

DREIDIMENSIONALE ERMITTLUNG DES THERMISCHEN KOMFORTS MIT DETAILLIERTER BERECHNUNG DER STRALUNGSTEMPERATUREN AUF BASIS VON MESSDATEN AUS DROHNENBEFLIEGUNGEN

D. Rüdissler¹, T. Weiss¹ und L. Unger²

¹AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich

²Skyability GmbH, Siegendorf, Österreich

KURZFASSUNG

Eine neue Methode und Prozesskette zur Evaluierung des thermischen Komforts, bzw. der Wärmebelastung in urbanem Gebiet wird formuliert und anhand einer Fallstudie in einem städtischen Quartier erprobt. Die Methode berücksichtigt insbesondere die Signifikanz aller relevanten Strahlungseinflüsse in Bezug auf das Hitzeempfinden. Zur möglichst exakten Bestimmung derselben werden anhand von Drohnenbefliegungen radiometrische Messungen vorgenommen. Die ermittelten Daten werden in ein detailliertes 3D-Stadtmodell übertragen und auf Basis eines Monte-Carlo Samplingalgorithmus unter Berücksichtigung der humanen Topologie ausgewertet. Die so errechneten lokalen mittleren Strahlungstemperaturen werden für die Erstellung von hochaufgelösten thermischen Komfortkarten und zur Identifizierung und Beurteilung lokaler Hotspots und relevanter Einflussgrößen herangezogen.

EINLEITUNG

Das Thema des thermischen Komforts, sowohl im Innenraum als auch im Außenbereich, gewinnt rasant an Bedeutung. Die Relevanz wird mit dem subjektiven Terminus „Komfort“ vielfach jedoch nur unzulänglich beschrieben, da die Hitze- oder Kältebelastung, welche mit sehr hohen oder sehr niederen Werten der thermischen Komfortindizes verbunden ist, zu objektivem physiologischem Stress führt. Dieser stellt nicht nur eine Behaglichkeitsbeeinträchtigung dar, sondern kann gravierende gesundheitsrelevante Auswirkungen bis hin zu einem Anstieg der Mortalitätsraten haben. Eine Metastudie der WHO Europe (WHO, 2004) untersuchte die Auswirkungen und Einflussfaktoren von Hitzewellen und empfiehlt eine gezielte Berücksichtigung der mikroklimatischen Auswirkungen bei der Stadtplanung zur Reduktion der Hitzebelastung in Städten.

Für zielgerichtete Optimierungsmaßnahmen, welche sich auf die Reduktion der Hotspots in Form von Intra-Urban-Heat-Islands (IUHI) konzentrieren, ist es notwendig die komplexen Zusammenhänge zu verstehen und die wesentlichen Einflussfaktoren zu identifizieren. Zunehmend wird für diese Aufgabe eine Reihe von Simulationstools eingesetzt. Meist aufbauend auf einen zukunftsweisenden Ansatz, welcher bereits in den 1970er von Fanger (FANGER PO et al., 1970) formuliert wurde, wird mit Hilfe von

numerischen Berechnungen versucht, die für die Auswertung essentielle mittlere Strahlungstemperatur T_{MRT} mit unterschiedlich detaillierten Ansätzen zu bestimmen. Zu nennen sind hier etwa die Verfahren bzw. Tools CityComfort+ (Huang et al., 2014), EnviMet (Toudert, 2005), RayMan (Matzarakis et al., 2010), SOLWEIG (Lindberg et al., 2008) oder Rakha (Rakha et al., 2017).

Für eine umfassende, exakte Simulation urbaner Oberflächentemperaturen wäre es nötig sehr detaillierte und verknüpfte Gleichungssysteme zu lösen. Zudem gilt es eine Vielzahl an Randbedingungen und Materialparameter möglichst exakt festzulegen. Ausgehend von den Randbedingungen Sonneneinstrahlung, Höhenwind, Niederschlag, Bewölkung, Luftfeuchte und allfälligen Wärmequellen entfaltet sich ein sehr komplexer Wärmeaustausch. Für eine adäquate Simulation gilt es die Mechanismen Wärmestrahlung, Konvektion, Wärmeleitung und Wärmespeicherfähigkeit in ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung über einen ausreichend großen Bereich zu simulieren. Es ist daher schwierig mit oben genannten Verfahren belastbare Absolutwerte exakt vorherzusagen. Die Simulationsverfahren eignen sich jedoch gut zur Analyse von Sensitivitäten und Wechselwirkungen.

Das hier vorgeschlagene Verfahren stellt gewissermaßen eine Hybridvariante dar. Grundsätzlich handelt es sich um eine messtechnische Untersuchungsmethode für die Auswertung der Messdaten. Insbesondere für die Ableitung des gesuchten des thermischen Komforts werden jedoch numerische Verfahren eingesetzt, welche in ähnlicher Weise in oben genannten Simulationsprogrammen zur Anwendung gelangen.

Der Entwicklung des Verfahrens wurde die Arbeitshypothese unterlegt, dass die zentrale Einflussgröße bei der Bestimmung des thermischen Komforts in sommerlichen urbanen Umgebungen die mittlere Strahlungstemperatur ist, da die Strahlung in der Wärmebilanz einerseits den größten Wärmestrom darstellt und andererseits den größten räumlichen Variationen unterliegt. Die möglichst exakte Bestimmung dieser Größe stellte deshalb die zentrale Aufgabestellung bei der Entwicklung des Verfahrens dar. Sowohl auf der Empfängerseite (Mensch) als auch auf der Senderseite (Umgebung) wurde eine möglichst verfeinerte Beschreibung angestrebt. Hierfür wurden einerseits richtungsabhängige

Suszeptibilitätsfunktionen auf Basis der menschlichen Topologie bestimmt, andererseits wird das Einstrahlungsfeld, bestehend aus der thermischen Strahlung aller Oberflächen, der atmosphärischen Gegenstrahlung, sowie direkten und diffus reflektierten und gestreuten Sonneinstrahlung, auf Basis der Messdaten mit numerischen Verfahren detailliert ermittelt. Im Verfahren wird getrennt voneinander, aber weitgehend analog die thermische Strahlung (nachfolgend auch als „langwellig“ bezeichnet) und die Solarstrahlung (nachfolgend auch als „kurzwellig“ oder „Globalstrahlung“ bezeichnet) synchron abgearbeitet.

ANISOTROPE STRAHLUNGSSUSZEPTIBILITÄT

Um die richtungsabhängige Strahlungssuszeptibilität des menschlichen Körpers möglichst genau abzubilden, wurde ein dreidimensionales CAD-Modell des menschlichen Körpers erstellt und die Oberflächen in die zwei Kategorien „Haut“ / „Kleidung“ unterteilt. Den so definierten Oberflächen wurden unterschiedliche Emissionsgrade ϵ (langwellig, „lw“) und der kurzwellige Absorptionskoeffizienten α („sw“) zugeordnet. Für Hautflächen, werden die in der Literatur üblichen Werte herangezogen, für die textilen Oberflächen reduzierte Werte verwendet, welche den durchschnittlichen Absorptionseigenschaften üblicher Textilien besser entsprechen. (Zhang et al., 2009) (Watanabe, 2009)

Tabelle 1: angewendete Absorptionskoeff. (sw) und Emissionsgrade (lw)

PARAMETER	HAUT	KLEIDUNG
ϵ (lw)	0,97	0,80
α (sw)	0,70	0,50

Zur Bestimmung der gesamten Strahlungsbilanz, welche zur Ermittlung der mittleren Strahlungstemperatur dient, ist es notwendig auf Basis dieser Annahmen sowohl die integralen effektiven Strahlungsflächen A_{eff} als auch die Richtungsabhängigkeit der Strahlungssuszeptibilität zu ermitteln.

