

Einfluss der Verschattung auf die Vitamin-D-gewichtete UV-Exposition eines Menschen

Impact of Shadowing on the Vitamin D Weighted Exposure of a Human

Autoren

M. Schrempf, N. Thuns, K. Lange, G. Seckmeyer

Institut

Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover

Bibliografie

DOI <https://doi.org/10.1055/s-0043-105258> |

Online-Publikation: 29.8.2017 | Akt Dermatol 2018; 44: 204–209

© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 0340-2541

Korrespondenzadresse

Dipl.-Met. Michael Schrempf, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover
schrempf@muk.uni-hannover.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die Vitamin-D₃-gewichtete UV-Exposition eines aufrecht stehenden Menschen wurde für ausgewählte urbane Umgebungen bestimmt, um den Einfluss der Verschattung durch Gebäude oder Bewuchs auf die Exposition zu untersuchen. Die Exposition wird berechnet unter Berücksichtigung der Strahldichte, also der Strahlungsenergie von direkter Sonnenstrahlung und diffuser Himmelsstrahlung aus verschiedenen Einfallswinkel und Azimutwinkeln und der 3D-Geometrie eines Modellmenschen. Die Verschattung wird durch Hemisphären-Bilder bestimmt, die mithilfe einer Fotokamera mit

Fischaugenobjektiv aufgenommen wurden, wobei angenommen wird, dass die Strahlung verschatteter Himmelssegmente vernachlässigbar klein ist. Dadurch werden den Himmel verdeckende Hindernisse räumlich hochaufgelöst erfasst und als Input in das Expositionsmodell eingegeben. Die Vitamin-D₃-gewichtete Exposition betrug an einer bebauten Straße am 21. Dezember zu Sonnenhöchststand ungefähr 50% und am 21. März 70% von der Exposition einer hindernisfreien Umgebung.

