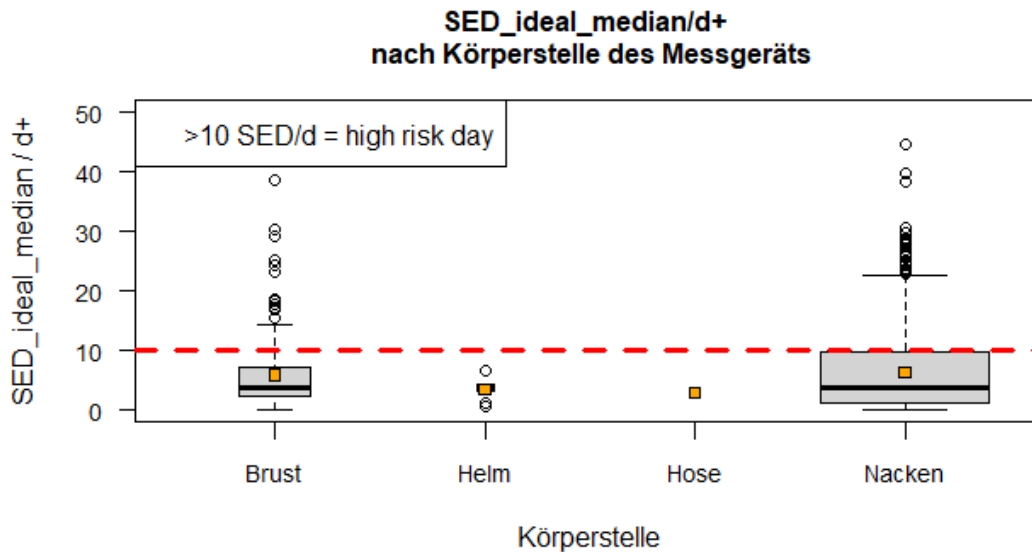


Abbildung 47 SED_ideal_median/d+ nach Körperstelle des Messgeräts

Tabelle 12 Deskriptive Statistik von SED_ideal_madian/d+ nach der Körperstelle des Messgeräts; Mittel = arithmetischer Mittelwert

SED_ideal_madian/d+ Körperstelle des Messgeräts										
KdM	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Brust	169	26	0,10	3,98	5,96	0,14	2,29	7,17	25,10	38,75
Helm	10	0	0,59	3,71	3,57	0,74	3,23	4,32	6,29	6,82
Hose	2	0	2,27	3,00	3,00	2,31	2,64	3,37	3,70	3,74
Nacken	979	238	0,04	3,90	6,43	0,14	1,20	9,88	23,82	44,65

Tabelle 13 Relative Änderung in % von SED/d zu SED/d+ und SED/d zu SED_ideal_meadian/d+ nach Körperstelle des Messgeräts; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Relative Änderung in % von SED/d zu SED/d+ nach Körperstelle des Messgeräts										
KdM	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max	
Brust	75,00	66,67	109,85	54,65	19,40	118,18	69,65	23,07	23,09	
Nacken	-14,58	-20,00	-7,58	-14,09	-7,14	-2,50	-13,89	-20,55	0,00	
Prozentuale Veränderung von SED/d zu SED_ideal_meadian/d+ nach Körperstelle des Messgeräts										
Brust	62,50	66,67	96,06	47,24	4,48	108,18	56,55	22,34	17,71	
Nacken	-17,36	-20,00	-7,58	-16,56	0,00	0,00	-15,01	-25,11	2,08	

Signifikanz Tests SED/d+. Um herauszufinden, ob die Variable „Körperstelle“ (KdM) eine signifikante Auswirkung auf die gewichteten Werte der PE-Messungen (Variable: SED/d+) hat, wurden statistische Tests durchgeführt. Da keine Normalverteilung vorliegt, wurden nichtparametrische Test gewählt. Es wurde nur auf die Signifikanz der Körperstellen Nacken und Brust getestet, da an den Körperstellen Hose und Helm zu wenige PE-Messungen durchgeführt wurden. Als Signifikanzniveau aller statistischen Test wurde 0,05 gewählt.

Erstens der Mann-Whitney-U-Test (Wilcoxon rank sum test), um auf die **Gleichheit der zentralen Tendenz** (Median) der abhängigen Variable SED/d+, der Kategorien Brust und Nacken, der erklärenden Variable Körperstellen zu testen.

H0: Es liegen keine Unterschiede bezüglich der zentralen Tendenz der beiden Gruppen vor.

Wilcoxon rank sum test
W = 86604, p-value = 0.3298

Der p-Wert (0,3298) ist > 0,05. **H0 kann nicht verworfen werden.**

Zweitens ist es von Interesse, ob sich die Verteilung der SED/d+ Werte der Kategorien Brust und/oder Nacken von der Verteilung aller PE-Messwerte unterscheidet. Hierzu werden 2 *Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Tests* angewandt. Ziel ist es, die **kumulierten Verteilungsfunktionen** von allen SED/d+ Werten und den SED/d+ Werten der Körperstelle Brust, beziehungsweise die kumulierten Verteilungsfunktionen von allen SED/d+ Werten und den SED/d+ Werten der Körperstelle Nacken zu vergleichen und auf signifikante Unterschiede zu testen.

Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test der Verteilungen von allen SED/d+ Werten und den SED/d+ Werten der Kategorie Brust.

H0: Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die **dieselbe Distribution** aufweist.

Asymptotic two-sample Kolmogorov-Smirnov test
D = 0.15948, p-value = 0.001103

Der p-Wert (0,001103) ist < 0,05. **H0 kann verworfen werden.** Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die nicht dieselbe Distribution aufweist.

Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test der Verteilungen von allen SED/d+ Werten und den SED/d+ Werten der Kategorie Nacken.

H0: Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die **dieselbe Distribution** aufweist.

Asymptotic two-sample Kolmogorov-Smirnov test
D = 0.029066, p-value = 0.7608

Der p-Wert (0,7608) ist > 0,05. **H0 kann nicht verworfen werden.**

Signifikanz Tests SED_ideal_median/d+. Um herauszufinden, ob die Variable „Körperstelle“ (KdM) eine signifikante Auswirkung auf die Variable „SED_ideal_median/d+“ hat, wurden statistische Tests durchgeführt.

Erstens der Mann-Whitney-U-Test (Wilcoxon rank sum test) um, auf die **Gleichheit der zentralen Tendenz** (Median) der Variable SED_ideal_median/d+, der Kategorien Brust und Nacken, der Variable Körperstellen (KdM) zu testen.

H0: Es liegen keine Unterschiede bezüglich der zentralen Tendenz der beiden Gruppen vor.

Wilcoxon rank sum test
W = 83842, p-value = 0.7791

Der p-Wert (0,7791) ist $> 0,05$. **H0 kann nicht verworfen werden.**

Analog zu den Signifikanz-Tests der Verteilungsfunktion oben wurden mittels 2 Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Tests die **Verteilungsfunktion** von allen SED_median_ideal/d+ Werten und den SED_median_ideal/d+ Werten der Körperstellen Brust und Nacken verglichen und auf signifikante Unterschiede getestet.

Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test der Verteilungen von allen SED_median_ideal/d+ Werten und den SED_median_ideal/d+ Werten der Kategorie Brust.

H0: Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die **dieselbe Distribution** aufweist.

Asymptotic two-sample Kolmogorov-Smirnov test
D = 0.23051, p-value = 3.111e-07

Der p-Wert ($3,111e^{-7}$) ist $< 0,05$. **H0 kann verworfen werden.** Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die nicht dieselbe Distribution aufweist.

Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test der Verteilungen von allen SED_median_ideal/d+ Werten und den SED_median_ideal/d+ Werten der Kategorie Nacken.

H0: Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die **dieselbe Distribution** aufweist.

Asymptotic two-sample Kolmogorov-Smirnov test
D = 0.04092, p-value = 0.3363

Der p-Wert (0,3363) ist > 0,05. **H0 kann nicht verworfen werden.**

5.2.5 Beschattungsindex

Der Beschattungsindex (BSI) wurde nicht gemessen, sondern durch **Expertenwissen** bestimmt. Der BSI liegt als 5-stufige dimensionslose Größe vor. Die Indexwerte sind ordinal und qualitativ beschrieben, von **1 = kein Schatten bis 5 = im Schatten**.

Auf den Abbildungen 48 und 49 ist zu erkennen, dass die Variable Beschattungsindex die UVR-Exposition der Probanden recht gut beschreibt. Die Tabellen 14 und 15 bestätigen das durch die statistisch entscheidenden Parameter HRD, Median, arithmetischer Mittelwert, und die vier Perzentil-Werte (Q2.5; Q25; Q75; Q97.5). Die, im Feld durch Beobachtung, approximierte Beschattung besitzt relativ hohen Erklärungsgehalt.

Um zu testen, wie hoch der Erklärungsgehalt ist, wurden lineare Regressionsmodelle für die 4 abhängigen Variablen (SED/d; SED/d+; SED_ideal_median/d+, SED_ideal_max/d+), mit der erklärenden Variable Beschattungsindex berechnet. Die Ergebnisse sind wie folgt.

R^2 des linearen Regressionsmodells von SED/d = 0,1233

R^2 des linearen Regressionsmodells von SED/d+ = 0,1146

R^2 des linearen Regressionsmodells von SED_ideal_meadian/d+ = 0,1046

R^2 des linearen Regressionsmodells von SED_ideal_max/d+ = 0,1018

Für SED/d hat die unabhängige Variable Beschattungsindex den besten Erklärungsgehalt. Das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,1233$ gibt an, dass **12,33 % der Varianz** von SED/d durch die Variable Beschattungsindex erklärt werden. Ein schwach-positiver Zusammenhang konnte nachgewiesen werden. Der Erklärungsgehalt wurde versucht zu steigern, in dem die Daten der Variable SED/d transformiert wurden.

R^2 des linearen Regressionsmodells von log10-transformierter-SED/d = 0,1946

R^2 des linearen Regressionsmodells von $\sqrt{\quad}$ -transformierter-SED/d = 0,1724

Mittels der log10-transformierten-SED/d-Werte konnte der Erklärungsgehalt der Variable Beschattungsindex gesteigert werden. Die Variable Beschattungsindex erklärt **19,46 % der Varianz** der log10-transformierten-SED/d-Werte. Ein schwach-positiver Zusammenhang konnte nachgewiesen werden. Die p-Werte des F-Tests aller aufgelisteten linearen Regressionsmodelle liegen deutlich unter dem Signifikanzniveau von 0,05 (e.g. lineares Regressionsmodell von log10-transformierter-(SED/d): F (1,1120)=270,6; $p < 2,2e-16$). Der dadurch implizierte signifikante

Erklärungsbeitrag der Modelle sollte nicht für überschätzt werden, da die Anzahl der Freiheitsgrade sehr groß ist. Der **Standardfehler** der Regression, des lineares Regressionsmodell von SED/d ist **1,307**. Bei einem 5-stufigen Index ist das ein zu hoher Wert, um von hoher Anpassungsgüte des linearen Regressionsmodells zu sprechen.

Verteilung der realen PE-Messwerte nach Beschattungsgrad vom Arbeitsplatz

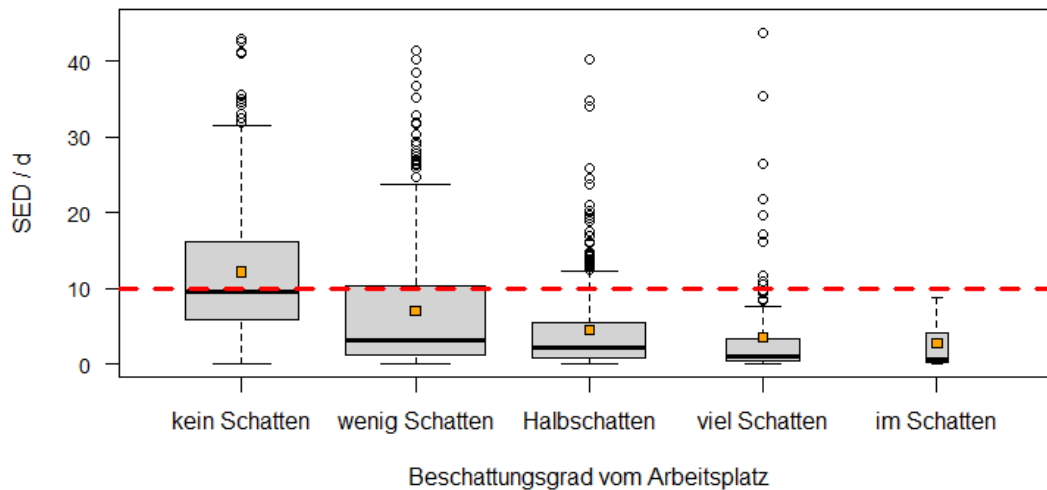


Abbildung 48 Verteilung der SED/d nach Beschattungsindex am Arbeitsplatz

Verteilung der SED/d+ nach Beschattungsindex des Arbeitsplatz

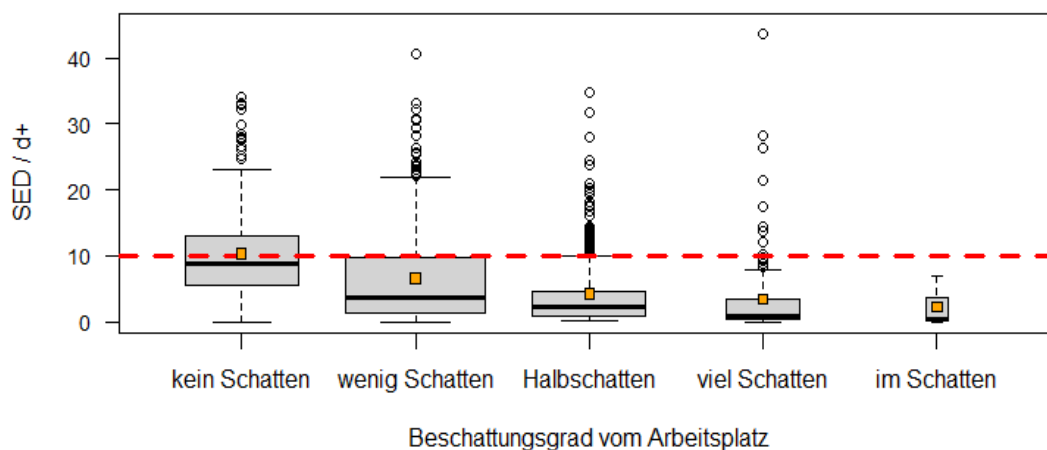


Abbildung 49 Verteilung der SED/d+ nach Beschattungsindex am Arbeitsplatz

Die Tabellen 14 und 15 zeigen, dass bereits geringe Beschattung am Arbeitsplatz (BSI 2: wenig Schatten) im Vergleich zu unbeschatteten Arbeitsplätzen (BSI 1: kein Schatten) zu einer deutlichen Reduktion der PE führt.

Tabelle 14 Deskriptive Statistik der SED/d nach Beschattungsindex; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Beschattungsindex SED/d										
BSI	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
1	284	139	0,08	9,49	12,22	0,68	5,92	16,17	34,68	42,97
2	427	110	0,05	3,18	7,01	0,20	1,22	10,39	29,79	41,52
3	284	43	0,06	2,12	4,53	0,13	0,93	5,45	20,93	40,32
4	116	12	0,06	0,97	3,59	0,10	0,36	3,34	22,36	43,74
5	11	0	0,06	0,65	2,71	0,08	0,27	4,13	8,51	8,78

Tabelle 15 Deskriptive Statistik der SED/d+ nach Beschattungsindex; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Beschattungsindex SED/d+										
BSI	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
1	284	125	0,06	8,80	10,37	0,59	5,57	13,13	28,03	34,05
2	427	103	0,04	3,62	6,64	0,18	1,36	9,71	25,40	40,52
3	284	37	0,08	2,20	4,31	0,13	0,83	4,70	19,82	34,85
4	116	9	0,04	0,95	3,39	0,08	0,32	3,44	22,12	43,74
5	11	0	0,05	0,52	2,25	0,06	0,21	3,76	6,81	7,02

Um den Effekt der Beschattung zu verdeutlichen, wurden Verhältniswerte der entscheidenden statistischen Deskriptoren, der Kategorien, des Beschattungsindex nach SED/d und nach SED/d+ berechnet (siehe Tabellen 16 und 17). Die Verhältniswerte beziehen sich stets auf den niedrigsten Beschattungsgrad (BSI 1). Erhöht sich der Beschattungsgrad verringert sich die SED/d, das kann an jedem einzelnen berechneten Verhältnis, in Tabelle 16 beobachtet werden. Erhöht sich der Beschattungsgrad verringert sich die SED/d+, das kann an fast jedem berechneten Verhältnis, in Tabelle 17 beobachtet werden.

Tabelle 16 Relative Änderung in % der statistischen Deskriptoren der BSI-Kategorien von SED/d; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Relative Änderung in % der BSI-Kategorien von SED/d							
BSI	HRD%	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5
1 zu 2	-47,37	-66,49	-42,64	-70,59	-79,39	-35,75	-14,10
1 zu 3	-69,06	-77,66	-62,93	-80,88	-84,29	-66,30	-39,65
1 zu 4	-78,86	-89,78	-70,62	-85,29	-93,92	-79,34	-35,52
1 zu 5	-100,00	-93,15	-77,82	-88,24	-95,44	-74,46	-75,46

Tabelle 17 Relative Änderung in % der statistischen Deskriptoren der BSI-Kategorien von SED/d+; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Relative Änderung in % der BSI-Kategorien von SED/d+							
BSI	HRD%	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5
1 zu 2	-45,20	-58,86	-35,97	-69,49	-75,58	-26,05	-9,38
1 zu 3	-70,40	-75,00	-58,44	-77,97	-85,10	-64,20	-29,29
1 zu 4	-82,37	-89,20	-67,31	-86,44	-94,25	-73,80	-21,08
1 zu 5	-100,00	-94,09	-78,30	-89,83	-96,23	-71,36	-75,70

5.2.6 Regionen

Abbildung 50 verdeutlicht, dass in West-Österreich durchschnittlich höhere PE-Werte gemessen wurden als in den anderen Regionen Österreichs, der Interquartilsabstand ist trotz der großen Anzahl an Messungen, in West-Österreich größer als in den anderen Regionen. Besonders hohe Messwerte wurden in Süd-Österreich vereinzelt gemessen, in den anderen Regionen häufiger. Abbildung 50 verdeutlicht die Notwendigkeit, sich bei positiven Verteilungen auf den Median zu beziehen. Durch Gewichtung (SED/d+) und Md-Normierung nähern sich Median und arithmetischer Mittelwert an (siehe Abbildung 51 und Abbildung 52, sowie Tabelle 20). Die UVR-Expositionsdaten, bezüglich der Regionen, werden durch die Md-Normierung statistisch brauchbarer gemacht.

