



Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Mikroskalige Modellierung von UV-Belastungen und gefühlter Temperatur in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention

Vorhaben 3621S72430

pecanode GmbH

Dr. Matthias Sühling
Katrin Gehrke
Helge Knoop

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

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUV (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-234/24

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

urn:nbn:de:0221-2024101847245

Salzgitter, Oktober 2024

Mikroskalige Modellierung von UV-Belastungen und gefühlter Temperatur in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention

Abschlussbericht nach § 12 Abs. 3, 4 ABFE-BMU

Auftragnehmer
pecanode GmbH
Peterstr. 30
38640 Goslar

Autoren
Dr. Matthias Sühring
Katrin Gehrke
Helge Knoop

Vorbemerkung

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

Goslar, November 2023

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens „Mikroskalige Modellierung von UV-Belastungen und gefühlter Temperatur in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention“ wurde ein urbanes UV-Strahlungsmodell in das mikroskalige Stadtklima- und Strömungsmodell PALM implementiert, mit dem Ziel die erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke in bebauten Gebieten tageszeitabhängig zu quantifizieren. Dies soll Stadtplaner in Kommunen und Behörden dazu befähigen, wissenschaftlich fundierte Aussagen über die UV-Belastung in öffentlichen Bereichen zu treffen, mit dem Ziel, Strategien zur Reduktion der UV-Exposition der Bevölkerung zu implementieren.

Das entwickelte urbane UV-Strahlungsmodell berücksichtigt Abschattungen durch Bäume, Gebäude und Sonnenschutzvorrichtungen wie Markisen oder Sonnensegel, Transmission durch Pflanzenbestände sowie multiple Reflexionen an urbanen Oberflächen. Es wurden zwei Modellierungsansätze implementiert: ein raumwinkelunabhängiger Ansatz bei dem angenommen wird, dass der diffuse Strahlungsanteil isotrop verteilt ist, sowie ein raumwinkelabhängiger Ansatz, bei dem die Strahldichte aus jedem Raumwinkel individuell betrachtet wird. Das grundlegende atmosphärische UV-Szenario wird mittels eines externen Strahlungstransfermodells für verschiedene Sonnenzenitwinkel modelliert und in einem Präprozessorschritt in eine PALM-lesbare Datei gespeichert und während der Simulation entsprechend des tageszeitabhängigen Sonnenzenitwinkel eingelesen. Um Anwender, die ausschließlich an der UV-Strahlung interessiert sind, zu ermöglichen, ressourcensparend Simulationen durchzuführen, kann das Modell während einer zeitlichen Vorabintegration ausgeführt werden. Für Anwender die sowohl an der UV-Strahlung als auch an anderen stadtklimatischen Aspekten wie z.B. dem thermischen Komfort interessiert sind, kann das UV-Strahlungsmodell parallel zur Zeitintegration des Strömungsmodells ausgeführt werden.

Das urbane UV-Strahlungsmodell wurde anhand dedizierter Messungen der UV-Bestrahlungsstärke im Außenbereich eines Kindergartens evaluiert. An unverschatteten Standorten konnte eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen den Modellergebnissen und der Messung festgestellt werden. Ebenso konnte nachgewiesen werden, dass das entwickelte UV-Strahlungsmodell die durch Bäume, Gebäude und Sonnensegel verursachte räumliche sowie zeitliche Variabilität der UV-Strahlung realistisch wiedergibt. Der raumwinkelunabhängige Modellierungsansatz zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten, wohingegen der eigentlich physikalisch genauere, raumwinkelabhängige Ansatz die UV-Bestrahlungsstärke im Nahbereich von Bäumen oder Gebäudewänden teilweise überschätzt. Diese Überschätzung wird auf eine zu geringe Strahldichte aus Raumwinkeln nahe der Sonnenposition zurückgeführt, sodass der diffuse, aus allen Raumwinkeln kommende Anteil der Strahlung überschätzt wird. Weiterhin hat sich gezeigt, dass eine signifikante Unsicherheit in der modellierten UV-Bestrahlungsstärke aufgrund unzureichender Kenntnis der mikroskaligen Umgebungsbedingungen, insbesondere der Bauminformationen, besteht. Dadurch werden einzelne belaubte Äste, die lokal zu einer Reduktion der UV-Bestrahlungsstärke führen, im Modell nicht ausreichend abgebildet. Dies führte an einigen Messpunkten zu einer großen Streuung zwischen den Simulationsdaten und den Messwerten.

Das in PALM integrierte urbane UV-Strahlungsmodell ist ein effizientes Werkzeug zur Bewertung der UV-Strahlungsbelastung in urbanen Umgebungen. Die erfolgreiche Anwendung des Modells für reale urbane Standorte setzt jedoch vertiefte modelltechnische, numerische sowie physikalische Kenntnisse voraus, sodass der potenzielle Nutzerkreis des entwickelten Modells zum jetzigen Zeitpunkt auf Modellierexperten mit einem physikalisch-technischem Hintergrund beschränkt ist. Um das UV-Strahlungsmodell jedoch bei den Zielanwendern, d.h. den Stadtplanern in Kommunen und Behörden, langfristig zu etablieren, wird empfohlen die technischen Hürden bei der Bedienung des UV-Strahlungsmodells so weit abzusenken, dass auch Personen ohne die notwendigen technischen und physikalischen Kenntnisse in der Lage sind das UV-Strahlungsmodell anzuwenden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Einleitung | 6 |
| 2 Das mikroskalige Stadtklima-Modell PALM | 8 |
| 2.1 Numerik, Topographie und Oberflächendarstellung | 9 |
| 2.2 Vorgabe von geostatischen und meteorologischen Eingangsdaten | 10 |
| 2.3 Vegetation | 10 |
| 2.4 Urbaner Strahlungstransfer zur Modellierung der Oberflächenenergiebilanz | 11 |
| 3 Durchführung des Projekts und Ergebnisse | 12 |
| 3.1 Stand der Wissenschaft und Technik | 12 |
| 3.1.1 Atmosphärische UV-Strahlungstransfermodelle | 13 |
| 3.1.2 UV-Strahlung im städtischen Umfeld | 14 |
| 3.1.3 Methoden zur Modellierung von UV-Strahlung in urbanen Umgebungen | 21 |
| 3.2 Methodenbewertung | 23 |
| 3.2.1 Bewertung atmosphärischer UV-Strahlungstransfermodelle und deren Einbindung in PALM | 23 |
| 3.2.3 Vorgeschlagene Implementierung im PALM-Modellsystem zur Ableitung der UV-Bestrahlungsstärke | 30 |
| 3.3 Entwicklung eines technischen Implementierungskonzepts | 31 |
| 3.3.1 Struktur der NetCDF-Eingabedatei | 31 |
| 3.3.2 PALM-Ausgabedatei | 31 |
| 3.3.3 Entwicklung eines Implementierungskonzepts in PALM für ein UV-Strahlungsmodell | 31 |
| 3.4 Entwicklung eines Präprozessors zur Erstellung atmosphärischer UV-Szenarien | 32 |
| 3.5 Implementierung des UV-Strahlungsmodells in PALM | 34 |
| 3.5.1 Dokumentation der Ein- und Ausgabegrößen | 36 |
| 3.5.2 Erste Beispielanwendung | 37 |
| 3.6 Evaluierung des Modells | 39 |
| 3.6.1 Messungen der UV-Bestrahlungsstärke | 39 |
| 3.6.2 Modellsetup | 42 |
| 3.6.4 Sensitivität der Modellergebnisse gegenüber numerischen und physikalischen Parametern | 49 |
| 3.6.5 Demonstration der Funktionalität des UV-Strahlungsmodells | 53 |
| 3.6.6 Veröffentlichung des UV-Strahlungsmodells | 54 |
| 4 Zusammenfassung und Diskussion der Arbeiten | 54 |

| | |
|--|-----------|
| 5 Durchführung einer UV-Modellierung – Technische und physikalische Aspekte | 56 |
| 5.1 Aufbereitung der geostatischen Eingangsdaten | 56 |
| 5.2 Erstellung eines UV-Szenarios | 56 |
| 5.3 Ausführung einer Simulation | 57 |
| 5.4 Empfehlungen für ein physikalisch und numerisch plausibles Modellsetup | 57 |
| 6 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf | 58 |
| 6.1 Praktische Anwendung des Modells | 59 |
| 6.2 Mögliche Weiterentwicklungen | 59 |
| Literatur | 61 |
| Anhang A - UV-Eingabedatei für PALM im NetCDF-Format | 69 |
| Anhang B - PALM Ausgabevariablen | 70 |
| Anhang C - PALM-Konfigurationsdatei für das Evaluierungsszenario | 72 |
| Anhang D - uv2palm-Konfigurationsdatei für das Evaluierungsszenario | 74 |

Einleitung

Die an der Erdoberfläche ankommende Sonnenstrahlung umfasst einen weiten Spektralbereich, von Wellenlängen im Infraroten, über sichtbares Licht, bis hin zu ultravioletter (UV) Strahlung. Die UV-Strahlung wird in drei Spektralbereiche unterteilt: UV-C (100-280 nm), UV-B (280-315 nm) sowie UV-A (315-400 nm). Die von der Sonne emittierte UV-C Strahlung wird in der Stratosphäre vollständig absorbiert und erreicht nicht die Erdoberfläche und wird daher nicht weiter betrachtet.

UV-Strahlung hat sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Zum einen ist UV-B-Strahlung notwendig für die Vitamin-D Produktion (z.B. Holick, 2004). Zum anderen kann UV-Strahlung aber auch zu akuten und langfristigen Schädigungen der Augen und der Haut führen. So kann es durch eine erhöhte Exposition von UV-Strahlung zu akuten Entzündungen der Hornhaut und Bindehaut kommen, zu Erythemen, Sonnenallergien sowie fototoxischen Reaktionen der Haut. Ebenfalls kann UV-Strahlung zu einer akuten Schwächung des Immunsystems führen (Immunsuppression), wodurch das Risiko für Infekte steigt und was einen Risikofaktor bei der Hautkrebsentstehung darstellt (Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 2023; Strahlenschutzkommission, 2016). Des Weiteren ist übermäßige UV-Strahlung einer der auslösenden Faktoren für den „Grauen Star“ sowie verschiedener Hautkrebserkrankungen (BfS, 2023; Strahlenschutzkommission, 2016) und wird in Verbindung mit frühzeitiger Hautalterung (Mac-Mary et al., 2010) und Melanomen (Lazovich et al., 2010) gebracht. Eine umfassende Übersicht hinsichtlich der biologischen Wirkung von UV-Strahlung auf die menschliche Haut und Augen sowie auf weitere gesundheitliche Aspekte werden in Baldermann et al. (2023), im Bericht der Strahlenschutzkommission (2016) sowie auf den Seiten des BfS (2023) gegeben. Neben diesem direkten Einfluss diskutieren Neale et al. (2021) auch einen indirekten Einfluss von UV-Strahlung auf die menschliche Gesundheit über photochemische Reaktionen, welche insbesondere in urbanen Regionen eine Rolle spielen. So haben photochemische Reaktionen im UV-Spektralbereich einen signifikanten Einfluss auf die lokale NO_x Konzentration sowie auf die Entstehung von Formaldehyd und $\text{PM}_{2.5}$ (Feinstaub mit einer Partikelgröße $< 2,5 \mu\text{m}$) auf Basis von organischen Substanzen, und somit direkte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Im Folgenden wird dieser indirekte Effekt allerdings nicht weiter adressiert; stattdessen wird der Fokus ausschließlich auf den direkten Einfluss von UV-Strahlung auf die menschliche Gesundheit gelegt.

Die Effektivität, mit der UV-Strahlung eine photobiologische Reaktion in der Haut auslöst, wird anhand von standardisierten spektralen Wichtungsfunktionen beschrieben. Es existieren verschiedene Wichtungsfunktionen, z.B. für Vitamin-D₃-Induktion, für Photokarzinogenese sowie für Erytheme. Die in der Literatur am häufigsten verwendete spektrale Wichtungsfunktion ist die Erythemwichtungsfunktion, welche den Rötungsgrad der Haut als Reaktion auf UV-Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge beschreibt (Strahlenschutzkommission, 2016).

Messungen am Boden sowie mittels Fernerkundung zeigen, dass die an der Erdoberfläche ankommende erythemwirksame Bestrahlungsstärke im Zeitraum zwischen 2005-2018 im Mittel über verschiedene, global verteilte Metropolregionen, keinen signifikanten zeitlichen Trend aufweist. Jedoch kann es lokal sehr wohl zu signifikanten Änderungen der ankommenden erythemgewichteten UV-Strahlung kommen, was auf eine im Rahmen des Klimawandels veränderte mittlere Bewölkung und Aerosolkonzentration zurückgeführt werden kann (Herman et al., 2020; Wild et al., 2021). Vitt et al. (2020) zeigen, dass insbesondere im Frühling und Frühsommer die UV-Belastung in Mitteleuropa um 1 bis 3,6% pro Dekade zunimmt. Aufgrund lokaler Gegebenheiten und der geographischen Breite, können die zeitlichen Änderungen in der bodennahen UV-Strahlung in Europa räumlich sehr unterschiedlich sein (Fountoulakis et al., 2020). Anhand von Klimasimulationen haben Eleftheratos et al. (2020) prognostiziert, dass es in Zukunft in den mittleren Breiten im Mittel zu einer Erhöhung der erythemgewichteten UV-Strahlung um 1,3% pro Dekade kommt. Diese Erhöhung führen Eleftheratos et al. (2020) auf die Änderung der mittleren Wolkenbedeckung durch geänderte Zirkulationsmuster zurück, welche sich ab 2050 immer stärker bemerkbar

machen wird. Der Effekt des geminderten Ausstoßes von Fluorkohlenwasserstoffen und der dadurch langfristigen Erholung der stratosphärischen Ozonkonzentrationen auf die UV-Strahlung wird dadurch überkompensiert (Neale et al., 2021). Für weiterführende Informationen hinsichtlich klimawandelbedingter Änderungen der bodennahen UV-Strahlung und den damit erwartbaren Folgen für die menschliche Gesundheit, wird auf Baldermann und Lorenz (2019) und Baldermann et al. (2023) verwiesen.

UV-Strahlung im offenen, nicht verschatteten Gelände wurde in der Vergangenheit in zahlreichen Studien untersucht (z.B. Eltbaakh et al., 2011). Die an der Erdoberfläche ankommende UV-Strahlung ist dabei von zahlreichen Faktoren abhängig: Ozonschichtdicke, Spurengaskonzentration, Höhenlage, Albedo der Oberfläche, Bedeckungsgrad und Wolkeneigenschaften, Aerosolkonzentration und -eigenschaften, Sonnenzenitwinkel, jahreszeitlich variierender Abstand der Erde zur Sonne, geographische Breite, etc., und kann zeitlich sowie räumlich variieren. Wolken haben dabei den größten Einfluss auf die erythemwirksame UV-Strahlung (z.B. Bais et al., 2015, 2018), gefolgt von der Albedo, der Ozonschichtdicke sowie Aerosolen. Für eine weiterführende Erläuterung des jeweiligen Einflusses der hier genannten Einflussfaktoren auf die UV-Bestrahlungsstärke wird auf Seckmeyer und Luiz (2021) und die darin zitierte Literatur verwiesen.

Menschen halten sich jedoch oftmals nicht in offenen, nicht verschatteten Bereichen auf, sondern in bebauten Gebieten in denen ein Teil des Himmels durch Objekte verdeckt ist und dadurch die UV-Strahlung auf der Mikroskala räumlich sowie zeitlich variiert (Schmalwieser et al., 2010). So gibt es Abschattungseffekte durch Gebäude oder Bäume, aber auch „Hotspots“ mit erhöhter UV-Bestrahlung im Vergleich zu offenen Flächen, unter anderem bedingt durch Reflexionen an Bodenoberflächen und/oder Fassaden. Obwohl die über den Tag aufsummierte empfangene UV-Strahlung eines Menschen in städtischen Bereichen je nach Aktivität nur etwa 30-70% des Wertes über einer Freifläche entspricht (Schmalwieser et al., 2010), reicht die UV-Bestrahlung in (teil)verschatteten Bereichen dennoch aus, um negative gesundheitliche Folgen wie z.B. UV-bedingte Krebserkrankungen der Haut oder im Auge oder Sonnenbrand hervorzurufen (Turnbull und Parisi, 2003). Zusätzlich kann es je nach Sonnenstand, Albedo der Bodenoberflächen, Gebäudekonfiguration und der Albedo des Fassadenmaterials zu zeitlich befristeten lokalen Spitzen in der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke aufgrund von Reflexionen kommen (Wai et al., 2017).

Ziel des Vorhabens ist die Modellierung der UV-Belastung im urbanen Umfeld mittels des mikroskaligen Stadtklimamodells PALM (Maronga et al., 2020). Damit sollen räumlich hoch aufgelöste Aussagen über die erythemwirksame UV-Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit von der umgebenen Bebauung, Bäumen und Sonnenschutzvorrichtungen getroffen werden. Dies soll Stadtplanern ermöglichen, geeignete UV-Schutzstrategien zu testen und technisch, wissenschaftlich basiert zu bewerten, um die UV-Exposition für die Bevölkerung in öffentlichen Bereichen zu reduzieren und somit einen wichtigen Beitrag zur Prävention UV-bedingter Erkrankungen, insbesondere von Krebserkrankungen der Haut und in Augen, zu leisten. Der Bericht der Strahlenschutzkommission (2016) empfiehlt erhöhte Schutzmaßnahmen vor UV-Strahlung. Dies beinhaltet genügend Schattenplätze einzurichten, welche auch einen ausreichenden Schutz vor diffuser UV-Strahlung bieten sowie auch eine Vermeidung von Aktivitäten während der Mittagsstunden, die eine erhöhte Exposition bedingen (z.B. Sport). Entsprechende stadtplanerische Maßnahmen zur Reduktion der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke erfordern jedoch Kenntnis der zeitlich und räumlich variierenden UV-Strahlung in der urbanen Umgebung (Schmalwieser et al., 2010), welche idealerweise schon während des Planungsprozesses gegeben ist. Eine allgemein verständliche Visualisierung der zeitabhängigen UV-Belastung im mikroskaligen Raum trägt zudem zur Sensibilisierung für die Gefahren von UV-Strahlung bei und kann als Planungsgrundlage zur Gestaltung von Tagesabläufen, z.B. in Kindergärten, dienen (UV-Schutz-Bündnis, 2017). Als Grundlage für entsprechende Maßnahmen bedarf es einer Software zur Abschätzung der UV-Bestrahlungsstärke mit hoher räumlicher als auch zeitlicher Auflösung im öffentlichen Bereich.

Der Bericht gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 gibt einen Überblick über das mikroskalige Stadtklima- und Strömungsmodell PALM. Dies beinhaltet eine Zusammenfassung der technischen und physikalischen Fähigkeiten sowie der möglichen Anwendungsbereiche in

Wissenschaft, Industrie und öffentlichem Sektor. Weiterhin werden technische Modellaspekte im Hinblick auf den Strahlungstransfer und die UV-Modellierung erläutert. Kapitel 3 beschreibt im Detail die Durchführung des Projekts entsprechend der durchgeführten Arbeitspakete. Dies beinhaltet einen ausführlichen Bericht über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik, die Entwicklung technischer Fähigkeiten sowie eine Evaluierungsstudie des entwickelten UV-Modells. In Kap. 4 werden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert. In Kap. 5 werden die notwendigen Schritte zur Durchführung einer UV-Simulation erläutert und es werden technisch, physikalische Empfehlungen vorgeschlagen, um belastbare Ergebnisse mit dem entwickelten UV-Modell ableiten zu können. Abschließend wird in Kap. 6 eine Übersicht über den weiteren Forschungsbedarf und Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Anwendbarkeit durch die eigentlichen Zielanwender in Kommunen und Behörden gegeben.

2 Das mikroskalige Stadtklima-Modell PALM

PALM ist ein mikroskaliges Gebäude- und Pflanzen-auflösendes, atmosphärisches Turbulenzmodell, welches speziell für die Untersuchung stadtklimatischer Fragestellungen entwickelt wurde und wird. PALM ist eine OpenSource Software unter der Gnu Public License (GPL) 3 und ist frei zugänglich. Das Modell bietet die Möglichkeit einer Kopplung zu großskaligen Wettervorhersage- sowie Klimamodellen (Kadasch et al., 2021). Dadurch ist es möglich, die Auswirkungen momentaner und zukünftiger Hitzeperioden in städtischen Bereichen zu untersuchen und stadtklimatische Maßnahmen zur Reduktion von Hitzestress und Luftschadstoffbelastung zu bewerten. Zudem bietet PALM die Möglichkeit, biometeorologische Parameter wie z.B. der gefühlten Temperatur, zur Bewertung des thermischen Komforts zu berechnen (Fröhlich und Matzarakis, 2020). Ein gekoppeltes Innenraum- und Gebäudeenergiemodell (Pfafferott et al., 2021) berücksichtigt den Gebäudeenergiebedarf und modelliert den anthropogenen Wärmeeintrag in die Atmosphäre. PALM basiert auf einer gerasterten Topographie und Gebäudedarstellung und ist in der Lage die Energiebilanz an verschiedenen städtischen (Gebäuden, Straßen) und natürlichen Oberflächen wiederzugeben (Gehrke et al., 2021; Resler et al., 2021), sowie Strahlungsprozesse im lang- und kurzwelligen Spektrum in bebauten Bereichen zu modellieren (Krč et al., 2021; Salim et al., 2022). Dazu können an jeder aufgelösten Gebäudeoberfläche unterschiedliche Oberflächen- und Materialeigenschaften (z.B. Albedo, Fenster- und Wandanteil, Wärmekapazität, ...) vorgegeben werden (Heldens et al., 2020), welches insbesondere für die mikroskalige Modellierung der UV-Strahlung in urbanen Umgebungen relevant ist (Seckmeyer und Luiz, 2021). Weiterhin ist PALM in der Lage, den Einfluss von Baumbeständen auf die Strömung und auf Strahlungsprozesse (Krč et al., 2021) mittels eines dreidimensionalen Blattflächendichte-Ansatzes zu berücksichtigen. Ein Gitternesting (Hellsten et al., 2021) ermöglicht räumlich begrenzte Gebiete höher aufzulösen, um somit Rechenressourcen zu sparen. Mittels eines Luftschadstoffmodells können Atmosphärenchemie (Khan et al., 2021) sowie Aerosolphysik (Kurppa et al., 2019) untersucht werden.

PALM kommt in verschiedenen Bereichen zur Anwendung und ist weltweit verbreitet. Ursprünglich wurde das Modell für die Untersuchung atmosphärischer und ozeanischer Grenzschichtströmungen entwickelt. In den letzten Jahren wurde PALM zunehmend für die Untersuchung städtischer Anwendungen benutzt, zum einen für reine Forschungszwecke (z.B. Akinlabi et al., 2022), zum anderen für stadtplanerische Zwecke in Gutachter- und Ingenieurbüros (z.B. Meteotest, 2023), bei Architekten sowie in Kommunalverwaltungen und Behörden (z.B. UC2, 2021). Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem thermischen Komfort, um städtebauliche Maßnahmen zur Reduktion von Hitzestress zu bewerten und somit Städte resilienter gegenüber längeren Hitzeperioden zu machen. Zudem wird PALM zunehmend für die Untersuchung von Luftschadstoffausbreitung im urbanen Umfeld sowie in Innenräumen zur Infektionsbekämpfung (Auvinen et al., 2022) genutzt.

Im Folgenden wird auf weitere technische und numerische Aspekte des Modells im Hinblick auf die UV-Modellierung eingegangen.

2.1 Numerik, Topographie und Oberflächendarstellung

PALM basiert auf einer Finite-Differenzen-Methode und die zugrunde liegenden inkompressiblen Boussinesq-approximierten Navier-Stokes-Gleichungen werden auf einem kartesischen, rechtwinkligen Gitter gelöst. Orographie und Gebäude, im Weiteren als Topographie zusammengefasst, können in PALM dreidimensional dargestellt werden, sodass auch Durchfahrten, Tunnel, Innenräume oder dreidimensionale Objekte simuliert werden können (Gronemeier und Sühling, 2019; Auvinen et al., 2022). Die Topographie wird anhand einer Maskierungsmethode berücksichtigt (Maronga et al., 2015). Dies bedeutet, dass eine Gitterzelle entweder vollständig zur Atmosphäre oder vollständig zur Topographie gehört, wodurch schräge Oberflächen stufenförmig approximiert werden (siehe z.B. Heldens et al., 2020, Abb. 12) oder Gebäudefassaden künstliche Stufen aufweisen können (siehe z.B. Resler et al., 2021, Abb. 22,23). Ein Beispiel dieser stufenförmigen Approximation ist in Abb. 1 gegeben. Die Genauigkeit der geometrischen Oberflächendarstellung hängt somit direkt von der gewählten horizontalen und vertikalen Gitterweite ab.

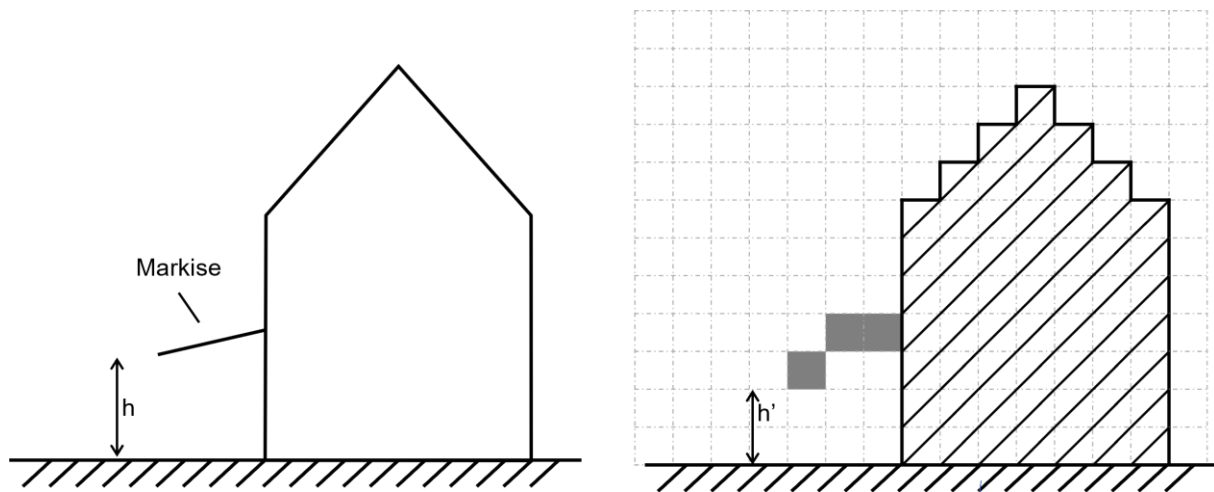


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines realen Gebäudes (links) auf dem numerischen Gitter (rechts). Weiterhin illustriert ist die vorgeschlagene Repräsentation einer Markise (oder eines Vorbaus) auf dem numerischen Gitter (grau markierte Gitterboxen). Da die Gitterweite zu grob ist, um die Markise vertikal aufzulösen, beträgt die vertikale Ausdehnung der Markise 1-mal die vertikale Gitterweite.

Gebäude- und Geländeoberflächen sind in PALM als die Grenzfläche zwischen einer kartesischen Atmosphäregitterbox und einer Topographiegitterbox definiert (siehe Gebäudedarstellung in Abb. 1). Dies bedeutet, dass Oberflächen strikt entlang der jeweiligen Gitterachsen ausgerichtet sind. Für jedes Oberflächenelement wird dabei die Energiebilanz an der Oberfläche sowie der Wärmetransport in den Boden bzw. in die Wand individuell gelöst (Resler et al., 2017; Gehrke et al., 2021). In PALM werden dabei Oberflächen in unterschiedliche Kategorien eingeteilt: Vegetations-, Straßen-, Wasser- oder Gebäudeoberflächen, wobei jede dieser Kategorien weitere Unterkategorien beinhaltet und eine Reihe von Material- und Oberflächeneigenschaften (z.B. Albedo, Wärmekapazität, Wand-/Fenster-/Grünflächenanteil an Gebäuden) vordefiniert. Oberflächeneigenschaften können jedoch bei Bedarf für jedes Oberflächenelement individuell noch weiter spezifiziert werden (Heldens et al., 2020), z.B. durch Vorgabe der jeweiligen Oberflächen-/Materialeigenschaft in einer NetCDF Datei.

Da in PALM die Topographie sowie Oberflächendarstellung strikt an das rechtwinklige numerische Gitter gebunden ist, kann es lokal begrenzt zu geometrisch bedingten Ungenauigkeiten in der simulierten Strahlung kommen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass derzeit an einer genaueren Darstellung der Topographie in PALM gearbeitet wird (persönliche

Mitteilung, Sühning et al., 2023). Mittels eines sogenannten 'cut-cell' Ansatzes soll erreicht werden, dass Oberflächen unabhängig vom rechtwinkligen Gitter definiert werden können und somit die stufenförmige Approximation schräger Oberflächen entfällt, womit die Genauigkeit des urbanen Strahlungstransfers erhöht werden soll.

2.2 Vorgabe von geostatischen und meteorologischen Eingangsdaten

Eingangsdaten, welche die Gebäudekonfiguration, das Gelände, Pflanzenbestände oder die Oberflächeneigenschaften definieren, werden in PALM mittels einer NetCDF-Datei vorgegeben, welche im Weiteren als statische Eingangsdatei¹ bezeichnet wird (Heldens et al., 2020). Die statische Eingangsdatei enthält gerasterte Informationen, z.B. Gebäudehöhe und -typ, welche für jeden horizontalen Modellgitterpunkt bereitgestellt werden. Anhand dieser Informationen werden Material- und Oberflächeneigenschaften für jede Oberfläche im Modell anhand vordefinierter Parameterlisten gesetzt. Beispielsweise steht an einem Ort ein Wohngebäude aus den 1950-ern, welches durch den Gebäudetyp 1 klassifiziert wird. Dieser Gebäudetyp definiert dann bestimmte Dach- und Fassadeneigenschaften (Albedo, Fensterflächen- und Wandanteil, Wärmekapazitäten, etc.), die im Weiteren zur Lösung der Energiebilanz oder bei der Modellierung des Strahlungstransfers benötigt werden. Zudem ist es möglich, spezifische Eigenschaften für jede im Modell definierte Oberfläche individuell noch weiter zu spezifizieren, z.B. den Fensterflächenanteil oder die Albedo an einem bestimmten Fassadenabschnitt unabhängig vom gegebenen Gebäudetyp. Dies ist z.B. nützlich, wenn bekannt ist, dass entsprechende Gebäudeteile umgebaut oder saniert wurden. Die Eingabedaten sind georeferenziert und können aus GIS-Systemen abgeleitet werden.

Weitere Eingangsdaten zur Operation des Modells, z.B. Daten aus mesoskaligen Modellen zum Antrieb mikroskaliger Simulationen oder Emissionen chemischer Stoffe werden ebenfalls ausschließlich über georeferenzierte und gerasterte Dateien im NetCDF-Format bereitgestellt (Kadasch et al., 2021; Khan et al., 2021). Alternative Dateiformate, z.B. ASCII Daten, Vektorformate, CityGML oder andere auf XML-Formaten basierende Standards, etc., werden von PALM nicht unterstützt und bedürfen einer Konvertierung hin zu PALM-seitig definierten Schnittstellen.

2.3 Vegetation

In PALM werden zwei unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung von Vegetation unterschieden: subskalige und gitteraufgelöste Vegetation. Die subskalige Vegetation wird nicht explizit durch das numerische Gitter aufgelöst und Effekte auf die Strömung und die Energiebilanz der Oberfläche werden parametrisiert (Gehrke et al., 2021). In der Regel wird niedrige Vegetation, z.B. Gras oder Sträucher, mittels subskaliger Vegetation berücksichtigt. Eine Darstellung hoher Vegetation, z.B. Bäume, mittels des subskaligen Ansatzes ist jedoch auch möglich, allerdings mit größeren Unsicherheiten behaftet (Wanner et al., 2022). Der Strahlungsstransfer innerhalb subskaliger Vegetation wird nicht explizit modelliert, d.h. eine explizite Berücksichtigung von Abschattungen oder Reflexionen findet nicht statt. Die Strahlungsbilanz wird ausschließlich über die Vorgabe der Breitbandalbedo sowie der Emissivität berücksichtigt.

Im Gegensatz zu subskaliger Vegetation können dynamische Prozesse bei gitteraufgelöster Vegetation anhand eines Pflanzenmodells (Maronga et al., 2015) direkt berücksichtigt werden. Ebenso ist es möglich, Strahlungsprozesse im Pflanzenbestand und deren Rückkopplung auf die Atmosphäre zu berücksichtigen (Krč et al., 2021). Gitteraufgelöste Vegetation wird über die Blattflächendichte (LAD, engl.: *Leaf Area Density*) sowie der Holzflächendichte (BAD, engl.: *Basal Area Density*) berücksichtigt. Blatt- und Holzflächendichte sind dabei äquivalent zur Topographie strikt an das numerische Gitter gebunden. Dies bedeutet, dass Blatt- und Holzflächendichte innerhalb einer Gitterbox als

¹ Eine Übersicht sowie Beispiele der statischen Eingangsdatei sind zu finden unter: <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/app/iofiles/pids/static>

konstant angenommen werden. Eine Berücksichtigung von räumlichen Heterogenitäten, welche kleiner als die numerische Gitterweite sind, ist daher nicht möglich. In Abb. 2 wird dies graphisch verdeutlicht. Kleine Öffnungen unterhalb der numerischen Gitterweite, z.B. innerhalb des Kronenraums, können daher nicht explizit aufgelöst werden. Durch die Vorgabe dreidimensionaler Blattflächendichte-Daten ist jedoch die Darstellung unterschiedlicher Kronenformen möglich (Heldens et al., 2020). Es sei darauf hingewiesen, dass Vegetation in PALM als zeitlich konstant angenommen wird. Dies ist vorrangig dadurch bedingt, dass der Simulationszeitraum mit PALM normalerweise nur wenige Stunden bis zu einigen Tagen beträgt. Längere Simulationszeiträume, insbesondere im Frühjahr oder Herbst, können daher zu Ungenauigkeiten in der Blattflächendichte führen.

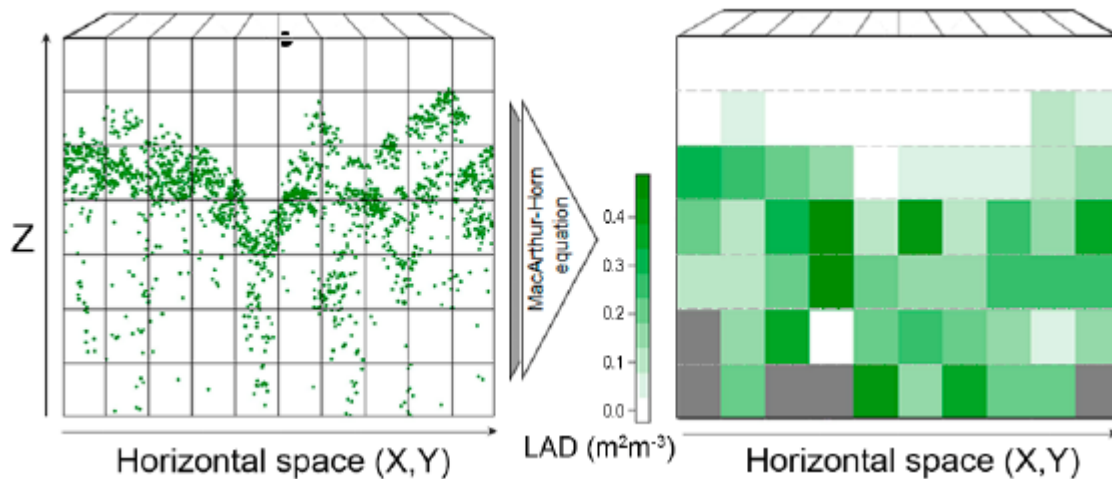


Abbildung 2: Vertikaler xz-Schnitt der Blattflächendichte (engl.: *Leaf Area Density*, LAD, $m^2 m^{-3}$), links: gemessene Daten, rechts: Darstellung auf einem diskreten numerischen Gitter. Je höher die Anzahl der gemessenen Rückstreuung (Dichte der Punktwolke in der linken Abbildung), desto höher die abgeleitete Blattflächendichte, dargestellt in Grüntönen. Gitterboxen, in denen keine Messdaten vorliegen, sind als grau markiert. Die Abbildung wurde aus Almeida et al. (2019) entnommen und soll die diskrete Darstellung der Blattflächendichte auf einem kartesischen Gitter verdeutlichen.

2.4 Urbaner Strahlungstransfer zur Modellierung der Oberflächenenergiebilanz

Der Strahlungstransfer in PALM wird bisher ausschließlich spektral unabhängig anhand der kurz- und langwelligen Breitbandstrahlung betrachtet. Der Strahlungstransfer in PALM gliedert sich dabei in zwei Komponenten. Zum einen wird die im Mittel ankommende lang und kurzwellige Strahlung anhand eines eindimensionalen Strahlungsmodells modelliert. Dazu kann die solare Strahlung entweder anhand einer Parametrisierung für wolkenlosen Himmel abgeschätzt werden (Maronga et al., 2015), oder aber die solare Strahlung kann mittels des eingebundenen, externen Strahlungsmodells RRTMG (Clough et al., 2005) modelliert werden. Strahlungsinteraktionen an horizontal abgegrenzten Wolken (z.B. Cumulus Wolken) können mit diesem Ansatz allerdings nicht berücksichtigt werden.

