



Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Machbarkeitsstudie zur mikroskaligen
Modellierung von UV-Belastungen in urbanen
Umgebungen für verschiedene
Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention

Vorhaben 3618S72490

Leibniz Universität Hannover

Dr. G. Seckmeyer

Dr. E. W. Luiz

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (Ressortforschungsplan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: ePost@bfs.de

De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

BfS-RESFOR-183/21

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2021091028627

Salzgitter, September 2021

Machbarkeitsstudie zur mikroskaligen Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention

Ergebnisbericht zum Vorhaben 3618S72490

Hannover, den 25.02.2021, Überarbeitung: 11.4.2021

Auftragnehmer:

Leibniz Universität Hannover,

Institut für Meteorologie und Klimatologie

Dr. G. Seckmeyer, Dr. Eduardo Weide Luiz (verantwortlich für den Bericht)

INHALT

TABELLENVERZEICHNIS.....	3
<i>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</i>	4
1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG	7
2 EINZELZIELSETZUNG.....	8
2.1. <i>Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik</i>	8
2.2. <i>Erstellen eines Parameterkatalogs</i>	9
2.3. <i>Allgemeine Bewertung der Parameter</i>	9
2.4. <i>Bewertung der Parameter hinsichtlich GIS-basierter Modellierungsprogramme und Berichtslegung</i>	9
3 METHODIK.....	9
3.1. <i>Komponenten der Solaren Strahlung</i>	9
3.2. <i>LibRadtran Model</i>	10
4 Ergebnisse.....	11
4.1. <i>Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik</i>	11
4.1.1. <i>Messungen der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke</i>	11
4.1.2. <i>Vereinfachte Lösungen für die Schattenanalyse</i>	12
4.1.3. <i>Mikroskalige Strahlungsmodellierung bei teilverschatteten Bedingungen</i>	12
4.1.4. <i>Strahlungstransfermodelle</i>	13
4.1.5. <i>GIS basierte Modelle</i>	14
4.2. <i>Parameterkatalog</i>	16
4.2.1. <i>Parameter für Makro- und Mikroskala</i>	16
4.2.2. <i>Parameter der Mikroskala</i>	19
4.3. <i>GIS-Dateiformate</i>	23
4.4. <i>Auswirkungen der Hauptparameter auf die Modellierung der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke</i>	24
4.4.1. <i>Oberflächenhöhe</i>	24
4.4.2. <i>Albedo</i>	24
4.4.3. <i>Aerosol</i>	25
4.4.4. <i>Ozonsäule</i>	26
4.4.5. <i>Wolken</i>	27
4.5. <i>Mikroskalige Auswirkungen der Strahldichte</i>	28
4.5.1. <i>Albedo</i>	28
4.5.2. <i>Aerosol</i>	29
4.5.3. <i>Ozonprofil</i>	30
4.5.4. <i>Wolken</i>	31
4.5.5. <i>Reflektion</i>	32
5 DISKUSSION.....	33
6 EMPFEHLUNGEN	35
7 LITERATUR.....	36

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Relevante Parameter zur Berechnung des UVI und eine grobe Abschätzung der eingeführten Unsicherheit in einer praktischen Abschätzung. 16

Tabelle 2. Breitband-UV-Albedo-Messungen von meist künstlich hergestellten Oberflächen in Prozent, wie in der Literatur berichtet. Die ID-Nummern in der oberen Reihe entsprechen den ID-Nummern, die in Joanna Turner & Parisi (2018) vergeben wurden..... 22

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Biologische Aktionsspektren für Erytheme von der CIE (1998) zusätzlich zur spektralen Prävitamin-D3-Synthese und den extrapolierten Daten von der CIE (2006).....	7
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Größen Strahldichte und Bestrahlungsstärke	10
Abbildung 3: Gewichtete Verteilung der diffusen erythemgewichteten Strahldichte (in $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$) bei klarem Himmel für städtische atmosphärische Bedingungen	11
Abbildung 4: Grafische Darstellung als hemisphärische Bilder eines Expositionsmodells mit den wichtigsten Einflussparametern: Strahlungsverteilung, städtische Hindernisse und kombinierte Wirkung	13
Abbildung 5: Beispiele von Himmelsprofilen, die mit Fischaugen-Kamerasystemen und mit morphologischen 3D-Daten mit Bäumen und Gebäuden, wie sie vom SkyHelios-Modell im Produktionsmodus erzeugt wurden	20
Abbildung 6: Jährliche Variabilität der Baumblattbedeckung, aufgenommen mit Bildern von einem Fußweg in Hannover, Deutschland.....	23
Abbildung 7: Skizze eines Beispiel-Strandbereichs, dargestellt als regelmäßiges Raster und vektorbasierte Polygone.....	24
Abbildung 8: Variabilität der erythemwertgewichteten UV-Bestrahlungsstärke für verschiedene Albedowerte in verschiedenen Höhen und Ozonwerten	25
Abbildung 9: Variabilität der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke und Verhältnis zwischen diffuser und globaler Bestrahlungsstärke für verschiedene Höhenlagen unter verschiedenen Aerosolbedingungen.	26
Abbildung 10: Variabilität der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke und Verhältnis zwischen der diffusen und der globalen Bestrahlungsstärke für verschiedene Höhenlagen unter verschiedenen aerosolsaisonalen Bedingungen	26
Abbildung 11: Variabilität der erythemwert-gewichteten UV-Bestrahlungsstärke für verschiedene Ozonwerte in verschiedenen Höhen, für städtische und ländliche Aerosolbedingungen	27
Abbildung 12: Beispiel einer typischen Eingabedatei für den Wasserwolkengehalt (<code>wc_file</code>) auf libRadtran UVSPEC.	27
Abbildung 13: Variabilität der erythemwert-gewichteten UV-Bestrahlungsstärke bei bewölktem und klarem Himmel	28
Abbildung 14: Gewichtete diffuse Strahldichteverteilung (in $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$) für städtische atmosphärische Bedingungen unter dem Schatten eines künstlichen Gebäudes.....	28
Abbildung 15: Variabilität der erythemwertgewichteten diffusen UV-Bestrahlungsstärke für verschiedene Albedo-Stufen in verschiedenen Höhen für unverschattete und verschattete Bedingungen.....	29
Abbildung 16: Variabilität der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke mit der Höhe für unverschattete und verschattete Bedingungen für verschiedene Aerosoleigenschaften.....	30

Abbildung 17: Variabilität der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke für verschiedene Ozonwerte in unterschiedlichen Höhen, für städtische Aerosolbedingungen.....	30
Abbildung 18: Gewichtete diffuse Strahldichteverteilung (in $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$) für städtische atmosphärische Bedingungen bei Vorhandensein von zwei Gebäuden	31
Abbildung 19: Tagesvariabilität der erythemwertgewichteten UV-Globalbestrahlungsstärke bei bewölktem und Wolkenlos Himmel unter völlig unverschatteten Bedingungen (kein Gebäude) und mit den gleichen Konfigurationen von Abbildung 16 (mit Gebäude).....	32
Abbildung 20: Gewichtete diffuse Strahldichteverteilung (in $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$) für städtische atmosphärische Bedingungen bei Vorhandensein von zwei künstlichen Gebäuden.....	33

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieses Projekts ist zu prüfen, ob eine Modellierung der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke im mikroskaligen Raum möglich ist und welche Parameter hierbei zu berücksichtigen sind. Die Untersuchung ergab, dass eine Modellierung auch mit GIS-basierten Datensätzen möglich ist, wobei jedoch einige Vereinfachungen vorgenommen werden sollten. Damit die Rechenzeit in einem realistischen Rahmen bleibt, sollten vor allem Strahldichte-Outputs des libRadtran-UVSPEC-Modells verwendet werden und es sollten diese in Look-Up-Tables (LUTs) für verschiedene Makroskalenbedingungen gespeichert werden. Danach können die Ergebnisse für verschiedene Mikroskalen-Szenarien verwendet werden. Es verbleiben dann noch zwei Herausforderungen: Modellierung unter Baumschatten und Berücksichtigung der bidirektionalen Reflexionsfunktion. Beide können zwar auf vereinfachte Weise in der Modellierung berücksichtigt werden, aber für bestimmte Situationen könnten Fehler auftreten. Es wird vorgeschlagen mit einem vereinfachten Modell zu beginnen, dieses experimentell zu überprüfen und später zusätzliche genauere Pakete sowohl für die Baumtransmission als auch für die Spiegelreflexion zu entwickeln.

SUMMARY

The main objective of this project is to conduct a feasibility study on the methods and the parameters to be considered when modelling erythema effective UV irradiance in microscale partially shaded areas. After analyzing all relevant parameters, we concluded that it is possible to model it, even using GIS based datasets. In order to keep the computational time within reasonable limits, the proposed method shall use radiance outputs from the libRadtran UVSPEC model and store them into Look-Up-Tables (LUTs) for different macroscale conditions. After that, the results can be used for different microscale scenarios. However, this requires some simplifications, which are: modelling under tree shade and bidirectional reflection functions. Both can be modeled in simplified ways; however, errors still can occur for specific situations. The proposed idea is to begin with a simplified model and then to develop extra packages for both tree and bidirectional reflectance.

1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG

Die ultraviolette Strahlung der Sonne ist die Ursache vieler Erkrankungen, einschließlich akuter und chronischer gesundheitlicher Auswirkungen auf die Haut, die Augen und das Immunsystem (Seckmeyer et al., 2012). Zu den negativen Auswirkungen einer erhöhten UV-Exposition gehören beispielsweise Erytheme, Sonnenbrand und Keratitis (Juzeniene et al., 2011; Lucas et al., 2008). Darüber hinaus ist die UV-Strahlung ein grundlegender Parameter bei der Entstehung von Hautkrebs (Haluza et al., 2014). Auf der anderen Seite ist UV auch für die Vitamin D3-Produktion des Menschen essentiell. Es gibt Hinweise darauf, dass der Vitamin-D-Spiegel als Indikator für das Gesundheitsrisiko bei einigen Krebsarten, Infektionskrankheiten (z.B. Zahnkaries, Lungenentzündung) und Autoimmunkrankheiten (z.B. Diabetes mellitus Typ 1, Multiple Sklerose) u.a. angesehen werden könnte (Seckmeyer et al., 2012; WHO, 2008).

Der UV-Spektralbereich wird in 3 Regionen unterteilt: UVA (315-380 nm), UVB (280-315 nm) und UVC (100-280 nm). UVC-Strahlung wird in der Oberflächenanalyse normalerweise nicht diskutiert, da sie in der oberen Atmosphäre absorbiert wird. Der biologisch wirksame Teil der UV Strahlung ist von der Wellenlänge abhängig. Die relative Wirksamkeit ist in Abbildung 1 als Aktionsspektrum für das Erythem dargestellt, definiert durch die CIE 1998.

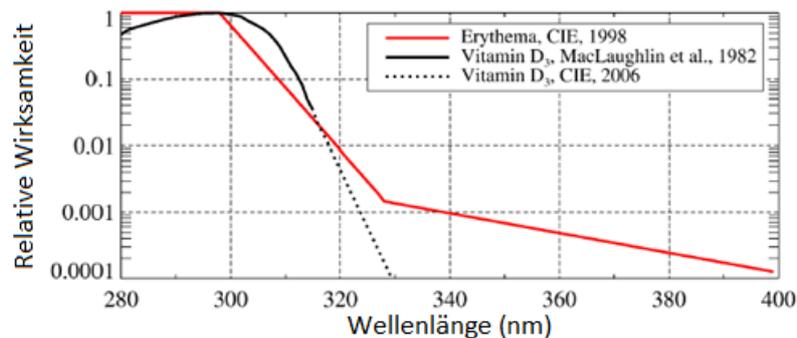


Abbildung 1: Biologische Aktionsspektren für Erytheme von der CIE (1998) (rote Linie) zusätzlich zur spektralen Prävitamin-D3-Synthese und den extrapolierten Daten von der CIE (2006).

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) und die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) haben bereits 1994 gemeinsam empfohlen, den UVI zu verwenden, um die Öffentlichkeit über mögliche Gesundheitsrisiken durch Sonneneinstrahlung zu informieren. Seit seiner Einführung in Kanada im Jahr 1992 hat sich der UVI zu einem weit verbreiteten Parameter zur Charakterisierung der solaren UV-Strahlung entwickelt (Na et al., 2014). Der einheitenlose UVI wird gemäß Gleichung 1 definiert, wobei E_{λ} die spektrale Bestrahlungsstärke und $S_{er}(\lambda)$ das Referenzwirkungsspektrum für UV-induzierte Erytheme auf der menschlichen Haut ist, wobei in der ursprünglichen Form nur das Tagesmaximum des UVI angegeben werden sollte.

$$UVI = \frac{40}{Wm^2} \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} S_{er}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Der UV-Index wurde für unverschattete Umgebungen ausgiebig untersucht, aber relevante Messungen oder Modellstudien in Megastädten mit Wolkenkratzern sind in der Literatur nur selten zu finden (Wai et al., 2017). Innerhalb einer Stadt reduzieren Bebauung und Bäume die UV-Strahlung aus bestimmten Himmelssegmenten. Reflexionen an Metallen oder Glas können dagegen die Bestrahlung erhöhen. Auf den ersten Blick scheint der moderne Lebensstil in einer städtischen Umgebung kein großes Risiko in Bezug auf UV-Strahlung zu bergen. Es gibt jedoch einige Hinweise darauf, dass empfindliche Patienten trotz nur kurzzeitiger Exposition Sonnenbrand entwickelt haben. Insbesondere Kinder halten sich auch in urbanen Umgebungen vergleichsweise häufig im Freien auf. Zur Erfassung der Bestrahlung

ist es daher notwendig, die persönliche Exposition mit hoher zeitlicher Auflösung zu messen (Schmalwieser et al., 2010) und zu modellieren.

Frühere Studien mit Schulkindern haben gezeigt, dass weniger als ein Drittel in den Vereinigten Staaten wirksamen Sonnenschutz praktiziert. In Australien wurde ebenfalls ein ähnlich schlechtes Sonnenschutzverhalten durch Jugendliche beobachtet (Cokkinides et al., 2001; Livingston et al., 2003). Für Kinder im Schulalter, die eine bedeutende Risikogruppe für die Entwicklung von durch Sonneneinstrahlung verursachten Krankheiten darstellen (Longstreth et al., 1998; Moise et al., 1999) und sich im städtischen Umfeld zu Zeiten der höchsten solaren UV-Bestrahlungsstärke aufhalten, kann das Verständnis die lokale Umgebung und die UV-Wechselwirkungen innerhalb dieser Umgebung zu verstehen, ein wichtiger Schritt zur Verringerung der mit der UV-Exposition verbundenen Risiken sein (Downs et al., 2008).

Auf Grund der gesundheitlichen Relevanz der UV Strahlung und der Tatsache, dass der Klimawandel auch zu einer verstärkten UV Exposition führen kann besteht die Notwendigkeit, Strukturen zu schaffen, die vor einer zu hohen UV Belastung in der Lebensumgebung schützen. Zur Unterstützung der Verantwortlichen, z.B. Architekten, ist es erforderlich, die UV-Belastung auch im mikroskaligen Bereich zu bestimmen (z.B. in Außenbereichen von Schulen und Kindergärten). Daher gibt es einen Bedarf an Modellen um die UV-Bestrahlung in solchen Umgebungen vorab abschätzen und planen zu können.

Die UV-Verteilung in der städtischen Gebäudeumgebung ist sehr komplex und besteht aus einer Kombination von Bereichen mit UV-Abschwächung im Gebäudeschatten, möglichen "Hotspots" am Boden aufgrund von Strahlungsreflexion durch Fassaden von Häusern. Es gibt Studien, die darauf verweisen, dass Menschen in Bodenhöhe andere UV-Expositionsraten im Vergleich zu offenen Bereichen erhalten (Wai et al., 2017). Das Hauptziel dieses Projektes ist es, eine Machbarkeitsstudie über die Methoden und die zu berücksichtigenden Parameter bei der Modellierung der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke im mikroskaligen Bereichen durchzuführen, um Aussagen über die UV-Bestrahlungsstärke und über deren Veränderung in Abhängigkeit von äußeren Strukturen treffen zu können. Am Ende soll eine Software entwickelt werden, die es erleichtert Außenflächen mit hoher UV-Bestrahlung zu identifizieren und mittels Simulation den Aufbau von Sonnenschutz-Strukturen (Bäume, Sonnensegel, etc.) und deren Effektivität im Hinblick auf Reduzierung der UV-Belastung zu visualisieren.

2 EINZELZIELSETZUNG

2.1. Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

In einem ersten Bearbeitungsschritt wird der bekannte Stand von Wissenschaft und Technik dargestellt. Gemäß Auftrag sollte untersucht werden, wie die UV-Bestrahlungsstärke auf horizontalen oder geneigten Flächen in einer teilverschatteten Umgebung so verarbeitet werden kann, dass eine GIS-basierte Visualisierung in Städten erreicht werden kann. Hierzu gehören:

- Bisherige Arbeiten des Auftragnehmers: Methoden, Daten, Vorgehensweisen und Ergebnisse;
- Wichtige Untersuchungen und Ergebnisse anderer Stellen (abgeschlossene sowie laufende Arbeiten, Literaturrecherche);
- Aktuelle Beratungen in einschlägigen nationalen und internationalen Gremien;
- Vorliegende Bewertungsmaßstäbe, die dem Vorhaben zugrunde gelegt werden können.

2.2. Erstellen eines Parameterkatalogs

Alle Parameter, die für die Modellierung der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke in mikroskaligen Räumen anzuwenden sind werden in Kapitel 4.2. aufgelistet

2.3. Allgemeine Bewertung der Parameter

Die aufgeführten Parameter sollten ausgewertet werden. Dabei wird beschrieben:

- wie die Parameter erfasst und für die weitere Datenverarbeitung zur Verfügung gestellt werden,
- auf welche Weise diese Parameter (oder Parameter-Gruppen) vereinfacht erfasst und/oder dargestellt werden können und
- welche Parameter nicht betrachtet werden müssen.

2.4. Bewertung der Parameter hinsichtlich GIS-basierter Modellierungsprogramme und Berichtslegung

Struktur und Funktionalität des Programms SkyHelios sowie anderer GIS-Modelle wird untersucht, um die Parameter im Hinblick auf GIS-basierte Modellierungsprogramme zu bewerten. Durch das Verständnis der Funktionsweise von GIS-basierten Modellierungsprogrammen und der damit verbundenen Inputparameter und Gleichungen, wird ein Vergleich dieser mit der Berechnungsmethodik für die erythemwirksame UV-Bestrahlungsstärke durchgeführt. Dadurch konnte eine Bewertung der Parameter hinsichtlich GIS-basierter Modellierungsprogramme vorgenommen und gezeigt werden, wie die Berechnungsmethodik der erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke in ein GIS-basiertes Modellierungsprogramm integriert werden kann.

3 METHODIK

Um die Machbarkeit einer mikroskaligen Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention zu untersuchen wurde die wissenschaftliche Literatur eingehend untersucht und es wurden eigene Sensitivitätsstudien mit einem Strahlungstransfermodell durchgeführt. In Kapitel 3.1. werden die wesentlichen Komponenten und physikalischen Größen eingeführt, die im Ergebniskapitel verwendet werden. Kapitel 3.2. beschreibt das für die späteren Sensitivitätsstudien verwendete Strahlungstransfermodellpaket libratran.