Hierzu wird eine gewichtete Summe über das gesamte 3d-Modell des menschlichen Dummys errechnet. Die Gewichtungsfaktoren bilden die „Strahlungsaktivität“ der einzelnen Oberflächen ab. Einerseits werden diese durch die Absorptionskonstanten ϵ bzw. α gebildet, andererseits durch die ein Integral, welches die „Eigenverschattung“ durch das Modell abbildet. Hierzu wird eine Sichtbarkeitsfunktion v eingeführt, welche für Einstrahlungsrichtungen die durch das Modell selbst obstruiert sind den Wert 0 annimmt, da kein Strahlungsaustausch mit der Umgebung stattfindet. Für nicht obstruierte Richtungen hat v den Wert 1. Unter der Annahme von Lambert’schen Oberflächeneigenschaften, welche für die betreffenden Oberflächen eine gute Näherung darstellen, muss zur korrekten Berücksichtigung aller Raumrichtungen das nach dem Kosinusetz gewichtete hemisphärische

Integral über dem jeweiligen Oberflächensegment A_i gelöst werden.

$$(1) A_{eff, lw} = \sum_i \epsilon_i \int_{A_i} \int_{\Omega} \frac{\cos\theta}{\pi} \cdot v(\omega, p) \cdot d\omega dA = \int_x \int_y \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \frac{\cos\theta}{\pi} \cdot v(\varphi, \theta, x, y) \cdot \sin(\theta) d\theta d\varphi dy dx$$

analog: $(2) A_{eff, sw} = \sum_i \alpha_i \dots$

Die Integrale für die langwellige und die kurzwellige Einstrahlung unterscheiden sich lediglich durch die Absorptionskoeffizienten ϵ_i bzw. α_i der einzelnen Subflächen.

Die Mehrfachintegrale wurden mit Hilfe von Monte-Carlo Integration numerisch mit einer Auflösung von fünf Milliarden Samplingpunkten gelöst.

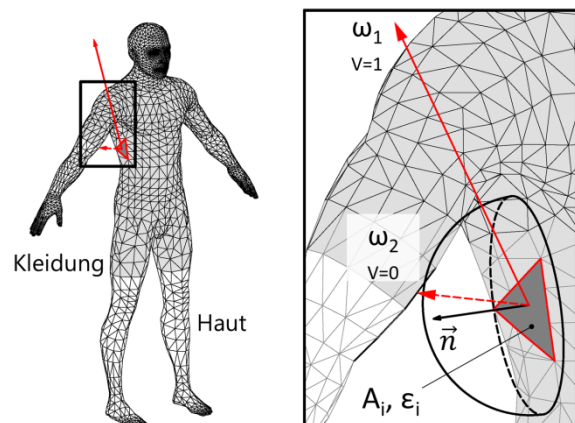


Abbildung 1: Ermittlung der effektiven Strahlungsflächen

Das hier vorgestellte Verfahren unterscheidet sich von gängigen Verfahren (Herrmann et al., 2010) (Lindberg et al., 2008) dadurch, dass die Anisotropie der Körperoberfläche nicht nur bei der Komponente der direkten Sonneinstrahlung berücksichtigt wird, sondern die anisotrope Suszeptibilität auch für die langwelligeren und kurzwelligeren Diffuskomponenten zur Anwendung gelangen. Für diesen Zweck wird auf Basis des eben beschriebenen Modells die richtungsspezifische Strahlungssensitivität als Funktion ermittelt. Hierzu kann bildlich gesprochen gemäß dem Prinzip der Umkehrbarkeit des Strahlengangs die Oberfläche als diffuser Emitter angesehen werden. Die spezifische Ausstrahlung der einzelnen Oberflächensegmente i ist jeweils proportional zu den Koeffizienten ϵ_i (langwellig) bzw. α_i (kurzwellig). Die zweidimensionale Suszeptibilitätsfunktion $S_{2D}(\varphi, \theta)$ entspricht der normierten räumlichen Verteilung der daraus resultierenden Strahlungsdichte. Da nur die Richtung und nicht die Lage der einzelnen Strahlen berücksichtigt wird, ist diese quasi für einen unendlich großen Abstand bestimmt. Da die Verteilung mit dem Abstand jedoch schnell konvergiert, kann diese Funktion auch für den Nahebereich herangezogen werden. Die so ermittelten Funktionen, welche in der

Polardarstellung eine „erdnussförmige“ Gestalt aufweisen, werden ausgehend vom Körperschwerpunkt für das Sampling der mittleren Strahlungstemperatur herangezogen. Wird die Verteilung nicht normiert so stellt diese die effektive projizierte Fläche $P_{2D}(\varphi, \theta)$ der menschlichen Dummies in die einzelnen Raumrichtungen dar (mit der Einheit Quadratmeter).

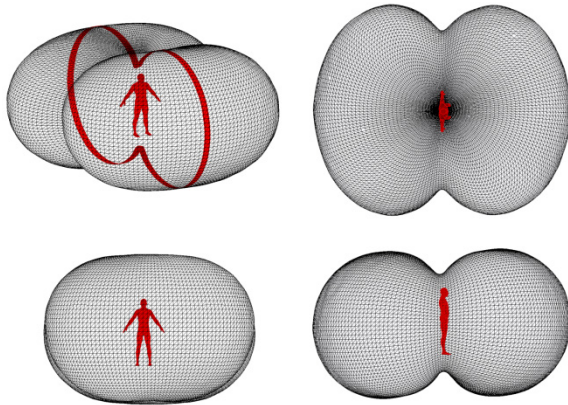


Abbildung 2: 3d Polar-Diagramm der Funktion anisotropen Strahlungssuszeptibilität $S_{2D,sw}(\varphi, \theta)$

Da für die praktische Anwendung die Verwendung der zweidimensionalen Funktion ungeeignet ist - da eine konkrete Orientierung der Person vorgegeben werden müsste - wird eine Mittelung über alle Richtungen φ vorgenommen - entsprechend einer Drehung des Dummies um seine Vertikalachse. Die so erhaltenen verallgemeinerten, rotationssymmetrischen Funktionen $S_{lw}(\theta)$, $S_{sw}(\theta)$ bzw. $P_{sw}(\theta)$ werden für das hier vorgestellte Verfahren herangezogen.

Als Referenz wurde ein Vergleich mit der gebräuchlichen Funktion $f_p(\theta)$ welche vom Sonnenstand abhängig die projizierte Fläche des menschlichen Körpers nach Fanger (FANGER PO et al., 1970) beschreibt, durchgeführt. Da $f_p(\theta)$ lediglich zur Gewichtung des direkten Sonneneinfalls herangezogen wird, ist die Funktion nur für die obere Hemisphäre ($\theta > 0^\circ$) definiert.