Die ankommende solare Strahlung am Oberrand der Gebäude liefert dann die Randbedingung für die mikroskalige Modellierung mittels eines dreidimensionalen urbanen Strahlungstransfermodells (Krč et al., 2021), im Weiteren als PALM-RTM (engl.: *Radiative Transfer Model*) bezeichnet. Das PALM-RTM modelliert die kurz- und langwellige Strahlungsinteraktion von Oberflächen mit der Atmosphäre anhand eines Sky-View Faktors (SVF, relativer Flächenanteil des Himmels der von einem Ort aus sichtbar und nicht durch Gebäude oder Bäume verdeckt ist), die Strahlungsinteraktion von Oberflächen untereinander anhand von Oberflächen-Wichtungsfaktoren sowie die Strahlungsinteraktion von aufgelöster Vegetation mit der Atmosphäre und den Oberflächen anhand von Pflanzen-Wichtungsfaktoren. Das PALM-RTM ist dadurch in der Lage, Gebäude- und Pflanzenabschattungen tageszeitabhängig zu modellieren und Mehrfachreflexionen zwischen Oberflächen zu berücksichtigen. Dabei wird

angenommen, dass Oberflächen die Strahlung vollständig diffus reflektieren. Zudem wird aufgrund der geringen Weglänge zwischen zwei Oberflächen angenommen, dass es keine Interaktion der Strahlung mit der Atmosphäre bei Mehrfachreflexionen gibt, d.h. Streuung und Absorption werden bei der mikroskaligen Modellierung innerhalb der Gebäudeschicht vernachlässigt. Zur Begrenzung des Rechenaufwands findet zudem nur eine begrenzte Anzahl an Mehrfachreflexionen zwischen Oberflächen statt. In der Regel sind 3-5 Mehrfachreflexionen ausreichend, bis die solare Strahlung vollständig von den Oberflächen absorbiert ist und es zu keinen signifikanten Änderungen in der Oberflächenstrahlungsbilanz mehr kommt (Krč et al., 2021; Salim et al., 2022).

Das PALM-RTM unterscheidet zwischen diffuser und direkter kurzwelliger sowie diffuser langwelliger Strahlung. Dabei wird eine isotrope diffuse Strahlung angenommen und eine spektral abhängige Verteilung der diffusen Strahlung wird nicht berücksichtigt.

Aufgrund der gitterabhängigen Topographie und der dadurch bedingten stufenförmigen Approximation von Gebäude- oder Geländeoberflächen (siehe z.B. Resler et al., 2021, Abb. 22,23) kann es jedoch zu Unsicherheiten bei der Modellierung des urbanen Strahlungstransfers kommen. Aufgrund der rechtwinkligen Approximation von in der Realität schrägen Oberflächen kann es zu Unterschieden in der räumlichen Ausrichtung von Modelloberflächen kommen. Dies wiederum kann einerseits zu lokalen künstlichen Abschattungen einzelner Oberflächenelemente führen. Andererseits ändern sich aufgrund der stufenförmigen Approximation von Gebäudeoberflächen die Oberflächen-Wichtungsfaktoren, was wiederum zu lokalen Unsicherheiten in der zwischen Oberflächen reflektierten Strahlung führen kann (Resler et al., 2021). Eine weitere Unsicherheit ist durch die gitterabhängige Darstellung der aufgelösten Vegetation gegeben. Kleinskalige Öffnungen, welche z.B. für Sonnenflecken relevant sind, können durch die diskrete, an das Gitter gebundene Definition der Blattflächendichte nicht aufgelöst werden. Weiterhin kann es zu Unsicherheiten in der Baumabschattung aufgrund der stufenförmigen Kronendarstellung kommen (Resler et al., 2021). An dieser Stelle wird jedoch angemerkt, dass die verfügbaren Geoinformationen über Stadtbäume nur selten in einem hohen Detailgrad vorliegen. Oftmals sind nicht einmal Informationen über die Baumart oder die räumliche Verteilung der Blattflächendichte vorhanden. Aus diesem Grund werden die Unsicherheiten im urbanen Strahlungstransfer, bedingt durch die gitterabhängige Approximation von Baumkronen, daher als untergeordnet angenommen. Weiterführende technische Aspekte zur Durchführung einer PALM-Simulation werden in Kap. 5 diskutiert.

3 Durchführung des Projekts und Ergebnisse

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten und deren Ergebnisse beschrieben. In Kap. 3.1 wird zunächst ein Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik im Hinblick auf UV-Strahlung in urbanen Umgebungen gegeben. Zudem werden die für den UV-Strahlungstransfer relevanten physikalischen Prozesse in urbanen Bereichen herausgearbeitet. In Kap. 3.2 erfolgt eine Bewertung der in Kap. 3.1 zusammengetragenen Modellierungsansätze für urbane Umgebungen sowie der verfügbaren atmosphärischen UV-Strahlungstransfermodelle. In Kap. 3.3 wird ein Konzept zur Implementierung der geeigneten UV-Modellierungsansätze vorgestellt. Kapitel 3.4 beschreibt die technischen Details eines Präprozessors zur Erstellung realistischer atmosphärischer UV-Szenarien mittels eines externen atmosphärischen Strahlungstransfermodells. Die finale Implementierung des urbanen UV-Strahlungsmodells wird in Kap. 3.5 beschrieben. Die Evaluierung des UV-Modells wird in Kap. 3.6 beschrieben.

3.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Folgenden wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik gegeben. In Kapitel 3.1.1 wird eine Übersicht über die in der Literatur verfügbaren atmosphärischen UV-Strahlungstransfermodelle gegeben. Nachfolgend wird in Kapitel 3.1.2 der Stand der Wissenschaft hinsichtlich der UV-Belastung im urbanen Umfeld aufgearbeitet.

Dabei werden geeignete Methoden und Ansätze zur Abschätzung der UV-Bestrahlungsstärke im urbanen Bereich herausgearbeitet. Weiterhin wird auf die Relevanz von Mehrfachreflexionen im UV-Spektralbereich an Gebäudewänden und Pflanzenbeständen eingegangen.

3.1.1 Atmosphärische UV-Strahlungstransfermodelle

Strahlungstransfermodelle können für verschiedene atmosphärische Bedingungen die Einstrahlungsrandbedingungen an jedem Ort der Erde hinreichend genau abbilden, vorausgesetzt alle relevanten Eingabeparameter sind hinreichend bekannt. In diesem Kapitel wird ein Überblick über die in der Literatur verfügbaren atmosphärischen Strahlungstransfermodelle und deren Eigenschaften gegeben. Dabei werden vornehmlich Modelle betrachtet, welche den UV-Bereich spektral auflösen.

Eines der verbreitetsten Modelle zur Simulation des Strahlungstransfers ist `uvspec`, welches das Strahlungstransfermodell des `libRadtran` Softwarepakets (Mayer und Kylling, 2005; Emde et al., 2016) ist. Die Bezeichnung `uvspec` suggeriert zwar eine Modellierung des Strahlungstransfers nur im UV-Spektralbereich, das Modell ist jedoch auch in der Lage den sichtbaren und infraroten Spektralbereich abzubilden. Das `libRadtran` Paket umfasst verschiedene numerische Algorithmen unterschiedlicher Komplexitätsstufen zur Lösung der Strahlungstransfergleichung (im Folgenden kurz als Löser bezeichnet) zur Modellierung unterschiedlicher atmosphärischer Situationen, welche von `uvspec` intern aufgerufen werden können. Zudem beinhaltet `libRadtran` verschiedene Anwendungsbeispiele unterschiedlicher vordefinierter atmosphärischer Szenarien sowie die dazugehörigen Datensätze. Dazu gehören z.B. typische Sommer und Wintertage in den mittleren Breiten unter bedecktem oder wolkenfreiem Himmel, urbane, maritime oder kontinentale Aerosolprofile sowie unterschiedliche Spurengaskonfigurationen. Zusätzlich können verschieden atmosphärische Profile von Spurengasen, Ozon, Wasserdampf und Flüssigwasser, Temperatur, Oberflächenalbedo sowie unterschiedliche Aerosoleigenschaften definiert werden. Basierend darauf, und je nach gewähltem Löser, liefert `uvspec` spektral aufgelöste Bestrahlungsstärken oder Strahldichten sowie aktinische Flüsse für horizontale oder geneigte Oberflächen. Der in `libRadtran` enthaltene Löser `DISORT` (Stamnes et al., 1988, 2000; Buras et al., 2011) wird standardmäßig verwendet und kann bei wolkenlosem Himmel sowie stratiformer Bewölkung (Wolken mit einer großen horizontalen Ausdehnung und diffusen Umrissen) eingesetzt werden und liefert spektral aufgelöste Strahldichte sowie Bestrahlungsstärken² (diffusen und direkten Anteil) in hoher spektraler Auflösung. Zur Modellierung von horizontal abgegrenzten Wolken, z.B. `Cumulus`, kann wiederum der Monte-Carlo Löser `Mystic` (Mayer, 2009) eingesetzt werden. Dieser liefert äquivalente Ausgaben zum `DISORT` Löser, erfordert allerdings eine genaue Beschreibung der 3D Wolkenstruktur inklusive Flüssigwassergehalt, Tropfenanzahl sowie Tropfengrößenverteilung. Eine Dokumentation inklusive verschiedener Anwendungsbeispiele von `uvspec` und der hinterlegten Strahlungstransferlöser ist in (Mayer et al., 2022) zu finden. Das `libRadtran` Paket inklusive `uvspec` ist Open Source und wird unter der Gnu General Public License (Gnu GPL), Version 2, bereitgestellt.

Ein weiteres häufig verwendetes Modell zur Modellierung von UV-Bestrahlungsstärken ist `TUV` (NCAR Tropospheric Ultraviolet and Visible radiation, Madronich et al., 1998), welches ebenfalls auf dem `DISORT` Löser beruht. `TUV` kann ähnlich wie `uvspec` für wolkenlose sowie stratiforme Bewölkung eingesetzt werden und kann entsprechend der atmosphärischen Bedingungen konfiguriert werden. `TUV` enthält ebenfalls eine Reihe vordefinierter Anwendungsbeispiele. `TUV` liefert Ausgaben der spektral aufgelösten Bestrahlungsstärken (diffusen und direkten Anteil) für horizontale Oberflächen sowie bereits erythem- oder Vitamin-D gewichtete Ausgaben der UV-Bestrahlungsstärke. Nach Kenntnis der Autoren ist es mit `TUV` allerdings nicht möglich Spektraldichten auszugeben. Der `TUV Code`³ ist frei zugänglich.

² Die Strahldichte bezeichnet die empfangene Strahlungsleistung die durch einen bestimmten Azimut- und Zenitwinkel (Raumwinkel) auf eine horizontale Fläche trifft. Die Bestrahlungsstärke bezeichnet die gesamte aus allen Raumwinkeln stammende Strahlungsleistung.

³ <https://www.acom.ucar.edu/Models/TUV/download/tuv5.3.2.zip>

Momentan noch in der Entwicklung ist FARMS-NIT (Fast All-sky Radiation Model for Solar applications with Narrowband Irradiances on Tilted surfaces, Xie und Sengupta, 2018; Xie et al., 2019), ein Strahlungstransfermodell, welches Strahldichten und Bestrahlungsstärken für horizontale oder geneigte Oberflächen für verschiedene Wellenlängen basierend auf dem DISORT Löser modelliert. Momentan ist FARMS-NIT jedoch nur für wolkenlose Situationen und dem sichtbaren und infraroten Spektralbereich evaluiert, ist prinzipiell jedoch auch in der Lage den UV-Spektralbereich aufzulösen. Eine umfassende Validierung für bedeckten Himmel ist momentan jedoch noch ausstehend (Xie et al., 2019). Zudem muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass FARMS-NIT nicht speziell zur Modellierung der UV-Strahlung entwickelt wird, sondern der Hauptanwendungsbereich in der Photovoltaik liegt. Der FARMS-NIT⁴ code ist OpenSource und wird unter der BSD-3-Clause Lizenz veröffentlicht. Ein weiteres in der Literatur verwendetes Modell ist GRIMALDI (Scheirer und Macke, 2001, 2003). GRIMALDI ist ein dreidimensionales spektrales Strahlungstransfermodell zur Untersuchung des Strahlungstransfer in bewölkten Situationen. Wagner et al. (2011) haben den GRIMALDI Code adaptiert, sodass dieser auch für Strahlungstransferstudien in orographisch gegliedertem Gelände eingesetzt werden kann. Der GRIMALDI Code ist OpenSource und auf Nachfrage verfügbar.

STARsci (Ruggaber et al., 1997) ist ein weiteres auf den DISORT Löser basierendes Modell, welches ebenfalls den UV-Spektralbereich behandelt und eine hohe Genauigkeit aufweist. Eine aktuelle Referenz zum STARsci Source Code sowie aktuelle Informationen über dessen Weiterentwicklung und Pflege sind den Autoren jedoch leider nicht bekannt.

Da Strahlungstransfermodelle einen hohen Rechenaufwand erfordern, UV-Produkte in manchen Anwendungen allerdings schnell verfügbar sein müssen, haben Lipponen et al. (2020) das AURORA-UV-Modell entwickelt. AURORA-UV selbst ist kein voll funktionsfähiges Strahlungstransfermodell, sondern ein Algorithmus zur Datensynthese, um aus aktuellen Satellitenmessungen der Ozonschichtdicke und vertikalen Aerosolverteilung der Atmosphäre räumlich hochaufgelöste Vorhersagen des UV-Indexes bereitzustellen. AURORA basiert auf mittels libRadtran vorab erstellten Lookup-Tabellen (LUT), welche für ausgewählte atmosphärische Szenarien (wolkenlos, unterschiedliche Bedeckungsgrade), Sonnenzenitwinkel, Höhenlagen, Ozonschichtdicken, Oberflächenalbedos, etc., vorberechnet wurden. Mittels Interpolation im entsprechenden Parameterraum kann weltweit für die meisten atmosphärischen Situationen die aktuelle spektrale UV-Bestrahlungsstärke basierend auf den aktuell herrschenden Bedingungen abgeleitet werden. Eine Information, inwieweit der AURORA-UV Code frei verfügbar ist, liegt den Autoren momentan nicht vor.

FastRT (Fast Radiative Transfer, Engelsen und Kylling, 2005) ist ähnlich wie AURORA UV ebenfalls selbst kein voll funktionsfähiges Strahlungstransfermodell, sondern berechnet spektral aufgelöste UV-Bestrahlungsstärken basierend auf einer umfassenden Datenbank von vorab berechneten Datensätzen für verschiedene atmosphärische Situationen, Sonnenzenitwinkel, Höhenlagen, Ozonschichtdicken, etc. Je nach aktuellen atmosphärischen Bedingungen werden Interpolationen und Extrapolationen im verfügbaren Parameterraum durchgeführt und entsprechenden Ausgaben der UV-Bestrahlungsstärke mit hoher Genauigkeit generiert. FastRT basiert ebenfalls auf libRadtran's integriertem DISORT Löser. Nach Kenntnis der Autoren liefert FastRT allerdings keine Ausgaben der Strahldichte. Der FastRT Code ist auf Nachfrage frei verfügbar.

3.1.2 UV-Strahlung im städtischen Umfeld

Im Folgenden Kapitel wird eine Übersicht über den derzeitigen Stand der Forschung verschiedener urbaner Aspekte auf die UV-Strahlung gegeben. An dieser Stelle wird angemerkt, dass diese Zusammenfassung als Erweiterung des von Seckmeyer und Luiz (2021) beschriebenen Parameterkatalogs gedacht ist und bestimmte Einflussfaktoren nicht näher behandelt werden. Dazu gehören z.B. die Einflüsse von natürlichem sowie anthropogenen Aerosol, Wolken, Ozon schichtdicke oder Meereshöhe auf die UV-Strahlung,

⁴ <https://github.com/NREL/farms>

welche von Seckmeyer und Luiz (2021) in ihrer Machbarkeitsstudie bereits umfassend herausgearbeitet wurden. Der Fokus wird in diesem Kapitel auf den Einfluss von Verschattung durch Gebäude und Bäume sowie auf Reflexionen an Fassaden und deren Relevanz im urbanen Umfeld gelegt. Weiterhin werden in diesem Kapitel die in der Literatur bereits vorhandenen Modellierungsansätze beschrieben.

Einfluss von Verschattungen durch Bebauung, künstliche Verschattungen und Orographie

Anhand von Messungen in Hongkong sowie dazugehörigen Modellsimulationen zeigten Wai et al. (2015, 2017), dass die UV-A- Bestrahlungsstärke in bebauten Gebieten aufgrund von Abschattungseffekten durch Gebäude hauptsächlich im diffusen Anteil reduziert ist. Die Reduktion im Vergleich zu einer Messung über einer Freifläche mit nicht-verschattetem Horizont (folgend als Referenzmessung bezeichnet) korrelierte dabei mit der Entfernung der Messung zu den umliegenden Gebäuden. In 15 m Entfernung zu hohen Gebäuden betrug die UV A-Bestrahlungsstärke zwischen 12-20% des Wertes der Referenzmessung, während in 60 m Entfernung zum Gebäude etwa 60-80% des Wertes der Referenzmessung gemessen wurden. Diese Ergebnisse decken sich mit den von Heisler und Grant (2000) vorgestellten Messungen in urbanen Bereichen, welche die UV-B-Strahlung in verschatteten Bereichen auf etwa 30-60% der Werte gegenüber denen über einer Freifläche quantifizierten. Insgesamt beobachteten sowohl Heisler und Grant (2000) als auch Wai et al. (2017) eine zeitlich und räumlich sehr variable UV-Bestrahlungsstärke sowohl in verschatteten als auch von Gebäuden weiter entfernten Orten, welche beide Studien auf die zeitliche Veränderung des Sonnenzenits und der damit einhergehenden Änderung der Strahldichteverteilung zurückführen. Schrempf et al. (2017) haben ebenfalls einen Abschattungseffekt durch Gebäude und Vegetation auf die UV-Strahlung nachweisen können (Vitamin-D3 gewichtet). Des Weiteren berichten Wai et al. (2017), dass der Abschattungseffekt durch Gebäude an Tagen mit kontinental geprägten, trockenen Luftmassen und einer hohen Aerosolkonzentration geringer ausfällt verglichen mit Tagen an denen aerosolärmere maritime, feuchte Luftmassen dominieren. Aufgrund von vermehrter Streuung an Aerosolen vermindert sich der direkte Anteil im UV-Spektralbereich zugunsten des diffusen Anteils und der Effekt geometrischer Verschattung wird geringer. Allgemein ist im UV-Spektrum der Effekt geometrischer Verschattung weniger offensichtlich als im sichtbaren Bereich, was auf die stärkere Streuung kürzerer Wellenlängen und einem höheren diffusen Strahlungsanteil zurückzuführen ist. Sichtbare Schatten durch Gebäude oder Bäume sind daher kein verlässliches Maß für die Abschattung im UV-Spektralbereich (Heisler und Grant, 2000).

Weihls et al. (2012) haben dreidimensionale Strahlungssimulationen in orographisch gegliedertem Gelände im Alpenraum durchgeführt, um die Sensitivität der modellierten UV-Strahlung in Abhängigkeit zur räumlichen Auflösung der Orographie zu quantifizieren. Bei grober räumlicher Auflösung des Geländes in der Größenordnung von mehreren hundert Metern nahm der sichtbare, nicht von Orographie oder Gebäuden verdeckte Anteil des Himmels in Tallagen um bis zu 15% ab, verglichen mit einer feinen Auflösung des Geländes. Diese führte zu einer Zunahme der modellierten nicht gewichteten UV-Bestrahlungsstärke bei 305 nm um bis zu 12%. Der Effekt der Verschattung durch umliegende Orographie auf die UV-Bestrahlungsstärke ist bei großen Sonnenzenitwinkeln (Wintermonate oder Morgen-/Abendstunden) stärker ausgeprägt, da die direkten und diffusen Anteile der UV-Strahlung in der Umgebung der Sonne herausgefiltert werden (Weihls et al., 2012). Dies zeigt, dass in Modellsimulationen die Verschattung von der räumlichen Auflösung der verwendeten Eingangsdaten abhängt und sich auch auf die modellierte UV-Strahlung auswirkt, was ein relevanter Aspekt bei der Modellierung der UV-Strahlung in PALM sein kann.

Turnbull und Parisi (2003) zeigen, dass die erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke in mikroskalig verschatteten Bereichen in ihren Messdaten zwischen 20-80% des Wertes über einer offenen Freifläche beträgt. Insbesondere unter Sonnenschirmen oder mit Markisen überdachten Gehwegen war die Reduktion der UV-Strahlung nur gering ausgeprägt. Dies führen die Autoren auf den diffusen Anteil der UV-Strahlung zurück: je kleinflächiger die Abdeckung des Himmels ist, desto weniger diffuse Strahlung aus verschiedenen Raumwinkeln

wird geblockt und umso kleiner ist die Reduktion im UV-Spektralbereich. Allerdings weisen Turnbull und Parisi (2003) auch darauf hin, dass der Effekt von zusätzlichen Verschattungen stark vom Sonnenzenitwinkel abhängt, wobei der größte relative Schutz bei kleinen Zenitwinkeln (Sonne steht hoch) um die Mittagszeit zu beobachten ist, da hier die diffuse Strahlung aufgrund der geringeren Weglänge durch die Atmosphäre tendenziell am geringsten ist. Absolut betrachtet ist die Reduktion der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke unter Verschattungen bei kleinen Sonnenzenitwinkeln dennoch am größten. Turnbull und Parisi (2005) und Parisi et al. (2019) zeigten zudem, dass die UV-Strahlung unter Verschattungen zusätzlich noch vom Ort der Messung abhängt, da an unterschiedlichen Orten unter diesen Verschattungen der sichtbare Anteil des Himmels und damit die diffuse UV-Strahlung verschieden sein kann. Um eine zusätzliche Verschattung des diffusen Anteils der UV-Strahlung zu erreichen, empfehlen Turnbull und Parisi (2005) daher auch vertikale Verschattungselemente einzusetzen, z.B. Zwischenwände, Hecken oder Bäume, sodass diffuse Anteile aus großen Zenitwinkeln geblockt werden.

Des Weiteren haben Turnbull und Parisi (2003) den Einfluss halbdurchlässiger Materialien an Sonnenschirmen und Markisenstoffen untersucht und eine spektralunabhängige Transmissivität von ca. 5% im UV-Spektralbereich festgestellt, sodass die Autoren schließen, dass die Materialien selbst einen effektiven Sonnenschutz bieten. Für Verschattungsmaterialien aus Polycarbonat zeigten Turnbull und Parisi (2005), dass die Transmissivität bei erythemwirksamen Wellenlängen von < 365 nm sogar vernachlässigbar ist, was mit den von Toomey et al. (1995) berichteten Werten übereinstimmt.

Einfluss von Vegetation

Nach Heisler und Grant (2000) haben Stadtbäume grundsätzlich das Potential, die UV-Strahlung signifikant zu reduzieren, da diese den Himmel verschatten und UV-Strahlung effektiv absorbieren. Je nach Baumart werden etwa 91-95% der UV-Strahlung an Blättern absorbiert, 5-9% werden reflektiert, und nur $< 0.1\%$ werden transmittiert (Yang et al., 1995; Heisler und Grant, 2000; Grant et al., 2003). Damit ist die Reflektivität im UV-Bereich deutlich geringer im Vergleich zum sichtbaren Bereich, wo die Reflektivität bei etwa 10-30% liegt und spektral deutlich höhere Werte annehmen kann. Zudem fanden Yang et al. (1995), dass es keine signifikante Abhängigkeit der Reflexionseigenschaften von Blättern im UV-Bereich sowohl von der Wellenlänge noch der Blattausrichtung (Ober-/Unterseite) gibt, ausgenommen bei Eichen, welche im UV-A-Bereich eine relativ hohe, im UV-B-Bereich jedoch eine sehr geringe Reflektivität zeigen. Yoshimura et al. (2010) zeigen auch, dass die Absorptionseigenschaften im UV-Bereich nicht vom Alter oder dem Zustand der Blätter abhängen, selbst junge Blätter im Frühjahr oder bereits abgestorbene Blätter absorbieren UV-Strahlung effektiv. Für eine Übersicht bezüglich der Reflexions-, Absorptions- sowie Transmissionseigenschaften verschiedener Baumarten wird auf Na et al. (2014), Qi et al. (2010), Yang et al. (1995), Heisler und Grant (2000) sowie Yoshimura et al. (2010) verwiesen. Obwohl die Reflektivität eines einzelnen Blattes immer noch bei 5% liegt, zeigen Yoshimura et al. (2010) anhand von Strahldichtemessungen, dass Reflexionen an Bäumen dennoch vernachlässigbar sind. Dies führen Yoshimura et al. (2010) darauf zurück, dass Blätter sehr unterschiedlich ausgerichtet sind und sich zudem bewegen, wodurch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Strahl im Kronenraum mehrfach reflektiert wird, relativ hoch ist. Da aufgrund der hohen Absorptionsrate von Blättern ein Großteil der UV-Strahlung absorbiert wird, sind nur wenige Mehrfachreflexionen an Blättern notwendig, um die UV-Strahlung effektiv zu absorbieren. Dies deckt sich auch mit Lee und Downum (1991), welche unter einem vollständig geschlossenen Kronendach in Wäldern keine signifikante UV-Strahlung mehr nachweisen konnten.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass Bäume keine homogenen stationären Objekte darstellen, sondern komplexe Strukturen haben und sich Blätter zudem aufgrund der turbulenten Strömung bewegen. Dadurch entstehen sogenannte Sonnenflecken, welche im sichtbaren Spektralbereich häufig im Schatten von Bäumen visuell zu beobachten sind und zu einer bimodalen Verteilung der ankommenden Strahlung im Schatten führen (Grant, 1997). Im

Bereich von Sonnenflecken ist der diffuse Anteil der UV-B-Strahlung kaum verschieden zu Bereichen außerhalb von Sonnenflecken. Dies führen Flint und Caldwell (1998) darauf zurück, dass der nicht verschattete Anteil des Himmels durch Öffnungen in den Baumkronen nur marginal erhöht wird und die diffuse Strahlung, welche durch diese Öffnungen dringt, aufgrund von Mehrfachreflexionen an Blättern effektiv absorbiert wird. Einzig der direkte Anteil der UV-Strahlung kommt in Bereichen von Sonnenflecken hinzu, sodass die Bestrahlungsstärke im UV-B nur leicht verschieden zu Bereichen außerhalb der Sonnenflecken ist. Aufgrund der Tatsache, dass Sonnenflecken aufgrund der Blatt- und Astbewegung räumlich nicht stationär sind, schließen Flint und Caldwell (1998), dass Sonnenflecken die UV-B-Bestrahlungsstärke im zeitlichen Mittel nur minimal erhöhen. In Übereinstimmung dazu beobachtete Grant (1997) in Bereichen von Sonnenflecken eine Erhöhung von 22% im UV-B und 13% im UV-A, im Vergleich zu beschatteten Bereichen außerhalb der Sonnenflecken. Dies ist deutlich verschieden zum sichtbaren Bereich, für welchen Grant (1997) eine Erhöhung um 240% beobachtete, was auf den höheren Anteil der direkten Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich zurückgeführt werden kann.

Brantley und Young (2010) haben den Zusammenhang zwischen Sonnenfleckenhäufigkeit und pflanzenphysiologischen Parametern wie dem Blattflächenindex oder der Blattflächendichte bei verschiedenen Baumarten untersucht. Allerdings fanden die Autoren keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Sonnenflecken und pflanzenphysiologischen Parametern. Brantley und Young (2010) führen dies auf den sehr unterschiedlichen Aufbau mit unterschiedlichen Verästelungen, Blattausrichtungen und Blattbewegungen bei verschiedenen Baumarten zurück. Den Autoren dieses Berichts ist bislang keine weitere Studie bekannt, welche einen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Sonnenflecken und allgemein verfügbaren pflanzenphysiologischen Parametern wie dem Blattflächenindex oder der Blattflächendichte zeigen, was jedoch eine Grundvoraussetzung zur realistischen Modellierung dieser Prozesse ist.

Grant (1997) hat Messungen der UV-Bestrahlungsstärke im UV-A- und UV-B-Bereich in der Umgebung einzelner Stadtbäume durchgeführt und gezeigt, dass auch einzelne Bäume zu einer Reduktion der UV-Strahlung in sonnenbeschienenen Bereichen führen, ähnlich wie Wai et al. (2017) dies bei Gebäuden nachgewiesen haben. Weiterhin fand Grant (1997), dass die UV-Strahlung auf der sonnenzugewandten Seite des Baumes tendenziell höher ist als auf der sonnenabgewandten Seite, mit abnehmendem Abstand zum Baum aber stark abnimmt, wohingegen auf der sonnenabgewandten Seite räumlich homogenere UV-Bestrahlungsstärken beobachtet wurden, was auf eine anisotrope Verteilung der diffusen UV-Strahlung zurückgeführt werden konnte. Heisler und Grant (2000) kommen zu einem ähnlichen Schluss, dass der Unterschied von sichtbarem Schatten und Sonne im UV weniger offensichtlich ist, was auf den hohen diffusen Anteil von > 50% im UV zurückzuführen ist. Heisler und Grant (2000) berichten, dass im sichtbaren Schatten auf der sonnenabgewandten Seite des Baumes noch über 60% des Wertes im Vergleich zur Freifläche gemessen werden. Weiterhin konnten Na et al. (2014) zeigen, dass auch noch entfernte Bäume zu einer Reduktion der UV-Bestrahlungsstärke beitragen, insbesondere bei größeren Sonnenzenitwinkeln. Der Abschattungseffekt von Bäumen hängt dabei jedoch wesentlich von der Morphologie der Bäume ab. Weit ausladende Laubbäume bieten mehr Schutz vor UV-B-Strahlung als hochgewachsene Nadelbäume mit nur einem schmalen Kronendurchmesser (Sivarajah et al., 2020). Im Hinblick auf UV-Prävention in Städten sind daher Baumarten mit weiten Kronendurchmessern zu empfehlen (Heisler und Grant, 2000).

In bewölkten Situationen mit einem Bedeckungsgrad von mehr als 6/8 fanden Grant und Heisler (2006), dass der Effekt von Stadtbäumen auf die UV-Abschattung schwächer ausgeprägt ist. In diesem Fall ist der Großteil der empfangenen Strahlung bereits gestreut worden und diffus, sodass Bäume kaum noch einen Beitrag zur Abschattung des direkten Anteils leisten und nur den diffusen Anteil aus den verschatteten Himmelsanteilen abschirmen. Bei einem geringeren Bedeckungsgrad von < 5/8 fanden Grant und Heisler (2006) jedoch keinen signifikanten Effekt von Wolken auf die Baumabschattung im UV, verglichen mit einer unbewölkten Situation. An dieser Stelle muss jedoch angemerkt werden, dass Grant und Heisler (2006) eine analytische Beschreibung des direkten und diffusen Strahlungsanteils in

Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad benutzt haben. Diese berücksichtigt jedoch keinerlei Reflexionen an Wolkenrändern, welche zu lokalen Überhöhungen der UV-Bestrahlungsstärke führen können (Na et al., 2014). Die von Grant und Heisler (2006) getroffene Schlussfolgerung über Abschattungseffekte von Bäumen bei geringem Bedeckungsgrad ist daher mit Vorsicht zu betrachten.

Albedo und Reflexionen

Das Rückstrahlvermögen einer Oberfläche im UV-Spektralbereich wird üblicherweise über die Albedo definiert. Diese bezeichnet das Verhältnis der Bestrahlungsstärke zwischen diffus nach oben reflektierter und von oben einfallender diffuser und direkter Strahlung. Dabei wird angenommen, dass die Oberfläche die einfallende Strahlung vollständig diffus reflektiert. Im Weiteren, soweit nicht anders angemerkt, bezieht sich die Albedo auf das Mittel über den gesamten UV-Spektralbereich.

Nach Heisler und Grant (2000) ist die Kenntnis der räumlichen mittleren Albedo des städtischen Umfelds ein wesentlicher Faktor zur Untersuchung der UV-Strahlung. Eine Erhöhung der mittleren UV-Albedo von 0,03 auf einen Wert von 0,2 würde unter typischen atmosphärischen Bedingungen zu einer 3%-igen Erhöhung der UV-B-Strahlung führen. Eine ähnliche Aussage über die Relevanz der mittleren Albedo treffen auch Seckmeyer und Luiz (2021). Heisler und Grant (2000) geben eine Literaturübersicht der Albedo verschiedener Oberflächenmaterialien. Im Mittel beziffern Heisler und Grant (2000) die Albedo bei Gehwegen auf 12%, 5% für Asphalt, 4% für Gras, 9% für Glas und 22% für Metalloberflächen und einige weiße Farbanstriche an Wänden. Die entsprechenden Werte wurden dabei aus Blumthaler und Ambach (1988) und Sliney (1986) abgeleitet. Turner und Parisi (2018a, Tab. 2-5) geben zudem eine weitere umfassende Literaturübersicht über die Breitband- und die spektrale UV-Albedo. Turner und Parisi (2018a) weisen jedoch darauf hin, dass es immer noch Unsicherheiten bei den exakten Werten der Albedo aufgrund unterschiedlicher Materialzusammensetzungen und -strukturen gibt, und die Variabilität der Albedo bei ein und demselben Material, z.B. Baustoffe aus Gips, zwischen unterschiedlichen Studien relativ hoch ist.

Seckmeyer und Luiz (2021) zeigen, dass die erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke von der Albedo abhängt. Eine Angabe der Albedo ist bereits bei der Modellierung der UV-Strahlung durch die Atmosphäre durch ein Strahlungstransfermodell erforderlich. Städtische Umgebungen sind jedoch räumlich sehr heterogen und sind durch sehr unterschiedliche Oberflächen auch hinsichtlich der Albedo geprägt. Aus der Literatur ist allerdings nicht eindeutig ersichtlich, über welchen Radius die mittlere Albedo zu bestimmen ist. Degünther et al. (1998) fanden, dass auch Oberflächen mit einer Entfernung > 40 km vom Messort die UV-Bestrahlungsstärke noch beeinflussen. Smolskaia et al. (1999) kamen jedoch nur auf einen Entfernungsradius von 2,5 km, Wagner et al. (2011) auf etwa 5,0 km. Mayer und Degünther (2000) diskutieren zudem mögliche Ursachen dieser unterschiedlichen Werte und erwähnen, dass räumlich große Unterschiede der Oberflächenalbedo unter Umständen Messungen der Albedo verfälschen könnten. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass je nach Beschaffenheit des Stadtquartiers und des Radius der einbezogenen Umgebung sich die mittlere Albedo ändern kann, was wiederum zu Unsicherheiten führen kann (Weihs et al., 2012).

Reflexionen an städtischen Oberflächen

Turner und Parisi (2018a) erwähnen, dass die im städtischen Bereich vorkommenden Oberflächen unterschiedliche Rückstrahleigenschaften haben. Turner und Parisi (2018a) unterscheiden dabei zwei Kategorien an Oberflächenmaterialien: Zum einen Oberflächen, welche als ideale Lambertsche Strahler agieren und Strahlung unabhängig vom Eingangswinkel gleichverteilt und diffus in alle Raumrichtungen reflektieren. Zu dieser Kategorie zählen im UV-Spektralbereich die meisten im städtischen Umfeld auftretenden Oberflächen, z.B. asphaltierte Flächen, Vegetation, Sand und Boden sowie die meisten

Baumaterialien. Die Rückstrahleigenschaften dieser Materialien können gut mittels der Albedo abgebildet werden. Zum anderen gibt es aber auch Oberflächen, welche als nicht-Lambertsche Strahler agieren. Dazu gehören spiegelnde Oberflächen, an denen die Strahlung nicht ausschließlich diffus in alle Raumrichtungen gerichtet ist, sondern ein Teil der reflektierten Strahlung eine Richtungsabhängigkeit aufweist und somit vom Einfallswinkel, d.h. von der Gebäudegeometrie und dem Sonnenwinkel, abhängt. Im UV-Spektralbereich zählen dazu z.B. Zink-Aluminium Verbindungen und einige Glasarten, wobei Turner und Parisi (2018a) auch erwähnen, dass diese Materialien keine ideal spiegelnden Oberflächen sind, sondern zum Teil auch immer noch UV-Strahlung diffus reflektieren. Turner und Parisi (2012, 2018a) erwähnen zudem, dass für diese Materialien die Albedo kein ausreichendes Maß zur Beschreibung der UV-Oberflächeneigenschaften darstellt, da diese per Definition einen Lambertschen Strahler annimmt, was insbesondere bei der Vermessung der Oberflächeneigenschaften eine wichtige Rolle spielt (Turner und Parisi, 2012).

Insgesamt hatte der Aspekt von UV-Reflexionen an Fassaden, Dächern und anderen urbanen Strukturen in der Literatur bislang nur eine geringe Priorität, der Fokus lag vorwiegend auf den Effekten von Wolken, Aerosol, Ozon und Verschattungen (Turner und Parisi, 2018a). Dennoch konnte der Effekt von Reflexionen an städtischen Oberflächen im UV-Spektralbereich bereits nachgewiesen werden. Parisi et al. (2003) führten Messungen über verschiedenen horizontalen Oberflächen durch und fanden an signifikant reflektierenden Oberflächen leicht erhöhte erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärken. Je nach Oberfläche und Sonnenzenitwinkel betrug die Erhöhung zwischen 1-9% über asphaltierten Flächen und bis zu 15% über Sand. Anhand von Messungen der UV-Bestrahlungsstärke an Orten mit hohem Anteil an Glasfassaden in Tokio und Singapur zeigen Hasegawa et al. (2017), dass die UV-Strahlung aufgrund von Reflexionen lokal erhöht sein kann, verglichen mit der Situation über einer Freifläche. Insbesondere in offenen Bereichen mit einem geringen Sky-View Faktor und hohen umliegenden Gebäuden mit Glasfassaden konnte dieser Effekt beobachtet werden.