3.1. Komponenten der Solaren Strahlung

Die von der Sonne ausgehende Strahlung steht in vielfältiger Wechselwirkung mit den atmosphärischen Parametern. Diese Wechselwirkungen ergeben schließlich ein sehr komplexes Muster, das räumlich, zeitlich und spektral variiert. Zur Charakterisierung der Strahlung, die den Boden erreicht, werden üblicherweise vor allem zwei physikalische Größen verwendet: Strahldichte und Bestrahlungsstärke (DIN 5031, 1982). Die Strahldichte (L) stellt eine Richtungsinformation dar und wird spektral als die Strahlungsenergie (dQ) pro Zeitintervall (dt), pro Wellenlänge ($d\lambda$), pro Fläche (dA) und pro Raumwinkel ($d\Omega$) auf einer zur Quelle senkrechten Fläche beschrieben (Gleichung 2 und Abbildungen 2a und 2b) (Seckmeyer et al., 2018b).

$$L_{\lambda} = \frac{dQ}{dt \cdot d\lambda \cdot dA \cdot \cos\alpha \cdot d\Omega}; \left[\frac{W}{m^2 nm sr} \right] \quad (2)$$

Andererseits stellt die spektrale Bestrahlungsstärke E_λ die aus allen Richtungen kommende Strahlung dar und ist definiert als die Strahlungsenergie (dQ) pro Zeitintervall (dt), pro Wellenlänge ($d\lambda$) und pro Fläche (dA) von einem beliebigen Ursprung, die auf ein horizontal ausgerichtetes Flächenelement auftrifft (Gleichung 3 und Abbildung 2c).

$$E_\lambda = \frac{dQ}{dt \cdot d\lambda \cdot dA} = \int_{2\pi} L_\lambda \cdot \cos\alpha d\Omega; \left[\frac{W}{m^2 nm} \right] \quad (3)$$

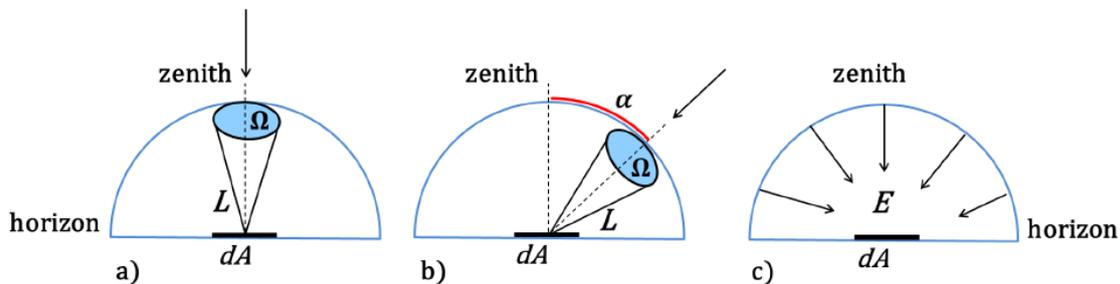


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Größen Strahldichte (a) und (b) und Bestrahlungsstärke (c). In (a) steht der Empfangsbereich dA senkrecht zur Quelle, während in (b) der Winkel α zwischen der Flächennormalen und dem einfallenden Strahl 45° beträgt. Das Diagramm (c) visualisiert die Bestrahlungsstärke, bei der die Strahlung aller Ursprünge von dem Flächenelement dA empfangen wird.

Darüber hinaus kann die solare Strahlung auch in verschiedene Komponenten aufgeteilt werden, je nach ihrem Weg bis zur Oberfläche. Die direkte Komponente wird verwendet, um den Teil der solaren Strahlung zu beschreiben, der sich auf einer geraden Linie von der Sonne bis zu einer senkrecht dazu aufgestellten Messfläche bewegt. Die diffuse Komponente hingegen beschreibt den Teil der solaren Strahlung, der von Molekülen und Partikeln in der Atmosphäre gestreut wurde, aber trotzdem bis zur horizontalen Oberfläche gelangt ist. Die reflektierte Komponente beschreibt die solare Strahlung, die an nicht-atmosphärischen Oberflächen wie dem Boden, Bäumen oder sogar Gebäuden in der Nähe reflektiert wurde. Die Summe aller Komponenten wird als Globalstrahlung bezeichnet.

3.2. LibRadtran Modell

Strahlungstransfermodelle sind ein häufig genutztes Werkzeug für die Analyse der Einstrahlungsbedingungen (Grant et al., 2002; Machete et al., 2018; Marsh, 2005; Nazarian et al., 2017; Schrepf et al., 2017; Seckmeyer et al., 2013), da sie im Prinzip für jeden Ort der Erde eingesetzt werden können und Ergebnisse mit einem begrenzten Satz von Eingabedaten erzielt werden können. Das libRadtran-UVSPEC-Strahlungstransportmodell (Emde et al., 2016) berechnet das Strahlungsfeld in der Erdatmosphäre für eine Vielzahl atmosphärischer Bedingungen. Ein Merkmal von libRadtran ist, dass der Benutzer eine Auswahl verschiedener RTE-Gleichungslöser (RTE = Radiative Transfer Equation) hat, die in der Eingabedatei ausgewählt werden. Der Solver RTE DISORT (Stamnes et al., 2000) wird standardmäßig in libRadtran verwendet und kann Strahldichten, Bestrahlungsstärke und aktinische Flüsse in planparalleler Geometrie berechnen. Darüber hinaus ist das umfassendste RTE in libRadtran das Monte-Carlo-Modell MYSTIC (Mayer, 2009), das zur Berechnung von Strahldichten in bewölkten Atmosphären verwendet werden kann. Diese Berechnungen werden jedoch in 3D-Umgebungen durchgeführt und erfordern eine sehr detaillierte und spezifische Beschreibung der Wolken. LibRadtran UVSPEC bietet auch einen Satz von sechs Standardatmosphären: *Midlatitude Summer*, *Midlatitude Winter*, *Sub-Arctic Summer*, *Sub-Arctic Winter*, *Tropical* und *US-Standard*. Sie enthalten Profile von Druck, Temperatur, Luftdichte und Konzentrationen von Ozon, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid und Stickstoffdioxid. Ein Nachteil von Modellen wie libRadtran ist die relativ lange Rechenzeit, die manchmal Anwendungen bei der Analyse der erythemgewichteten Bestrahlung in teilverschatteten Gebieten verhindern kann.

In dieser Studie wurden zunächst Strahldichte und Bestrahlungsstärke unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen mit libRadtran modelliert. Abbildung 3 zeigt die erythemgewichtete diffuse Strahldichteverteilung (in $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$) für städtische atmosphärische Bedingungen. Diese Ergebnisse werden dann mit Schatten-Informationen (oder dem weiter unten eingeführten Solar View Faktor) kombiniert um die Strahlungsverhältnisse mikroskaliger Standorte zu analysieren.

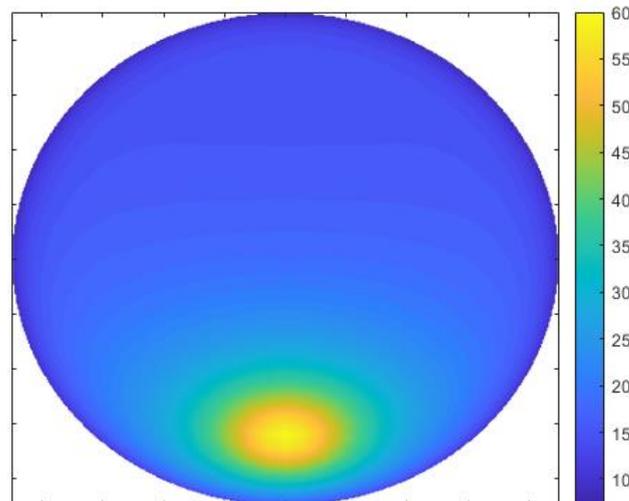


Abbildung 3: Verteilung der erythemgewichteten Strahldichte (in $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$) bei klarem Himmel für städtische atmosphärische Bedingungen. Die globale erythemgewichtete Bestrahlungsstärke hat in dieser Situation einen Wert von $89 \text{ mW}/\text{m}^2$. Die Modellierung wurde mit einem Ozonwert von 300 DU, einem solaren Zenitwinkel von 45° , einem Azimut von 180° und dem Löser (solver) DISORT RTE mit LibRadtran durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1. Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik

4.1.1. Messungen der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke

Messungen haben das Potential reale Bedingungen gut zu erfassen, aber sie sind häufig nicht auf andere Orte bzw. andere atmosphärische Bedingungen übertragbar. Eine mögliche Alternative stellen Langzeitklimatologien oder satellitengestützte Ableitungen dar. Allerdings beziehen sich diese meist nur auf die Bestrahlungsstärke ohne Verschattung, d.h. es fehlt die Richtungsinformation der einfallenden Strahlung. Diese richtungsabhängige Information ist aber notwendig um die Bestrahlungsstärke bei einer teilweise abgeschatteten Umgebung mit ausreichender Genauigkeit abzuschätzen. Dieser Mangel an Richtungsinformation bringt die Notwendigkeit mit sich, zusätzlich zur Bestrahlungsstärke auch die Strahldichte (richtungsabhängig) zu modellieren wie in (Grant, 1997; Grant et al., 1997; Religi et al., 2016), oder vereinfachte Parametrisierungen zu verwenden, um mit den Schatteneffekten zurecht zu kommen (Calcabrini et al., 2019; Parisi et al., 2019). Zudem sind viele der verfügbaren Datensätze normalerweise nicht spektral aufgelöst, was weitere erhebliche Unsicherheiten bei der UV-Analyse mit sich bringt. Daraus ergibt sich, dass Messungen der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke ohne weitere umfangreiche Zusatzinformationen nicht dazu geeignet sind eine mikroskalige Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention zu ermöglichen.

4.1.2. Vereinfachte Lösungen für die Schattenanalyse

Es wurden einige vereinfachte Methoden analysiert, die entwickelt wurden, um die Komplexität der Modellierung der Strahldichte unter teilverschatteten Bedingungen zu reduzieren und ihre Anwendbarkeit auf die Ziele dieser Studie zu überprüfen. Zum Beispiel schlugen Parisi et al. (2019) den *Protection Factor* (PF) vor, der das Verhältnis zwischen der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke auf eine unverschattete horizontal stehende Fläche ($UVBE_{Global}$) und der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Fläche mit Schatten ($UVBE_{Shade}$) beschreiben soll. Die Methode $UVBE_{Shade}$ zu berechnen ist dabei ähnlich wie ein Ansatz, der für Situationen unter Baumkronen verwendet wird (Grant, 1997). Dabei wird sowohl die diffuse als auch die globale (horizontale) erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke unter Verwendung des deterministischen Modells PRO6UV (Deo et al., 2017) für klare Himmelsbedingungen abgeschätzt. Die Autoren schlagen auch die Verwendung anderer Modelle wie UVSPEC libRadtran vor (Emde et al., 2016). In dieser Vereinfachung wird keine Strahldichte (nur die Bestrahlungsstärke) modelliert, aber sie nehmen an, dass das direkte Sonnenlicht niemals die Oberflächen/Nutzer erreicht, was eine zu starke Vereinfachung ist, die nicht den Erwartungen dieses Projekts entspricht. Andere vereinfachte Lösungen wurden von Calcabrini et al. (2019) vorgeschlagen. Dabei wird ein der *Sky View Factor* (SVF) (Johnson and Watson, 1984) und der *Sun Coverage Factor* (SCF) eingeführt. Der SVF einer Fläche ist ein geometrischer Parameter, der den Anteil des Himmels darstellt, der sichtbar ist. Das Hauptproblem der Methode ist das Fehlen von Richtungsinformationen. So haben z.B. Objekte, die sich in der nördlichen Region befinden, die gleiche Auswirkung wie Objekte, die sich im Süden befinden. Dies entspricht nicht der Realität. Daher handelt es sich hier um eine grobe Vereinfachung, da Objekte im Norden einen viel geringeren Einfluss auf die Sonneneinstrahlung haben. Um den Schatteneinfluss auf der Grundlage der Sonnenbewegung besser abschätzen zu können, führten sie darüber hinaus den SCF ein, der als das Verhältnis zwischen der Zeit, in der die Sonne durch Hindernisse blockiert wird, und der gesamten Sonnenscheindauer definiert ist. Der SCF hat den Vorteil, dass er einfach zu verstehen ist und dass er die Sonnenbewegung berücksichtigt, er stellt jedoch das UV-Strahlungsfeld nicht korrekt dar, da der Großteil der diffuse Anteil der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke überwiegt und sogar oft dominant ist. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alle diese Methoden die Analyse der erythemwirksamen Strahlung zu einfach und damit unkorrekt darstellen. Daher sind sie für die Anforderungen dieser Studie ungeeignet.

4.1.3. Mikroskalige Strahlungsmodellierung bei teilverschatteten Bedingungen

Die spektrale Strahldichte ist ein physikalische Größe, welche die Richtungsinformation der auf eine Oberfläche auftreffende Strahlung beinhaltet, und sie ist notwendig, um die Schatteneffekte abschätzen zu können. Dazu sollten Strahlungstransportmodelle (RTMs = *Radiative Transfer Models*) verwendet werden, die die wellenlängenabhängige Mehrfachstreuung in der Atmosphäre berücksichtigt. Nur damit lässt sich am Ende sowohl die direkte als auch die diffuse Himmelsstrahlung korrekt modellieren. Nur dann lassen sich auch Abschattungen und Reflexionen richtig beschreiben. Abbildung 4 enthält ein Beispiel für die mehrstufige Vorgehensweise. Es beginnt mit der von libRadtran modellierten erythemgewichteten Strahldichte. Auf dieses Modell wird eine „Maske“ mit der Verschattung gelegt, die mit einer Allsky-Kamera ermittelt wurde. Das Verfahren wird im Detail bei Schrempf et al 2017 beschrieben. Je nach Anwendung kann es zweckmäßig sein die erforderliche Rechenzeit vorab abzuschätzen, um das beste Modell auszuwählen, u.a. weil selbst kleine Unterschiede zu großen Problemen führen können. Eine sehr effiziente Methode zur Verkürzung der Rechenzeit ist die Verwendung von Look-up-Tabellen (LUTs) (z.B. FastRT, (Engelsen and Kylling, 2005)), mit denen eine gute Modellierungsqualität aufrechterhalten werden kann. Diese Modelle berechnen die Bestrahlungsstärke durch Interpolationen und Extrapolationen der atmosphärischen Bedingungen auf der Grundlage früherer Berechnungen aus RT-Modellen.

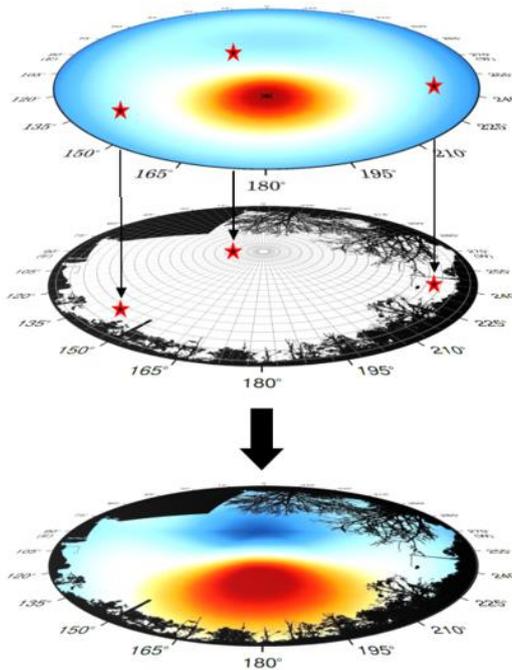


Abbildung 4: Grafische Darstellung der räumlichen Strahlungsverteilung mit Hilfe hemisphärischer Bilder eines Expositionsmodells. Strahlungsverteilung (erste Ebene) unverschattet, städtische Hindernisse bzw. Schatten (zweite Ebene) und kombinierte Wirkung für eine aufrecht stehende Person, die nach Süden schaut (dritte Ebene). Für diese Darstellung wurde eine Grafik von (Schrempf et al., 2017) für diese Studie angepasst.

Andere Lösungen könnten verwendet werden, wenn direkte und diffuse spektrale UV-Bestrahlungsstärkemessungen verfügbar sind. Mit diesen Daten kann die Strahldichte-Verteilung über den Himmel mit vereinfachten isotropen/anisotropen Annahmen unter Verwendung des solaren Zenitwinkels und der Strahldichte in Abhängigkeit vom Einfallswinkel und Azimutwinkel abschätzen (Grant et al., 1997; Kuchinke and Nunez, 2003; Religi et al., 2016). Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass tatsächlich gemessene Daten verwendet werden, allerdings wie schon vorher erwähnt, sind solche Lösungen mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet. So können sich die tatsächlichen Strahlungsbedingungen sehr von diesen Lösungen unterscheiden, da

- a) die sich Strahlungsverhältnisse während der Messungen sich durch Änderungen der Atmosphärischen Bedingungen stark unterscheiden können
- b) weil die Annahme der isotropen Strahldichteverteilung nicht zutreffend ist
- c) und weil die Messungen häufig nicht spektral sind, was zu falschen Annahmen über den Effekt von Abschattung und Reflektion führen kann

Aus diesen Gründen ist der Analyse der spektralen Strahldichteverteilung eindeutig der Vorzug zu geben.

4.1.4. Strahlungstransfermodelle

Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben sind Strahlungstransfermodelle ein häufig verwendetes Werkzeug bei der Analyse der Einstrahlungsbedingungen (Grant et al., 2002; Machete et al., 2018; Marsh, 2005; Nazarian et al., 2017; Schrempf et al., 2017; Seckmeyer et al., 2013), da sie im Prinzip für jeden Ort der Erde eingesetzt werden können und Ergebnisse mit einem begrenzten Satz von Eingabedaten erzielt werden können. Weiterhin lassen sie es zu, die erythemgewichtete Strahldichte und Bestrahlungsstärke im makroskaligen Bereich zu ermitteln, welche dann später in mikroskaligen Umgebungen verwendet werden kann. Es gibt

viele Modelloptionen für die Berechnung der spektralen Strahldichte mit unterschiedlicher Genauigkeit, Komplexität und Rechenzeit (z.B. Mehrfachstreuungs-Spektralmodelle (Emde et al., 2016; Rozanov et al., 1997; Stamnes et al., 1988), schnelle Spektralmodelle (Diffey, 1977; Madronich, 1993; Schipnick and Green, 1982) und empirische Modelle (Burrows et al., 2007; Renaud et al., 2000). Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Nachschlagetabellen-Modellen („Look up tables“ (LUTs)) (z.B. FastRT (Engelsen and Kylling, 2005)), die eine gute Modellierungsqualität mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand verbinden. Diese Modelle berechnen die Bestrahlungsstärke durch Interpolationen und Extrapolationen der atmosphärischen Bedingungen auf der Grundlage früherer Berechnungen aus anderen Modellen.

4.1.5. GIS basierte Modelle

Ziel dieser Studie ist es die Machbarkeit einer Modellierung UV-Bestrahlungsstärke in verschatteter Umgebung zu untersuchen. Dazu sollten komplexe Mehrfachstreuungs-RT-Modelle verwendet werden, da nur sie eine gute Qualität der Ergebnisse erwarten lassen. Wie in Kapitel 3.2 erwähnt, ist das LibRadtran-Modell ein zuverlässiges Modell mit erwiesenermaßen guten Ergebnissen und wurde in vielen anderen Studien verwendet. Der Hauptnachteil solcher Qualitätsmodelle ist die relativ längere Rechenzeit, die bei einigen GIS-Anwendungen ein Hindernis darstellen kann. Eine Lösung für dieses Problem ist die Verwendung von LUTs aus früheren modellierten Daten für spezifische Bedingungen, auf die später von der endgültigen Software zugegriffen werden kann. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Benutzer die notwendigen spezifischen Bedingungen auswählen zu lassen, die Rechenzeit abzuwarten und die Ergebnisse in neuen LUTs zu speichern, die später von der Software verwendet werden können. In diesem Kapitel werden die verschiedenen bestehenden GIS-basierten Modelle analysiert.