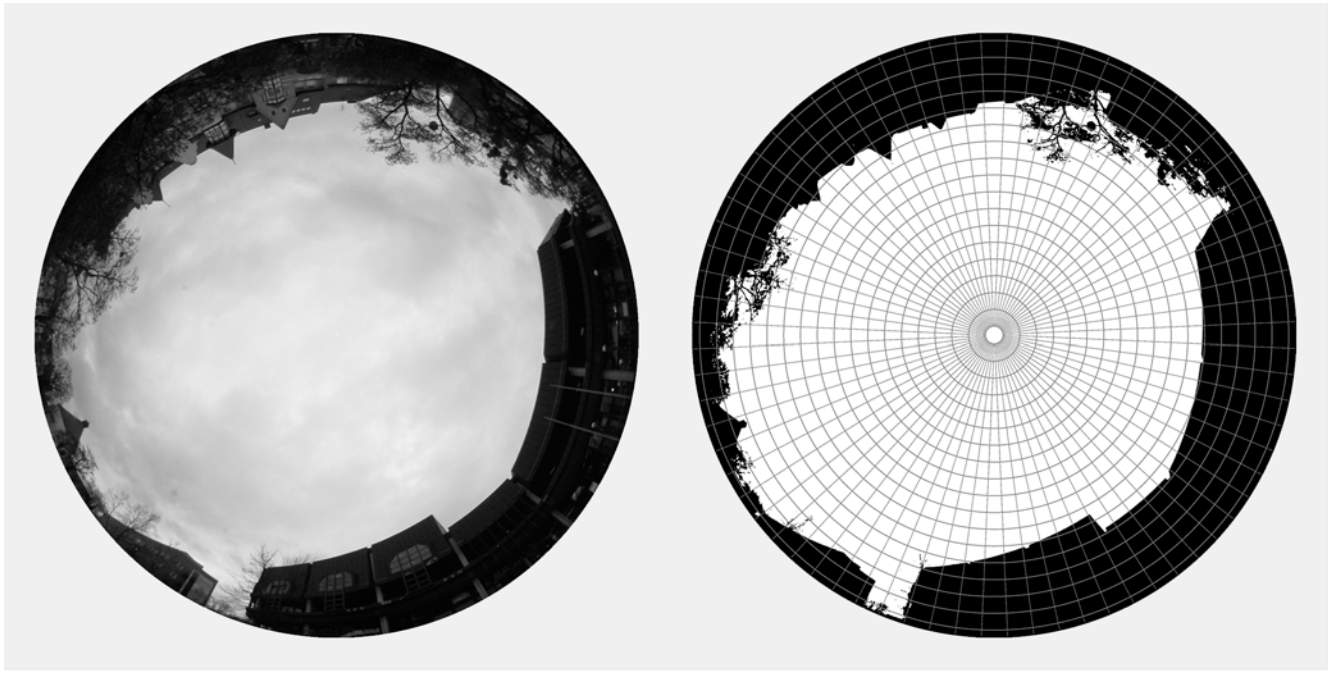
ABSTRACT

The vitamin D₃ weighted UV exposure of a human with vertical posture was calculated for specific urban locations to investigate the impact of shadowing by buildings or vegetation on the exposure. The exposure is calculated by taking into account the radiance, i. e. the radiant energy from direct solar radiation and diffuse sky radiation from different incident and azimuth angles and the 3D geometry of a human model. Obstructions shading the sky radiance are derived in high spatial resolution from hemispherical images, taken by a digital camera with a fisheye lens. The radiance from shaded sky regions is neglected in the UV. The derived shadowing information is used as input in the exposure model. The vitamin D₃ weighted UV exposure on a street within a city on December 21 at noon is approximately 50% and on March 21 at noon 70% of the exposure compared to an unobstructed location.

Einleitung

Ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung) der Sonne zeigt akute und chronische gesundheitliche Auswirkungen auf die Haut, Augen und das Immunsystem [1]. Zu den negativen Folgen einer erhöhten UV-Exposition gehören zum Beispiel Erythembildung, Sonnenbrand und Keratitis [2,3]. Zudem ist die UV-Strahlung ein wichtiger Einflussfaktor bei der Entstehung von Hautkrebs [4,5]. Allerdings wirkt die UV-Strahlung nicht ausschließlich negativ auf den Menschen, sondern ist essentiell für die Produktion von Vitamin D₃ im menschlichen Körper [1,6]. Im Folgenden wird Vitamin D als allgemeiner Begriff benutzt, wohingegen wir den Ausdruck Vitamin D₃ in Zusammen-

hang mit UV-Strahlung verwenden. Es gibt einen nachweislichen Zusammenhang zwischen dem Vitamin-D-Spiegel und verschiedenen Erkrankungen, wie z. B. einigen durch UV-Strahlung induzierten Krebsarten, Herz-Kreislauf-erkrankungen und multipler Sklerose. Daher wird der Vitamin-D-Spiegel im Blut auch als Indikator für das Gesundheitsrisiko o. g. Erkrankungen herangezogen [7]. Prospektive Kohortenstudien zeigen, dass bei erhöhtem Vitamin-D-Spiegel die Anzahl der Herz-Kreislauf-erkrankungen und das Sterblichkeitsrisiko sinken [8–11]. Vitamin D wird vorwiegend durch die UVB-Strahlung (280–315 nm) der Sonne synthetisiert, lediglich 10% des täglichen Vitamin-D-Bedarfs werden über die Nahrung aufgenommen



