Oberflächenmaterialien in Städten – Auswirkungen Mikroklima und Sensitivität Simulationsergebnisse (Version, Vorlaufzeit)

Caroline Hoffmann[1], Achim Geissler[1], Andreas Wicki[2]
1 Fachhochschule Nordwestschweiz, Schweiz, E-Mail: caroline.hoffmann@fhnw.ch
1 Fachhochschule Nordwestschweiz, Schweiz, E-Mail: achim.geissler@fhnw.ch
2 GEO Partner AG, Schweiz, E-Mail: wicki@geopartner.ch

Kurzfassung

Fehlende Beschattung, sowie ein hoher städtischer Bebauungsgrad mit wärmespeichernden Materialien und versiegelten Oberflächen führen im Sommer zu Hitzestress und einer verminderten nächtlichen Abkühlung. Geeignete Baumaterialien können zur Minderung dieser Effekte beitragen. In einer Simulationsstudie wird der Einfluss unterschiedlicher Aussenböden, grüner Infrastruktur (GI), Dachdeckungen und Wandmaterialien auf das Mikroklima untersucht. Die hier vorgestellte Analyse umfasst 44 Datensätze in einem mikroklimatischen Simulationsmodell (Simulationsprogramm: ENVI-met). Die Ergebnisse zeigen, dass helle Bodenmaterialien die Lufttemperatur (DBT) 1.7 m über dem Boden um bis zu 0.4 K senken und sich damit positiv auf das städtische Mikroklima auswirken. Der thermische Komfort von Fussgängern kann jedoch durch reflektierende Oberflächen negativ beeinflusst werden. Die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) über hellen Oberflächen liegt im Mittel um bis zu 1.0 K höher als über dunklen Böden. Dies ist auf die reflektierte kurzwellige Strahlung zurückzuführen, die den empfundenen Hitzestress trotz niedrigerer Lufttemperatur deutlich erhöht. Sinngemäss gilt dies auch für Wandmaterialien. Über Böden mit ausgetrockneter GI ist die PET in der Sonne tagsüber um bis zu 2.6 K höher als mit feuchter GI. Bei Dächern senken helle Dachmaterialien die DBT 1.6 m über dem Dach um bis zu 0.1 K und wirken sich damit positiv auf das städtische Mikroklima aus.

Die Simulationsergebnisse dienen als Datengrundlage für die erweiterte, zweite Auflage der Publikation «Baumaterialien für Städte im Klimawandel – Materialkatalog mit Empfehlungen». Zur Gewährleistung der Konsistenz beider Auflagen werden Simulationen aus der ersten Auflage mit einer aktuelleren Programmversionen wiederholt. Es zeigt sich, dass die mittlere PET beider Versionen um 3.4 K differiert und sich in Abhängigkeit von der Albedo des Materials die Rangfolge der Ergebnisse für die PET verändert.

Einleitung

Gemäss Klimaszenarien für Mitteleuropa erwarten uns in den nächsten Jahrzehnten wegen des Klimawandels steigende Temperaturen und häufigere Extremwetterereignisse (Stocker et al. 2013). Hitzewellen werden häufiger, intensiver und langanhaltender (Meehl et al. 2004). Die Auswirkungen des Klimawandels mit steigenden Temperaturen und langen Trockenperioden sind auch in Städten spürbar. Hinzu kommen eine fehlende Beschattung, ein hoher Bebauungsgrad mit wärmespeichernden Materialien und versiegelten Oberflächen, die im Sommer zu Hitzestress und einer reduzierten nächtlichen Auskühlung führen.