GIS-Modelle sind Modelle, die räumliche Informationen verwenden, um verschiedene Eigenschaften zu modellieren. Diese Modelle können Grafikprozessoren verwenden, die in Simulationsmodelle integriert werden können, um z.B. eine dreidimensionale Strömungsvisualisierung oder eine Strahlungsabschätzung durchzuführen. Einen Schritt weitergehend ist es sogar möglich, moderne Grafikhardware als Allzweck-Array-Prozessoren einzusetzen. Diese Ideen und Ansätze nutzen eine preiswerte Massenproduktionstechnologie, um spezifische Probleme zu lösen. Diese Technologie kann zur Modellierung von Klimabedingungen oder klimarelevanten Parametern auf der Mikroskala im Hinblick auf die urbane Morphologie eingesetzt werden. Um dieser Herausforderung gerecht zu werden, wurde der Schwerpunkt der Analysen vom einzelnen Gebäude auf größere geografische Gebiete verlagert und die neuen Modelle mussten ihre Fähigkeit unter Beweis stellen, mit dem komplexen Muster von „Schatten“ umzugehen, die von der Topografie und der bebauten Umgebung geworfen werden und die Reflexionen von städtischen Oberflächen auf die Bestrahlungsstärke berücksichtigen. GIS-Werkzeuge bieten aufgrund ihrer Fähigkeit, geografische und räumliche Daten anzuzeigen und zu bearbeiten, eine geeignete Umgebung für die Entwicklung und Ausführung von solaren Strahlungsmodellen. Das einfachste Modell geht davon aus, dass die diffuse Strahlung gleichmäßig aus dem gesamten oberen Halbraum eintrifft (Liu and Jordan, 1960). Die solare Strahlung besteht demnach aus drei Komponenten, der direkten Strahlung, der isotropen diffusen Strahlung und der diffusen reflektierten Strahlung vom Boden. Realistischere Modelle enthalten eine anisotropische diffuse Strahlung, wie z.B. das Modell von Hay (Hay und Davis, 1980), welches neben einem isotropischen Teil einen zirkumsolaren Bereich enthält, der Beiträge zur diffusen Strahlung auf einer geneigten Oberfläche berücksichtigt und durch einen Anisotropie-Index beschrieben wird.

Es gibt einige GIS-basierte Modelle, die sich mit der Strahlungsmodellierung auf einer bestimmten Ebene befassen. Eine ihrer Haupteinschränkungen ist jedoch die Verwendung einfacherer Methoden als Kompromiss zwischen Genauigkeit und angemessener Rechenzeit (Freitas et al., 2015). Viele Strahlungsmodelle verwenden zum Beispiel einfachere Methoden, obwohl sie auf der nicht korrekten Annahme der Isotropie (Gleichverteilung der einfallenden

Strahldichte) der diffusen und der reflektierten Strahldichte basieren. Weitere Herausforderungen ergeben sich aus der korrekten Darstellung von Oberflächen und Vegetation. Die Modelle RADIANCE (Ward, 1994), Daysim (Mardaljevic, 2000) und SOLENE (Miguet and Groleau, 2001) gehören zu den besten Programmen, die eine detaillierte Simulation der Lichtanisotropie und der Spekularität (jedoch nicht der Spektralität) sowie der Inter- und Multireflexionen durchführen können, allerdings mit sehr langer Rechenzeit. Die Spekularität beschreibt dabei ein Maß für den Glanz von Oberflächen um diffus streuende von hochglänzenden Oberflächen unterscheiden zu können.

SkyHelios (Matzarakis and Matuschek, 2011) ist ein Mikroskalenmodell zur Berechnung mikro-meteorologischer Bedingungen in komplexen städtischen Umgebungen. Es wurde mit Laufzeit-Effizienz unter Verwendung von 3D-Grafik-Hardware zur Lösung der komplexen Berechnungen entwickelt und erlaubt die Berechnung von meteorologischen und anderen Hilfsparametern. Die Haupteinschränkungen des Modells liegen in der Verwendung einer vereinfachten nichtspektralen Strahlungsmodellierung und indirekter isotroper Berechnungen der reflektierten Strahlung (komplexe Modellierung wurde zur Laufzeit als zu zeitaufwändig befunden) (Fröhlich and Matzarakis, 2018). In SkyHelios werden die Komponenten der solaren Strahlung nach den Gleichungen 4-9 berechnet. Aus Gleichung 4 (Jendritzky et al., 1990; VDI, 2019) wird eine anfängliche Globalstrahlung (G_0) abgeleitet.

$$G_0 = 0.84 \cdot I_0 \cdot \cos(SZA) \cdot e^{\left(\frac{-0.027 \cdot \frac{pr}{pr_0} \cdot T_L}{\cos(\varphi)}\right)} \quad (4)$$

wobei I_0 (W/m^2) die anfängliche direkte Sonneneinstrahlung an der Oberseite der Atmosphäre ist, die SZA ($^\circ$) der solare Zenitwinkel, pr der tatsächliche Luftdruck in hPa, pr_0 der Druck auf Meereshöhe für eine Standardatmosphäre (1013 hPa) und T_L (dimensionslos) der Linke-Trübungsfaktor ist.

Die direkte Sonnenbestrahlungsstärke (I) wird nach Gleichung 5 (Jendritzky et al., 1990), als Funktion von I_0 , SZA , T_L der relativen optischen Luftmasse r_{opt} (dimensionslos), der vertikalen optischen Dicke einer Standardatmosphäre δ_{opt} (dimensionslos), pr und der Wolkendecke cc in Oktas (0 = klarer Himmel bis 8 = bedeckter Himmel) geschätzt.

$$I = I_0 \cdot \cos(SZA) \cdot e^{\left(-T_L \cdot \delta_{opt} \cdot r_{opt} \cdot \frac{p}{p_0}\right)} \cdot \left(1 - \frac{cc}{8}\right) \quad (5)$$

Der diffuse Anteil wird als Summe der isotropen (D_{iso}) und anisotropen diffusen Strahlung (D_{aniso}), beide in W/m^2 (Valko, 1966). Der isotrope Anteil kann mit Gleichung (6) berechnet werden.

$$D_{iso} = (G_0 - I_{clear}) \cdot \left(1 - \frac{I_{clear}}{I_0 \cdot \cos(SZA)}\right) \cdot \Psi_S \quad (6)$$

Diese Gleichung setzt die direkte Sonneneinstrahlung unter der Annahme eines klaren Himmels ohne Wolken voraus I_{clear} (W/m^2). Die anisotrope Komponente D_{aniso} (Equation 7) kann durch eine ähnliche Gleichung approximiert werden, wenn die Sonne sichtbar ist. Für den Fall, dass die Sonne durch den Horizont oder durch Hindernisse verdeckt ist, wird D_{aniso} zu 0.

$$D_{aniso} = (G_0 - I_{clear}) \cdot \left(\frac{I_{clear}}{I_0 \cdot \cos(\varphi)}\right) \quad (7)$$

Für unklare Himmelsbedingungen wird eine lineare Korrektur nach Valko, (1966) angewendet (Gleichung 8). Sie berücksichtigt die Wolkendecke (cc) in Oktas:

$$D_0 = D_{clear} \cdot \left(1 - \frac{cc}{8}\right) + D_{overcast} \cdot \frac{cc}{8} \quad (8)$$

Für einen vollständig bedeckten Himmel ($cc = 8/8$) schlägt Valko, (1966) eine vereinfachte Gleichung vor:

$$D_{overcast} = 0.28 \cdot G_0 \cdot SVF \quad (9)$$

In diesem Fall kann die Globalstrahlung durch Skalierung der anfänglichen Globalstrahlung (G_0) mit 0,28 und dem lokalen Himmelssicht-Faktor (SVF) approximiert werden (Valko, 1966). Es ist wichtig zu erwähnen, dass ohne die Berechnung der Strahldichte die Gleichungen keine Richtungsabhängigkeit haben und obwohl sie für die Berechnung des thermischen Komforts ausreichend sein können, sind sie für die Abschätzung der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke zu einfach und damit unzureichend.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass einige GIS-Modelle nicht auf die besonderen Erfordernisse der UV-Strahlung angepasst sind und teilweise sehr rechenintensiv sind. SkyHelios weist zwar relativ Rechenzeiten auf, ist aber nicht für eine mikroskalige Berechnung der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke geeignet. Daher sollte für die Schätzung der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke in mikroskaligen Umgebungen eine neue Software entwickelt werden, die einige spezifische Techniken aus verschiedenen Softwareprogrammen und Methoden miteinander kombiniert. Eine solche Entwicklung nicht nur sinnvoll, sondern auch möglich.

4.2. Parameterkatalog

In diesem Kapitel wird ein Überblick über alle Parameter gegeben, die sich direkt oder indirekt auf mikroskalige teilverschattete Umgebungen auswirken, von den makroskaligen atmosphärischen Parametern bis zu lokalen Parametern wie Strukturen und Schatten. Die Darstellung basiert auf Literaturstudien und wird anhand eigener Berechnung noch weiter verdeutlicht.

4.2.1. Parameter für Makro- und Mikroskala

Es gibt eine Reihe von Faktoren, die die UV-Strahlung sowohl in der Makro- als auch in Mikroskala beeinflussen. Der wichtigste Faktor, der die erythemwirksame Bestrahlungsstärke bestimmt, ist die Sonnenhöhe. Dadurch kann die Abhängigkeit der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke von der Tageszeit, dem Tag des Jahres, der geografischen Lage und der Höhe des Meßortes beschrieben werden (Diffey and Diffey, 2002). Weitere wichtige Faktoren, die die solare UV-Strahlung beeinflussen, sind das stratosphärische Ozon und die Bewölkung. Außerdem bestimmen weitere Faktoren die Bestrahlungsstärke, darunter die optische Dicke des Aerosols (AOD), Aerosoleigenschaften, die Albedo und Veränderungen der Spurengase (Religi et al., 2016). Tabelle 1 zeigt eine Liste relevanter Parameter zur Berechnung des UVI und eine grobe Abschätzung der eingeführten Unsicherheit in einer praktischen Prognose für die Makroskala nach (Allaart et al., 2004).

Tabelle 1: Relevante Parameter zur Berechnung des UVI und eine grobe Abschätzung der eingeführten Unsicherheit in einer praktischen Abschätzung. Quelle: Allaart et al. (2004).

PARAMETER	UNSICHERHEIT DES UVI (%)
BEDECKUNGSGRAD UND WOLKENEIGENSCHAFTEN	> 50
ALBEDO (SCHNEE)	28
OZONPROFIL	8
AEROSOL-EIGENSCHAFTEN (AOD = 0.42 ± 0.26)	10
HÖHE (1 KM)	5
GESAMTOZON (3%)	4
GEOGRAPHISCHE BREITE (1°)	3
ABSTAND VON DER SONNE ZUR ERDE	3
STRATOSPHERISCHE TEMPERATUR	2
SCHWEFELDIOXID (1 DU)	1

Im Folgenden wird der Einfluss einiger Parameter kurz erläutert:

Aerosoleigenschaften

Atmosphärische Aerosolpartikel können sowohl aus natürlichen (z.B. Bodestaub oder Meersalz) als auch aus anthropogenen Quellen (z.B. Luftverschmutzung durch die Industrie) stammen. Ihre Wirkung auf die UV-Strahlung ist sehr komplex, da die Strahlungseigenschaften von Aerosolen sowohl Streu- als auch Absorptionseigenschaften umfassen, die stark von der Wellenlänge und der relativen Feuchte abhängen (Reuder and Schwander, 1999). Darüber hinaus können Aerosole die einfallende UV-Bestrahlungsstärke indirekt beeinflussen, indem sie die Photochemie der unteren Atmosphäre verändern und so die Konzentration des troposphärischen Ozons beeinflussen oder indem sie die Wolkenbildung modifizieren (Calbó, 2005; Raptis et al., 2018). Die Abschwächung von Aerosolen im UV-Spektralbereich ist nicht vernachlässigbar, und in einigen Fällen wurde festgestellt, dass ihre Auswirkungen ebenso wichtig sind wie die Veränderungen der Ozonschichtdicke (Castro et al., 2001; Fountoulakis et al., 2016; Lamy et al., 2018; Meleti et al., 2009). Die Absorption durch Aerosole reduziert unter typischen städtischen Bedingungen die UV-Strahlung um bis zu 10-15%, obwohl an stark belasteten Standorten die Absorption auch noch stärker sein kann (Fioletov et al., 2010). Andererseits kann eine Erhöhung der optischen Dichte des Aerosols (AOD) zu einer Erhöhung der UV-Bestrahlung führen, wenn diese Erhöhung durch eine Zunahme der Menge kleiner streuender Aerosolpartikel verursacht wird (De Bock et al., 2014). Allerdings ist der Einfluss der Aerosole auf die UV-Bestrahlungsstärke aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität immer noch nicht vollständig verstanden (Hunter et al., 2019). Das Ignorieren der lokalen Variationen der Aerosole durch Änderungen der optischen Dicke kann zu Fehlern von etwa 5% im UV-Index führen (Allaart et al., 2004). Da hochauflösende Aerosoldaten nicht so einfach zu erhalten sind, wurden Simulationen mit verschiedenen Aerosoleigenschaften durchgeführt und dann in Look Up Tables gespeichert.

Gesamtozon und Ozonprofil

In den mittleren Breiten zeigt die Gesamtozonverteilung eine erhebliche Variabilität von Tag zu Tag. Sowohl Beobachtungen als auch modernste Ozonvorhersagen führen zu einer Unsicherheit von 3% bei der säulenintegrierten Ozonmenge, was zu Fehlern von 4% bei UVI-Schätzungen führt (Allaart et al., 2004). Modellsimulationen zeigen, dass die berechneten UVI-Werte um 8% steigen, wenn ein Ozonprofil in mittleren Breiten durch ein tropisches Profil ersetzt wird, während die Gesamtmenge des Ozons konstant bleibt (Van Weele et al., 2000).

Spurengase

Die Auswirkung von typischen Änderungen der Schwefeldioxid (SO₂)-Konzentration auf den UVI ist mit weniger als 1% recht gering. Da andererseits die Lebensdauer von troposphärischem SO₂ recht kurz ist, ist es möglich, dass in einigen Gebieten wesentlich höhere Konzentrationen auftreten können. Die Auswirkungen anderer Spurengase sind von vergleichbarer Größenordnung (Allaart et al., 2004). Auf libRadtran sind die Spurengase wie CO₂, NO₂, Wasserdampf und Sauerstoff in den Standardatmosphären enthalten, sie können aber auch separat analysiert werden.

Temperatur

Die Ozonabsorptionskoeffizienten sind etwas temperaturabhängig, und die Temperatur in der Stratosphäre kann erheblich variieren, insbesondere in der Nähe des Polarwirbels. Die Ignorierung dieses Effekts kann zu einem Fehler bei der UVI-Modellierung von 2% führen (Allaart et al., 2004). Bei libRadtran, z.B., wird die Luftdichte aus Temperatur und Druck (die ebenfalls angegeben werden können) berechnet. Die mittlere Temperatur ist ebenfalls in den sechs Standardatmosphären enthalten.

Räumliche Variabilität

Großflächige UVI-Prognosen werden entweder durch eine einzige Zahl, die für das gesamte Land oder die gesamte Region relevant ist, oder als Isolinien mit konstantem UVI auf einer Karte dargestellt. Es wird ein Fehler von 3% im UVI pro Breitengrad abgeschätzt (Allaart et al., 2004).

Sonne-Erde-Entfernung

Der Abstand zwischen der Erde und der Sonne ist nicht konstant. Die Sonneneinstrahlung weicht um $\pm 3\%$ um ihren Mittelwert ab, mit einem Maximum im Januar (Allaart et al., 2004). Diese Korrektur ist auf libRadtran durch die Definition des Tages des Jahres enthalten.

Albedo

Aufgrund der Strahlungswechselwirkungen zwischen Oberfläche und Atmosphäre ist die Oberflächenalbedo von großer Bedeutung für die Berechnung der UV-Bestrahlungsstärke, wobei auch weit entfernte Orte (~ 50 km) mit erhöhter Albedo noch einen signifikanten Einfluss haben können (Degünther et al., 1998). Die Albedo im UV-Spektralbereich ist für die meisten Oberflächen recht gering, die Albedo von Sand ist im Allgemeinen liegt zwischen 8-18%, die von Gras und Erde bei 1-4% (Sliney, 1986). Schneebedeckte Oberflächen können jedoch eine hohe UV-Albedo aufweisen, mit Werten bis zu 100% (Wuttke and Seckmeyer, 2006; Feister and Grewe, 1995). Der Effekt der effektiven Albedo kann in Strahlungstransportmodellen, d.h. in der Modellierung auf der Makroebene, bereits enthalten sein.

Wolken

Wolken sind der wichtigste, aber auch der am schwierigsten abzuschätzende atmosphärische Parameter, der die UV-Bestrahlungsstärke bestimmt, die den Boden erreicht. Grant and Heisler (2006) kamen zu dem Schluss, dass das Fehlen von Wolkendaten bei der Abschätzung der UV-Exposition zu einer Überschätzung von 20% in schattigen Gebieten führt. Selbst unter Baumschatten war die tatsächliche Bestrahlungsstärke in teilweise bewölkten Gebieten höher, wahrscheinlich aufgrund von Streueffekten an den Wolkenrändern (Seckmeyer et al., 1993; Mims III and Frederick, 1994). Nach Na et al. (2014), treten die Verstärkungseffekte von Wolken nur in kurzen Zeiträumen auf, obwohl andere Studien bereits gezeigt haben, dass bestimmte meteorologische Bedingungen auch zu einer länger anhaltenden Erhöhung der Strahlung aus Wolken führen (Seckmeyer et al. 1997). Eine ununterbrochene Wolkenschicht kann den UVI bei Niederschlag typischerweise um mehr als 99% reduzieren (Mayer et al. 1998). Darüber hinaus ist die Beziehung zwischen diffusem

Anteil und dem Wolkenbedeckungsgrad nicht linear. Der diffuse Anteil kann unter wolkenlosen und vollständig bedeckten Bedingungen zwar leicht abgeschätzt werden, trotzdem ist die Verteilung der Himmelsstrahlung auch unter diesen Voraussetzungen sehr inhomogen (Riechelmann et al., 2013). Der diffuse Anteil der Globalstrahlung nimmt mit zunehmendem Bedeckungsgrad stark zu.