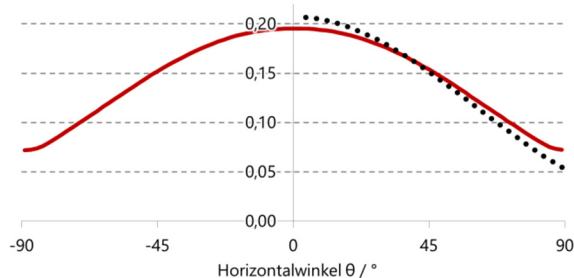


Abbildung 3: Vergleich kurzwellige Suszeptibilität $1/A_{eff,lw} \cdot P_{sw}(\theta)$ (rot) mit $\alpha_{eff}/\epsilon_{eff} \cdot f_p$ nach Fanger (schwarz punktiert)

Für den direkten Vergleich wird die Funktion f_p nach Fanger mit den effektiven Absorptionskoeffizienten $\alpha_{eff}=0,591$ und $\epsilon_{eff}=0,877$ entsprechend unserem Humanmodell gewichtet.

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Die Variabilität unseres Modells ist im Vergleich zur projizierten Fläche nach Fanger etwas reduziert.

BEFLIEGUNG - MESSUNG DER SPEZIFISCHEN AUSSTRAHLUNG

Zur Ermittlung der thermischen Ausstrahlung aller Oberflächen („langwellige Strahlung“), sowie der an den Oberflächen reflektieren Globalstrahlung („kurzwellige Strahlung“) werden sogenannte UAVs eingesetzt. Die Drohnen sind mit einer vollradiometrischen Infrarotkamera, sowie mit einer RGB- oder Hyperspektralkamera ausgestattet.

Für die angestrebte Auswertung im Bodenbereich könnte grundsätzlich auch auf den Einsatz von Drohnen verzichtet werden, da nur die Ausstrahlung der vom Boden aus einsehbaren Oberflächen relevant ist. Die Befliegung mit Drohnen ist jedoch wesentlich effizienter und zusätzliche gewonnene Daten, etwa Dachtemperaturen, können für andere mikro-klimatische Untersuchungen herangezogen werden. Ein wesentlicher Vorteil des Einsatzes von Drohnen besteht in der außerordentlich geringen Zeitspanne welche für die Befliegung notwendig ist. Dies ist für die hier durchgeführte Auswertung vorteilhaft, da sich die Umgebungsbedingungen in der benötigten Zeit nur geringfügig ändern.

Lambert-Strahler Annahme

Sowohl bei der Ermittlung der spezifischen Ausstrahlung der einzelnen Oberflächen, als auch bei der späteren rechnerischen Ermittlung der mittleren Strahlungstemperaturen im Raytracing-Verfahren werden idealisierte Oberflächen im Sinne des Lambert'schen Gesetzes vorausgesetzt, d.h. dass die Strahlungstärke I entsprechend dem Kosinusetz in alle Raumrichtungen abgestrahlt wird: $I(\theta) = L \cdot A \cdot \cos\theta$. Die Strahldichte $L = I(\theta)/(A \cdot \cos\theta)$ ist somit eine Konstante, welche – wie durch Integration über den Halbraum gezeigt werden kann - mit der spezifischen Ausstrahlung M [W/m^2] wie folgt in Relation steht: $L = M/\pi$. Im Folgenden wird deshalb vereinfachend nur noch auf die spezifischen Ausstrahlungen E_{lw} und E_{sw} Bezug genommen, obwohl sowohl für die Detektion, als auch für das Sampling im Raytracingverfahren die Strahldichte ausschlaggebend ist. Der konstante Proportionalitätsfaktor π welcher die beiden Größen verknüpft, wird im Algorithmus an den entsprechenden Stellen berücksichtigt.

Auswertung langwellige Ausstrahlung

Die von den Pixeln der vollradiometrischen Infrarotkamera gelieferten Messwerte können direkt als Maß für die thermische Ausstrahlung der einzelnen Flächen herangezogen werden. Für die weitere Bearbeitung ist die Intensität, also die spezifische Ausstrahlung [W/m^2] der Wärmestrahlung entscheidend. Es ist also nicht die tatsächliche Oberflächentemperatur, sondern die sogenannte Brightness-Temperatur relevant. Sie entspricht jener Temperatur, welcher ein sogenannter schwarzer Strahler ($\epsilon=1$) aufweisen müsste, um die entsprechende Strahlung zu emittieren. Eine Kenntnis der Emissionsgrade der einzelnen Oberflächen ist

deshalb grundsätzlich nicht notwendig. Das Verfahren setzt lediglich die spektrale Konstanz des Emissionsgrades voraus („graue Strahler“). Im thermisch relevanten Spektralbereich bzw. im Detektorbereich von 7,5 – 14µm, trifft dies für die urbanen Oberflächen und die Vegetation gut zu.

Das Verfahren setzt zudem - wie oben erwähnt - voraus, dass sich alle Oberflächen wie perfekte diffuse Strahler verhalten. Die beiden getroffenen Annahmen „grauer Strahler“ (konstanter Emissionsgrad bzgl. Wellenlänge) bzw. „diffuser Strahler“ (konstanter Emissionsgrad bzgl. Abstrahlrichtung) – werden bei thermographischen Auswertungen üblicherweise vorausgesetzt, da sie einerseits wesentliche Vereinfachungen des Berechnungsvorgangs gestatten, und andererseits für mineralische und natürliche raue Oberflächen gut zutreffend sind.

Die größte Abweichung hinsichtlich der getroffenen Annahmen tritt im vorliegenden Verfahren bei den glatten Oberflächen der Verglasungen auf. Für Umgebungen, bei denen Glasflächen signifikante Anteile aller Oberflächen ausmachen, ist eine Weiterentwicklung des Verfahrens zur Berücksichtigung der gerichteten Reflexion - welche insbesondere bei flachen Einfallswinkeln dominant ist - möglich. Voraussetzung hierfür ist eine entsprechende Klassifizierung der Oberflächen als Glasoberflächen im verwendeten Stadtmodell.

Auswertung kurzweilige Ausstrahlung (Reflexion)

Während die im langwelligen Bereich detektierte spezifische Ausstrahlung zum Großteil von den Oberflächen selbst emittiert wird und nur einen geringen Anteil an (diffus) reflektierter Wärmestrahlung enthält, ist die hier als „kurzweilige spezifische Ausstrahlung“ bezeichnete Komponente zur Gänze als diffuse Reflexion der eintreffenden Globalstrahlung zu verstehen. Wiederum werden ideal diffus reflektierende Oberflächen nach dem Lambert'schen Gesetz vorausgesetzt. Ähnlich wie bei der langwelligen thermischen Strahlung stellt diese Annahme für die hier relevanten Oberflächen eine akzeptable Näherung dar. Eine vertiefte Betrachtung müsste sowohl bei der Detektion der Ausstrahlung, als auch bei der späteren Berechnung der Einstrahlung die bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktionen (BRDF) aller Oberflächen spezifisch berücksichtigen.

Hierfür wäre eine Klassifizierung der Oberflächen im Modell, sowie eine genaue Ermittlung und Zuordnung der relevanten BRDF Funktionen für die einzelnen Materialien notwendig. Dies wäre jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden. Wiederum analog zur langwelligen Betrachtung wäre zumindest die gesonderte Betrachtung des gerichteten Reflexionsanteils von Metall und Glasoberflächen als zukünftiger Verfeinerungsschritt sinnvoll.