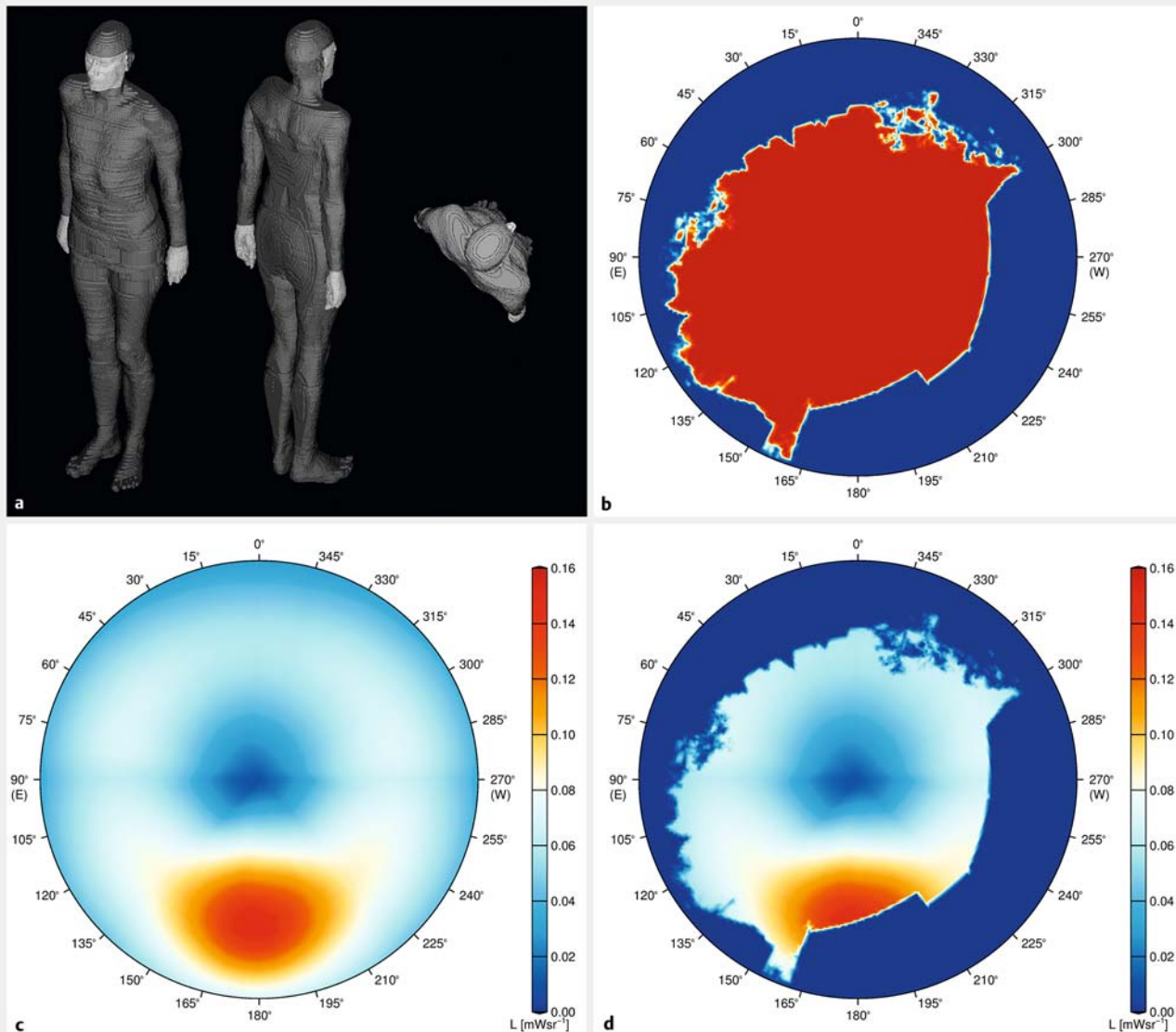
► **Abb. 1** Vor der Universitätsmensa der Leibniz Universität Hannover aufgenommenes Hemisphären-Bild (links) und das daraus ermittelte Verschattungsbild mit den in schwarz dargestellten, den Himmel verdeckenden Hindernissen (rechts). Das durch das Gitter segmentierte Bild veranschaulicht die verschiedenen Richtungen, für die jeweils eine prozentuale Verschattung bestimmt wird. Bei der Berechnung des Verhältnisses von als Hindernis definierter Pixelanzahl zu Gesamtpixelanzahl ergibt sich für den vollständigen Himmel, dass für diesen Fall insgesamt 39% der oberen Hemisphäre durch Hindernisse verdeckt sind.

[12]. Da Vitamin D hauptsächlich durch UVB-Strahlung synthetisiert wird, unterliegt der Vitamin-D-Level tages- und jahreszeitlichen Schwankungen [13, 14]. Dies ist unter anderem auf die Änderung der UV-Strahlung, bedingt durch die zeitliche Änderung des Sonnenzenitwinkels und die Änderung des Bekleidungsverhaltens der Bevölkerung und die damit verbundene Änderung der exponierten Hautfläche zurückzuführen. Als Folge der tief stehenden Sonne und einer zunehmenden Bekleidung in den Wintermonaten weisen mehr als 50% der deutschen Bevölkerung vor allem während der Winterperiode eine Vitamin-D-Insuffizienz auf [15]. In diesem Zusammenhang weisen einige Studien auf den sogenannten „Vitamin-D-Winter“ hin, welcher für die mittleren und nördlichen Breiten von Oktober bis Ende März angegeben wird [13, 16–18]. Innerhalb dieser Periode ist es einem Menschen nicht möglich, genügend Vitamin D über die Strahlungsexposition zu synthetisieren, ohne das Risiko eines Sonnenbrandes einzugehen [19, 20]. Allerdings kann eine Vitamin-D-Insuffizienz nicht ausschließlich während des Winters infolge einer schwachen Strahlungsexposition aufgrund der tief stehenden Sonne auftreten, sondern auch in einer verschatteten Umgebung, wie beispielsweise einem Wald oder einer bebauten Stadt. Die Bestimmung der Vitamin-D₃-Exposition ist erforderlich, um abzuschätzen, ob durch Sonnenstrahlung in typischen Alltagssituationen im Frühjahr ausreichend Vitamin D₃ synthetisiert werden kann. Kawanishi [21] verwendete Hemisphären-Bilder, um die Abschattung des Himmels durch Sonnenschutzvorrichtungen abzuschätzen, untersuchte dabei jedoch den Schutz vor Erythemgewichteter Strahlung auf eine horizontale Ebene. In Parisi et al.