Dies und die Tatsache, dass Wolken einer der am schwierigsten abzuschätzenden Parameter sind, führen dazu, dass in der Regel der UVI nur bei klarem Himmel und bei einer homogenen Wolkenbedeckung modelliert wird. Für Szenarien mit durchbrochenen Wolken ist eine komplexe 3D-Modellierung erforderlich (z.B. Monte-Carlo-Modell MYSTIC (Mayer, 2009)), die jedoch sehr zeitaufwändig und sehr spezifisch für jede Situation ist. Für mittlere Bedingungen wurden Methoden entwickelt, die Wolken als halbtransparente Hindernisse betrachten (Kinney et al., 2000; Vanicek et al., 1999). Mehrere verschiedene Methoden zur Berücksichtigung der Wolkendecke bei der Berechnung der UV-Strahlung für allgemeine mittlere Bedingungen können genannt werden. Zum Beispiel entwickelten Vanicek et al. (1999) eine Methode zur Berechnung des UVI für den bedeckten Himmel auf der Grundlage des Wolkenmodifikationsfaktors, den sie für verschiedene Wolkentypen in verschiedenen Höhen schätzten. Kinney et al. (2000) stellen in einer anderen Studie die prozentualen Strahlungsdurchlässigkeitsraten unter Bedingungen dar, indem sie die MOS-Wolkeneigenschaften (Model Output Statistic) verwenden. Diese Raten werden von der Environmental Protection Agency (EPA) und dem National Weather Service (US EPA, 2019) verwendet. Die Raten sind definiert als 99,9% für klaren Himmel, 89,6% für gestreuten Himmel (von 1/8 bis 2/8 des abgedeckten Himmels), 72,6% für durchbrochene Bewölkung Wolken (von 5/8 bis 6/8 Bedeckungsgrad) und 31,6% für den vollständig bedeckten Himmel (OFCM, 2017).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass trotz ihrer großen Bedeutung bei der Modellierung der UV-Strahldichte und der UV-Bestrahlungsstärke einige Vereinfachungen bei bewölktem Himmel vorgenommen werden müssen. Die größte Herausforderung ist die Modellierung bei durchbrochener Bewölkung, die sehr komplex und für jedes Zeitfenster spezifisch ist. Wenn das Ziel darin besteht, die mittleren Bedingungen zu berechnen und nicht die zeitlichen Variationen wiedergegeben werden müssen, ist es eventuell vertretbar nur den vollständig bedeckten und den wolkenlosen Himmel zu betrachten (Seckmeyer et.al. 2013). Es kann aber auch Situationen geben, in denen auch die Verhältnisse bei durchbrochener Bewölkung betrachtet werden müssen. Dies ist dann ein Grenzfall, der sich sowohl auf der Makro- wie auf der Mikroskala auswirkt.

4.2.2. Parameter der Mikroskala

Himmelsprofil und Himmelssicht-Faktor (SVF)

Der Himmelsansichtsfaktor (SVF) ist ein dimensionsloser Parameter, der den sichtbaren Anteil des Himmels auf einer Halbkugel (Himmelsprofil) darstellt, der zentriert über dem analysierten Ort liegt und durch zwei Methoden bestimmt werden kann: Mit Fischaugenbildern oder mit numerischen Modellen unter Verwendung einer 3D-Datenbank als Input. Abbildung 5 zeigt Beispiele von Himmelsprofilen, die mit den beiden Methoden erhalten wurden. Das Hauptproblem bei der Verwendung der Fotografie ist die Reflexionsanalyse, es sei denn, es werden photogrammetrische Messungen mit mehr als einer Kamera verwendet. Komplexe Reflexionsanalysen sind in der Regel zu zeitaufwändig, weshalb viele GIS-Modelle sie vollständig ignorieren oder vereinfachte Methoden verwenden (z.B. SkyHelios). Im Falle von SkyHelios erlaubt die Vereinfachung eine gewisse Reflexionsanalyse mit Hilfe der Fotografie, d.h. es wird z.B. angenommen, dass die Objekte auf der Sonnenseite die Bestrahlungsstärke isotrop reflektieren.

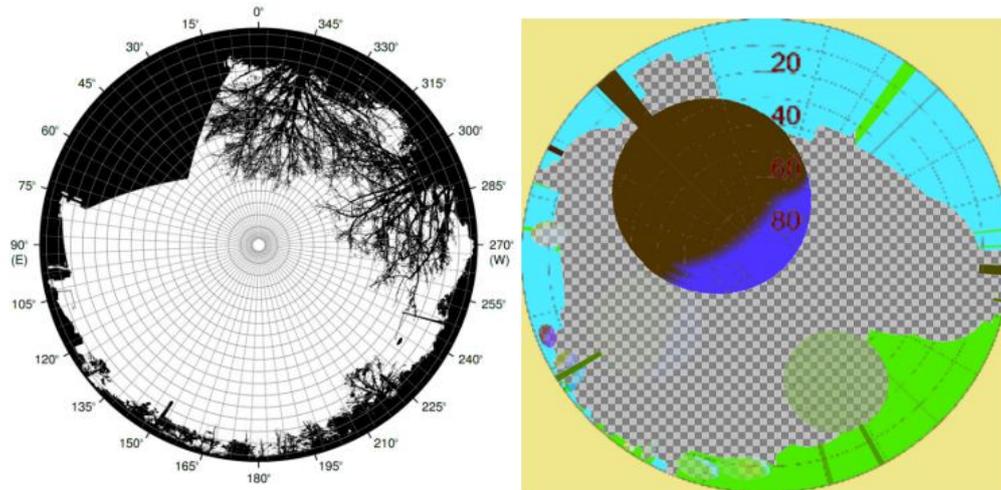


Abbildung 5: Beispiele von Himmelsprofilen, die mit Fischaugen-Kamerasystemen (Schrempf et al., 2017) (links) und mit morphologischen 3D-Daten mit Bäumen und Gebäuden, wie sie vom SkyHelios-Modell im Produktionsmodus erzeugt wurden (rechts). Die Farben und die Opazität entsprechen unterschiedlicher kurzwelliger Albedo, langwelligem Emissionsgrad, direktem Strahlungsfaktor der Oberflächen (einschließlich kurzwelliger Reflexionen). Der schachbrettartige Hintergrund wurde hinzugefügt, um die Opazität der Objekte zu visualisieren (D. Fröhlich and Matzarakis, 2018).

Halbdurchlässige Objekte

Nicht alle Abschattungshindernisse sind im UV-Bereich zwangsläufig völlig undurchsichtig. Beschattungsflächen wie Wartehäuser und sogar Bäume können im UV-Spektralbereich halbdurchsichtig sein. Aus diesem Grund ist die Information über die Durchlässigkeit dieser Hindernisse notwendig, um die darunter fallende UV Einstrahlung korrekt darstellen zu können (Downs et al., 2008).

Reflexion der Strahlung an Objekten im Sichtfeld

Die reflektierte Bestrahlungsstärke hängt stark von der Umgebungsgeometrie, den Materialeigenschaften und dem Sonnenstand ab. Um Mehrfachreflexionen zu modellieren, wird ein 3D-Modell der bebauten Umgebung benötigt. Zu diesem Zweck wurden viele Modelle entwickelt (Aida and Gotoh, 1982; Arnfield, 1988; Groleau and Mestayer, 2013; Kondo et al., 2001; Krayenhoff and Voogt, 2007). Alle 3D-Modelle sind jedoch sehr rechenintensiv. Um den Berechnungsaufwand zu reduzieren, schlugen einige Autoren vereinfachte Modelle vor (Bernabé et al., 2015; Downs et al., 2008; Robinson and Stone, 2004). Einige GIS Modelle wie z.B. SkyHelios benutzen anisotropische Berechnungen der reflektierten Strahlung, lassen aber glasbedeckte Oberflächen unberücksichtigt, da deren komplexe Modellierung zu rechenintensiv wäre.

Die Reflexivität der meisten Oberflächen im UV-Bereich ist gering und kann als isotrop angenähert werden, jedoch weist die Reflexion einiger Oberflächen wie Metall oder Glas eine nicht vernachlässigbare Winkelabhängigkeit (spiegelnd) auf. Nach (Heisler and Grant, 2000) beträgt die Reflexion von Glas bei 300 nm Strahlung weniger als 10 % bei Einfallswinkeln bis etwa 70°, wobei sie bei nahezu streifendem Einfall sehr schnell auf nahezu 100 % Reflexionsvermögen ansteigt. Darüber hinaus haben verschiedene Glasstypen ein unterschiedliches Reflexionsvermögen, z.B. ist für das normale Fensterglas das Reflexionsvermögen im UV-Bereich gering, während silberbeschichtetes Glas ein Reflexionsvermögen von 30% erreichen kann (Jelle, 2013).

Darüber hinaus ist es wichtig zu erwähnen, dass die Studien zur UV-Reflexion in städtischen Umgebungen immer noch ein aktuelles Forschungsthema sind. Es gibt viele verschiedene Studien über die Reflexion im UV, die nicht immer leicht an 3D-Mikroskala-Umgebungen angepasst werden können oder sogar widersprüchlich sind. Während viele Modelltechniken die Auswirkungen der Reflexion völlig vernachlässigen (z.B. Erdélyi et al., 2014; HEMI, 2000; Seckmeyer et al., 2018; Wai et al., 2017), weisen einige Messungen auf eine größere Auswirkung hin (Turner and Parisi, 2018). Hinzu kommt das Problem, dass die Definitionen von Albedo und Reflektivität in der Vergangenheit austauschbar verwendet wurden. Im Allgemeinen empfehlen Joanna Turner & Parisi (2018), dass die Albedo für die Messung natürlicher, meist horizontaler Flächen verwendet werden sollte, unter der Maßgabe, dass sich die Albedo während des Tages nicht wesentlich verändert sollte. Der Begriff Reflexion sollte, nach Ansicht von Turner&Parisi dagegen für nicht-natürliche Oberflächen und nicht-horizontale Oberflächenmessungen verwendet werden und ändert sich je nach den unterschiedlichen Bedingungen, einschließlich der Geometrie der einfallenden und reflektierten Bestrahlungsstärke, sowie aufgrund der intrinsischen Natur der Oberfläche selbst. In ihrem Bericht wird auch erwähnt, dass in der vorhandenen Literatur zur UV-Albedo nur eine Handvoll Oberflächen mehr als ein paar Mal gemessen und veröffentlicht wurden, während viele verschiedene Oberflächentypen nur einmal für die UV-Albedo und nicht für die Reflexion (sowohl für Breitband- als auch für spektrale UV-Strahlung) vermessen wurden.

Joanna Turner & Parisi (2018) schreiben weiterhin, dass die Messmethode für Reflexionsmessungen viel entscheidender ist als für die Albedo und klar festgelegt werden muss, um wiederholbare Ergebnisse zu erzielen. Sie sagen auch, dass die Albedo, vorausgesetzt, sie hält sich an die Annahmen und Bedingungen, die aus ihrer Definition ergeben, ziemlich konsistent gemessen werden kann, trotz der Unterschiede in der Entfernung zwischen Oberfläche und Sensor. Es scheint jedoch nicht viele Studien zu geben, die versucht haben, die Albedo oder den Reflexionsgrad mit dem tatsächlichen Einfluss der UV-Exposition unter realen Bedingungen zu korrelieren. Hier ist somit noch Forschungsbedarf vorhanden. Tabelle 2 zeigt einen Vergleich der Reflexionsmessung als Prozentsatz in verschiedenen Wellenlängenbereichen.

Eine vollständige Analyse der Reflexion hängt vom Winkel der einfallenden Strahlung und vom Betrachtungswinkel der reflektierten Strahlung ab. Die Strahlungseigenschaften aus mehreren Winkeln kann durch verschiedene Reflexionsfaktoren dargestellt werden. Die einfallende und reflektierte Strahlung wird in drei Kategorien eingeteilt: gerichtet, konisch und halbkugelförmig (Schaepman-Strub et al., 2006). Im Idealfall ist die bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF) bekannt (Nicodemus, 1970). In diesem Fall trifft ein kollimierter Lichtstrahl aus einem infinitesimalen Raumwinkel auf eine homogene Oberfläche und wird in eine andere Richtung reflektiert. Die BRDF ist somit eine Funktion von vier realen Variablen, die definiert, wie Licht an einer Oberfläche reflektiert wird. Sie wird in Computergrafik-Algorithmen verwendet und enthält die notwendigen Informationen für eine etailierte Reflexionsanalyse. In der Praxis gibt es jedoch zwei Probleme bei der Bestimmung der BRDF (Schaepman-Strub et al., 2006): Erstens haben die Sensoren, die die Strahlung empfangen, einen nicht zu vernachlässigenden Öffnungswinkel. Die detektierte reflektierte Strahldichte ist also ein Integral der Strahlung aus mehreren Reflexionsrichtungen. Zweitens erfolgen die Messungen unter Strahlungsbedingungen, bei denen nicht nur der direkte Strahl auf die Oberfläche auftrifft, sondern auch die diffuse Himmelsbestrahlungsstärke vorhanden ist. Häufig wird daher nicht die einfallende direkte Bestrahlungsstärke, sondern die einfallende Globalstrahlung detektiert. Daher kann bei passiven Instrumenten, die keine künstlichen Strahlungsquellen verwenden, nur der hemisphärisch-konische Reflexionsfaktor (HRF) zur Charakterisierung der Oberfläche verwendet werden. Es ist zu beachten, dass der HRF in der Literatur oft als BRDF bezeichnet wird, BRDF ist jedoch ein Idealfall, der sich in der Praxis nicht bestimmen lässt.

Tabelle 2. Breitband-UV-Albedo-Messungen von meist künstlich hergestellten Oberflächen in Prozent, wie in der Literatur berichtet. Die ID-Nummern in der oberen Reihe entsprechen den ID-Nummern, die in Joanna Turner & Parisi (2018) vergeben wurden.

% Albedo ID	1	3	4 & 9	5	6	7b	8 & 9	10	11	12	13	14	15	min	max	mean
Surface Type																
Concrete (new)		15.8			9.8		10-12	14.6						9.8	15.2	12.44
Concrete	8.2	9.2				8-12	7.0-8.2				10-11 ^k		9.7	7	12	9.26
Wet concrete					8									-	-	8
Concrete/pebble tile	12.4													-	-	12.4
White concrete tile													22	-	-	22
Ceramic tile—porcelain												11.48		-	-	11.48
—stoneware												17.30		-	-	17.30
—vitrified mosaic												33.22		-	-	33.22
Gravel path	8.2	5.8												5.8	8.2	7
Asphalt			5.5			5-9 black	4.1-5.0 ^l 5.0-8.9 ^m				2-7		4.2-9.2	2	9	5.90
Tar sealed road		6												-	-	6
Tarmac road	6.5 ^f 5.5 ^g 5.7 ^h									9.8-15 ⁿ 9-9.8 ^o				5.5	15	8.76
Tennis court			2.9											-	-	2.9
Wooden boards (dock)	4.4					5-7	6.4							4.4	7	5.7
Natural clear wood									2.6				5.2	2.6	5.2	3.9
White painted wood									4.2					-	-	4.2
Black painted wood									2.7				6.5	2.7	6.5	24.6
Enamel paint (white/red)		5.1												-	-	5.1
Black butyl rubber roof		5.1												-	-	5.1
Stainless steel opaque plate									4.3					-	-	4.3
Steel plate—colour coating												8.86 ^p -13.35 ^t		8.86	13.35	11.11
Shiny corrugated iron		18.1			30 ^p (25-32) ^q									18.1	30	24.05
Pale pink corrugated iron					3-12 ^p (3-6) ^q									-	-	7.5
White paint—metal oxide							22						17.5	17.5	22	19.75
Aluminium-weathered							13						75 ^r	13	75	44
Unpainted galvanized tin													29.3	-	-	29.3
White fibre glass							9.1							-	-	9.1
White formica									7.9					-	-	7.9
Polycarbonate hollow sheet												8.46		-	-	8.46
Pottery wall tile												12.35		-	-	12.35
Red brick										4.5-7				4.5	7	5.75

^f Canada, ^g England, ^h Saudi Arabia, ^k cement, ^l old, ^m new, ⁿ light tarmac, ^o dark tarmac, ^p broadband, ^q biologically weighted, ^r new not weathered, ^s cream coloured fire resistant coating, ^t grey-composition not stated.

Bei der Reflexionsanalyse mögen vereinfachte isotrope Lösungen für die meisten Oberflächen die einfachste und leichteste Lösung sein, jedoch erhöht diese Vereinfachung eventuell die Unsicherheiten für stark reflektierende Materialien wie Glas oder Metall. Ein Vorschlag ist, mit der vereinfachten isotropen Reflexionsanalyse zu beginnen, die der Benutzer manuell aus einem Satz von Materialien auswählen kann, und dann ein Zusatzpaket mit Reflexionsanalyse für sehr reflektierende Materialien unter Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit hinzuzufügen.

Bäume

Die Blätter der Bäume sind für UV-Strahlung teildurchlässig. Verschiedenen Studien zufolge werden unabhängig von der Baumart etwa 90-95% der UV-Strahlung absorbiert, 5-9% reflektiert und <0,1% durch die Blätter transmittiert (Grant et al., 2003; Na et al., 2014; Qi et al., 2010; Yang et al., 1995). Die Penetration durch das Blatt erfordert die Penetration durch die (adaxiale) Kutikula, Epidermis, Mesophyll, eine zweite (abaxiale) Epidermis und eine zweite Kutikula. Es scheint, dass die Transmission von UV-B durch das Blatt vernachlässigbar ist und ein Großteil der Absorption des UV-B in der Kutikula stattfindet. Das Eindringtiefe der Strahlung in die Blätter nimmt im Allgemeinen mit zunehmender Wellenlänge zu (CUI et al., 1991; Day et al., 1994; KRAUSS et al., 1997). Dieser Mangel an UV-Blattdurchlässigkeit finden auch Brabham and Briggs (1975), Na et al. (2014), Yang et al. (1995). In einer Studie von Krauss et al. (1997) variierte die Durchlässigkeit durch die Epidermis und Cuticula zwischen den Arten von 0,004 bis 0,50, und in Day et al. (1994) wies der *Quercus velutina* eine epidermale Durchlässigkeit im UVB von 0,13 auf, während die Durchlässigkeit für das gesamte Blatt in dieser Studie ebenfalls mit weniger als 0,006 gemessen wurde.

Es wurden verschiedene Modelle erstellt, um die Sonneneinstrahlung unter Baumschatten zu modellieren (Downs et al., 2008; Grant et al., 2002; Grant and Heisler, 2006; Heisler et al., 2003a, 2003b). Die meisten dieser Methoden verwenden jedoch Vereinfachungen in Bezug

auf die Modellierung der spektralen Strahldichte und der spektralen Bestrahlungsstärke und vernachlässigen häufig die Richtungsinformation. Eines der Hauptprobleme von Baumdarstellungen ist auch, dass sie sich im Laufe des Jahres ändern. In Abbildung 6 finden sich Fotos am gleichen Ort, die zu verschiedenen Jahreszeiten an der Unterseite von Bäumen aufgenommen wurden. Eine einfachere Art der Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke unter Baumschatten besteht darin, sie als halbtransparente Hindernisse zu betrachten. Ein ähnlicher Ansatz wird bei SkyHelios verwendet. Die Verwendung von Fotos kann nur für bestehende Standorte und für eine bestimmte Zeit erfolgen. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Standardbäumen für verschiedene Jahreszeiten auf der Grundlage von Messungen von Wuchsform und Blattdichte. So ist es möglich, zu überprüfen, ob die Sonne hinter einem Baum steht und die Bestrahlungsstärke nach den bereits erwähnten Methoden zu parametrisieren. Im Idealfall können diese Ergebnisse dann mit der Strahlungs- und Reflexionsmodellierung kombiniert werden. Möglicherweise können neue Messungen und Analysen notwendig sein.