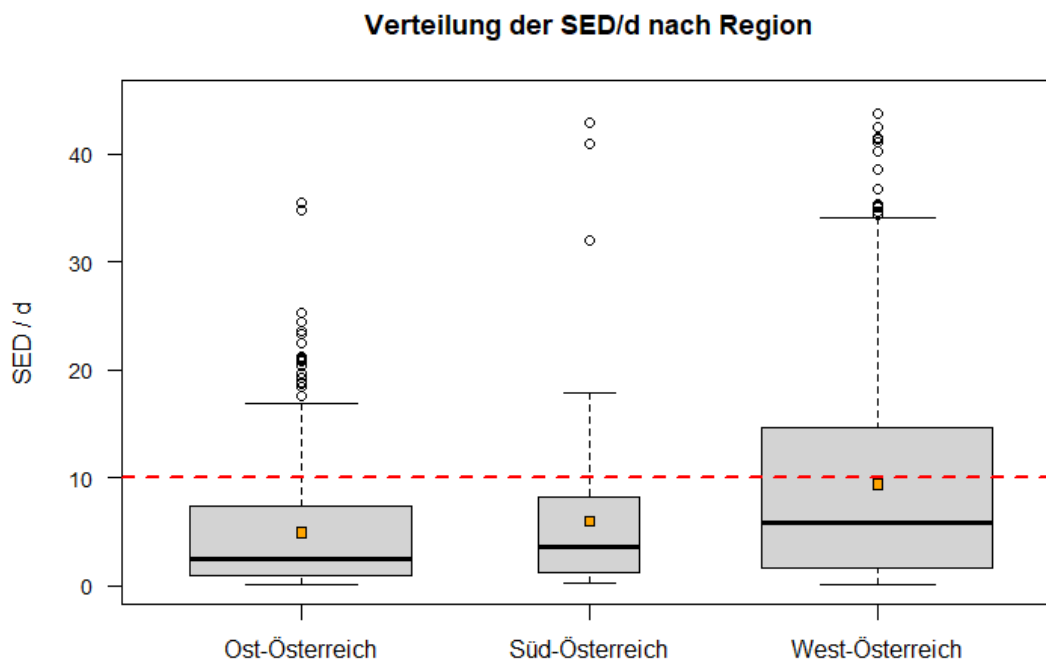


Abbildung 50 Verteilung der SED/d nach Region

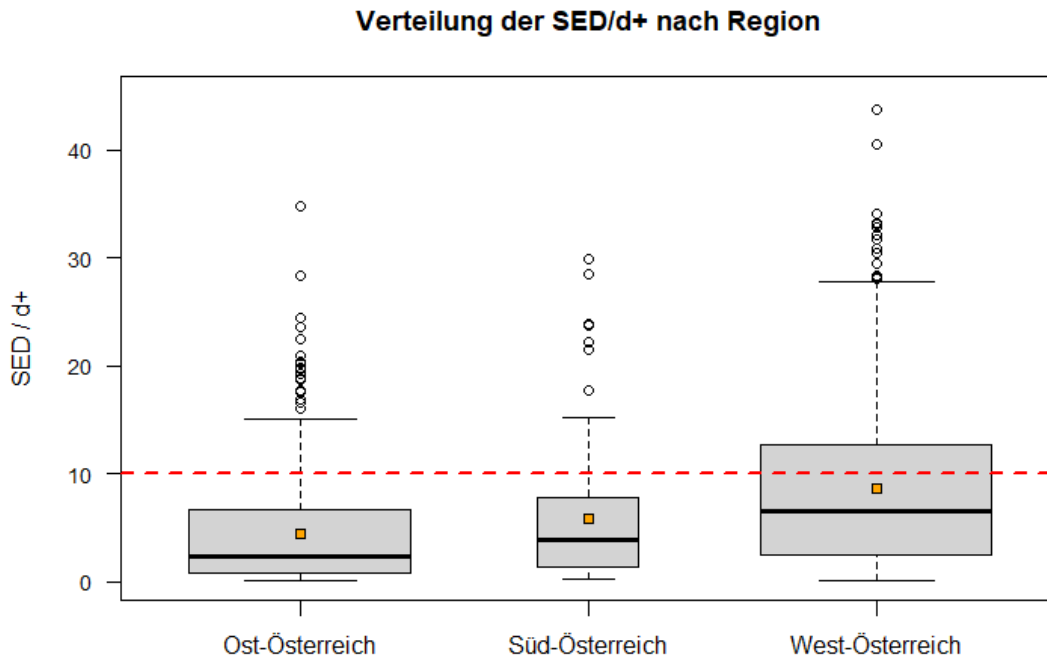


Abbildung 51 Verteilung der SED/d+ nach Region

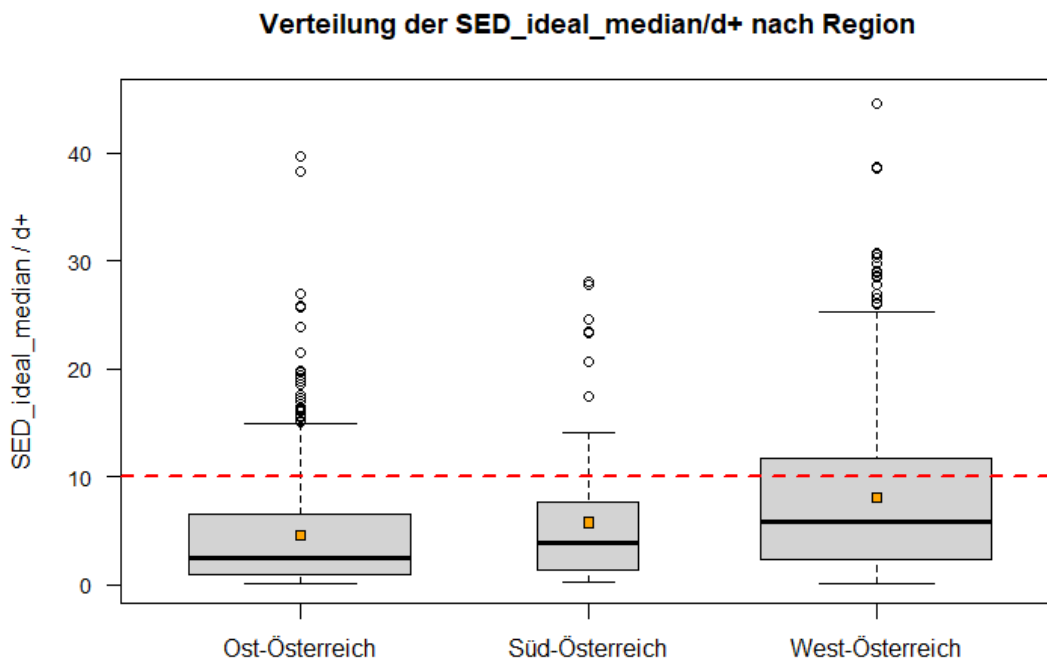


Abbildung 52 Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Region

Das prozentuelle Verhältnis der HRD zu allen realen PE-Messungen beträgt in Ost-Österreich 17,75 %, in Süd-Österreich 18,89 %, und in West-Österreich 35,47 %. Der westösterreichische

Median vergrößert sich durch die Gewichtung (SED/d+) um 10,31 %, durch die Md-Normierung (SED_ideal_median/d+) verkleinert er sich um 10,15 %. Das ist bemerkenswert da, die Md-Normierung die Gewichtung beinhaltet und ein Hinweis auf hohe ambiante Bestrahlung, während der PE-Messungen in West-Österreich (siehe Tabellen 18, 19 und 20).

Tabelle 18 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d nach Region; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED/d nach Region										
Region	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
O-Österreich	507	90	0,05	2,45	4,93	0,14	0,93	7,33	20,48	35,54
S-Österreich	106	20	0,16	3,59	5,99	0,27	1,21	8,09	23,19	42,97
W-Österreich	547	194	0,06	5,86	9,39	0,13	1,63	14,68	34,22	43,74

Tabelle 19 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d+ nach Region; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED/d+ nach Region										
Region	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
O-Österreich	507	69	0,04	2,39	4,45	0,13	0,83	6,62	18,85	34,85
S-Österreich	106	20	0,19	3,84	5,81	0,31	1,38	7,84	23,81	29,89
W-Österreich	547	185	0,04	6,46	8,6	0,14	2,42	12,63	28,1	43,74

Tabelle 20 Relative Änderung in % der Verteilung der SED/d zu SED/d+ und SED/d zu SED_ideal_median/d+ nach Region; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Relative Änderung in % von SED/d zu SED/d+ nach Region										
Region	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max	
O-Österreich	-23,33	-12,73	-2,45	-9,63	-6,55	-10,27	-9,61	-7,93	-1,94	
S-Österreich	0,00	21,74	7,20	-2,98	12,54	14,25	-3,03	2,66	-30,43	
W-Österreich	-4,64	-38,46	10,31	-8,36	4,14	49,13	-13,94	-17,86	0,00	

Relative Änderung in % von SED/d zu SED_ideal_median/d+ nach Region										
Region	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max	
O-Österreich	2,90	7,13	3,90	3,30	4,43	5,23	-1,85	0,42	14,10	
S-Österreich	-10,00	14,03	0,74	-0,46	6,64	2,32	-3,41	0,21	-6,14	
W-Österreich	-5,41	-4,18	-10,15	-6,46	-10,51	-1,68	-7,20	-6,47	2,09	

Signifikanz Tests SED/d. Um herauszufinden, ob die Variable „Region“ eine signifikante Auswirkung auf SED/d hat, wurden statistische Tests durchgeführt. Da keine Normalverteilung vorliegt, wurden nichtparametrische Test gewählt. Es wurde nur auf die Signifikanz der Ost- und West-Österreich getestet, da in Süd-Österreich deutlich weniger PE-Messungen durchgeführt wurden. Als Signifikanzniveau aller statistischen Test wurde 0,05 gewählt.

Erstens der Mann-Whitney-U-Test (Wilcoxon rank sum test) um, auf die Gleichheit der **zentralen Tendenz** (Median) der Variable SED/d, der Kategorien Ost-Österreich und West-Österreich, der Variable Region zu testen.

H0: Es liegen keine Unterschiede bezüglich der zentralen Tendenz der beiden Gruppen vor.

Wilcoxon rank sum test

W = 101955, p-value = 1.05e-13

Der p-Wert ($1,05e^{-13}$) ist $< 0,05$. **H₀ kann verworfen werden**, es liegen Unterschiede bezüglich der zentralen Tendenz beider Gruppen vor.

Zweitens ist es von Interesse, ob sich die Verteilung der SED/d Werte der Kategorien Ost-Österreich und/oder West-Österreich von der Verteilung aller SED/d Werte unterscheidet. Hierzu werden 2 *Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Tests* angewandt. Ziel ist es die **kumulierten Verteilungsfunktionen** von allen SED/d Werten und den SED/d Werten der Region Ost-Österreich, beziehungsweise die kumulierten Verteilungsfunktionen von allen SED/d Werten und den SED/d Werten der Region West-Österreich zu vergleichen und auf signifikante Unterschiede zu testen.

Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test der Verteilungen von allen SED/d Werten und den SED/d Werten der Kategorie Ost-Österreich.

H₀: Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die **dieselbe Distribution** aufweist.

Asymptotic two-sample Kolmogorov-Smirnov test
D = 0.1078, p-value = 0.0005497

Der p-Wert (0,0005497) ist $< 0,05$. **H₀ kann verworfen werden**. Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die nicht dieselbe Distribution aufweist.

Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test der Verteilungen von allen SED/d Werten und den SED/d Werten der Kategorie West-Österreich.

H₀: Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die dieselbe Distribution aufweist.

Asymptotic two-sample Kolmogorov-Smirnov test
D = 0.11346, p-value = 0.0001396

Der p-Wert (0,0001396) ist $< 0,05$. **H₀ kann verworfen werden**. Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die nicht dieselbe Distribution aufweist.

Signifikanz Tests SED/d+. Um herauszufinden, ob die Variable „Region“ eine signifikante Auswirkung auf die Werte der Variable SED/d+ hat, wurden statistische Tests durchgeführt. Da keine Normalverteilung vorliegt, wurden nichtparametrische Test gewählt.

Erstens der Mann-Whitney-U-Test (Wilcoxon rank sum test) um, auf die Gleichheit der **zentralen Tendenz** (Median) der Werte der Variable SED/d+, der Kategorien Ost-Österreich und West-Österreich, der Variable Region zu testen.

H0: Es liegen keine Unterschiede bzgl. der zentralen Tendenz der beiden Gruppen vor.

Wilcoxon rank sum test

W = 91081, p-value < 2.2e-16

Der p-Wert ($< 2,2e^{-16}$) ist < 0,05. **H0 kann verworfen werden.** Es liegen Unterschiede bezüglich der zentralen Tendenz beider Gruppen vor.

Zweitens ist es von Interesse, ob sich die Verteilung der SED/d+ Werte der Kategorien Ost-Österreich und/oder West-Österreich von der Verteilung aller PE-Messwerte unterscheidet. Hierzu werden 2 *Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Tests* angewandt. Ziel ist es **die kumulierten Verteilungsfunktionen** von allen SED/d+ Werten und den SED/d+ Werten der Region Ost-Österreich, beziehungsweise die kumulierten Verteilungsfunktionen von allen SED/d Werten und den SED/d Werten der Region West-Österreich zu vergleichen und auf signifikante Unterschiede zu testen.

Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test der Verteilungen von allen SED/d+ Werten und den SED/d+ Werten der Kategorie Ost-Österreich.

H0: Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die **dieselbe Distribution** aufweist.

Asymptotic two-sample Kolmogorov-Smirnov test

D 0.13959, p-value = 2.14e-06

Der p-Wert ($2,14e^{-6}$) ist < 0,05. **H0 kann verworfen werden.** Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die nicht dieselbe Distribution aufweist.

Two-Sample Kolmogorov-Smirnov Test der Verteilungen von allen SED/d+ Werten und den SED/d+ Werten der Kategorie West-Österreich.

H0: Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die dieselbe Distribution aufweist.

Asymptotic two-sample Kolmogorov-Smirnov test

D = 0.1367, p-value = 1.851e-06

Der p-Wert ($1,851e^{-6}$) ist < 0,05. **H0 kann verworfen werden.** Beide Stichproben wurden einer Grundgesamtheit entnommen, die nicht dieselbe Distribution aufweist.

5.2.7 Seehöhe und Höhenstufen

Abbildung 53 beschreibt die SED/d Messwerte nach Seehöhe. Es ist ein sehr kleiner Zusammenhang von Seehöhe und SED/d zu erkennen. Die erklärende Variable Seehöhe besitzt nur sehr geringen Erklärungsgehalt. Durch Gewichtung und Normierung lässt sich der **Erklärungsgehalt** steigern, er verbleibt aber auf **geringem Niveau**.

R^2 von $\text{lm}(\text{SED}/d$ mit Seehöhe) = 0,003431

R^2 von $\text{lm}(\text{SED}/d+$ mit Seehöhe) = 0,01672

R^2 von $\text{lm}(\text{SED_ideal_median}/d+$ mit Seehöhe) = 0,01953

R^2 von $\text{lm}(\text{SED_ideal_max}/d+$ mit Seehöhe) = 0,03884

Der größte Erklärungsgehalt wird durch die Maximalnormierung erreicht, das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,03884$ gibt an, dass 3,88 % der Varianz von $\text{SED_ideal_max}/d+$ durch die Variable Seehöhe erklärt werden.

Berechnet, mittels der Formel des linearen Regressionsmodells der erklärenden Variable **Seehöhe** und der abhängigen Variable **SED/d+** ($\text{SED}/d+ = 5,6243388 + 0,0010657 * \text{Seehöhe}$) ist der modellierte Wert der tiefst, auf 151 m gelegenen Messstelle 5,79 SED/d+, jener der höchst, auf 3035 m gelegenen Messstelle 8,86 SED/d+. Durch die Formel des Höheneffekts (UV-Werte in J/m^2 oder W/m^2) von Schmucki & Philipona (2002):

$$\text{Altitude Effect}[\%] = 100 * \frac{UV_{\text{high}} - UV_{\text{low}}}{UV_{\text{high}}} * \frac{1000}{h_{\text{high}} - h_{\text{low}}}$$

Formel 15

UV_{high} = hochgelegene Messstelle

UV_{low} = tiefgelegene Messstelle

ergibt sich ein modellierter Höheneffekt von **12,87%/1000 m**.

Die in Abbildung 53 eingezeichneten Seehöhen der Hubs (Knotenpunkte der Feldmessungen) lassen erkennen, dass die Wahl der Hubs, nicht nur die geographische Lage der Feldmessungen beeinflusst (siehe Abbildung 33), sondern auch die Seehöhe der Feldmessungen. Viele UVR-Expositionsmessungen haben im Höhenbereich 150 – 300 m stattgefunden, das entspricht der Höhenlage von Wien und dem Wiener Umland. Im Höhenbereich 500 – 700 m häufen sich Datenpunkte der PE-Messungen, zweifelsohne handelt es sich dabei um den Gutteil der PE-Messungen um den südösterreichischen Hub Feistritz im Rosental, sowie zahlreiche im Inntal durchgeführte Messreihen. Im Höhenbereich 850 – 1050 m sind viele Datenpunkte, entsprechend der Höhenlage des Stubaitals und den nördlichen Ausläufern der Tuxer Alpen,

sowie der Stubai-er Alpen, verzeichnet. Die oberhalb der 3 Höhenbereiche eingetragenen Messungen wurden in West- und Südösterreich durchgeführt.

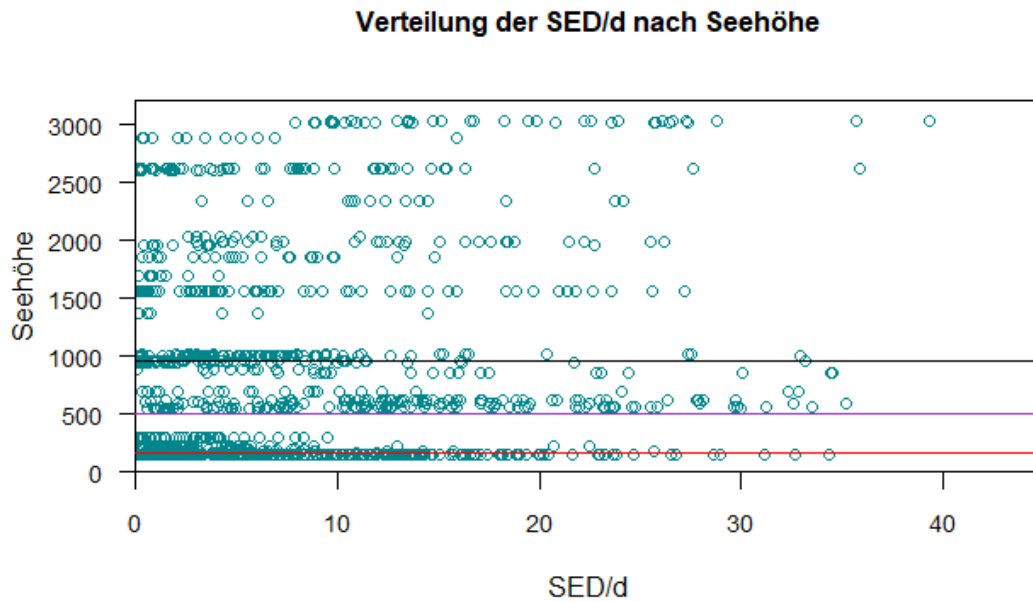
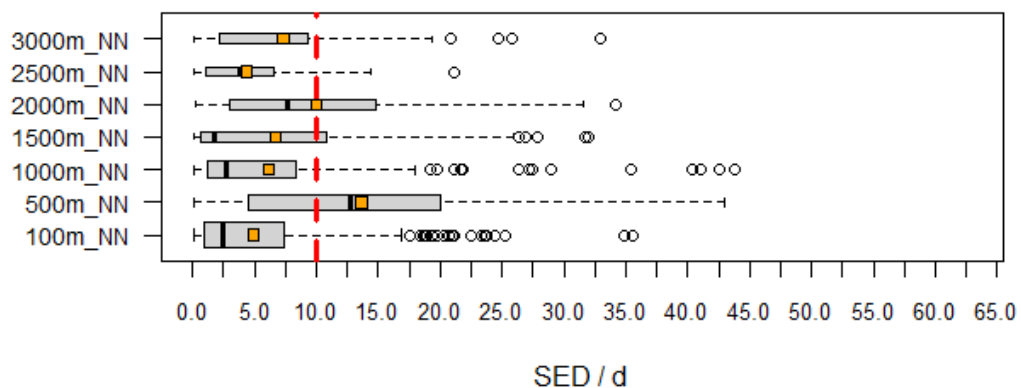


Abbildung 53 SED/d nach Seehöhe; Seehöhe der Hubs, Wien: rote Linie, Feistritz im Rosental: violette Linie, Mieders im Stubaital: schwarze Linie

Die Kategorienamen, der kategorialen, erklärenden Variable „Höhenstufe“, definieren die Untergrenze der Höhenstufe. Die graphische Darstellung, der Verteilung der UVR-Expositionswerte der abhängigen Variablen SED/d und SED_ideal_max/d+, nach Höhenstufe offenbart Unterschiede. Nach Max-Normalisierung erhöht sich die modellierte Strahlenexposition der Höhenstufen 3000m_NN, 2500m_NN und 2000m_NN deutlich.

Es ist kein eindeutiger Höhengradient, der URV-Expositionswerte, in Abbildung 53 und Abbildung 54, oder in den Tabellen 21 und 22 festzustellen. Durch die Maximalnormierung verbessert sich die Erklärungsleistung der Variable „Höhenstufe“ etwas.

Verteilung der SED/d nach Höhenstufe



Verteilung der SED_ideal_max/d+ nach Höhenstufe

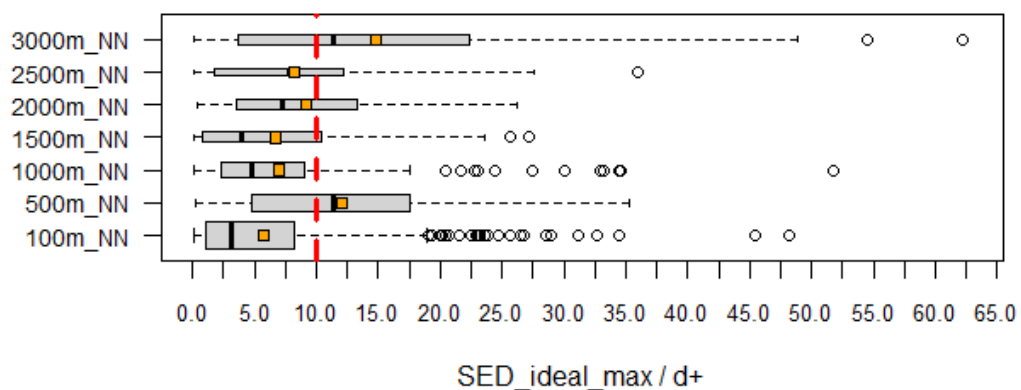


Abbildung 54 Vergleich der Verteilung der Strahlenexposition nach Höhenstufen; oben: SED/d; unten: SED_ideal_max/d+

Tabelle 21 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d nach Höhenstufe; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED/d nach Höhenstufe										
Höhenstufe	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
100m_NN	507	90	0,05	2,45	4,93	0,14	0,93	7,33	20,48	35,54
500m_NN	187	105	0,16	12,71	13,66	0,39	4,48	19,99	39,15	42,97
1000m_NN	194	40	0,06	2,71	6,14	0,13	1,18	8,29	30,12	43,74
1500m_NN	79	22	0,06	1,75	6,66	0,07	0,67	10,83	28,00	32,02
2000m_NN	81	32	0,25	7,60	10,00	0,61	2,96	14,84	30,85	34,15
2500m_NN	45	2	0,11	3,82	4,39	0,11	1,10	6,58	13,96	21,07
3000m_NN	67	13	0,07	7,35	7,32	0,18	2,15	9,28	25,12	32,92

Tabelle 22 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED_ideal_max/d+ nach Höhenstufe; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED_ideal_max/d+ nach Höhenstufe										
Höhenstufe	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
100m_NN	507	102	0,06	3,19	5,76	0,18	1,07	8,22	23,35	48,13
500m_NN	187	106	0,27	11,31	12,10	0,67	4,82	17,53	31,61	35,22
1000m_NN	194	39	0,04	4,76	7,00	0,11	2,35	8,97	30,53	51,76
1500m_NN	79	21	0,09	3,94	6,69	0,14	0,80	10,47	23,70	27,17
2000m_NN	81	33	0,33	7,26	9,16	0,62	3,54	13,26	24,12	26,17
2500m_NN	45	15	0,15	7,81	8,23	0,18	1,79	12,17	27,16	35,91
3000m_NN	67	37	0,10	11,32	14,82	0,22	3,62	22,37	50,84	62,26

Um die Veränderung der UVR-Expositionswerte durch die Maximalnormierung zu verdeutlichen ist in Tabelle 23 die prozentuale Veränderung der deskriptiven, statistischen Parameter eingetragen. Die relative Änderung, der HDR ist, in sehr hohen Lagen (Höhenstufen 2500m_NN und 3000m_NN), massiv positiv, die restlichen Deskriptoren steigen um 24,06 – 104,36 %. Die negative prozentuelle Änderung der HRD, bei gleichzeitiger positiver prozentueller Änderung der Zentralmaße, der Höhenstufen 1000m_NN und 1500m_NN, ist auffällig. Die prozentuelle Änderung der statistischen Deskriptoren, der Höhenstufen 500m_NN, 1000m_NN, 1500m_NN und 2000m_NN, lässt keine eindeutige Tendenz erkennen.