Turner et al. (2008) sowie Turner und Parisi (2018b) führten spektrale Messungen der reflektierten UV-Strahlung im Nahbereich von Fassaden mit verschiedenen Oberflächenmaterialien durch. Insbesondere an Fassaden mit Zink-Aluminium oder polierten Stahlverkleidungen wurden dabei bis zu 20-40% der UV-B-Strahlung und etwa 10-30% der UV-A-Strahlung reflektiert. Verschiedene Anstriche konnten die reflektierte UV-Strahlung jedoch signifikant reduzieren. Zudem konnten Turner et al. (2008) nachweisen, dass die reflektierte UV-Strahlung an spiegelnden Metalloberflächen stark vom Ort bzw. der Ausrichtung der Fassade sowie vom Sonnenwinkel abhing, was auf eine richtungsabhängige Reflexion hindeutet. Bei Anstrichen konnte dieser Effekt hingegen nicht nachgewiesen werden. Turner und Parisi (2009) fanden im Nahbereich von Gebäudefassaden mit reflektierenden Metalloberflächen eine Erhöhung der erythemwirksamen Strahlung von bis zu 20-50% in sonnenbeschienenen Bereichen, verglichen mit einer Messung über einem freien Horizont. Im Schatten konnten Turner und Parisi (2009) eine Erhöhung der erythemwirksame UV-Strahlung zwischen 40-300% aufgrund von Reflexionen an Zink-Aluminium Fassaden nachweisen, verglichen mit einer Messung an einer gestrichenen kaum reflektierenden Wand. Dies zeigt, dass Reflexionen an Metalloberflächen den Anteil der geblockten diffusen UV-Strahlung durch die Fassaden teils überkompensieren. Turner und Parisi (2009) erwähnen zudem, dass der direkte Anteil der UV-Strahlung effektiver reflektiert wird, als der diffuse und dass es dadurch an glänzenden Oberflächen eine Winkelabhängigkeit der Reflexion im UV-Bereich gibt. Übereinstimmend mit den Ergebnissen von Turner et al. (2008) zeigen auch Turner und Parisi (2009), dass ein Farbanstrich eine durch Reflexionen bedingte Erhöhung der erythemwirksamen UV-Strahlung in der Nähe von Fassaden verhindert.

Wai et al. (2017) konnten nahe Glasfassaden sogenannte „Hotspots“ mit erhöhter UV-Strahlung nachweisen. Die Autoren führten diese „Hotspots“ auf Reflexionen an Glasfassaden zurück, die zum Teil visuell erkennbar waren durch hellere Regionen in den Gebäudeschatten. In diesen lokal abgegrenzten und zeitlich stark variierenden Bereichen führten Wai et al. (2017) dann Messungen der UV-A-Bestrahlungsstärke durch und fanden um bis zu zweimal höhere Werte verglichen mit danebenliegenden, aber nicht durch Reflexionen dominierten Bereichen. Es muss an dieser Stelle jedoch erwähnt werden, dass die UV-A-Bestrahlungsstärken in den „Hotspots“ dennoch geringere Werte aufwiesen als eine Referenzmessung über einer

Freifläche. Wai et al. (2017) merkten jedoch an, dass „Hotspots“ ebenso in sonnenbeschienenen, vom Gebäude weiter entfernten Bereichen auftreten können und somit zu erhöhten UV-Bestrahlungsstärken führen. Entsprechende Messungen fanden allerdings in diesen Bereichen nicht statt. Einen ähnlichen Effekt einer erhöhten Bestrahlungsstärke in der Nähe von Glasfassaden, jedoch nicht direkt auf den UV-Spektralbereich bezogen, haben auch Resler et al. (2021) beobachtet.

Den Autoren dieses Berichts sind bislang keine weiteren Studien zu Reflexionen im UV-Spektralbereich an Fenstern oder Glasfassaden bekannt, sodass über die Reflexionseigenschaften im UV-Spektralbereich an Glas sowie deren Relevanz für die erythemwirksame UV-Strahlung in der Umgebung keine weitere Aussage getroffen werden kann. Zusammengefasst lässt sich jedoch sagen, dass Reflexionen nahe Gebäudefassaden aus Glas oder Metall lokal sowie zeitlich begrenzt einen Einfluss auf die erythemwirksame UV-Bestrahlungsstärke haben können. Die genauen Reflexionseigenschaften hängen jedoch von dem verwendeten Material ab und weisen eine hohe Unsicherheit auf (Turner und Parisi, 2018a). Mittels einer Modellstudie basierend auf Sky-View Bildern haben Downs et al. (2008) den Effekt von Reflexionen an Wänden abgeschätzt. Im Nahbereich von weiß gestrichenen Gebäudefassaden erhöhte dabei der reflektierte Anteil die erythemgewichtete Bestrahlungsstärke zwischen 2-10% je nach Sonnenzenitwinkel. Obwohl dieses Ergebnis auf einer Modellierung beruht, bei der z.B. eine isotrope Verteilung der diffusen Strahlung angenommen wurde, deuten diese Ergebnisse dennoch daraufhin, dass Reflexionen an Gebäudewänden grundsätzlich berücksichtigt werden sollten.

Aufgrund der Tatsache, dass der Anteil der diffusen Strahlung den der direkten im UV Spektralbereich übersteigt und diffuse Strahlung an spiegelnden Materialien diffus in alle Richtungen gestreut wird und nur der kleinere direkte Anteil gerichtet reflektiert wird, empfehlen die Autoren dieses Berichts zunächst Reflexionen als vollständig diffus anzunehmen. Reflexionen der direkten Strahlung an spiegelnden Oberflächen sollte zunächst eine niedrigere Priorität eingeräumt werden. Obwohl es wissenschaftlich bislang nicht eindeutig geklärt ist, in welchen Fällen und wo genau es durch Glasanteile an Gebäudefassaden zu erhöhten Werten der UV-Bestrahlungsstärke kommen kann, so kann es dennoch sinnvoll sein, potentiell betroffene Regionen je nach Sonnenwinkel zu identifizieren und als Modellausgabe bereitzustellen, um zu einem späteren Zeitpunkt gegebenenfalls dort weitere Untersuchungen durchzuführen (Schrempf, 2022a).

Reflexionen an Bäumen

In den vorherigen Abschnitten wurde bereits erwähnt, dass Reflexionen an Bäumen kaum stattfinden. Grant et al. (2003) untersuchte spektrale Messungen der UV-Absorptions- und Reflexionseigenschaften an Blättern unterschiedlicher Baumarten. Dabei konnte die hohe Absorptionsrate bzw. geringe Reflexionsrate (ca. 5%) mit einer effektiven Streuung der UV-Strahlung an der Blattoberfläche aufgrund von kleinen Ausstülpungen auf der Cuticula in Verbindung gebracht werden. Dadurch wird ein Strahl auf der Blattoberseite zwischen den Ausstülpungen mehrfach hin und her reflektiert und somit effektiv absorbiert. Wird ein ganzer Baum betrachtet und nicht nur ein einzelnes Blatt, so liegt die Reflektivität im UV-Spektralbereich bei < 2% (Yoshimura et al., 2010). Dies ist auf die relativ hohe Absorptionsrate von Blättern im UV-Bereich in Verbindung mit deren unterschiedlichen Ausrichtung und Bewegung zurückzuführen. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Strahl im Kronenraum mehrfach reflektiert wird, relativ hoch, wodurch bei jeder Reflexion der Großteil der Energie absorbiert wird und dadurch die UV-Strahlung im Kronenraum des Baumes effektiv absorbiert, aber kaum reflektiert wird (Yoshimura et al., 2010). Weitere Studien, welche die Relevanz von UV-Reflexionen an Bäumen quantifizieren, sind den Autoren nicht bekannt.

3.1.3 Methoden zur Modellierung von UV-Strahlung in urbanen Umgebungen

Bevor im Folgenden Verschattungsmodelle vorgestellt werden, sei erwähnt, dass einige der beschriebenen Ansätze auf Kameraaufnahmen zur Ableitung des Sky-View Faktors (SVF) basieren. Kameraaufnahmen sind jedoch nur in Einzelfällen möglich, kostenintensiv und nur für kleinere Gebiete anwendbar. Der SVF einer Oberfläche, welcher den verschatteten bzw. sichtbaren Anteil des Himmels entweder raumwinkelabhängig oder integral beschreibt, kann jedoch ebenso aus GIS-basierten Daten in einem Modell wie PALM abgeleitet werden, sodass die im Weiteren vorgestellten Methoden potentiell auch in PALM angewendet werden können. In der Literatur gibt es unterschiedliche Ansätze zur Abschätzung der UV-Strahlung in urbanen Bereichen. So haben Downs et al. (2008) anhand von Fotos, aufgenommen mit einer Sky-View-Kamera, den durch Gebäude oder Pflanzen verschatteten Himmelsanteil abgeleitet. Basierend auf einer analytischen Beschreibung des diffusen und direkten Anteils der UV-Strahlung (Rundel, 1986), des lokal abgeleiteten SVF sowie der Annahme, dass der direkte Anteil der UV-Strahlung an vertikalen Wänden spiegelnd reflektiert wird, haben Downs et al. (2008) die erythemwirksame Bestrahlungsstärke auf einem Schulhof modelliert. In ihrem Modell konnte die Verteilung der UV-Strahlung plausibel nachgebildet werden. Unter Bäumen konnte vorrangig eine Reduktion im UV-A-Bereich und weniger im erythemwirksamen UV-B-Bereich beobachtet werden. Zudem hatten größere Bäume zu einer größeren Reduktion geführt als kleine Bäume. Auch konnte die Reduktion auf die erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke nahe den Gebäudewänden abgebildet werden, ähnlich wie sie z.B. Wai et al. (2017) zeigen.

Gao et al. (2002) haben ein geometrisches Modell zur Abschätzung der UV-B-Strahlung unter bzw. in Vegetationsbeständen basierend auf einem SVF-Ansatz entwickelt. Um die Anisotropie der diffusen Strahlung bei verschiedenen Sonnenwinkeln zu berücksichtigen, wird die Strahldichteverteilung der diffusen UV-B-Strahlung anhand einer von Grant et al. (1997a,b) entwickelten analytischen Abschätzung für wolkenlosen Himmel modelliert. Um den Effekt von Sonnenflecken zu berücksichtigen, modellieren Gao et al. (2002) anhand der winkelabhängigen Weglänge durch den Kronenraum sowie der Blattflächendichte die Wahrscheinlichkeit (Norman und Welles, 1983), dass direkte oder diffuse Strahlung den Kronenraum durchdringt. Anschließend wird die UV-B-Strahlung über alle nicht verschatteten Himmelsrichtungen integriert. Gao et al. (2002) konnten damit unter Stadtbäumen eine gute Übereinstimmung der UV-B-Strahlung zu Messdaten zeigen. In diesem Fall konnten jedoch keine Sonnenflecken beobachtet werden und die modellierte, den Kronenraum durchdringende UV-Strahlung (durch Öffnungen) war vernachlässigbar gering, was sich mit den von Flint und Caldwell (1998) gezeigten Messungen unter Bäumen deckt. In einem Maisbestand, welcher durch eine hohe Auftretswahrscheinlichkeit von Sonnenflecken charakterisiert war, fanden Gao et al. (2002) jedoch eine gute Übereinstimmung zwischen der modellierten und gemessenen transmittierten UV-Strahlung, ebenso wie Downs et al. (2019) für einen Bestand mit australischen Araukarien, welche in der Regel nur eine geringe Blattflächendichte aufweisen. Dies zeigt, dass der von Gao et al. (2002) vorgeschlagene Ansatz zur Berücksichtigung des Einflusses von Sonnenflecken auf die UV-Bestrahlungsstärke bei dünn besetzter Vegetation funktioniert.

Mit Hilfe des von Gao et al. (2002) entwickelten mathematischen Modells haben Grant et al. (2002) eine Parametrisierung für die UV-B-Abschätzung in Baumbeständen in Abhängigkeit vom Sonnenzenitwinkel, der Kronenfläche sowie des von den Baumkronen verdeckten Himmelsanteils entwickelt. Die diffuse UV-B-Strahlung unter Bäumen kann somit anhand der ankommenden UV-B-Strahlung oberhalb der Bäume, multipliziert mit dem lokal berechneten SVF, berechnet werden. Grant und Heisler (2006) haben die UV-B-Parametrisierung für den diffusen Anteil erweitert und eine Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad hinzugefügt, sodass auch bei bewölkten Situationen die erythemgewichtete UV-B-Strahlung bei Vorhandensein von Bäumen plausibel abgeschätzt werden kann. Na et al. (2014) haben für eine städtische Umgebung in Seoul, Korea, die UV-Abschattung durch Bäume anhand der von Grant et al. (2002) sowie Grant und Heisler (2006) entwickelten Parametrisierung für verschiedene Landnutzungen mit unterschiedlicher Anzahl an Bäumen modelliert. Mit Hilfe dieses geometrischen Modells ist es somit möglich, generelle und hinreichend genaue Aussagen über

die Baumabschattung im UV-Bereich zu treffen. Es sei jedoch angemerkt, dass die zugrunde liegende Parametrisierung auf einer analytischen Beschreibung des diffusen und direkten Anteils der UV-Strahlung beruht. Eine Veränderung der direkten und diffusen Strahlung aufgrund unterschiedlicher Ozonschichtdicken oder Aerosolkonzentrationen ist damit nicht berücksichtigt.

Des Weiteren haben Parisi et al. (2019) ein Modell zur Abschätzung des UV-Abschattungsfaktors entwickelt, welches das Verhältnis der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke zwischen einer offenen Freifläche und in einer verschatteten Umgebung beschreibt. Auf Basis des SVF, welcher aus Fotos ermittelt wurde (mit Hilfe des *SVF-Calculators*, Lindberg und Holmer, 2012) und mittels der durch ein Regressionsmodell modellierten diffusen und direkten UV-Strahlung, Transmission sowie Albedo, wurde eine Parametrisierung zur Abschätzung der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke abgeleitet. Dabei wurde jedoch angenommen, dass die diffuse UV-Strahlung aus allen Himmelsrichtungen gleich verteilt ankommt. Nach Seckmeyer und Luiz (2021) stellt dies allerdings eine starke Vereinfachung dar, da somit Verschattungen, welche sich im Norden oder im Süden der Messung befinden, die gleiche Auswirkung hätten. Dennoch konnten Parisi et al. (2019) eine gute Übereinstimmung zwischen modellierter und gemessener erythemgewichteter UV-Bestrahlungsstärke an unterschiedlichen Positionen und bei unterschiedlichen Sonnenzenitwinkeln nachweisen. Nach Kenntnis der Autoren wurde dieses Verschattungsmodell jedoch bislang nur für kleinskalige Strukturen, wie Markisen oder Pavilions, getestet. Eine Evaluierung für größere Bereiche, wie Straßenschluchten oder Plätze, ist noch ausstehend. Parisi et al. (2019) weisen in ihrer Studie zudem darauf hin, dass ihr Ansatz unabhängig von der Verwendung eines speziellen Modells ist und unterschiedliche Datensätze, welche z.B. unterschiedliche Ozonschichtdicken repräsentieren, verwendet werden können.

Weitere Modelle zur Abschätzung der Bestrahlungsstärke sind z.B. SkyHelios (Matzarakis und Matuschek, 2011; Fröhlich und Matzarakis, 2018), Soram (Erdélyi et al., 2014), oder ein von Calcabrini et al. (2019) entwickeltes Modell. Jedoch sind diese Modelle hauptsächlich zur Modellierung der Breitbandstrahlung für den thermischen Komfort bzw. Photovoltaikanlagen entwickelt worden und nicht speziell für den UV-Spektralbereich. Calcabrini et al. (2019) haben zusätzlich noch den Sun-Coverage-Faktor eingeführt. Dieser ist definiert als das Verhältnis der Zeitdauer, in der direkte Strahlung auf eine Oberfläche trifft zur gesamten Zeitdauer, in der der Sonnenzenitwinkel kleiner 90 ist. Der Sun-Coverage-Faktor ist insbesondere für geneigte Oberflächen relevant für den Fall, dass die Sonne im Rücken der Oberfläche steht und diese daher keine direkte, sondern nur diffuse Strahlung empfängt. Das Konzept des Sun Coverage-Faktors ist zur Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke nicht unbedingt nötig, da zu verschiedenen Zeitpunkten die UV-Strahlung basierend auf den aktuellen Gegebenheiten ausgegeben werden soll. Allerdings könnte der Sun-Coverage-Faktor relevant werden, falls mit dem entwickelten UV-Strahlungsmodell zukünftig Abschätzungen der UV-Tagesdosis an bestimmten Orten mit geneigten Flächen gemacht werden sollen.

Einen anderen Ansatz haben Wai et al. (2015, 2017) gewählt. Diese haben die vom TUV-Modell (siehe Kap. 3.1.1) vorab berechnete diffuse und direkte UV-Bestrahlungsstärke benutzt und mittels der kommerziellen CAD-Software Autodesk Ecotect⁵ basierend auf einem Ray tracing Algorithmus die Verschattung simuliert. Reflexionen wurden dabei allerdings nicht berücksichtigt, ebenso wie die Anisotropie der diffusen Strahlung. Eine Berücksichtigung unterschiedlicher atmosphärischer Szenarien mit dem von Wai et al. (2015, 2017) gewählten Ansatz ist aufgrund der vorab modellierten diffusen und direkten UV-Strahlung mittels eines externen Modells möglich.

Seckmeyer und Luiz (2021) empfehlen in ihrer Machbarkeitsstudie zur Umsetzung des Vorhabens die Verwendung der spektralen Strahldichte, anstatt der bereits über alle Himmelsrichtungen integrierten, spektralen Bestrahlungsstärke. Seckmeyer und Luiz (2021) begründen dies mit der anisotropen Verteilung der diffusen UV-Strahlung aus

⁵ <https://autodesk-ecotect-analysis.software.informer.com/download/>

unterschiedlichen Raumrichtungen. Anhand von Messungen der Strahldichteverteilung zeigen Riechelmann et al. (2013) und Schrepf et al. (2017) eine signifikante Abhängigkeit der empfangenen Energie im UV-B Spektralbereich von der Himmelsrichtung, welche sich insbesondere bei wolkenlosem Himmel stark von der Strahldichteverteilung im sichtbaren Spektralbereich unterscheidet.

Grant (1997) konnte ebenfalls einen Effekt der anisotropen diffusen Strahlungsverteilung auf die Baumabschattung im UV-Bereich beobachten. Seckmeyer und Luiz (2021) argumentieren daher, dass sich eine Abschattung einzelner Himmelsrichtungen durch Gebäude oder Bäume bei gleichzeitiger Annahme einer isotropen Strahlungsverteilung signifikant auf die Genauigkeit der Ergebnisse auswirken würde. Dieses Vorgehen wäre äquivalent zu dem von Gao et al. (2002), Grant et al. (2002) sowie Downs et al. (2008) mit dem Unterschied, dass Seckmeyer und Luiz (2021) eine Kopplung an ein externes Strahlungsmodell empfehlen, die vorher genannten Studien die Anisotropie der diffusen Strahlung jedoch auf unterschiedliche Weise parametrisiert haben (spektral für diskrete Wellenlängen oder eine Verteilung für das gesamte UV-Spektrum), wodurch der Einfluss von Ozon und Aerosol nicht adäquat berücksichtigt ist.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass alle in der Literatur vorhandenen Ansätze auf dem SVF beruhen. Im Fall, dass eine anisotrope Strahlungsverteilung angenommen wird, wird die Bestrahlungsstärke durch Integration über alle diskreten Raumwinkel bestimmt. Im vereinfachten Fall, dass eine homogene Strahlungsverteilung angenommen wird, reicht es stattdessen aus, den verschatteten Himmelsanteil zu kennen und die ankommende UV-Bestrahlungsstärke oberhalb der Gebäude damit zu multiplizieren.

3.2 Methodenbewertung

Basierend auf den in Kap. 3.1 zusammengetragenen Informationen erfolgt eine Methodenbewertung. Diese umfasst eine Bewertung der verfügbaren externen Strahlungstransfermodelle, welche die Randbedingung für die mikroskalige Modellierung der UV-Strahlung liefern. Weiterhin erfolgt eine Bewertung der vorgestellten UV-Modellierungsansätze zur Berücksichtigung der Baum- und Gebäudeabschattung sowie zur Berücksichtigung von Reflexionen an Fassaden. Die entsprechenden Bewertungskriterien werden in den folgenden Abschnitten jeweils erläutert. Ziel dieser Methodenbewertung ist, ein Methodenkonzept zu erstellen, welches als Basis für die darauffolgenden Entwicklungsarbeiten dient.

Zunächst erfolgt in Kap. 3.2.1 eine Bewertung externer Strahlungstransfermodelle. Im Anschluss wird in Kap. 3.2.2 eine Bewertung der entsprechenden UV-Modellierungsansätze vorgenommen. Ein entsprechendes Methodenkonzept zur Implementierung wird in Kap. 3.2.3 vorgeschlagen sowie ein Überblick hinsichtlich der Unsicherheiten und Grenzen der mikroskaligen UV-Modellierung mit PALM gegeben.

3.2.1 Bewertung atmosphärischer UV-Strahlungstransfermodelle und deren Einbindung in PALM

Ziel dieses Abschnitts ist die Bewertung der in Kap. 3.1 vorgestellten atmosphärischen UV-Strahlungstransfermodelle zur Einbindung in PALM. Das gewählte Modell soll dann die Randbedingung für die am Oberrand der Gebäude ankommende UV-Strahlung liefern, auf deren Basis die lokalen UV-Bestrahlungsstärken im städtischen Umfeld modelliert werden.

Aufgrund der Komplexität atmosphärischer UV-Strahlungstransfermodelle und deren Rechenanforderungen ist es nicht möglich, diese während innerhals einer PALM-Ausführung aufzurufen, da dies zu einem massiven Performanceverlust führen würde und eine Verschwendung von Rechenkapazitäten bedeuten würde. Es ist daher angedacht, entweder auf bereits erzeugte Daten zurückzugreifen oder, falls nötig, das entsprechende UV-Strahlungstransfermodell vorab der PALM-Simulation aufzurufen und einen entsprechenden Datensatz für das ausgewählte atmosphärische Szenario und verschiedene Sonnenstände zu erzeugen. Die erzeugten Daten werden in einer NetCDF-Datei gemäß des in Kap 3.3.1

definierten Eingabestandards mittels einer Software zur Datenkonvertierung abgespeichert (siehe Kap. 3.4). Dazu wird für ein vorab definiertes UV-Strahlungs Szenario (fest definierte Albedo, Ozonschichtdicke, Bedeckung, Aerosol- und Wasserdampfprofile, etc.) die Bestrahlungsstärke (oder Strahldichte) für verschiedene Sonnenzenitwinkel modelliert und abgespeichert, um den Tagesgang der ankommenden Strahlung abzubilden. Während der PALM-Simulation werden dann die aktuellen UV-Bestrahlungsstärken am Oberrand der Gebäude mittels Interpolation zwischen verschiedenen Sonnenzenitwinkeln abgeleitet.

Das verwendete atmosphärische Strahlungsmodell muss folgende Anforderungen erfüllen:

1. Der Source-Code muss frei verfügbar sein. Das Ziel der PALM-Entwickler ist, dass der Zugang zu PALM-Modellkomponenten für jeden Anwender gewährleistet ist. Eine Schnittstelle – entsprechende Software zur Präprozessierung und Konvertierung von Ausgabedaten in ein PALM lesbares Format – ist notwendig, welche speziell auf das ausgewählte Strahlungstransfermodell ausgerichtet ist. Das Einbinden von nicht frei verfügbarer Software oder die Ausrichtung von Präprozessierungssoftware auf nicht frei verfügbarer Software würde dies einschränken und ist daher keine Option.
2. Das Strahlungstransfermodell sollte Ausgaben der diffusen und direkten spektralen Bestrahlungsstärke im UV-Spektralbereich liefern. Wünschenswert wäre zudem eine Ausgabe der spektralen Strahldichte, um die Anisotropie der diffusen Strahlung berücksichtigen zu können.
3. Das Modell sollte für den UV-Spektralbereich evaluiert sein.
4. Das Strahlungstransfermodell zur Erzeugung der Eingangsdaten für PALM muss auf einem Standard-Notebook anwendbar sein und die Rechendauer sollte vertretbar sein.
5. Das Modell sollte aktiv weiterentwickelt werden. Damit soll sichergestellt werden, dass der entsprechende Source Code langfristig verfügbar ist. Mit einer aktiven Entwickler- sowie Anwendercommunity wird die Wahrscheinlichkeit, dass das entsprechende Modell langfristig verfügbar ist, als hoch eingeschätzt.
6. Die Dokumentation des Modells sowie der einstellbaren Parameter sollte verständlich und ausreichend genau sein.

In Tab. 1 sind die in Kap. 3.1 vorgestellten Strahlungstransfermodelle und dazugehörige Informationen aufgelistet. Nur ein Teil der in Tab. 1 gelisteten Modelle erfüllt die Anforderungen. Zum Beispiel ist FARMS-NIT bislang nicht speziell für den UV-Spektralbereich evaluiert worden, sodass die Unsicherheiten des Modells nicht eingehend bekannt sind. FAST-RT wird nach aktuellem Kenntnisstand nicht weiterentwickelt, was darauf hindeutet, dass es nur wenige Anwender gibt und die langfristige Verfügbarkeit damit nicht garantiert werden kann. Gleiches trifft auf STARsci sowie GRIMALDI zu. Ebenso AURORA-UV wird nicht weiter betrachtet, da keine Information über die freie Verfügbarkeit vorliegt. Nach den definierten Anforderungen kommen daher nur die Modelle uvspec und TUV in Frage.

Beide Modelle sind frei verfügbar und sind umfangreich dokumentiert sowie evaluiert worden (e.g. Cordero et al., 2007; Madronich et al., 1998). Zudem haben beide Modelle eine aktive Entwickler- und Anwendercommunity und werden regelmäßig in Veröffentlichungen erwähnt (Deng et al., 2012; Ruiz-Arias und Gueymard, 2018; Lamy et al., 2019). Weiterhin liefern beide Modelle Informationen der diffusen und direkten spektralen Bestrahlungsstärke und beide Modelle können für eine Vielzahl atmosphärischer Szenarien angewendet werden, z.B. stratiforme Bewölkung, maritim oder kontinental geprägte Luftmassen, etc.. Gegenüber TUV hat uvspec jedoch den Vorteil, dass wahlweise auch spektrale Strahldichten ausgegeben werden können, was nach derzeitigem Kenntnisstand mit TUV nicht möglich ist. Diese Ausgabegröße ist essenziell, um den von Seckmeyer und Luiz (2021) vorgeschlagenen

Modellierungsansatz zu verwenden, bei dem die direkte und diffuse UV-Strahlung sowie deren Verschattung raumwinkelabhängig betrachtet wird.

Tabelle 1: Atmosphärische UV-Strahlungsmodelle.

| Modell | Rechenzeit | Open-Source (Lizenz) | Entwicklung / Anwendung | Dokumentation | Ausgabe-größen | Besonderheiten |
|-------------------|---------------------------------|--|--|---------------|---|--|
| uvspec | wenige Minuten pro Sonnenwinkel | ja - GPL2 | aktive Entwickler- und Anwendercommunity, letzte Version Dezember 2020, Hauptentwicklung Universität München | umfangreich | diffus + direkt, spektrale Bestrahlungsstärke oder Strahldichte | umfangreiche Konfigurationsmöglichkeiten, 3D Wolken und Orographie möglich |
| TUV | wenige Minuten pro Sonnenwinkel | ja, Lizenz nicht bekannt | aktive Entwickler- und Anwendercommunity, letzte Version April 2018, Hauptentwicklung am NCAR ⁶ | umfangreich | diffus + direkt, spektrale Bestrahlungsstärke | umfangreiche Konfigurationsmöglichkeiten |
| FARMS-NIT | wenige Minuten pro Sonnenwinkel | ja - BSD-3 Clause | aktive Entwicklung. Hauptentwicklung am NREL ⁷ | umfangreich | diffus + direkt, spektrale Bestrahlungsstärke | nicht für den UV-Spektralbereich evaluiert |
| GRIMALDI | nicht bekannt | ja, Lizenz nicht bekannt, Code auf Nachfrage | nicht bekannt | nicht bekannt | diffus + direkt, spektrale Bestrahlungsstärke | 3D Wolken und Orographie möglich |
| STARSci | nicht bekannt | nicht bekannt | nicht bekannt | nicht bekannt | diffus + direkt, spektrale Bestrahlungsstärke | keine Referenz zum Starsci-Code bekannt |
| AURO-RA-UV | nicht bekannt | nicht bekannt | nicht bekannt | nicht bekannt | UV-Index, spektrale Bestrahlungsstärke | Look-up Table Ansatz basierend auf uvspec |
| FAST-RT | nicht bekannt | nicht bekannt | nicht bekannt, letzte Version 2008 | ausreichend | UV-Index, spektrale Bestrahlungsstärke | Look-up Table Ansatz basierend auf uvspec, nur Web-Interface |

Für eine objektive Entscheidung zeigt Tab. 2 eine Entscheidungsmatrix, in der zu jeder definierten Anforderung eine Punktzahl zwischen 0 und 10 vergeben wurde, um anzugeben, wie gut diese Anforderung erfüllt ist. Die Gewichtung der einzelnen Anforderungen ist gleich. Der erreichten Punktzahl entsprechend, wird im weiteren Verlauf des Projekts das Modell uvspec für die Erzeugung von UV-Eingangsdaten für die mikroskalige Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke verwendet.

Tabelle 2: Entscheidungsmatrix zur Bewertung atmosphärischer UV-Strahlungstransfermodelle. Jede Kategorie wird mit einer Punktzahl von 0 bis 10 bewertet, wobei höhere Werte eine bessere Eignung anzeigen. Betrachtet werden hier nur die in Frage kommenden Modelle uvspec und TUV.

| Modell | Krit. 1 | Krit. 2 | Krit. 3 | Krit. 4 | Krit. 5 | Krit. 6 | Gesamt |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| uvspec | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 58 |
| TUV | 8 | 5 | 10 | 10 | 10 | 7 | 50 |

⁶ National Center for Atmospheric Research, USA

⁷ National Renewable Energy Laboratory, USA

3.2.2 Bewertung der Modellierungsansätze

Um die verschiedenen Ansätze zur Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke (siehe Kap. 3.1.3) im urbanen Raum objektiv bewerten zu können, muss zunächst geprüft werden, inwieweit unterschiedliche Anforderungen erfüllt sind. Zum einen müssen die Modellierungsansätze die physikalischen Aspekte hinreichend abdecken, zum anderen müssen die Ansätze umsetzbar sein. Die Umsetzbarkeit bedeutet in diesem Fall, dass die Modellierungsansätze grundsätzlich vereinbar mit der in PALM verwendete Modellphysik und Darstellung von Topographie und Pflanzen auf dem numerischen Gitter sind. Zudem muss der jeweilige Modellierungsansatz in PALM ohne die Verwendung externer Softwarepakete implementierbar sein, wodurch einige der in Kap. 3.1 vorgestellten Methodiken entfallen. Weiterhin muss die Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke unter gegebenen Rechenkapazitäten realisierbar sein, d.h. die Anzahl der Rechenoperationen und die Menge des benötigten Speicherplatzes dürfen nicht die Rechenkapazitäten eines handelsüblichen Notebooks übersteigen.

Physikalische Eignung

Tabelle 3 fasst die Eigenschaften der in Kap. 3.1 vorgestellten UV-Modellierungsansätze zusammen. Die jeweiligen Ansätze unterscheiden sich jeweils hinsichtlich ihrer Komplexität sowie Ausrichtung auf bestimmte Fragestellungen. Keines der Modelle umfasst jedoch alle für die Modellierung der UV-Strahlung notwendigen Aspekte (Abschattung an Gebäuden und Pflanzen, Reflexionen). Im Weiteren werden einzelne Teilaspekte individuell bewertet.

Die meisten der bekannten Methodiken zur Modellierung der Abschattung im UV-Spektralbereich im urbanen Umfeld basieren auf einem SVF-Ansatz (siehe Kap. 3.1.3). Der SVF kann entweder integral oder raumwinkelabhängig betrachtet werden. Integral definiert beschreibt der SVF den von einer (x, y, z) -Position sichtbaren Anteils des Himmels und kann Werte zwischen 0 (kein Himmel sichtbar) und 1 (kompletter Himmel sichtbar) annehmen. Häufig wird in der Literatur allerdings auch eine raumwinkelabhängige Definition des SVF verwendet, welche den sichtbaren Anteil des Himmels in einem gegebenen Raumwinkel (Azimut und Zenit) definiert. In Tab. 3 sind diese beiden Ansätze jeweils mit dem Zusatz integral oder raumwinkelabhängig unterschieden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass der SVF (integral oder raumwinkelabhängig) von der (x, y, z) -Position abhängt, nicht jedoch von der Wellenlänge der betrachteten Strahlung. Weiterhin sei angemerkt, dass eine raumwinkelabhängige Definition des SVF die Verwendung der Strahldichte ermöglicht. Mit einer integralen Definition des SVF ist dies nicht möglich und die Anisotropie der diffusen UV-Strahlung kann nicht berücksichtigt werden.

Die in Kap. 3.1.3 vorgestellten Modellierungsansätze zur Abschattung der UV-Strahlung basieren meist darauf, dass die am Oberrand der Gebäude ankommende diffuse und direkte Strahlung mit dem SVF multipliziert werden und dadurch die jeweilige ortsabhängige Abschattung berücksichtigt wird. Eine Ausnahme stellt der von Wai et al. (2015, 2017) vorgestellte Ansatz dar, in welchem eine kostenpflichtige externe Software zur Modellierung des Raytracings (Strahlenverfolgung) verwendet wird. Diese Methodik ist in Tab. 3 zwar mit aufgeführt, wird im Weiteren aber nicht weiter betrachtet. Dies ist damit begründet, dass die Einbindung einer kostenpflichtigen Software in das PALM-Modellsystem im Widerspruch zum Open-Source-Charakter steht und eine generelle Verfügbarkeit für ein breites Anwenderspektrum dauerhaft nicht gewährleistet werden kann.

Die nicht speziell für die Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke ausgelegten Modelle von Fröhlich und Matzarakis (2018), Erdélyi et al. (2014) und Calcabrini et al. (2019), basieren auf einer raumwinkelunabhängigen Abschattung durch Gebäude oder Bäume. Zudem wird diffuse und direkte Strahlung spektral unabhängig betrachtet. Physikalisch wird bei diesen Ansätzen somit angenommen, dass die diffuse Strahlung isotrop am Himmel verteilt ist und es zudem keine Wellenlängenabhängigkeit der Streuung/Absorption gibt. Ersteres haben z.B. Riechelmann et al. (2013) anhand von Messungen widerlegt und gezeigt, dass die diffuse

Strahlung insbesondere unter wolkenlosen Bedingungen deutlich anisotrop verteilt sein kann. Weiterhin ist das Verhältnis von diffuser zu direkter Strahlung im UV-Spektralbereich, insbesondere im erythemwirksamen UV-B-Bereich, stark von der Wellenlänge abhängig. Aus diesem Grund sind diese vereinfachten Ansätze nur bedingt für die Modellierung der UV-Bestrahlungsstärke geeignet, da diese zu größeren Ungenauigkeiten in der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke führen können.

Tabelle 3: Übersicht zu den Eigenschaften verschiedener Modellierungsansätze. Mit (*) gekennzeichnete Ansätze sind nicht speziell für die Modellierung des UV-Spektralbereichs ausgelegt. Unter dem Aspekt *ankommende Strahlung* ist aufgeführt, wie die am Oberrand der Gebäude ankommende UV-Strahlung in den Originalveröffentlichungen bereitgestellt wurde.

| Modell / Referenz | Ansatz und Eigenschaften der Abschattung | spektrale Betrachtung | Reflexionen | ankommende Strahlung |
|---|--|-----------------------|-------------|---|
| Parisi et al. (2019) | SVF integral | ja | nein | Messung |
| SkyHelios* (Fröhlich und Matzarakis, 2018) | SVF integral | nein | nein | intern modelliert |
| SORAM* (Erdélyi et al., 2014) | SVF integral | nein | nein | intern modelliert |
| Calcabrini et al. (2019)* | SVF integral | nein | nein | intern modelliert |
| Wai et al. (2015, 2017) | Raytracing mittels externer Bibliothek | ja | nein | externes Modell (TUV) |
| Downs et al. (2008) | SVF raumwinkelabhängig | ja | ja | analytische Beschreibung (Anbindung an externes Modell möglich) |
| Seckmeyer und Luiz (2021) | SVF raumwinkelabhängig | ja | - | empfehlen externes Modell |
| Gao et al. (2002), Grant et al. (2002), Grant und Heisler (2006) | SVF raumwinkelabhängig (nur Baumabschattung) | ja | nein | analytische Beschreibung oder externes Modell |

In dem von Parisi et al. (2019) vorgestellten Ansatz wird die ankommende diffuse und direkte, bereits erythemgewichtete Bestrahlungsstärke direkt mit dem integralen SVF multipliziert. Dadurch kann die erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke an jedem gegebenen Ort abgeleitet werden. Allerdings beruht diese Methodik auf der Annahme einer isotropen Verteilung der diffusen UV-Strahlung und kann daher zu Ungenauigkeiten führen. Weiterhin haben Parisi et al. (2019) keine Mehrfachreflexionen berücksichtigt und keine Unterscheidung bei der Abschattung durch Gebäude oder Pflanzen getroffen. Letzteres impliziert, dass eine eventuelle Berücksichtigung des Einflusses von Sonnenflecken oder teilweise transparenten Strukturen auf die UV-Bestrahlungsstärke nicht möglich ist.