Zur Detektion der kurzwelligen Ausstrahlung (diffusen Reflexion) wird idealerweise eine Hyperspektralkamera eingesetzt, welche einen möglichst großen Globalstrahlungsbereich von ca. 300nm bis ca. 2500nm spektral hochaufgelöst erfassen kann. Eine gute Näherung kann jedoch auch mit Multispektralkameras, die neben den RGB-Kanälen meist einen zusätzlichen Kanal im nahen Infrarot besitzen, erfasst werden. Ban-Weiss (Ban-Weiss et al., 2014) konnte bei Albedo-Bestimmungen von Dächern zeigen, dass sich mit herkömmlichen RGB-Kameras brauchbare Näherungen erzielen lassen. Lediglich für bestimmte, im sichtbaren Bereich schwach reflektierende Dächer, brachte der Einsatz einer Multispektralkamera mit zusätzlichem NIR-Kanal signifikante Vorteile.

Allgemein formuliert kann die gemessene Abstrahlung als gewichtete Summe der einzelnen Signale s_i auf unterschiedlichen Spektralkanälen formuliert werden.

$$(3) E_{sw} = \sum C_i s_i^{a_i}$$

Die Faktoren C_i gemeinsam mit den Exponenten a_i beschreiben die Sensorempfindlichkeit. In der Regel liegt eine relative gute Linearität des Sensorsignals vor ($a=1$). Da die Anzahl der einzelnen Kanäle beschränkt ist und diese jeweils nur relativ schmale Bänder des Spektrums abdecken, handelt es sich selbst bei idealer Kalibrierung immer nur um ein Näherungsverfahren.

Beim hier präsentierten Anwendungsfall wurde eine handelsübliche RGB-Kamera eingesetzt und die folgende Vereinfachung bei der Berechnung der spezifischen Ausstrahlung durchgeführt:

$$(4) E_{sw} = C_{rgb} \frac{s_r + s_g + s_b}{3}$$

Es wurde somit durch Mittelung der RGB-Kanäle ein Helligkeitswert definiert und dieser mittels des Faktors C_{rgb} linear-proportional in die gesuchte spezifische Ausstrahlung umgerechnet. Die Konstante C_{rgb} kann mit Hilfe eines Kalibriertargets ermittelt, oder – wie von uns angewendet – durch Abgleich mit mehreren Bodenmessungen mit Hilfe von Pyranometern. Die eingesetzte Kamera muss naturgemäß hierfür über einen statischen, nicht-adaptiven Modus verfügen.

Obwohl in unserem Verfahren für die Ermittlung der diffus-reflektierten kurzwelligen Strahlung urbaner Oberflächen eine Reihe von Vereinfachungen notwendig sind, stellt die Methode eine signifikante

Verfeinerung zu gängigen Verfahren dar, bei welchen dieser Anteil entweder nicht explizit, oder nur als konstanter Anteil der direkten Sonneneinstrahlung berücksichtigt wird. Quantitativ spielt die kurzwellige Einstrahlung aus Reflexion an Oberflächen in der Regel eine eher untergeordnete Rolle. Folglich sind auch die Auswirkungen der getroffenen Vereinfachungen auf den Gesamtfehler der Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur und des daraus abgeleiteten Komfortindizes begrenzt.

ABBILDUNG DER SPEZIFISCHEN AUSSTRAHLUNG AUF EIN 3D- MODELL

Bei der Befliegung mit der Drohne wird eine umfangreiche Serie an zweidimensionalen Bildaufnahmen erstellt. Diese enthalten, wie oben beschrieben, einerseits die langwellige thermische Abstrahlung und andererseits die kurzwellige Abstrahlung (als Reflexionsstrahlung) aller einsehbaren Oberflächen (Gebäude, Vegetation, versiegelte und nicht versiegelte Bodenflächen). Zusätzlich wird für das Verfahren ein möglichst dreidimensionales Stadtmodell in ausreichender Genauigkeit benötigt.

Fotogrammetrie

Im ersten Schritt werden die georeferenzierten Bildserien der Befliegung mit Hilfe von fotogrammetrischen Verfahren in dreidimensionale Punktwolken umgewandelt. Zur exakten räumlichen Ausrichtung und Entzerrung der Daten wird das Modell georeferenziert, d.h. die Koordinaten von einzelnen charakteristischen Punkten werden in Lage, als auch Höhe dem Stadtmodell entnommen und den fotogrammetrischen Routinen als Fixpunkte vorgegeben. Die notwendigen Berechnungen können mit Hilfe von kommerziellen Softwarelösungen durchgeführt werden, sind jedoch sehr rechenintensiv. Entscheidend für das Verfahren sind ausreichend kontrastreiche Aufnahmen. Bei den thermographischen Aufnahmen spiegeln diese die Strahlungstemperaturen der einzelnen Oberflächen wider, deshalb können bei geometrisch sehr differenzierten Bereichen, wie etwa Gebäudekanten, unter Umständen nur sehr geringe Kontraste auftreten. Eine hohe Auflösung der Thermographiekamera, sowie Erfahrung im Umgang mit fotogrammetrischen Auswertungen ist somit notwendig. Die Anwendung der fotogrammetrischen Verfahren an thermografischen Aufnahmen ist daher wesentlich aufwändiger und komplexer, kommerzielle Softwarelösungen stoßen hierbei schnell an ihre Grenzen. Umso mehr ist eine sorgfältige Flugplanung, mit gut gewählten Bildüberlappungsbereichen, sowie eine zweckmäßige Unterteilung in Prozessierungsblöcke notwendig.

Im nächsten Schritt werden die aus den RGB-Daten erstellten Punktwolken in dreidimensionale, triang

ulierte Gitternetze umgewandelt. Auch hierfür werden Standardverfahren kommerzieller Software eingesetzt. Dieser Schritt ist notwendig, da die Vegetation (Bäume und Buschwerk) im 3D-Stadtmodell nicht, oder nur unzureichend, abgebildet wird. Zur Komplettierung des Stadtmodells wird die relevante Vegetation „manuell“ aus dem fotogrammetrisch erstellten Gitternetz extrahiert und als zusätzliche Ebene in das bestehende Stadtmodell integriert.

In einem alternativen Ansatz könnte anstelle des 3D-Stadtmodells auch das gesamte erzeugte Gitternetz für die weiteren Berechnungen eingesetzt werden. Der Mehrwert dieses Ansatzes liegt darin, dass das so erstellte Gitternetz aktueller ist und alle Objekte enthält. Der Vorteil bei der Verwendung eines bestehenden Stadtmodells begründet sich in der größeren Klarheit, d.h. einer deutlich geringeren Anzahl an Subflächen und insbesondere in der Verfügbarkeit zusätzlicher semantischer Attribute. D.h. die einzelnen Oberflächen des Modells liegen bereits klassifiziert vor („Fassade“, „Dach“, „Bodenfläche“ etc.). Die zusätzliche Klassifizierung erlaubt einerseits tiefergehende zusätzliche Analysen und andererseits eine Verknüpfung der gemessenen Daten mit dem Stadtmodell, etwa auf Basis des CityGML-Formats.

Abbildung auf das Modell

Im weiteren Bearbeitungsschritt werden die den Punktdaten entsprechenden spezifischen Ausstrahlungswerte auf die Oberflächen des – mit einem neuen Vegetationslayer angereicherten – Stadtmodells abgebildet. Für diesen Prozessschritt wurde ein spezielles Verfahren entwickelt und als Algorithmus implementiert. Zunächst wird das Stadtmodell automatisch verfeinert, d.h. große Subflächen werden so lange unterteilt, bis die gewünschte maximale Dimensionsvorgabe, i.d.R. einige Meter, von allen Kanten aller Subflächen unterschritten wird.