Tabelle 23 Relative Änderung in % der Verteilung der SED/d zu SED_ideal_max/d+ nach Höhenstufen; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Relative Änderung in % von SED/d zu SED_ideal_max/d+ nach Höhenstufe									
Höhenstufe	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
100m_NN	13,33	19,24	30,37	16,94	25,82	16,09	12,26	14,03	35,42
500m_NN	0,95	69,64	-11,02	-11,46	69,97	7,70	-12,27	-19,25	-18,02
1000m_NN	-2,50	-31,76	76,10	14,13	-11,45	98,78	8,22	1,37	18,33
1500m_NN	-4,55	57,77	125,42	0,37	100,98	20,44	-3,28	-15,38	-15,16
2000m_NN	3,13	31,99	-4,45	-8,42	1,28	19,75	-10,67	-21,81	-23,36
2500m_NN	650,00	37,67	104,36	87,45	62,03	62,84	84,97	94,62	70,45
3000m_NN	184,62	45,76	53,95	102,39	24,06	68,64	141,22	102,41	89,13

Um den Höheneffekt weiter zu beschreiben sind in Tabelle 24 und 25 die prozentuellen Änderungen, ausgewählter statistischer Deskriptoren, jeder Höhenstufe zu der jeweils darüberliegenden Höhenstufe, der abhängigen Variablen SED/d und SED_ideal_max/d+ eingetragen. HRD% ist der prozentuelle Anteil von HRD an N (in diesem Fall, Anzahl der Werte der jeweiligen Höhenstufe), die in der Tabelle eingetragenen HRD%-Werte geben, analog zu allen anderen in den Tabellen 24 und 25 eingetragenen Werten, die relative Änderung in Prozent, der niedrigeren Höhenstufe zu der darüberliegenden Höhenstufe, an. Der Höheneffekt wird durch die Max-Normierung besser beschrieben als durch SED/d. Ignoriert man die Werte der mittleren Höhenstufen „1000m_NN“ und „1500m_NN“, beziehungsweise „500m zu 1000m“ und „1000m

zu 1500m“ der Tabelle 25, und betrachtet die Deskriptoren Median und Q97,5 der Max-Normierung, ist eine kontinuierliche Steigerung der UVR-Exposition, durch ein Zentralmaß (Median) und ein Extremwerte-beschreibendes-Maß (Q97,5), beschrieben.

Tabelle 24 Relative Änderung in % der statistischen Deskriptoren der Höhenstufen-Kategorien von SED/d; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Relative Änderung in % der Höhenstufenwerte von SED/d							
Höhenstufe	HRD%	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5
100m zu 500m	216,31	418,78	177,08	178,57	381,72	172,71	91,16
500m zu 1000m	-63,28	-78,68	-55,05	-66,67	-73,66	-58,53	-23,07
1000m zu 1500m	35,06	-35,42	8,47	-46,15	-43,22	30,64	-7,04
1500m zu 2000m	41,86	334,29	50,15	771,43	341,79	37,03	10,18
2000m zu 2500m	-88,75	-49,74	-56,10	-81,97	-62,84	-55,66	-54,75
2500m zu 3000m	336,57	92,41	66,74	63,64	95,45	41,03	79,94

Tabelle 25 Relative Änderung in % der statistischen Deskriptoren der Höhenstufen-Kategorien von SED_ideal_max/d; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Relative Änderung in % der Höhenstufenwerte von SED_ideal_max/d+							
Höhenstufe	HRD%	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5
100m zu 500m	181,76	254,55	110,07	272,22	350,47	113,26	35,37
500m zu 1000m	-64,54	-57,91	-42,15	-83,58	-51,24	-48,83	-3,42
1000m zu 1500m	32,23	-17,23	-4,43	27,27	-65,96	16,72	-22,37
1500m zu 2000m	53,26	84,26	36,92	342,86	342,50	26,65	1,77
2000m zu 2500m	-18,18	7,58	-10,15	-70,97	-49,44	-8,22	12,60
2500m zu 3000m	65,67	44,94	80,07	22,22	102,23	83,81	87,19

5.3 Berufsgruppen

Um die Berufsgruppen genauer zu analysieren, wurden die Variablen SED/d und SED_ideal_median/d+ ausgewählt. SED/d da sie die Variable die realen PE- Messergebnisse enthält, SED_ideal_median/d+ da die Variable an ehesten in der Lage ist über Jahre gemittelte, hypothetisch akkurate PE-Werte zu approximieren. Die Variable Berufsgruppe ist erklärender Natur für die 4 abhängigen Variablen, schlussendlich sollen die abhängigen Variablen Aussagekraft über die PE der Beschäftigten generieren. Insofern können die Variablen SED/d SED_ideal_median/d+ als erklärend für die Variable Berufsgruppen gesehen werden.

Die real gemessene, erythemgewichtete UV-Strahlenexposition (SED/d) der Berufsgruppe „Bau klassisch“ ist extrem hoch, der Median und das arithmetische Mittel überschreiten den Schwellenwert HRD (siehe Abbildung 55 und Tabelle 26). Der Anteil der HRD an allen Messungen, der Berufsgruppe „Bau klassisch“ liegt bei 56,30 %, der zweithöchste HRD-Anteil ist für die Berufsgruppe „Landwirtschaft“ mit 25 % verzeichnet, gefolgt von der Berufsgruppe „Alpin“ 16,12 %, der Berufsgruppe „Sport“ 7,29 %, und der Berufsgruppe „weitere mögliche Gruppen“ 2,25 %. Die durch Mediannormierung gewichteten und normierten PE-Werte der Berufsgruppen nähern

sich einander an (siehe Abbildung 56 und Tabellen 27), ein Indiz für die Sinnhaftigkeit der Berechnung, bedenkt man die in der Analyse gewonnen Erkenntnisse über den Zusammenhang der Variablen Messdauer und Berufsgruppe, sowie jene über den Einfluss der Körperstelle der Messung (siehe Diskussion der Ergebnisse).

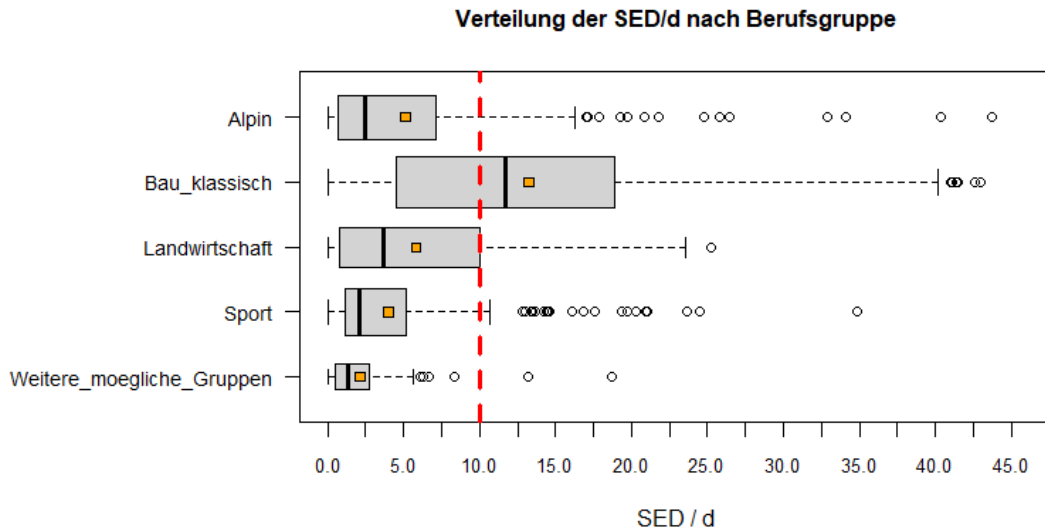


Abbildung 55 Verteilung der SED/d nach Berufsgruppen

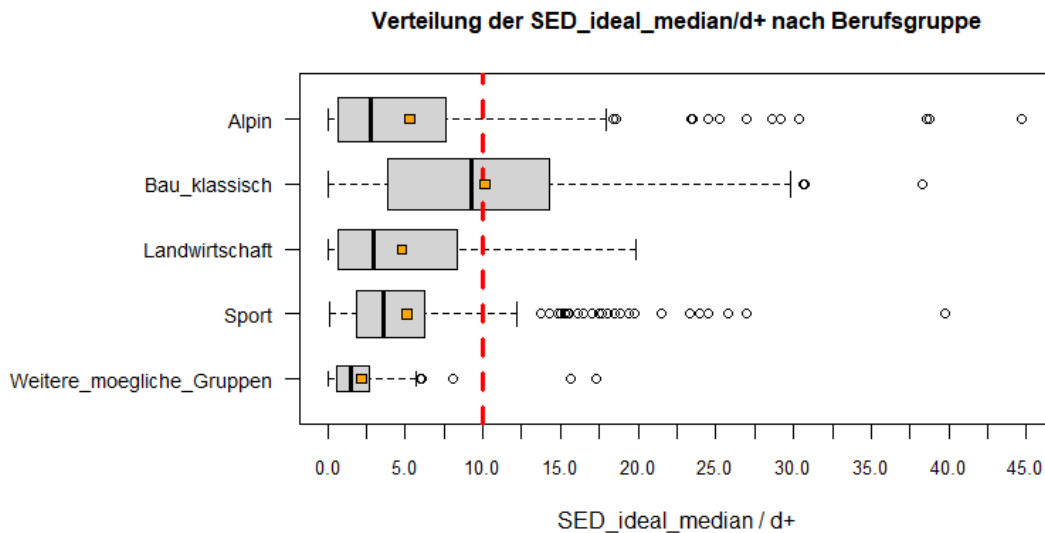


Abbildung 56 Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Berufsgruppen

In Tabellen 26 und 27 sind die Kenngrößen der deskriptiv statistischen Parameter verzeichnet. Bis zum 75%-Quartil überragen die SED/d und SED_ideal_median/d+ Werte der Berufsgruppe „Bau klassisch“ die der andern Berufsgruppen deutlich, die UVR-Exposition der Berufsgruppe ist exorbitant. Durch SED_ideal_median/d+ werden die Mediane der Berufsgruppen „Bau klassisch“

und „Landwirtschaft“ um 20,84 %, beziehungsweise 19,41 %, im Vergleich zu SED/d, verkleinert, jener von „Sport“ um 73 % vergrößert (siehe Tabelle 28).

Tabelle 26 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d nach Berufsgruppe; W.M.G. = Weitere mögliche Gruppen; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED/d nach Berufsgruppen										
BG_ALT	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Alpin	242	39	0,06	2,46	5,12	0,09	0,70	7,10	24,67	43,74
Bau klassisch	341	192	0,08	11,69	13,26	0,54	4,53	18,88	36,18	42,97
Landwirtschaft	200	50	0,06	3,71	5,82	0,15	0,81	9,96	20,78	25,25
Sport	288	21	0,06	2,09	3,99	0,25	1,12	5,21	19,02	34,85
W.M.G.	89	2	0,05	1,30	2,15	0,11	0,53	2,73	8,02	18,66

Tabelle 27 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Berufsgruppen; W.M.G. = Weitere mögliche Gruppen; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Berufsgruppen										
BG_ALT	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Alpin	242	40	0,04	2,74	5,28	0,08	0,69	7,58	26,92	44,65
Bau klassisch	341	158	0,08	9,25	10,13	0,50	3,86	14,29	27,12	38,32
Landwirtschaft	200	32	0,05	2,99	4,76	0,11	0,64	8,34	16,35	19,87
Sport	288	32	0,12	3,61	5,10	0,34	1,88	6,23	19,67	39,76
W.M.G.	89	2	0,05	1,45	2,18	0,11	0,62	2,69	7,68	17,28

Tabelle 28 Relative Änderung in % von SED/d zu SED_ideal_median/d+ nach Berufsgruppen; W.M.G. = Weitere mögliche Gruppen; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Relative Änderung in % von SED/d zu SED_ideal_median/d+ nach Berufsgruppen										
BG_ALT	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max	
Alpin	2,56	-41,03	11,32	3,13	-8,97	-1,39	6,86	9,14	2,09	
Bau klassisch	-17,71	-4,49	-20,84	-23,63	-6,56	-14,78	-24,29	-25,02	-10,82	
Landwirtschaft	-36,00	-22,09	-19,41	-18,29	-26,60	-20,75	-16,28	-21,30	-21,29	
Sport	52,38	107,91	73,00	27,71	35,60	68,28	19,66	3,46	14,10	
W.M.G.	0,00	-1,77	11,74	1,38	-1,77	16,84	-1,41	-4,29	-7,38	

5.4 Tätigkeiten

Um die Tätigkeiten zu analysieren, wurden die Variablen SED/d und SED_ideal_median/d+ ausgewählt. SED/d da sie die realen PE- Messergebnisse enthält, SED_ideal_median/d+ da die Variable an ehesten in der Lage ist über Jahre gemittelte, hypothetisch akkurate PE-Werte zu approximieren. Die Variable Tätigkeit ist erklärender Natur für die 4 abhängigen Variablen, schlussendlich sollen die abhängigen Variablen Aussagekraft über die PE der Beschäftigten generieren. Insofern können die Variablen SED/d und SED_ideal_median/d+ als erklärend für die Variable Tätigkeiten gesehen werden.

Die real gemessenen, erythemgewichteten UV-Strahlenexpositionen (SED/d) der Tätigkeiten „Tiefbau“ und „Fassader, Dachdecker, Spengler“ sind extrem hoch, Median und arithmetisches

Mittel überschreiten den Schwellenwert HRD (siehe Abbildung 57 und Tabelle 29). Der Anteil der HRD an allen Messungen, der Tätigkeit „Tiefbau“ liegt bei 83,33 %, der zweithöchste HRD-Anteil ist für die Tätigkeit „Fassader, Dachdecker, Spengler“ mit 64,42 % verzeichnet, gefolgt von der Tätigkeit „Erntehelfer“ 26,18. Die durch Mediannormierung gewichteten und normierten PE-Werte der Tätigkeiten nähern sich einander an (siehe Abbildung 58 und Tabelle 30), ein Indiz für die Sinnhaftigkeit der Berechnung, bedenkt man die in der Analyse gewonnen Erkenntnisse über den Zusammenhang der Variablen Messdauer und Berufsgruppe, sowie jene über den Einfluss der Körperstelle der Messung (siehe Diskussion der Ergebnisse).

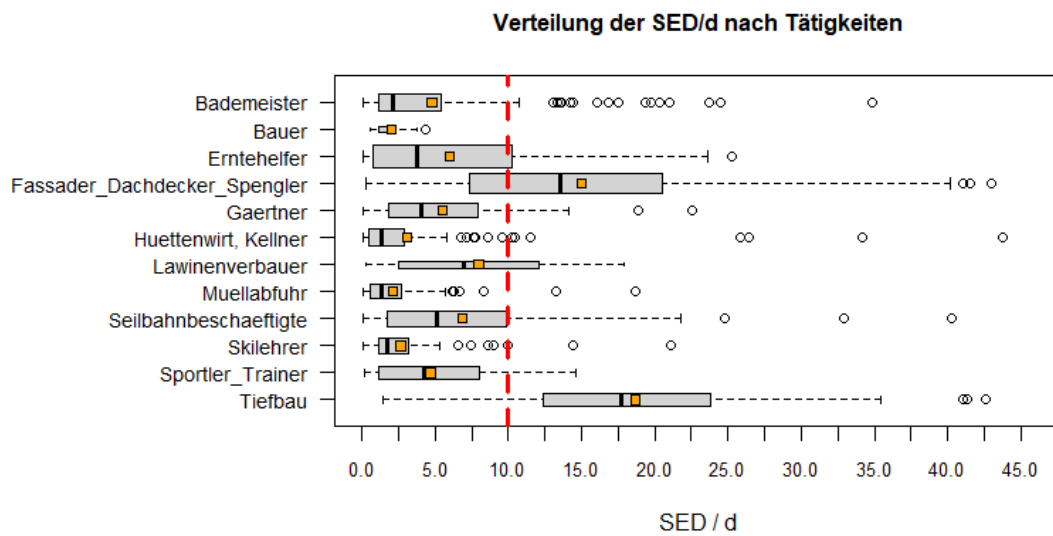


Abbildung 57 Verteilung der SED/d nach Tätigkeiten

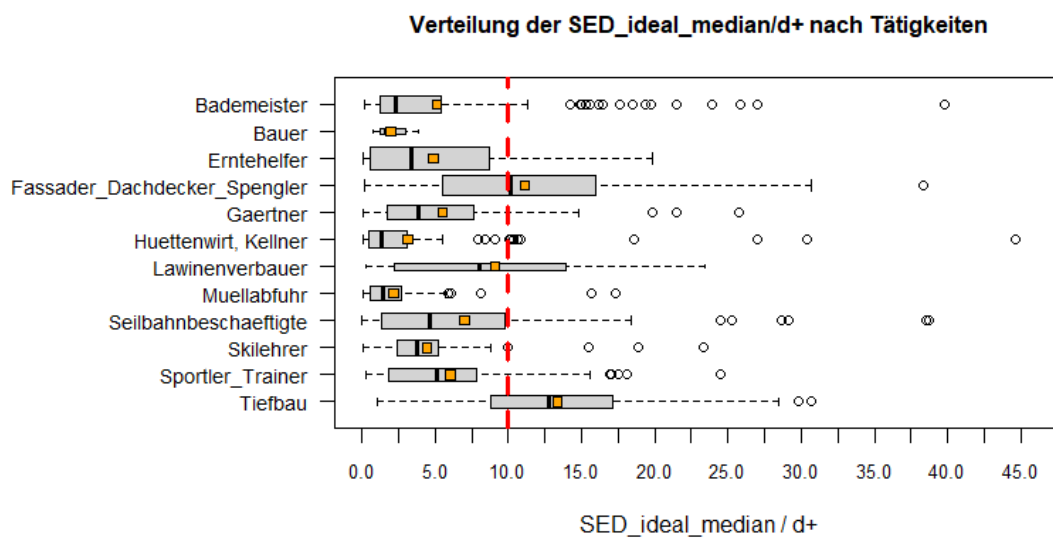


Abbildung 58 Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Tätigkeiten

In Tabellen 29 und 30 sind die Kenngrößen der deskriptiv statistischen Parameter verzeichnet. Bis zum 75%-Quartil überragen die SED/d und SED_ideal_median/d+ Werte der Tätigkeiten „Fassader, Dachdecker, Spengler“ und „Tiefbau“ die der anderen Tätigkeiten deutlich, die UVR-Exposition der Tätigkeiten ist exorbitant. Durch SED_ideal_median/d+ werden die Mediane der Tätigkeiten „Fassader, Dachdecker, Spengler“ und „Tiefbau“ um 25,21 %, beziehungsweise 27,62 %, im Vergleich zu SED/d, verkleinert, jener von „Skilehrer“ um 113,73 % vergrößert (siehe Tabelle 31).