Komplexere Ansätze, die auf einer raumwinkelabhängigen Information der Himmelsabschattung basieren, wurden von Downs et al. (2008) und Gao et al. (2002) (sowie darauf basierende Weiterentwicklungen) vorgeschlagen. Aus physikalischer Sicht ist die Verwendung einer richtungsabhängigen Abschattungsinformation die genauere Herangehensweise (Schrempf et al., 2017) und wurde bereits von Seckmeyer und Luiz (2021) empfohlen.

Pflanzenabschattung

Parisi et al. (2019) sowie Downs et al. (2008) unterscheiden nicht bei der Abschattung durch Gebäude oder Bäume. Sobald ein Bereich des Himmels bedeckt ist, wird der SVF

entsprechend reduziert, unabhängig davon, wie dicht die Baumkrone ist. Bei diesem Ansatz wird somit angenommen, dass UV-Strahlung von Blättern effektiv absorbiert wird, was entsprechend den Untersuchungen von Yang et al. (1995) sowie Heisler und Grant (2000) eine gerechtfertigte Annahme darstellt. Parisi et al. (2019) sowie Downs et al. (2008) hatten in ihren Studien hochaufgelöste Informationen der Himmelsabschattung durch Bäume aus Kamerabildern vorliegen, bei denen auch kleinskalige Öffnungen aufgelöst waren. Eine Gleichbehandlung von Gebäuden und Bäumen bei der Abschattung ist aus Sicht der Autoren daher ein gerechtfertigter Ansatz, solange die Abschattungsinformation sehr hoch (im Bereich weniger Zentimeter) aufgelöst vorliegt, z.B. abgeleitet aus Kamerabildern oder Laserscans, und kleinere Öffnungen in Baumkronen berücksichtigt werden und somit der SVF entsprechend exakt bestimmt werden kann. In einem numerischen Modell liegen Informationen jedoch auf dem diskreten numerischen Gitter vor, sodass kleinskalige Öffnungen vorab gefiltert sind (siehe Abb. 2). Baumkronen sind im Modell daher fast immer geschlossen, wodurch es möglicherweise zu Unsicherheiten durch die Nichtberücksichtigung der Transmission von UV-Strahlung durch kleinskalige Öffnungen kommt.

Aus Sicht der Autoren sollte das von Gao et al. (2002) verwendete Modell für die Baumabschattung benutzt werden, in welchem die Transmission der UV-Strahlung durch Baumkronen anhand der Blattflächendichte parametrisiert ist.

Mehrfachreflexionen

Downs et al. (2008) haben anhand eines topographischen Modells Mehrfachreflexionen mit einem View-Faktor-Ansatz modelliert und konnten in der Nähe von Wänden einen signifikanten Einfluss auf die UV-Bestrahlungsstärke zeigen.

Eine Methodik zur Modellierung von Mehrfachreflexionen ist bereits in PALM integriert (siehe Krč et al., 2021), welche von der physikalischen Eignung aus Sicht der Autoren ähnlich der von Downs et al. (2008) vorgestellten ist.

Anforderungen an Rechnerressourcen

Mit dem Ziel, für jeden auf dem numerischen Gitter definierten horizontalen Oberflächenpunkt die erythemgewichtete Bestrahlungsstärke abzuschätzen, wird im Folgenden eine Abschätzung der benötigten Rechenoperationen und des Speichers vorgenommen. Dabei wird angenommen, dass die erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke an jedem horizontalen Oberflächengitterpunkt berechnet werden soll, wobei n_x und n_y die Anzahl der Oberflächengitterpunkte des Simulationsgebietes in x - und y -Richtung angeben. Zudem wird angenommen, dass die ankommende UV-Bestrahlungsstärke im UV-Bereich, abgeleitet aus einem externen Strahlungstransfermodell, spektral aufgelöst in n_λ Wellenlängenintervalle zur Verfügung steht.

Im integralen Ansatz muss der SVF für jedes Wellenlängenintervall mit der ankommenden diffusen und direkten UV-Bestrahlungsstärke multipliziert werden, d.h. es sind $2 \times n_\lambda \times n_x \times n_y$ Rechenoperationen für jeden Ausgabezeitpunkt notwendig. Im raumwinkelabhängigen Ansatz muss der SVF für jedes Wellenlängenintervall mit der ankommenden diffusen und direkten spektralen Bestrahlungsstärke aus jedem Raumwinkel multipliziert werden, wobei n_ψ und n_ϕ die Anzahl der betrachteten diskreten Raumwinkel bezeichnet. Die Anzahl der Rechenoperationen pro Ausgabezeitpunkt ergibt sich dann zu $2 \times n_\psi \times n_\phi \times n_\lambda \times n_x \times n_y$. Verglichen mit dem Rechenaufwand des dreidimensionalen Strömungsmodells zur Lösung der Bilanzgleichungen für Impuls, Wärme und weiterer prognostischer Größen, ist der abgeschätzte Rechenaufwand pro Berechnungsschritt gering.

Der Speicherbedarf ist für die integrale Methode vergleichsweise gering, für jeden horizontalen Oberflächengitterpunkt muss jeweils ein Wert des SVF pro horizontalem Gitterpunkt (GP) im Fortran Datentyp REAL (8 Byte) abgespeichert werden. Für eine typische Modellgebietsgröße $n_x = 400$ und $n_y = 400$ Gitterpunkten entspricht dies einem zusätzlichen Speicherbedarf von $\approx 1,3$ MB, um den SVF für das gesamte horizontale Simulationsgebiet zu speichern.

Für den raumwinkelabhängigen Ansatz werden pro horizontalem Gitterpunkt maximal $n_\psi \times n_\phi$ Werte benötigt, um die Abschattungsinformationen zu speichern. Die Anzahl der abgeschatteten Raumwinkel ist allerdings deutlich kleiner als $n_\psi \times n_\phi$. Bei einer Standarddiskretisierung des Himmels von $n_\psi = 80$ und $n_\phi = 80$ und der Annahme, dass im Mittel etwa 10% des Himmels verschattet sind, ergibt sich ein Speicherbedarf von ≈ 800 MB für eine typische Modellgebietsgröße. Auf einem gängigen Notebook mit 16 Rechenkernen und etwa 16 GB Arbeitsspeicher ist dies realisierbar.

Tabelle 4 fasst die technischen Aspekte der beiden grundlegenden Ansätze zur Berücksichtigung der Abschattung nochmals zusammen.

Tabelle 4: Allgemeine Übersicht zu den technischen Aspekten der in Frage kommenden Modellierungsansätze. n_ψ und n_ϕ bezeichnen die Anzahl der betrachteten diskreten Raumwinkel in Azimut und Zenit, n_λ die Anzahl der betrachteten diskreten Wellenlängenintervalle im UV-Spektrum, sowie n_x und n_y die Anzahl der horizontalen Gitterpunkte in x- und y-Richtung. Die Genauigkeit der jeweiligen Methodiken kann an dieser Stelle nicht quantitativ abgeschätzt werden und hängt noch von weiteren Faktoren ab, z.B. die Güte der Eingangsdaten.

| Ansatz | Rechenaufwand | Speicher | Genauigkeit | Reflexionen | transparente Strukturen |
|----------------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------|-------------------------|
| SVF - integral betrachtet | gering $O(n_\lambda \times n_x \times n_y)$ | gering (8 Byte / GP) | hoch (bei isotroper Verteilung) | ja | ja (über SVF) |
| SVF - raumwinkelabhängig | moderat bis hoch $O(n_\psi \times n_\phi \times n_\lambda \times n_x \times n_y)$ | moderat $O(n_\psi \times n_\phi)$ | hoch (wenn Strahldichte realistisch) | ja | ja |

Technische Aspekte bei der Berücksichtigung von Sonnenschutzvorrichtungen und dem Effekt von Sonnenflecken

Sonnenschutzvorrichtungen wie z.B. Markisen oder Sonnensegel, oder auch Sichtschutzwände, sind in der Regel relativ schmale Elemente von nur wenigen Millimetern bis Zentimetern Dicke. Um diese Strukturen durch das kartesische Gitter auflösen zu können, wären sehr kleine Gitterweiten notwendig, was aus Gründen der verfügbaren Rechenressourcen nicht praktikabel ist (die größten momentan durchgeführten Simulationen mit PALM im städtischen Bereich verwenden Gitterweiten in der Größenordnung von 1m). Momentan können daher Sonnenschutzvorrichtungen nicht adäquat berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit, Abschattungen durch Sonnenschutzvorrichtungen dennoch realisieren zu können, ist, diese Elemente künstlich so zu erweitern, dass diese eine Dicke von 1-mal der vertikalen Gitterweite aufweisen (siehe Abb. 1 in Kap. 2), wodurch eine Berücksichtigung bei der Modellierung der UV-Strahlung, im Strömungslöser, beim Strahlungstransfer sowie der Biometeorologie möglich ist. Die künstliche Erweiterung kann bereits während der Präprozessierung der Eingangsdaten erfolgen, sodass kein zusätzlicher Mehraufwand bei der Implementierung entstehen würde. Ein Nachteil dieser Darstellung ist allerdings, dass die Höhe der Markisenunterseite nur auf ein Vielfaches der vertikalen Gitterweite genau repräsentiert werden kann. Diese Approximation führt jedoch wiederum zu Ungenauigkeiten in den lokalen Werten des SVF, sodass die einfallende diffuse UV-Strahlung unter Umständen nicht genau abgebildet werden kann.

Vegetation

Aufgrund des relativ hohen Absorptionskoeffizienten von Blättern im UV-Spektrum (siehe Kap. 3.1), kann hinsichtlich der Abschattung ein Baum ähnlich behandelt werden wie ein Gebäude. Dies bedeutet, dass ein Großteil der UV-Strahlung vom Blattvolumen absorbiert wird, sobald der Strahl in eine Gitterbox mit einem Wert der Blattflächendichte ungleich 0 eindringt. Der verbleibende Anteil wird entsprechend der Weglänge durch das Volumen transmittiert, gemäß der von Gao et al. (2002) entwickelten Parametrisierung. Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, werden Informationen über die Blattflächendichte in PALM nur diskret pro Gitterbox abgespeichert. Räumliche Unterschiede in der Blattflächendichte kleiner als die Gitterweite werden dadurch gefiltert und können von PALM nicht berücksichtigt werden.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass aus physikalischer Sicht die Verwendung des raumwinkelabhängigen Ansatzes eine höhere Genauigkeit verspricht, da dadurch die Anisotropie der diffusen UV-Strahlung berücksichtigt wird und eine richtungsabhängige Abschattung erfolgen kann. Die Anzahl der benötigten Rechenoperationen ist im raumwinkelabhängigen Ansatz vergleichbar mit denen des PALM-RTM's und somit auf einem handelsüblichen Notebook durchführbar. Es wird empfohlen, zwei Komplexitätsstufen zu implementieren. Die erste Komplexitätsstufe umfasst die Berechnung der erythemwirksamen UV-Strahlung basierend auf vereinfachten, richtungsunabhängigen Abschattungsinformationen, d.h. basierend auf dem integralen SVF-Ansatz. Dieser vereinfachte Ansatz dient dabei als Rückfalllösung im Falle, dass die lokalen Rechnerressourcen nicht ausreichen sollten. Die zweite Komplexitätsstufe verwendet genauere richtungsabhängige Abschattungsinformationen, d.h. basierend auf dem raumwinkelabhängigen SVF-Ansatz. Zudem ermöglicht die Implementierung beider Ansätze einen späteren Vergleich hinsichtlich qualitativer und quantitativer Unterschiede während der Evaluierungsphase, um mögliche Unsicherheiten quantifizieren zu können.

3.2.3 Vorgeschlagene Implementierung im PALM-Modellsystem zur Ableitung der UV-Bestrahlungsstärke

Im Folgenden wird eine allgemeine Implementierung der Modellierungsansätze in das PALM-Modellsystem vorgeschlagen:

1. Einlesen der am Oberrand ankommenden UV-Strahlung, bereitgestellt aus einem externen Strahlungsmodell. Diese wird entweder als spektrale UV-Bestrahlungsstärke oder als spektrale Strahldichte (Bestrahlungsstärke pro Raumwinkelement) bereitgestellt. Die externe Strahlung wird präprozessiert und PALM über eine NetCDF-Datei zur Verfügung gestellt. Das dazu notwendige Fortran Programm zur Präprozessierung wird ebenfalls in das PALM-Modellsystem integriert.
2. Erweiterung der Materialparameterlisten für natürliche und urbane Oberflächen, um für das UV-Spektrum repräsentative Werte der Albedo.
3. Berechnung der lokalen UV-Bestrahlungsstärke an jedem horizontalen Gitterpunkt im Simulationsgebiet mittels der eingelesenen externen UV-Bestrahlungsstärke unter Berücksichtigung der Abschattung durch Gebäude und Bäume. Abschattungsinformationen werden dabei entweder richtungsabhängig oder -unabhängig betrachtet. Gebäude und Bäume werden bei der UV-Abschattung äquivalent behandelt, d.h. der SVF wird entsprechend dem Vorhandensein von Gebäuden oder eines Gittervolumens mit einer Blattflächendichte ungleich Null in einer gegebenen Raumrichtung entsprechend reduziert.
4. Implementierung der von Gao et al. (2002) entwickelten Parametrisierung zur Berücksichtigung kleinskaliger Öffnungen in Baumkronen zur Berücksichtigung der UV-Transmission.
5. Berücksichtigung von schmalen Sonnenschutzvorrichtungen (Markisen, Sonnensegel) durch künstliche Verbreiterung auf 1-mal der vertikalen Gitterweite, sodass diese Elemente explizit durch das numerische Gitter aufgelöst werden. Dies geschieht vorzugsweise bereits während der Präprozessierung der Eingangsdaten. Sonnenschutzvorrichtungen werden dabei als UV-undurchlässig angenommen, was für die meisten Materialien eine gültige Annahme ist (Toomey et al., 1995; Turnbull und Parisi, 2005). An dieser Stelle wird jedoch angemerkt, dass Reflexionen als vollständig diffus angenommen werden. Gerichtete Reflexionen an spiegelnden Glas- oder polierten Metalloberflächen können damit nicht adäquat berücksichtigt werden.

3.3 Entwicklung eines technischen Implementierungskonzepts

3.3.1 Struktur der NetCDF-Eingabedatei

Im folgenden Abschnitt werden die erforderlichen globalen Attribute zur Beschreibung des Datensatzes, sowie die Dimensionen und Variablen zur Speicherung der Daten im NetCDF Format definiert. Die NetCDF-Eingabedatei folgt dem PALM-Eingabestandard und wird in Englisch definiert. Ein Beispiel der NetCDF-Eingabedatei ist in Anhang A gegeben.

Entsprechenden Variablen und Dimensionen werden zusätzliche Attribute zugeordnet. Dazu gehört die physikalische Einheit (*unit*), eine entsprechende Bezeichnung (*long_name*) sowie, falls notwendig, ein Standardwert zur Identifikation von fehlenden Daten (*_FillValue*). Je nach Verfügbarkeit und Detailgrad der Eingangsdaten (Bestrahlungsstärke oder Strahldichte), können entsprechende Variablen **_irradiance* sowie *uv_radiance* vorgegeben werden. Dabei hängen die Eingangsvariablen für die Bestrahlungsstärke nur vom Sonnenstand sowie der Wellenlänge ab, die der Strahldichte zusätzlich noch von dem Zenit- und Azimutwinkel.

3.3.2 PALM-Ausgabedatei

Die Ausgabe der modellierten erythemwirksamen UV-Bestrahlungsstärke erfolgt gemäß des PALM-Ausgabestandards in eine NetCDF-Datei. Dafür vorgesehen ist die Standard 2D Ausgabe. Es werden Ausgaben der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke mit dem raumwinkelunabhängigen Ansatz (*uv_ewir1*), dem raumwinkelabhängigen Ansatz (*uv_ewir2*) sowie UV-Bestrahlungsstärken mit dem raumwinkelunabhängigen Ansatz (*uv_ir1*) und dem raumwinkelabhängigen Ansatz (*uv_ir2*) definiert.

3.3.3 Entwicklung eines Implementierungskonzepts in PALM für ein UV-Strahlungsmodell

Um die Anforderungen verschiedener Anwendertypen zu erfüllen, wurden 2 Modi implementiert.

Modus 1: Der erste Modus zielt insbesondere auf Anwender ab, welche ausschließlich an der UV-Strahlung interessiert sind. Eine Zeitintegration des 3D-Strömungsmodells ist in diesem Fall nicht vorgesehen, kann aber erfolgen. Das urbane UV-Strahlungsmodell vorab der 3D Strömungssimulation aufgerufen und der zeitliche Ablauf des Sonnenstandes wird unabhängig vom 3D-Strömungsmodell emuliert. Diese Vorabintegration wird als „Spinup“ bezeichnet. Das UV-Strahlungsmodell wird zu den vordefinierten Ausgabezeitpunkten aufgerufen und die modellierten Daten werden in eine dafür konzipierte NetCDF-Datei geschrieben. Im Anschluss geht es je nach Wunsch entweder mit der Zeitintegration des 3D-Strömungsmodells weiter oder PALM wird beendet. Dieser Modus ist verglichen mit einer 3D-Strömungssimulation wenig rechenintensiv und Ergebnisse sind schnell verfügbar.

Modus 2: Der zweite Modus zielt auf Anwender ab, die an einer umfassenderen Analyse des Stadtklimas interessiert sind. Das UV-Modul wird zu bestimmten Zeitpunkten (Ausgabezeitpunkte) während der Zeitintegration des 3D-Strömungsmodells aufgerufen und die modellierten Daten werden in eine NetCDF-Datei geschrieben.

Notwendige Arbeiten

Das geplante UV-Modell wird entsprechend des PALM-Programmierstandards modular aufgebaut und einzelne Routinen des UV-Modells werden aus PALM's zentralem Steuerungsmodul *module_interface.f90* aufgerufen. Das UV-Modul besteht dabei aus einer Reihe standardisierter Routinen, welche verschiedene Aufgaben erfüllen: Ein lesen von Steuerungsparametern und Daten, Allokation von Speicher und Initialisierung des Modells, Berechnung der Ausgabegrößen während der Simulation, Datenausgabe sowie ein Interface für Fortsetzungsläufe. Das UV-Modul wird dabei äquivalent zu anderen Modulen aufgebaut:

- Dateneingabe: Einleseroutinen werden in `netcdf_data_input_mod.f90` implementiert. Diese Routinen werden im UV-Modul geladen und zum standardisierten Einlesen des definierten UV-Szenario benutzt.
- Berechnung der Sky-View Faktoren während der Initialisierung mittels der bereits vorhandenen PALM-Routine `raytrace_2d`.
- Modifikation der PALM-Routine `raytrace_2d`, um Informationen über Pflanzen- oder Gebäudeverschattung zu erhalten.
- Modifikation der PALM-Routine `radiation_interactions.f90` (diese beinhaltet das urbane Strahlungstransfermodell von PALM) um Mehrfachreflexionen im UV-Spektralbereich unabhängig von denen im Breitbandspektrum betrachten zu können.
- Implementierung der Pflanzenparametrisierung nach Gao et al. (2002), bei welcher der transmittierte Anteil der Strahlung in Abhängigkeit von der Blattflächendichte sowie der Wegstrecke durch die Baumkrone bestimmt wird. Dazu wird die Blattflächendichte entlang eines Raumwinkels integriert und in der definierten Datenstruktur abgespeichert.
- Berechnung des Sonnenstandes, um Abschattungen der direkten UV-Strahlung berücksichtigen zu können.
- Rotation der Eingangsdaten auf den aktuellen Azimutwinkel der Sonne. Dies ist notwendig, da `uvspec` einen standardisierten Azimutwinkel über einer homogenen Oberfläche benutzt. Über einer heterogenen Oberfläche ist dieser Ansatz jedoch nicht mehr gültig und die `uvspec`-Daten müssen entsprechend des Sonnenstandes in PALM gedreht werden.
- Berechnung der lokalen UV-Bestrahlungsstärke mittels der abgespeicherten Sky-View Faktoren und Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen.
- Integration und Ausgabe der berechneten Zielgrößen in PALM's Ausgabestruktur.

3.4 Entwicklung eines Präprozessors zur Erstellung atmosphärischer UV-Szenarien

Die Modellierung der UV-Strahlung in urbanen Umgebungen mit PALM basiert auf der Verfügbarkeit von UV-Daten am Oberrand der Gebäude als Randbedingung. Die entsprechenden `uvspec`-Ausgaben müssen dazu konvertiert werden und in ein von PALM lesbares Format gebracht werden. Dazu wurde der Präprozessor `uv2palm` entwickelt, welcher als Paket in das PALM-Modellsystem inklusive Installationsautomatik integriert wird. Der Präprozessor ist in Python geschrieben. Im Weiteren wird für alle weiteren Arbeiten die `uvspec`-Version 2.0.4-MYSTIC benutzt. `uvspec` ist ein umfangreiches Strahlungstransfermodell mit einer Vielzahl an Möglichkeiten zur Konfiguration physikalischer Randbedingungen und numerischer Verfahren für unterschiedliche Anwendungen (Mayer et al., 2022). Die Grundidee bei der Entwicklung von `uv2palm` ist, PALM-Anwender ohne vertiefte Kenntnisse in der Strahlungsmodellierung in die Lage zu versetzen, eigene UV-Datensätze in überschaubarer Zeit selber zu erzeugen. In diesem Fall ist es sinnvoll, dass der PALM-Anwender möglichst keinen direkten Kontakt mit `uvspec` und dessen Konfigurationsdatei hat. `uv2palm` soll dabei folgende Aufgaben erfüllen:

- Erzeugen eines physikalischen und numerisch sinnvollen `uvspec`-Setups sowie Bereitstellung der `uvspec`-Eingabedatei. Dazu werden eine Reihe an fest vorgegebenen `uvspec` Einstellungen (z.B. Ausgabeformat, numerische Strahlungstransferlöser) definiert.

Ausgewählte Parameter wie z.B. Ozonschichtdicke, Aerosolgehalt, Seehöhe, Druck, Anzahl der Sonnenzenitwinkel, Anzahl der betrachteten Raumwinkel für die Strahldichte, etc., können jedoch mittels einer Konfigurationsdatei vom Anwender modifiziert werden. Eine Dokumentation der vom Nutzer definierbaren Parameter und eine Erläuterung dazu wird in der PALM-Dokumentation bereitgestellt.

- Automatisierter Aufruf von `uvspec` innerhalb von `uv2palm`.
- Einlesen der `uvspec`-Ausgabedaten.
- Ausgabe der prozessierten Daten in eine NetCDF-Datei, gemäß des in Kap. 3.3.1 definierten Standards.
- Steuerung des Präprozessors: `uv2palm` wird mittels einer Konfigurationsdatei im `.yaml` Format gesteuert, welches das in PALM verwendete Standardformat zur Konfiguration von in Python geschriebenen Modellpaketen ist. Ein Beispiel einer `uv2palm` Konfigurationsdatei ist in Anhang D bereitgestellt.
- Definition eines Ausgabeformats von `uvspec`: Abhängig von der zu untersuchenden Zielgröße sowie des gewählten Strahlungstransferlösers unterscheiden sich die Ausgabeformate von `uvspec`. Zudem können die Formatierung und Reihenfolge der `uvspec`-Ausgabe noch zusätzlich vom Nutzer konfiguriert werden. Für die Entwicklung eines Präprozessors zur Konvertierung von `uvspec`-Ausgabedaten ist ein variables Ausgabeformat jedoch nachteilig, da alle möglichen Fälle berücksichtigt werden müssten, was auf lange Sicht vermehrt zu Anpassungen und Fehlermeldungen führen könnte. Aus diesem Grund wird für die Kopplung zwischen PALM und `uvspec` ein Ausgabeformat für die `uvspec`-Daten definiert. Die `uvspec`-Ausgaben umfassen dabei spektrale Werte der direkten, diffusen und der globalen Bestrahlungsstärke sowie die spektrale Strahldichte. Weicht das `uvspec`-Ausgabeformat von diesem Standard ab, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Das Ausgabeformat in der `uvspec`-Konfigurationsdatei muss entsprechend wie folgt gesetzt werden: `output_user lambda edir edn eglo uu`
- `uvspec`-Ausgabedaten: Um in urbanen Gebieten möglichst genaue Ergebnisse für die UV Belastung zu erhalten, ist eine möglichst hohe diskrete Auflösung der Raumwinkel für die Strahldichte sinnvoll. Im Rahmen früherer Studien, z.B. Schrempf et al. (2017), wurde die Genauigkeit der UV-Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit von der diskreten Raumwinkelauflösung untersucht. Es hatte sich herausgestellt, dass in bebauten Gebieten die Raumwinkel entlang des Zenits in mindestens 1°-Schritten und entlang des Azimuts in mindestens 5°-Schritten aufgelöst werden sollten (Schrempf, 2022b). Für einen vollständigen UV-Datensatz, welcher alle spektralen Strahldichten für alle möglichen Sonnenzenitwinkel von 0-90° in 1°-Schritten umfasst, ergibt sich somit ein Speicherbedarf von 1,3 GByte. Diese Daten werden in eine externe Datei geschrieben und während der PALM-Simulation abhängig vom Sonnenstand eingelesen. (Anmerkung: Die Größe der externen Datei hat keinen Einfluss auf den benötigten Arbeitsspeicher der jeweiligen Modellierungsansätze in Kap. 3.2.2.)
- Optimierung: Die Modellierung der UV-Strahlung in urbanen Umgebungen mit PALM basiert auf der Verfügbarkeit von UV-Daten am Oberrand der Gebäude. Dazu wird `uvspec` für verschiedene vorab definierte Sonnenzenitwinkel mehrfach ausgeführt. Bei einer hohen Auflösung an diskreten Raumwinkeln (in Azimut und Zenit) kann dabei für eine `uvspec`-Simulation für einen einzelnen Sonnenzenitwinkel zwischen 20-60 Minuten benötigt werden. Bei einer hohen Anzahl von vorab berechneten Sonnenzenitwinkeln kann somit die benötigte Zeit zur Erstellung des gesamten UV-Datensatzes mehrere Stunden oder Tage dauern. Um eine schnellere Erzeugung von externen UV-Datensätzen zu ermöglichen, wurde `uv2palm` dahingehend optimiert, dass mehrere `uvspec`-

Simulationen gleichzeitig ausgeführt werden können. Da uvspec nicht parallelisiert ist, kann jeweils eine uvspec-Simulation pro verfügbaren Prozessorkern ausgeführt werden, ohne dass es zu Laufzeitverlängerungen der uvspec-Ausführung kommt. Dazu ermittelt uv2palm automatisch die Anzahl der verfügbaren Prozessorkerne auf dem jeweiligen PC oder Notebook und startet entsprechend mehrere uvspec-Simulationen gleichzeitig. Damit konnte die benötigte Zeit zur Erstellung eines hochaufgelösten UV-Datensatzes auf etwa eine Stunde bei acht verfügbaren Prozessorkernen auf einem handelsüblichen Notebook reduziert werden.

3.5 Implementierung des UV-Strahlungsmodells in PALM

Die Implementierung des UV-Modells umfasste verschiedene Arbeiten, die im Folgenden erläutert werden. Zusätzlich dazu werden die entsprechenden PALM-Code Dateien aufgelistet, welche dafür modifiziert worden. Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

1. Es wurden Dateiverbindungsanweisungen für die zusätzliche NetCDF-Eingabedatei für das externe UV-Szenario hinzugefügt. (.palm.iofiles)
2. Es wurde ein neues Fortran Modul `uv_radiation_model_mod.f90` in PALM erstellt, welches das UV-Modell beinhaltet. Das neue Modul folgt der für PALM vereinbarten Modulstruktur. Das neue UV-Modul umfasst dazu Routinen zum Einlesen von Daten und Konfigurationsparametern, zur Datenausgabe, Routinen zur Durchführung von PALM-Restart Simulationen, Routinen zur Initialisierung und Berechnung der entsprechenden Werte sowie weitere Routinen zur notwendigen Prüfung korrekter Modellkonfigurationen. Die jeweiligen Aufrufe der Routinen wurden entsprechend der PALM-Modulstruktur eingefügt.
3. Es wurden neue PALM-Routinen zum Einlesen der externen UV-Strahlungsdaten (siehe Kap. 3.3) implementiert. Dazu werden zuerst alle NetCDF-Dimensionen und Attribute eingelesen und auf Konsistenz geprüft. Zudem wird der NetCDF-Datensatz initial auf Verfügbarkeit aller notwendigen Variablen geprüft.
4. (`netcdf_data_input_mod.f90`, `uv_radiation_model_mod.f90`)
5. Im UV-Modul wurden neue Abfragen implementiert, um Modellkonfigurationsparameter auf Konsistenz zu prüfen. Es wird beispielsweise überprüft, ob die Konfiguration des Strahlungstransfermodells die Anforderungen des UV-Modells erfüllt, z.B. ob die diskrete Auflösung des Strahlungstransfermodells dem des externen UV-Datensatzes entspricht. Ist dies nicht der Fall, wird eine entsprechende Fehlermeldung ausgegeben und die PALM-Simulation wird beendet. Weiterhin werden Parameter zur Modellkonfiguration auf erlaubte Eingaben geprüft. Die implementierten Fehlermeldungen wurden in die entsprechende PALM-Dokumentation eingefügt. (`uv_radiation_model_mod.f90`)
6. Es wurden alle für das UV-Modell notwendigen internen Variablen und Datenstrukturen erstellt und initialisiert. Weiterhin wurde die spektrale Erythemwichtungsfunktion nach ISO/CIE:17166 (2019) vorab berechnet und für Ausgabezwecke gespeichert. Die Initialisierung des UV-Modells umfasst dabei zwei Stadien. Zum einen die Initialisierung moduleigener Variablen und Datenstrukturen, die unabhängig von der Konfiguration des PALM-internen Strahlungstransfermodells sind. Zum anderen die Initialisierung von Daten, die direkt vom Strahlungstransfermodell und dem darin implementierten 'Ray tracing' abhängen. (`radiation_model_mod.f90`, `uv_radiation_model_mod.f90`)
7. Die Berechnung der erythemgewichteten Strahlung entsprechend der in der vom Nutzer definierten Methode in der Standard PALM-Konfigurationsdatei (`_p3d`) in der neu hinzugefügten Parameterliste `uv_radiation_parameters`. Es wurden, wie in Kap. 3.3 definiert, zwei verschiedene Methoden implementiert:

Methode 1: Die Berechnung der lokalen erythemgewichteten Bestrahlungsstärke aus der extern vorgegebenen spektralen UV-Bestrahlungsstärke unter Berücksichtigung des SVF (raumwinkelunabhängiger Ansatz, LOD1). Dazu wird der am Oberrand der Gebäude ankommende diffuse Anteil der spektralen UV-Bestrahlungsstärke mit dem SVF multipliziert. Dieser ist unabhängig vom Raumwinkel. Der SVF wird für den entsprechenden x,y -Gitterpunkt aus Daten des Strahlungstransfermodells bestimmt und berücksichtigt bereits die Teilabschattung durch transparente Verschattungen durch Pflanzen. Das Strahlungstransfermodell wurde dahingehend erweitert, dass diese Informationen während der Initialisierungsphase des Modells explizit berechnet werden und in einer eigens dafür entwickelten PALM-internen Datenstruktur abgelegt werden (für den PALM-Nutzer nicht sichtbar). Für den direkten Anteil der UV-Strahlung wird zunächst der aktuelle Stand der Sonne bestimmt. Ist an einem x,y -Gitterpunkt der entsprechende Raumwinkel, in dem sich die Sonne zum gegebenen Zeitpunkt befindet, durch transparente oder nicht-transparente Objekte verschattet, so wird der direkte Anteil der UV Bestrahlungsstärke nicht bzw. nur der transmittierte Anteil für die Integration berücksichtigt.

Methode 2: Die Berechnung der lokalen erythemgewichteten Bestrahlungsstärke aus der extern vorgegebenen spektralen UV-Strahldichte unter Berücksichtigung der lokalen raumwinkelabhängigen Verschattung (LOD2). Dazu wurde implementiert, dass während der Initialisierung für jeden x,y -Gitterpunkt die entsprechenden verschatteten Raumwinkel (Azimut- und Zenitwinkel) und entsprechenden Werte der Transmission während des 'Raytracings' aggregiert und auf einer eigens dafür implementierten Datenstruktur gespeichert werden (für den PALM-Nutzer nicht sichtbar). Bei der Integration der Strahldichte über den Azimut und Zenit werden Werte bei verschatteten Raumwinkeln nicht bzw. nur der entsprechende transmittierte Anteil berücksichtigt. Methode 2 unterscheidet sich von Methode 1 dahingehend, dass die gesamte UV-Strahlung raumwinkelabhängig abgeschattet wird, wohingegen bei Methode 1 nur der direkte Anteil raumwinkelabhängig behandelt wird.

Beide Methoden, 1 und 2, können in einer Simulation gleichzeitig verwendet werden. Dazu wurde die PALM-interne Steuerung so modifiziert, dass zu jedem Datenausgabezeitpunkt das UV-Modell aufgerufen und die entsprechenden Größen berechnet werden. Um die UV-Bestrahlungsstärke zu berechnen, wurde zunächst eine Routine zur Berechnung des Sonnenstandes auf Basis der aktuellen Modellzeit (in UTC) implementiert, welche ebenfalls die dazugehörigen Sonnenazimut- und Sonnenzenitwinkel bestimmt. Basierend darauf wurde umgesetzt, dass der dazugehörige UV-Datensatz für den spezifischen Sonnenzenitwinkel aus der vorab erstellten NetCDF-Datei gelesen wird. Liegt der aktuelle Sonnenzenitwinkel zwischen zwei verfügbaren Sonnenzenitwinkeln, wurde implementiert, dass die UV-Bestrahlungsstärke oder Strahldichte zwischen diesen beiden Winkeln linear interpoliert wird. Weiterhin wurde realisiert, dass bei Methode 2 noch eine Drehung der Strahldichtedaten auf den aktuellen Azimutwinkel der Sonne stattfindet, um die anisotrope diffuse UV-Strahlung korrekt richtungsabhängig abzuschatten (uvspec berechnet die Strahldichte unter der Annahme, dass die Sonne im Süden steht). (radiation_model_mod.f90, uv_radiation_model_mod.f90)

8. Mehrfachreflexionen an Oberflächen wurden implementiert. Dazu wurde zunächst die Parameterliste für typische Werte der oberflächenspezifischen Albedo erweitert. Diese umfasste bislang oberflächenspezifische Werte der Breitbandalbedo sowie der Albedo für den kurzwelligen und langwelligen Bereich. Neu hinzugefügt wurden Werte der Oberflächenalbedo für den UV-Spektralbereich, abgeleitet aus Blumthaler und Ambach (1988); Sliney (1986); Turner und Parisi (2018a). Weiterhin wurde das Strahlungstransfermodell dahingehend erweitert, dass Mehrfachreflexionen im UV-Bereich zwischen „sich sehenden“ Oberflächen stattfinden. An dieser Stelle wird betont, dass Reflexionen als ausschließlich diffus angenommen werden. Spiegelnde Reflexionen

direkter Sonneneinstrahlung, wie sie z.B. an einigen Glasoberflächen oder metallischen Oberflächen stattfinden, sind nicht implementiert, sodass „Hotspots“ in der Nähe solcher Oberflächen unterschätzt werden können. (uv_radiation_model_mod.f90)

9. Um den Einfluss transparent verschattender Pflanzen auf die UV-Bestrahlungsstärke zu modellieren, wurde die von Gao et al. (2002) vorgeschlagene Parametrisierung basierend auf der Blattflächendichte implementiert. Diese beruht auf dem Lambert-Beerschen Gesetz und dient dazu, die Transmission abhängig von der raumwinkelabhängigen Weglänge eines Strahls durch den Kronenraum abzuschätzen. Eine statistische Modellierung von Sonnenflecken in Abhängigkeit von der Blattflächendichte ist darin bereits enthalten. Gao et al. (2002) geben leider keine konkreten Werte des Extinktionskoeffizienten an. Der Wert des Extinktionskoeffizienten wurden daher auf Basis von Shulski et al. (2004) auf $\alpha = 0,6$ festgelegt. (radiation_model_mod.f90)
10. Es wurde eine 2D-Ausgabe der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke in eine NetCDF-Datei implementiert. Die hinzugefügten Ausgabegrößen wurden entsprechend der PALM-Dokumentation hinterlegt.
11. (netcdf_interface_mod.f90, uv_radiation_model_mod.f90)
12. Eine Dokumentation der Modelleingabeparameter wurde in Form einer .yml Datei erstellt und entsprechend der PALM Dokumentationsstruktur eingepflegt. Der entwickelte Code und die zugrunde liegenden Annahmen bei der programmiertechnischen Umsetzung wurden entsprechend des PALM-Programmierstandards umfangreich dokumentiert.
13. Der entwickelte Code wurde bereits über die PALM-Entwicklungsplattform⁸ in Form eines Entwicklungszweiges öffentlich zugänglich gemacht und wird mit dem Release 24.04 in den offiziellen PALM-Code integriert.

Alle durchgeführten programmtechnischen Entwicklungsarbeiten sind auf <https://gitlab.palm-model.org/> im PALM-Entwicklungszweig *549-implementation-of-an-urban-uv-radiation-model* einsehbar. Der PALM-Anwender hat in der Regel keinerlei Kontakt zu den Sourcecode Dateien und sieht nur die im nächsten Abschnitt dokumentierten Ein- und Ausgabedateien.