[22] wird die Abschattung des Himmels durch Bäume mit in die Untersuchungen der UV-Exposition einbezogen. Für die Untersuchungen wurden UV-Dosimeter auf rotierende Mannequins angebracht, welche die Statur eines durchschnittlichen Menschen aufweisen. Die Messgeräte wurden auf der gesamten Oberfläche verteilt, um die Exposition auf möglichst allen Körperflächen zu erfassen, jedoch wurde in dieser Studie anstatt der Vitamin-D₃-Exposition die minimale Erythem-Dosis untersucht.

Materialien und Methoden

Um den Einfluss der Abschattung des Himmels durch Gebäude und Bewuchs auf die Vitamin-D₃-Produktion eines Menschen für verschiedene Szenarien zu untersuchen, muss ein Expositionsmodell verwendet werden. Für die Berechnung der Exposition in einer verschatteten Umgebung kann die Strahlung des Himmels nicht durch einen Wert berücksichtigt werden, da je nach Umgebung unterschiedliche Bereiche des Himmels durch Hindernisse verdeckt sind. Die auf eine horizontale Fläche definierte globale Bestrahlungsstärke kann daher nicht verwendet werden. Stattdessen sollte eine multi-direktionale Strahlungsverteilung verwendet werden, weshalb wir die Strahldichte (definiert als Strahlungsenergie pro Raumwinkel und Fläche) verwenden und so das komplexe Strahlungsfeld des Himmels mit einbeziehen. Für die Berechnung der Vitamin-D₃-gewichteten Exposition beziehen wir uns auf das Expositionsmodell von Seckmeyer et al. [23], das die komplexe Geometrie eines Menschen berücksichtigt, indem es die auf den Menschen einfallenden



► **Abb. 2** Visualisierung des Winterkleidung tragenden Modellmensen aus den Blickrichtungen vorne, hinten und oben, wobei nur Gesicht und Hände der Strahlung exponiert sind (a). Das Verschattungsbild der betrachteten Umgebung Universitätsmensa ist unter (b) dargestellt. Die Vitamin-D₃-gewichtete Strahldichtevertielung am 21. Dezember zu Sonnenhöchststand, gewichtet mit der Geometrie eines nach Süden (180°) ausgerichteten, Winterkleidung tragenden Menschen ist unter (c) dargestellt. Die relative Verteilung ähnelt der Verteilung einer höherstehenden Sonne. Die Kombination der gewichteten Strahldichtevertielung aus (c) mit den Verschattungsinformationen aus (b) ist unten rechts dargestellt (d).

de solare Strahldichte über alle Flächenelemente des menschlichen Körpers und die Expositionszeit integriert. Die aus den verschiedenen Himmelsrichtungen sichtbaren Flächenelemente des Modellmensen wurden in Seckmeyer et al. [23] als geometrische Faktoren A_{proj} definiert und berücksichtigen dabei sowohl die Struktur als auch die Bekleidung des Menschen (siehe ► **Abb. 2**). Mathematisch ausgedrückt wird die Exposition berechnet durch:

$$Exposition_{VitD} = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L_{VitD}(\varepsilon, \varphi, t) \cdot A_{proj}(\varepsilon, \varphi) d\varphi d\varepsilon dt \quad (\text{Gleichung 1}),$$

wobei L_{VitD} als Vitamin-D₃-gewichtete Strahldichte und die verschiedenen Himmelsrichtungen durch den Azimutwinkel (φ) und den Höhenwinkel (ε) definiert sind. Der in dieser Studie verwendete Modellmensch trägt Winterbekleidung, sodass nur Gesicht und Hände exponiert sind. In ► **Abb. 2** ist die Visualisierung des Modellmensen aus den 3 Himmelsrichtungen $\varphi = 150^\circ$ und $\varepsilon = 30^\circ$ (Perspektive von vorne), $\varphi = 310^\circ$ und $\varepsilon = 30^\circ$ (Perspektive von hinten) und $\varphi = 310^\circ$ und $\varepsilon = 90^\circ$ (Perspektive von oben) dargestellt.