Tabelle 29 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d nach Tätigkeiten; F., D., S.: Fassader, Dachdecker, Spengler; H., K.: Hüttenwirt, Kellner; Lawinenv.: Lawinenverbauer; Seilbahn.: Seilbahnbeschäftigte; S., T.: Sportler, Trainer; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED/d nach Tätigkeiten										
TK_ALT	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Bademeister	116	17	0,13	2,17	4,78	0,25	1,12	5,29	21,32	34,85
Bauer	9	0	0,58	1,93	2,05	0,64	1,11	2,20	4,26	4,39
Erntehelfer	191	50	0,06	3,72	6,00	0,14	0,77	10,27	20,85	25,25
F., S., D.	179	115	0,26	13,59	14,98	0,70	7,32	20,51	37,78	42,97
Gärtner	90	17	0,08	4,09	5,51	0,22	1,89	7,92	17,78	22,55
H., K.	118	7	0,06	1,36	3,09	0,09	0,46	2,82	25,86	43,74
Lawinenv.	18	7	0,32	6,98	7,97	0,87	2,55	12,01	17,87	17,90
Müllabfuhr	89	2	0,05	1,30	2,15	0,11	0,53	2,73	8,02	18,66
Seilbahn.	106	25	0,06	5,11	6,89	0,10	1,74	9,83	22,89	40,32
Skilehrer	104	2	0,06	1,76	2,67	0,53	1,13	3,16	9,39	21,07
S., T.	68	2	0,16	4,23	4,69	0,26	1,18	8,06	10,52	14,64
Tiefbau	72	60	1,44	17,71	18,68	3,56	12,42	23,74	41,15	42,56

Tabelle 30 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Tätigkeiten; F., D., S.: Fassader, Dachdecker, Spengler; H.,K.: Hüttenwirt, Kellner; Lawinenv.: Lawinenverbauer; Seilbahn.: Seilbahnbeschäftigte; S.,T.: Sportler, Trainer; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Tätigkeiten										
TK_ALT	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Bademeister	116	17	0,14	2,33	5,10	0,24	1,22	5,35	24,17	39,76
Bauer	9	0	0,79	1,59	1,96	0,82	1,23	3,01	3,72	3,84
Erntehelfer	191	32	0,05	3,33	4,89	0,10	0,61	8,71	16,49	19,87
F., S., D.	179	93	0,22	10,16	11,16	0,76	5,53	16,01	27,76	38,32
Gärtner	90	17	0,08	3,83	5,51	0,20	1,75	7,63	18,74	25,72
H., K.	118	9	0,07	1,35	3,15	0,09	0,47	3,12	19,22	44,65
Lawinenv.	18	7	0,26	8,02	9,10	0,85	2,30	13,71	23,42	23,46
Müllabfuhr	89	2	0,05	1,45	2,18	0,11	0,62	2,69	7,68	17,28
Seilbahn.	106	24	0,04	4,64	7,01	0,07	1,39	9,62	28,82	38,75
Skilehrer	104	3	0,12	3,75	4,47	1,07	2,42	5,17	12,32	23,36
S., T.	68	12	0,26	5,17	6,06	0,41	2,01	7,81	17,68	24,53
Tiefbau	72	48	1,06	12,82	13,35	2,52	8,98	17,09	28,79	30,65

Tabelle 31 Relative Änderung in % von SED/d zu SED_ideal_median/d+ nach Tätigkeiten; F., D., S.: Fassader, Dachdecker, Spengler; H.,K.: Hüttenwirt, Kellner; Lawinenv.: Lawinenverbauer; Seilbahn.: Seilbahnbeschäftigte; S.,T.: Sportler, Trainer; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Relative Änderung in % von SED/d zu SED_ideal_median/d+ nach Tätigkeiten									
TK_ALT	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Bademeister	0,00	5,58	7,41	6,85	-4,25	9,08	1,10	13,40	14,10
Bauer	0,00	36,63	-17,52	-4,19	26,88	10,78	36,63	-12,63	-12,63
Erntehelfer	-36,00	-22,09	-10,36	-18,52	-25,02	-20,55	-15,10	-20,88	-21,29
F., S., D.	-19,13	-14,58	-25,21	-25,55	8,15	-24,49	-21,94	-26,52	-10,82
Gärtner	0,00	-4,49	-6,40	0,06	-5,87	-7,15	-3,65	5,40	14,05
H., K.	28,57	21,13	-0,48	1,72	2,96	0,71	10,71	-25,68	2,09
Lawinenv.	0,00	-17,52	14,96	14,13	-2,64	-9,73	14,22	31,06	31,06
Müllabfuhr	0,00	-1,77	11,74	1,38	-1,77	16,84	-1,41	-4,29	-7,38
Seilbahn.	-4,00	-41,03	-9,25	1,67	-26,67	-20,42	-2,10	25,90	-3,89
Skilehrer	50,00	107,91	113,73	67,69	101,21	114,11	63,87	31,18	10,85
S., T.	500,00	62,41	22,33	29,20	60,69	71,11	-3,15	68,16	67,52
Tiefbau	-20,00	-26,08	-27,62	-28,54	-29,22	-27,69	-27,99	-30,02	-27,99

Die in der Methodik angesprochene neue 3-stufige hierarchische Klassifizierung (in Arbeit befindlich) findet in Tabelle 32 Verwendung. Die aufgelisteten Tätigkeiten entsprechen der untersten Stufe der Klassifizierung, die exakte Zuordnung der zweiten und dritten Stufe des Klassifikationssystems wird momentan diskutiert. Die wichtigsten deskriptiven Parameter sind eingetragen. Die höchste, nach dem Median gemittelte UVR-Exposition wurde bei Asphaltierern (Md = 21,13), gefolgt von Straßenbauern (Md = 18,21) gemessen. Bei Asphaltierern überschritten 70,56 % der Arbeitstage den Schwellenwert HRD, bei Straßenbauern 91,89 %.

Tabelle 32 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d nach Tätigkeiten NEU; GH = Gewächshaus; AD = Außendienst; GL = Garten- und Landschaftspflege; WLV = Wildbach- und Lawinenverbau; a. = allgemein; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED/d nach Tätigkeiten Neu										
TK_NEU	N	HRD	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Ackerbau a.	104	39	0,06	7,28	8,01	0,42	2,42	12,04	22,08	25,25
Almhütten a.	18	0	0,09	1,79	2,02	0,29	0,92	2,45	5,82	7,60
Anbau im GH a.	43	0	0,06	0,42	0,64	0,07	0,25	0,87	2,40	2,72
Arbeiter im AD	10	0	0,08	5,92	5,61	0,82	4,35	7,19	9,02	9,29
Asphaltierer	17	12	1,44	21,13	18,80	2,76	8,73	25,85	36,05	41,35
Baumschneider	10	0	0,62	2,75	3,26	0,78	2,17	4,24	7,04	7,74
Berghütten a.	25	2	0,07	1,71	3,51	0,14	0,80	3,30	19,94	34,15
Bergrestaurant a.	59	3	0,06	0,72	2,52	0,09	0,25	3,18	10,98	25,82
Bergsteiger	36	0	0,36	7,19	4,86	0,40	1,11	8,12	9,37	9,41
Dacharbeiten	23	11	0,28	9,17	11,51	0,51	2,90	14,16	41,90	42,97
Deponiearbeiter a.	15	0	0,09	0,96	1,42	0,10	0,38	2,33	4,05	4,24
Fassader	31	16	0,26	12,91	12,09	0,31	1,77	17,55	33,11	34,71
Freibad	73	17	0,49	2,91	6,43	0,60	1,51	8,40	23,83	34,85
Gaertner	68	14	0,08	2,47	5,03	0,18	1,00	7,64	19,60	22,55
GL a.	13	2	3,80	4,22	5,51	3,84	3,98	4,84	11,85	12,16
Hochbau a.	39	18	1,51	9,70	12,39	2,45	4,81	14,61	40,29	41,52
Hochseilgarten	21	2	0,25	4,70	5,55	0,43	2,58	8,15	13,73	14,64
Kombibad	43	0	0,13	1,45	1,97	0,15	0,58	2,92	5,70	6,83
Liftwart	24	11	1,54	9,80	11,21	1,72	4,79	14,63	28,22	32,92
Mähboote	23	11	2,29	9,81	9,72	2,61	6,86	11,66	20,51	22,54
Müllaufleger a.	74	2	0,05	1,48	2,29	0,14	0,60	2,73	9,20	18,66
Obstbau a.	20	1	0,29	7,23	5,60	0,30	2,30	8,06	10,00	10,06
Restaurant a.	16	2	0,09	1,05	5,76	0,15	0,52	1,90	37,24	43,74
Schafbauer	9	0	0,58	1,93	2,05	0,64	1,11	2,20	4,26	4,39
Schalungszimmerer	24	21	7,20	18,15	21,21	7,52	13,85	29,11	37,56	38,57
Seilbahnbau	62	49	3,50	16,10	16,94	4,50	11,51	23,10	31,58	32,02
Seilbahnbeschäftigte	62	14	0,06	3,91	6,13	0,12	1,33	9,21	20,71	40,32
Skilehrer	104	2	0,06	1,76	2,67	0,53	1,13	3,16	9,39	21,07
Stationsmitarbeiter	10	0	0,06	0,51	2,53	0,08	0,26	3,63	8,54	8,78
Straßenbau	37	34	1,70	18,21	18,56	3,86	12,47	22,37	34,41	35,06
Tiefbau a.	18	14	4,16	14,60	18,80	6,07	12,76	21,47	41,94	42,56
Trainer a.	11	0	0,16	1,78	2,50	0,19	0,79	4,20	6,05	6,16
WLV	18	7	0,32	6,98	7,97	0,87	2,55	12,01	17,87	17,90

5.5 Jahresexposition

Auf den Abbildungen 59 und 60 ist die UVR-Jahresexposition der Berufsgruppen und Tätigkeiten dargestellt. Zur Berechnung wurden die gewichteten und mediannormierten Werte der Variable SED_ideal_median/d+ verwendet. Weiters wurden die Werte mittels der Arbeitsjahresgewichtung (siehe Formeln 12, 13, 14 und Tabelle 5) berechnet. Median, arithmetischer Mittelwert (orangefarbenes Quadrat) und Länge der Boxplots, sowie die Antennen beschreiben die wichtigsten statistischen Parameter. Die Breite der Boxen entspricht der Anzahl der PE-Messungen. Die rote, gestrichelte Linie gibt den Referenzwert der UVR-Jahresexposition von 300 SED an (DGUV, 2020).

Die durchschnittliche UVR-Jahresexposition überschreitet den Referenzwert von 300 SED, nach dem arithmetischen Mittelwert bei allen Berufsgruppen, nach dem Median bei allen Berufsgruppen außer „weitere mögliche Gruppen“. Die durchschnittliche UVR-Jahresexposition der Berufsgruppe „Bau klassisch“ ist am höchsten (siehe Abbildung 59 und Tabelle 33).



Abbildung 59 UVR-Jahresexposition der Berufsgruppen nach SED_ideal_median/Oy+

In Tabelle 11 sind die wichtigsten deskriptiven, statistischen Determinanten der SED_ideal_median/Oy+ nach Berufsgruppen eingetragen. Die immensen Spannweiten und die großen Interquartilsabstände aller Berufsgruppen sind auffallend. Der Median der UVR-Jahresexposition der Berufsgruppe „Bau klassisch“ überschreitet den Referenzwert 300 SED um 1029,42 SED (Faktor = 4,43). Einzig der Median, der UVR-Jahresexposition, der Berufsgruppe „weitere mögliche Gruppen“ liegt unter dem Referenzwert von 300 SED.

Tabelle 33 Deskriptive Statistik der UVR-Jahresexposition der Berufsgruppen nach SED_ideal_median/Oy+; W.M.G. = Weitere mögliche Gruppen; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED_ideal_median/Oy+ nach Berufsgruppen									
BG_ALT	N	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Alpin	242	5,06	393,90	968,43	11,72	109,80	1198,27	5804,78	9235,72
Bau klassisch	341	13,66	1329,42	1473,90	90,20	661,18	2073,63	3908,20	5137,46
Landwirtschaft	200	7,11	449,64	747,42	15,61	102,32	1307,42	2567,51	3552,63
Sport	288	19,63	607,69	881,53	48,82	298,56	1136,36	3360,91	5686,08
W.M.G.	89	8,78	259,65	389,15	20,02	110,69	481,10	1372,03	3089,47

In Abbildung 60 ist die UVR-Jahresexposition der Tätigkeiten nach SED_ideal_median/Oy+ dargestellt. Die Tätigkeiten „Tiefbau“ und „Fassader, Dachdecker, Spengler“ erfahren die höchste

arbeitsbedingte UVR-Jahresexposition. Der Interquartilsabstand der Tätigkeit „Seilbahnbeschäftigte“ ist auffallen groß.

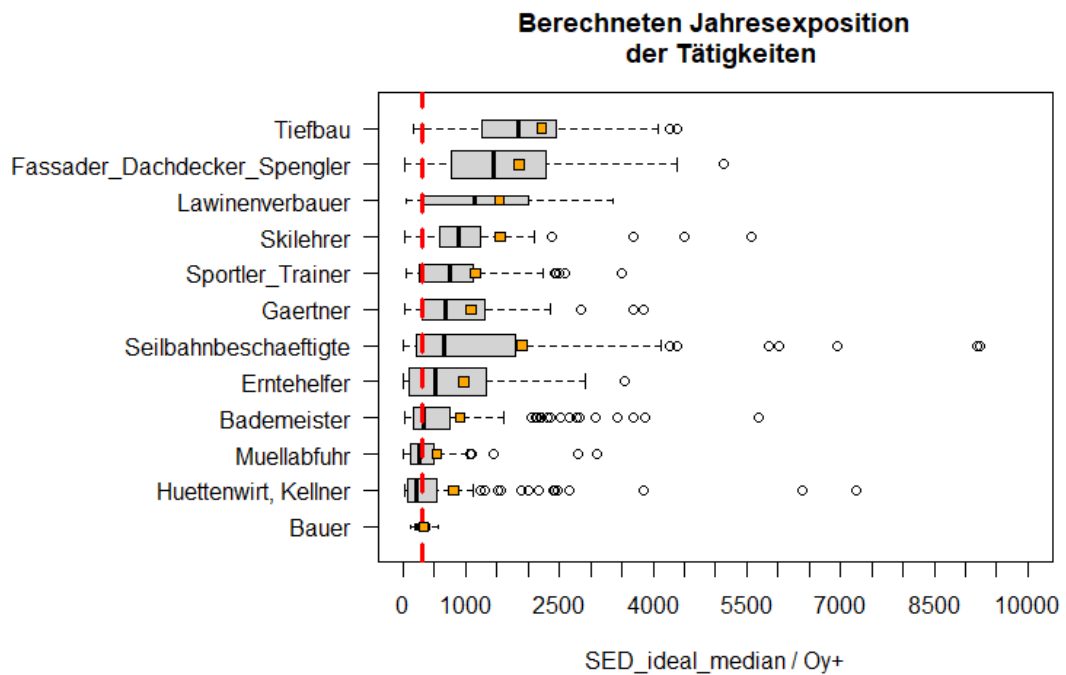


Abbildung 60 UVR-Jahresexposition der Tätigkeiten nach SED_ideal_median/Oy+

Tabelle 11 offenbart, dass der Median, der UVR-Jahresexposition, der Tätigkeiten „Tiefbau“ und „Fassader, Dachdecker, Spengler“, den Referenzwert 300 SED/y um 1533 SED (Faktor = 6,11), beziehungsweise um 1153,33 (Faktor = 4,84) überschreiten. Die Mediane, der UVR-Jahresexposition, der Tätigkeiten „Müllabfuhr“, „Hüttenwirt, Kellner“ und „Bauer“ liegen unter dem Referenzwert von 300 SED.

Tabelle 34 Deskriptive Statistik der UVR-Jahresexposition der Tätigkeiten nach SED_ideal_median/Oy+; F., D., S.: Fassader, Dachdecker, Spengler; H., K.: Hüttenwirt, Kellner; Lawinenv.: Lawinerverbauer; Seilbahn.: Seilbahnbeschäftigte; S., T.: Sportler, Trainer; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Verteilung der SED_ideal_median/Oy+ nach Tätigkeiten									
TK_ALT	N	Min	Median	Mittel	Q2.5	Q25	Q75	Q97.5	Max
Tiefbau	72	152,22	1833,00	1908,49	360,31	1283,68	2444,13	4117,59	4382,64
F., S., D.	179	31,76	1453,53	1593,02	115,52	779,09	2283,32	3969,43	5137,46
Lawinenv.	18	37,74	1146,66	1301,00	120,88	328,83	1960,83	3349,15	3354,73
Skilehrer	104	29,73	894,00	1065,53	254,64	577,91	1233,21	2936,56	5566,39
S., T.	68	37,16	739,11	866,71	59,00	288,13	1116,59	2528,53	3507,11
Gärtner	90	13,66	676,42	889,33	36,47	313,68	1285,45	2733,75	3849,84
Seilbahn.	106	5,06	663,15	1354,20	10,35	198,29	1768,40	6363,41	9235,72
Erntehelfer	191	7,11	513,59	769,41	14,74	98,20	1330,71	2596,20	3552,63
Bademeister	116	19,63	322,11	725,25	32,76	172,76	748,54	3456,61	5686,08
Müllabfuhr	89	8,78	259,65	389,15	20,02	110,69	481,10	1372,03	3089,47
H., K.	118	10,39	212,06	571,16	13,03	69,45	519,89	2748,96	7243,81
Bauer	9	113,32	227,65	280,87	116,84	175,85	429,85	532,26	548,50

Die in der Methodik angesprochene neue 3-stufige hierarchische Klassifizierung (in Arbeit befindlich) findet in Tabelle 35 Verwendung. Die aufgelisteten Berufsgruppen entsprechen der obersten Stufe der Klassifizierung. Die gewichteten und normierten Variablen wurden für die Extrapolation der arbeitsjährlichen (Oy = 220 Tage) UVR-Exposition herangezogen. Auffällig sind die extremen arbeitsjährlichen Unterschiede der UVR-Belastung. Selbst nach der Max-Normierung, die die gewichteten Messwerte an den maximalen UV-Index der gesamten Messreihe (des UV-Indexes) anpasst, ist die jährliche berechnete, maximale UV-Strahlenexposition (SED_ideal_max/Oy+) der Berufsgruppe „Bau“ um 104,93 % höher als jene der Berufsgruppe „Sport und Freizeit“, beide Gruppen beinhalten überwiegend bemessene Probanden, die sich fast ausschließlich im Außenbereich aufhielten. Der (SED_ideal_median/Oy+)-Wert von „Bau“ ist 221,32 % höher als jener von „Landwirtschaft“ und 114,22 % höher als jener von „Garten- und Landschaftspflege“ (große arbeitszeitliche Anteile im ungeschützten Außenbereich). Die Md-Normierung (SED_ideal_median/Oy+) reduziert die ausschließlich gewichteten Median-Werte (SED/Oy+) der neuen Berufsgruppen „Bau“, „Sport und Freizeit“, „Gastronomie“ und „Garten- und Landschaftsgestaltung“ um 8,34 %, 4,70 %, und 1,74 % respektive. Die Median-Werte der neuen Berufsgruppen „Gastronomie“, „Tourismus“, „Landwirtschaft“ und „Abfallwirtschaft“ werden durch analoge Berechnung um 2,10 %, 8,49 %, 0,65 %, und 11,74 % erhöht.

Tabelle 35 Deskriptive Statistik der Jahresexposition der Berufsgruppen NEU nach SED_ideal_max/Oy+, SED_ideal_median/Oy+, und SED/Oy+; SF = Sport und Freizeit; Landw. = Landwirtschaft; GLG = Garten- und Landschaftsgestaltung; Abfallw. = Abfallwirtschaft; Mittel = arithmetischer Mittelwert

Jahresexposition der Berufsgruppen NEU

BG_NEU	SED_ideal_max/Oy+			SED_ideal_median/Oy+			SED/Oy+		
	Q25	Median	Q75	Q25	Median	Q75	Q25	Median	Q75
Bau	958,60	1639,64	2436,25	828,87	1429,62	2108,70	903,94	1559,71	2362,27
SF	365,88	800,08	1562,56	283,19	599,02	1102,88	261,42	628,57	1207,80
Gastronomie	76,55	241,87	722,35	64,11	195,75	479,90	68,40	191,72	517,17
Tourismus	217,30	728,17	2116,77	183,04	612,14	1632,37	179,28	564,22	1238,62
Landw.	107,53	510,28	1390,36	87,64	405,42	1116,27	85,93	402,80	1112,65
GLG	286,28	765,40	1675,00	238,68	634,91	1331,17	251,12	646,16	1307,54
Abfallw.	141,66	322,85	657,51	102,18	239,68	444,09	87,45	214,50	450,45

6 Diskussion

Die Analyse und somit auch die Ergebnisse sind beeinträchtigt von der äußerst rechtsschiefen Verteilung der gemessenen persönlichen UVR-Expositionsdaten und der berechneten abhängigen Variablen. Die Verteilungen der abhängigen Variablen ähneln einer Pareto Verteilung mit vereinzelt bis häufig auftretenden lokalen Minima und Maxima (siehe Abbildungen 36 und 37). Mathematische, statistische Methoden sind deshalb beschränkt (Warsono et al., 2019).

6.1 Implikationen der Messdauer

Die Messdauern der PE-Messungen waren unterschiedlich lang und schlossen manchmal den Sonnenhöchststand des Messtages aus. Systematisch betroffen waren die PE-Messungen der Tätigkeit „Skilehrer“. Die Tätigkeit „Skilehrer“ wurde häufig bemessen, 104 der 1160 (8,97 %), nach dem *Data Culling* verbleibenden Datensätze betreffen „Skilehrer“. Ob die kurzen, oft ausschließlich vormittäglichen Messzeiträume die durchschnittlichen Arbeitszeiten realistisch abbilden, ist zu hinterfragen. Die PE-Messungen fanden Mitte bis Ende März statt, gegen Ende der Skisaison. Das bedeutet, dass deutlich weniger Urlauber das Angebot der Skischulen nutzen. Der Umstand, der zu kurzen Messdauer der Skilehrer wurde während der Wintermesskampagne bewusst und mit den Skilehrern besprochen. Auf Anfrage, ob derart kurze Arbeitszeiten gewöhnlich sind, waren sie geteilter Meinung. Die schlechte Schneelage während der Messungen könnte ebenfalls Einfluss auf die Dauer der durchschnittlichen Messzeiten haben und beeinflusst in jedem Falle die Strahlungsverhältnisse im Strahlungsraum (Albedo) der Messungen.

Während der Wintermesskampagne wurden 189 PE-Messungen durchgeführt, nach dem *Data Culling* verbleiben 172. Von diesen 172 wurden 104 PE-Messungen bei Skilehrern an der Körperstelle Brust durchgeführt, 3-mal wurde simultan die Körperstelle Rücken bemessen, die drei Rückenmessungen wurden ausgeschlossen, da jeder Proband an einem Tag nur mit einer Messung in den Daten vertreten sein soll, um konstant zu bleiben. Die Körperstelle der Messung Brust wurde nur im Winter gewählt, da Winterbekleidung den Nacken (fast) vollständig bedeckt und die UVR-Exposition auf das Gesicht beschränkt ist. Im Gesicht sind die PSF-Dosimeter schlecht anzubringen und/oder werden ungern von den Probanden getragen. Als Proxy fungiert die Körperstelle Brust (ähnlicher Winkel). PE-Messungen der Skilehrer fanden nur im Winter statt. Die Tätigkeit Skilehrer hat großen **statistischen Einfluss** auf die erklärenden Variablen „Körperstelle der Messung“ (Übergewicht in Kategorie: **Brust**), Messmonat (Übergewicht in Kategorie „**März23**“) und Jahreszeit (Übergewicht in Kategorie **Winter**).