Im nächsten Schritt werden auf Basis von geeignet gewählten Toleranzen, in Form von Abstandsschwellwerten, die sich im Nahebereich befindlichen Punktdaten einzelnen Subflächen zugeordnet. Je nach Gestalt und Größe der Fläche wird hierfür entweder der Minimalabstand oder der Normalabstand als Kriterium herangezogen.

Im letzten Prozessschritt werden die Intensitätswerte der jeweils den Subflächen zugeordneten Punkten gemittelt. Bei einer geringen Anzahl von Punkten erfolgt eine einfache arithmetische Mittelung. Stehen für eine Subfläche viele Punkte zur Verfügung, so wird zur Erhöhung der Genauigkeit eine bilineare Interpolation durchgeführt. Die Information der kurz- und langwelligen spezifischen Ausstrahlung der einzelnen Subflächen liegt also entweder als konstanter Wert oder in Form eines räumlich orientierten Gradienten vor.

ABBILDUNG DER DIFFUSEN HIMMELSTRAHLUNG UND DIREKTEN SONNENEINSTRALUNG

Das eben beschriebene Verfahren wird für alle Boden-, Gebäude- oder Vegetationsflächen angewendet. Für die direkte Solarstrahlung und diffuse Einstrahlung aus dem Himmel werden, sowohl kurzweilig als auch langweilig, modellhafte Beschreibungen gewählt. Einerseits da die messtechnische Erfassung notwendigen Voraussetzungen „Lambert-Strahler“ und „grauer Strahler“ für die Atmosphäre nur mehr bedingt erfüllt sind, und andererseits, weil hierfür brauchbare Modelle zur Verfügung stehen. Die mit dem Modell ermittelten Werte können zudem einerseits durch Messungen mit Pyranometer oder Pyrgeometer validiert bzw. abgeglichen werden, andererseits gestattet es die modellhafte Abbildung einfach Variationen der Himmelseinstrahlung durchzuführen. Für beide Komponenten wurde jeweils ein einfaches, isotropes Beschreibungsmodell gewählt.

Für die langwellige Ausstrahlung aus der Atmosphäre, die sogenannte atmosphärische Gegenstrahlung, ist dies die gebräuchliche Ångström-Formel (VDI, 1994)

$$(5) E_{sky, lw} = \sigma \cdot T^4 \cdot (0.82 - 0.25 \cdot 10^{-0.0945 p}) \cdot \left[1 + 0.21 \left(\frac{N}{8} \right)^{2.5} \right]$$

Wobei T die Lufttemperatur am Boden, p der Wasserdampfpartialdruck am Boden und N der aktuelle Gesamtbedeckungsgrad in Achtel (0-8) ist.

Zur Abbildung der kurzweiligen Globalstrahlung gilt es die diffusen und direkten Anteile der Sonneneinstrahlung zu berücksichtigen. Wiederum wird für die diffuse Sonneneinstrahlung ein einfaches isotropes Modell verwendet. Für die Aufteilung in diffuse und direkte Sonneneinstrahlung wird auf Basis von Messdaten mittels Pyranometer, dem Sonnenstand und dem Reindl-Verfahrens (Reindl et al., 1990) eine Aufteilung in Diffus- ($E_{sky, sw}$) und Direktstrahlung (I_{dir}) vorgenommen. Der Sonnenstand wird auf Basis der geodätischen Koordinaten und der Uhrzeit mit Hilfe des SG2-Algorithmus (Blanc et al., 2012) exakt berechnet.

ERMITTLUNG DER MITTLEREN STRALUNGSTEMPERATUR

Ziel des Verfahrens ist es den wesentlichen Parameter mittlere Strahlungstemperatur T_{MRT} möglichst exakt zu ermitteln. Bei den gängigen Outdoor-Thermal-Comfort Verfahren wird die humane Topologie lediglich zur Ermittlung des Beitrages der direkten Sonneneinstrahlung durch eine sonnenstandsabhängige Funktion $fp(\theta)$ berücksichtigt, meist nach Fanger (FANGER PO et al., 1970), welche die projizierte Fläche eines menschlichen Körpers abbildet. In manchen numerischen Ansätzen (Tanabe et al., 2000)(Kubaha et al., 2004)

werden zusätzlich Integrale über $fp(\theta)$ für vereinfachte Berücksichtigung von reflektierter Globalstrahlung vom Boden, diffuser Himmelseinstrahlung oder rechteckige Bereiche berücksichtigt. In unserem Verfahren wird dieser Ansatz verfeinert und verallgemeinert, d.h. sowohl die humane Topologie, als auch das inhomogene Einstrahlungsprofil der Umgebung wird detailliert bei der Ermittlung sowohl der langweiligen, als auch der kurzweiligen Komponenten berücksichtigt. Zur Differenzierung zum herkömmlichen Ansatz, bezeichnen wir die so erhaltene mittlere Strahlungstemperatur als T_{SMRT} (sampled mean radiant temperature).

Zur effizienten Bestimmung der beiden diffusen Anteile der Strahlungstemperatur wird ein Monte-Carlo Verfahren eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein numerisches, stochastisches Verfahren, welches sich sehr gut zur effizienten Lösung mehrdimensionaler Integrale eignet. Die anhand des menschlichen Modells erhaltenen normierten Suszeptibilitätsfunktionen $S_{lw}(\theta)$ bzw. $S_{sw}(\theta)$ werden hierbei als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für den Elevationswinkel θ zur Erstellung von zufälligen Sampling-Richtungen ($X_{lw,i}$ $X_{sw,i}$) herangezogen. Azimutal (bzgl. des Winkels φ) sind die Richtungen gleichverteilt. Die Methode ist sehr effizient, da auf diese Weise die Anzahl der notwendigen Strahlverfolgungen im Raytracing zur Erreichung einer vorgegebenen Genauigkeit Verfahren minimal wird.

Die Suszeptibilitätsfunktionen S kommen deshalb im Ausdruck (6) zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur T_{SMRT} nicht explizit vor, sondern gehen implizit in die Verteilung der Samplingrichtungen X ein.

Schließlich können wir entsprechend dem von uns gewählten Ansatz die so ermittelte Strahlungstemperatur T_{SMRT} wie folgt formulieren:

$$(6) T_{SMRT} = \left[\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{lw}(X_{lw,i}) + \frac{A_{eff,sw}}{A_{eff,lw}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{sw}(Y_{sw,i}) + \delta_{shadow} \frac{1}{A_{eff,lw}} P_{sw}(\theta_{sun}) I_{dir} \right) \right]^{1/4}$$

Die ersten beiden Summanden beschreiben die Ermittlung der diffusen Komponenten anhand des Raytracingverfahrens. Basierend auf dem Stadtmodell, welches die lang- und kurzweiligen Strahlungsintensitäten der relevanten Oberflächen enthält, und entsprechend der oben eingeführten humanen Strahlungssuszeptibilitätsfunktionen S_{lw} und S_{sw} gewichteten, großen Menge der Samplingrichtungen X werden mit Hilfe eines Raytracing-Algorithmus die mittleren diffusen Einstrahlungswerte errechnet. Gerichtete Reflexionen werden im derzeitigen Verfahren nicht berücksichtigt. Diffuse Reflexionsanteile werden – unter der getroffenen Annahme der

streng Lambert'schen Oberflächeneigenschaften – implizit berücksichtigt, da diese in den messtechnisch ermittelten Intensitäten bereits enthalten sind.