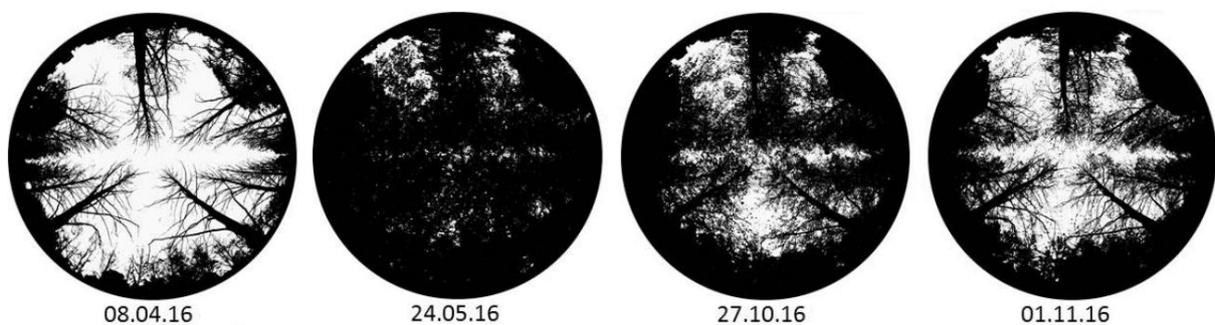


Abbildung 6: Jährliche Variabilität der Baumblattbedeckung, aufgenommen mit einer Kamera mit fish-eye Objektiv auf einem Fußweg in Hannover, Deutschland.

4.3. GIS-Dateiformate

Der letzte wichtige Parameter im Zusammenhang mit der Modellierung auf Mikroebene sind schließlich die räumlichen 3D-Eingangsdaten. Sie sind meist in zwei Formate unterteilt: Raster und Vektor (Abbildung 7). Rasterformate bestehen aus einem äquidistanten Gitter mit einem bestimmten Wert (z.B. Höhe) für jede Gitterzelle. Eines der gängigsten Rasterdateiformate ist die "Geospatial Data Abstraction Library" (GDAL, GDAL Development Team, 2016). Vektorformate basieren auf der Angabe der räumlichen Position bestimmter Punkte (Vertices). Mehrere Vertices können Polygone bilden, z.B. Gebäude. Das gebräuchlichste Vektor-Dateiformat ist Shapefile. Diese Beispiele, neben vielen anderen, werden vom SkyHelios-Modell durch OGR (OpenGIS Simple Features Reference Implementation) akzeptiert (GDAL Development Team, 2016). Ein weiteres wichtiges Vektor-Dateiformat, das in SkyHelios akzeptiert wird, sind die RayMan-Hindernisdateien (Matzarakis et al., 2010). RayMan-Hindernisdateien sind eine spezielle Art von räumlichen Vektordateien, die auf durch Semikolon getrennten Textdateien basieren. Dabei können die Daten sowohl manuell oder auch automatisch auf der Basis von Shapefiles mit Hilfe des Quantum GIS plugin (QGIS Development Team, 2016) erzeugt worden sein. Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, sind Vektorformate eine präzisere Darstellung der Realität, während Rasterformate einfacher und meist auch leichter zu handhaben sind.

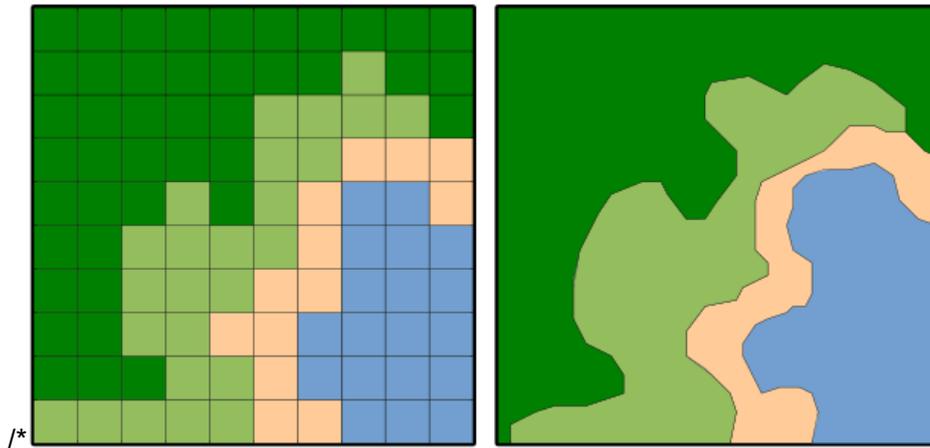


Abbildung 7: Skizze eines Beispiel-Strandbereichs, dargestellt als regelmäßiges Raster (links) und vektorbasierte Polygone (rechts). In beiden Diagrammen ist das Meer blau, der Strand braun, die Wiesen hellgrün und der Wald dunkelgrün gefärbt. In beiden Diagrammen ist das gleiche Gebiet dargestellt, um die Unterschiede zwischen Raster- und Vektorformaten zu zeigen. Quelle: Fröhlich and Matzarakis, (2018).

4.4. Auswirkungen der Hauptparameter auf die Modellierung der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der wichtigsten atmosphärischen Parameter analysiert, die die erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke beeinflussen. Die Bedeutung dieser Analyse besteht darin, zu verstehen, welche Parameter so entscheidend sind, dass sie extra modelliert oder in die LUTs aufgenommen werden sollten, und welche Parameter nur interpoliert oder extrapoliert werden können. Abbildung 3 zeigt die erythemgewichtete diffuse Strahldichteverteilung (in $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$) für typische städtische atmosphärische Bedingungen. In den folgenden Kapiteln werden ausschließlich mit libRadtran erzeugte Ergebnisse gezeigt.

4.4.1. Meereshöhe

Ein wesentlicher Inputparameter in LibRadtran ist die Höhe über dem Meer in Kilometern. Die Profile von Druck, Temperatur, molekularen Absorbern, Eis- und Wasserwolken werden als Funktion der Höhe beschrieben. Es wird angenommen, dass das Aerosolprofil nicht durch die Höhe beeinflusst wird; es beginnt direkt an der Modelloberfläche. Die Modellierung kann für einige spezifische Höhen, oder unter Verwendung von Höhenkorrekturfaktoren (z.B. Piazena, 1996) durchgeführt und interpoliert werden. Im Folgenden wird gezeigt, wie sich die erythemgewichtete Bestrahlungsstärke für verschiedene Höhen unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen ändert.

4.4.2. Albedo

Alle Strahlungstransportsolver in libRadtran enthalten Lambert'sche Oberflächen, und können auch mit bidirektionalen Reflexionsverteilungsfunktionen (BRDF) umgehen, die vom Modell bereitgestellt werden. Darüber hinaus kann der Benutzer seine eigene monochromatische Albedo, eine spektrale Albedo-Datei oder eine BRDF definieren. Eine wellenlängenabhängige Oberflächen-Albedo kann ebenfalls spezifiziert werden. Es kann auch eine nicht-lambert'sche Oberflächenreflexion (BRDF) für Vegetation und Wasser definiert werden. Albedo-Bibliotheken sind eine Sammlung von spektralen Albedos verschiedener Oberflächentypen. Es gibt zwei Möglichkeiten für Bibliotheken: die eingebaute IGBP-Bibliothek oder eine benutzerdefinierte Albedo-Bibliothek. Die IGBP-Bibliothek enthält 20 Oberflächentypen, wie Stadt, Mischwald, Wüste und Ozean. Abbildung 8 zeigt die Variabilität der erythem-

gewichteten UV-Bestrahlungsstärke für verschiedene Albedowerte in verschiedenen Höhen (links) und Ozonwerten (rechts). Die erythemwirksame globale Bestrahlungsstärke wird in allen Höhen bis etwa 3000 m um ~25% erhöht, wenn die Albedoerhöhung von 0,05 auf 0,8 ansteigt. Die Erhöhung der erythemwirksame Bestrahlungsstärke durch die gleiche Albedoänderung liegt ebenfalls bei ~20-30%. Die Auswirkungen der Albedo im Schatten eines Gebäudes (Mikroskala) werden im nächsten Kapitel dargestellt..

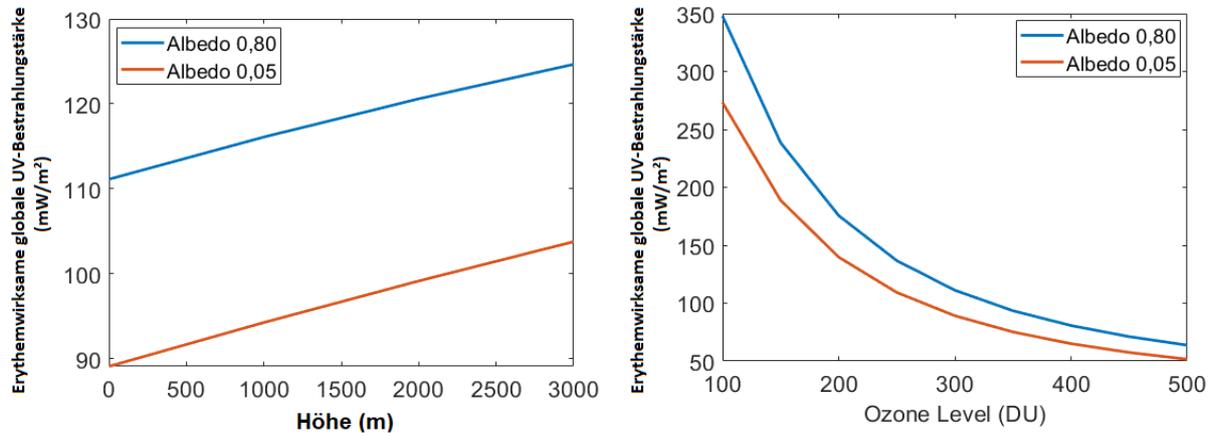


Abbildung 8: Variabilität der erythemwertgewichteten UV-Bestrahlungsstärke für verschiedene Albedowerte in verschiedenen Höhen (links) und Ozonwerten (rechts). Die Modellierung erfolgte bei klarem Himmel, einem solaren Zenitwinkel von 45° und einem Azimut von 180° und dem solver DISORT RTE.

4.4.3. Aerosol

Bei libRadtran ist das Standard-Aerosol-Setup nach Shettle (1989) definiert, es umfasst ein Aerosol ländlicher Art in der Grenzschicht, Hintergrundaerosole über 2 km Höhe, Frühling-Sommer-Bedingungen und eine Sichtbarkeit von 50 km, jedoch können alle diese Parameter geändert werden. Weitere Informationen können sukzessiv eingeführt werden, wobei die Standardparameter überschrieben werden können, selbst vertikale Profile der optischen Dicke, Einzelstreuungsalbedo und Asymmetrieparameter können eingeführt werden. Die Wellenlängenabhängigkeit der optischen Dicke des Aerosols kann mit den Angström-Parametern spezifiziert werden. Falls mikrophysikalische Eigenschaften verfügbar sind, können diese ebenfalls eingeführt werden. Abbildung 9 zeigt die Auswirkungen der vier verschiedenen Standard-Aerosoltypen (definiert nach Shettle (1989)) auf die gesamte erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke und auf das Verhältnis zwischen diffuser und globaler Bestrahlungsstärke. Auf dem Bild kann man erkennen, dass die verschiedenen Aerosoltypen einen großen Einfluss auf die UV-Strahlung haben können, die Veränderungen mit der Höhe sind praktisch linear. Die bei libRadtran UVSPEC verwendeten Aerosoltypen sind:

Ländlich: Mischung aus wasserlöslichen und staubförmigen Aerosolen.

Städtisch: Ländliche Aerosolmischungen mit rußähnlichen Aerosolen.

Maritim: Meersalzlösung in Wasser.

Troposphärisch: Verschiedene ländliche Aerosolmischungen.

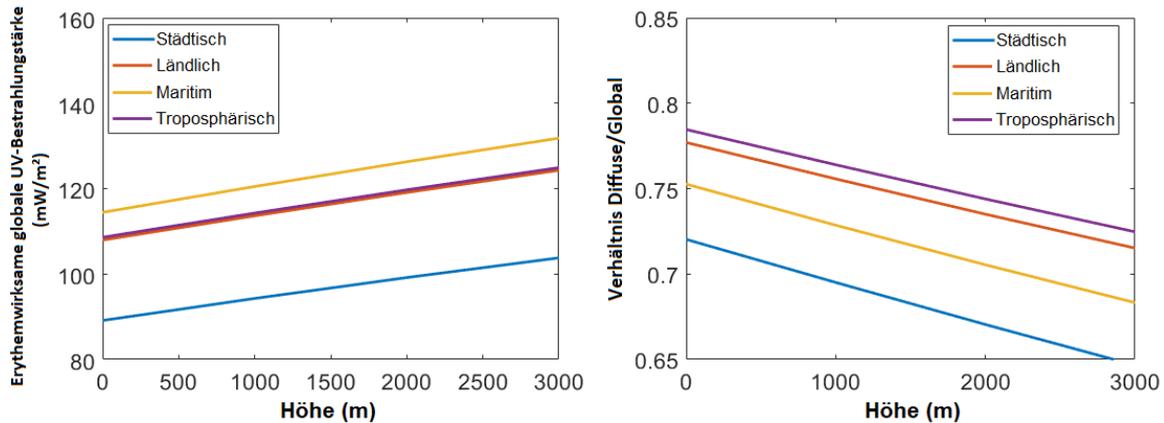


Abbildung 9: Variabilität der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke und Verhältnis zwischen diffuser und globaler Bestrahlungsstärke für verschiedene Höhenlagen unter verschiedenen Aerosolbedingungen. Die Modellierung erfolgte bei klarem Himmel, Ozonwerten von 300 DU, einem Sonnenzenitwinkel von 45°, einem Azimut von 180° und dem DISORT RTE-Löser.

Andere Änderungen an den möglichen Standardaerosoleinstellungen hängen mit der Jahreszeit zusammen. Abbildung 10 zeigt die Unterschiede zwischen dem modellierten erythemgewichteten Bestrahlungsstärke für die Frühling-Sommer- und Herbst-Winter-Saison.

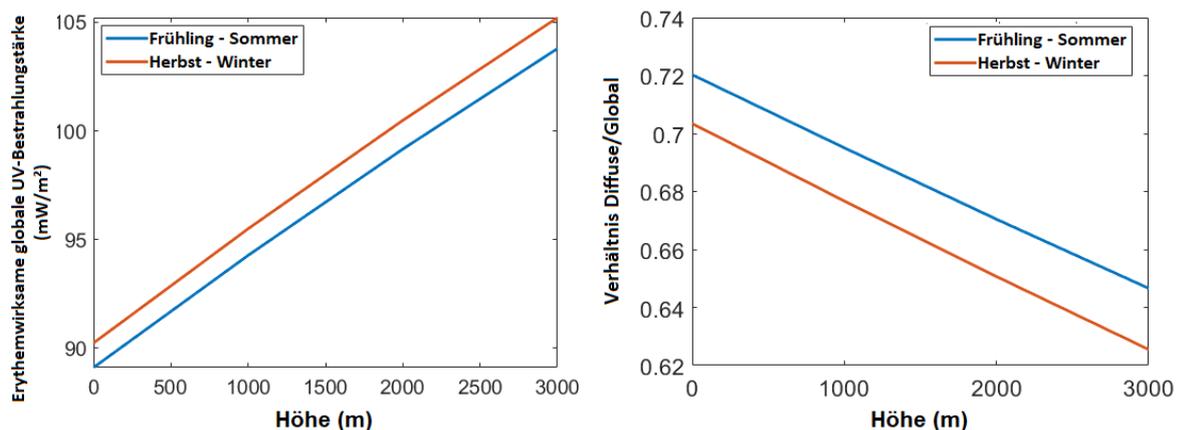


Abbildung 10: Variabilität der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke und Verhältnis zwischen der diffusen und der globalen Bestrahlungsstärke für verschiedene Höhenlagen unter verschiedenen saisonalen Bedingungen. Die Modellierung erfolgte unter klaren Himmelsbedingungen, städtischen Aerosolen, Ozonwerten von 300 DU, Sonnenzenitwinkel von 45°, Azimutwinkel von 180° und dem DISORT RTE-Löser.

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen, dass die Variation für verschiedene Aerosol-Typen viel größer ist, bis hin zu einem Anstieg der Bestrahlungsstärke-Werte um 30 % beim Wechsel des Aerosol-Typs von urban zu marin, verglichen mit der saisonalen Variabilität (~1,5 %). Aus diesem Grund ist es wichtiger, in den LUTs Szenarien unter verschiedenen Aerosoltypen zu berücksichtigen als die Modellierung für verschiedene Jahreszeiten durchzuführen, obwohl beide Faktoren einbezogen werden können.

4.4.4. Gesamtozon (Ozonsäule)

In libRadtran kann das Gesamtozon in Dobson-Einheiten (DU) oder mit Hilfe einer Stamnes-Tabelle eingegeben werden (Stamnes et al., 1991). Für die Suche nach der Ozonsäule erfordert diese Methode eine Tabelle der Bestrahlungsstärkeverhältnisse als Funktion des Sonnenzenitwinkel und der Ozonsäule. Das Bestrahlungsstärkeverhältnis wird als das Verhältnis der Bestrahlungsstärken bei nicht-absorbierenden und ozonabsorbierenden Wellenlängen genommen. Abbildung 11 zeigt, wie sich die erythemgewichtete Bestrahlungsstärke für verschiedene Ozonwerte in verschiedenen Höhen, für ländliche

Aerosolbedingungen ändert. Die Abhängigkeit der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke vom Gesamtozon ist in Abbildung 11 zu dargestellt. Dagegen ist die Änderung mit der Meereshöhe ein kleiner Effekt. Daher sollten verschiedene das Gesamtozon in den Szenarien für die LUTs für die mikroskalige Modellierung aufgenommen werden.

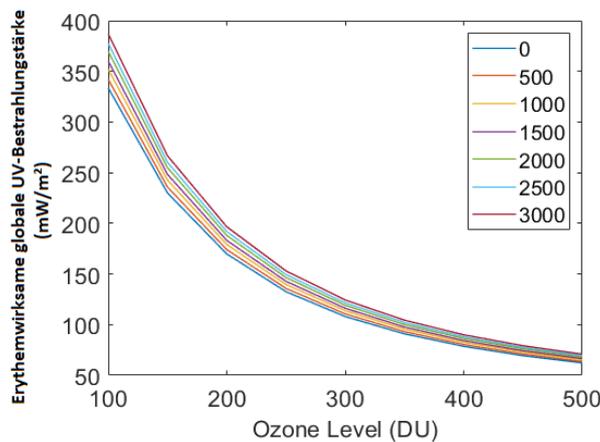


Abbildung 11: Variabilität der erythemgewichtete Bestrahlungsstärke für verschiedene Werte des Gesamtozons in verschiedenen Höhen, für ländliche Aerosolbedingungen. Die Modellierung erfolgte für wolkenlosen Himmel, einem Sonnenzenitwinkel von 45° und einem Azimut von 180° und dem Solver DISORT RTE.