Stadtplanerische Massnahmen sind die Grundlage für klimaresiliente Städte, um lokal relevante Windsysteme zur Durchlüftung zu erhalten, Flächen zu entsiegeln und Bäume sowie Grünflächen zu etablieren. Ein weiterer integraler Baustein kann der Einsatz von Materialien für Fassaden, Dächer und Böden im Gebäudeumfeld sein, deren Eigenschaften zu einer Verbesserung des städtischen Mikroklimas beitragen können. Damit soll eine (unnötige) Erhöhung des Hitzestresses auf den Menschen vermieden werden. Neben der Wirkung auf das Mikroklima spielen bei der Wahl von Aussenmaterialien jedoch auch Aspekte wie Blendung, Akustik, Versickerungsfähigkeit (im Dach- und Bodenbereich), Treibhausgasemissionen und Lebensdauer der Materialien eine Rolle. Um fundierte Planungsentscheidungen treffen zu können, müssen Entscheidungsträger und Planer auf entsprechend aufbereitete Informationen zugreifen können. Eine Publikation «Baumaterialien für Städte im Klimawandel – Materialkatalog mit Empfehlungen», die diese Informationen für Aussenwandmaterialien und gebäudenahe Böden bereitstellt, erschien 2022 in einer ersten Auflage und wird 2026 in einer zweiten Auflage um horizontale Begrünungen in trockenem und

feuchtem Zustand sowie unterschiedliche Dachdeckungen, erweitert. Um alle Materialien unter identischen Randbedingungen zu untersuchen und vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten sind mikroklimatische Simulationen erforderlich. Zur Sicherstellung konsistenter Angaben in beiden Auflagen werden Simulationen aus der ersten Auflage mit einer aktuellen Programmversion wiederholt.

In neueren Forschungsarbeiten zu ENVI-met werden Programmversionen eher selten miteinander verglichen. Wenn dies geschieht, dann werden einzelne Versionen Messwerten gegenübergestellt. Neuere Publikationen behandeln einen Vergleich zwischen Messwerten und Version 5.0 und 5.3 (Aleksandrowicz et al. 2023) sowie Version 4.4.6 und 5.0.2 (Liu et al. 2024). In beiden Fällen bildet die höhere Version die Messung besser ab und die Ergebnisse beider Versionen sind nicht gleich.

Auch bei den eigenen Vergleichen, die sich aufgrund der abweichenden Versionen nicht mit den genannten Quellen vergleichen lassen, treten Differenzen zwischen den Versionen 4.4.5 und 5.6.1 auf. Im nachfolgenden Text werden die Ergebnisse der Programmversion 5.6.1 für Böden, Dächer und Fassaden dargestellt, sowie die Unterschiede zwischen den Versionswechseln für Böden und Fassaden vorgestellt.

Methodik

Simulationsprogramm ENVI-met und Programmversionen

ENVI-met ist ein dreidimensionales gekoppeltes Strömungs-Energiebilanzmodell zur Simulation des Mikroklimas in städtischen Strukturen (Bruse 1999). Unter allen CFD-basierten Modellen ist ENVI-met eines der am häufigsten verwendeten Programme zur Simulation des städtischen Mikroklimas mit Gebäuden und Grünflächen in der Wissenschaft (Vurro et al. 2024), (Tsoka et al. 2018). Die wissenschaftliche Anerkennung ist der Grund für die Verwendung von ENVI-met. Die Simulationen der ersten Auflage wurden mit ENVI-met Version 4.4.5 (Sommer 2020) erstellt, die Simulationen der zweiten Auflage mit ENVI-met 5.6.1 (Winter 2023/2024). Die neue Programmversion unterscheidet sich durch erhebliche Anpassungen und Verbesserungen im Strahlungsmodell von der Vorgängerversion. Da Testsimulationen mit ENVI-met 5.6.1 zeigen, dass sich der Versionswechsel speziell auf die Ergebnisse von hellen und dunklen Flächen auswirkt, werden alle Materialien der ersten Auflage nochmals mit Version 5.6.1 berechnet.

Simulationsmodell

Um die Auswirkung der Materialien auf das Mikroklima zu untersuchen, wird in ENVI-met ein dreidimensionales Modell für ein Areal mit Hofsituation in Basel-Stadt erstellt (Abbildung 1, Abbildung 2). Die Grösse des Untersuchungsgebiets wird so gewählt, dass das Modell in hoher Auflösung gerechnet werden kann und die zu untersuchende Prozesse, welche das Mikroklima an den ausgewerteten Empfangspunkten (Sensoren) beeinflussen, realistisch abgebildet werden. Bei der Simulation wird jeweils das Material für einen Bauteiltyp (z. B. «Dach») variiert. Die anderen Bauteile, z. B. Wände und Böden der Umgebung, haben dabei eine Referenzkonstruktion. Es wird eine viertägige Hitzewelle mit Wetterdaten der MeteoSchweiz-Station Basel-Binningen der ersten Augustwoche 2018 simuliert. Die Klimaregion kann als gemässigtes Ozeanklima mit warmen Sommern (Köppen Cfb) eingeordnet werden (Kottek et al. 2006).