Zusätzlich wurde für diese Untersuchung die Abschattung des Himmels durch verschiedene Hindernisse berechnet, welche wir im Folgenden als Verschattung definieren. Als Grund-

lage für die Berechnung der Verschattung dienen Hemisphären-Bilder, die mit einer Digitalkamera mit Fischaugenobjektiv aufgenommen wurden. Zur Berechnung der Verschattung wurde ein Hindernisindex mit einem Wertebereich von 0 bis 255 eingeführt (siehe Gleichung 2), der sich aus dem Mittel der Zahlenwerte der roten, grünen und blauen Farbebene eines Pixels berechnet und definiert ist als:

$$\text{Hindernisindex}_{i,j} = \frac{\text{Farbwert Rot}_{i,j} + \text{Farbwert Grün}_{i,j} + \text{Farbwert Blau}_{i,j}}{3} \quad (\text{Gleichung 2}).$$

Pixel mit einem niedrigeren Hindernisindex als 125 werden als Hindernisse und das Komplement als Himmel definiert. Bei Aufnahmen von Hemisphären-Bildern mit vollständig bedecktem Himmel erscheinen Hindernisse im Gegensatz zum Himmel meist relativ dunkel und lassen sich dadurch gut ermitteln. Die Albedo von Oberflächenmaterialien (wie z. B. Asphalt, Beton, Vegetation) beträgt im UVB-Wellenlängenbereich ca. 0,02 – 0,1 [24, 25] und ist somit klein. In Seckmeyer et al. [23] wurde gezeigt, dass aufgrund dieser geringen Albedowerte die Exposition durch Reflexionen am Boden vernachlässigbar gering ist. Wir nehmen für diese Untersuchung ebenfalls an, dass die ermittelten Hindernisse aus Oberflächenmaterialien bestehen, deren Reflexionsgrad vernachlässigt werden kann. Diese Annahme kann nicht für die Betrachtung großflächig verglasteter oder schneebedeckter Oberflächen verwendet werden.

Weil die Auflösung eines Hemisphären-Bildes mit ca. 3 Millionen Pixeln wesentlich höher ist als die räumliche Auflösung der im Expositionsmodell verwendeten Himmelsrichtungen (Himmelssegmente, siehe ► **Abb. 1**), werden die hochauflösenden Verschattungsinformationen jedes Himmelssegments gemittelt.

Die für diese Untersuchung ermittelten Hindernisse der ausgewählten Umgebungen werden analog zu der Methodik von Seckmeyer et al. [23] in das Expositionsmodell integriert, indem für die jeweilige Himmelsrichtung die Verschattungsinfo-

mation mit der Vitamin-D₃-gewichteten Strahldichte und dem geometrischen Faktor multipliziert wird. Mathematisch ausgedrückt wird die durch Verschattungen gewichtete Exposition eines Menschen berechnet durch:

$$A_{\text{proj}}(\varepsilon, \varphi) d\varphi d\varepsilon dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L_{\text{vitD}}(\varepsilon, \varphi, t) \cdot \text{Verschattung}(\varepsilon, \varphi) \cdot \text{Exposition}_{\text{vitD}} \quad (\text{Gleichung 3}).$$