Die Gewichtung auf den typisch 8-Stunden Arbeitstag (SED/d+) kann den Verlust, oder die nur partielle Integration der Strahlungsverhältnisse, bei PE-Messungen, die die **4 Stunden um den wahren Mittag** nicht oder teilweise beinhalten, besonders an sonnigen Tagen, nicht ausgleichen (Diffey, 2002; Podesser, 2007; Stieglitz & Heinzl, 2012; Siani et al., 2014). Da die Gewichtung nur vom realen PE-Messwert (SED/d) abhängig ist. Die Mediannormierung und die Maximalnormierung basieren auf SED/d+ und sind stark von dem tatsächlichen PE-Messwert

(SED/d) abhängig. Die Berechnung der jährlichen und arbeitsjährlichen Strahlenexposition hat gezeigt, dass die normierten Variablen, bei der derzeitigen dürftigen Datenlage der PE-Messungen vieler Berufsgruppen und Tätigkeit, sowie der mangelhaften Vergleichswerte der ambienten Bestrahlung (UV-Index) unzulänglich sind.

6.2 Implikationen der Pause

Die Messdauer beinhaltet die Pausendauer. Pausenlänge und Uhrzeit der Pausen variieren von Tätigkeit zu Tätigkeit. Außerdem verbringen viele Probanden ihre Pausen in Räumen mit völlig **anderen Strahlungsverhältnissen** als jenen während der Arbeitszeit. Daten bezüglich Pausenlänge und Uhrzeit der Pausen, sowie Daten der Beschattungsverhältnisse, während der Pausen wurden unzureichend aufgenommen und/oder parametrisiert, das beeinflusst besonders die Variable Messdauer, in geringerem Maß die Variable Beschattungsindex, da die erwähnten Gegebenheiten nicht berücksichtigt wurden.

Implikationen des Messmonats August 2022. Im August 2022 wurden sehr hohe UV-Strahlenexpositionen gemessen, der Anteil der HRD an allen, im August 2022 durchgeführten PE-Messungen betrug 37,09 %. Der August-Median der Variable SED/d beträgt **6,9 SED/d**, der Wert des dritten Quartils ist **14 SED/d**. Das sind beängstigend hohe Werte und Maßzahlen. Schmalwieser et al. (2021) und die ICNIRP (2004) benennen das UVR-Expositionslimit mit 1 -1,3 SED pro Tag. Serrano et al. (2013) ermittelten ähnlich hohe SED/d Werte (Median = 6,11 SED/d), bei einer Studie die Bauarbeiter, im Juli 2010 in Valencia, Spanien, 5 Tage lang bemaß. Um 13 % höhere Werte in Österreich, über diverse Berufsgruppen und Tätigkeiten zu messen ist bemerkenswert. Die Majorität der August-Messungen 2022 fand in Tirol und Kärnten (hoch gelegene Regionen) statt, das mach die extremen PE-Werte plausibel. Andererseits überprägt die geographische Verteilung die Variable Messmonat. Bei einer zukünftig angestrebten Modellbildung müssen derartige **Interferenzen** beachtet werden.

6.3 Die Implikationen der statistischen Tests und Modellrechnungen

Die extreme rechtsschiefe Verteilung der PE-Messwerte, sowie der gewichteten und normierten PE-Werte erschweren es einfache statistische Modelle zu erstellen. Intensive Befassung mit der Datenverteilung und Datenstruktur der abhängigen Variablen, sowie detaillierte Befassungen mit den aufgenommenen erklärenden Variablen, ist notwendig, um durch begründete und methodisch korrekte Datenmanipulation und Kombination von Variablen passende, brauchbare,

aber nachvollziehbare, reproduzierbare Modelle zu entwickeln. Dieser Balanceakt liegt jeder anspruchsvollen statistischen Auseinandersetzung zugrunde.

Da der **Beschattungsindex** rein auf Beobachtung und Expertenwissen beruht, konnte nicht davon ausgegangen werden, dass er die vier abhängigen Variablen dermaßen gut beschreibt. Die, mit der erklärenden Variable Beschattungsindex, berechneten linearen Regressionsmodelle könnten potenziell auf einen interessanten Zusammenhang hindeuten. Betrachtet man den **Erklärungsgehalt (R^2)**, der linearen Regressionsmodelle, der vier grundlegenden, abhängigen Variablen nach Beschattungsindex, ist eine **Abnahme nach Gewichtung und Normierung** der PE-Messdaten zu erkennen. SED/d+ entfernt den Einfluss der Messdauer als den Daten, dennoch besitzt das Im von SED/d den höheren Erklärungsgehalt. Möglicherweise besteht ein gewisser **Zusammenhang zwischen Arbeitszeit und Beschattung**. Potenziell könnten Berufe mit langen Arbeitszeiten höher UVR-exponiert sein als Berufe, in denen kürzere Arbeitszeiten üblich sind. Dieses potenzielle Verhältnis müsste mit größeren Datensätzen von SED/d und SED/d+ überprüft werden. Mittels **log10-Transformation** von SED/d konnte der Erklärungsgehalt der Variable Beschattungsindex auf **19,46 %** gesteigert werden. Ein schwach-positiver Zusammenhang konnte nachgewiesen werden. Log10-Transformation rechtsschiefer Daten wirkt ausgleichen auf die Standardabweichung, so können lineare Regressionsmodelle die Verteilung der zu erklärenden Datenpunkte besser erklären (Curran-Everett, 2018). Der vergleichsweise hohe Erklärungsgehalt der subjektiv, mittels Expertenwissens, erstellten Variable Beschattungsindex ist erstaunlich. Keine andere analysierte Variable verrät so viel über die UVR-Expositionsmesswerte wie BSI. Bei Folgemessungen sollte die Beschattung quantifiziert werden. Mittels Kamera könnten Bilder oder Videos aufgenommen werden und von AI (*artificial intelligence*) ausgewertet und der BSI besser quantifiziert werden (Biljecki & Ito, 2021).

Die Bestimmtheitsmaße (R^2) der linearen Regressionsmodelle der vier abhängigen Variablen und der erklärenden Variable **Seehöhe** sind sehr gering, aber die p-Werte des F-Tests sind $< 0,05$. So konnte mittels der Formel des linearen Regressionsmodells (SED/d+ = $5,6243388 + 0,0010657 * \text{Seehöhe}$) der erklärenden Variable **Seehöhe** und der abhängigen Variable **SED/d+** ein Höheneffekt (**12,87 %/ 1000 m**) berechnet werden, welcher gute Übereinstimmung zu den berechneten Höheneffekten, im Alpenraum, von Blumthaler et al. (1996) und Schmucki & Philippona (2002) zeigt. Die Berechnung des Höheneffekts verlangt nach Daten, die mit gleichen Messgeräten aufgenommen wurden, nach zeitlicher Übereinstimmung (simultane Messungen, gleich lange Messungen) der Messdaten und nach möglichst geringer horizontaler Distanz, zwischen den Messstellen (Blumthaler et al., 1996). Die verwendeten Messgeräte sind PSF-Dosimeter, derselben Charge und gleichen sich somit. Durch die

Verwendung der Variable SED/d+ ist die Dauer der Messungen ausgeglichen (quasi-gleich lange Messungen). Da modellierte Daten zur Berechnung des Höheneffekts (siehe Formel 15) verwendet wurden, sind Messzeitpunkt und Messort quasi-gleich. Die Variable SED/d+ schien am geeignetsten, da sie die SED/d ausschließlich zeitlich gewichtet und so repräsentativer für die seehöhenabhängigen Unterschiede der erythemalen UV-Bestrahlung ist als die Variablen SED_ideal_median/d+ und SED_ideal_max/d+, die durch Normierungen mit verschiedenen hoch gelegenen UVR-Messstationen bereits einen gewissen Höheneffekt beinhalten. Es ist fraglich, ob die Verwendung der, durch das lineare Regressionsmodell, errechneten Formel, bei einer gewissen gegenseitigen Abhängigkeit der Variablen SED/d+ und Seehöhe legitim ist. Die Legitimität der hier vorgestellten Methode, zur Berechnung des Höheneffekts, ist fraglich. Der Erfolg der Methode beruht wohl auf der Datenmenge, muss aber in jedem Fall durch Folgemessungen und Vergleichsmessungen mit höherwertigen Radiometern bestätigt werden.

Die kategoriale Variable „**Körperstelle der Messung**“ liefert geringen Erklärungsgehalt und lässt sich schwerer ordinalisieren (Ordinalisierung und Quantifizierung ist mit Referenzdaten möglich) (Vernez et al., 2012; Schmalwieser, 2020). Dennoch konnte festgestellt werden, dass die PE-Werte der Kategorie „Brust“ eine **andere Distribution** aufweisen als jene PE-Werte der gesamten Datenbasis, selbst nach Gewichtung und Mediannormierung. Das kann als Hinweis auf die **körperstellenabhängigkeitliche UVR-Exposition** von Personen sein (Vernez et al., 2012; GMBL, 2013; Schmalwieser, 2020; IFA, 2021).

Die statistischen Tests der erklärenden Variable Region zeigen einerseits, dass ein **signifikanter Unterschied** bezüglich der **zentralen Tendenz**, der jeweiligen gemessenen PE-Werte, in den Regionen **Ost- und West-Österreich** besteht, und andererseits, dass die **Distribution** der gemessenen PE-Werte beider Regionen sich von der Distribution der PE-Werte der gesamten Datenbasis abheben. Das sind deutliche Hinweise auf die **verschiedenartigen Strahlungsfelder** in Österreich (Dirnhirn, 1964). West-Österreich liegt deutlich höher als Ost-Österreich, die optische Luftmasse nimmt mit der Zunahme der Seehöhe ab, die statistische Analyse, der Variable Region impliziert diesen Sachverhalt, da der Unterschied der geographischen Breite unbedeutend ist und die Expositionsverhältnisse durch die große Anzahl an PE-Messungen in beiden Regionen ausgleichen werden. Die vergleichsweise große Anzahl von PE-Messungen an Bauarbeiter in West-Österreich, könnte ein überprägender Faktor, für die durchschnittlich höheren PE-Messwerte sein (DGUV, 2020). Die **wechselseitigen Abhängigkeiten** der Variablen Tätigkeit, Seehöhe und Region konnten in der Analyse und den Ergebnissen aufgezeigt, aber nicht vollends erklärt werden.

Der, durch die **niedrigen p-Werte der F-Tests**, implizierte signifikante Erklärungsbeitrag der Im-BSI-Modelle und der anderen berechneten linearen Regressionsmodelle sollte nicht überschätzt werden, da die Anzahl der Freiheitsgrade sehr groß ist. Der Standardfehler der Regression, des lineares Regressionsmodell-BSI von (SED/d) ist 1,307. Bei einem 5-stufigen Index ist das ein zu hoher Wert, um von hoher Anpassungsgüte des linearen Regressionsmodells zu sprechen. Bei **über 1000 Freiheitsgraden** sind lineare Regressionsmodelle praktisch immer statistisch signifikant. Aufgrund der **extrem rechtsschiefen Verteilung** aller abhängigen Variablen wurde nicht erwartet, viele brauchbare lineare Regressionsmodelle (ohne immense Datenmanipulation) zu erstellen, die Erklärungsgehalte waren trotzdem von Interesse.

6.4 Implikationen der Gewichtung und Normierung

Die berechneten normierten und/oder gewichteten Variablen $SED/d+$; $SED_ideal_median/d+$ und $SED_ideal_max/d+$ sollen die Daten vergleichbarer machen und beinhalten teilweise Quasi-Daten der ambienten Bestrahlung. Die Daten der Jahres-UVR-Exposition konnten durch $SED_ideal_median/d+$ und $SED_ideal_max/d+$ etwas verbessert werden, die Unterschiede der Jahresexpositionen von vergleichbar lang UVR-Exponierten Berufsgruppen und Tätigkeiten scheint dennoch zu hoch. Durch Normierung konnten **marginale Verbesserungen des Erklärungsgehalts**, bezüglich der erklärenden Variablen Seehöhe und Region, erreicht werden. Die normierten Variablen sind zu abhängig von der realen Exposition, sie können daher nicht guten Gewissens für die Berechnung von ERTA verwendet werden. Die Maximalnormierung basiert auf einem linearen Verhältnis von gewichteter UVR-Exposition und der theoretischen maximalen Bestrahlung, möglicherweise biete eine andere Modellrechnung bessere Eigenschaften, um maximalnormierte Werte zu berechnen. Die Berechnung der Mediannormierung und Maximalnormierung und die Wahl des UV-Indexes als Referenzwert der ambienten Bestrahlung sollten überdacht werden. Es wäre ratsam, **Messungen der ambienten Bestrahlung** durchzuführen, um aussagekräftige ERTA berechnen zu können. So würden Extrapolationen deutlich mehr Aussagekraft erhalten und das berufsbedingte Risiko an MAK und SSC könnte besser eingeschätzt werden.

6.5 Implikationen der Stichprobengröße

Es gestaltete sich als schwierig, eine statistisch ausreichende Stichprobengröße aller, in der alte Klassifikation, enthaltenen Tätigkeiten zu erreichen. Die feingliedrige neue, in Arbeit befindliche

Klassifizierung erhöht das **statistische Problem** der **unzureichenden Stichprobengröße**. Viele Tätigkeiten sind unzureichend bemessen und erfasst. Um repräsentative Daten für alle neu bestimmten Tätigkeiten zu generieren, muss der Messaufwand deutlich gesteigert werden oder der Messaufbau und Messablauf in einem Maße vereinfacht werden, dass er problemlos und zeitsparend von forschungsunerfahrenen, wissenschaftsuninteressierten oder gar wissenschaftsskeptischen Probanden akzeptiert wird und durchgeführt werden kann. Es wäre ratsam, sozial- und humanwissenschaftliche Aspekte in die Forschungsplanung miteinzubeziehen. Die inhärente Interdisziplinarität der Geographie kann dabei behilflich sein.

6.6 Beantwortung der Forschungsfragen

Persönliche UVR-Exposition. Diese Studie ermittelte, bei 1160 Einzelmessungen der persönlichen erythemgewichteten UVR-Exposition, eine durchschnittliche *personal exposure* (PE) von **3,72 SED** pro Tag nach dem Median, und **7,13 SED** pro Tag nach dem arithmetischen Mittelwert. Auf den typischen 8-Stunden Arbeitstag gewichtet ist die durchschnittliche PE **3,94 SED** pro Tag nach dem Median, und **6,53 SED** pro Tag nach dem arithmetischen Mittelwert. Bei 341 Einzelmessungen der persönlichen erythemgewichteten UVR-Exposition der Berufsgruppe „**Bau klassisch**“, ist die durchschnittliche PE **11,69 SED** pro Tag nach dem Median, und **13,26 SED** pro Tag nach dem arithmetischen Mittelwert. Bei 179 Einzelmessungen der persönlichen erythemgewichteten UVR-Exposition der Tätigkeit „Fassader, Dachdecker, Spengler“ ist die durchschnittliche PE **13,59 SED** pro Tag nach dem Median, und **14,98 SED** pro Tag nach dem arithmetischen Mittelwert. Schmalwieser et al. (2010) ermittelten vergleichbare Höchstwerte bei österreichischen Bauern, gemessen mit elektronischen Dosimetern, auf der Stirn, im Sommer. Siani et al. (2011) ermittelten, am 22. April 2005 einen, bei Feldarbeitern am Nacken gemessenen, Medianwert von 14,5 SED/d, mit PSF-Dosimetern. Milon et al. (2007) ermittelten die PE von Bauarbeitern auf drei Höhenstufen, im Gebirge, anhand von persönlichen Sporen-Dosimetermessungen und berichten von einem arithmetischen Mittelwert von 11,9 SED/d auf 500 m, 21,4 SED/d auf 1500 m, und 28,6 SED/d auf 2500 m.

Forschungsfrage 1 Wie hoch ist die erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter?

Somit kann festgehalten werden, dass die durchschnittliche erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter den Schwellenwert **HRD** von **10 SED/d** nicht überschreitet. **H1 muss verworfen werden.** Nur die durchschnittliche PE

kleinerer Untergruppen (e.g., „Bau klassisch“, „Fassader, Dachdecker, Spengler“) überschreiten den Schwellenwert HRD.

Höheneffekt. Der Höheneffekt der erythemgewichteten UVR-Exposition, bei 1160 Einzelmessungen, konnte, mithilfe des linearen Regressionsmodells der Variablen SED/+ und Seehöhe, berechnet werden und beträgt **12,87%/1000 m**. Blumthaler et al. (1997) berechneten 16-20 %/1000 m, Schmuki & Philipona (2002) 8–16%/ 1000 m, im Alpenraum. Die WHO (2016) gibt einen Referenzwert von 10–12%/1000 m an.

Forschungsfrage 2 Welchen Einfluss hat der Höheneffekt auf die erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter?

Es kann festgehalten werden, dass der Höheneffekt einen Einfluss auf die erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter hat. Der Höheneffekt ist **12,87 %/1000 m, H2 kann angenommen werden**. Der in dieser Studie gefundene Höheneffekt zeigt exzellente Übereinstimmung mit den angeführten Referenzwerten. Die, zur Berechnung des Höheneffekts, verwendeten Daten sowie die angewandte Methode entsprechen nicht den etablierten Schemata.

Beschattung. Die Beschattung hat mehrere Facetten. In gebirgigen Regionen verändert das Relief das Verhältnis von direkter und diffuser Bestrahlung, das ist durch Messungen bestätigt (Podesser, 2007; Schmalwieser, 2020). Schattenspendende Strukturen halten direkte Strahlung besser ab als diffuse (Schmalwieser, 2020). Die Quantifizierung der Beschattung, der erythemalen UV-Bestrahlung, ist ein **vernachlässigtes Thema**, Sacri-Bosanac et al. (2019) zeigten, dass die Beschattung durch ein dichtes Blätterdach von Bäumen effektiver ist als Beschattung durch Sonnenschirme. Bigelbach et al. (o.J.) beschäftigen sich zurzeit mit der UVR-expositionsbedingtem Erythem von felllosen Schweinen und der Wirkung von schattenspendenden Tüchern. Die in der Fachliteratur auffindbaren Zahlen, der UV-Bestrahlungsverminderung durch Beschattung, sind meist impliziert durch PE-Messungen und nicht eigentliches Ziel der Forschung (Siani et al., 2011; Schmalwieser et al., 2021). Die Spannweite, der publizierten Werte des Beschattungseffekts ist deshalb groß, sie reichen von **30 % bis 95 %** Verminderung der UVR-Exposition (Gies et al., 1995; Narayanan et al., 2010; Milon et al., 2013).

Forschungsfrage 3 Welchen Einfluss hat die Beschattung des Arbeitsplatzes (Messort) auf die erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter?

Mittels des, auf Beobachtung und Expertenwissen basierenden, Beschattungsindex (BSI) konnte ein **Zusammenhang** zwischen Beschattung und erythemgewichteter UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter hergestellt werden. Das Verhältnis ist **stetig**, ein höherer Beschattungsgrad des BSI führt zu durchschnittlich kleinerer PE der Probanden. **H3 muss verworfen werden**. Der auf dem BSI basierende Beschattungsgrad hat einen Einfluss auf die durchschnittliche, erythemgewichtete UV-Strahlenexposition der untersuchten, österreichischen Außenarbeiter.

6.7 Limitationen verwendeter Messgeräte

Polysulfonfilm-Dosimeter (PSF-Dosimeter) bildeten das Fundament der UVR-Expositionsmessungen der österreichischen Arbeiterschaft. PSF-Dosimeter sind probate und erprobte Messinstrumente zur Generierung von PE-Messdaten (Davis et al., 1976; Challoner et al., 1976; Siani et al., 2011; Larkö & Diffey, 1983; Siani et al., 2011; Diffey, 2020; Schmalwieser, 2020; Schmalwieser et al., 2021). Dennoch sind Limitation der PSF-Dosimeter zu beachten.

Die elektronischen Dosimeter der Baureihe X-2000 (elektronische Dosimeter mit Datenlogger), der Gigahertz Optik GmbH, sollten die ambiente Bestrahlung aufnehmen und episodisch dazu dienen, zeitlich hochaufgelöste PE-Messungen durchzuführen. Generell sind diese elektronischen Breitband-Dosimeter gut geeignet, um beide angesprochene Messungen durchzuführen (Cockell et al. 2008; Schmalwieser et al., 2010; Siani et al., 2011). Während der Feldmessungen und der Bearbeitung wurden Limitationen festgestellt.

- (i) Das inhärente Problem von PSF-Dosimetern ist, dass sie nur absolute oder bestenfalls semi-quantitative Messwerte generieren können (Diffey 2020; Schmalwieser et al., 2021). Um mit PSF-Dosimetern eine zeitliche Auflösung zu erreichen und sie als Datengrundlage für ambiente Bestrahlungsreferenz nutzen zu können, um die ERTA zu bestimmen, sollte ein Protokoll befolgt werden, wie es Siani et al. (2011) durchgeführt haben. Sie nutzten zwei, auf dasselbe biologische Wirkungsspektrum kalibrierte, elektronische Breitbandradiometer als Referenz der ambienten Bestrahlung am Messort, zusätzlich legten sie horizontal mehrere PSF-Dosimeter aus, die zu bestimmten Zeiten wieder entfernt wurden, um eine zeitlich aufgelöste Kalibrationskurve der PSF-Dosimeter, angepasst an die Messwerte der elektronischen Breitbandradiometer zu generieren. Somit konnten die Daten der gleichzeitig stattfindenden PE-Messungen (mit PSF-Dosimetern) in ein Verhältnis gesetzt werden und die ERTA berechnet werden. Weiters sollten die PSF-Dosimeter

genau kalibriert sein und die Messergebnisse mit gleich gewichteten Ergebnissen exakterer Bestahlungsmessgeräte abgeglichen werden (Siani et al., 2014; Diffey, 2020; Strehl et al., 2021). Derartig ausgereifte Messaufbauten waren aus zeitlichen, logistischen und finanziellen Gründen bei den UVR-Expositionsmessungen im Rahmen des Projektes „SEDiment“ nicht möglich.