3.5.1 Dokumentation der Ein- und Ausgabegrößen

Das UV-Strahlungsmodell kann durch Hinzufügen der Fortran-Konfigurationsliste `uv_radiation_parameters` in die vorhandene Konfigurationsdatei (`_p3d*`) eingeschaltet werden. Zusätzlich muss zwingend das Strahlungsmodell eingeschaltet sein, welches durch Hinzufügen der Konfigurationsliste `radiation_parameters` zu der `_p3d*`-Datei standardmäßig eingeschaltet wird. Ist das Strahlungsmodell nicht eingeschaltet oder passend konfiguriert worden, wird eine Fehlermeldung ausgegeben und die Simulation wird beendet. Folgendes Beispiel soll die Konfiguration des Modells demonstrieren:

```
&uv_radiation_parameters
  uv_integration_method = 'from_radiance from_irradiance',
  num_reflections = 5,
/

&radiation_parameters
  radiation_scheme = 'rrtmg',
  dt_radiation = 30.0,
  raytrace_discrete_azims = 72,
```

⁸ https://gitlab.palm-model.org

```

raytrace_discrete_elevs = 60,
surface_reflections = .T.,
nrefsteps = 2,
/

&runtime_parameters
data_output = 'uv_ewir1*_xy', 'uv_ewir2*_xy',
'uv_ir1*_xy', 'uv_ir2*_xy',
...
/

```

Das Strahlungstransfermodell diskretisiert dabei den oberen Halbraum durch 72 Azimutwinkel (5° Auflösung) und 60 Zenitwinkel (1.5° Auflösung), spezifiziert durch die Parameter *raytrace_discrete_azims* und *raytrace_discrete_elevs*. Diese Werte müssen mit den durch uv2palm erstellten Dimensionen der Azimut- und Zenitwinkel übereinstimmen, d.h.

raytrace_discrete_azims muss mit dem Wert von $360 / step_size$ (der Variablen *phi* in der uv2palm-Konfigurationsdatei, siehe Anhang D) und *raytrace_discrete_elevs* mit dem Wert von $90 / step_size$ (der Variablen *umu* in der uv2palm Konfigurationsdatei, siehe Anhang D) übereinstimmen. Weitere Parameter in der Konfigurationsliste *radiation_parameters* sind für das UV-Modell nicht relevant.

Im UV-Modell werden durch *num_reflections* = 5 fünf Iterationsschritte für die Mehrfachreflexion an Oberflächen gewählt. Nach Krč et al. (2021) konvergiert die reflektierte Strahlung nach 3–5 Iterationen.

Durch *uv_integration_method* = 'from_radiance from_irradiance' werden beide Methoden (1 und 2) zur Berechnung der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke ausgewählt. Die Datenausgabe der UV-Strahlungsgrößen wird durch Setzen von entsprechenden Zeichenketten im Namelist Parameter *data_output* gesteuert. Folgende Größen werden derzeit ausgegeben:

- 'uv_ewir1*_xy' - erythemgewichtete Bestrahlungsstärke berechnet aus extern vorgegebener Bestrahlungsstärke unter Berücksichtigung einer richtungsunabhängigen Verschattung
- 'uv_ewir2*_xy' - erythemgewichtete Bestrahlungsstärke berechnet aus extern vorgegebener Strahldichte unter Berücksichtigung einer richtungsabhängigen Verschattung
- 'uv_ir1*_xy' - UV-Bestrahlungsstärke berechnet aus extern vorgegebener Bestrahlungsstärke unter Berücksichtigung einer richtungsunabhängigen Verschattung. Integration über den Wellenlängenbereich von 280-400 nm.
- 'uv_ir2*_xy' - UV-Bestrahlungsstärke berechnet aus extern vorgegebener Strahldichte unter Berücksichtigung einer richtungsabhängigen Verschattung. Integration über den Wellenlängenbereich von 280-400 nm.

Eine Dokumentation in den entsprechenden PALM-Dokumentationsdateien ist bereits erfolgt.

3.5.2 Erste Beispielanwendung

Um die grundlegende Funktionsfähigkeit des UV-Modells zu demonstrieren, wurde ein realitätsnahes Setup für den Ernst-Reuter Platz in Berlin simuliert. Dazu wurde ein UV-Datensatz erstellt unter der Annahme einer Ozonschichtdicke von 150 Dobson Units (DU) und einer mittleren Höhe von 50 m über dem Meeresspiegel. Die Simulation bildet die Situation um 11 UTC am 1. Juli 2019 unter der Annahme eines wolkenlosen Himmels ab. Abbildung 3 zeigt das Simulationsgebiet und die dazugehörigen Oberflächen. Das Simulationsgebiet umfasste 512 x 512 Gitterpunkte in x - und y-Richtung bei einer Gitterauflösung von 2 Metern (m).

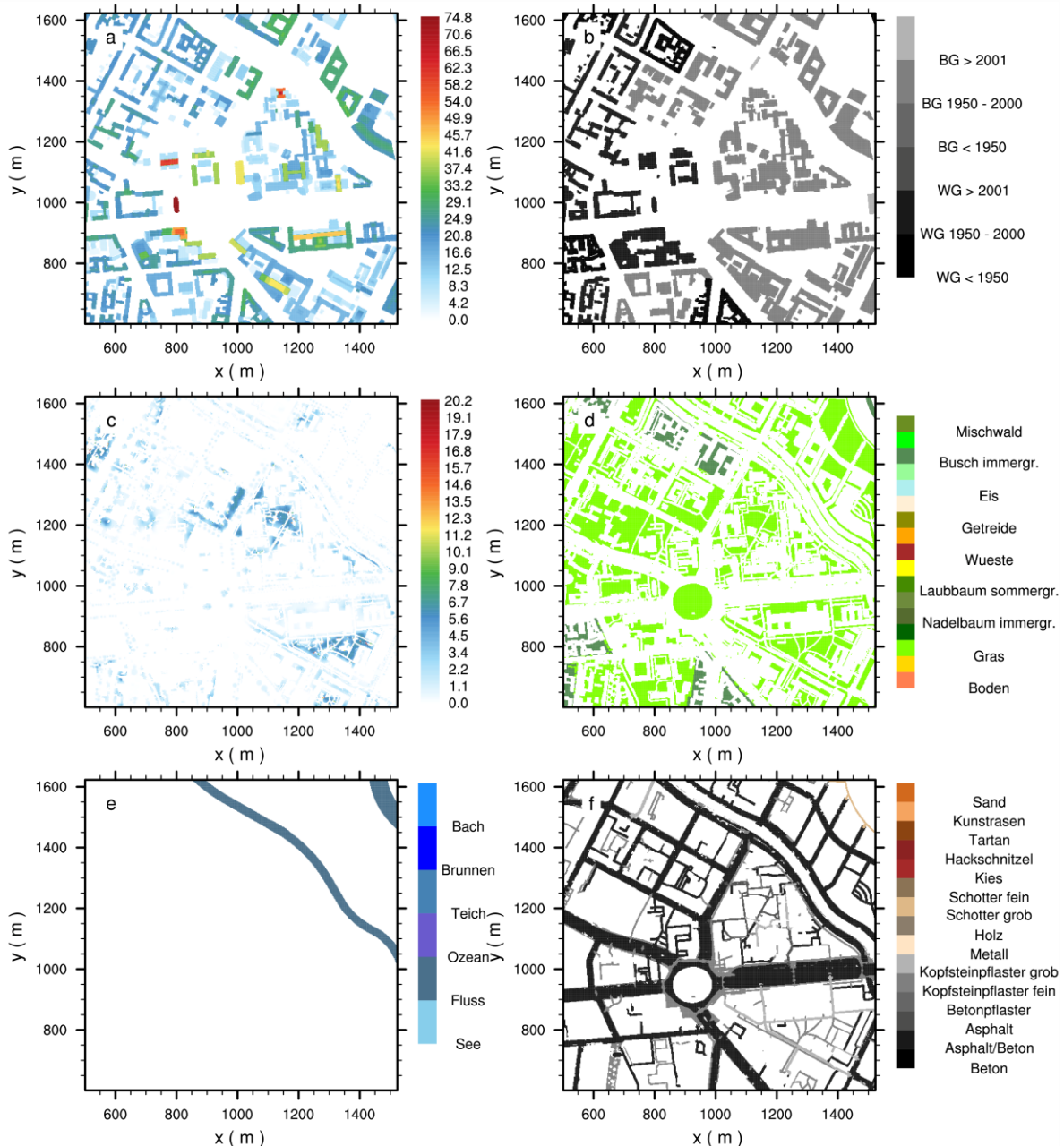


Abbildung 3: Simulationsgebiet um den Ernst-Reuter Platz, Berlin: a) Gebäudehöhe in m, b) Gebäudetyp (Wohngebäude WG, Bürogebäude BG), c) Blattflächenindex (LAI), berechnet durch vertikale Integration über die Blattflächendichte, d) Vegetationstyp, e) Wassertyp, f) Asphalttyp. Pro Gitterzelle ist ausschließlich ein Oberflächentyp erlaubt, d.h. entweder Gebäude, Wasser, Vegetation oder Asphalt. Weiße Flächen bedeuten Füllwerte, an denen die entsprechenden Oberflächentypen nicht definiert sind. Eine Übersicht der einzelnen Gebäude-, Vegetations-, Asphalt- und Wasserparameter ist in Heldens et al. (2020) gegeben.

Abbildung 4 zeigt die simulierte erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke für die raumwinkelrichtungsunabhängige sowie raumwinkelabhängige Berechnungsmethode. Auf Gebäudedächern sowie Freiflächen weist die erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke höhere Werte auf verglichen mit Straßenschluchten oder eng bebauten Gebieten mit Blockrandbebauung. Zudem ist mit beiden Berechnungsmethoden deutlich der Einfluss von Bäumen zu erkennen, z.B. direkt im Kreisverkehr des Ernst-Reuter Platzes oder entlang der Spree. Weiterhin fällt auf, dass mit Methode 1 Gebäudeschatten deutlich klarer ausgeprägt sind verglichen mit Methode 2, was z.B. an dem Schattenwurf nordwestlich des hohen Gebäudes an der Westseite des Ernst Reuter Platzes bei $x = 300$ m, $y = 400$ m zu erkennen ist. Eine Bewertung, welche Methode näher an der Realität liegt, ist an dieser Stelle ohne

weitere Vergleiche mit realen Messdaten jedoch nicht möglich. Eine Evaluierung des implementierten UV-Strahlungsmodells wird in Kap. 3.6 beschrieben.

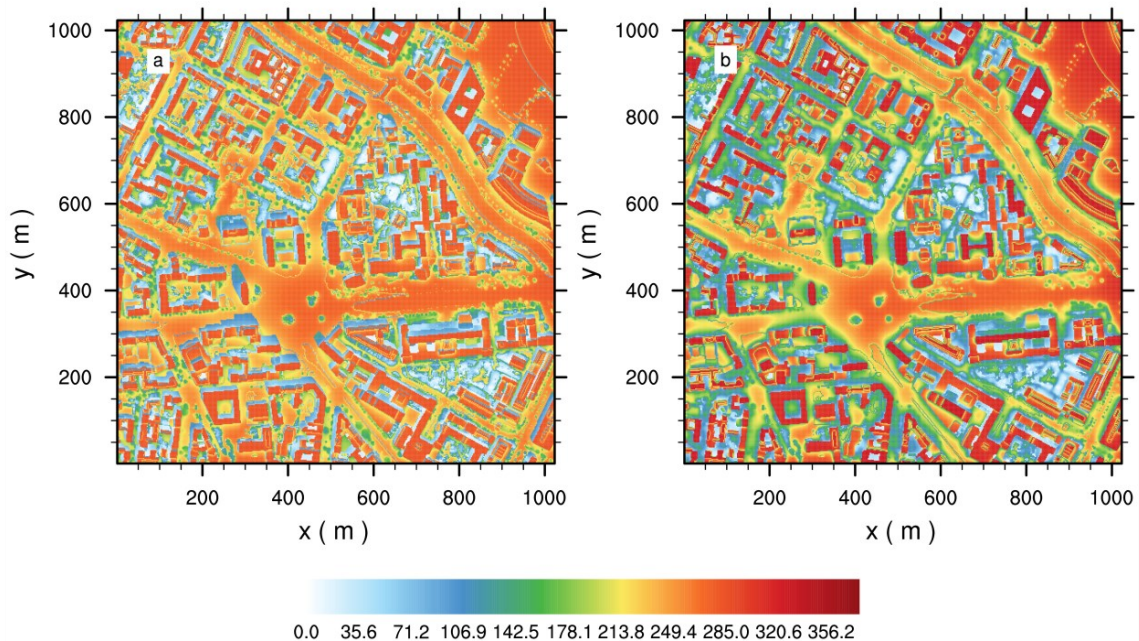


Abbildung 4: Simulierte erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke für ein ausgewähltes UV Szenario mit einer Ozonschichtdicke von 150 DU für den 1. Juli 2019 um 11 UTC für den Ernst-Reuter Platz, Berlin: a) berechnet aus der extern vorgegebenen Bestrahlungsstärke, b) berechnet aus der extern vorgegebenen Strahldichte. Werte sind in mW m⁻² angegeben.

3.6 Evaluierung des Modells

Im Rahmen des Projekts wurde das entwickelte UV-Strahlungsmodell mit Messungen verglichen und evaluiert. Die Messungen wurden vom BfS im Außenbereich eines Kindergartens in Neuherberg durchgeführt. Ziel dieser Evaluierung ist, die allgemeine Funktionalität des Modells zu belegen sowie Unsicherheiten in den Modellergebnissen aufzuzeigen und zu quantifizieren.

3.6.1 Messungen der UV-Bestrahlungsstärke

Zunächst wurde in Zusammenarbeit mit dem BfS ein Messkonzept entwickelt. Das Ziel der Messungen war es, einen Datensatz zu generieren, der die räumliche und zeitliche Variabilität der UV-Bestrahlungsstärke in einem urbanen Bereich abbildet und zur Evaluierung des entwickelten urbanen UV-Strahlungsmodells benutzt werden kann. Dazu wurden vom Auftragnehmer zwei Messstrategien vorgeschlagen, die sich gegenseitig ergänzen:

- i. Um die zeitliche Variabilität der UV-Strahlung in einen von Bäumen und Gebäuden umgebenen Standort zu erfassen, wurde vom Auftragnehmer vorgeschlagen, an drei verschiedenen Standorten Messungen der UV-Bestrahlungsstärke über einen längeren Zeitraum durchzuführen, um die Verlagerung der Verschattung im Tagesverlauf zu erfassen. Basierend auf vorab durchgeführten Simulationen für den gewählten Messstandort wurden dem BfS drei Messstandorte vorgeschlagen. Diese erste Messstrategie wurde basierend auf der Hypothese vorgeschlagen, dass etwaige Diskrepanzen, bedingt durch die Genauigkeit der Eingangsdaten, insbesondere der Gebäude und Bäume sowie der Gitterauflösung, keine so große Rolle spielen. Wenn an dem Messstandort die Abschattung durch umliegende Bäume im Modell versetzt stattfindet, weil z.B. die Kronenform, Baumhöhe oder Blattflächendichte nicht exakt abgebildet wird, kann dennoch anhand des zeitlichen Verlaufs und der Amplitude der Änderung in der UV-

Bestrahlungsstärke eine Aussage zur Modellperformance getroffen werden. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Messpunkten kann mittels dieser Messstrategie die räumliche Heterogenität einer bebauten Umgebung allerdings nicht ausreichend erfasst werden.

- ii. Um die räumliche Heterogenität der UV-Strahlung besser erfassen zu können, wurde vorgeschlagen, zu ausgewählten Zeitpunkten Rastermessungen an verschiedenen Positionen durchzuführen. Diese zeitlich und örtlich diskreten Punktmessungen haben jedoch den Nachteil, dass Ungenauigkeiten bei der Positionierung des virtuellen Sensors im Modell, der Gitterauflösung oder der vorgegebenen Baum- und Gebäudedaten, etc. zu signifikanten Abweichungen zwischen der modellierten und der gemessenen UV-Strahlung führen können. Das kann insbesondere dann problematisch sein, wenn die räumlichen und zeitlichen Änderungen der UV-Bestrahlungsstärke groß sind.

Beschreibung der Messungen

Das BfS hat am 19.05.2023 Messungen der UV-Bestrahlungsstärke im Außenbereich eines Kindergartens in Neuherberg (48.2211°N, 11.5903°O) durchgeführt. Der 19.05.2023 war ein Strahlungstag, charakterisiert durch einen geringen Bedeckungsgrad von 0/8 bis 2/8 durch zeitlich begrenzt auftretende niedrige Cumulus- und Cirrus-Bewölkung (siehe Abb. 5).

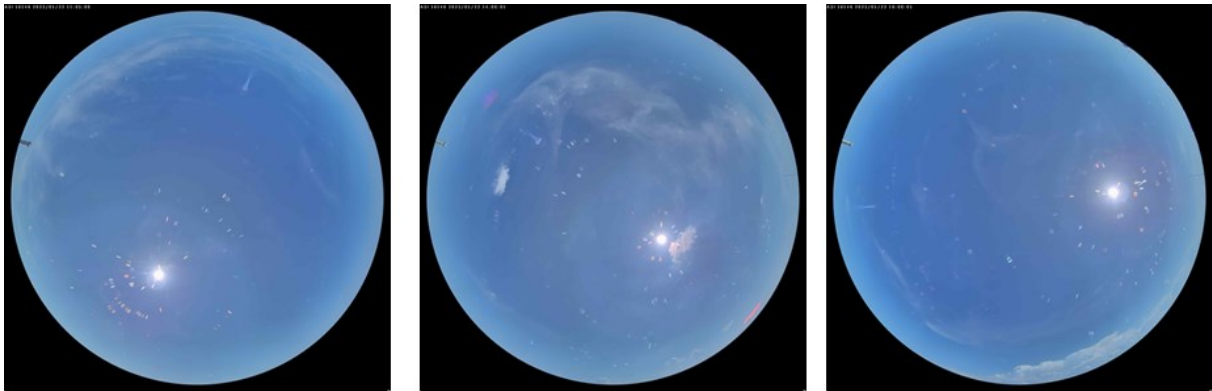


Abbildung 5: Fotos der oberen Halbsphäre am 19.05.2023 aufgenommen zu verschiedenen Zeitpunkten auf dem Dach des BfS-Gebäudes: 09:05 MESZ (links), 12:00 MESZ (mitte) und 15:00 MESZ (rechts).

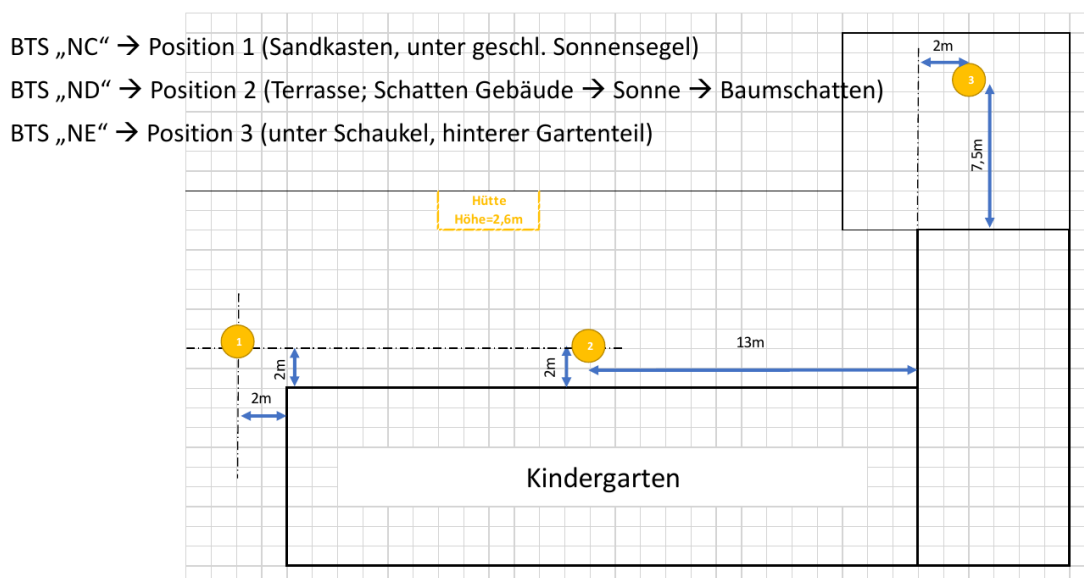


Abbildung 6: Position der Spektralradiometer zur Messung der UV-Bestrahlungsstärke im Tagesverlauf sowie die Skizze des nahegelegenen Kindergartengebäudes. Die Abbildung wurde von Erik Faber, BfS, erstellt.

Die in Abschnitt 3.6.1 vorgeschlagene Messstrategie wurde vom BfS übernommen. Um die zeitliche Variabilität der UV-Strahlung an verschiedenen Standorten zu erfassen (Messstrategie i), wurden drei Spektralradiometer an verschiedenen Positionen im Außenbereich des Kindergartens platziert. Die Messungen begannen um 08:30 Uhr MESZ und endeten um 16:30 MESZ. Während dieses Zeitraums wurden an den drei verschiedenen Positionen (siehe Abb. 6) die spektral aufgelöste sowie integrierte UV-Bestrahlungsstärke ermittelt. Position 1 (NC) befindet sich in einem Sandkasten und wird teilweise durch Bäume verschattet. Zudem wurde im Verlauf des Tages NC mehrfach künstlich mit dem dort installierten Sonnensegel verschattet. Position 2 (ND) befindet sich auf der Terrasse neben einem Gebäude und wird im Tagesverlauf durch Bäume und Gebäude verschattet. Position 3 (NE) befindet sich im hinteren Gartenteil unter einer Schaukel und wird im Tagesverlauf ebenfalls durch mehrere Bäume verschattet. In Abb. 7 sind die Standorte der Spektralradiometer anhand von Fotos dokumentiert. Des Weiteren wurde auf dem Dach des nahegelegenen BfS-Gebäudes eine unverschattete Referenzmessung durchgeführt.

Um die räumliche Heterogenität der UV-Bestrahlungsstärke zu verschiedenen Zeitpunkten zu erfassen (Messstrategie ii), wurden Rastermessungen der UV-Bestrahlungsstärke mittels eines Breitband-Radiometers durchgeführt. Die Messpositionen sind in Abb. 8 dokumentiert. Die Rastermessung wurde insgesamt zweimal durchgeführt, einmal von 12:48 bis 12:53 MESZ, und einmal um 13:14 bis 13:23 MESZ.

Weiterhin wurden vonseiten des BfS die Positionen der Bäume sowie die jeweiligen Schattenlängen der Bäume ermittelt.



Abbildung 7: Fotos der Messpunkte NE (links), ND (mitte) und NC (rechts). Die Fotos wurden von Erik Faber, BfS, erstellt.

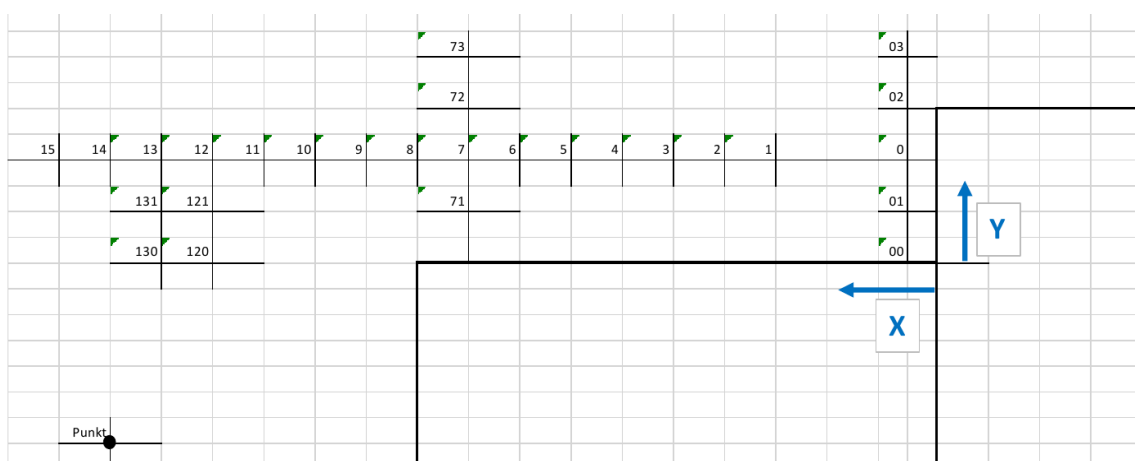


Abbildung 8: Position der Rastermesspunkte zur Erfassung der räumlichen Heterogenität der UV-Bestrahlungsstärke. Die Darstellung des Kindergartengebäudes ist gedreht. Die Nordseite des Kindergartens befindet sich auf der rechten Seite der Darstellung. Die Darstellung des Gebäudes und der Messpunkte ist nicht maßstabsgetreu. Die Abbildung wurde von Erik Faber, BfS, erstellt.

3.6.2 Modellsetup

Um die realen Bedingungen des Außenbereichs des Kindergartens sowie der umliegenden Gebäude im Modell zu berücksichtigen, müssen die entsprechenden Geoinformationen bereitgestellt werden. Das Modell PALM selbst enthält keine Datenbank mit hinterlegten Geoinformationen. Technisch ist dies damit begründet, dass PALM ein mikroskaliges Modell ist, welches eine hohe räumliche Auflösung der Geodaten erfordert. Eine Speicherung der notwendigen Geodaten für ein großes Gebiet (z.B. landesweit) würde sehr viel Speicherplatz benötigen und wäre damit ineffizient. Weiterhin spielen rechtliche Aspekte eine Rolle und räumlich hochaufgelöste Daten sind oftmals kostenpflichtig. Die Beschaffung und Aufbereitung der Geodaten sind daher zum jetzigen Zeitpunkt Aufgabe der Nutzer. Um Geoinformationen in PALM abzubilden, existiert eine definierte Schnittstelle im NetCDF-Format (im Folgenden statische Eingangsdatei), mittels derer die Umgebungseigenschaften definiert werden können (Heldens et al., 2020). Dazu gehört die räumliche Verteilung von unterschiedlichen Landoberflächen und Vegetationsklassen, Bodeneigenschaften, Gebäudeinformationen, 3D-Objekte und explizit durch das numerische Gitter aufgelöste Bäume inklusive deren Charakteristika wie Kronenformen oder Blattflächendichteverteilungen. Um diese Information in einem hohen Detailgrad bereitzustellen, hat das BfS Geodaten vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie beschafft. Diese wurden vom Auftragnehmer gesichtet, prozessiert und in eine statische Eingabedatei konvertiert. Aufgrund einer unzureichenden Qualität der verfügbaren Baumdaten (Bäume fehlten oder waren unrealistisch hoch), wurden Baumhöhen anhand der vom BfS ermittelten Schattenlängen ermittelt und Kronenformen wurden anhand von Fotos und Satellitenansichten geschätzt und manuell angepasst. Abbildung 9 zeigt die im Modell abgebildeten Bäume sowie Gebäude. Weitere Bauminformationen wie die Blattflächendichte wurden anhand typischer vertikaler Verteilungen mitteleuropäischer Laubbäume abgeleitet, welche vorprozessiert in PALM-Präprozessierungsskripten zur Verfügung stehen und standardmäßig angenommen werden (Heldens et al., 2020). Da die Rohdaten nur Informationen zu Gebäudehöhe und -alter enthielten, wurden weitere Gebäudeinformationen wie z.B. der Fassadentyp, die Oberflächenalbedo der Gebäudewände oder der Fensterflächenanteil anhand vordefinierter, in PALM integrierter Standardwerte gesetzt. Weitere Objekte im Außenbereich des Kindergartens, wie z.B. das Sonnensegel oder die Hütte auf der Terrasse, waren nicht in den Eingangsdaten vorhanden. Diese wurden manuell zu den Geodaten hinzugefügt. Dazu wurden die vom BfS entworfenen maßstabsgerechten Skizzen für das Sonnensegel und für die Hütte zur Hilfe genommen.

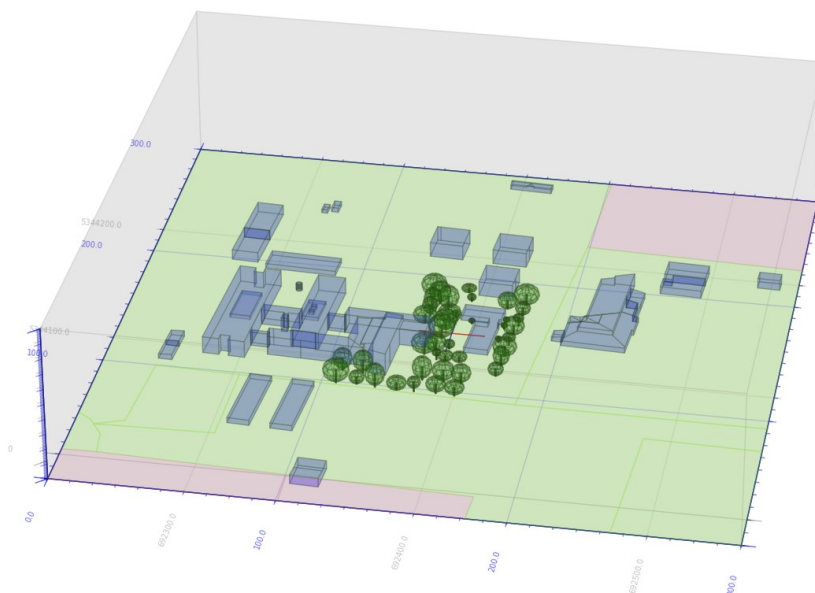


Abbildung 9: Position und Form der im Modell abgebildeten Bäume und Gebäude.

Weiterhin wurden die numerischen und physikalischen Simulationsparameter definiert. Das Modellgebiet umfasste 600 x 600 x 120 Gitterpunkte entlang der x-, y- und z-Richtung bei einer hochaufgelösten Gitterweite von 0,25m. Die Modellgebietsgröße wurde so gewählt, dass die umliegenden Gebäude ebenfalls berücksichtigt werden. Eine nachträgliche Sensitivitätsanalyse hat jedoch gezeigt, dass diese nahezu keinen Einfluss auf die UV-Bestrahlungsstärke im Analysegebiet haben. Die obere Hemisphäre wurde im Strahlungsmodell mit 60 diskreten Punkten entlang des Azimutwinkels und 90 diskreten Punkten entlang des Zenitwinkels aufgelöst. Für das UV-Modell wurden Reflexionen an Gebäuden berücksichtigt. Dazu wurden fünf Iterationsschritte für die Reflexion berücksichtigt. Die Simulation deckte den gesamten Messtag ab und startete um 00:00 MESZ. Das UV-Modell wurde während der „Spinup“-Phase der Oberflächenmodelle aufgerufen und die Simulation wurde nach dem „Spinup“ der Oberflächenmodelle kontrolliert beendet. Die „Spinup“-Phase bezeichnet dabei eine zeitliche Vorabsimulation des Oberflächen- und Boden- / Wandmodells unter Berücksichtigung eines angenommenen Tagesgangs der Strahlung und Temperatur und dient dazu, die Oberflächen und Boden- / Wandtemperaturen in einen initialen Gleichgewichtszustand mit den atmosphärischen Bedingungen zu bringen (Maronga et al., 2020). Eine anschließende Simulation der dreidimensionalen Strömung fand in diesem Zusammenhang nicht statt. Simulierte UV-Bestrahlungsstärken wurden alle 100s ausgegeben. Insgesamt wurde die Simulation zweimal durchgeführt. Einmal mit geschlossenem Sonnensegel und einmal mit geöffnetem Sonnensegel. Dies war nötig, um die zeitweilige Öffnung des Sonnensegels während des Messzeitraums in der Analyse zu berücksichtigen. Eine dynamische Anpassung von 3D-Objekten während der Simulation ist mit PALM momentan nicht realisiert. Die Simulationen wurden auf 96 Rechenkernen durchgeführt und benötigten etwa 10 Stunden Laufzeit. Die für die Evaluierungssimulationen verwendete PALM-Konfigurationsdatei (*_p3d*) ist in Anhang A bereitgestellt.

Erstellung eines realitätsnahen UV-Szenarios

Das UV-Szenario wurde mittels des auf uvspec basierenden Präprozessors *uv2palm* erstellt. Dazu wurden die am Messtag vorhandene Ozonschichtdicke, die Geländehöhe des Standorts, der Luftdruck sowie die Sichtweite definiert. Die Ozonschichtdicke wurde aus bereitgestellten globalen Daten vom *Department of Environment and Climate Change Canada* (ECC, 2023) abgeleitet. Die Ozonschichtdicke am 19.05.2023 betrug demnach 350 DU. Der für uvspec benötigte Luftdruck ($p = 1023$ hPa) und die Sichtweite (100 km) wurden aus Reanalysedaten des *Global Forecasting System* (GFS, 2023) für den Messstandort und den entsprechenden Messzeitraum anhand von Wetterkarten visuell abgeleitet. Da der 19.05.2023 ein fast idealer Strahlungstag war, wurden keine Wolken berücksichtigt. Die für die Evaluierungssimulationen verwendete *uv2palm*-Konfigurationsdatei ist in Anhang B bereitgestellt. Die uvspec-Modellergebnisse wurden nach der jeweiligen Ausführung in eine für PALM lesbare NetCDF-Datei konvertiert.

3.6.3 Vergleich der Modellergebnisse mit Messdaten

Abbildung 10 zeigt die uvspec-modellierte Strahldichteverteilung bei verschiedenen Sonnenzenitwinkeln für den 19.05.2023 unter Annahme des in Abschnitt 3.6.2 beschriebenen atmosphärischen UV-Szenarios. Die höchsten Werte der Strahldichte treten in allen gezeigten Fällen bei Raumwinkeln nahe der Sonnenposition auf. Nahe dem Horizont (Zenitwinkel zwischen 80-90°) treten die geringsten Strahldichten auf. Ebenso sind geringe Strahldichten in sonnenabgewandter Richtung zu erkennen. Im Zenitwinkelbereich zwischen 65-80° sind zudem leicht höhere Strahldichten zu erkennen. Obwohl die Strahldichte nicht isotrop verteilt ist, sind die raumwinkelabhängigen Unterschiede mit Ausnahme der Sonnenposition relativ schwach ausgeprägt.

Abbildung 11 zeigt Horizontalschnitte der modellierten erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke um 13:00 MESZ für den Außenbereich des Kindergartens. Die räumliche Heterogenität der UV-Strahlung aufgrund der Gebäude- und Baumabschattung wird mit beiden Modellierungsansätzen abgebildet, allerdings sind die räumlichen Unterschiede mit dem raumwinkelunabhängigen (LOD1) Ansatz (Abb. 11a) stärker ausgeprägt. So werden an

der Nordseite der Gebäude mit der LOD1-Methode nur erythemgewichtete Bestrahlungsstärken von 40-50 mW m^{-2} erreicht, wohingegen mit der raumwinkelabhängigen (LOD2) Methode in den selben Bereichen Werte von über 100 mW m^{-2} auftreten. Ebenso sind die Baumschatten mit der LOD1-Methode deutlicher ausgeprägt verglichen mit der LOD2-Methode. Weiterhin fällt auf, dass im Nahbereich der Gebäude die UV-Bestrahlungsstärke reduziert ist, auch wenn keine direkte Abschattung stattfindet, z.B. an der Süd- und Westseite des Kindergartengebäudes. Diese Reduktion der Bestrahlungsstärke ist auf eine teilweise Verschattung des Himmels und einer damit einhergehenden Reduktion des diffusen Strahlungsanteils zurückzuführen.

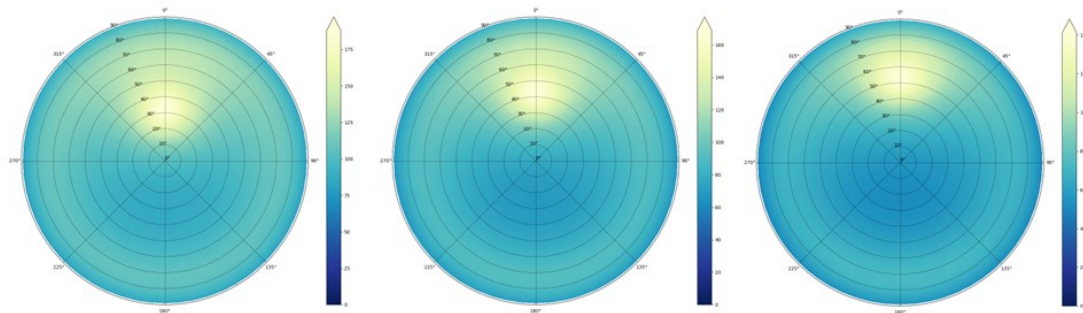


Abbildung 10: Hemisphärische Verteilung der spektralen Strahldichte ($\text{mW m}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$) aus uvspec für den 19.05.2023 bei einer Wellenlänge von $\lambda = 330 \text{ nm}$ für einen Sonnenzenitwinkel von 30° (links), 40° (mitte) und 50° (rechts). Radiale Linien zeigen den Azimutwinkel, zirkuläre Linien den Zenitwinkel. Die Sonne ist in allen drei Fällen auf den Azimutwinkel bei 0° (Süden) projiziert.