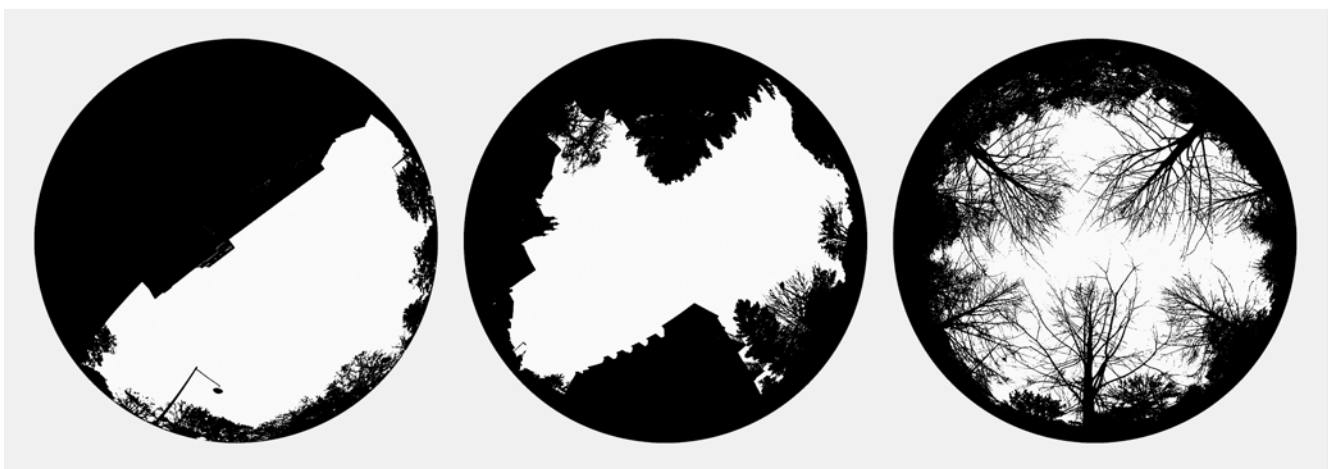
Ergebnisse

Für die Untersuchungen des Einflusses der Verschattung wird die Vitamin-D₃-gewichtete UV-Exposition des 3D-Modellmenschen für vier unterschiedlich verschattete Umgebungen in Hannovers Nordstadt berechnet. Dabei handelt es sich um die Standorte Nienburger Straße, Callinstraße, Universitätsmensa und eine Allee im Georgengarten (siehe auch ► **Tab. 1**). Die aus den Hemisphären-Bildern ermittelten Hindernisse sind in den ► **Abb. 1** und ► **Abb. 3** illustriert.

In ► **Tab. 1** sind die Ergebnisse der Expositionsberechnung für den Frühling und den Winter für einen Winterkleidung tragenden Menschen angegeben, der sich in den vier verschatteten und in einer unverschatteten Umgebungen befindet und nach Süden ausgerichtet ist. Die Vitamin-D₃-gewichtete Exposition ist dabei für 10 Minuten berechnet und in Internationalen Einheiten (IE) angegeben. Zusätzlich sind in ► **Tab. 1** die mit Gleichung 4 berechneten Verschattungsquotienten zwischen den Expositionswerten der verschatteten Umgebungen und einer unverschatteten freien Ebene aufgeführt.

$$\text{Verschattungsquotient} = \frac{\text{Exposition}_{\text{verschattet}}}{\text{Exposition}_{\text{freie Ebene}}} \quad (\text{Gleichung 4})$$

Es ist ersichtlich, dass die Abschattung der Strahldichte durch Hindernisse, wie beispielsweise Gebäude und Bäume, einen starken Einfluss auf die Vitamin-D₃-gewichtete Exposition hat.



► **Abb. 3** Verschattungsbilder der untersuchten Umgebungen Nienburger Straße (links), Callinstraße (Mitte) und Allee im Georgengarten (rechts) in Hannovers Nordstadt (siehe auch ► **Tab. 1**).

► **Tab. 1** Simulierte Werte der Vitamin-D₃-gewichteten Exposition über 10 Minuten zu Sonnenhöchststand für einen nach Süden ausgerichteten, Winterkleidung tragenden Menschen unter Berücksichtigung der Verschattung verschiedener Umgebungen. Des Weiteren ist der Verschattungsquotient der verschatteten Umgebung im Vergleich zu einer unverschatteten Umgebung nach Gleichung 4 aufgeführt.

Umgebung	21. 12. (Winter)			21. 03. (Frühling)	
	freier Himmel [%]	Exposition [IE]	Verschattungsquotient [%]	Exposition [IE]	Verschattungsquotient [%]
Freie Ebene	100 %	15	–	262	–
Nienburger Straße	44 %	8	53	178	68
Callinstraße	45 %	6	40	76	29
Universitätsmensa	61 %	9	60	188	72
Georgengarten	52 %	8	53	149	57

Ein Mensch, der sich am 21. März zu Sonnenhöchststand vor der Universitätsmensa (► **Abb. 1**) befindet und in Richtung Süden ausgerichtet ist, produziert 72 % der Menge an Vitamin D₃, die ein Mensch in einer unverschatteten Umgebung produzieren würde. Im Winter ist die Sonne durch die geringe Sonnenhöhe, je nach Umgebung, durch Hindernisse verdeckt. Infolgedessen kann der direkte Anteil der Solarstrahlung und ein Teil der zirkumsolaren Strahlung den Menschen nicht erreichen (► **Abb. 2**). Dadurch ist, zum Beispiel für den Standort Universitätsmensa, am 21. Dezember der Verschattungsquotient mit 60 % kleiner als im Frühjahr.

In ► **Tab. 1** ist erkennbar, dass Umgebungen mit nahezu gleicher prozentualer Verschattung beziehungsweise nahezu gleichem Anteil an freiem Himmel große Unterschiede in den berechneten Expositionswerten aufweisen können. Der Anteil des freien Himmels der Umgebung Nienburger Straße ist mit 44 % annähernd so groß wie der Anteil der Umgebung Callinstraße mit 45 %, die berechnete Vitamin-D₃-Exposition ist mit 180 IE für die Nienburger Straße jedoch mehr als doppelt so groß. Die für die Expositionsberechnung notwendige Verschattungsinformation des Himmels lässt sich demzufolge nicht mit einer einzigen Zahl beschreiben. Es ist daher von großer Bedeutung, richtungsabhängige Verschattungsinformationen zu verwenden.