Da das Verfahren variable Absorptionskoeffizienten (α_i, ε_i) für die Oberflächen des menschlichen Modells gestattet, wird der in bisherigen Ansätzen verwendete Quotient α/ε verallgemeinert als $A_{eff,sw}/A_{eff,lw}$ abgebildet (alternativ und äquivalent könnte ein effektiver Emissionsgrad bzw. ein effektiver Absorptionskoeffizient verwendet werden). Der Quotient spiegelt die Proportionalität zwischen der eingestrahelten kurzwelligeren Leistung und der dadurch zusätzlich abgestrahlten langwelligeren Leistung im betrachteten Fall des Strahlungsgleichgewichts wider.

Der dritte Term in Gleichung (6) bildet den Einfluss der direkten Sonnenstrahlung ab. Die Funktion δ_{shadow} nimmt im Schatten den Wert 0 und bei direkter Sonneneinstrahlung den Wert 1 an. Der Wert wird durch ein Raytracing-Sample in Richtung des aktuellen Sonnenstands festgelegt. Der Proportionalitätsfaktor bei diesem Term reduziert sich zu $1/A_{eff,lw}$ da die Gewichtungsfunktion $P_{SW}(\theta)$ die für die kurzwellige Strahlung die effektive, projizierte Fläche bereits implizit enthält.

BERECHNUNG DER THERMISCHEN KOMFORTINDIZES

Zur Ermittlung des thermischen Komforts kann die oben erläuterte Berechnung der Strahlungstemperatur T_{SMRT} hochaufgelöst für jeden Punkt innerhalb des detektierten Gebiets durchgeführt werden. Obwohl eine dreidimensionale Auswertung möglich ist, werden die Berechnungen zweckentsprechend nur zweidimensional für eine „Fußgängerebene“ in 1,1 m Höhe über dem jeweiligen Bodenniveau durchgeführt. Die Berechnung wird mit einer Rasterschrittweite von 1x1 m durchgeführt. An jedem Punkt des Rasters wird das Raytracing-Verfahren zur Ermittlung von T_{SMRT} durchgeführt. Die so ermittelte Strahlungstemperatur stellt gemeinsam mit der Lufttemperatur, dem Wasserdampfpartialdruck und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft die Eingangsparameter zur Berechnung des lokalen UTCI-Index (z.B. Błażejczyk et al., 2013) dar. Dieser spiegelt eine empfundene Temperatur wider und wurde zur objektiven Bewertung von thermischem Komfort, bzw. thermischer Stressbelastung entwickelt. Für die alternative Berechnung des thermischen Komforts gemäß PMV-Index nach Fanger, ist lediglich die ergänzende Festlegung einer Stoffwechselrate, sowie eines Bekleidungs-faktors notwendig.

Die orts aufgelöste Bestimmung oder Beschreibung der Eigenschaften des Luftkörpers, definiert durch Lufttemperatur, Luftfeuchte (Wasserdampfpartialdruck) und Strömungsgeschwindigkeiten, stellt eine große Herausforderung dar. Eine Intra- und Extrapolation von Messdaten auf Basis weniger Messungen

ist schwierig, alternativ könnten Daten aus zusätzlichen CFD-Simulationen integriert werden.

Entsprechend der einleitend angeführten Arbeitshypothese, ist die Variabilität der Luftkörpereigenschaften in Vergleich zur Variabilität der Strahlungstemperatur bei innerstädtischen Gebieten, insbesondere bei Untersuchung von sommerlichen Belastungsszenarien, vergleichsweise gering. Aus diesem Grunde können die Luftkörpereigenschaften für kleinräumig untersuchte Bereiche als konstant angenommen werden. Bei den Messungen zu unserer Fallstudie unter hochsommerlichen Bedingungen konnten diese Annahmen gut belegt werden. Es ist auch anzumerken, dass etwa der Effekt der kühlenden Wirkung einer Luftströmung mit zunehmender Lufttemperatur geringer wird. Proportional sinkt auch die Notwendigkeit der exakten Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit.

ANWENDUNG / FALLSTUDIE GRAZ

Zur Evaluierung unseres Ansatzes wurde die gesamte Prozesskette auf ein innerstädtisches Quartier im Bereich des Platzes „Eisernes Tor“ in Graz, Österreich angewendet. Das Gebiet liegt im Zentrum der Stadt, umfasst historische Gebäude (mit Giebelhöhen bis 30m), einen befahrenen Straßenzug und umfangreiche Fußgängerzonen. Zudem ist das untersuchte Zielgebiet durch eine Vielzahl an z.T. hochwüchsigem Baumbestand gekennzeichnet.

Die Befliegung wurde am 20. August 2019 in der Zeit von 14:15 bis 14:35 durchgeführt. Auf Grund der begrenzten Flugzeit war ein kurzer Zwischenstopp zum Auswechseln der Akkumulatoren notwendig. Zur thermographischen Detektion wurde eine Kamera vom Typ FLIR-T1020 an der Drohne angebracht. Synchron wurden Aufnahmen mit der RGB-Kamera GoPro Hero 6 durchgeführt.

Zeitgleich zur Befliegung wurden an 15 Standorten Messungen der Lufttemperatur, Luftfeuchte und Strömungsgeschwindigkeit der Luft durchgeführt. Auf Grund eines Sensorfehlers konnten die Werte für die Luftfeuchte nicht ausgewertet werden. Aus diesem Grunde wurde der Messwert einer nahegelegenen offiziellen Messstation, mit vergleichbarem Temperaturwert für die Auswertung verwendet. Der Wasserdampfpartialdruck betrug 1726 Pa bei 29,45 °C.

Die Spotmessungen am Boden (in 1,5 m Höhe) wurden an sehr unterschiedlich exponierten Standorten, welche von sonnigem Standort am versiegelten Platz bis zur Messung im Schatten im Park reichen, durchgeführt. Dennoch lagen die ermittelten Lufttemperaturen in einer sehr engen Bandbreite mit Standardabweichung 0,54 °C um den Mittelwert 29,45 °C verteilt. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft wurde mittels omnidirektionalem Anemometer zu (1,29±0,56) m/s bestimmt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Spotmessungen

Standort	von	bis	T _{air} / °C	v _{air} / m/s
MP1	14:43:36	14:44:05	28,95	1,00
MP2	14:09:41	14:10:10	28,54	0,70
MP3	14:34:51	14:35:20	29,19	1,55
MP4	14:33:11	14:33:40	29,79	0,59
MP5	14:31:21	14:31:50	29,77	0,73
MP6	14:27:31	14:28:00	30,00	1,19
MP7	14:28:41	14:29:10	29,68	0,87
MP8	14:22:11	14:22:40	29,39	0,70
MP9	14:24:26	14:24:55	30,47	1,14
MP10	14:25:51	14:26:20	29,91	1,20
MP11	14:36:01	14:36:30	28,93	2,42
MP12	14:37:51	14:38:20	29,12	1,76
MP13	14:41:06	14:41:35	29,41	2,09
MP14	14:42:11	14:42:40	28,76	1,93
MP15	14:40:01	14:40:30	29,87	1,45
Mittelwert:			29,45	1,29
Std.abw.:			0,54	0,56
Max:			30,47	2,42
Min:			28,54	0,59

Der Bewölkungsgrad des Himmels wurde als heiter eingestuft (N=2/8). Zusätzlich wurde an jedem Messpunkt die Globalstrahlung auf die Horizontale mittels Pyranometer bestimmt. Diese Daten wurden zur Kalibrierung der Einstrahlungsparameter herangezogen. Die Einstrahlungswerte auf die Horizontale setzen sich aus Direkt-, Diffus und Reflexionsstrahlung zusammen. Auf Basis unseres Berechnungsverfahrens können auch quasi virtuelle Messungen der kurzwelligen Einstrahlung im Modell durchgeführt werden. Hierzu wird anstelle der humanen Samplingfunktionen, eine Kosinus-gewichtete Samplingfunktion eingesetzt um entsprechend dem Pyranometer-Messprinzip die Einstrahlung auf die Horizontale zu ermitteln. Der Vergleich gibt Aufschluss über die Qualität des Modells hinsichtlich der Abbildung des kurzwelligen Strahlungsanteils.