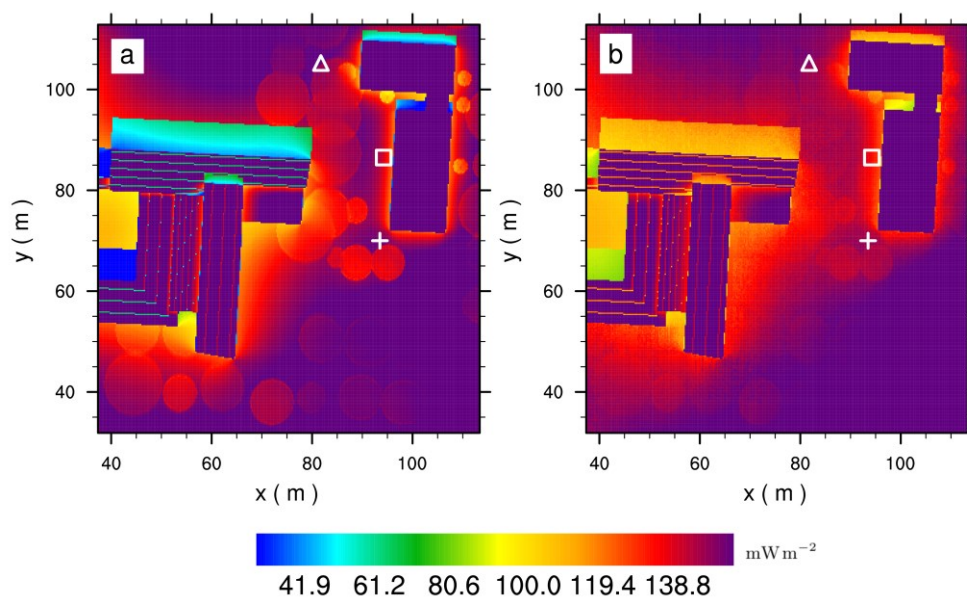


Abbildung 11: Horizontalschnitt der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke (mW m^{-2}) um 13:00 MESZ im Außenbereich des Kindergartens für a) den raumwinkelunabhängigen (LOD1) Ansatz und b) den raumwinkelabhängigen (LOD2) Ansatz. Die x- und y-Achse sind relativ zum Koordinatenursprung des Modellgebiets angegeben. Das rechte Gebäude ist der Kindergarten, das linke das BfS-Gebäude. Die weißen Marker zeigen die Position der Messpunkte NC (Kreuz), ND (Quadrat) und NE (Dreieck).

Abbildung 12 zeigt die Tagesgänge der gemessenen und modellierten UV-Bestrahlungsstärke an der Referenzstation auf dem Dach des BfS-Gebäudes, welches nicht durch Abschattungen durch umliegende Gebäude und Bäume beeinflusst ist. Die modellierten UV-Bestrahlungsstärken stimmen sehr gut mit den gemessenen Werten im Tagesverlauf überein. Einzig in den frühen Morgenstunden sind marginale Abweichungen zu erkennen. Zudem

werden Wolkenschatten, welche die gemessene UV-Bestrahlungsstärke kurzzeitig vermindern, nicht vom Modell erfasst. Die erythemgewichtete Bestrahlungsstärke zeigt im Gegensatz zur nicht gewichteten Bestrahlungsstärke größere Unterschiede. Insbesondere zwischen 11:00 - 15:00 MESZ zeigt sich, dass die modellierten Werte die real gemessenen Werte um 10 - 15 mW m^{-2} unterschreiten.

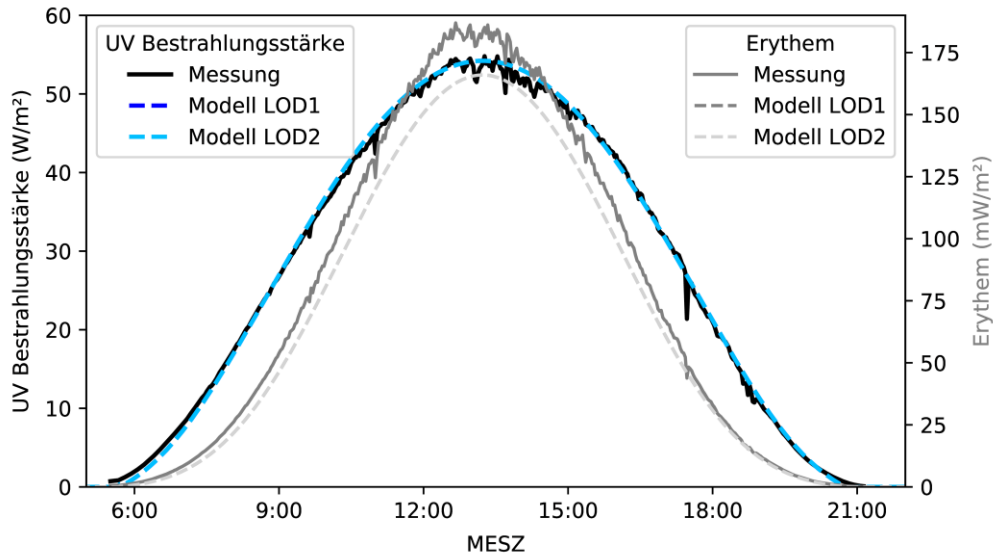


Abbildung 12: Tagesgang der UV-Bestrahlungsstärke (W m^{-2} , linke Ordinate und Legende) sowie der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke (mW m^{-2} , rechte Ordinate und Legende) an der Referenzstation auf dem Dach des BfS-Gebäudes. Dargestellt sind jeweils Werte abgeleitet aus der Messung sowie dem raumwinkelunabhängigen (LOD1) und raumwinkelabhängigen (LOD2) Modellierungsansatz. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die jeweiligen Kurven von LOD1 und LOD2 exakt übereinanderliegen.

Abbildung 13 zeigt die zugehörige spektrale Verteilung der gemessenen und uvspec-modellierten UV-Bestrahlungsstärke für den Zeitraum um 13:00 MESZ. Die spektrale Verteilung der gemessenen und modellierten Bestrahlungsstärke zeigt für die meisten Wellenlängen sehr ähnliche Verläufe und Werte, was in ähnlichen Bestrahlungsstärken resultiert, wie Abb. 12 zeigt. In einigen Wellenlängenbereichen weist die modellierte Bestrahlungsstärke jedoch geringere Werte auf, z.B. im Wellenlängenbereich von 335 – 340 nm. Da die Erythemgewichtungsfunktion in diesem Wellenlängenbereich einen signifikanten Einfluss hat, wird die Unterschätzung der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke in Abb. 12 auf die Unterschätzung der modellierten spektralen Bestrahlungsstärken in einzelnen Wellenlängenbereichen zurückgeführt.

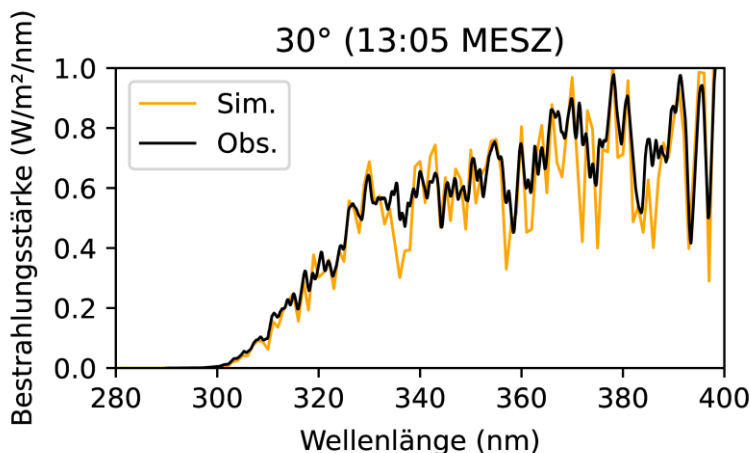


Abbildung 13: Spektrale Verteilung der gemessenen und uvspec-modellierten UV-Bestrahlungsstärke ($\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$) bei einem Sonnenzenitwinkel von 30° um die Mittagsstunden des 19.05.2023 auf dem unverschatteten BfS-Gebäudedach.

Abbildung 14 zeigt die Tagesgänge der gemessenen und modellierten UV-Bestrahlungsstärke an den Messpunkten NC, ND und NE. An Messpunkt NC wird in der Simulation ohne Sonnensegel der Tagesgang der UV-Bestrahlungsstärke sowohl mit dem raumwinkelabhängigen (LOD2), als auch dem raumwinkelunabhängigen (LOD1) Ansatz wiedergegeben. Mit beiden Modellierungsansätzen wird die UV-Bestrahlungsstärke leicht überschätzt, wobei die Überschätzung mit dem LOD1 Ansatz mit $3-6 \text{ W m}^{-2}$ stärker ausgeprägt ist. Die Simulation mit offenem Sonnensegel zeigt vor 09:00 Uhr einen ähnlichen Tagesgang. Anschließend ist eine signifikante Verminderung in der UV-Bestrahlungsstärke zu beobachten, welche mit dem LOD1 Ansatz stärker ausgeprägt ist. Im Weiteren zeigt die mit dem LOD1 Ansatz modellierte UV-Bestrahlungsstärke am Messpunkt NC nahezu konstante Werte, welche im Bereich der gemessenen UV-Bestrahlungsstärken bei geöffnetem Sonnensegel liegen (siehe die abrupten Einbrüche um 12:36 und 13:38 MESZ, zu diesen Zeitpunkten wurde das Sonnensegel geöffnet). Im Gegensatz dazu weist die mit dem LOD2 Ansatz modellierte Bestrahlungsstärke einen signifikanten Tagesgang am Messpunkt NC auf und die gemessenen Werte werden bei offenem Sonnensegel signifikant überschätzt. Dies deutet darauf hin, dass die Abschattung der direkten UV-Strahlung unterschätzt wird, wohingegen der Anteil der diffusen Strahlung aus nicht abgeschatteten Raumwinkeln überschätzt wird. Um dies weitergehend zu untersuchen, wird der Einbruch in der gemessenen UV-Bestrahlungsstärke um etwa 14:34 MESZ an der Messposition NC herangezogen. Zu diesem Zeitpunkt ist das Sonnensegel geschlossen, der Messpunkt NC wird aber kurzzeitig von der schmalen Aufhängung des Sonnensegels verschattet (Lorenz, 2023). Aufgrund der geringen Ausdehnung der Aufhängung und der damit verbundenen geringen flächenmäßigen Abdeckung des Himmels kann somit angenommen werden, dass dadurch nur der direkte Strahlungsanteil an Messpunkt NC abgeschattet wird, wohingegen der ankommende diffuse Strahlungsanteil kaum beeinflusst ist. Dies erlaubt die Bestimmung des direkten und diffusen Strahlungsanteils zu diesem Zeitpunkt. Abbildung 15a zeigt die modellierten Zeitreihen der diffusen und direkten UV-Bestrahlungsstärke am Messpunkt NC sowie den da zugehörigen Messwert der diffusen Bestrahlungsstärke zum Zeitpunkt der Abschattung durch die Aufhängung. Es ist erkennbar, dass die modellierte diffuse Bestrahlungsstärke mit dem raumwinkelunabhängigen Ansatz mit dem Wert der Messung übereinstimmt, wohingegen die mit dem raumwinkelabhängigen Ansatz modellierte diffuse UV-Bestrahlungsstärke den Wert der Messung um einen Faktor 2 überschätzt. Die Überschätzung der UV-Bestrahlungsstärke unter dem Sonnensegel mit dem raumwinkelabhängigen Ansatz in Abb. 14a wird daher auf die Überschätzung der diffusen Strahlung zurückgeführt, d.h. die in Abb. 10 exemplarisch gezeigte Strahldichte wird bei Raumwinkeln ungleich der Sonnenposition überschätzt, wohingegen die Strahldichte aus Raumwinkeln nahe der Sonnenposition unterschätzt wird. Mehrfache Überprüfung des Quellcodes hat keine Hinweise auf Programmierfehler ergeben, sodass zum jetzigen Zeitpunkt davon ausgegangen wird, dass es sich hierbei um eine Fragestellung bezogen auf uvspec handelt. Zur Klärung dieser Überschätzung der diffusen Strahlung wurden bereits die uvspec-Entwickler kontaktiert. Bis zur Fertigstellung des Forschungsvorhabens und Ende der Berichtslegung erfolgte hierzu aber kein weiterer Austausch.

Die Zeitreihen der modellierten und gemessenen UV-Bestrahlungsstärken am Messpunkt ND sind in Abb. 14b dargestellt. Messpunkt ND ist vornehmlich durch die Gebäudeabschattung charakterisiert. Vor 12:00 Uhr ist der Messpunkt ND durch das Gebäude abgeschattet. Die mit dem LOD1 Ansatz modellierte Bestrahlungsstärke zeigt während der Vormittagsstunden ähnliche Werte der UV-Bestrahlungsstärke wie die Messung, wohingegen die mit dem LOD2 Ansatz modellierten Werte die Messung signifikant überschätzen. Hier wird ebenso wie bei Messpunkt NC eine Überschätzung des diffusen Strahlungsanteils vermutet. Kurz vor 12:00 Uhr steigt die gemessene UV-Bestrahlungsstärke am Messpunkt ND signifikant an, ähnlich wie die modellierten Werte. Der Zeitpunkt des Übergangs zwischen Beschattung und Sonnenexposition stimmt zudem gut überein. Um etwa 15:30 Uhr verringert sich die gemessene Bestrahlungsstärke signifikant aufgrund der Abschattung umliegender Bäume. Diese Abschattung wird vom Modell zu diesem Zeitpunkt nur teilweise wiedergegeben und es kommt zu einer Überschätzung der UV-Bestrahlungsstärke gegenüber der Messung in den Nachmittagsstunden. Aufgrund der idealisierten Kronenformen im Modell werden jedoch

belaubte Äste nicht exakt aufgelöst. Es kann daher zu Diskrepanzen zwischen Messung und Modell kommen, z.B. wenn in der Realität ein Punkt durch belaubte Äste teilweise abgeschattet wird, diese Pflanzenstrukturen jedoch nicht exakt im Modell abgebildet werden.

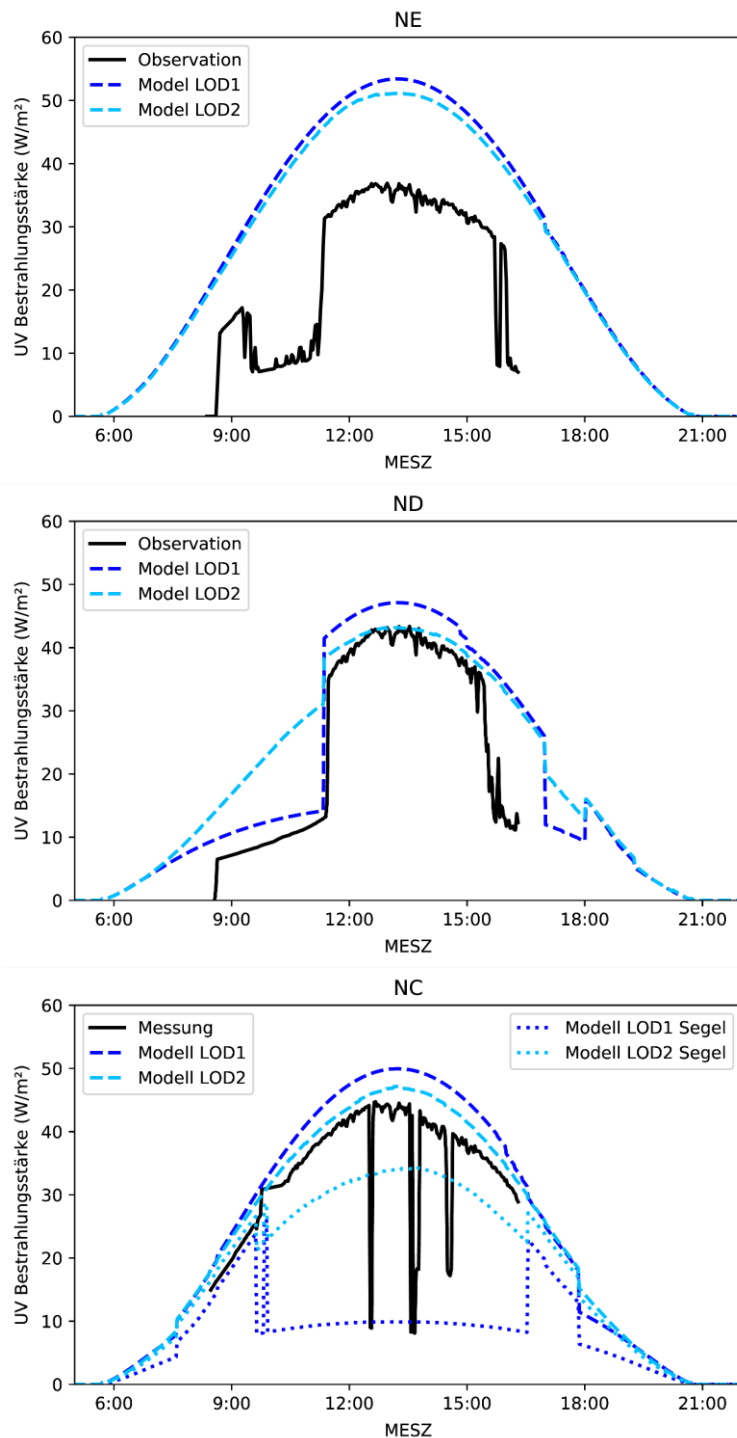


Abbildung 14: Tagesgang der UV-Bestrahlungsstärke ($W\ m^{-2}$) an den Messpunkten NC (oben), ND (mitte) und NE (unten). Dargestellt sind jeweils Werte abgeleitet aus der Messung sowie dem LOD1- und dem LOD2-Modellierungsansatz. Für den Messpunkt NC sind sowohl die modellierten Zeitreihen aus der Referenzsimulation ohne Sonnensegel (gestrichelt) als auch aus der Simulation mit Sonnensegel (gepunktet) für den gesamten Tagesgang dargestellt.

Messpunkt NE liegt im hinteren Teil des Kindergartengeländes und ist von hohen Bäumen umgeben. Die UV-Bestrahlungsstärke wird am Messpunkt NE vom Modell tendenziell überschätzt. Die modellierten Bestrahlungsstärken zeigen einen relativ kontinuierlichen Verlauf ohne abrupte starke Änderungen, was darauf hindeutet, dass nur wenig Abschattung

der direkten UV-Strahlung erfolgt, sondern am Messpunkt NE vorrangig die diffuse Strahlung abgeschattet wird. Die Messung weist jedoch abrupte Änderungen der UV-Bestrahlungsstärke um etwa 09:30 Uhr, 11:30 Uhr und 16:00 Uhr auf, was auf eine direkte Abschattung des Messpunktes NE zurückzuführen ist. Einzig der abrupte Anstieg der gemessenen UV-Bestrahlungsstärke um 11:30 MESZ wird vom Modell ansatzweise wiedergegeben. Die Diskrepanz zwischen Modell und Messung wird ebenso wie bei Messpunkt ND auf eine Diskrepanz zwischen den im Modell abgebildeten Baumkronen und der tatsächlichen Blattflächendichteverteilung zurückgeführt. Ebenso wie am Messpunkt NC fand an Messpunkt NE eine Abschattung der direkten Strahlung durch das Gerüst der Nestschaukel statt (15:50 MESZ), welche eine direkte Differenzierung zwischen diffuser und direkter UV-Bestrahlungsstärke erlaubt (Lorenz, 2023). Die dazugehörigen modellierten Zeitreihen der diffusen und direkten UV-Bestrahlungsstärken am Messpunkt NE sind in Abb. 15b gezeigt. Es wird deutlich, dass mit beiden Modellierungsansätzen die diffuse Strahlung deutlich überschätzt wird. Da dies am Messpunkt NC mit dem raumwinkelunabhängigen Ansatz jedoch nicht der Fall ist, wird davon ausgegangen, dass die Überschätzung der diffusen Bestrahlungsstärke durch eine unzureichende Repräsentation der Baumkronen im Modell hervorgerufen wird, sodass die Verschattung der diffusen Strahlung durch die umliegenden Bäume unterschätzt wird.

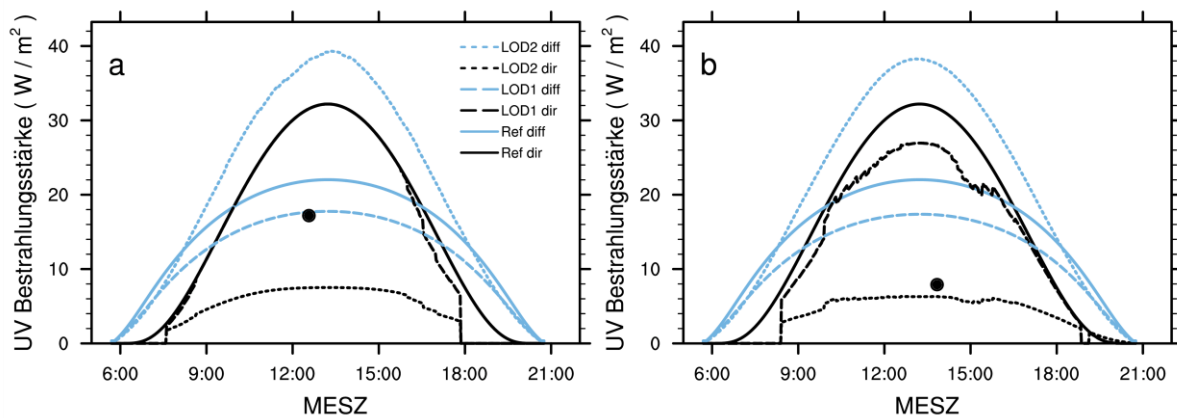


Abbildung 15: Zeitreihen der modellierten direkten und diffusen UV-Bestrahlungsstärke am Messpunkt NC (a) und NE (b) aus dem raumwinkelunabhängigen (LOD1, gestrichelte Linie) und raumwinkelabhängigen (LOD2, gepunktete Linie) Modellierungsansatz sowie die uvspec modellierten Referenzwerte (durchgezogene Linie). Der schwarze Kreis zeigt die an NC und NE gemessene diffuse Strahlung zum Zeitpunkt der Verschattung durch die Aufhängung des Sonnensegels (a) sowie durch das Gerüst der Nestschaukel (b). Es wird angemerkt, dass im Modell die Aufhängung des Sonnensegels sowie das Gerüst der Nestschaukel nicht abgebildet sind, sodass der Abschattungseffekt des direkten Strahlungsanteils im Modell an den Messpunkten NC und NE nicht berücksichtigt ist.

Abbildung 16 zeigt einen Vergleich der modellierten erythemgewichteten Bestrahlungsstärke mit den gemessenen Werten aus der Rastermessung (siehe Kap. 3.6.1 und Abb. 8). Die Rastermessung fand entlang der Westseite des Kindergartengebäudes statt und erstreckte sich bis in den Garten an der Südseite des Gebäudes und beinhaltet sowohl die räumliche als auch die zeitliche Variabilität der UV-Bestrahlungsstärke. An dieser Stelle wird angemerkt, dass die in Abb. 8 aufgelisteten Messungen an den Punkten 14 und 15 nicht für den Vergleich herangezogen werden, da sich diese in der unmittelbaren Umgebung eines Klettergerüsts befinden, welches nicht im Modell berücksichtigt wurde. Der Vergleich der modellierten und gemessenen Werte zeigt generell eine hohe Streuung. Beide Modellierungsansätze tendieren dazu, niedrige Werte zu überschätzen, insbesondere der raumwinkelabhängige Ansatz, was mit den Ergebnissen der stationären Messungen an Messpunkt NC und NE (siehe Abb. 14) übereinstimmt. Aus diesem Grund werden im Weiteren vorwiegend die Ergebnisse für die raumwinkelunabhängige Methode diskutiert. Die modellierten und gemessenen Werte an den Messpunkten im nördlichen Teil der Terrasse (0, 02, 03) zeigen eine gute Übereinstimmung, mit Ausnahme der wandnahen Messpunkte 00 und 01, an denen das Modell die gemessenen Werte mit beiden Modellierungsansätzen überschätzt. Die zeitliche Variation der gemessenen

Werte an Punkt 00 (vergl. Punkt und Kreuz) deutet darauf hin, dass die Rastermessung während des Übergangsbereichs zwischen Verschattung durch das Gebäude und direkter Sonneneinstrahlung stattfand. Anhand von Videos zur Dokumentation der Messungen konnte dies bestätigt werden (nicht gezeigt). Im Modell wird dieser zeitliche Übergangseffekt zu dem betrachteten Zeitraum jedoch nicht abgebildet und fand bereits an den betrachteten Positionen etwa 10 bis 15 Minuten früher statt (nicht gezeigt). Die in Abb. 16 dargestellte räumliche Variabilität der Strahlung in unmittelbarer Umgebung von Punkt 00 (graue Linien) ist zudem insbesondere bei der raumwinkelunabhängigen Methode relativ groß. Dies bedeutet, dass die am Messpunkt 00 extrahierte UV-Strahlung aus dem Modell relativ sensitiv auf die exakte Positionierung des Messpunktes im Modell reagiert. Bereits geringfügige Änderungen der exakten Positionierung des Messpunktes 00 können somit zu einer deutlich besseren Übereinstimmung zwischen den modellierten und gemessenen Wert führen.

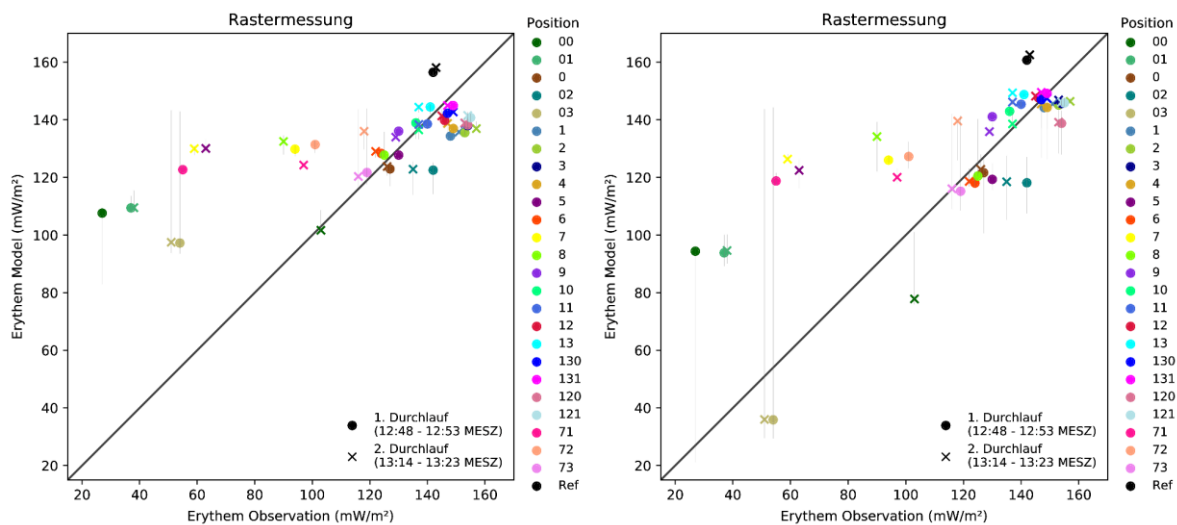


Abbildung 16: Vergleich der modellierten erythemgewichteten Bestrahlungsstärke (Ordinate) mit der gemessenen (Abszisse) für die Messpunkte der Rastermessung für den raumwinkelunabhängigen Modellierungsansatz (links) und den raumwinkelabhängigen Modellierungsansatz (rechts). Die Punkte zeigen Werte aus der ersten Durchführung der Rastermessung zwischen 12:48 – 12:53 Uhr MESZ, Kreuze zeigen Werte aus der zweiten Durchführung zwischen 13:14 – 13:23 Uhr MESZ. Die unterschiedlichen Farben markieren die einzelnen Messpunkte aus Abb. 8. Die modellierten Bestrahlungsstärken wurden jeweils an dem im Modell korrespondierenden Ort und Zeitpunkt aus den Ergebnissen extrahiert. Die grauen Balken entlang der Ordinate zeigen den Wertebereich der modellierten erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke an den jeweiligen umliegenden Gitterpunkten in einem Umkreis von $\pm 0,5$ m zum ursprünglichen Ort.

An den Messpunkten 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11 und 12 zeigen die modellierten Werte eine relativ gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Auch im Bereich des Sonnensegels (13, 130, 131, 120, 121) zeigt das Modell eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Die gemessenen sowie die modellierten Werte an den Punkten 5 und 7, 71, 72 sowie 73 weisen eine hohe zeitliche Variabilität auf. Diese ist durch die dort befindlichen Bäume bedingt, welche Teile der Terrasse verschatten. Aufgrund der räumlich kleinskaligen Schatten, die sich im Tagesverlauf verlagern (nicht gezeigt), kommt es zu relativ großen zeitlichen Unterschieden zwischen den Messwerten an den entsprechenden Messpositionen. Dadurch, dass die Baumkronen im Modell nur idealisiert angenommen sind, können diese räumlich kleinskaligen Abschattungen durch einzelne Äste nicht ausreichend abgebildet werden, wodurch es lokal zu größeren Diskrepanzen zwischen Messung und Modell kommen kann, was wiederum zu einer größeren Streuung der Werte führt.

3.6.4 Sensitivität der Modellergebnisse gegenüber numerischen und physikalischen Parametern

Um die Sensitivität der Modellergebnisse hinsichtlich physikalischer Parameter sowie bezüglich der Unsicherheit in den Eingangsdaten abzuschätzen, wurden zusätzlich zu den

beiden Referenzsimulationen (mit offenem und geschlossenem Sonnensegel) weitere Simulationen durchgeführt. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die durchgeführten Sensitivitätssimulationen. Simulation 1 (S1) untersucht den Einfluss der Modellgebietsgröße auf die Ergebnisse. Bei der Referenzsimulation wurde das Modellgebiet so gewählt, dass auch weiter entfernte umliegende Gebäude im Modellgebiet abgebildet werden, obwohl diese womöglich nur einen sehr geringen bis keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Um dies zu quantifizieren, wurde eine Simulation mit deutlich kleinerem Modellgebiet durchgeführt, welche nur die relevanten Gebäude (Kindergarten, BfS-Gebäude) abbildet. Diese Simulation wurde auch im Hinblick auf die Reduktion der Rechenzeit durchgeführt.

Tabelle 5: Übersicht der durchgeführten Sensitivitätssimulationen. Änderungen von Simulationsparametern sind auf die jeweiligen Werte der Referenzsimulation bezogen. Variationen der gewählten physikalischen Parameter bewegen sich im Bereich der jeweiligen Unsicherheit bezüglich der Eingangsdaten.

| Simulation | Beschreibung |
|------------|---|
| S1 | kleinere Modellgebietsgröße (320 x 320 x 80 Gitterpunkte in x, y und z) |
| A1 | Absorptionskoeffizient Blätter geringer ($\alpha = 0,4$) |
| A2 | Absorptionskoeffizient Blätter höher ($\alpha = 0,8$) |
| L1 | geringere Blattflächendichte (-50%) |
| L2 | höhere Blattflächendichte (+50%) |
| R1 | geringere Albedo (-50%) an Gebäudeoberflächen |
| R2 | höhere Albedo (+50%) an Gebäudeoberflächen |

Bei der Implementierung der Baumabschattung wurde der Ansatz von Gao et al. (2002) implementiert, mit einem Absorptionskoeffizienten von $\alpha = 0,6$ (Shulski et al., 2004). Shulski et al. (2004) weisen allerdings auf eine relativ hohe Variabilität des Absorptionskoeffizienten hin. Um den Einfluss des Absorptionskoeffizienten auf die Modellergebnisse zu quantifizieren, wurden zwei Simulationen A1 und A2 durchgeführt, mit jeweils geringerem und höherem Absorptionskoeffizienten.

Weiterhin spielt bei der Baumabschattung die Blattflächendichte eine Rolle. Für die Evaluierungssimulation wurden typische Blattflächendichteprofile europäischer Laubbäume (Heldens et al., 2020) benutzt. Um die Unsicherheit diesbezüglich abzuschätzen, wurden zwei Simulationen L1 und L2 durchgeführt, in denen die Blattflächendichte um jeweils 50% verringert oder erhöht wurde. Auf eine Variation der Kronenformen wurde an dieser Stelle verzichtet, da diese eine gewisse Willkür impliziert und nicht zum Verständnis der Modellsensitivität beiträgt.

In der Evaluierungssimulation wurden typische Gebäude- und Fassadeneigenschaften entsprechend dem klassifizierten Gebäudetyp gesetzt. Der Gebäudetyp ist dabei abhängig vom Gebäudealter und der Gebäudenutzung (Wohngebäude, öffentliches Gebäude, Bürogebäude) und repräsentiert unterschiedliche physikalische Parameter hinsichtlich Albedo, Emissivität sowie der Wärmekapazität und -leitfähigkeit (Heldens et al., 2020). Da dies jedoch eine signifikante Unsicherheit bezüglich der Oberflächenalbedo impliziert, wurde mit den Simulationen R1 und R2 der Effekt einer unterschiedlichen Gebäudeoberflächenalbedo untersucht. Die Sensitivitätssimulationen basieren alle auf dem Setup von S1. Bis auf Simulation S1 selbst werden im Folgenden alle Sensitivitätssimulationen mit S1 verglichen.

Abbildung 17 zeigt die Differenz zwischen Simulation S1 und der Referenzsimulation für den Außenbereich des Kindergartens anhand der UV-Bestrahlungsstärke. Im Randbereich des Modellgebiets von Simulation S1 treten größere Unterschiede im Bereich von $10\text{-}15\text{ W m}^{-2}$ auf (siehe Abb. 17), insbesondere westlich des BfS-Gebäudes und nördlich des Kindergartens. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der Referenzsimulation diese Bereiche durch weitere Gebäude teilweise abgeschattet wurden, nicht jedoch in der Simulation S1, wodurch in diesen Bereichen höhere Werte der UV-Bestrahlungsstärke in S1 auftreten. Im Außenbereich des Kindergartens, wo die Messungen stattfanden, sind die Unterschiede jedoch marginal und bewegen sich für beide Modellierungsansätze im Bereich von $\pm 1\text{ W m}^{-2}$. Daraus kann geschlossen werden, dass die UV-Bestrahlungsstärke im Analysebereich unabhängig von der Modellgebietsgröße ist, wodurch kleinere Modellgebiete gewählt werden können und sich damit die Rechenzeit signifikant reduziert. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass mindestens

immer die umliegenden Gebäude und Bäume im Modellgebiet abgebildet werden. In Kap. 4 wird dieser Aspekt nochmals diskutiert werden.

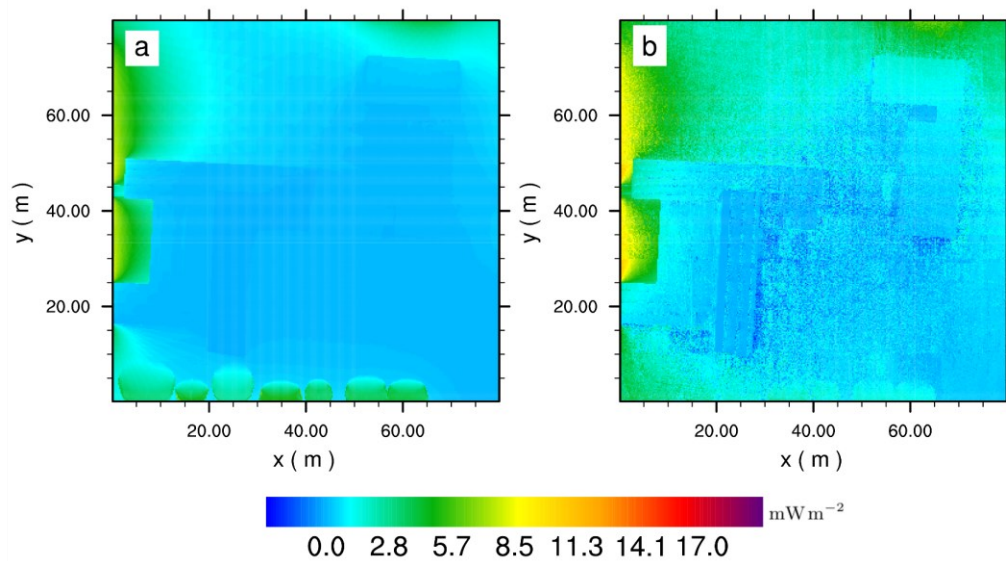


Abbildung 17: Differenz in der modellierten erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke (mW m^{-2}) zwischen Simulation S1 und der Referenzsimulation. Dargestellt ist ein Horizontalschnitt zum Zeitpunkt 13:00 MESZ im Außenbereich des Kindergartens für a) den raumwinkelunabhängigen Ansatz und b) den raumwinkelabhängigen Ansatz. Die x- und y-Achsen sind relativ zum Koordinatenursprung des Modellgebiets der Simulation S1. Der Horizontal schnitt zeigt einen identischen Ausschnitt zu Abb. 11.

Abbildung 18 zeigt die jeweilige Differenz zwischen den Sensitivitätssimulationen A1, A2, L1, L2, R1, R2 und S1. Sowohl der Absorptionskoeffizient als auch die Blattflächendichten haben einen signifikanten Einfluss auf die Bestrahlungsstärke. Ein kleinerer Absorptionskoeffizient sowie eine geringe Blattflächendichte führen zu einer Erhöhung der Bestrahlungsstärke um etwa $1\text{-}5 \text{ W m}^{-2}$ im Außenbereich des Kindergartens. Entgegengesetzt führen ein höherer Absorptionskoeffizient sowie eine höhere Blattflächendichte zu einer Verminderung der Bestrahlungsstärke um etwa $1\text{-}4 \text{ W m}^{-2}$. Eine Verminderung oder Erhöhung der Oberflächen albedo führt zu einer entsprechenden geringeren oder erhöhten Bestrahlungsstärke um etwa $0,5\text{-}1,5 \text{ W m}^{-2}$. Am signifikantesten wirken sich Änderungen der Albedo im Nahbereich von sonnenbeschienenen Wänden aus, z.B. an der Südseite der Gebäude, wohingegen in weiterer Entfernung zu Wänden der reflektierte Anteil der UV-Strahlung in diesem Fall gering ist und kaum Änderungen auftreten.