Diskussion

Die Strahldichtesimulationen für diese Studie wurden mit dem DISORT-Programmcode des UVSPEC-Modells aus dem LibRadTran-Paket berechnet [26]. Um einfache und allgemeine Situationen für die Studie zu erstellen, wurden die in ► **Tab. 2** aufgelisteten Werte verwendet. Die Ergebnisse ergeben, bei wolkenlosen Situationen mit grundlegenden Atmosphärenbedingungen, äußerst niedrige Werte der Vitamin-D₃-gewichteten Exposition, z. B. ausgedrückt als 10 Minutenwerte in IE, für den 21. Dezember und geringe Werte für den 21. März. Durch veränderte Annahmen zum Zustand der Atmosphäre kommt es teilweise zu höheren oder auch zu geringeren Expositionswerten, z. B. bei einem höheren Wert der Gesamtozonsäule oder einer bewölkten Situation. Außerdem soll erwähnt werden, dass zur Berechnung der Vitamin-D₃-gewichteten Exposition eines Menschen

► **Tab. 2** In dieser Studie verwendete Parameterwerte.

Parameter	21. 12. (Winter)	21. 03. (Frühling)
Sonnenzenitwinkel (Sonnenhöchststand)	75,8°	52,2°
Gesamtozonsäule	300 DU	300 DU
Sichtweite	50 km	50 km
Albedo	0,02	0,02
Tag des Jahres	356	81

zahlreiche Annahmen getroffen wurden, die in Seckmeyer et al. [23] aufgelistet sind.

Obwohl die Bestimmung der individuellen Werte der Exposition mit großen Unsicherheiten verbunden ist, kann die Abschattung des Himmels durch Hindernisse gut durch Hemisphären-Bilder ermittelt werden. In dieser Studie wurde ein nach Süden ausgerichteter Mensch betrachtet, andere Ausrichtungen wurden hier noch nicht untersucht. Da sich die vorliegenden Ergebnisse auf Modellrechnungen beziehen, wäre eine Überprüfung dieser Rechnungen durch Messungen der spektralen Strahldichte wünschenswert. Dafür könnte ein neu entwickeltes Instrument verwendet werden, welches die spektrale Strahldichte in mehr als 100 Richtungen simultan messen kann [27]. Dadurch kann das komplexe und zeitlich verändernde Strahlungsfeld mit einer zeitlichen Auflösung im Sekundenbereich erfasst werden.

Schlussfolgerungen

In dieser Studie wurde eine Methode vorgestellt, mit der sich durch Hemisphären-Bilder den Himmel verdeckende Hindernisse in hoher räumlicher Auflösung ermitteln und in ein Expositionsmodell integrieren lassen. Es wurde gezeigt, dass die Abschattung des Himmels durch Hindernisse einen großen Einfluss auf die Vitamin-D₃-gewichtete Exposition eines Menschen hat.

Für eine realistische Expositionsbestimmung ist die Berücksichtigung der Verschattungen von Umgebungen daher von großer Bedeutung. Die Berechnung der Vitamin-D₃-gewichteten Exposition ergab für verschiedene Orte mit annähernd gleichem Anteil an freiem Himmel Unterschiede von mehr als dem Faktor zwei. Dies zeigt, dass die für die Expositionsbestimmung in einer bebauten Umgebung notwendige Verschattungsinformation nicht durch eine einzige Zahl charakterisiert werden kann. Stattdessen ist die richtungsabhängige Verschattungsinformation ein notwendiger Parameter bei der Expositionsbestimmung eines Menschen.