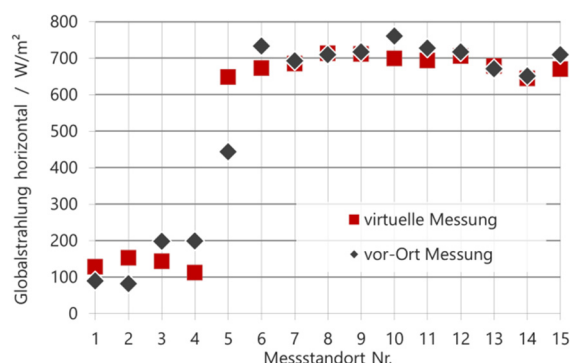


Abbildung 4: Vergleich der im Modell errechneten Werte der kurzwelligen Einstrahlung (GHI) vs. Vor-Ort Messungen mit Pyranometer

Die auftretenden Abweichungen sind auf naturgemäß vorhandene Unterschiede hinsichtlich der exakten Geometrie (insbesondere bei der Vegetation), der

Reflexionseigenschaften der Oberflächen und des Detaillierungsgrades zurückzuführen. Zur Veranschaulichung der Arbeitshypothese, welche voraussetzt, dass die Variabilität der Strahlungstemperatur den dominanten Einfluss auf die Werte des thermischen Komforts ausübt, sind in *Abbildung* die im Verfahren ermittelten Strahlungstemperaturen im gesamten ausgewerteten Bereich in Form eines Histogramms dargestellt.

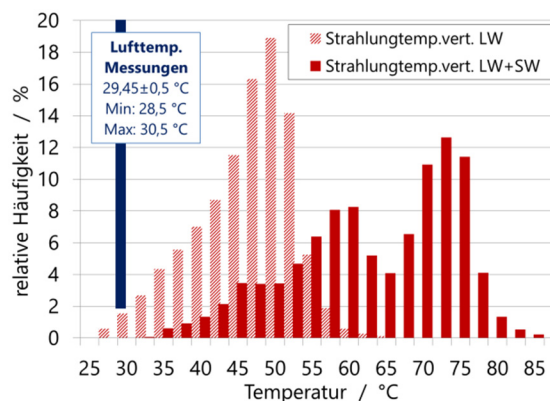


Abbildung 5: Verteilung der gemessenen Lufttemperaturen und berechneten mittleren Strahlungstemperaturen im untersuchten Bereich

Wie zu sehen ist, liegen alle gemessenen Lufttemperaturen in einem sehr engen Bereich um 29,5°C (±0,5 °C) verteilt, während die sich aus der thermischen Strahlung ergebenden mittleren Strahlungstemperaturen einen breiten Bereich bis ca. 65 °C abdecken. Berücksichtigt man zusätzlich die kurzwellige Einstrahlung so werden Werte bis über 80 °C erzielt.

Die räumliche aufgelöste Berechnung des thermischen Komfortindex UTCI ist in *Abbildung* dargestellt. Wie zu sehen ist, zeigt sich eine räumlich sehr differenzierte Verteilung. Die geringsten Werte werden im Bereich des Parks, sowie des am Platz vorhandenen Brunnens erzielt. Die höchsten Werte werden jeweils im Nahebereich vor sonnenexponierten Fassaden erzielt. Neben den dargestellten Absolutwerten des UTCI-Index, stellen auch die zugrundeliegenden Berechnungskomponenten eine sehr aufschlussreiche Informationsquelle dar. So können etwa auch die ermittelten mittleren Strahlungstemperaturen oder separat die kurzwelligen und langwelligen Einstrahlungswerte kartografisch dargestellt werden. Auch die absolute und relative Quantifizierung der einzelnen Komponenten stellen Werkzeuge zur Analyse des Istzustandes oder allfälliger Optimierungsmaßnahmen dar. Eine detaillierte Darstellung und Erläuterung dieser Analysemöglichkeiten würden den Umfang dieses Beitrages sprengen.

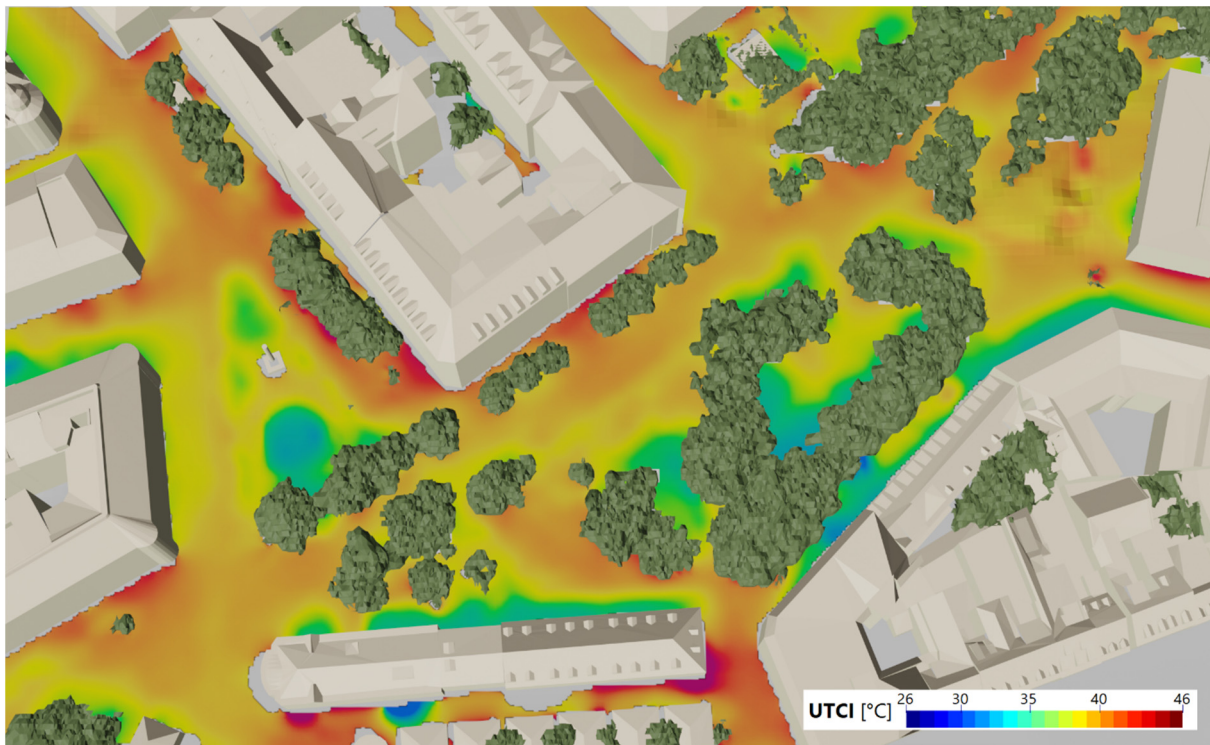


Abbildung 6: Darstellung der ermittelten UTCI-Werte für den thermischen Komfort, ausgewertet mit einer Rastergröße von 1x1 m für eine Höhe von 1,1 m über Bodenniveau