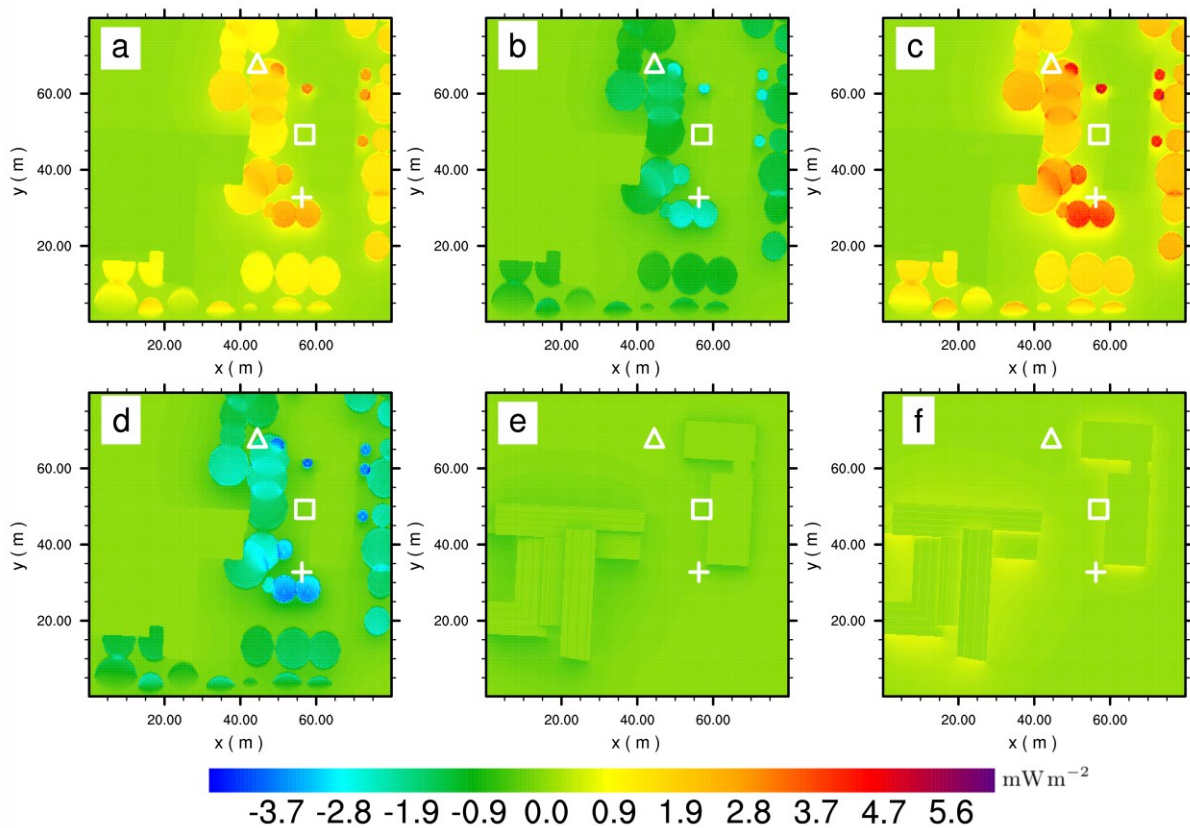


Abbildung 18: Differenz in der modellierten erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke (mW m^{-2}) zwischen a) Simulation A1 und S1, b) A2 und S1, c) L1 und S1, d) L2 und S1, e) R1 und S1 sowie f) R2 und S1. Dargestellt ist ein Horizontalschnitt zum Zeitpunkt 13:00 MESZ im Außenbereich des Kindergartens abgeleitet aus dem raumwinkelunabhängigen Modellierungsansatz. Der Horizontalschnitt zeigt einen identischen Ausschnitt zu Abb. 11. Die weißen Marker zeigen die Position der Messpunkte NC (Kreuz), ND (Quadrat) und NE (Dreieck).

Abbildung 19 zeigt den Einfluss der geänderten Simulationsparameter auf die modellierten UV-Bestrahlungsstärken an den Messpunkten NC, ND und NE. Obwohl der Einfluss der geänderten Simulationsparameter für die Baumabschattung lokal einen signifikanten Einfluss haben kann (Abb. 18), hat dies kaum einen Einfluss auf die modellierten Zeitreihen an den Messpunkten, an denen die Variabilität hinsichtlich der variierten Simulationsparameter gering ausgeprägt ist. Die Diskrepanzen, die an den Messpunkten beobachtet wurden, lassen sich daher nicht auf Unsicherheiten bezüglich der verwendeten physikalischen Parameter zurückführen, sondern werden eher auf geometrische Unsicherheiten in der Abbildung der Bäume zurückgeführt. Dies wird insbesondere für Messpunkt NE nochmals deutlich. An den nahegelegenen Gitterpunkten ist in Abb. 18 ein deutlicher Einfluss der Baumabschattung erkennbar, der sich allerdings nicht auf den eigentlichen Messpunkt auswirkt.

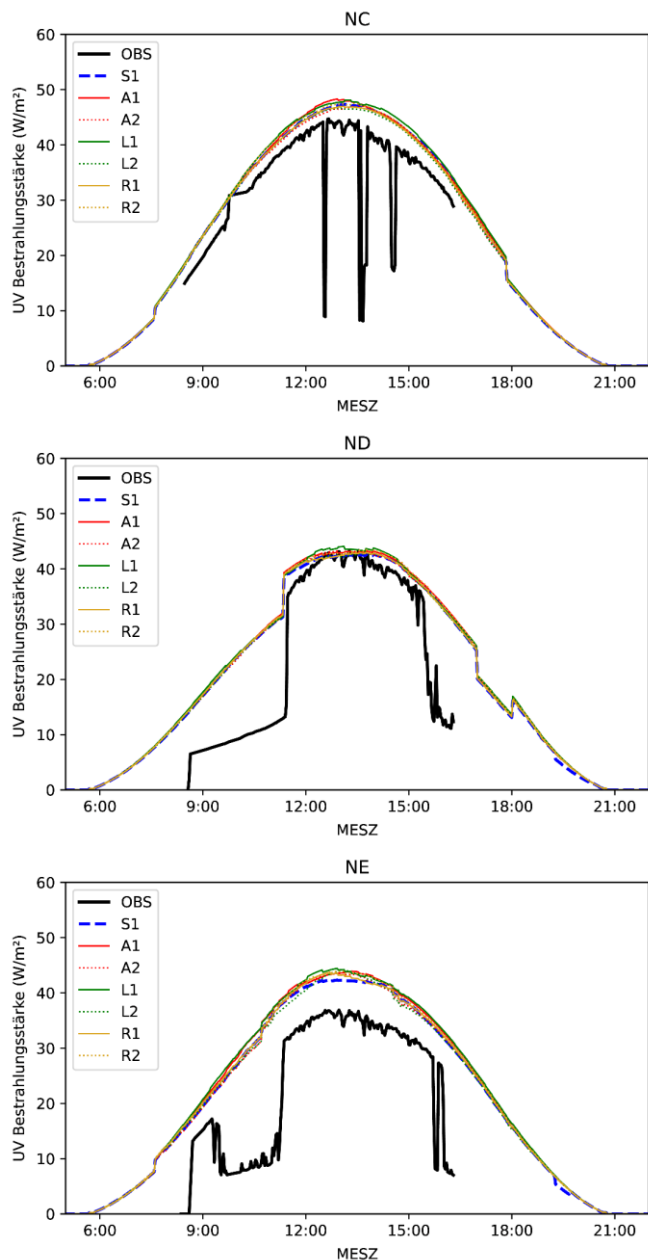


Abbildung 19: Tagesgang der UV-Bestrahlungsstärke (W m^{-2}) an den Messpunkten NC (oben), ND (mitte) und NE (unten) abgeleitet aus den Sensitivitätssimulationen S1, A1, A2, L1, L2, R1 und R2 sowie der Messung.

3.6.5 Demonstration der Funktionalität des UV-Strahlungsmodells

Die Funktionalität des entwickelten UV-Strahlungsmodells wurde am Standort des BfS in Neuherberg demonstriert. Die Demonstration fand am 09.10.2023 statt. Dazu wurde zunächst ein Überblick über die im Projekt getätigten Arbeiten gegeben sowie eine kurze Einführung in die Fähigkeiten des PALM-Modellsystems. Im Anschluss wurden die für eine UV-Simulation notwendigen Arbeitsschritte erklärt und auf einem Notebook des Auftragnehmers vorgeführt. Dies beinhaltete die Installation des PALM-Modellsystems inklusive des entwickelten Präprozessors und des externen UV-Strahlungsmodells uvspec. Zunächst wurde ein UV-Szenario mithilfe des Präprozessors konfiguriert und erstellt. Im Weiteren wurde die Parameterdatei für das Modell PALM konfiguriert und die Ausgabegrößen wurden definiert. Anschließend wurde das Modell ausgeführt und die Ergebnisse wurden diskutiert. Weiterführende Aspekte zur Durchführung einer UV-Simulation mit dem Modell PALM werden in Kap. 5 diskutiert.

3.6.6 Veröffentlichung des UV-Strahlungsmodells

Das in PALM integrierte UV-Strahlungsmodell ist anwendbar und kann für Untersuchungen der UV-Bestrahlungsstärke in städtischen Umgebungen angewendet werden. Der entwickelte PALM-Code sowie der Präprozessor `uv2palm`, werden nach Begutachtung durch einen unabhängigen PALM-Entwickler in den Standardcode integriert und mit dem nächsten PALM-Release 24.04 unter https://gitlab.palm-model.org/releases/palm_model_system/-/releases veröffentlicht. Dies beinhaltet ebenfalls eine Dokumentation der damit verbundenen Steuerungsparameter und Ausgabegrößen. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse in einem internationalen Journal (*peer-reviewed*) ist momentan in Vorbereitung.

4 Zusammenfassung und Diskussion der Arbeiten

Im Rahmen des durchgeführten Projekts wurde ein urbanes UV-Strahlungsmodell zur Bestimmung der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke in bebauten Umgebungen in das mikroskalige Gebäude-auflösende Stadtklimamodelle PALM implementiert und auf physikalische Plausibilität geprüft. Dazu wird im Modell die Abschattung der direkten und diffusen Anteile der UV-Strahlung durch Bäume, Gebäude und 3D-Objekte, wie z.B. Sonnenschutzvorrichtungen, berücksichtigt. Ebenfalls werden die Transmission und Absorption von UV-Strahlung in Baumkronen sowie Mehrfachreflexionen an diffus reflektierenden Oberflächen modelliert. Es wurden zwei Modellierungsansätze implementiert: zum einen ein integraler Ansatz, bei dem der Winkel und die Richtung der schattenverursachenden Objekte keine Rolle spielt (raumwinkelunabhängiger Ansatz); zum anderen ein Ansatz basierend auf der Strahldichte, bei dem die Richtung der schattenverursachenden Objekte aufgrund der anisotropen Verteilung der diffusen Strahlung berücksichtigt wird. Die am Oberrand der Gebäudeschicht ankommende direkte und diffuse UV-Bestrahlungsstärke bzw. die Strahldichte werden durch das externe Strahlungstransfermodell `uvspec` vorab berechnet und in eine NetCDF-Datei geschrieben, welche während der PALM-Simulation gelesen und als Randbedingung für das urbane UV-Strahlungsmodell benutzt wird. Dadurch ist es möglich, verschiedene atmosphärische Situationen hinsichtlich der ankommenden UV-Strahlung zu berücksichtigen. Die von Seckmeyer und Luiz (2021) herausgearbeiteten Anforderungen für ein urbanes UV-Strahlungsmodell wurden damit umgesetzt.

Um die physikalische Richtigkeit des UV-Strahlungsmodells zu belegen, wurden Simulationsergebnisse mit dedizierten Messdaten verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss von Bäumen, Gebäuden und 3D-Objekten auf die UV-Bestrahlungsstärke realistisch berücksichtigt wird. Es wurde gezeigt, dass der raumwinkelunabhängige integrale Modellierungsansatz bereits eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten erzielt. Dies widerlegt damit die von Seckmeyer und Luiz (2021) aufgestellte Hypothese, dass die Kenntnis der Strahldichte eine notwendige Voraussetzung für die Modellierung der UV-Strahlung in bebauten Gebieten darstellt. Des Weiteren wurde festgestellt, dass der ursprünglich angenommene, physikalisch genauere raumwinkelabhängige Ansatz die UV-Bestrahlungsstärke in abgeschatteten Bereichen überschätzt (die Abschattung wird unterschätzt). Da das Ergebnis der `uvspec`-modellierten Strahldichte und Bestrahlungsstärke von den vorgegebenen atmosphärischen Wasserdampf-, Spurengas- sowie Aerosolprofilen und entsprechenden Aerosoleigenschaften abhängen, die in den meisten Fällen nicht bekannt sind und geschätzt werden müssen, impliziert dies eine gewisse Unsicherheit in der am Oberrand der urbanen Schicht ankommenden UV-Strahlung, insbesondere der Gewichtung zwischen diffuser und direkter UV-Strahlung. Der ankommende diffuse Strahlungsanteil kann dadurch um $\pm 10\text{--}15\%$ variieren (Seckmeyer und Luiz, 2021) und einen Einfluss auf die simulierten UV-Bestrahlungsstärken im urbanen Bereich haben. Es wird daher vermutet, dass die Diskrepanz zwischen modellierter UV-Bestrahlungsstärke mit der raumwinkelabhängigen Methode und der Messung auf eine Unterschätzung des direkten Strahlungsanteils bei gleichzeitiger Überschätzung des diffusen Strahlungsanteils im bereitgestellten

atmosphärischen UV-Szenario zurückgeführt werden kann. Um dies weiter abzuklären, wurden die uvspec-Entwickler kontaktiert. Bis Ende der Berichtslegung erfolgte hierzu jedoch kein Austausch. Basierend auf den Ergebnissen der Modellevaluierung, wird daher empfohlen, stattdessen den raumwinkelunabhängigen integralen Ansatz für die Berechnung der UV-Bestrahlungsstärke in urbanen Gebieten zu benutzen.

Weiterhin hat sich herausgestellt, dass eine signifikante Unsicherheit in der modellierten UV-Bestrahlungsstärke aufgrund unzureichender Kenntnis der Umgebungsbedingungen besteht. Dies betrifft insbesondere Bauminformationen, die in vielen Datensätzen nicht oder nicht ausreichend genau verfügbar sind. Dies ist vor allem für Untersuchungen problematisch, die auf einen Vergleich zwischen Modell- und Messdaten abzielen, da sich auch kleine Unsicherheiten lokal stark auf die modellierte UV-Strahlung auswirken können. Für eine spätere Anwendung des UV-Modells bei Planungstätigkeiten wird dieser Aspekt jedoch nicht als kritisch bewertet, da es in diesem Fall vornehmlich darum geht, die Gesamtbelastung in einem größeren Bereich über einen längeren Zeitraum zu reduzieren. Als Planungsgrundlage sind daher idealisierte Informationen ausreichend, um die mögliche erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke und damit die mögliche UV-Strahlungsbelastung beurteilen zu können. Zudem ist nach Kenntnis des Auftragnehmers der für eine exakte Abbildung der Realität erforderliche Detailgrad der Geoinformationen momentan in Kommunen oder Behörden nicht verfügbar. In der Analyse hat sich gezeigt, dass die Modellergebnisse für das Kindergartengelände nicht von der Größe des Modellgebietes abhängen und weiter entfernt liegende Gebäude sowie der Modellrand keinen Einfluss auf die UV-Bestrahlungsstärke im untersuchten Bereich haben. Demnach ist es ausreichend, nur den für die Abschätzung relevanten Bereich zu modellieren, um die erforderlichen Rechenressourcen möglichst gering zu halten. Allerdings impliziert dies gleichzeitig, dass der spätere Anwender vorab eine Analyse der Umgebung vornehmen und eigenständig entscheiden muss, welcher Bereich für die Abschätzung tatsächlich relevant ist. Da dieses Vorgehen einen gewissen Grad an Willkür impliziert, sollte dieser Arbeitsschritt in Zukunft automatisiert werden (siehe Kap. 6). Ein weiterer Aspekt bei der Modellierung betrifft die numerische Auflösung. Diese wird zum einen bestimmt durch die kartesische Gitterweite des Modells, wodurch wiederum der Detailgrad von Gebäudeoberflächen und Baumkronen bestimmt wird. Zum anderen wird die numerische Auflösung ebenfalls über die Anzahl der diskretisierten Raumwinkel im Strahlungstransfermodell bestimmt. Für die Evaluierungsstudie wurden vorab Tests durchgeführt, um die notwendige Gitterweite und Raumwinkelauflösung zu bestimmen. Es hat sich gezeigt, dass ab einer Gitterauflösung von 1 m keine signifikanten Änderungen der UV-Bestrahlungsstärke mehr auftraten. Jedoch hängt das Einsetzen der Verschattung an einem bestimmten Ort von der Anzahl der Raumwinkel ab. Weiterhin wurde gezeigt, dass der Wert des Pflanzenabsorptionskoeffizienten sowie der Blattflächendichte einen signifikanten Einfluss auf die modellierte erythemgewichtete Bestrahlungsstärke haben können. Am stärksten ist der Effekt in der näheren Umgebung von Bäumen ausgeprägt und kann zu einer Verminderung / Erhöhung von bis zu 10% führen. Der Einfluss der Oberflächenalbedo im UV-Spektralbereich auf die erythemgewichtete Bestrahlungsstärke war für den Außenbereich des Kindergartens nur schwach ausgeprägt und führte zu einer Verminderung / Erhöhung von 1%. Allerdings ist an dieser Stelle nicht auszuschließen, dass bei Oberflächen mit einer deutlich höheren Albedo der Einfluss signifikant wird.

Die Evaluierung des UV-Modells hat gezeigt, dass der Einfluss von Gebäuden, Bäumen und Sonnenschutzvorrichtungen realistisch wiedergegeben werden kann, insbesondere mit dem raumwinkelunabhängigen Modellierungsansatz. An dieser Stelle wird aber abschließend darauf hingewiesen, dass eine nicht sachgemäße Anwendung des Modells (z.B. zu grobe Gitterweite oder Winkelauflösung, unrealistisches UV-Szenario, etc.) zu Ungenauigkeiten und damit zu Fehlinterpretationen der Simulationsergebnisse führen kann. Wie bei allen physikalischen Modellen, ist daher ein hohes Maß an Sorgfalt bei der Anwendung des UV-Modells notwendig. Empfehlungen für ein numerisch und physikalisch plausibles Modellsetup werden in Kap. 5 gegeben.

5 Durchführung einer UV-Modellierung – Technische und physikalische Aspekte

Im Folgenden werden die notwendigen Schritte und technischen Voraussetzungen zur Durchführung einer UV-Simulation für ein reales urbanes Gebiet erläutert. Um das UV-Strahlungsmodell anwenden zu können, ist zunächst eine Installation des mikroskaligen Modells PALM notwendig. Dazu müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Ein Linux Betriebssystem.
- Eine Bash Shell - Eine Kommandoschnittstelle zwischen Nutzer und Betriebssystem.
- Ein aktueller Fortran- und C++ Compiler.
- Eine MPI (Message Passing Interface) Bibliothek mit MPI-3 Unterstützung.
- Eine NetCDF-Bibliothek.
- Folgende Softwarepakete müssen installiert sein: Python3, PyQt5, NCL.
- Eine Installation des atmosphärischen Strahlungstransfermodells uvspec.

Die neueste PALM-Version wird über https://gitlab.palm-model.org/releases/palm_model_system zur Verfügung gestellt. Ein Installationsskript sowie eine Schritt-für-Schritt Anleitung zur Installation wird mitgeliefert und kann im Benutzerterminal folgendermaßen ausgeführt werden:

```
bash install <install_path>.
```

5.1 Aufbereitung der geostatistischen Eingangsdaten

Um eine urbane Umgebung realitätsnah im Modell abbilden zu können, müssen zunächst die Eingangsdaten beschafft werden. Geodaten, wie z.B. die Landnutzung, Gebäude- und Bauminformationen, etc., können bei Behörden, Kommunen oder dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie beschafft werden. Die Daten liegen dann üblicherweise in sogenannten Shapefiles, in einem XML oder einem anderen Vektor-basierten Format vor. Die Daten müssen zunächst gerastert und anschließend in ein PALM-lesbares Format (NetCDF) konvertiert werden. Dieser Arbeitsschritt ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht automatisiert und erfordert daher vertiefte Kenntnisse hinsichtlich Geodatenverarbeitung und GIS (Geographische Informationssystem) Anwendungen sowie Programmierkenntnisse zur Konvertierung der Daten in ein NetCDF-Format. Aus Anwendersicht stellt dieser Arbeitsschritt momentan die größte Hürde dar.

5.2 Erstellung eines UV-Szenarios

Um verschiedene atmosphärische Szenarien hinsichtlich der UV-Strahlung zu untersuchen, müssen die dazugehörigen Daten erzeugt werden. Im Rahmen des Projektes wurde dazu ein Präprozessor uv2palm entwickelt, welcher Daten des Strahlungstransfermodells uvspec (Installation notwendig) in ein PALM-lesbares Format konvertiert (siehe Kap. 3.4). uv2palm wird mittels einer YAML-Datei konfiguriert und kann im Linux-Nutzerterminal folgendermaßen ausgeführt werden:

```
python3 uv2palm --uv-setup example_uv.yml --output-driver example_uv.nc
```

5.3 Ausführung einer Simulation

PALM muss zunächst konfiguriert werden. Dazu müssen alle physikalischen und numerischen Parameter in einer Konfigurationsdatei definiert werden. Im Anschluss müssen alle Eingangsdaten (Konfigurationsdatei, geostatische Eingangsdatei, UV-Datenbank) in einen entsprechenden *INPUT*-Ordner kopiert werden. PALM kann dann mittels eines Bash-Skriptes folgendermaßen im Nutzerterminal ausgeführt werden:

```
palmlrun -c default -r uv_demo -X8 -T8 -t 1000 -a "d3#"
```

Nach Beendigung der Simulation müssen die Simulationsergebnisse der modellierten UV-Bestrahlungsstärke visualisiert werden. Geeignete Software zur Visualisierung von PALM-Ausgabedaten (NetCDF-Format) ist z.B. Python, NCL oder MatLab. An dieser Stelle wird angemerkt, dass die Ausführung einer PALM-Simulation ein generelles Verständnis der Modellinfrastruktur (Ein- und Ausgabedaten, Modellkonfigurationsdateien, Ordnerstruktur, Dateiformate, etc.) erfordert.

5.4 Empfehlungen für ein physikalisch und numerisch plausibles Modellsetup

Im Folgenden werden Empfehlungen für ein physikalisch, numerisch plausibles Modellsetup gegeben. Weiterhin werden Hinweise zur Minimierung der Rechenzeit gegeben und es werden Handlungsempfehlungen ausgesprochen, um belastbare Aussagen über die mittlere UV-Belastung an einem Ort zu erhalten.

- Der Sonnenzenitwinkel hat einen signifikanten Einfluss auf die UV-Bestrahlungsstärke. Es wird empfohlen, den Sonnenzenitwinkel in den verwendeten UV-Szenarien mit mindestens 1°-Schritten aufzulösen.
- Es wird empfohlen, die Hemisphäre im Strahlungstransfermodell entlang des Zenitwinkels mit mindestens 90 Punkten (1°-Schritte) und entlang des Azimutwinkels mit mindestens 36 Punkten (10°-Schritte) aufzulösen.
- Um die UV-Belastung eines Gebietes beurteilen zu können, ist es notwendig, dass alle relevanten Bäume, Gebäude und Objekte in der Simulation abgebildet werden. Um dies objektiv bewerten zu können, ist eine vorherige geometrische Analyse des Gebietes notwendig, um den relevanten Umgebungsbereich analysieren zu können.
- Es wird empfohlen, Gebäude, Bäume und Objekte mit einer Gitterweite von mindestens 1 m aufzulösen.
- Um den Effekt von Mehrfachreflexionen der einfallenden UV-Strahlung ausreichend abbilden zu können, sollten mindestens drei Iterationsschritte (`num_reflections = 3`) gerechnet werden.
- Aufgrund der ungeklärten Genauigkeit des raumwinkelabhängigen Ansatzes wird empfohlen, die Beurteilung der UV-Belastung auf Basis der raumwinkelunabhängigen integralen Methode durchzuführen (Ausgabegrößen `uv_ewir1`, `uv_ir1`).
- Zur Minimierung der Rechenressourcen wird empfohlen, dass UV-Modell während der Vorab-Zeitintegration auszuführen (`end_time <= 0.1`, `spinup_time = 86400.0`, `data_output_during_spinup = .T.`), entsprechend der in Anhang C bereitgestellten PALM Konfigurationsdatei).

- Anhand von Sensitivitätsstudien wurde gezeigt, dass der Wert des Pflanzenabsorptionskoeffizienten sowie der Blattflächendichte einen signifikanten Effekt auf die modellierte erythemgewichtete Bestrahlungsstärke haben können. Da der Pflanzenabsorptionskoeffizient eine große statistische Streuung besitzt und vom Alter und Zustand der Bäume abhängt, wird empfohlen den von Shulski et al. (2004) definierten Standardwert von $\alpha = 0,6$ zu verwenden.
- Der Einfluss der Oberflächenalbedo im UV-Spektralbereich auf die erythemgewichtete Bestrahlungsstärke war nur schwach ausgeprägt und führte zu einer Verminderung / Erhöhung von 1%. Auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes des Auftragnehmers wird empfohlen, die implementierten Standardwerte für die implementierten Oberflächen und Fassadentypen zu benutzen.
- Es stellte sich heraus, dass es empfehlenswert ist, verschiedene atmosphärische UV-Szenarien zu rechnen. Dies umfasst verschiedene meteorologische Situationen, d.h. unbewölkt und bewölkt, eine unterschiedliche Ozonschichtdicke sowie ein unterschiedlicher Aerosolgehalt. Damit werden verschiedene atmosphärische Situationen mit einer unterschiedlichen Gewichtung zwischen diffuser und direkter Strahlung berücksichtigt, wodurch sich UV-Schutzmaßnahmen und damit verbundene Abschattungen unterschiedlich auf einen Ort auswirken können. Dadurch wird eine höhere Bandbreite von atmosphärischen Situationen bei der Beurteilung der UV-Exposition berücksichtigt und Aussagen basierend auf einem spezifischen atmosphärischen Szenario werden möglicherweise relativiert.

6 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die Abbildung der Umgebungsbedingungen im Modell, insbesondere der Bäume, hat einen signifikanten Einfluss auf die Güte der Modellergebnisse. Dazu sind insbesondere Informationen über die Kronenform sowie die räumliche Verteilung der Blattflächendichte, wichtige Parameter. Aus Planungssicht wäre es wünschenswert, spezifische Informationen über die entsprechenden typischen Bauparameter in Abhängigkeit von der Baumart und dem Baumalter in einer Datenbank zu hinterlegen, um den Einfluss von Einzelbäumen auf die Abschattung der UV-Strahlung besser abbilden zu können.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor des UV-Modells resultiert aus der Behandlung von Mehrfachreflexionen. In PALMs Strahlungstransfermodell werden Reflexionen an Gebäudewänden ausschließlich als diffus angenommen. Da der Großteil der verbauten Fassadenmaterialien als ein diffuser Strahler angenommen werden kann, werden Reflexionen im Modell entsprechend der Physik repräsentiert. Anders verhält es sich jedoch an Fensterflächen, welche die einfallende solare Strahlung im UV-Spektralbereich zum Teil direkt reflektieren (Turner und Parisi, 2018a), sodass eine Abhängigkeit vom Einfallswinkel besteht. Durch Reflexionen an Glasflächen können sogenannte „Hotspots“ entstehen, in denen die UV-Bestrahlungsstärke in einem abgegrenzten Bereich deutlich erhöht sein kann (Wai et al., 2017). Dadurch dass in PALM alle Oberflächen als diffus reflektierend angenommen werden, kann zum jetzigen Zeitpunkt dieser Effekt nicht im Modell abgebildet werden und bedarf weiterer Entwicklungsarbeit sowie dedizierter Messungen an realen Gebäuden, um die physikalische Plausibilität der Modellergebnisse belegen zu können.

Der raumwinkelabhängige Ansatz basierend auf der Strahldichte überschätzt die UV-Bestrahlungsstärke in abgeschatteten Bereichen teilweise signifikant. Die Gründe dafür sind noch nicht abschließend geklärt. Es wird vermutet, dass dies auf eine Unterschätzung des direkten Strahlungsanteils bei gleichzeitiger Überschätzung des diffusen Strahlungsanteils im bereitgestellten atmosphärischen UV-Szenario zurückgeführt werden kann. Eine weiterführende Untersuchung dieses Sachverhalts wäre sinnvoll.

In Kap. 3.6 wurde gezeigt, dass die Modellergebnisse nicht von der Größe des Modellgebietes abhängen und weiter entfernt liegende Gebäude keinen Einfluss auf die UV-Strahlungsstärke im untersuchten Bereich haben. Demnach ist es ausreichend, nur den für die Abschattung relevanten Bereich zu modellieren, um die erforderlichen Rechenressourcen möglichst gering zu halten. Allerdings impliziert dies, dass der spätere Anwender vorab eine Analyse der Umgebung vornehmen und eigenständig entscheiden muss, welcher Bereich für die Abschattung tatsächlich relevant ist. Da dieses Vorgehen einen gewissen Grad an Willkür impliziert, sollte dieser Arbeitsschritt in Zukunft automatisiert oder zumindest technisch unterstützt werden. Zum Beispiel könnte während der Präprozessierung der Eingangsdaten technisch basiert abgeschätzt werden, wie groß der zu erwartende Fehler bei der Nichtberücksichtigung bestimmter Gebäude und Bäume wäre.

6.1 Praktische Anwendung des Modells

Das durchgeführte Projekt zielte auf die Implementierung eines UV-Strahlungsmodells in das mikroskalige Modell PALM ab. PALM ist auf städtische Anwendungen, wie z.B. die Beurteilung des thermischen Komforts, ausgelegt und wird von Modellierexperten weltweit angewendet.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Durchführung einer PALM-Simulation technische Kenntnisse von Linux Betriebssystemen, GIS-Datenverarbeitung und ein generelles Modellverständnis von PALM erfordert sowie ein grundlegendes Verständnis der physikalischen und numerischen Aspekte einer UV-Simulation. Die Anwendung des Modells setzt zum jetzigen Zeitpunkt allerdings eine Reihe an technischen, numerischen und physikalischen Grundkenntnissen voraus (siehe Kap. 5). Die Anwendung des Modells findet nicht in einem gesteuerten Menü statt, sondern auf Nutzerterminal- und Programmiererebene. Aufgrund der relativ hohen Anforderungen ist daher der potentielle Nutzerkreis des entwickelten UV-Strahlungsmodell zum jetzigen Zeitpunkt auf Modellierexperten mit physikalisch-technischem Hintergrund beschränkt. Das definierte Ziel des BfS ist jedoch eine flächige Anwendung des UV-Strahlungsmodells durch Stadtplaner und Architekten in Kommunen, Behörden oder Planungsbüros. In diesem Fall kann nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass die technischen und physikalischen Kenntnisse ausreichen, um das in PALM integrierte UV-Modell in einem begrenzten Arbeitszeitrahmen erfolgreich anzuwenden. Aus Sicht des Auftragnehmers leitet sich daraus weiterer Handlungsbedarf ab, die Hürden bei der Anwendung des UV-Strahlungsmodells so weit abzusenken, dass auch Nutzer ohne tiefere technischen, physikalischen Hintergrund in der Lage sind, belastbare Aussagen über die UV-Strahlungsbelastung in urbanen Umgebungen zu tätigen.

6.2 Mögliche Weiterentwicklungen

Um die Akzeptanz des UV-Modells und damit dessen Nutzung bei Planungsmaßnahmen zur Beurteilung der UV-Strahlungsbelastung zu erreichen, sollte das UV-Modell in einem begrenzten Arbeitsaufwand anwendbar sein und belastbare Ergebnisse nach einer angemessenen Zeitspanne zur Verfügung stellen. Die Dokumentation des Modells muss leicht verständlich sein und die Komplexität der Anwendung sollte auf ein Mindestmaß reduziert sein. Weiterhin dürfen keine technischen Hürden bei der Anwendung des Modells bestehen. Das definierte Ziel wäre es, ein UV-Strahlungsmodell zur Verfügung zu stellen, bei dem die Anwender keinen Kontakt mehr zur Programmiererebene haben, sondern nur noch den Tag im Jahr sowie das zu untersuchende UV-Szenario auswählen müssen. Um dies zu erreichen, sind aus Sicht des Auftragnehmers folgende Anforderungen zu erfüllen und Aspekte zu bedenken:

- Bereitstellung einer Version des UV-Strahlungsmodells, welches unabhängig von PALM ausgeführt werden kann. Technisch gesehen müssten dazu alle Abhängigkeiten zu anderen PALM-Modulen (Fortran Dateien) entfernt werden, sodass der UV-Strahlungs-Code separat kompiliert und ausgeführt werden kann. Die Einbindung des UV-

Strahlungsmodells in den PALM-Code soll dabei aber für Expertennutzer bestehen bleiben. Damit sollen Softwareabhängigkeiten reduziert werden und die Steuerung sowie die Konfiguration des Modells vereinfacht werden.

- Das UV-Strahlungsmodell sollte soweit vorkonfiguriert sein, dass Anwender nur noch entscheiden müssen, welcher Tag im Jahr simuliert werden soll. Alle weiteren Konfigurationen, die z.B. die sphärische Auflösung, das numerische Gitter oder numerische Parameter betreffen, sollten auf entsprechende Werte vorkonfiguriert sein.
- Es sollte eine umfangreiche Datenbank mit atmosphärischen UV-Szenarien erstellt werden, die einen weiten Bereich der möglichen Anwendungs-Szenarien abdeckt, sodass die Anwender kein UV-Szenario mehr erstellen müssen.
- Geostatische Eingangsdaten unterschiedlicher Formate sollten für den zu untersuchenden Bereich automatisch in ein PALM-lesbares Format konvertiert werden. Änderungen der statischen Eingangsdaten, z.B. Änderungen an den Gebäuden oder Pflanzungen von Bäumen sollten leicht über eine grafische Schnittstelle hinzugefügt werden können. Eine Einbindung der Eingangsdatenerzeugung in GIS-Systeme wäre denkbar
- Die Ergebnisse der Simulation sollten grafisch aufbereitet werden. Dazu sollten die Modellergebnisse automatisch analysiert werden. Bereiche mit einer erhöhten UV-Belastung sollten zudem graphisch hervorgehoben werden.
- Um Softwareabhängigkeiten zu umgehen, aufwendige Installationen zu vermeiden so wie die dauerhaft reibungslose Bereitstellung der Software sicher zu stellen, wäre es denkbar, eine *Software-as-a-Service* (SaaS) Lösung zu entwickeln, bei der das Modell auf administrierten Servern ausgeführt wird und den Anwendern ein Web-Interface zur unkomplizierten Nutzung bereitgestellt wird. Ein SaaS Ansatz wäre in diesem Anwendungsszenario auch denkbar, um die Umgebungsdaten zu definieren sowie entsprechende Planungsszenarien zu entwickeln und diese dann in eine PALM-lesbare geostatische Eingangsdatei zu konvertieren.

Literatur

- Environment and Climate Change Canada, URL <https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/cgi-bin/c/lf2/selectMap?lang=e&clf=2&printversion=false&printfullpage=false&accessible=off&type1=du&day1=19&month1=05&year1=2023&howmany1=3&interval1=1&intervalunit1=d&hem1=n&type2=no&day2=10&month2=07&year2=2023&howmany2=1&interval2=1&intervalunit2=d&hem2=n&mapsiz e=100>, last access: 2023-09-20, 2023.
- Akinlabi, E., Maronga, B., Giometto, M. G., und Li, D.: Dispersive Fluxes Within and Over a Real Urban Canopy: A Large-Eddy Simulation Study, *Boundary-Layer Meteorology*, 185, 93–128, <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00725-6>, 2022.
- Almeida, D. R. A. d., Stark, S. C., Shao, G., Schietti, J., Nelson, B. W., Silva, C. A., Gorgens, E. B., Valbuena, R., Papa, D. d. A., und Brancalion, P. H. S.: Optimizing the Remote Detection of Tropical Rainforest Structure with Airborne Lidar: Leaf Area Profile Sensitivity to Pulse Density and Spatial Sampling, *Remote Sensing*, 11, <https://doi.org/10.3390/rs11010092>, 2019.
- Auvinen, M., Kuula, J., Grönholm, T., Sühning, M., und Hellsten, A.: High-resolution large-eddy simulation of indoor turbulence and its effect on airborne transmission of respiratory pathogens— Model validation and infection probability analysis, *Physics of Fluids*, 34, 015 124, <https://doi.org/10.1063/5.0076495>, 2022.
- Bais, A. F., McKenzie, R. L., Bernhard, G., Aucamp, P. J., Ilyas, M., Madronich, S., und Tourpali, K.: Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 14, 19–52, <https://doi.org/10.1039/C4PP90032D>, 2015.
- Bais, A. F., Lucas, R. M., Bornman, J. F., Williamson, C. E., Sulzberger, B., Austin, A. T., Wilson, S. R., Andradý, A. L., Bernhard, G., McKenzie, R. L., Aucamp, P. J., Madronich, S., Neale, R. E., Yazar, S., Young, A. R., de Grijl, F. R., Norval, M., Takizawa, Y., Barnes, P. W., Robson, T. M., Robinson, S. A., Ballaré, C. L., Flint, S. D., Neale, P. J., Hylander, S., Rose, K. C., Wäng berg, S.-, Häder, D.-P., Worrest, R. C., Zepp, R. G., Paul, N. D., Cory, R. M., Solomon, K. R., Longstreth, J., Pandey, K. K., Redhwi, H. H., Torikai, A., und Heikkilä, A. M.: Environmental effects of ozone depletion, UV radiation and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, update 2017, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 17, 127–179, <https://doi.org/10.1039/C7PP90043K>, 2018.
- Baldermann, C. und Lorenz, S.: UV-Strahlung in Deutschland: Einflüsse des Ozonabbaus und des Klimawandels sowie Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung, *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 62, 639–645, <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02934-w>, 2019.
- Baldermann, C., Laschewski, G., und Groß, J. U.: Auswirkungen des Klimawandels auf nicht übertragbare Erkrankungen durch veränderte UV-Strahlung, *Journal of Health Monitoring*, pp. 61–81, <https://doi.org/10.25646/11647>, 2023.
- BfS: Wirkungen von UV-Strahlung, URL https://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/wirkung/einfuehrung/einfuehrung_node.html, last access: 2023-11-28, 2023.
- Blumthaler, M. und Ambach, W.: SOLAR UVB-ALBEDO OF VARIOUS SURFACES, *Photochemistry and Photobiology*, 48, 85–88, <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1988.tb02790.x>, 1988.
- Brantley, S. T. und Young, D. R.: Linking light attenuation, sunflecks, and canopy architecture in mesic shrub thickets, *Plant Ecology*, 206, 225–236, <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9637-9>, 2010.
- Buras, R., Dowling, T., und Emde, C.: New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 112, 2028–2034, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.03.019>, 2011.
- Calcabrini, A., Ziar, H., Isabella, O., und Zeman, M.: A simplified skyline-based method for estimating the annual solar energy potential in urban environments, *Nature Energy*, 4, 206–215, <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0318-6>, 2019.