- (ii) Strehl et al. (2021) fanden, dass PSF-Dosimeter die erythemgewichtete UVR-Exposition, bei normalem und annähernd normalem Einfallswinkel der Strahlung, im Vergleich zu ausgereifteren Bestahlungsmessgeräten um 30 % überschätzen. Diese Erkenntnis fand keinen Eingang in die Methode dieser Studie.
- (iii) Da PSF-Dosimeter zum Schutz in Gehäusen verbaut sind, können flach einfallende Strahlen nicht detektiert werden (siehe Abbildungen 32 und 34). Flach einfallende Strahlung trägt nur geringfügig zur Gesamtexposition der Haut bei (Strehl et al., 2021).
- (iv) Um unverfälschte Messergebnisse zu erzielen, sollte der im Dosimeter verbaute Polysulfonfilm nicht berührt oder beeinträchtigt werden. Verschmutzung kann den Wert der Messung verringern, Schweißtropfen können wie eine Lupe wirken und dazu führen, dass die tatsächliche UVR-Exposition überschätzt wird (Wolf et al., 2019).
- (v) Die Polysulfonfilme dürfen nicht nass werden, einerseits verfälscht Wasser auf dem Film das Messergebnis, andererseits zerfällt der, den Polysulfonfilm umgebende, Kartonrand durch übermäßige Durchnässung. Somit sind UVR-Expositionsmessungen bei Schlechtwetter nicht möglich.
- (vi) Die bei den Feldmessungen verwendeten elektronischen Dosimeter der Baureihe X-2000 (X2000-3, X-2000-4 und X-2000-5) sind veraltet und wurden lange nicht mehr kalibriert. Das erschwerte die Handhabung (veraltete Software) und machte die Daten für diese Studie unbrauchbar.
- (vii) Bei den Feldmessungen traten bei allen verwendeten elektronischen Dosimetern der Baureihe X-2000 Probleme auf, die nie vollends behoben werden konnten. Zeitweise starteten die Dosimeter die Messung nicht, manchmal setzte die Messung grundlos aus. Jegliche verfügbare Programmierfunktion wurden ausgetestet, ohne dem Problem Herr zu werden. Ob die X-2000 Messgeräte Daten aufnehmen, kann während der Messung nicht erörtert werden, erst nach Beendigung der Messung kann der Datensatz begutachtet werden.

6.8 Statistische Limitationen der Datengrundlage

- (i) Für jeden Arbeitsplatz (Messstandort) liegt ein Wert der Seehöhe vor. Die Punktdarstellung der Variable Seehöhe limitiert die Aussagekraft der persönlichen UVR-Messungen. Zur Auswertung jedes einzelnen PSF-Dosimeters benötigte Peter Knuschke eine konkrete Höhenangabe. PSF-Messungen von Arbeitsplätzen mit großer Höhendifferenz sind dadurch teilweise verfälscht.
- (ii) Die Variablen der geographischen Lage des Messorts und der zugehörigen Seehöhe beschreiben einen Punkt. Bei Arbeitsplätzen mit großer räumlicher Ausdehnung limitiert dieser Umstand die Aussagekraft der erklärenden Variablen Seehöhe und Höhenstufe. Besonders betroffen sind die Berufsgruppe „Alpin“, wegen der Tätigkeiten „Seilbahnbeschäftigte“ und „Lawinverbauer“ und „Sport“, wegen der Tätigkeiten „Skilehrer“ und „Sportler, Trainer“. Es wurde stets versucht, den Hauptaufenthaltort der Probanden zu bestimmen. Bei Skigebieten mit großer Höhendifferenz, wie dem Stubaier Gletscher, an dem Skilehrer und Seilbahnbeschäftigte bemessen wurden, ist das nicht möglich.
- (iii) Die extrem rechtsschiefe Verteilung der PE-Messwerte (SED/d), sowie der daraus berechneten Variablen (SED/d+; SED_ideal_median/d+; SED_ideal_max/d+), beschränkt die Auswahl statischer Parameter, Verteilungsanpassungen und Analysemethoden. Schmalwieser et al. (2021) empfehlen deshalb, sich bei der Analyse von persönlichen UVR-Expositionsdaten auf deskriptive statistische Methoden zu beschränken.
- (iv) Die extrem rechtsschiefe Verteilung der abhängigen Variablen erschwert es, robuste Gesetzmäßigkeiten mittels Modellrechnungen anzustellen. Ohne exakte Kenntnis aller, permanent überwachter Messparameter einer jeden PE-Messung ist es nicht legitim, unpassende, dem Modell nicht folgende, Werte auszuschließen. Selbst der Ausschluss der PE-Messwerte $\leq 0,05$ SED/d ist gewagt. Es ist durchaus möglich, dass sich ein Proband an einem Messtag, mit geringer ambienter UV-Bestrahlung, überwiegend im Schatten einer Struktur und im Inneren einer Maschine aufhielt. Ein PE-Messwert $\leq 0,05$ SED/d wäre dadurch plausibel und sollte in die Analyse miteinfließen. Es ist ebenso gewagt kategorisch PE-Messwerte ≥ 45 SED/d auszuschließen. Der Schwellenwert richtet sich nach der maximal möglichen (ambienten) Globalbestrahlung des Strahlungsraums Österreichs (einschließlich der alpinen Zone), im Sommer. Bestimmte Körperhaltung (exponierte Körperstelle der Messung steht (fast) normal zum direkten Strahl der Sonne) und spezifische,

kleinräumige Strahlungsverhältnisse (e.g., große Menge reflektierter Strahlung, einfallend auf die exponierte Körperstelle der Messung) können dazu führen, dass die PE die ERTA übersteigt. Milon et al. (2007) maßen eine maximale PE-Dosis, bei Bauarbeiter, in der alpinen Höhenstufe, in der Südschweiz, während eines Arbeitstages, von 91,1 SED oder ~200 % der ERTA.

- (v) Kleine Messwerte dominieren jegliche größere Gruppe von Messwerten, nur durch gezielte Auswahl sehr spezifischer, kleiner *Subsets* kann die starke Rechtsschiefe, der Datenpunkte, der abhängigen Variablen verringert werden. Die so entstehenden kleinen „Stichproben“ besitzen in jedem Fall geringe Aussagekraft, selbst bei theoretisch robusten Regressionszusammenhängen, da Stichprobenverzerrung (*selection bias*) betrieben wird und die Stichprobe zu klein ist.
- (vi) Die Parametrisierung mancher erklärenden Variablen basierte rein auf Beobachtung und Expertenwissen. Dennoch besitzt die Variable BSI vergleichsweise hohen Erklärungsgehalt.
- (vii) Die Gruppengrößen vieler Kategorien, erklärender kategorialer und ordinaler Variablen sind sehr unterschiedlich. Der tatsächliche Erklärungsgehalt von statistischen Analyseverfahren leidet darunter, selbst wenn statistische Tests das Gegenteil behaupten (Faber & Fonseca, 2014).
- (viii) Aufgenommene, kontinuierliche, erklärende Variablen (Seehöhe) zeigen teilweise Symptome von *selection bias*. Der Erklärungsgehalt verringert sich dadurch.
- (ix) Durch die Analyse konnte kaum bestimmt werden, ob die oftmalige Aufnahme oder Bemessung derselben kategorialen, ordinalen und kontinuierlichen Variablen *Noise* in den Kategorien vergrößert oder verkleinert. In jedem Fall ist die *Noise* in den Daten zu groß. Exaktere Messungen, bessere Methoden, methodischere Arbeit und fachliche sowie statistische Fortbildung ist auf allen, die Studie betreffenden Gebieten notwendig.
- (x) Die Wahl des UVI als Proxy-Variable der ambienten Bestrahlung ist, aufgrund der anderen Berechnung und Bewertung der UVR-Exposition, im Vergleich zu den PE-Messungen, zu hinterfragen. Außerdem lagen einige Referenzmessstation zu weit von den PE-Messungen entfernt, um die kleinräumig diversen Strahlungsräume in Österreich korrekt zu approximieren (Dirnhirn, 1964).

6.9 Limitationen der Methode

Die Bewertung der UVR-Exposition, und der darauf aufbauenden Bewertung des NMSC-Risikos, der österreichischen Arbeiterschaft verlangt, mit den derzeit zur Verfügung stehenden Mitteln, nach Fortentwicklungen und Korrekturen.

- (i) Eine Standardisierung, bei gleichzeitiger Erweiterung des Messaufbaus, ist wünschenswert. Es ist derzeit schwierig und zeitaufwendig, mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten exakte Messdaten der persönlichen UVR-Exposition und der ambienten Bestrahlung zu generieren.
- (ii) Der Ablauf der Messungen sollte überdacht werden. Im Laufe des Projekts „SEDiment“ wurden auf Drängen der Forschenden Verbesserungen durchgesetzt. Trotzdem bestehen weiterhin Schwachstellen, die grob gesagt als Personalmangel bezeichnet werden können. Anfänglich war geplant pro Woche bei 10 Betrieben (Arbeitsplätzen) Messungen durchzuführen, ergo 240 PE-Messungen (3 Messungen pro Probanden * 8 Probanden pro Betrieb * 10 Betrieben) pro Woche umzusetzen. Zusätzlich musste eine ganze Reihe von Sekundärvariablen aufgenommen werden und die Arbeitsplätze dokumentiert werden. Weiters fallen organisatorische und logistische Arbeiten parallel dazu an. Die Koordinierung mit den Verantwortlichen, bei denen die Messungen durchgeführt werden, das Finden von Betrieben, bei denen zukünftige Messungen stattfinden können, die Vorbereitung der Messgeräte für zukünftige Messreihen und die Nachbereitung der Messgeräte vergangener Messreihen. Das Übermaß an durchzuführenden Messungen und sekundären Aufgaben benachteiligt die Observation, darunter leidet die Datenqualität.
- (iii) Die beiden bisher angesprochenen Limitationen der Methode bedingen eine Dritte. Die Aufnahme von exakten Daten der ambienten Bestrahlung. Fanden viel Messreihen gleichzeitig statt war es unmöglich an allen Messorten ambiente Bestrahlungsdaten aufzunehmen, da vielfach Arbeitstage gleichzeitig beginnen und enden und 2 Menschen nicht überall gleichzeitig sein können.
- (iv) Von Seiten der AUVA wurden, für die Aufnahme der ambienten Bestrahlung, 3 Messgeräte (diverse X-2000 Modelle) zur Verfügung gestellt. Bei vielen parallel stattfindenden Messungen sind das zu wenige.
- (v) Die Messungen der ambienten Bestrahlung, während der Wintermesskampagne, offenbarten eine weitere Limitation. Bei weiträumigen, großen Höhengradienten aufweisenden Arbeitsplätzen (Messorten) ist eine punktuelle Messstelle der ambienten Bestrahlung unzureichend. Selbst zu zweit ist es praktisch unmöglich, die

weit verteilten, zur ambienten Bestahlungsmessung, ausgelegten Messgeräte zeitgerecht einzusammeln (Siani et al., 2011).

- (vi) Nicht aufgenommen erklärende Variablen verringern den Erklärungsgehalt der UVR-Expositionsmessungen. Schmalwieser et al. (2010) maßen die PE von österreichischen Bauern, während einer Langzeitstudie von April bis Oktober 2010. Frauen erhielten ungefähr doppelt so hohe UVR-Expositionsdosen wie Männer. Das Geschlecht der Probanden wurde nicht aufgenommen. Weiters waren nur sehr wenige Probanden Frauen, eine bessere Geschlechterparität sollte bei Folgestudien ein Ziel sein.
- (vii) Die unzureichende Aufnahme von erklärenden Parametern muss als Limitation angesehen werden. Daten zu typischer Körperhaltung, Bekleidung und Sonnenschutzmaßnahmen liegen entweder lückenhaft vor, oder wurden nicht ausreichend parametrisiert.

7 Schlussfolgerungen

Polysulfonfilm-Dosimeter erwiesen sich als geeignet, um die persönliche UVR-Exposition österreichischer Außenarbeiter zu messen und zu quantifizieren. Zahlreiche vorangegangene Studien konnten mittels PSF-Dosimetern die PE der UVR-Exposition bestimmen. Die gemessenen UVR-Expositionsdosen sind teilweise sehr hoch, aber nicht aus dem Rahmen fallend. Die hohen, in dieser Studie, vorrangig bei Bauarbeitern, im August, in Tirol ermittelten, PE-Messwerte müssen in Folgemessungen bestätigt werden.

Die gefundenen Zusammenhänge von Beschattung, sowie des Höheneffekts (12,87%/1000 m) und der UVR-Exposition der österreichischen Außenarbeiter sollen Anstoß sein für einen verbesserten Messaufbau, um die Zusammenhänge, mit höherer wissenschaftlicher Güte, zu bestätigen. Brauchbare Referenzmessungen der ambienten Bestahlung müssen zukünftig vor Ort stattfinden. Im Unterschied zu den erwähnten Studien, die mittels PSF-Dosimetern die UVR-Exposition beurteilten, wurden in der hier vorgestellten Studie deutlich mehr persönliche UVR-Messungen durchgeführt. Dem Autor ist keine vorangegangene vergleichbare Studie bekannt, die innerhalb weniger Monate ein derartiges Pensum an PSF-Dosimetermessungen durchführte. Obwohl PSF-Dosimeter seit fast 50 Jahren zu PE-Messungen benützt werden, betritt diese Studie Neuland.

8 Ausblick

Die Messung und Quantifizierung der persönlichen UV-Strahlenexposition, der österreichischen Arbeiterschaft, insbesondere der Außenarbeiter, kann trotz 1160 arbeitstaglanger, verwertbarer PE-Messungen nicht als abgeschlossen betrachtet werden. Aller Voraussicht nach wird es ein Folgeprojekt geben, in dem die in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse, bezüglich der Analysemethoden, Ergebnisse und Limitationen zur Anwendung kommen werden. Ein besseres Verständnis des komplexen, feingliedrigen, österreichischen Strahlungsraums wird angestrebt. Weiters ist geplant, die für die Modellbildung relevanten Parameter, besser zu verstehen und präziser aufzunehmen. Der Fokus muss auf Interferenzen zwischen den Parametern liegen. Der stetige, rasante Fortschritt der automatisierten Analyse und Modellbildung soll Anwendung finden, die Hintergründe müssen jedoch verstanden werden.

Weiters ist geplant, bei erneuter Feldmessung der PE, im Rahmen des Projekts „SEDiment“ die ambiente Bestrahlung, an dem jeweiligen Messort, mittels portablen UV-Radiometern (sglux) aufzunehmen. So kann die ERTA bestimmt werden und die explorativen Modellrechnungen werden mehr Aussagekraft erhalten.

Neben den Messungen der persönlichen UVR-Exposition wurden im Zuge der Feldarbeit Hauttypenmessungen mit CR-300 Chroma Meter von Minolta durchgeführt. Die Auswertung dieser Ergebnisse und die Relation zu den Ergebnissen dieser Studie werden in einer Folgestudie vorgestellt.

Final sei erwähnt, dass es von unbedingter Notwendigkeit ist, die medizinischen und hautbiologischen Vorgänge besser zu verstehen und sie in das geographischen System Biosphäre zu integrieren. Der interdisziplinäre Charakter der Geographie ist bestens geeignet, um eine Vorreiterrolle in der Erkenntnisgewinnung der komplexen Zusammenhänge einzunehmen. Der Begründer der UV-strahlenbedingten Hautkrebsforschung Frederick Urbach positionierte seine Forschung in erster Linie in der Disziplin Geographie, das gilt es nicht zu vergessen.

9 Literaturverzeichnis

Abeck, D. (2020). Häufige Hautkrankheiten in der Allgemeinmedizin: Klinik, Diagnose, Therapie. Springer-Verlag.

Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA). (o.J.). M 014 UV-Strahlenbelastung am Arbeitsplatz

- Anders, A., Altheide, H. J., Knälmann, M., & Tronnier, H. (1995). Action spectrum for erythema in humans investigated with dye lasers. *Photochemistry and Photobiology*, 61(2), 200–205. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1995.tb03961.x>
- Arnold, M., de Vries, E., Whiteman, D. C., Jemal, A., Bray, F., Parkin, D. M., & Soerjomataram, I. (2018). Global burden of cutaneous melanoma attributable to ultraviolet radiation in 2012. *International Journal of Cancer*, 143(6), 1305–1314. <https://doi.org/10.1002/ijc.31527>
- Bai, J., & Zong, X. (2021). Global Solar Radiation Transfer and Its Loss in the Atmosphere. *Applied Sciences*, 11, 2651. <https://doi.org/10.3390/app11062651>
- Bais, A. F., Gardiner, B. G., Slaper, H., Blumthaler, M., Bernhard, G., McKenzie, R., Webb, A. R., Seckmeyer, G., Kjeldstad, B., Koskela, T., Kirsch, P. J., Gröbner, J., Kerr, J. B., Kazadzis, S., Leszczynski, K., Wardle, D., Josefsson, W., Brogniez, C., Gillotay, D., ... Redondas, A. (2001). SUSPEN intercomparison of ultraviolet spectroradiometers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D12), 12509–12525. <https://doi.org/10.1029/2000JD900561>
- Barth, J. (1987). [Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) and the discovery of ultraviolet irradiation 185 years ago]. *Der Hautarzt; Zeitschrift Fur Dermatologie, Venerologie, Und Verwandte Gebiete*, 38(5), 301–303.
- Batlles, F. J., Bosch, J. L., Tovar-Pescador, J., Martínez-Durbán, M., Ortega, R., & Miralles, I. (2008). Determination of atmospheric parameters to estimate global radiation in areas of complex topography: Generation of global irradiation map. *Energy Conversion and Management*, 49(2), 336–345. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.012>
- Baumann, L. (2008). Understanding and Treating Various Skin Types: The Baumann Skin Type Indicator. *Dermatologic Clinics*, 26(3), 359–373. <https://doi.org/10.1016/j.det.2008.03.007>
- Bigelbach, L., Heydenreich, J., Schmalwieser, A. W. (2023) Photoprotection of animals: Livestock shade cloths for free-range pigs [unveröffentlichtes Manuskript]
- Biljecki, F., & Ito, K. (2021). Street view imagery in urban analytics and GIS: A review. *Landscape and Urban Planning*, 215, 104217. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104217>
- Blumthaler, M., & Ambach, W. (1988). Solar Uvb-Albedo of Various Surfaces. *Photochemistry and Photobiology*, 48(1), 85–88. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1988.tb02790.x>
- Blumthaler, M., Ambach, W., & Ellinger, R. (1997). Increase in solar UV radiation with altitude. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 39(2), 130–134. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(96\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(96)00018-8)

- Botero-Valencia, J. S., Mejia-Herrera, M., & Pearce, J. M. (2022). Design of a low-cost mobile multispectral albedometer with geopositioning and absolute orientation. *HardwareX*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00324>
- Breuninger, H., Sebastian, G., Kortmann, R.-D., Schwipper, V., & Garbe, C. (2005). Deutsche Leitlinie: Basalzellkarzinom.
- Bryan, D. L., & O'Kelly, M. E. (2002). Hub-and-Spoke Networks in Air Transportation: An Analytical Review. *Journal of Regional Science*, 39(2), 275–295. <https://doi.org/10.1111/1467-9787.00134>
- Cadet, J.-M., Bencherif, H., Cadet, N., Lamy, K., Portafaix, T., Belus, M., Brogniez, C., Auriol, F., Metzger, J.-M., & Wright, C. Y. (2020). Solar UV Radiation in the Tropics: Human Exposure at Reunion Island (21° S, 55° E) during Summer Outdoor Activities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218105>
- Calzavara-Pinton, P., Ortel, B., & Venturini, M. (2015). Non-melanoma skin cancer, sun exposure and sun protection. *Giornale Italiano Di Dermatologia E Venereologia: Organo Ufficiale, Societa Italiana Di Dermatologia E Sifilografia*, 150(4), 369–378.
- Challoner, A. V., Corbett, M. F., Davis, A., Diffey, B. L., Leach, J. F., & Magnus, I. A. (1978). Description and application of a personal ultraviolet dosimeter: A review of preliminary studies. *National Cancer Institute Monograph*, 50, 97–100.
- Cheng, W., Vernez, D., Brown, R., & Goldberg, D. (2020). Estimation of Individual Exposure to Erythemal Weighted UVR by Multi-Sensor Measurements and Integral Calculation. *Sensors*, 20. <https://doi.org/10.3390/s20154068>
- Cockell, C. S., McKay, C. P., Warren-Rhodes, K., & Horneck, G. (2008). Ultraviolet radiation-induced limitation to epilithic microbial growth in arid deserts – Dosimetric experiments in the hyperarid core of the Atacama Desert. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 90(2), 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2007.11.009>
- Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). (2019). ISO/CIE 17166:2019(E) Erythema reference action spectrum and standard erythema dose
- Corbett, M. F., Davis, A., & Magnus, I. A. (1978). Personnel radiation dosimetry in drug photosensitivity: Field study of patients on phenothiazine therapy. *The British Journal of Dermatology*, 98(1), 39–46. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.1978.tb07331.x>