4.4.5. Wolken

In libRadtran können homogene Wolkenschichten eingefügt werden. Es kann zwischen Wasser- und Eiswolken unterschieden werden, für die der Anwender zwischen verschiedenen Parametrisierungen wählen muss, die vom Programm vom Flüssigkeits-/Eiswassergehalt und Tröpfchen-/Partikelradius auf optische Eigenschaften übertragen werden. Der einfachste Weg, eine Wasserwolke zu definieren, ist die Angabe einer `wc_Datei`, die den Flüssigwassergehalt und den effektiven Tröpfchenradius in jeder Modellschicht oder Ebene definiert. Abbildung 12 zeigt ein Beispiel für eine typische `wc_file`. Die drei Spalten sind die Niveauhöhe [km], der Flüssigwassergehalt [g/m³] und der effektive Tropfenradius in Mikrometern. Standardmäßig werden diese Größen als Schichtmengen interpretiert. Im Beispiel unten dehnt sich die Wolke von 2 bis 5 km aus, mit einem LWC von 0,2 g/m³ für die Schicht zwischen 4 und 5 km. Abbildung 13 zeigt die Auswirkungen dieser spezifischen Wolkenbedingung auf die Variabilität der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke bei verschiedenen Zenitwinkeln. Es ist ein großer Unterschied in der modellierten erythemgewichteten Bestrahlungsstärke unter den verschiedenen Wolkenbedingungen zu erkennen, mit einem Anstieg von etwa 90 % während der Mittagszeit von der bewölkten zur wolkenfreien Bedingung. Auch hier können, wie bei den Aerosolen und dem Ozon, verschiedene Bewölkungsszenarien vorher modelliert und in den LUTs gespeichert werden, damit die Software später darauf zugreifen kann.

```
# z LWC R_eff
# (km) (g/m3) (um)
5.000 0 0
4.000 0.2 12.0
3.000 0.1 10.0
2.000 0.1 8.0
```

Abbildung 12: Beispiel einer typischen Eingabedatei für den Wasserwolkengehalt (`wc_file`) auf libRadtran UVSPEC.

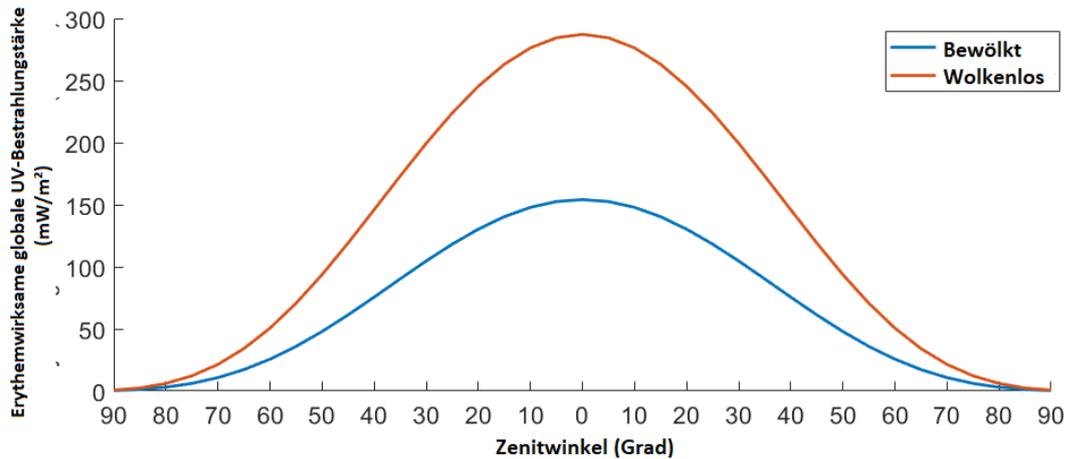


Abbildung 13: Variabilität der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke bei bewölktem und klarem Himmel. Die Modellierung wurde mit dem DISORT RTE-Löser, städtischen Aerosolbedingungen, Ozonwerten von 300 DU und Albedo von 5% durchgeführt.

4.5. Mikroskalige Auswirkungen der Strahldichte

Anhand der bereits modellierten Daten aus dem vorherigen Kapitel werden in diesem Kapitel die Auswirkungen der makroskaligen atmosphärischen Parameter auf die Mikroskala analysiert. Anschließend wurde untersucht, ob das Verhalten auf der Mikroskala ähnlich ist. Die Analyse beginnt mit den Auswirkungen des Schattens eines Gebäudes in Südlage mit 15 m Höhe und 7 m Breite in 4 m Entfernung von der analysierten Fläche.

Abbildung 14 zeigt die mit erythemgewichtete diffuse Strahldichte in $\text{mW/m}^2\text{sr}$ für städtische atmosphärische Bedingungen unter dem Schatten des künstlichen Gebäudes.

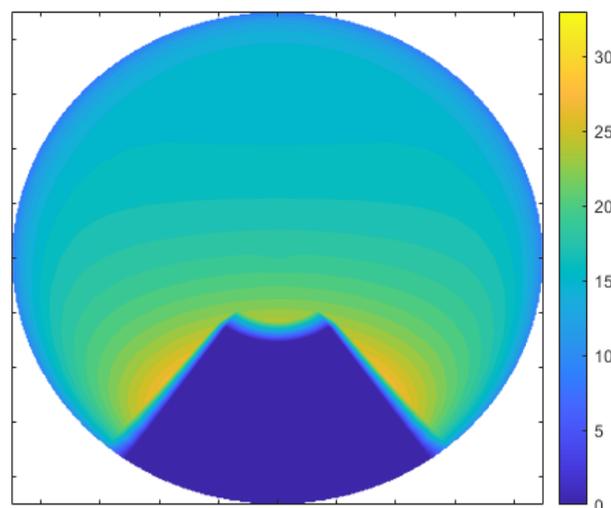


Abbildung 14: Gewichtete diffuse Strahldichte in $\text{mW/m}^2\text{sr}$ für städtische atmosphärische Bedingungen unter dem Schatten eines künstlichen Gebäudes. Die Modellierung wurde für einen Ozonwert von 300 DU, einen solaren Zenitwinkel von 45° , einen Azimut von 180° und den DISORT RTE-Solver durchgeführt.

4.5.1. Albedo

Unter Verwendung der gleichen abgeschatteten Bedingungen von Abbildung 14 wurden die Auswirkungen der Albedo auf die Modellierung der erythemgewichteten diffusen UV-

Bestrahlungsstärke analysiert. Abbildung 15 zeigt diese Effekte sowohl bei unverschatteten (links) als auch bei verschatteten (rechts) Bedingungen. Ähnlich wie bei den vorherigen Ergebnissen tritt der erwartete Erhöhungseffekt mit zunehmender Elevation nur für die unverschatteten Bedingungen auf, was wiederum zeigt, dass dieser Anstieg aus der direkten Bestrahlungsstärke resultiert. In diesem Fall nahm die diffuse UV-Bestrahlungsstärke für die abgeschatteten Bedingungen sogar ein wenig ab da bei höheren Elevationen der Weg durch die Atmosphäre für die Solare Strahlung kleiner ist. Dies bedeutet weniger Streueffekte, wodurch der direkte Anteil steigt und der diffuse Anteil sinkt. Dies wurde auch in Abbildung 8 gezeigt, wo das Verhältnis zwischen dem diffusen und dem globalen Anteil mit der Höhe abnimmt. Die Albedo hat einen großen Einfluss auf die Bestrahlungsstärke. Es ist jedoch zu beachten, dass die Albedo im UV-Bereich normalerweise niedrig ist (~5%) fast nur bei schneebedeckten Oberflächen ist dies anders (~80%). In den modellierten Beispielen erhöhte sich die diffuse erythemgewichtete Bestrahlungsstärke bei einer relativen Albedo-Veränderung von 75% um ~36% für die unverschatteten und ~40% für die verschatteten Bedingungen. Da die Albedo bereits in den Strahlungstransportmodellen enthalten ist und die lokale Albedo von horizontalen Oberflächen keine direkte Auswirkung UV-Bestrahlungsstärke hat (Degünther et al., 1998), hat die lokale Albedo auch keinen großen Einfluss, wenn nur mikroskalige Umgebungen analysiert werden.

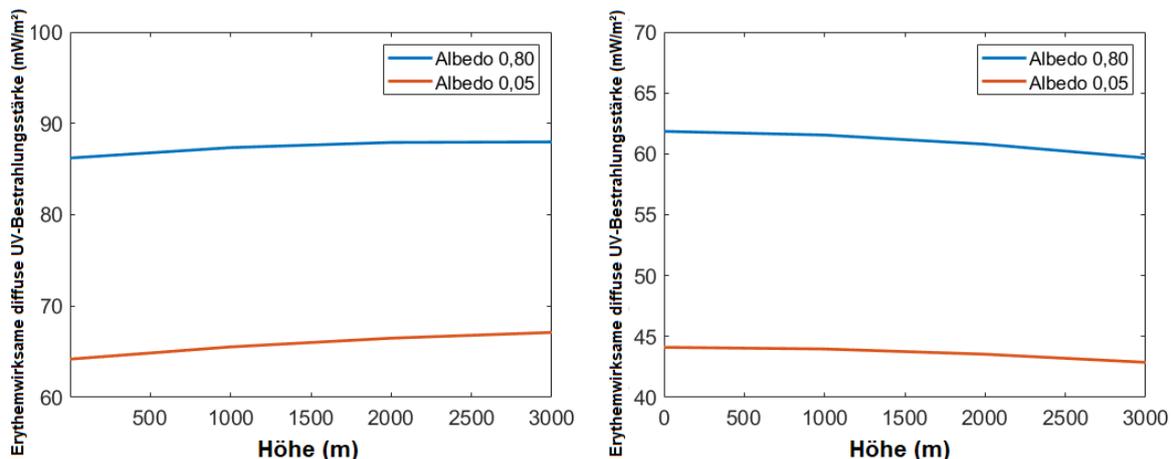


Abbildung 15: Variabilität der erythemwertgewichteten diffusen UV-Bestrahlungsstärke für verschiedene Albedo-Stufen in verschiedenen Höhen für unverschattete (links) und verschattete (rechts) Bedingungen. Die Modellierung erfolgte bei klarem Himmel, 300 DU, einem solaren Zenitwinkel von 45° und einem Azimut von 180° und dem DISORT RTE-Löser.

4.5.2. Aerosol

Unter Verwendung der gleichen Bedingungen aus den Abbildungen 3 und 14 wurden die Auswirkungen der verschiedenen Aerosoltypen auf die erythemgewichtete diffuse UV-Bestrahlungsstärke sowohl unter verschatteten als auch unter unverschatteten Bedingungen analysiert. Da im Schatten nur diffuse Strahlung den Boden erreicht, wurde nur dieser Anteil analysiert. Abbildung 16 zeigt in der linken Größe die Änderungen mit der Höhe auf den diffusen Anteil bei normalen Bedingungen (links) und unter Schatten (rechts). Es ist zu erkennen, dass unter verschatteten Bedingungen die Variabilität mit der Höhe kleiner ist als unter unverschatteten Bedingungen und auch kleiner als die globale Bestrahlungsstärkevariabilität. Dieses Ergebnis kann so interpretiert werden, dass der größte Teil der Variabilität mit der Elevation aus dem direkten Anteil stammt. Wir können aus dieser Analyse auch schließen, dass die Standardbedingungen "Rural", "Maritime" und "Tropospheric" aus LibRadtran sehr ähnlich sind und nur eine oder zwei davon als Optionen auf den LUTs notwendig sind.

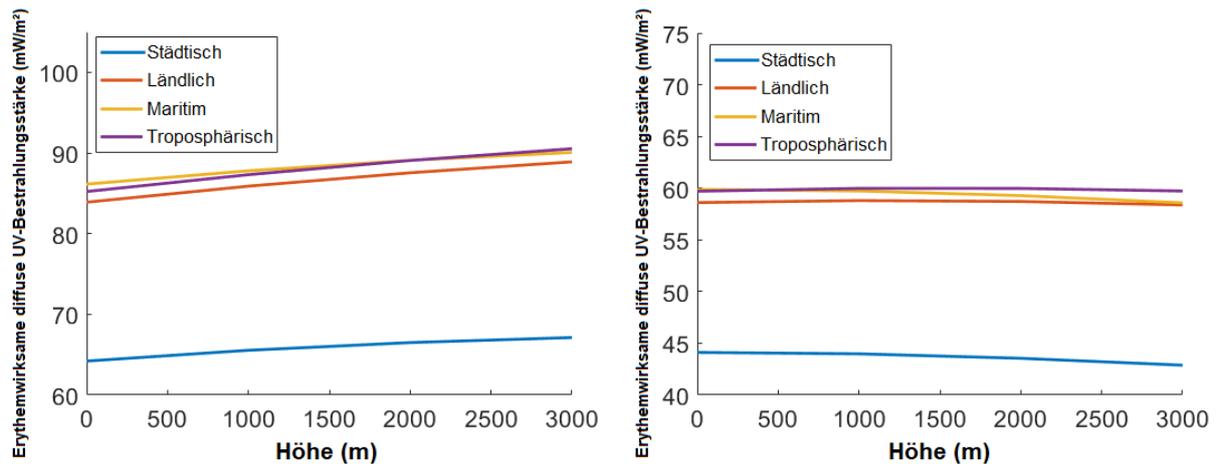


Abbildung 16: Variabilität der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke mit der Höhe für unverschattete (links) und verschattete (rechts) Bedingungen für verschiedene Aerosoleigenschaften. Die Modellierung wurde bei klarem Himmel, Ozonwerten von 300 DU, einem solaren Zenitwinkel von 45°, einem Azimut von 180° und dem DISORT RTE Solver durchgeführt.

4.5.3. Ozonprofil

Abbildung 17 zeigt, wie sich unter städtischen atmosphärischen Bedingungen die erythemgewichtete diffuse UV-Bestrahlungsstärke unter verschatteten Bedingungen für verschiedene Ozonwerte in unterschiedlichen Höhen ändert. Man kann erkennen, dass im Schatten die UV Werte von der Höhe über dem Meeresspiegel wenig beeinflusst werden, der Ozonwert hat dagegen einen großen Einfluss. Diese Analyse wurde zum Vergleich mit den Auswirkungen auf der Makroebene durchgeführt. Es ist erkennbar, dass die Höhe wiederum einen geringeren Effekt bei Verschattung hat. Da die LUTs jedoch für die Modellierung unter vielen verschiedenen Situationen, einschließlich unter direkter Sonneneinstrahlung, verwendet werden, muss die Höhe ohnehin in den vorherigen makroskaligen Modellierungsszenarien, die als Eingabe für die mikroskaligen Situationen verwendet werden, berücksichtigt werden.

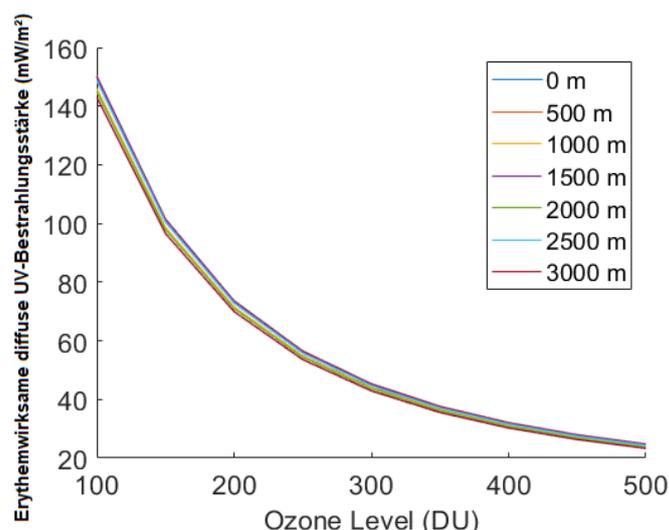


Abbildung 17: Variabilität der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke für verschiedene Ozonwerte in unterschiedlichen Höhen, für städtische Aerosolbedingungen. Die Modellierung wurde unter klaren Himmelsbedingungen, einem solaren Zenitwinkel von 45° und einem Azimut von 180° und dem DISORT RTE Solver durchgeführt.

4.5.4. Wolken

Um darüber hinaus die tägliche Variabilität der erythemgewichteten diffusen Bestrahlungsstärke zu testen, wurde die Gebäudekonfiguration aus Abbildung 18 verwendet

Abbildung 18 zeigt den Effekt zweier Gebäude vor der Sonne. Beide Gebäude haben die gleiche Größe und den gleichen Abstand wie das Gebäude aus Abbildung 14, befinden sich aber nun mit unterschiedlichen Winkeln zur Südposition (Südwest und Südost). Abbildung 19 zeigt die tageszeitliche Variabilität der globalen Bestrahlungsstärke für verschiedene solare Zenit- und Azimutwinkel unter klarem Himmel und bei Bewölkung. Die verwendete Winkelvariation betrug jeweils 10° im Azimut und 5° im Zenit. Die direkte Komponente der diffusen Bestrahlungsstärke wurde nur berücksichtigt, wenn die Sonne nicht hinter den Gebäuden stand. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass der Einfluss der direkten Komponente hoch ist und dass die Werte nahe an den bewölkten Werten liegen, wenn sie nicht berücksichtigt werden (lila und rote Linien). Aus dieser Analyse kann man erkennen, wie wichtig es ist, verschiedene Bewölkungsszenarien in die Analyse einzubeziehen. Wie bereits erwähnt, sollten verschiedene Szenarien unter bewölkten und wolkenfreien Bedingungen erstellt werden.

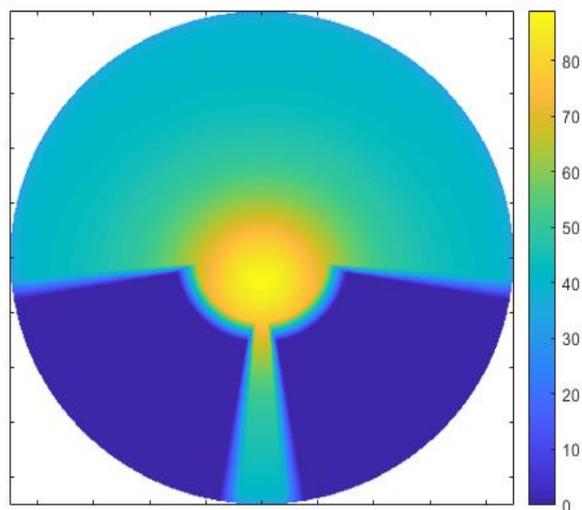


Abbildung 18: Erythemgewichtete Strahldichte (in $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$) bei wolkenlosem Himmel für städtische atmosphärische Bedingungen bei Vorhandensein von zwei Gebäuden. Die Modellierung wurde für Ozonwerte von 300 DU, einen solaren Zenitwinkel von 0° , einen Azimut von 180° und den DISORT RTE-Löser durchgeführt.

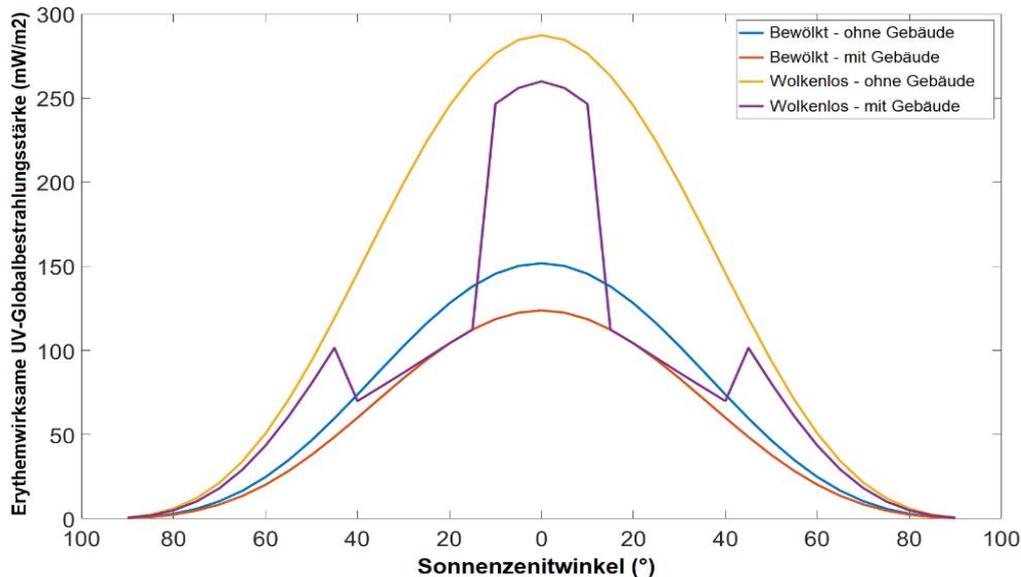


Abbildung 19: Tagesvariabilität der erythemgewichteten Globalbestrahlungsstärke bei bewölkt und wolkenlosem Himmel unter a) unverschatteten Bedingungen (kein Gebäude) und b) teilverschatteten Bedingungen. Es wurden die gleichen Konfigurationen wie in Abbildung 16 (mit Gebäude) verwendet. Die Modellierung wurde mit dem DISORT RTE, städtischen Aerosolbedingungen, Ozonwerten von 300 DU und einer Albedo von 5% durchgeführt.