Interessenkonflikt

Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- [1] Seckmeyer G, Zittermann A, McKenzie R et al. Solar Radiation: 13. Solar radiation and human Health. In: Geuymard C, ed. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. New York: Springer; 2012: 9649–9672
- [2] Lucas RM, McMichael AJ, Armstrong BK et al. Estimating the global disease burden due to ultraviolet radiation exposure. *Int J Epidemiol* 2008; 37: 654–667
- [3] Juzeniene A, Brekke P, Dahlback A et al. Solar radiation and human health. *Rep Prog Phys* 2011; 74: 56
- [4] Lucas R, McMichael T, Smith W et al. Solar Ultraviolet Radiation: Global Burden of Disease from Solar Ultraviolet Radiation. Environmental Burden of Disease Series, No 13. Geneva: World Health Organization; 2006
- [5] Haluza D, Simic S, Höltge J et al. Connectedness to nature and public (skin) health perspectives: Results of a representative, population-based survey among Austrian residents. *Int J Environ Res Public Health* 2014; 11: 1176–1191
- [6] WHO. World Health Organization, International Agency for Research on Cancer. Vitamin D and cancer. IARC Working Group Reports. WHO Press 2008; 5: 148
- [7] IARC, Working Group on Vitamin D. Vitamin D and cancer / a report of the IARC Working Group on Vitamin D. International Agency for Research on Cancer (IARC Working Group Report). Lyon: World Health Organisation; 2008: 449
- [8] Ginde A, Scragg R, Schwartz R et al. Prospective Study of Serum 25-Hydroxyvitamin D Level, Cardiovascular Disease Mortality, and All-Cause Mortality in Older U.S. Adults. *J Am Geriatr Soc* 2009; 57: 1595–1603
- [9] Giovannucci E, Liu Y, Hollis B et al. 25-hydroxyvitamin D and risk of myocardial infarction in men: a prospective study. *Arch Intern Med* 2008; 168: 1174–1180
- [10] Pilz S, Dobnig H, Nijpels G et al. Vitamin D and mortality in older men and women. *Clin Endocrinol* 2009; 71: 666–672
- [11] Wang T, Pencina M, Booth S et al. Vitamin D deficiency and risk of cardiovascular disease. *Circulation* 2008; 117: 503–511
- [12] Biesalski HK, Köhrle J, Schürmann K. Vitamine, Spurenelemente und Mineralstoffe – Prävention und Therapie mit Mikronährstoffen. Georg Thieme Verlag; 2002
- [13] Webb AR, Kift R, Durkin MT et al. The role of sunlight exposure in determining the vitamin D status of the U.K. white adult population. *Br J Dermatol* 2010; 5: 1050–1055
- [14] Wabitsch M, Koletzko B, Moß A. Vitamin-D-Versorgung im Säuglings-, Kindes- und Jugendalter. *Monatsschr Kinderheilkd* 2011; 159: 766–774
- [15] Zittermann A. The estimated benefits of vitamin D for Germany. *Mol Nutr Food Res* 2010; 8: 1164–1171
- [16] Diffey BL. Is casual exposure to summer sunlight effective at maintaining adequate vitamin D status? *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 2010; 26: 172–176
- [17] Webb AR, Kline L, Holick MF. Influence of season and latitude on the cutaneous synthesis of vitamin D₃: Exposure to winter sunlight in Boston and Edmonton will not promote vitamin D₃ synthesis in human skin. *J Clin Endocrinol Metab* 1988; 67: 373–378
- [18] Zeeb H, Greinert R. Übersichtsarbeit: Bedeutung von Vitamin D in der Krebsprävention: Konflikt zwischen UV-Schutz und Anhebung niedriger Vitamin-D-Spiegel? *Deutsches Arzteblatt – Ärztliche Mitteilungen – Ausgabe B* 2010; 107: 638
- [19] Webb AR, Engelsen O. Calculated ultraviolet exposure levels for a healthy vitamin D status. *Photochem Photobiol* 2006; 82: 1697–1703
- [20] McKenzie RL, Liley JB, Björn LO. UV Radiation: Balancing Risks and Benefits. *Photochem Photobiol* 2009; 85: 88–98
- [21] Kawanishi T. Evaluation of Ultraviolet Radiation Protection of a Membrane Structure Using a UC Shade Chart. *Proceedings of ANZASCA2010*, 2010
- [22] Parisi AV, Kimlin MG, Wong J et al. Personal exposure distribution of solar erythemal ultraviolet radiation in tree shade over summer. *Phys Med Biol* 2000; 45: 349
- [23] Seckmeyer G, Schrempf M, Wiczorek A et al. A Novel Method to Calculate Solar UV Exposure Relevant to Vitamin D Production in Humans. *Photochem Photobiol* 2013; 89: 974–983
- [24] Feister U, Grewe R. Spectral albedo measurements in the UV and visible regions over different types of surfaces. *Photochem Photobiol* 1995; 62: 736–744
- [25] McKenzie R, Kotkamp M, Ireland W. Upwelling UV spectral irradiances and surface albedo measurements at Lauder, New Zealand. *Geophys Res Lett* 1996; 23: 1757–1760
- [26] Shettle EP. Models of aerosols, clouds, and precipitation for atmospheric propagation studies. AGARD, Atmospheric Propagation in the UV, Visible, IR, and MM-Wave Region and Related Systems Aspects 14 p (SEE N90-21907 15-32); 1990
- [27] Riechelmann S, Schrempf M, Seckmeyer G. Simultaneous measurement of spectral sky radiance by a non-scanning multidirectional spectroradiometer (MUDIS). *Meas Sci Technol* 2013; 24: 125501