- Curran-Everett, D. (2018). Explorations in statistics: The log transformation. *Advances in Physiology Education*, 42(2), 343–347. <https://doi.org/10.1152/advan.00018.2018>
- Davis, A., Deane, G. H., & Diffey, B. L. (1976). Possible dosimeter for ultraviolet radiation. *Nature*, 261(5556), 169–170. <https://doi.org/10.1038/261169a0>
- de Gruijl, F. R. (2017). UV adaptation: Pigmentation and protection against overexposure. *Experimental Dermatology*, 26(7), 557–562. <https://doi.org/10.1111/exd.13332>
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV). (Hrsg.) (2020). IFA Report 4-2020: Exposition von Beschäftigten gegenüber solarer UV-Strahlung - Ergebnisse des Projekts mit Genesis-UV.
- Didona, D., Paolino, G., Bottoni, U., & Cantisani, C. (2018). Non Melanoma Skin Cancer Pathogenesis Overview. *Biomedicines*, 6(1), 6. <https://doi.org/10.3390/biomedicines6010006>
- Diffey, B. L. (1987). Analysis of the risk of skin cancer from sunlight and solarium in subjects living in northern Europe. *Photo-Dermatology*, 4(3), 118–126.
- Diffey, B. L. (2002). Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, 28(1), 4–13. [https://doi.org/10.1016/S1046-2023\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(02)00204-9)
- Diffey, B. L., Gibson, C. J., Haylock, R., & McKinlay, A. F. (1996). Outdoor ultraviolet exposure of children and adolescents. *The British Journal of Dermatology*, 134(6), 1030–1034.
- Dirmhirn, I. (1964). *Das Strahlungsfeld im Lebensraum*. Akademische Verlagsgesellschaft.
- Elsner, P., Bauer, A., Blome, H., Brüning, T., Drexler, H., Fartasch, M., John, S. M., Letzel, S., Knuschke, P., Schmitt, J., Wittlich, M., & Diepgen, T. L. (2014). Durch UV-Strahlung induzierte bösartige Hauttumoren – Erarbeitung und Evaluation von versicherungsrechtlich relevanten Abgrenzungskriterien beruflicher gegenüber nicht beruflicher Verursachung. *Wissenschaftlicher Abschlussbericht des DGUV-. Dermatologie in Beruf Und Umwelt*, 62(07), 107–132. <https://doi.org/10.5414/DBX00229>
- Fabbrocini, G., Triassi, M., Mauriello, M. C., Torre, G., Annunziata, M. C., De Vita, V., Pastore, F., D'Arco, V., & Monfrecola, G. (2010). Epidemiology of Skin Cancer: Role of Some Environmental Factors. *Cancers*, 2(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/cancers2041980>
- Faber, J., & Fonseca, L. M. (2014). How sample size influences research outcomes. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 19(4), 27–29. <https://doi.org/10.1590/2176-9451.19.4.027-029.ebo>

- Findlay, M. W., & Soufan, C. (2022). 9—Nonmelanoma Skin Cancer. In R. D. Farhadieh, N. W. Bulstrode, B. J. Mehrara, & S. Cugno (Hrsg.), *Plastic Surgery—Principles and Practice* (S. 97–113). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-65381-7.00009-5>
- Fioletov, V. E., McArthur, L. J. B., Mathews, T. W., & Marrett, L. (2009). On the relationship between erythemal and vitamin D action spectrum weighted ultraviolet radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 95(1), 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2008.11.014>
- Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang (2021). The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change (2021). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (Hrsg.)]. Cambridge University Press, 923–1054. doi:10.1017/9781009157896.009
- Foukal, P., & Lean, J. (1990). An Empirical Model of Total Solar Irradiance Variation Between 1874 and 1988. *Science*, 247(4942), 556–558. <https://doi.org/10.1126/science.247.4942.556>
- Frederick, J. E., & Lubin, D. (1988). The budget of biologically active ultraviolet radiation in the Earth-atmosphere system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93(D4), 3825–3832. <https://doi.org/10.1029/JD093iD04p03825>
- Frost, C. A., & Green, A. C. (1994). Epidemiology of solar keratoses. *The British Journal of Dermatology*, 131(4), 455–464. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.1994.tb08544.x>
- Gajipra, K. (2015). Low Carbon Shipping. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3485.0728>
- Gale, J. (1972). Elevation and Transpiration: Some Theoretical Considerations with Special Reference to Mediterranean-Type Climate. *Journal of Applied Ecology*, 9(3), 691–702. <https://doi.org/10.2307/2401898>
- Gemeinsames Ministerblatt (GMBL). (2013). Berufskrankheiten-Verordnung; Empfehlung des ärztlichen Sachverständigenrats „Berufskrankheiten“. Nr. 35, 671–693.
- Gies, H. P., Roy, C. R., Toomey, S., Maclennan, R., & Watson, M. (1995). Solar Uvr Exposures of Three Groups of Outdoor Workers on the Sunshine Coast, Queensland. *Photochemistry and Photobiology*, 62(6), 1015–1021. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1995.tb02402.x>

- Gilchrest, B. A. (2011). Molecular Aspects of Tanning. *Journal of Investigative Dermatology*, 131, E14–E17. <https://doi.org/10.1038/skinbio.2011.6>
- Goudie, A. (2008). *Physische Geographie – Eine Einführung* (4th edition). Springer Spektrum
- Gross, H., Blechinger, F., & Achnner, B. (2008). Human Eye. In *Handbook of Optical Systems* (S. 1–87). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9783527699247.ch1>
- Gupta, V., & Sharma, V. K. (2019). Skin typing: Fitzpatrick grading and others. *Clinics in Dermatology*, 37(5), 430–436. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2019.07.010>
- Harrison, G. I., & Young, A. R. (2002). Ultraviolet radiation-induced erythema in human skin. *Methods*, 28(1), 14–19. [https://doi.org/10.1016/S1046-2023\(02\)00205-0](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(02)00205-0)
- Hau, L. V., Harris, S. E., Dutton, Z., & Behroozi, C. H. (1999). Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas. *Nature*, 397(6720), Article 6720. <https://doi.org/10.1038/17561>
- Havlik, D. (1972). Zur vertikalen Differenzierung der Zirkumglobalstrahlung (Investigations into Vertical Differences of Circumglobal Radiation). *Erdkunde*, 26(4), 241–251.
- Heckman, C. J., Chandler, R., Kloss, J. D., Benson, A., Rooney, D., Munshi, T., Darlow, S. D., Perlis, C., Manne, S. L., & Oslin, D. W. (2013). Minimal Erythema Dose (MED) Testing. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, 75, e50175. <https://doi.org/10.3791/50175>
- Hessling, M., Haag, R., Sieber, N., & Vatter, P. (2021). The impact of far-UVC radiation (200–230 nm) on pathogens, cells, skin, and eyes – a collection and analysis of a hundred years of data. *GMS Hygiene and Infection Control*, 16, Doc07. <https://doi.org/10.3205/dgkh000378>
- Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA). (2021). Technische Information zur Ermittlung in Berufskrankheiten(BK-)fällen vor dem Hintergrund der neuen Berufskrankheit mit der BK-Nr. 5103 „Plattenepithelkarzinome oder multiple aktinische Keratosen der Haut durch natürliche UV-Strahlung“ (Stand November 2021)
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (1992). *Solar and Ultraviolet Radiation IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Solar-And-Ultraviolet-Radiation-1992>
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (2012). *Radiation—IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 100D*. <https://publications.iarc.fr/Book->

And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Radiation-2012

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2023). Cancer today. Abgerufen 7. Oktober 2023, von <http://gco.iarc.fr/today/home>

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). (2004). Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). *Health Physics*, 87(2), 171–186.
<https://doi.org/10.1097/00004032-200408000-00006>

International Organization for Standardization (ISO). (2007). Space environment (natural and artificial)—Process for determining solar irradiances. ISO.
<https://www.iso.org/standard/39911.html>

Iqbal, M. (1983). *An Introduction To Solar Radiation*. Elsevier.

Irwin, C., Barnes, A., Veres, D., & Kaidbey, K. (1993). An Ultraviolet Radiation Action Spectrum for Immediate Pigment Darkening. *Photochemistry and Photobiology*, 57(3), 504–507.
<https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1993.tb02326.x>

Jablonski, N. G., & Chaplin, G. (2000). The evolution of human skin coloration. *Journal of Human Evolution*, 39(1), 57–106. <https://doi.org/10.1006/jhev.2000.0403>

Jablonski, N. G., & Chaplin, G. (2010). Human skin pigmentation as an adaptation to UV radiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(supplement_2), 8962–8968.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0914628107>

Jie, S. Y., Hoe, L. Z., Paul, S. C., & Anggraini, V. (2022). Characterizing the Tensile Behaviour of Woven and Composite Fabrics under UV Exposure. *Applied Sciences*, 12(22), Article 22.
<https://doi.org/10.3390/app122211440>

Julitta, T., Corp, L. A., Rossini, M., Burkart, A., Cogliati, S., Davies, N., Hom, M., Mac Arthur, A., Middleton, E. M., Rascher, U., Schickling, A., & Colombo, R. (2016). Comparison of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence Estimates Obtained from Four Portable Field Spectroradiometers. *Remote Sensing*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/rs8020122>

Juzeniene, A., Brekke, P., Dahlback, A., Andersson-Engels, S., Reichrath, J., Moan, K., Holick, M., Grant, W., & Moan, J. (2011). Solar radiation and human health. *Reports on Progress in Physics*, 74, 066701. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/74/6/066701>

- Kallenrode, M.-B. (2006). Physik der Atmosphäre. Universität Osnabrück.
- Kasten, F., & Young, A. T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, 28(22), 4735–4738. <https://doi.org/10.1364/AO.28.004735>
- Kaufman, P. (2022, September 24). Skin Cancer Types and Their Features. EverydayHealth.Com. <https://www.everydayhealth.com/skin-cancer/types/>
- Kiedron, P. W., Michalsky, J. J., Berndt, J. L., & Harrison, L. C. (1999). Comparison of spectral irradiance standards used to calibrate shortwave radiometers and spectroradiometers. *Applied Optics*, 38(12), 2432. <https://doi.org/10.1364/AO.38.002432>
- Kimlin, M. G., Parisi, A. V., & Wong, J. C. (1998). Quantification of personal solar UV exposure of outdoor workers, indoor workers and adolescents at two locations in Southeast Queensland. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, 14(1), 7–11. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0781.1998.tb00002.x>
- Knuschke, P., & Barth, J. (1996). Biologically weighted personal UV dosimetry. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 36(1), 77–83. [https://doi.org/10.1016/1011-1344\(95\)07223-3](https://doi.org/10.1016/1011-1344(95)07223-3)
- Knuschke, P., Unverricht, I., Ott, G., & Janßen, M. (2007). Personenbezogene Messung der UV-Exposition von Arbeitnehmern im Freien. sicher ist sicher. <https://doi.org/10.37307/j.2199-7349.2007.04.07>
- Kolb, C. E., & Worsnop, D. R. (2012). Chemistry and Composition of Atmospheric Aerosol Particles. *Annual Review of Physical Chemistry*, 63(1), 471–491. <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-032511-143706>
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). (2020). UV index and UV dose: action spectra. <https://www.temis.nl/uvradiation/product/action.html>
- Koronakis, P. S., Sfantos, G. K., Paliatsos, A., Kaldellis, J., Garofalakis, J. E., & Koronaki, I. P. (2002). Interrelations of UV-global/global/diffuse solar irradiance components and UV-global attenuation on air pollution episode days in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, 36, 3173–3181. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00233-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00233-9)
- Kraus, H. (2004). Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie. <https://doi.org/10.1007/3-540-35017-9>

- Krins, A., Dörschel, B., Knuschke, P., Seidlitz, H. K., & Thiel, S. (2001). Determination of the calibration factor of polysulphone film UV dosimeters for terrestrial solar radiation. *Radiation Protection Dosimetry*, 95(4), 345–352. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006559>
- Krishnamurthy, S. (1992). The geography of non-ocular malignant melanoma in India: Its association with latitude, ozone levels and UV light exposure. *International Journal of Cancer*, 51(2), 169–172. <https://doi.org/10.1002/ijc.2910510202>
- Krúdy, Á., & Ladunga, K. (2001). Measuring wavelength discrimination threshold along the entire visible spectrum. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 45(1), Article 1.
- Kuhn, H. J., Braslavsky, S. E., & Schmidt, R. (2004). Chemical actinometry (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 76(12), 2105–2146. <https://doi.org/10.1351/pac200476122105>
- Kurz, B., Berneburg, M., & Singer, S. (2022). Sonnenschutz der menschlichen Haut: Grundlagen Sun protection of human skin: from A to Z. *Der Hautarzt*, 73. <https://doi.org/10.1007/s00105-022-04953-2>
- Lacis, A. A., & Hansen, J. (1974). A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(1), 118–133. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2)
- Larkö, O., & Diffey, B. L. (1983). Natural UV-B radiation received by people with outdoor, indoor, and mixed occupations and UV-B treatment of psoriasis. *Clinical and Experimental Dermatology*, 8(3), 279–285. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2230.1983.tb01780.x>
- Leiter, U., Eigentler, T., & Garbe, C. (2015). Epidemiology of skin cancer. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 810, 120–140. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0437-2_7
- Leiter, U., Heppt, M. V., Steeb, T., Amaral, T., Bauer, A., Becker, J. C., Breitbart, E., Breuninger, H., Diepgen, T., Dirschka, T., Eigentler, T., Flaig, M., Follmann, M., Fritz, K., Greinert, R., Gutzmer, R., Hillen, U., Ihrler, S., John, S. M., ... Berking, C. (2020). S3-Leitlinie „Aktinische Keratose und Plattenepithelkarzinom der Haut“ – Kurzfassung, Teil 2: Epidemiologie, chirurgische und systemische Therapie des Plattenepithelkarzinoms, Nachsorge, Prävention und Berufskrankheit. *JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft*, 18(4), 400–413. https://doi.org/10.1111/ddg.14072_g

- Magnus, I. A. (1964). Studies with a monochromator in the common idiopathic photodermatoses. *The British Journal of Dermatology*, 76, 245–264.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.1964.tb14526.x>
- Marks, R. (1996). Squamous cell carcinoma. *Lancet (London, England)*, 347(9003), 735–738.
[https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(96\)90081-1](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(96)90081-1)
- McGregor, G. R. (2012). Human biometeorology. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 36(1), 93–109. <https://doi.org/10.1177/0309133311417942>
- Meffert, B., & Meffert, H. (2000). Optische Strahlung und ihre Wirkungen auf die Haut—Optical Radiation and its Effects on the Skin. *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering*, 45(4), 98–104. <https://doi.org/10.1515/bmte.2000.45.4.98>
- Milon, A., Bulliard, J.-L., Vuilleumier, L., Danuser, B., & Vernez, D. (2013). Estimating the contribution of occupational solar UV exposure to skin cancer. *The British journal of dermatology*, 170. <https://doi.org/10.1111/bjd.12604>
- Moan, J., Grigalavicius, M., Baturaite, Z., Dahlback, A., & Juzeniene, A. (2015). The relationship between UV exposure and incidence of skin cancer. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, 31(1), 26–35. <https://doi.org/10.1111/phpp.12139>
- Moehrle, M., Korn, M., & Garbe, C. (2000). Bacillus subtilis spore film dosimeters in personal dosimetry for occupational solar ultraviolet exposure. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 73(8), 575–580. <https://doi.org/10.1007/s004200000183>
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (2013). *Principles of environmental physics: Plants, animals, and the atmosphere* (4th edition). Elsevier/Academic Press.
- Morison, W. L. (1985). What is the function of melanin? *Archives of Dermatology*, 121(9), 1160–1163.
- Narayanan, D. L., Saladi, R. N., & Fox, J. L. (2010). Review: Ultraviolet radiation and skin cancer. *International Journal of Dermatology*, 49(9), 978–986. <https://doi.org/10.1111/j.1365-4632.2010.04474.x>
- Parra, E., Kittles, R., & Shriver, M. (2004). Implications of correlations between skin color and genetic ancestry for biomedical research. *Nature genetics*, 36, S54-60.
<https://doi.org/10.1038/ng1440>

- Parrish, J. A., Jaenicke, K. F., & Anderson, R. R. (1982). Erythema and Melanogenesis Action Spectra of Normal Human Skin *. *Photochemistry and Photobiology*, 36(2), 187–191.
<https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1982.tb04362.x>
- Pérez Ferriols, A., Aguilera, J., Aguilera, P., de Argila, D., Barnadas, M. A., de Cabo, X., Carrascosa, J. M., de Gálvez Aranda, M. V., Gardeazábal, J., Giménez-Arnau, A., Lecha, M., Lorente, J., Martínez-Lozano, J. A., Rodríguez Granados, M. T., Sola, Y., & Utrillas, M. P. (2014). Determination of Minimal Erythema Dose and Anomalous Reactions to UVA Radiation by Skin Phototype. *Actas Dermo-Sifiliográficas (English Edition)*, 105(8), 780–788.
<https://doi.org/10.1016/j.adengl.2014.05.020>
- Podesser, A. (2007). *Klimaatlas Steiermark: Kapitel 1 – Strahlung*.
- Ratushny, V., Gober, M. D., Hick, R., Ridky, T. W., & Seykora, J. T. (2012). From keratinocyte to cancer: The pathogenesis and modeling of cutaneous squamous cell carcinoma. *American Society for Clinical Investigation*. <https://doi.org/10.1172/JCI57415>
- Rieder, H. E., Staehelin, J., Weihs, P., Vuilleumier, L., Maeder, J. A., Holawe, F., Blumthaler, M., Lindfors, A., Peter, T., Simic, S., Spichtinger, P., Wagner, J. E., Walker, D., & Ribatet, M. (2010). Relationship between high daily erythemal UV doses, total ozone, surface albedo and cloudiness: An analysis of 30years of data from Switzerland and Austria. *Atmospheric Research*, 98(1), 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.03.006>
- Rockström, J., & Gaffney, O. (2021). *Breaking Boundaries: The Science of Our Planet*. Dorling Kindersley Ltd.
- Rosen, C. F., Jacques, S. L., Stuart, M. E., & Gange, R. W. (1990). Immediate pigment darkening: Visual and reflectance spectrophotometric analysis of action spectrum. *Photochemistry and Photobiology*, 51(5), 583–588. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1990.tb01969.x>
- Routaboul, C., Denis, A., & Vinche, A. (1999). Immediate pigment darkening: Description, kinetic and biological function. *European Journal of Dermatology: EJD*, 9(2), 95–99.
- Sahota, O. (2014). Understanding vitamin D deficiency. *Age and Ageing*, 43(5), 589–591.
<https://doi.org/10.1093/ageing/afu104>
- Saric-Bosanac, S. S., Clark, A. K., Nguyen, V., Pan, A., Chang, F.-Y., Li, C.-S., & Sivamani, R. K. (2019). Quantification of ultraviolet (UV) radiation in the shade and in direct sunlight. *Dermatology Online Journal*, 25(7), 13030/qt4wc0f6tw.

- Saternus, R., Vogt, T., & Reichrath, J. (2018). Hauttypen, Hautpigmentierung und Melaninsynthese: Wichtige Instrumente der menschlichen Haut zur Anpassung an die UV-Strahlung. *Aktuelle Dermatologie*, 44(5), 210–215. <https://doi.org/10.1055/s-0043-122320>
- Schmalwieser, A. W. (2020). Possibilities to estimate the personal UV radiation exposure from ambient UV radiation measurements. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 19. <https://doi.org/10.1039/D0PP00182A>
- Schmalwieser, A. W., Cabaj, A., Schaubeger, G., Rohn, H., Maier, B., & Maier, H. (2010). Facial solar UV exposure of Austrian farmers during occupation. *Photochemistry and Photobiology*, 86(6), 1404–1413. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2010.00812.x>
- Schmalwieser, A. W., Casale, G., Schmalwieser, S., & Siani, A. (2021). Review on Occupational Personal Solar UV Exposure Measurements. *Atmosphere*, 12, 142. <https://doi.org/10.3390/atmos12020142>
- Schmalwieser, A. W., Klotz, B., Schwarzmann, M., Baumgartner, D., Schreder, J., Schaubeger, G., & Blumthaler, M. (2019). The Austrian UVA -Network. *Photochemistry and Photobiology*, 95. <https://doi.org/10.1111/php.13111>
- Schmalwieser, A. W., & Siani, A. M. (2018). Review on Nonoccupational Personal Solar UV Exposure Measurements. *Photochemistry and Photobiology*, 94(5), 900–915. <https://doi.org/10.1111/php.12946>
- Schmalwieser, A. W., Wallisch, S., & Diffey, B. (2012). A library of action spectra for erythema and pigmentation. *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology*, 11, 251–268. <https://doi.org/10.1039/c1pp05271c>
- Schmitt, J., Diepgen, T., & Bauer, A. (2010). Occupational exposure to non-artificial UV-light and non-melanocytic skin cancer—A systematic review concerning a new occupational disease. *Journal Der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft = Journal of the German Society of Dermatology: JDDG*, 8(4), 250–263, 250–264. <https://doi.org/10.1111/j.1610-0387.2009.07260.x>
- Schmitt, J., Seidler, A., Diepgen, T. L., & Bauer, A. (2011). Occupational ultraviolet light exposure increases the risk for the development of cutaneous squamous cell carcinoma: A systematic review and meta-analysis. *The British Journal of Dermatology*, 164(2), 291–307. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.10118.x>