4.5.5. Reflektion

Schließlich wurden die Auswirkungen von Reflexionen an Gebäuden mit einer ähnlichen vereinfachten isotropen Reflexionsmodellierung getestet, wie sie im SkyHelios-Modell verwendet wird. Abbildung 20 zeigt die verwendete Gebäudekonfiguration, wobei ein Gebäude die Sonne blockiert und ein anderes sie reflektiert. Beide Gebäude haben die gleiche Größe wie das Gebäude aus Abbildung 14 und befinden sich in einem Abstand von 4 Metern von der untersuchten Oberfläche und sowohl in südlicher als auch in nördlicher Position. Zum Vergleich wurde zunächst die Modellierung ohne das Gebäude im oberen Teil der Abbildung vorgenommen, in der die modellierte erythemgewichtete diffuse UV-Bestrahlungsstärke einen Gesamtwert von 44,11 mW/m² hatte. In einem zweiten Schritt wurde die Modellierung unter Verwendung von 3 verschiedenen Werten des Reflexionsvermögens durchgeführt: 0, 0,05 und 0,30, wobei die Ergebnisse der modellierten Bestrahlungsstärke 35,16 mW/m², 35,31 mW/m² bzw. 36,06 mW/m² betragen. Dieser Rückgang der gesamten UV-Bestrahlungsstärke mit der Einbeziehung des Gebäudes war bereits erwartet worden, da die aus der Gebäuderichtung kommende diffuse Strahldichte viel größer ist als die vom Gebäude selbst reflektierte Strahlung. Die Fehler liegen bei Nichtberücksichtigung der Strahldichte aus einer solchen Gebäudekonfiguration in der Größenordnung von 0,4% bei einem Reflexionsgrad von 0,05 und 2,5% bei einem Reflexionsgrad von 0,30. Aus dieser Analyse kann man schließen, dass die Auswirkungen der Reflexion meist gering sind, wenn isotrope Reflexionen verwendet werden, was für die meisten Fälle eine gute Näherung ist. Probleme können bei Materialien mit hoher Reflexion auftreten, wie z. B. Glas oder Metall, von denen eine spezifischere und richtungsbezogene Analyse durchgeführt werden muss.

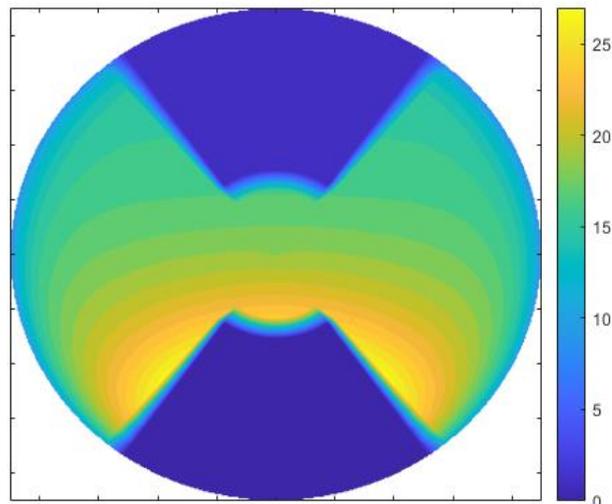


Abbildung 20: Gewichtete diffuse Strahldichte (in $\text{mW}/\text{m}^2\text{sr}$) bei wolkenlosem Himmel für städtische atmosphärische Bedingungen bei Vorhandensein von zwei künstlichen Gebäuden. Die Modellierung wurde für Ozonwerte von 300 DU, einen solaren Zenitwinkel von 45° , einen Azimut von 180° und den DISORT RTE-Löser durchgeführt.

5 DISKUSSION

Im Rahmen des Projektes "Machbarkeitsstudie zur mikroskaligen Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention" wurde eine allgemeine Analyse des Standes der Technik und eine Machbarkeitsstudie zur Modellierung erythemwirksamer Bestrahlungsstärken unter teilverschatteten (mikroskaligen Bereich) Bedingungen durchgeführt. Verschiedene Aspekte und Parameter wurden zunächst anhand von Ergebnissen aus der wissenschaftlichen Literatur und später mit eigenen Modellrechnungen analysiert, darunter atmosphärische Variablen (z.B. Wolken, Ozon und Aerosole), Darstellungen von Schatteneffekten und GIS-Modellen. Das Vorgehen für die mikroskalige Modellierung kann in 4 Schritte eingeteilt werden:

- a) Makroskalige Parameter, die nur einen eher geringen Einfluss auf die erythemwirksame Bestrahlungsstärke haben, wie die Temperatur, verschiedene Spurengase in der Troposphäre und der Sonnen-Erde Abstand. Hier können einfach die Standardwerte des Strahlungstransfermodells verwendet werden.
- b) Makroskalige Parameter, die einen großen Einfluss auf die erythemwirksame Bestrahlungsstärke haben, Sonnenzenitwinkel, Gesamtozon, Wolken, Aerosole und Albedo. Für diese Parameter sollte eine Modellierung durchgeführt und die Werte sollten in LUTs abgespeichert werden, die dann bei der mikroskaligen Modellierung verwendet werden.
- c) Berücksichtigung „Einfacher“ mikroskaliger Parameter, wie die Position von Gebäuden im Raum.
- d) Komplexe mikroskalige Parameter, die eine zusätzliche Berechnung erfordern, wie Bäume oder stark reflektierende Objekte. Diese Parameter werden weiter unten noch einmal ausführlicher diskutiert.

Was die atmosphärischen Variablen betrifft, so können die meisten von ihnen in frühere Strahldichtemodellierungen mit Strahlungstransportmodellen (RTMS), wie libRadtran UVSPEC, für die Makroskala einbezogen und dann in Look-up-Tabellen für eine spätere Einbeziehung in die mikroskalige Modellierung gespeichert werden. Mit diesem Ansatz lassen

sich lange Rechenzeiten vermeiden, da die Strahldichte- und Bestrahlungsstärkewerte bereits gespeichert sind. Für die Mikroskala kann auf diese Daten je nach den verschiedenen atmosphärischen Bedingungen einfach zugegriffen werden. Die Modellierung kann für verschiedene Aerosol-, Ozon- und Wolkenbedingungen und auch für verschiedene Zenitwinkel vorgenommen werden. Andere Variablen wie Höhe und Albedo können ebenfalls gespeichert, interpoliert oder extrapoliert werden.

Bei einer solchen Softwareentwicklung müssen zur Erzielung genauer Ergebnisse zwei Herausforderungen bewältigt werden: die Modellierung unter Baumschatten und die Analyse der Reflexion von vertikalen Objekten.

Bäume können auf zwei verschiedene Arten modelliert werden indem sie entweder als teiltransparente Objekte betrachtet, oder mithilfe von komplizierteren Modellierungstechniken, die in der Literatur zu finden sind, parametrisiert werden. Bei der ersten Lösung kann die Transmission verschiedener Baumarten im Voraus modelliert und dann auf die vorgeschlagene Software angewendet werden. Für die zweite Lösung wäre der beste Ansatz, zu prüfen, ob sich die Sonne hinter einem Baum befindet, und dann die Bestrahlungsstärke zu modellieren, die den Boden erreicht. Möglicherweise könnten zwei Versionen der Software erstellt werden. Eine erste, vereinfachte Version unter Verwendung der ersten Lösung für normale städtische Bedingungen und eine weitere für Gebiete mit vielen Bäumen. Darüber hinaus ist es auch möglich, Bilder von bestehenden Bäumen zu machen und die Bestrahlungsverhältnisse unter diesen Bedingungen mit hochauflösenden Bildern zu modellieren.

Hinsichtlich der Reflexionsprobleme mögen vereinfachte isotrope Lösungen für die meisten Oberflächen die leichteste und einfachste Lösung sein, jedoch würde dies, wie erwähnt, unter bestimmten Bedingungen Fehler für sehr reflexive Materialien wie Glas oder Metall mit sich bringen. Das Hauptproblem ist, dass es nicht genügend Informationen in der Literatur gibt und sogar einige Analysen widersprüchlich sind. Unser Vorschlag wäre, mit den vereinfachten isotropen Lösungen zu beginnen, die der Benutzer manuell auswählen kann, und dann ein Zusatzpaket mit reflexionsintensiver Analyse, mit einigen Materialoptionen auszuarbeiten.

Eine Herausforderung besteht darin, dass es für viele Oberflächentypen keine spezifische Winkelreflexionsanalyse für den UV-Bereich gibt und die Materialoptionen begrenzt wären. Um dieser Schwierigkeiten zu begegnen sollten Studien durchgeführt und später als Materialoptionen in die Software aufgenommen werden. Es sei noch darauf hingewiesen, dass die tatsächliche Rechenzeit erst während der Entwicklung der Software bestimmt werden kann und eine detailliertere Modellierung erst durchgeführt werden sollte wenn die Rechenzeit in akzeptablen Grenzen bleibt. Der mögliche Komplexitätsgrad wird auch von den unterschiedlichen Bedürfnissen der Benutzer abhängen.

Die abschließende Schlussfolgerung aus diesem Bericht ist, dass es möglich ist, die erythemgewichtete Bestrahlungsstärke unter mikroskaligen teilverschatteten Bedingungen zu modellieren. Es ist wichtig zu betonen, dass aufgrund des sehr hohen Anteils der UV-Bestrahlungsstärke, der aus diffuser Himmelsstrahlung stammt, die Modellierung der Strahldichte in Abhängigkeit von Einfalls- und Azimutwinkeln entscheidend ist, um größere Fehler bei der Bestimmung der Bestrahlungsstärke unter diesen Bedingungen zu vermeiden. Diese Tatsache bringt die Notwendigkeit mit sich, eine neue Software zu entwickeln, da die meisten der aktuellen GIS-Programme bei Weitem zu vereinfachte Darstellungen der Strahlungsverhältnisse verwenden. Für die Beschreibung einiger mikroskaliger Parameter wie Reflexion, Albedo und Solar View Factor kann unter Umständen jedoch auf bereits entwickelte Software (z.B. SkyHelios) zurückgegriffen werden.

6 EMPFEHLUNGEN

Die Hauptempfehlung ist die Entwicklung einer Software mit allen notwendigen Parametern für den mikroskaligen, teilverschatteten Bereich. Die vorgeschlagene Methode kann durchaus mit GIS-Systemen verwendet werden und es kann eine Software entwickelt werden, die für verschiedene Anwendungen (z.B. für Architekten) eingesetzt werden kann. Von der Anpassung und Verwendung anderer unterschiedlicher GIS-Software (z.B. SkyHelios und RADIANCE) wird jedoch wegen der sehr unterschiedlichen Ansätze und Ziele abgeraten. Für den vorliegenden Anwendungsfall wurden diese Softwarepakete auch nicht entwickelt. So ist z.B. im Fall von SkyHelios die Analyse der Solaren Strahlung zu vereinfacht, um wirklich aussagekräftige Ergebnisse im UV zu erhalten, während in RADIANCE das Modell zu spezifisch für den sichtbaren Spektralbereich ist und daher nicht einfach an den UV-Bereich angepasst werden kann. Wahrscheinlich würde es auch sehr lange Rechenzeiten benötigen. Für die Entwicklung der Software selbst wird empfohlen, die Fachkenntnisse von mindestens zwei Hauptbereichen miteinander zu vereinen, insbesondere der Meteorologie (genauer gesagt im Bereich der Strahlung) und der Informatik.

Schließlich werden aufgrund der unterschiedlichen Komplexitätsgrade, die die vorgeschlagene Software und Methode haben kann (meist im Zusammenhang mit der Baum- und Reflexionsanalyse), auch zwei Softwareebenen empfohlen; eine einfachere für den allgemeinen Benutzer und eine fortgeschrittene für präzisere Ergebnisse. Das erste vereinfachte Modell sollte Bäume als halbtransparente Hindernisse behandeln, wobei die vorherige Baummodellierung auf der Grundlage von Daten aus der Blatttransmission und der vereinfachten Reflexionsanalyse mit der Annahme der Isotropie verwendet werden sollte. Diese Methode soll trotz ihrer Vereinfachungen größere Fehler bei der Analyse nur in der Nähe von sehr reflexiven vertikalen Flächen wie Glas oder Metall aufweisen. Die fortgeschrittene Methode sollte die Modellierung unter Bäumen auf der Grundlage verschiedener verfügbarer Methoden verwenden, die auf den Eigenschaften der Bäume basieren, kombiniert mit einer winkelabhängigen Reflexionsanalyse. Es ist wichtig, Studien zur winkelabhängigen Reflexivität verschiedener Materialien durchzuführen, da es in der Literatur zu diesem Thema an Informationen fehlt.

Weiterhin wird angeraten die Sinnhaftigkeit des Ansatzes nur die Bestrahlungsstärke auf horizontale Flächen zu betrachten zu überprüfen. Sinnvoller erscheint die Anwendung anderer Geometrien, die Exposition eines Menschen besser als die horizontal stehende Fläche approximiert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine mikroskalige Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention möglich ist, wenn folgende Bedingungen berücksichtigt werden:

1. Modellierung der spektralen Strahldichte
2. Vorabmodellierung wichtiger atmosphärischer Parameter (Szenarien)
3. Verwendung von look-up-tables zur Begrenzung der Rechenzeit
4. 3-D Eingangsdaten von Gebäuden und Bäumen
5. Parametrisierung von Baumschatten
6. Sinnvolle Annahmen zu den Reflektionseigenschaften von nicht horizontal stehenden Hindernissen.

7 LITERATUR

- Aida, M., Gotoh, K., 1982. Urban albedo as a function of the urban structure ? A two-dimensional numerical simulation. *Boundary-Layer Meteorol.* 23, 415–424. <https://doi.org/10.1007/BF00116270>
- Allaart, M., van Weele, M., Fortuin, P., Kelder, H., 2004. An empirical model to predict the UV-index based on solar zenith angles and total ozone. *Meteorol. Appl.* 11, 59–65. <https://doi.org/10.1017/S1350482703001130>
- Arnfield, A.J., 1988. VALIDATION OF AN ESTIMATION MODEL FOR URBAN SURFACE ALBEDO. *Phys. Geogr.* 9, 361–372. <https://doi.org/10.1080/02723646.1988.10642360>
- Bernabé, A., Musy, M., Andrieu, H., Calmet, I., 2015. Radiative properties of the urban fabric derived from surface form analysis: A simplified solar balance model. *Sol. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.031>
- Brabham, D.E., Briggs, R.H., 1975. Optical properties of UV-B radiation into higher plant tissue, in: Nachtwey, D.S., Caldwell, M.M. (Eds.), *Impacts of Climatic Change on the Biosphere, Part 1: Ultraviolet Radiation Effects*. Climatic Impact Assessment Program, Monograph 5.
- Burrows, W.R., Vallée, M., Wardle, D.I., Kerr, J.B., Wilson, L.J., Tarasick, D.W., 2007. The Canadian operational procedure for forecasting total ozone and UV radiation. *Meteorol. Appl.* 1, 247–265. <https://doi.org/10.1002/met.5060010307>
- Calbó, J., 2005. Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review. *Rev. Geophys.* 43, RG2002. <https://doi.org/10.1029/2004RG000155>
- Calcabrini, A., Ziar, H., Isabella, O., Zeman, M., 2019. A simplified skyline-based method for estimating the annual solar energy potential in urban environments. *Nat. Energy* 4, 206–215. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0318-6>
- Castro, T., Madronich, S., Rivale, S., Muhlia, A., Mar, B., 2001. The influence of aerosols on photochemical smog in Mexico City. *Atmos. Environ.* [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00449-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00449-0)
- Cokkinides, V.E., Johnston-Davis, K., Weinstock, M., O’Connell, M.C., Kalsbeek, W., Thun, M.J., Wingo, P.A., 2001. Sun Exposure and Sun-Protection Behaviors and Attitudes among U.S. Youth, 11 to 18 Years of Age. *Prev. Med. (Baltim.)* 33, 141–151. <https://doi.org/10.1006/pmed.2001.0877>
- CUI, M., VOGELMANN, T.C., SMITH, W.K., 1991. Chlorophyll and light gradients in sun and shade leaves of *Spinacia oleracea*. *Plant, Cell Environ.* 14, 493–500. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01519.x>
- Day, T.A., Howells, B.W., Rice, W.J., 1994. Ultraviolet absorption and epidermal-transmittance spectra in foliage. *Physiol. Plant.* 92, 207–218. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb05328.x>
- De Backer, H., Koepke, P., Bais, A., de Cabo, X., Frei, T., Gillotay, D., Haite, C., Heikkilä, A., Kazantzidis, A., Koskela, T., Kyrö, E., Lapeta, B., Lorente, J., Masson, K., Mayer, B., Plets, H., Redondas, A., Renaud, A., Schaubberger, G., Schmalwiesser, A., Schwander, H., Vanicek, K., 2001. Comparison of measured and modelled uv indices for the assessment of health risks. *Meteorol. Appl.* 8, S1350482701003024. <https://doi.org/10.1017/S1350482701003024>
- De Bock, V., De Backer, H., Van Malderen, R., Mangold, A., Delcloo, A., 2014. Relations between erythemal UV dose, global solar radiation, total ozone column and aerosol optical depth at Uccle, Belgium. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 12251–12270. <https://doi.org/10.5194/acp-14-12251-2014>
- Degünther, M., Meerkötter, R., Albold, A., Seckmeyer, G., 1998. Case study on the influence of inhomogeneous surface albedo on UV irradiance. *Geophys. Res. Lett.* 25, 3587–3590. <https://doi.org/10.1029/98GL52785>
- Deo, R.C., Downs, N., Parisi, A. V., Adamowski, J.F., Quilty, J.M., 2017. Very short-term reactive forecasting of the solar ultraviolet index using an extreme learning machine integrated with the solar zenith angle. *Environ. Res.* 155, 141–166.