ZUSAMMENFASSUNG

Am Anwendungsfall Graz „Eisernes Tor“ konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Verfahren praktikabel ist und aufschlussreiche Untersuchungen gestattet. Die Arbeitshypothese, dass der mittleren Strahlungstemperatur bei Evaluierung einer sommerlichen urbanen Umgebung zentrale Bedeutung zukommt konnte untermauert werden. Die hier abgeleiteten richtungsabhängigen Strahlungssuszeptibilitätsfunktionen belegen, dass die aus horizontalen Richtungen auf den Körper eintreffende Strahlung dominanter ist, als jene aus vertikalen Richtungen. Dies wiederum bestätigt die Notwendigkeit einer möglichst detaillierten und dreidimensionalen Betrachtung, da in urbanen Umgebungen vertikale Flächen (Fassaden, Vegetation) einen signifikanten Anteil aufweisen.

Die messtechnische Erfassung der lang- und kurzwelligen Ausstrahlung mit Hilfe von Drohnen hat sich auf Grund der Effizienz und der kurzen Messzeiten sehr gut bewährt. Bei der nächsten Anwendung des Verfahrens wird eine Hyperspektralkamera eingesetzt um die diffuse Reflexion der Globalstrahlung gesamthafter erfassen zu können.

Obwohl sehr rechenintensiv, hat sich das entwickelte Auswerteverfahren als sehr tauglich bewiesen und plausible und räumlich gut differenzierte Ergebnisse geliefert. Als weiterer Validierungsschritt soll versucht werden die Ergebnisse mit Hilfe von Schwarzkugelthermometern zu validieren. Unter den vorhandenen Umgebungsbedingungen (direkte und

diffuse Sonneneinstrahlung, variable und turbulente Strömungsverhältnisse etc.) stellt dies keine triviale Aufgabe dar. Aus diesem Grunde konnte dieser Validierungsschritt im Rahmen dieser ersten Anwendung nicht durchgeführt werden. Die Korrektheit des Algorithmus für das Einstrahlungssampling wurde jedoch anhand von analytisch bestimmbar einfachen Konfigurationen validiert.

Als nächste Weiterentwicklung des Berechnungsverfahrens soll die gerichtete Reflexion von Glasscheiben abgebildet werden und die Automatisierung des Verfahrens erhöht werden.

Zunächst sollen jedoch weitere Analysen aus den bereits im Verfahren errechneten Größen abgeleitet und in einer interaktiven Karte online verfügbar gemacht werden, z.B. die Strahlungstemperaturen der unterschiedlichen Oberflächen, die wirksamen Flächenanteile, die lokalen Sensitivitäten des thermischen Komforts hinsichtlich der Umgebungsvariablen und Strahlungskomponenten. Die so zur Verfügung gestellten Daten können eine wertvolle Datenbasis für die Planung oder Evaluierung von stadtplanerischen Maßnahmen darstellen.

DANKSAGUNG

Das Verfahren wurde im Rahmen des Projekts *SmaCiSe – Smart City Sensing* entwickelt, welches von Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH FFG ermöglicht wurde. Wir danken für die Unterstützung.

LITERATUR

- Ban-Weiss, George, Jordan Woods, and Ronnen Levinson. 2014. "Using Remote Sensing to Quantify Albedo of Roofs in Seven California Cities."
- Blanc, Ph, and L. Wald. 2012. "The SG2 Algorithm for a Fast and Accurate Computation of the Position of the Sun for Multi-Decadal Time Period." *Solar Energy* 86 (10): 3072–83.
- Błazejczyk, Krzysztof, Gerd Jendritzky, Peter Bröde, Dusan Fiala, George Havenith, Yoram Epstein, Agnieszka Psikuta, and Bernhard Kampmann. 2013. "An Introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI)." *Geographia Polonica* 86 (1): 5–10.
- FANGER PO, ANGELIUS O, and KJERULF-JENSEN P. 1970. "Radiation Data for the Human Body." *ASHRAE Transactions* 76 (pt 2): 338–73.
- Herrmann, Jan, and Andreas Matzarakis. 2010. "Influence of Mean Radiant Temperature on Thermal Comfort of Humans in Idealized Urban Environments." *Berichte Des Meteorologischen Institute*, no. April 2010: 522–27.
- Huang, Jianxiang, Jose Guillermo Cedeño-Laurent, and John D. Spengler. 2014. "CityComfort+: A Simulation-Based Method for Predicting Mean Radiant Temperature in Dense Urban Areas." *Building and Environment* 80: 84–95.
- Kubaha, K., D. Fiala, J. Toftum, and A. H. Taki. 2004. "Human Projected Area Factors for Detailed Direct and Diffuse Solar Radiation Analysis." *International Journal of Biometeorology* 49 (2): 113–29.
- Lindberg, Fredrik, Björn Holmer, and Sofia Thorsson. 2008. "SOLWEIG 1.0 - Modelling Spatial Variations of 3D Radiant Fluxes and Mean Radiant Temperature in Complex Urban Settings." *International Journal of Biometeorology* 52 (7): 697–713.
- Matzarakis, Andreas, Frank Rutz, and Helmut Mayer. 2010. "Modelling Radiation Fluxes in Simple and Complex Environments: Basics of the RayMan Model." *International Journal of Biometeorology* 54 (2): 131–39.
- Rakha, Tarek, Pouya Zhand, and Christoph Reinhart. 2017. "A Framework for Outdoor Mean Radiant Temperature Simulation: Towards Spatially Resolved Thermal Comfort Mapping in Urban Spaces." *Building Simulation 2007, Vols 1-3, Proceedings*.
- Reindl, D. T., W. A. Beckman, and J. A. Duffie. 1990. "Diffuse Fraction Correlations." *Solar Energy* 45 (1): 1–7.
- Rüdiger, D. 2020. "Radi-Cal." ongoing PhD Thesis, unpublished yet, AEE INTEC, Graz University of Technology, funded by FFG Forschungspartnerschaften – industrienaher Dissertationen.
- Tanabe, Shin Ichi, Chie Narita, Yoshiichi Ozeki, and Masaaki Konishi. 2000. "Effective Radiation Area of Human Body Calculated by a Numerical Simulation." *Energy and Buildings* 32 (2): 205–15.
- Toudert, Fazia Ali. 2005. "Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate." *Building and Environment*, no. 15.
- VDI. 1994. "VDI 3789 Blatt 2." *Umweltmeteorologie - Wechselwirkungen Zwischen Atmosphäre Und Oberflächen - Berechnung Der Kurz- Und Der Langwelligen Strahlung*.
- Watanabe, Shinichi. 2009. "Measurement of Solar Radiation Absorptance of Different Clothing Fabric for Outdoor Thermal Comfort Study." *Japanese Journal of Biometeorology* 45 (4): 121–29.
- WHO, World Health Organisation. 2004. "Heat-Waves: Risks and Responses." *Health and Global Environmental Health Series No.2* (2): 124 pp.
- Zhang, H., T. L. Hu, and J. Ch Zhang. 2009. "Surface Emissivity of Fabric in the 8-14 μ m Waveband." *Journal of the Textile Institute* 100 (1): 90–94.