- Schmucki, D., & Philipona, R. (2002). Ultraviolet radiation in the Alps: The altitude effect. *Optical Engineering - OPT ENG*, 41. <https://doi.org/10.1117/1.1516820>
- Serrano, M.-A., Cañada, J., & Moreno, J. C. (2013). Solar UV exposure in construction workers in Valencia, Spain. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 23(5), Article 5. <https://doi.org/10.1038/jes.2012.58>
- Siani, A. M., Casale, G. R., Modesti, S., Parisi, A. V., & Colosimo, A. (2014). Investigation on the capability of polysulphone for measuring biologically effective solar UV exposures. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 13(3), 521–530. <https://doi.org/10.1039/c3pp50267h>
- Siani, A. M., Casale, G. R., Sisto, R., Colosimo, A., Lang, C. A., & Kimlin, M. G. (2011). Occupational exposures to solar ultraviolet radiation of vineyard workers in Tuscany (Italy). *Photochemistry and Photobiology*, 87(4), 925–934. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2011.00934.x>
- Siegel, J. A., Korgavkar, K., & Weinstock, M. A. (2017). Current perspective on actinic keratosis: A review. *British Journal of Dermatology*, 177(2), 350–358. <https://doi.org/10.1111/bjd.14852>
- Simic, S., Kromp-Kolb, H., Vacek, A., Weihs, P., Laube, W., & Fitzka, M. (2008). Monitoring von stratosphärischem Ozon und spektraler UV-B Strahlung auf dem Hohen Sonnblick. <https://docplayer.org/1129457-Monitoring-von-stratosphaerischem-ozon-und-spektraler-uv-b-strahlung-auf-dem-hohen-sonnblick.html>
- Simic, S., Schmalwieser, A. W., & Moshhammer, H. (2009). Gesundheitsrisiken für die österreichische Bevölkerung durch die Abnahme des stratosphärischen Ozons.
- Sklar, L. R., Almutawa, F., Lim, H. W., & Hamzavi, I. (2013). Effects of ultraviolet radiation, visible light, and infrared radiation on erythema and pigmentation: A review. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 12(1), 54–64. <https://doi.org/10.1039/c2pp25152c>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis*. Cengage Learning.
- Someda, C. G. (2017). *Electromagnetic Waves*. CRC Press.
- Statistik Austria. (Hrsg.) (2020). *Krebserkrankungen in Österreich*
- Steiner, A. K., Ladstädter, F., Randel, W. J., Maycock, A. C., Fu, Q., Claud, C., Gleisner, H., Haimberger, L., Ho, S.-P., Keckhut, P., Leblanc, T., Mears, C., Polvani, L. M., Santer, B. D., Schmidt,

- T., Sofieva, V., Wing, R., & Zou, C.-Z. (2020). Observed Temperature Changes in the Troposphere and Stratosphere from 1979 to 2018. *Journal of Climate*, 33(19), 8165–8194.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0998.1>
- Stephens, G. L., O'Brien, D., Webster, P. J., Pilewski, P., Kato, S., & Li, J. (2015). The albedo of Earth. *Reviews of Geophysics*, 53(1), 141–163. <https://doi.org/10.1002/2014RG000449>
- Stieglitz, R., & Heinzl, V. (2012). *Thermische Solarenergie: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29475-4>
- Strehl, C., Heepenstrick, T., Knuschke, P., & Wittlich, M. (2021). Bringing Light into Darkness—Comparison of Different Personal Dosimeters for Assessment of Solar Ultraviolet Exposure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17), 9071.
<https://doi.org/10.3390/ijerph18179071>
- Strehl, C., & Wittlich, M. (2021). Hautkrebs durch natürliche UV Strahlung. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 71(6), 262–269.
<https://doi.org/10.1007/s40664-021-00441-x>
- Urbach, F. (1971). Geographic distribution of skin cancer. *Journal of Surgical Oncology*, 3(3), 219–234. <https://doi.org/10.1002/jso.2930030304>
- Usoskin, I. G. (2017). A history of solar activity over millennia. *Living Reviews in Solar Physics*, 14(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>
- Vernez, D., Milon, A., Vuilleumier, L., & Bulliard, J.-L. (2012). Anatomical exposure patterns of skin to sunlight: Relative contributions of direct, diffuse and reflected ultraviolet radiation. *The British journal of dermatology*, 167, 383–390. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2012.10898.x>
- Wald, L. (2007). *Solar radiation energy (fundamentals)*.
- Wang, Q.-W., Hidema, J., & Hikosaka, K. (2014). Is UV-induced DNA damage greater at higher elevation? *American Journal of Botany*, 101(5), 796–802. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400010>
- Ward, P. (2021). *Atmospheric Absorption. Ozonedepletiontheory*.
<https://ozonedepletiontheory.info/ImagePages/absorption-rhode/>
- Ware, O. R., Dawson, J. E., Shinohara, M. M., & Taylor, S. C. (2020). Racial Limitations of Fitzpatrick Skin Type. *SKIN OF COLOR*.

- Warsono, Gustavia, E., Kurniasari, D., Amanto, & Antonio, Y. (2019). On the Comparison of the Methods of Parameter Estimation for Pareto Distribution. *Journal of Physics: Conference Series*, 1338, 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1338/1/012042>
- Webb, A. R., Slaper, H., Koepke, P., & Schmalwieser, A. W. (2011). Know your standard: Clarifying the CIE erythema action spectrum. *Photochemistry and Photobiology*, 87(2), 483–486. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2010.00871.x>
- Weihs, P., Schmalwieser, A., & Schauburger, G. (2013). UV Effects on Living Organisms (S. 609–688). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5764-0_22
- Wesselak, V., & Voswinckel, S. (2012). Strahlungsquelle Sonne. In V. Wesselak & S. Voswinckel (Hrsg.), *Photovoltaik: Wie Sonne zu Strom wird* (S. 9–26). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24297-7_2
- Westerhof, W., van Hasselt, B. A., & Kammeijer, A. (1986). Quantification of UV-induced erythema with a portable computer controlled chromameter. *Photo-Dermatology*, 3(5), 310–314.
- Wittlich, M., Westerhausen, S., Kleinespel, P., Rifer, G., & Stöppelmann, W. (2016). An approximation of occupational lifetime UVR exposure: Algorithm for retrospective assessment and current measurements. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 30(S3), 27–33. <https://doi.org/10.1111/jdv.13607>
- Wolf, S. T., Berry, C. W., Stanhewicz, A. E., Kenney, L. E., Ferguson, S. B., & Kenney, W. L. (2019). Sunscreen or simulated sweat minimizes the impact of acute ultraviolet radiation on cutaneous microvascular function in healthy humans. *Experimental physiology*, 104(7), 1136–1146. <https://doi.org/10.1113/EP087688>
- Wong, C. S. M., Strange, R. C., & Lear, J. T. (2003). Basal cell carcinoma. *BMJ : British Medical Journal*, 327(7418), 794–798.
- Wood, G. S., Xu, Y. G., Aylward, J. L., Spiegelman, V., Vanness, E., Teng, J. M. C., & Snow, S. N. (2014). 70 - Nonmelanoma Skin Cancers: Basal Cell and Squamous Cell Carcinomas. In J. E. Niederhuber, J. O. Armitage, J. H. Doroshow, M. B. Kastan, & J. E. Tepper (Hrsg.), *Abeloff's Clinical Oncology (Fifth Edition)* (S. 1092-1111.e7). Churchill Livingstone. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-2865-7.00070-9>

World Health Organisation (WHO). (Hrsg.) (2016). Radiation: Ultraviolet (UV) radiation, Abgerufen 3. Oktober 2023, von [https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-ultraviolet-\(uv\)](https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-ultraviolet-(uv))

Zerefos, C., Fountoulakis, I., Eleftheratos, K., & Kazantzidis, A. (2023). Long-term variability of human health-related solar ultraviolet-B radiation doses from the 1980s to the end of the 21st century. *Physiological Reviews*, 103(3), 1789–1826. <https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2022>

Zhang, Y., Wijeratne, L., Talebi, S., & Lary, D. (2021). Machine Learning for Light Sensor Calibration. *Sensors*, 21, 6259. <https://doi.org/10.3390/s21186259>

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Strahlungsbilanz und Energietransferprozesse bei klarem Himmel (Forster et al., 2021)	8
Abbildung 2 Strahlungsbilanz und Energietransferprozesse bei durchschnittlichem Himmel (Forster et al., 2021)	8
Abbildung 3 Gegenüberstellung des extraterrestrischen und des terrestrischen Sonnenspektrums; (DGUV, 2020)	10
Abbildung 4 Jahressummen der solaren Bestrahlung (Gajipra, 2015).....	11
Abbildung 5 erythemwirksamer jährlicher UV-Index, gemittelt 1996 – 2002 (Jie et al., 2022) ..	12
Abbildung 6 Wechselwirkung der Strahlung und Materie (Wesselak & Voswinckel, 2012)	13
Abbildung 7 Solare Strahlungsbilanz der Erde in Prozent (Wesselak & Voswinckel 2012)	15
Abbildung 8 Albedo der gesamten solaren Strahlung (t) und Albedo der erythemgewichteten solaren Strahlung (er) von Oberflächen; schraffierte Box zeigt die Variation zwischen minimal und maximal gemessenem Wert (Blumthaler & Ambach, 1988).....	16
Abbildung 9 Schematische Darstellung des Zenitwinkels der Sonne (zenith angle), des Höhenwinkel des Sonnenstands (altitude angle) und des Azimutwinkel (azimuth angle) (Zhang et al., 2021)	18
Abbildung 10 Verhältnis von RAF und Zenitwinkel der Sonne (Simic et al., 2009).....	19
Abbildung 11 Absorptionsbanden und Streubanden der Atmosphäre (Ward, 2021)	20
Abbildung 12 Jahresgang der relativen Sonnenscheindauer in Prozent (Podesser, 2007)	22
Abbildung 13 Jährliche globale solare Strahlung, Sierra Nevada (Spanien) (Batlles et al., 2008).....	22

Abbildung 14 oben: 2 baugleiche, kalibrierte Breitband-UV-Bestrahlungsmessgeräte, mit Schattenband (im Vordergrund) und ohne Schattenband (im Hintergrund); unten: Verhältnis der diffusen und globalen erythemgewichteten UV-Bestrahlung, an einem Sommertag mit wechselnden Bewölkungsverhältnissen in Wien Donaustadt, Österreich (Schmalwieser, 2020)	25
Abbildung 15 Gemittelte tägliche und jährliche globale Bestrahlung in Österreich, Zeitraum 1994 - 2008 (© 2020 The World Bank, Source: Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data: Solargis)	27
Abbildung 16 Spektrale Distribution der berechneten globalen (S_t), direkten (S_b) und diffusen Strahlung (S_d); wolkenlos, Zenitwinkel der Sonne 60° , niederschlagsbares Wasser 20 mm, Ozondicke 3 mm, aerosoloptische Dicke 0,2; (Monteith & Unsworth, 2008)	28
Abbildung 17 Deutsches Weißes Edelschwein mit Sonnenbrand, AS_{Ery} wie bei heller menschlicher Haut (Bigelbach et al., 2023)	30
Abbildung 18 Wirkungsspektren des UV-induzierten Erythems; (Schmalwieser et al., 2012)	32
Abbildung 19 Wirkungsspektren für Erythem nach dem CIE1998 Standard und nach Anders et al. (1995), für SCC in der Haut von Mäusen nach de Gruijl et al. (1993) und für Malignes Melanom in der Haut von Fischen nach Setlow et al. (1993) (Juzeniene et al., 2011)	34
Abbildung 20 Wirkungsspektren für Erythem nach CIE1998 Standard, Vitamin-D nach CIE1974 Standard und DNA-Schäden nach Setlow (1974) (KNMI 2020, © KNMI/ESA)	34
Abbildung 21 Charakterisierungen und Referenzwerte der MED, der vier europäischen Hauttypen nach Fitzpatrick (AUVA, o.J.)	37
Abbildung 22 Weltweite Hauttypenverteilung, vor der europäischen Kolonisation, nach Renato Biasutti (Parra et al., 2004)	38
Abbildung 23 UV-Strahlung gemessen im All (schwarz), Erdboden (blau), Absorption von stratosphärischem Ozon (violett), AS_{VitD} (grün), AS_{Ery} (rot) (Fioletov et al., 2009)	41
Abbildung 24 Schätzungen der NMSC-Inzidenz in Europa (© International Agency for Research on Cancer 2023)	43
Abbildung 25 Hautkrebsarten, typisches Ausbreitung in Hautschichten (Kaufman, 2022)	43
Abbildung 26 Erythem, Pro-Vitamin-D und PS gewichtete spektrale Bestrahlungsstärke, am 18.06.2007, 12:00 Uhr, Rom (Italien). $O_3 = 325$ DU, Zenitwinkel der Sonne = $18,6^\circ$, wolkenlos. (Siani et al., 2014).....	48
Abbildung 27 Beispiel für Korrelationsfaktoren (Kalibrationsmatrizen) von PSF für (a) AS_{Ery} und (b) AS_{VitD} . (Schmalwieser et al., 2021)	48
Abbildung 28 Dosimeter auf Suntracker, elektronische Dosimeter (links), Viospor (mittig), PSF (rechts) (Strehl et al. 2021)	49
Abbildung 29: Dosimeter Box	52

Abbildung 30 Drckverschlussbeutel mit PSF-Dosimetern	53
Abbildung 31 mit Nummer und Namen markierter Umschlag	53
Abbildung 32 geschlichtete, unbenutzte PFS-Dosimeter.....	53
Abbildung 33 Messstandorte aller Sommer- und Wintermessungen, Zuordnung der Tätigkeiten gegenüber der vorgegebenen Klassifikation verändert	54
Abbildung 34 Dosimeter am Nacken befestigt, währen der PE-Messung bei Seilbahnbeschäftigtem (Aufnahme 2022, Mutterer Alm).....	56
Abbildung 35 X-2000 Messgerät horizontal ausgerichtet und der Autor (Aufnahme 2022 Patscherkofel).....	59
Abbildung 36 Häufigkeitsverteilung der PE-Messungen; oben links: reale Messwerte der PE-Messungen; oben rechts: auf 8-Studentag gewichte PE-Messwerte; unten links: auf 8-Studentag gewichtete und mediannormierte Messwerte der PE-Messungen; unten rechts: auf 8-Studentag gewichtete und maximalnormierte Messwerte der PE-Messungen.....	68
Abbildung 37 Häufigkeitsverteilung der SED/d-Messwerte nach Berufsgruppe; rot gestrichelte Linie = HRD	69
Abbildung 38 Häufigkeitsverteilung der Messdauer der PE-Messungen in Halbstundenschritten; rote gestrichelte Linie = 8-Stunden Arbeitstag	70
Abbildung 39 SED/d nach Messdauer; Binbreite = 30 min, beginnend bei 15 min.....	71
Abbildung 40 Messdauer nach Berufsgruppe	71
Abbildung 41 Messdauer nach Tätigkeit	72
Abbildung 42 reale PE-Messwerte (SED/d) im Jahresverlauf.....	73
Abbildung 43 Verteilung der SED/d nach Messmonaten.....	74
Abbildung 44 Verteilung der SED/d+ nach Messmonaten.....	74
Abbildung 45 SED/d nach Körperstelle des Messgeräts	76
Abbildung 46 SED/d+ nach der Körperstelle des Messgeräts	77
Abbildung 47 SED_ideal_median/d+ nach Körperstelle des Messgeräts	78
Abbildung 48 Verteilung der SED/d nach Beschattungsindex am Arbeitsplatz.....	82
Abbildung 49 Verteilung der SED/d+ nach Beschattungsindex am Arbeitsplatz.....	82
Abbildung 50 Verteilung der SED/d nach Region	84
Abbildung 51 Verteilung der SED/d+ nach Region	85
Abbildung 52 Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Region	85
Abbildung 53 SED/d nach Seehöhe; Seehöhe der Hubs, Wien: rote Linie, Feistritz im Rosental: violette Linie, Mieders im Stubaital: schwarze Linie.....	90
Abbildung 54 Vergleich der Verteilung der Strahlenexposition nach Höhenstufen; oben: SED/d; unten: SED_ideal_max/d+.....	91

Abbildung 55 Verteilung der SED/d nach Berufsgruppen	94
Abbildung 56 Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Berufsgruppen.....	94
Abbildung 57 Verteilung der SED/d nach Tätigkeiten.....	96
Abbildung 58 Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Tätigkeiten.....	96
Abbildung 59 UVR-Jahrsexposition der Berufsgruppen nach SED_ideal_median/Oy+	100
Abbildung 60 UVR-Jahrsexposition der Tätigkeiten nach SED_ideal_median/Oy+.....	101

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Strahlungsrelevante Größen und Einheiten (Hering et al., 2001)	9
Tabelle 2 Beschreibung der, zur Extinktion der solaren Strahlung beitragende, atmosphärischen Bestandteile (Wald, 2007)	20
Tabelle 3 Eigenschaften verschiedener Dosimeter im Vergleich (Strehl et al., 2021)	50
Tabelle 4 vorgegebenes 2-stufiges Klassifizierungssystem	60
Tabelle 5 UV-Index und Gewichtungskoeffizienten der der Wetterstation Wien (Groß-Enzersdorf).....	65
Tabelle 6 Deskriptive Statistik der 4 UVR-Exposition beschreibenden, abhängigen Variablen; Mittel = arithmetischer Mittelwert	68
Tabelle 7 Deskriptive Statistik von der Verteilung der SED/d nach Monat; Mittel = arithmetischer Mittelwert	75
Tabelle 8 Deskriptive Statistik von der Verteilung der SED/d+ nach Monat; Mittel = arithmetischer Mittelwert	75
Tabelle 9 Relative Änderung in % von SED/d zu SED/d+ nach Monat; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	75
Tabelle 10 Deskriptive Statistik von SED/d nach Körperstelle des Messgeräts; Mittel = arithmetischer Mittelwert	76
Tabelle 11 Deskriptive Statistik von SED/d+ nach der Körperstelle des Messgeräts; Mittel = arithmetischer Mittelwert	77
Tabelle 12 Deskriptive Statistik von SED_ideal_madian/d+ nach der Körperstelle des Messgeräts; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	78
Tabelle 13 Relative Änderung in % von SED/d zu SED/d+ und SED/d zu SED_ideal_meadian/d+ nach Körperstelle des Messgeräts; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	78
Tabelle 14 Deskriptive Statistik der SED/d nach Beschattungsindex; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	83

Tabelle 15 Deskriptive Statistik der SED/d+ nach Beschattungsindex; Mittel = arithmetischer Mittelwert	83
Tabelle 16 Relative Änderung in % der statistischen Deskriptoren der BSI-Kategorien von SED/d; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	83
Tabelle 17 Relative Änderung in % der statistischen Deskriptoren der BSI-Kategorien von SED/d+; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	83
Tabelle 18 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d nach Region; Mittel = arithmetischer Mittelwert	86
Tabelle 19 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d+ nach Region; Mittel = arithmetischer Mittelwert	86
Tabelle 20 Relative Änderung in % der Verteilung der SED/d zu SED/d+ und SED/d zu SED_ideal_median/d+ nach Region; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	86
Tabelle 21 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d nach Höhenstufe; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	91
Tabelle 22 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED_ideal_max/d+ nach Höhenstufe; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	92
Tabelle 23 Relative Änderung in % der Verteilung der SED/d zu SED_ideal_max/d+ nach Höhenstufen; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	92
Tabelle 24 Relative Änderung in % der statistischen Deskriptoren der Höhenstufen-Kategorien von SED/d; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	93
Tabelle 25 Relative Änderung in % der statistischen Deskriptoren der Höhenstufen-Kategorien von SED_ideal_max/d; Mittel = arithmetischer Mittelwert	93
Tabelle 26 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d nach Berufsgruppe; W.M.G. = Weitere mögliche Gruppen; Mittel = arithmetischer Mittelwert	95
Tabelle 27 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Berufsgruppen; W.M.G. = Weitere mögliche Gruppen; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	95
Tabelle 28 Relative Änderung in % von SED/d zu SED_ideal_median/d+ nach Berufsgruppen; W.M.G. = Weitere mögliche Gruppen; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	95
Tabelle 29 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d nach Tätigkeiten; F., D., S.: Fassader, Dachdecker, Spengler; H.,K.: Hüttenwirt, Kellner; Lawinenv.: Lawinenverbauer; Seilbahnb.: Seilbahnbeschäftigte; S.,T.: Sportler, Trainer; Mittel = arithmetischer Mittelwert	97
Tabelle 30 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED_ideal_median/d+ nach Tätigkeiten; F., D., S.: Fassader, Dachdecker, Spengler; H.,K.: Hüttenwirt, Kellner; Lawinenv.: Lawinenverbauer; Seilbahnb.: Seilbahnbeschäftigte; S.,T.: Sportler, Trainer; Mittel = arithmetischer Mittelwert ...	98

Tabelle 31 Relative Änderung in % von SED/d zu SED_ideal_median/d+ nach Tätigkeiten; F., D., S.: Fassader, Dachdecker, Spengler; H.,K.: Hüttenwirt, Kellner; Lawinenv.: Lawinenverbauer; Seilbahnb.: Seilbahnbeschäftigte; S.,T.: Sportler, Trainer; Mittel = arithmetischer Mittelwert....	98
Tabelle 32 Deskriptive Statistik der Verteilung der SED/d nach Tätigkeiten NEU; GH = Gewächshaus; AD = Außendienst; GL = Garten- und Landschaftspflege; WLW = Wildbach- und Lawinenverbau; a. = allgemein; Mittel = arithmetischer Mittelwert	99
Tabelle 33 Deskriptive Statistik der UVR-Jahrsexposition der Berufsgruppen nach SED_ideal_median/Oy+; W.M.G. = Weitere mögliche Gruppen; Mittel = arithmetischer Mittelwert.....	100
Tabelle 34 Deskriptive Statistik der UVR-Jahrsexposition der Tätigkeiten nach SED_ideal_median/Oy+; F., D., S.: Fassader, Dachdecker, Spengler; H.,K.: Hüttenwirt, Kellner; Lawinenv.: Lawinenverbauer; Seilbahnb.: Seilbahnbeschäftigte; S.,T.: Sportler, Trainer; Mittel = arithmetischer Mittelwert	101
Tabelle 35 Deskriptive Statistik der Jahresexposition der Berufsgruppen NEU nach SED_ideal_max/Oy+, SED_ideal_median/Oy+,und SED/Oy+; SF = Sport und Freizeit; Landw. = Landwirtschaft; GLG = Garten- und Landschaftsgestaltung; Abfallw. = Abfallwirtschaft; Mittel = arithmetischer Mittelwert	102