- <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.035>
- Diffey, B.L., 1977. The calculation of the spectral distribution of natural ultraviolet radiation under clear day conditions (for UV dosimeter correction). *Phys. Med. Biol.* 22, 309.
- Diffey, B.L., Diffey, J.L., 2002. Sun protection with trees. *Br. J. Dermatol.* 147, 397–398. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2133.2002.483010.x>
- DIN 5031, 1982. Teil 1: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik. Beuth. <https://doi.org/10.31030/2700266>
- Downs, N., Parisi, A., Turner, J., Turnbull, D., 2008. Modelling ultraviolet exposures in a school environment. *Photochem. Photobiol. Sci.* 7, 700–710. <https://doi.org/10.1039/b801685b>
- Emde, C., Buras-Schnell, R., Kylling, A., Mayer, B., Gasteiger, J., Hamann, U., Kylling, J., Richter, B., Pause, C., Dowling, T., Bugliaro, L., 2016. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geosci. Model Dev.* 9, 1647–1672. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1647-2016>
- Engelsen, O., Kylling, A., 2005. Fast simulation tool for ultraviolet radiation at the earth's surface. *Opt. Eng.* 44, 041012. <https://doi.org/10.1117/1.1885472>
- Erdélyi, R., Wang, Y., Guo, W., Hanna, E., Colantuono, G., 2014. Three-dimensional SOLar RADIation Model (SORAM) and its application to 3-D urban planning. *Sol. Energy* 101, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.023>
- Feister, U., Grewe, R., 1995. SPECTRAL ALBEDO MEASUREMENTS IN THE UV and VISIBLE REGION OVER DIFFERENT TYPES OF SURFACES. *Photochem. Photobiol.* 62, 736–744. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1995.tb08723.x>
- Fioletov, V., Kerr, J.B., Fergusson, A., 2010. The UV Index: Definition, Distribution and Factors Affecting It. *Can. J. Public Heal.* 101, I5–I9. <https://doi.org/10.1007/BF03405303>
- Fountoulakis, I., Bais, A.F., Fragkos, K., Meleti, C., Tourpali, K., Maria Zempila, M., 2016. Short- and long-term variability of spectral solar UV irradiance at Thessaloniki, Greece: Effects of changes in aerosols, total ozone and clouds. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 2493–2505. <https://doi.org/10.5194/acp-16-2493-2016>
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., Brito, M.C., 2015. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41, 915–931. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.060>
- Fröhlich, D., Matzarakis, A., 2018. SkyHelios - A model for the rapid calculation of spatially resolved micro scale climate factors.
- GDAL Development Team, 2016. GDAL - Geospatial Data Abstraction Library.
- Grant, R.H., 1997. Biologically Active Radiation in the Vicinity of a Single Tree. *Photochem. Photobiol.* 65, 974–982. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1997.tb07957.x>
- Grant, R.H., Gao, W., 2003. Diffuse fraction of UV radiation under partly cloudy skies as defined by the Automated Surface Observation System (ASOS). *J. Geophys. Res.* 108, 4046. <https://doi.org/10.1029/2002JD002201>
- Grant, R.H., Heisler, G.M., 2006. Effect of Cloud Cover on UVB Exposure Under Tree Canopies: Will Climate Change Affect UVB Exposure? *Photochem. Photobiol.* 82, 487. <https://doi.org/10.1562/2005-07-07-ra-604>
- Grant, R.H., Heisler, G.M., Gao, W., 2002. Estimation of Pedestrian Level UV Exposure Under Trees. *Photochem. Photobiol.* 75, 369. [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2002\)075<0369:eoplue>2.0.co;2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2002)075<0369:eoplue>2.0.co;2)
- Grant, R.H., Heisler, G.M., Gao, W., 1997. Clear sky radiance distributions in ultraviolet wavelength bands. *Theor. Appl. Climatol.* 56, 123–135. <https://doi.org/10.1007/BF00866422>
- Grant, R.H., Heisler, G.M., Gao, W., Jenks, M., 2003. Ultraviolet leaf reflectance of common urban trees and the prediction of reflectance from leaf surface characteristics, in: *Agricultural and Forest Meteorology*. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.025>
- Groleau, D., Mestayer, P.G., 2013. Urban Morphology Influence on Urban Albedo: A Revisit with the Solene Model. *Boundary-Layer Meteorol.* 147, 301–327.

- <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9786-6>
- Haluza, D., Simic, S., Hölting, J., Cervinka, R., Moshhammer, H., 2014. Connectedness to Nature and Public (Skin) Health Perspectives: Results of a Representative, Population-Based Survey among Austrian Residents. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 11, 1176–1191. <https://doi.org/10.3390/ijerph110101176>
- Heisler, G., Grant, R., 2000. Ultraviolet radiation in urban ecosystems with consideration of effects on human health. *Urban Ecosyst.* 4, 193–229. <https://doi.org/10.1023/A:1012210710900>
- Heisler, G.M., Grant, R.H., Gao, W., 2003a. Individual- and scattered-tree influences on ultraviolet irradiance. *Agric. For. Meteorol.* 120, 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.024>
- Heisler, G.M., Grant, R.H., Gao, W., 2002. Urban tree influences on ultraviolet irradiance, in: *SPIE: Ultraviolet Ground- and Space-Based Measurements, Models, and Effects*. San Diego, pp. 277–290.
- Heisler, G.M., Grant, R.H., Nowak, D.J., Gao, W., Crane, D.E., Walton, J.T., 2003b. Inclusion of an ultraviolet radiation transfer component in an urban forest effects model for predicting tree influences on potential below-canopy exposure to UVB radiation. *Ultrav. Ground- Space-based Meas. Model. Eff. III* 5156, 228. <https://doi.org/10.1117/12.509193>
- HEMI, 2000. *The Solar Analyst 1.0 User Manual Draft*. Helios Environmental Modeling Institute 568 (HEMI). Kansas, KS.
- Hunter, N., Rendell, R.J., Higlett, M.P., O'Hagan, J.B., Haylock, R.G.E., 2019. Relationship between erythema effective UV radiant exposure, total ozone, cloud cover and aerosols in southern England, UK. *Atmos. Chem. Phys.* 19, 683–699. <https://doi.org/10.5194/acp-19-683-2019>
- Jelle, B.P., 2013. Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings - Measurement and calculation. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 116, 291–323. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.04.032>
- Jendritzky, G., Menz, H., Schirmer, H., Schmidt-Kessen, W., 1990. *Methodik zur Raumbezogenen Bewertung der Thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell)*.
- Johnson, G.T., Watson, I.D., 1984. The Determination of View-Factors in Urban Canyons. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 23, 329–335. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0329:TDOVFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0329:TDOVFI>2.0.CO;2)
- Juzeniene, A., Brekke, P., Dahlback, A., Andersson-Engels, S., Reichrath, J., Moan, K., Holick, M.F., Grant, W.B., Moan, J., 2011. Solar radiation and human health. *Reports Prog. Phys.* 74, 066701. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/74/6/066701>
- Kinney, J., Long, C.S., Geller, A.C., 2000. The Ultraviolet Index: A Useful Tool. *Dermatol. Online J.* 6.
- Kondo, A., Ueno, M., Kaga, A., Yamaguchi, K., 2001. The Influence Of Urban Canopy Configuration On Urban Albedo. *Boundary-Layer Meteorol.* 100, 225–242. <https://doi.org/10.1023/A:1019243326464>
- KRAUSS, P., MARKSTADTER, C., RIEDERER, M., 1997. Attenuation of UV radiation by plant cuticles from woody species. *Plant, Cell Environ.* 20, 1079–1085. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1997.tb00684.x>
- Krayenhoff, E.S., Voogt, J.A., 2007. A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures. *Boundary-Layer Meteorol.* 123, 433–461. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9153-6>
- Kuchinke, C., Nunez, M., 2003. An anisotropy correction method for all-sky measurements of diffuse UV-B erythemal irradiance. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 20, 1523–1533. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<1523:AACMFA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1523:AACMFA>2.0.CO;2)
- Lamy, K., Portafaix, T., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Morel, B., Pazmino, A., Metzger, J.M., Auriol, F., Deroo, C., Duflot, V., Goloub, P., Long, C.N., 2018. Ultraviolet radiation modelling from ground-based and satellite measurements on Reunion Island, southern tropics. *Atmos. Chem. Phys.* 18, 227–246.

- <https://doi.org/10.5194/acp-18-227-2018>
- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Sol. Energy* 4, 1–19. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1)
- Livingston, P.M., White, V., Hayman, J., Dobbins, S., 2003. Sun exposure and sun protection behaviours among Australian adolescents: trends over time. *Prev. Med. (Baltim)*. 37, 577–584. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2003.09.004>
- Longstreth, J., de Gruijl, F.R., Kripke, M.L., Abseck, S., Arnold, F., Slaper, H.I., Velders, G., Takizawa, Y., van der Leun, J.C., 1998. Health risks. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 46, 20–39. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(98\)00183-3](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(98)00183-3)
- Lucas, R.M., McMichael, A.J., Armstrong, B.K., Smith, W.T., 2008. Estimating the global disease burden due to ultraviolet radiation exposure. *Int. J. Epidemiol.* 37, 654–667. <https://doi.org/10.1093/ije/dyn017>
- Machete, R., Falcão, A.P., Gomes, M.G., Moret Rodrigues, A., 2018. The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. *Energy Build.* 177, 290–302. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.064>
- Madronich, S., 1993. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere, in: Tevini, M. (Ed.), *Environmental Effects of UV*. CRC Press.
- Mardaljevic, J., 2000. Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. *Light. Res. Technol.* 32, 111–118. <https://doi.org/10.1177/096032710003200302>
- Marsh, A., 2005. THE APPLICATION OF SHADING MASKS IN BUILDING SIMULATION, in: Ninth International IBPSA Conference. Montréal, Canada, pp. 725–732.
- Matzarakis, A., Matuschek, O., 2011. Sky view factor as a parameter in applied climatology - Rapid estimation by the SkyHelios model. *Meteorol. Zeitschrift* 20, 39–45. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0499>
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2010. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. *Int. J. Biometeorol.* 54, 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Mayer, B., 2009. Radiative transfer in the cloudy atmosphere. *Eur. Phys. J. Conf.* 1, 75–99. <https://doi.org/10.1140/epjconf/e2009-00912-1>
- McKenzie, R.L., Paulin, K.J., Madronich, S., 1998. Effects of snow cover on UV irradiance and surface albedo: A case study. *J. Geophys. Res. Atmos.* 103, 28785–28792. <https://doi.org/10.1029/98JD02704>
- Meleti, C., Bais, A.F., Kouremeti, N., Garane, K., Kazadzis, S., Zerefos, C., 2009. Factors affecting solar ultraviolet irradiance measured since 1990 at thessaloniki, greece. *Int. J. Remote Sens.* 30, 4167–4179. <https://doi.org/10.1080/01431160902822864>
- Miguet, F., Groleau, D., 2001. Simulation tool including transmitted direct and diffuse light: Application to the evaluation of daylighting inside glazed intermediate spaces, in: 7th IBPSA. pp. 907–914.
- Mims III, F.M., Frederick, J.E., 1994. Cumulus clouds and UV-B. *Nature* 371, 291–291. <https://doi.org/10.1038/371291a0>
- Moise, A.F., Büttner, P.G., Harrison, S.L., 1999. Sun Exposure at School. *Photochem. Photobiol.* 70, 269–274. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1999.tb07999.x>
- Na, H.R., Heisler, G.M., Nowak, D.J., Grant, R.H., 2014. Modeling of urban trees' effects on reducing human exposure to UV radiation in Seoul, Korea. *Urban For. Urban Green.* 13, 785–792. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.05.009>
- Nazarian, N., Fan, J., Sin, T., Norford, L., Kleissl, J., 2017. Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: A 3D numerical model for standard effective temperature. *Urban Clim.* 20, 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.011>
- Nicodemus, F.E., 1970. Reflectance Nomenclature and Directional Reflectance and Emissivity. *Appl. Opt.* 9, 1474. <https://doi.org/10.1364/AO.9.001474>
- OFCM, 2017. *Surface Weather Observations and Reports, FCM-H1-201*. ed. Washington, D.C.
- Parisi, A. V., Amar, A., Downs, N.J., Igoe, D.P., Harrison, S.L., Turner, J., 2019. Development of a model for calculating the solar ultraviolet protection factor of small to

- medium sized built shade structures. *Build. Environ.* 147, 415–421.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.010>
- Piazena, H., 1996. The effect of altitude upon the solar UV-B and UV-A irradiance in the tropical Chilean andes. *Sol. Energy.* [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00049-7)
- QGIS Development Team, 2016. Qgis geographic information system.
- Qi, Y., Heisler, G.M., Gao, W., Vogelmann, T.C., Bai, S., 2010. Characteristics of UV-B Radiation Tolerance in Broadleaf Trees in Southern USA, in: *UV Radiation in Global Climate Change*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 509–530.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-03313-1_18
- Raptis, I.P., Kazadzis, S., Eleftheratos, K., Amiridis, V., Fountoulakis, I., 2018. Single scattering albedo's spectral dependence effect on UV irradiance. *Atmosphere (Basel)*. 9, 1–19. <https://doi.org/10.3390/atmos9090364>
- Religi, A., Moccozet, L., Farahmand, M., Vuilleumier, L., Vernez, D., Milon, A., Bulliard, J.L., Backes, C., 2016. SimUVEx v2: A numeric model to predict anatomical solar ultraviolet exposure. *Proc. 2016 SAI Comput. Conf. SAI 2016* 1344–1348.
<https://doi.org/10.1109/SAI.2016.7556156>
- Renaud, A., Staehelin, J., Fröhlich, C., Philipona, R., Heimo, A., 2000. Influence of snow and clouds on erythemal UV radiation: Analysis of Swiss measurements and comparison with models. *J. Geophys. Res. Atmos.* 105, 4961–4969.
<https://doi.org/10.1029/1999JD900160>
- Reuder, J., Schwander, H., 1999. Aerosol effects on UV radiation in nonurban regions. *J. Geophys. Res. Atmos.* 104, 4065–4077. <https://doi.org/10.1029/1998JD200072>
- Riechelmann, S., Schrempf, M., Seckmeyer, G., 2013. Simultaneous measurement of spectral sky radiance by a non-scanning multidirectional spectroradiometer (MUDIS). *Meas. Sci. Technol.* 24. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/12/125501>
- Robinson, D., Stone, A., 2004. Solar radiation modelling in the urban context. *Sol. Energy.* <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.05.010>
- Rozanov, V. V., Diebel, D., Spurr, R.J.D., Burrows, J.P., 1997. GOMETRAN: A radiative transfer model for the satellite project GOME, the plane-parallel version. *J. Geophys. Res. Atmos.* 102, 16683–16695. <https://doi.org/10.1029/96JD01535>
- Schaepman-Strub, G., Schaepman, M.E., Painter, T.H., Dangel, S., Martonchik, J. V., 2006. Reflectance quantities in optical remote sensing—definitions and case studies. *Remote Sens. Environ.* 103, 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.03.002>
- Schippnick, P.F., Green, A.E.S., 1982. ANALYTICAL CHARACTERIZATION OF SPECTRAL ACTINIC FLUX and SPECTRAL IRRADIANCE IN THE MIDDLE ULTRAVIOLET. *Photochem. Photobiol.* 35, 89–101. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1982.tb03815.x>
- Schmalwieser, A.W., Enzi, C., Wallisch, S., Holawe, F., Maier, B., Weihs, P., 2010. UV exposition during typical lifestyle behavior in an urban environment. *Photochem. Photobiol.* 86, 711–715. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2010.00714.x>
- Schrempf, M., Thuns, N., Lange, K., Seckmeyer, G., 2017. Impact of Orientation on the Vitamin D Weighted Exposure of a Human in an Urban Environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 14, 920. <https://doi.org/10.3390/ijerph14080920>
- Seckmeyer, G., Mustert, C., Schrempf, M., McKenzie, R., Liley, B., Kotkamp, M., Bais, A., Gillotay, D., Slaper, H., Siani, A.-M., Smedley, A., Webb, A., 2018a. Why is it so hard to gain enough Vitamin D by solar exposure in the European winter? *Meteorol. Zeitschrift.* <https://doi.org/10.1127/metz/2018/0855>
- Seckmeyer, G., Schrempf, M., Wiczorek, A., Riechelmann, S., Graw, K., Seckmeyer, S., Zankl, M., 2013. A Novel Method to Calculate Solar UV Exposure Relevant to Vitamin D Production in Humans. *Photochem. Photobiol.* 89, 974–983.
<https://doi.org/10.1111/php.12074>
- Seckmeyer, G., Wendisch, M., Macke, A., 2018b. Strahlungsgrößen, -gesetze und –übertragung, (Radiation properties, radiation laws and radiation transfer), in: *Promet, Heft 100, Strahlungsbilanzen*. Deutscher Wetterdienst (DWD).
- Seckmeyer, G., Zittermann, A., McKenzie, R., Greinert, R., 2012. Solar radiation and human

- health, in: Geuymard, C. (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer, New York, NY, USA, pp. 9649–9672.
- Shettle, E., 1989. Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies, in: *Atmospheric propagation in the uv, visible, ir and mm-region and related system aspects*, in: AGARD Conference Proceedings. Copenhagen, Denmark.
- Sliney, D.H., 1986. Physical factors in cataractogenesis: Ambient ultraviolet radiation and temperature. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 27, 781–790.
- Stamnes, K., Slusser, J., Bowen, M., 1991. Derivation of total ozone abundance and cloud effects from spectral irradiance measurements. *Appl. Opt.* 30, 4418. <https://doi.org/10.1364/AO.30.004418>
- Stamnes, K., Tsay, S.-C., Wiscombe, W., Jayaweera, K., 1988. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Appl. Opt.* 27, 2502. <https://doi.org/10.1364/AO.27.002502>
- Stamnes, K., Tsay, S.-C., Wiscombe, W., Laszlo, I., 2000. *General Purpose Fortran Program for Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer in Scattering and Emitting Layered Media: An Update of DISORT*. Hoboken.
- Turner, J., Parisi, A. V., 2018. Ultraviolet radiation albedo and reflectance in review: The influence to ultraviolet exposure in occupational settings. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15. <https://doi.org/10.3390/ijerph15071507>
- US EPA, 2019. How UV Index is calculated [WWW Document]. URL <https://www.epa.gov/sunsafety> (accessed 11.5.19).
- Valko, P., 1966. Die Himmelsstrahlung in ihrer Beziehung zu verschiedenen Parametern. *Arch. für Meteorol. Geophys. und Bioklimatologie Ser. B* 14, 336–359. <https://doi.org/10.1007/BF02243366>
- Van Weele, M., Martin, T.J., Blumthaler, M., Brogniez, C., Den Outer, P.N., Engelsen, O., Lenoble, J., Mayer, B., Pfister, G., Ruggaber, A., Walravens, B., Weihs, P., Gardiner, B.G., Gillotay, D., Haferl, D., Kylling, A., Seckmeyer, G., Wauben, W.M.F., 2000. From model intercomparison toward benchmark UV spectra for six real atmospheric cases. *J. Geophys. Res. Atmos.* 105, 4915–4925. <https://doi.org/10.1029/1999JD901103>
- Vanicek, K., Frei, T., Litynska, Z., Schmalwieser, A., 1999. UV- Index for the Public, A guide for publication and interpretation of solar UV Index forecasts for the public prepared by the Working Group 4 of the COST-713 Action “UVB Forecasting.”
- VDI, 2019. *Environmental meteorology - Interactions between atmosphere and surfaces - Calculation of spectral short-wave and long-wave radiation*.
- Wai, K.M., Yu, P.K.N., Chan, P.M., 2017. Urban UV environment in a sub-tropical megacity – A measurement and modelling study. *Results Phys.* 7, 2705–2710. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.07.055>
- Ward, G.J., 1994. The RADIANCE lighting simulation and rendering system. *Proc. 21st Annu. Conf. Comput. Graph. Interact. Tech. SIGGRAPH 1994* 459–472. <https://doi.org/10.1145/192161.192286>
- WHO, 2008. *Vitamin D and Cancer*. Geneva, Switzerland.
- Yang, X., Heisler, G.M., Montgomery, M.E., Sullivan, J.H., Whereat, E.B., Miller, D.R., 1995. Radiative properties of hardwood leaves to ultraviolet irradiation. *Int. J. Biometeorol.* 38, 60–66. <https://doi.org/10.1007/BF01270660>