- Clough, S. A., Shephard, M. W., Mlawer, E. J., Delamere, J. S., Iacono, M. J., Cady-Pereira, K., Boukabara, S., und Brown, P. D.: Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes, Short Communication, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 91, 233–244, 2005.
- Cordero, R. R., Seckmeyer, G., Pissulla, D., Dasilva, L., und Labbe, F.: Uncertainty evaluation of the spectral UV irradiance evaluated by using the UVSPEC radiative transfer model, *Optics Communications*, 276, 44–53, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.04.008>, 2007.
- Degünther, M., Meerkötter, R., Albold, A., und Seckmeyer, G.: Case Study on the Influence of Inhomogeneous Surface Albedo on UV Irradiance., *Geophysical Research Letters*, 25, 3587–3590, URL <https://elib.dlr.de/8957/>, IIDO-Berichtsjahr=1999,, 1998.
- Deng, X., Zhou, X., Tie, X., Wu, D., Li, F., Tan, H., und Deng, T.: Attenuation of ultraviolet radiation reaching the surface due to atmospheric aerosols in Guangzhou, *Chinese Science Bulletin*, 57, 2759–2766, <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5172-5>, 2012.
- Downs, N., Parisi, A., Turner, J., und Turnbull, D.: Modelling ultraviolet exposures in a school environment, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 7, 700–710, <https://doi.org/10.1039/B801685B>, 2008.
- Downs, N. J., Butler, H. J., Baldwin, L., Parisi, A. V., Amar, A., Vanos, J., und Harrison, S.: A site-specific standard for comparing dynamic solar ultraviolet protection characteristics of established tree canopies, *MethodsX*, 6, 1683–1693, [https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.07.013,31406685\[pmid\]](https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.07.013,31406685[pmid]), 2019.
- Eleftheratos, K., Kapsomenakis, J., Zerefos, C. S., Bais, A. F., Fountoulakis, I., Dameris, M., Jöckel, P., Haslerud, A. S., Godin-Beekmann, S., Steinbrecht, W., Petropavlovskikh, I., Brogniez, C., Leblanc, T., Liley, J. B., Querel, R., und Swart, D. P. J.: Possible Effects of Greenhouse Gases to Ozone Profiles and DNA Active UV-B Irradiance at Ground Level, *Atmosphere*, 11, <https://doi.org/10.3390/atmos11030228>, 2020.
- Eltbaakh, Y. A., Ruslan, M., Alghoul, M., Othman, M., Sopian, K., und Fadhel, M.: Measurement of total and spectral solar irradiance: Overview of existing research, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1403–1426, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.018>, 2011.
- Emde, C., Buras-Schnell, R., Kylling, A., Mayer, B., Gasteiger, J., Hamann, U., Kylling, J., Richter, B., Pause, C., Dowling, T., und Bugliaro, L.: The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1), *Geoscientific Model Development*, 9, 1647–1672, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1647-2016>, 2016.
- Engelsen, O. und Kylling, A.: FAST simulation tool for ultraviolet radiation at the Earth's surface, *SPIE Digital Library*, URL <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Optical-Engineering/volume-44/issue-04/041012/Fast-simulation-tool-for-ultraviolet-radiation-at-the-earths-surface/10.1117/1.1885472.full>, 2005.
- Erdélyi, R., Wang, Y., Guo, W., Hanna, E., und Colantuono, G.: Three-dimensional SOLar RADIation Model (SORAM) and its application to 3-D urban planning, *Solar Energy*, 101, 63–73, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.023>, 2014.
- Flint, S. und Caldwell, M.: Solar UV-B and visible radiation in tropical forest gaps: measurements partitioning direct and diffuse radiation, *Global Change Biology*, 4, 863–870, <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00191.x>, 1998.
- Fountoulakis, I., Diémoz, H., Siani, A.-M., Laschewski, G., Filippa, G., Arola, A., Bais, A. F., De Backer, H., Lakkala, K., Webb, A. R., De Bock, V., Karppinen, T., Garane, K., Kapso menakis, J., Koukouli, M.-E., und Zerefos, C. S.: Solar UV Irradiance in a Changing Climate: Trends in Europe and the Significance of Spectral Monitoring in Italy, *Environments*, 7, URL <https://www.mdpi.com/2076-3298/7/1/1>, 2020.
- Fröhlich, D. und Matzarakis, A.: Calculating human thermal comfort and thermal stress in the PALM model system 6.0, *Geoscientific Model Development*, 13, 3055–3065, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3055-2020>, 2020.
- Fröhlich, D. und Matzarakis, A.: Spatial Estimation of Thermal Indices in Urban Areas - Basics of the SkyHelios Model, *Atmosphere*, 9, <https://doi.org/10.3390/atmos9060209>, 2018.

- Gao, W., Grant, R. H., Heisler, G. M., und Slusser, J. R.: A geometric ultraviolet-B radiation transfer model applied to vegetation canopies, *Agronomy Journal*, 94, 475, 2002.
- Gehrke, K. F., Sühling, M., und Maronga, B.: Modeling of land–surface interactions in the PALM model system 6.0: land surface model description, first evaluation, and sensitivity to model parameters, *Geoscientific Model Development*, 14, 5307–5329, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5307-2021>, 2021.
- GFS: Global Forecasting System, URL <https://www.wetterzentrale.de/reanalysis.php?map=2&model=avn&var=1&jaar=2023&maand=5&dag=19&uur=0000&h=0&nmaps=24>, last access: 2023-11-23, 2023.
- Grant, R. H.: Biologically Active Radiation in the Vicinity of a Single Tree, *Photochemistry and Photobiology*, 65, 974–982, <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1997.tb07957.x>, 1997.
- Grant, R. H. und Heisler, G. M.: Effect of Cloud Cover on UVB Exposure Under Tree Canopies: Will Climate Change Affect UVB Exposure?, *Photochemistry and Photobiology*, 82, 487–494, <https://doi.org/10.1562/2005-07-07-RA-604>, 2006.
- Grant, R. H., Heisler, G. M., und Gao, W.: Ultraviolet sky radiance distributions of translucent overcast skies, *Theoretical and Applied Climatology*, 58, 129–139, <https://doi.org/10.1007/BF00865013>, 1997a.
- Grant, R. H., Heisler, G. M., und Gao, W.: Clear sky radiance distributions in ultraviolet wavelength bands, *Theoretical and Applied Climatology*, 56, 123–135, <https://doi.org/10.1007/BF00866422>, 1997b.
- Grant, R. H., Heisler, G. M., und Gao, W.: Estimation of Pedestrian Level UV Exposure Under Trees, *Photochemistry and Photobiology*, 75, 369–376, [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2002\)0750369EOPLUE2.0.CO2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2002)0750369EOPLUE2.0.CO2), 2002.
- Grant, R. H., Heisler, G. M., Gao, W., und Jenks, M.: Ultraviolet leaf reflectance of common urban trees and the prediction of reflectance from leaf surface characteristics, *Agricultural and Forest Meteorology*, 120, 127–139, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.025>, uV Radiation and its impacts on Agriculture and Forests, 2003.
- Gronemeier, T. und Sühling, M.: On the Effects of Lateral Openings on Courtyard Ventilation and Pollution - A Large-Eddy Simulation Study, *Atmosphere*, 10, <https://doi.org/10.3390/atmos10020063>, 2019.
- Hasegawa, J., Kumakura, E., und Ichinose, M.: Ultraviolet Radiation on an Urban Street with High Rise Buildings in Asia, *Procedia Environmental Sciences*, 38, 627–634, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.142>, sustainable synergies from Buildings to the Urban Scale, 2017.
- Heisler, G. M. und Grant, R. H.: Ultraviolet radiation in urban ecosystems with consideration of effects on human health, *Urban Ecosystems*, 4, 193–229, <https://doi.org/10.1023/A:1012210710900>, 2000.
- Heldens, W., Burmeister, C., Kanani-Sühling, F., Maronga, B., Pavlik, D., Sühling, M., Zeidler, J., und Esch, T.: Geospatial input data for the PALM model system 6.0: model requirements, data sources and processing, *Geoscientific Model Development*, 13, 5833–5873, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5833-2020>, 2020.
- Hellsten, A., Ketelsen, K., Sühling, M., Auvinen, M., Maronga, B., Knigge, C., Barmpas, F., Tsegas, G., Moussiopoulos, N., und Raasch, S.: A nested multi-scale system implemented in the large eddy simulation model PALM model system 6.0, *Geoscientific Model Development*, 14, 3185–3214, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3185-2021>, 2021.
- Herman, J., Cede, A., Huang, L., Ziemke, J., Torres, O., Krotkov, N., Kowalewski, M., und Blank, K.: Global distribution and 14-year changes in erythemal irradiance, UV atmospheric transmission, and total column ozone for 2005–2018 estimated from OMI and EPIC observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 8351–8380, <https://doi.org/10.5194/acp-20-8351-2020>, 2020.

- Holick, M. F.: Sunlight and vitamin D for bone health and prevention of autoimmune diseases, cancers, and cardiovascular disease, *The American Journal of Clinical Nutrition*, 80, 1678S–1688S, <https://doi.org/10.1093/ajcn/80.6.1678S>, 2004.
- ISO/CIE:17166: Erythema reference action spectrum and standard erythema dose, ISO/CIE 17166:2019(E), International Organization for Standardization/Commission Internationale de l'Éclairage, URL <https://cie.co.at/publications/erythema-reference-action-spectrum-and-standard-erythema-dose-0>, 2019.
- Kadasch, E., Sühring, M., Gronemeier, T., und Raasch, S.: Mesoscale nesting interface of the PALM model system 6.0, *Geoscientific Model Development*, 14, 5435–5465, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5435-2021>, 2021.
- Khan, B., Banzhaf, S., Chan, E. C., Forkel, R., Kanani-Sühring, F., Ketelsen, K., Kurppa, M., Maronga, B., Mauder, M., Raasch, S., Russo, E., Schaap, M., und Sühring, M.: Development of an atmospheric chemistry model coupled to the PALM model system 6.0: implementation and first applications, *Geoscientific Model Development*, 14, 1171–1193, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1171-2021>, 2021.
- Krč, P., Resler, J., Sühring, M., Schubert, S., Salim, M. H., und Fuka, V.: Radiative Transfer Model 3.0 integrated into the PALM model system 6.0, *Geoscientific Model Development*, 14, 3095–3120, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3095-2021>, 2021.
- Kurppa, M., Hellsten, A., Roldin, P., Kokkola, H., Tonttila, J., Auvinen, M., Kent, C., Kumar, P., Maronga, B., und Järvi, L.: Implementation of the sectional aerosol module SALSA2.0 into the PALM model system 6.0: model development and first evaluation, *Geoscientific Model Development*, 12, 1403–1422, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1403-2019>, 2019.
- Lamy, K., Portafaix, T., Josse, B., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Revell, L., Akiyoshi, H., Bekki, S., Hegglin, M. I., Jöckel, P., Kirner, O., Liley, B., Marecal, V., Morgenstern, O., Stenke, A., Zeng, G., Abraham, N. L., Archibald, A. T., Butchart, N., Chipperfield, M. P., Di Genova, G., Deushi, M., Dhomse, S. S., Hu, R.-M., Kinnison, D., Kotkamp, M., McKenzie, R., Michou, M., O'Connor, F. M., Oman, L. D., Pitari, G., Plummer, D. A., Pyle, J. A., Rozanov, E., Saint-Martin, D., Sudo, K., Tanaka, T. Y., Visionsi, D., und Yoshida, K.: Clear-sky ultraviolet radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 10 087–10 110, <https://doi.org/10.5194/acp-19-10087-2019>, 2019.
- Lazovich, D., Vogel, R. I., Berwick, M., Weinstock, M. A., Anderson, K. E., und Warshaw, E. M.: Indoor Tanning and Risk of Melanoma: A Case-Control Study in a Highly Exposed Population, *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 19, 1557 – 1568, 2010.
- Lee, D. W. und Downum, K. R.: The spectral distribution of biologically active solar radiation at Miami, Florida, USA, *International Journal of Biometeorology*, 35, 48–54, <https://doi.org/10.1007/BF01040963>, 1991.
- Lindberg, F. und Holmer, B.: Sky View Factor Calculator - User Manual, URL https://www.researchgate.net/publication/267768871_Sky_View_Factor_Calculator, 2012.
- Lipponen, A., Ceccherini, S., Cortesi, U., Gai, M., Keppens, A., Masini, A., Simeone, E., Tirelli, C., und Arola, A.: Advanced Ultraviolet Radiation and Ozone Retrieval for Applications—Surface Ultraviolet Radiation Products, *Atmosphere*, 11, <https://doi.org/10.3390/atmos11040324>, 2020.
- Lorenz, S.: persönliche Mitteilung, 09. Oktober 2023, 2023.
- Mac-Mary, S., Sainthillier, J.-M., Jeudy, A., Sladen, C., Williams, C., Bell, M., und Humbert, P.: Assessment of cumulative exposure to UVA through the study of asymmetrical facial skin aging, *Clinical interventions in aging*, 5, 277–284, URL <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20924436>, 20924436[pmid], 2010.
- Madronich, S., McKenzie, R., Björn, L., und Caldwell, M.: Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 46, 5–19, [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(98\)00182-1](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(98)00182-1), 1998.

- Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., Kanani-Sühring, F., Keck, M., Ketelsen, K., Letzel, M. O., Sühring, M., und Raasch, S.: The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives, *Geoscientific Model Development*, 8, 2515–2551, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2515-2015>, 2015.
- Maronga, B., Banzhaf, S., Burmeister, C., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Fuka, V., Gehrke, K. F., Geletič, J., Giersch, S., Gronemeier, T., Groß, G., Heldens, W., Hellsten, A., Hoffmann, F., Inagaki, A., Kadasch, E., Kanani-Sühring, F., Ketelsen, K., Khan, B. A., Knigge, C., Knoop, H., Krč, P., Kurppa, M., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferott, J., Resler, J., Rissmann, S., Russo, E., Salim, M., Schrempf, M., Schwenkel, J., Seckmeyer, G., Schubert, S., Sühring, M., von Tils, R., Vollmer, L., Ward, S., Witha, B., Wurps, H., Zeidler, J., und Raasch, S.: Overview of the PALM model system 6.0, *Geoscientific Model Development*, 13, 1335–1372, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1335-2020>, 2020.
- Matzarakis, A. und Matuschek, O.: Sky view factor as a parameter in applied climatology rapid estimation by the SkyHelios model, *Meteorologische Zeitschrift*, 20, 39–45, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/0499>, 2011.
- Mayer: Radiative transfer in the cloudy atmosphere, *EPJ Web of Conferences*, 1, 75–99, <https://doi.org/10.1140/epjconf/e2009-00912-1>, 2009.
- Mayer, B. und Degünther, M.: Comment on “Measurements of erythemal irradiance near Davis Station, Antarctica: Effect of inhomogeneous surface albedo”, *Geophysical Research Letters*, 27, 3489–3490, <https://doi.org/10.1029/1999GL011171>, 2000.
- Mayer, B. und Kylling, A.: Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 1855–1877, <https://doi.org/10.5194/acp-5-1855-2005>, 2005.
- Mayer et al.: libRadtran user’s guide, URL <http://www.libradtran.org/doc/libRadtran.pdf>, 2022.
- Meteotest: Meteotest AG, URL <https://meteotest.ch/en/division/solar-climate>, last access: 2023-11-23, 2023.
- Na, H. R., Heisler, G. M., Nowak, D. J., und Grant, R. H.: Modeling of urban trees’ effects on reducing human exposure to UV radiation in Seoul, Korea, *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 785–792, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.05.009>, 2014.
- Neale, R. E., Barnes, P. W., Robson, T. M., Neale, P. J., Williamson, C. E., Zepp, R. G., Wilson, S. R., Madronich, S., Andrady, A. L., Heikkilä, A. M., Bernhard, G. H., Bais, A. F., Aucamp, P. J., Banaszak, A. T., Bornman, J. F., Bruckman, L. S., Byrne, S. N., Foereid, B., Häder, D.-P., Hollestein, L. M., Hou, W.-C., Hylander, S., Jansen, M. A. K., Klekociuk, A. R., Liley, J. B., Longstreth, J., Lucas, R. M., Martinez-Abaigar, J., McNeill, K., Olsen, C. M., Pandey, K. K., Rhodes, L. E., Robinson, S. A., Rose, K. C., Schikowski, T., Solomon, K. R., Sulzberger, B., Ukpebor, J. E., Wang, Q.-W., Wängberg, S.-Å., White, C. C., Yazar, S., Young, A. R., Young, P. J., Zhu, L., und Zhu, M.: Environmental effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation, and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, Update 2020, *Photochemical & Photobiological Sciences*, 20, 1–67, <https://doi.org/10.1007/s43630-020-00001-x>, 2021.
- Norman, J. M. und Welles, J. M.: Radiative Transfer in an Array of Canopies, *Agronomy Journal*, 75, 481–488, <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500030016x>, 1983.
- Parisi, A. V., Sabburg, J., Kimlin, M. G., und Downs, N.: Measured and modelled contributions to UV exposures by the albedo of surfaces in an urban environment, *Theoretical and Applied Climatology*, 76, 181–188, <https://doi.org/10.1007/s00704-003-0012-9>, 2003.
- Parisi, A. V., Amar, A., Downs, N. J., Igoe, D. P., Harrison, S. L., und Turner, J.: Development of a model for calculating the solar ultraviolet protection factor of small to medium sized built shade structures, *Building and Environment*, 147, 415–421, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.010>, 2019.
- Pfafferott, J., Rißmann, S., Sühring, M., Kanani-Sühring, F., und Maronga, B.: Building indoor model in PALM-4U: indoor climate, energy demand, and the interaction between buildings and the urban

- microclimate, *Geoscientific Model Development*, 14, 3511–3519, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3511-2021>, 2021.
- Qi, Y., Heisler, G. M., Gao, W., Vogelmann, T. C., und Bai, S.: Characteristics of UV-B Radiation Tolerance in Broadleaf Trees in Southern USA, 2010.
- Resler, J., Krč, P., Belda, M., Juruš, P., Benešová, N., Lopata, J., Vlček, O., Damašková, D., Eben, K., Derbek, P., Maronga, B., und Kanani-Sühling, F.: PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model, *Geoscientific Model Development*, 10, 3635–3659, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3635-2017>, 2017.
- Resler, J., Eben, K., Geletič, J., Krč, P., Rosecký, M., Sühling, M., Belda, M., Fuka, V., Halenka, T., Huszár, P., Karlický, J., Benešová, N., Ďoubalová, J., Honzáková, K., Keder, J., Nápravníková, v., und Vlček, O.: Validation of the PALM model system 6.0 in a real urban environment: a case study in Dejvice, Prague, the Czech Republic, *Geoscientific Model Development*, 14, 4797–4842, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4797-2021>, 2021.
- Riechelmann, S., Schrempf, M., und Seckmeyer, G.: Simultaneous measurement of spectral sky radiance by a non-scanning multidirectional spectroradiometer (MUDIS), *Measurement Science and Technology*, 24, 125 501, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/12/125501>, 2013.
- Ruggaber, A., Dlugi, R., Bott, A., Forkel, R., Herrmann, H., und Jacobi, H.-W.: Modelling of radiation quantities and photolysis frequencies in the aqueous phase in the troposphere, *Atmospheric Environment*, 31, 3137–3150, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00058-7), eUMAC: European Modelling of Atmospheric Constituents, 1997.
- Ruiz-Arias, J. A. und Gueymard, C. A.: Worldwide inter-comparison of clear-sky solar radiation models: Consensus-based review of direct and global irradiance components simulated at the earth surface, *Solar Energy*, 168, 10–29, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.008>, advances in Solar Resource Assessment and Forecasting, 2018.
- Rundel, R.: Computation of Spectral Distribution and Intensity of Solar UV-B Radiation, in: *Stratospheric Ozone Reduction, Solar Ultraviolet Radiation and Plant Life*, edited by Worrest, R. C. und Caldwell, M. M., pp. 49–62, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1986.
- Salim, M. H., Schubert, S., Resler, J., Krč, P., Maronga, B., Kanani-Sühling, F., Sühling, M., und Schneider, C.: Importance of radiative transfer processes in urban climate models: a study based on the PALM 6.0 model system, *Geoscientific Model Development*, 15, 145–171, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-145-2022>, 2022.
- Scheirer, R. und Macke, A.: On the accuracy of the independent column approximation in calculating the downward fluxes in the UVA, UVB and PAR spectral ranges, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 14 301–14 312, <https://doi.org/doi:10.1029/2001JD900130>, 2001.
- Scheirer, R. und Macke, A.: Cloud inhomogeneity and broadband solar fluxes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108, <https://doi.org/10.1029/2002JD003321>, 2003.
- Schmalwieser, A. W., Enzi, C., Wallisch, S., Holawe, F., Maier, B., und Weihs, P.: UV Exposition During Typical Lifestyle Behavior in an Urban Environment, *Photochemistry and Photobiology*, 86, 711–715, <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2010.00714.x>, 2010.
- Schrempf, M.: persönliche Mitteilung, 07. Februar 2022, 2022a.
- Schrempf, M.: persönliche Mitteilung, 20. Juni 2022, 2022b.
- Schrempf, M., Thuns, N., Lange, K., und Seckmeyer, G.: Impact of Orientation on the Vitamin D Weighted Exposure of a Human in an Urban Environment, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14, <https://doi.org/10.3390/ijerph14080920>, 2017.
- Seckmeyer, G. und Luiz, E. W.: Machbarkeitsstudie zur mikroskaligen Modellierung von UV-Belastungen in urbanen Umgebungen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zur Hautkrebsprävention, Bundesamt für Strahlenschutz, Digitales Online Repository und Informations-System, URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2021091028627>, 2021.

- Shulski, M. D., Walter-Shea, E. A., Hubbard, K. G., Yuen, G. Y., und Horst, G.: Penetration of Photosynthetically Active and Ultraviolet Radiation into Alfalfa and Tall Fescue Canopies, *Agronomy Journal*, 96, 1562–1571, <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1562>, 2004.
- Sivarajah, S., Thomas, S. C., und Smith, S. M.: Evaluating the ultraviolet protection factors of urban broadleaf and conifer trees in public spaces, *Urban Forestry & Urban Greening*, 51, 126–137, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126679>, 2020.
- Slone, D. H.: Physical factors in cataractogenesis: ambient ultraviolet radiation and temperature., *Investigative ophthalmology & visual science*, 27 5, 781–90, 1986.
- Smolskaia, I., Nunez, M., und Michael, K.: Measurements of erythemal irradiance near Davis Station, Antarctica: Effect of inhomogeneous surface albedo, *Geophysical Research Letters*, 26, 1381–1384, <https://doi.org/10.1029/1999GL900190>, 1999.
- Stamnes, K., Tsay, S.-C., Wiscombe, W., und Jayaweera, K.: Numerically stable algorithm for discrete ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media, *Appl. Opt.*, 27, 2502–2509, <https://doi.org/10.1364/AO.27.002502>, 1988.
- Stamnes, K., Tsay, S.-C., Wiscombe, W., und Laszlo, I.: DISORT, a General-Purpose Fortran Program for Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer in Scattering and Emitting Layered Media: Documentation of Methodology, 2000.
- Strahlenschutzkommission: Schutz des Menschen vor den Gefahren solarer UV-Strahlung und UV Strahlung in Solarien – Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung, BANz AT 27.11.2018 B2, URL [urn:nbn:de:101:1-2018111911051946447143](https://www.bfs.de/urn:nbn:de:101:1-2018111911051946447143), 2016.
- Sühling, M., Krč, P., und Resler, J.: persönliche Mitteilung, 28. August 2023, 2023.
- Toomey, S., Gies, H., und Roy, C.: UVR protection offered by shade cloths and polycarbonates, *Radiat. Prot. Aust.*, 13, 50–54, cited by 12, 1995.
- Turnbull, D. und Parisi, A.: Increasing the ultraviolet protection provided by shade structures, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 78, 61–67, <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2004.09.002>, 2005.
- Turnbull, D. J. und Parisi, A. V.: Spectral UV in public shade settings., *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, 69 1, 13–9, 2003.
- Turner, J. und Parisi, A. V.: Measuring the influence of UV reflection from vertical metal surfaces on humans, *Photochemical & Photobiological Sciences*, 8, 62–69, <https://doi.org/10.1039/b814006e>, 2009.
- Turner, J. und Parisi, A. V.: Improved method of ultraviolet radiation reflection measurement for non-horizontal urban surfaces, *Measurement Science and Technology*, 23, 045 701, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/4/045701>, 2012.
- Turner, J. und Parisi, A. V.: Ultraviolet Radiation Albedo and Reflectance in Review: The Influence to Ultraviolet Exposure in Occupational Settings, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, <https://doi.org/10.3390/ijerph15071507>, 2018a.
- Turner, J. und Parisi, A. V.: Investigation of correlation of broadband UVA reflection to broadband visible reflection for a variety of surfaces in the built environment, *Building and Environment*, 136, 259–268, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.062>, 2018b.
- Turner, J., Parisi, A., und Turnbull, D.: Reflected solar radiation from horizontal, vertical and inclined surfaces: Ultraviolet and visible spectral and broadband behaviour due to solar zenith angle, orientation and surface type, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 92, 29–37, <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2008.03.006>, 2008.
- UC2: Praxispartner Kommunen, URL <https://www.uc2-program.org/en/node/50>, last access: 2023-11-23, 2021.

- UV-Schutz-Bündnis: Vorbeugung gesundheitlicher Schäden durch die Sonne - Verhältnisprävention in der Stadt und auf dem Land: Grundsatzpapier des UV-Schutz-Bündnisses, URL <https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2017031414248>, 2017.
- Vitt, R., Laschewski, G., Bais, A. F., Diémoz, H., Fountoulakis, I., Siani, A.-M., und Matzarakis, A.: UV-Index Climatology for Europe Based on Satellite Data, *Atmosphere*, 11, URL <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/7/727>, 2020.
- Wagner, J. E., Angelini, F., Blumthaler, M., Fitzka, M., Gobbi, G. P., Kift, R., Kreuter, A., Rieder, H. E., Simic, S., Webb, A., und Weihs, P.: Investigation of the 3-D actinic flux field in mountainous terrain, *Atmospheric research*, 102, 300–310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.07.008>, 26412915[pmid], 2011.
- Wai, K., Yu, P. K. N., und se. Lam, K.: Reduction of Solar UV Radiation Due to Urban High-Rise Buildings – A Coupled Modelling Study, *PLoS ONE*, 10, 2015.
- Wai, K., Yu, P. K., und Chan, P.-M.: Urban UV environment in a sub-tropical megacity – A measurement and modelling study, *Results in Physics*, 7, 2705–2710, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.07.055>, 2017.
- Wanner, L., De Roo, F., Sühling, M., und Mauder, M.: How Does the Choice of the Lower Boundary Conditions in Large-Eddy Simulations Affect the Development of Dispersive Fluxes Near the Surface?, *Boundary-Layer Meteorology*, 182, 1–27, <https://doi.org/10.1007/s10546-021-00649-7>, 2022.
- Weihs, P., Wagner, J. E., Schreier, S. F., Rieder, H. E., Angelini, F., Blumthaler, M., Fitzka, M., Gobbi, G. P., Kift, R., Kreuter, A., Simic, S., und Webb, A. R.: The influence of the spatial resolution of topographic input data on the accuracy of 3-D UV actinic flux and irradiance calculations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 2297–2312, <https://doi.org/10.5194/acp-12-2297-2012>, 2012.
- Wild, M., Wacker, S., Yang, S., und Sanchez-Lorenzo, A.: Evidence for Clear-Sky Dimming and Brightening in Central Europe, *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092216, <https://doi.org/10.1029/2020GL092216>, e2020GL092216 2020GL092216, 2021.
- Xie, Y. und Sengupta, M.: A Fast All-sky Radiation Model for Solar applications with Narrowband Irradiances on Tilted surfaces (FARMS-NIT): Part I. The clear-sky model, *Solar Energy*, 174, 691–702, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.056>, 2018.
- Xie, Y., Sengupta, M., und Wang, C.: A Fast All-sky Radiation Model for Solar applications with Narrowband Irradiances on Tilted surfaces (FARMS-NIT): Part II. The cloudy-sky model, *Solar Energy*, 188, 799–812, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.058>, 2019.
- Yang, X., Heisler, G. M., Montgomery, M. E., Sullivan, J. H., Whereat, E. B., und Miller, D. R.: Radiative properties of hardwood leaves to ultraviolet irradiation, *International Journal of Biometeorology*, 38, 60–66, <https://doi.org/10.1007/BF01270660>, 1995.
- Yoshimura, H., Zhu, H., Wu, Y., und Ma, R.: Spectral properties of plant leaves pertaining to urban landscape design of broad-spectrum solar ultraviolet radiation reduction, *International Journal of Biometeorology*, 54, 179–191, <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0267-7>, 2010.

Anhang A - UV-Eingabedatei für PALM im NetCDF-Format

Im Folgenden wir ein Beispiel für die UV-Eingabedatei gegeben. Die angegebenen Werte sind an dieser Stelle beispielhaft und dienen rein der Veranschaulichung.

Globale Attribute

```
title: clear-sky summer scenario with moderate ozone depth
author: pecanode GmbH
institution: pecanode
creation_date: 29.05.2022
comment: none
rotation_angle: 0
uvspec_version: 1.0
references: Mayer et al. (2005)
```

Dimensionen

```
sun_zenith = 90      # sun zenith angles on file
wavelength = 120    # wavelength
view_zenith = 90    # cosine of view direction of sensor in zenith
view_azimuth = 60   # view direction of sensor in azimuth

float sun_zenith(sun_zenith)
    sun_zenith:long_name = "sun_zenith"
    sun_zenith:units = "degree"

float view_zenith(view_zenith)
    view_zenith:long_name = "view_zenith"
    view_zenith:units = "degree"

float view_azimuth(view_azimuth)
    view_azimuth:long_name = "view_azimuth"
    view_azimuth:units = "degree"

float wavelength(wavelength)
    wavelength:long_name = "wavelength"
    wavelength:units = "nm"
```

Variablen

```
float uv_dir_irradiance(sun_zenith,wavelength)
    uv_dir_irradiance:long_name = "uv_dir_irradiance"
    uv_dir_irradiance:units = mW m-2 nm-1
    uv_dir_irradiance:_FillValue = -9999.9

float uv_diff_irradiance(sun_zenith,wavelength)
    uv_diff_irradiance:long_name = "uv_diff_irradiance"
    uv_diff_irradiance:units = mW m-2 nm-1
    uv_diff_irradiance:_FillValue = -9999.9

float uv_radiance(sun_zenith,wavelength,view_zenith,view_azimuth)
    uv_radiance:long_name = "uv_radiance"
    uv_radiance:units = mW m-2 nm-1 sr-1
    uv_radiance:_FillValue = -9999.9
```

Anhang B - PALM Ausgabevariablen

Im Folgenden werden die erforderlichen globalen Attribute zur Beschreibung der PALM-Ausgabedaten sowie die Dimensionen und Variablen zur Speicherung der modellierten Daten im NetCDF-Format definiert.

Globale Attribute

```
title: clear-sky summer scenario with moderate ozone depth
author: pecanode GmbH
institution: pecanode
creation_date: 29.05.2022
comment: none
rotation_angle: 0
palm_version: 22.04
references: Maronga et al. (2020)
```

Dimensionen

```
x = 1000
y = 1000
time = 24

float x(x)
    x:long_name = "x dimension of model domain"
x:axis = "X"
    x:units = "m"

float y(y)
    y:long_name = "y dimension of model domain"
y:axis = "Y"
    y:units = "m"

float zu1_xy(zu1_xy) ;
    zu1_xy:units = "meters" ;
    zu1_xy:axis = "Z"

float time(time)
    time:long_name = "output time since reference point"
    time:axis = "T"
    time:units = "s"
```

Variablen

```
float uv_ewir1*_xy(time,zu1_xy,y,x)
uv_ewir1*_xy:long_name = "erythemally weighted UV irradiance"
uv_ewir1*_xy:units = mW/m2
uv_ewir1*_xy:_FillValue = -9999.9

float uv_ewir2*_xy(time,zu1_xy,y,x)
uv_ewir2*_xy:long_name = "erythemally weighted UV irradiance"
uv_ewir2*_xy:units = mW/m2
uv_ewir2*_xy:_FillValue = -9999.9

float uv_ir1*_xy(time,zu1_xy,y,x)
uv_ir1*_xy:long_name = "UV irradiance"
uv_ir1*_xy:units = W/m2
uv_ir1*_xy:_FillValue = -9999.9

float uv_ir2*_xy(time,zu1_xy,y,x)
```



```
uv_ir2*_xy:long_name = "UV irradiance"  
uv_ir2*_xy:units = W/m2  
uv_ir2*_xy:_FillValue = -9999.9
```

Anhang C - PALM Konfigurationsdatei für das Evaluierungsszenario am 19.05.2023

```
&initialization_parameters
  dx          = 0.25,
  dy          = 0.25,
  dz          = 0.25,
  nx          = 599,
  ny          = 599,
  nz          = 120,

  latitude    = 48.21989474492405,
  longitude   = 11.588214484572875,
  origin_date_time = '2023-05-19 00:00:00 +02',
  rotation_angle = 0.0,

  initializing_actions = 'set_constant_profiles',

  dt_spinup      = 10.0,
  spinup_pt_amplitude = 1.0,
  spinup_pt_mean   = 278.15,
  spinup_time     = 86400.0,
  data_output_during_spinup = .T.,

  topography = 'read_from_file',
  allow_roughness_limitation = .T.,
/

&runtime_parameters
  end_time = 1.0, ! Simulation time of 3D simulation

  dt_do2d_xy = 100.0,
  section_xy = 1,
  skip_time_data_output = 0.0,
  netcdf_data_format = 5,

  data_output = 'uv_ewir1*_xy', 'uv_ewir2*_xy',
               'uv_ir1*_xy',   'uv_ir2*_xy',
/

&radiation_parameters
  radiation_scheme = 'clear-sky',
  dt_radiation = 100.0,

  raytrace_discrete_azims = 60,
  raytrace_discrete_elevs = 90,

  surface_reflections = .T.,
  localized_raytracing = .T.,
/

&land_surface_parameters
  soil_temperature = 293.5, 293.6, 293.1 293.1, 293.1, 293.1 293.1,
293.1,
  soil_moisture = 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2,
/
```

```
&urban_surface_parameters  
/
```

```
&plant_canopy_parameters  
  canopy_mode      = 'read_from_file',  
/  

```

```
&uv_radiation_parameters  
  uv_integration_method = 'from_radiance from_irradiance',  
  num_reflections = 5,  
/  

```

Anhang D - uv2palm Konfigurationsdatei für das Evaluierungsszenario am 19.05.2023

```
data_files_path: /home/libRadtran-2.0.4/data
atmosphere_file: /home/libRadtran-2.0.4/data/atmmod/afglms.dat
source_solar: /home/libRadtran-2.0.4/data/solar_flux/atlas_plus_modtran
albedo: 0.05
altitude: 0.5
mol_modify: 03 350. DU
pressure: 1023
day_of_year: 139
sza: # zenith angle of the sun
  lower_limit: 0
  upper_limit: 90
  step_size: 1 # 1 degree steps in SZA
phi0: 0.0 # sun is in the South
umu:
  lower_limit: 0
  upper_limit: 90
  step_size: 1 # 1 degree steps in view zenith
phi:
  lower_limit: 0
  upper_limit: 360
  step_size: 6 # 6 degree steps in view azimuth
wavelength:
  lower_limit: 280
  upper_limit: 400
  step_size: 1.0 # 1 nm stepsize
# customized output of lambda, spectral irradiance direct and diffuse,
# global irradiance, as well as spectral radiances
output_user: [lambda, edir, edn, eglo, uu]

aerosol_default: true
aerosol_haze: 1 # rural type aerosols in the lowest 2km
aerosol_visibility: 100 # visibility in km
```