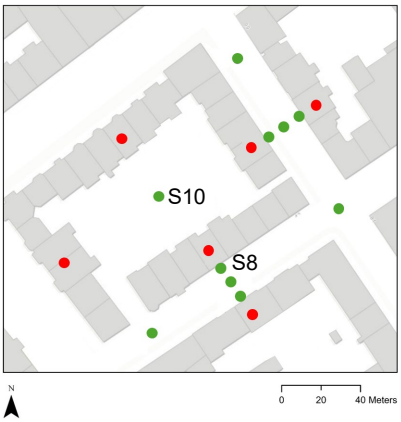


Abbildung 1: Verteilung Sensoren innerhalb des Simulationsmodells. Die roten Punkte stellen die Auswertungspunkte (Sensoren) für die Dächer auf 21.6 m Höhe dar, die grünen Punkte beziehen sich auf die Sensoren auf 1.7 m und 10.7 m Höhe.



Abbildung 2: Ausschnitt Hofsituation, Quelle: https://map.geo.bs.ch

Auswertung

Die Simulationsergebnisse werden für den vierten Tag der Hitzeperiode ausgewertet. Dieser Tag des Wetterdatensatzes weist um 4 Uhr morgens eine minimale DBT von 21.2 °C auf und tagsüber um 14 Uhr eine maximale DBT von 34.8 °C. Da nachts keine kurzwellige Strahlung vorhanden ist, wird die DBT zur Bewertung des thermischen Komforts um 4 Uhr morgens verwendet. Für Aussenbereiche, in denen sich Menschen aufhalten, wird tagsüber um 14 Uhr die physiologisch äquivalente Temperatur (PET) ausgewiesen. Die Berechnung erfolgt gemäss (Mayer et al. 1999) und (Walther et al. 2018). Die physiologischen Parameter werden für eine standardisierte Person gemäss den Empfehlungen in (Höppe 1999) ausgewählt. Auf Ebene der Dächer wird tagsüber die DBT ausgewertet, da hier, unter der Voraussetzung, dass sich keine Menschen auf den Dächern aufhalten, der thermische Komfort keine Rolle spielt.

Für die Ebene Fussgänger werden zehn Standorte (Sensoren) im Areal untersucht (Abbildung 1, grüne Punkte). Die gebäudenahen Sensoren sind jeweils 1 m von den Gebäudefassaden entfernt. Es werden Resultate für die Höhen 1.7 m und 10.7 m ausgegeben. Für jedes Höhenniveau werden die Ergebnisse aller zehn Standorte gemittelt. Für die Dächer werden fünf Sensoren auf 21.6 m (1.6 m über der Dachoberfläche) ausgewertet (Abbildung 1, rote Punkte). Die Methodik ist in (Hoffmann et al. 2021) und (Hoffmann et al. 2026) beschrieben.

Dokumentation Versionsunterschiede ENVI-met

Betreffend des Strahlungsmodells werden für Version 5.5 (Sommer 2023) die folgenden Änderungen angegeben: „Verbesserung der Berechnung der langwelligen Strahlung, die sich vor allem auf den nächtlichen städtischen Wärmeinseleffekt auswirkt und Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit für die MRT.“ (ENVI-met 2026)

Gemäss (Sinsel et al. 2022) wurden in Forschungsarbeiten zu ENVI-met drei Aspekte kritisiert: 1) Eine ungenaue Darstellung der von benachbarten Fassaden, Oberflächen oder Pflanzen emittierten langwelligen, bzw. reflektierten kurzwelligen Strahlung. 2) Die nichtvorhandene Abschwächung von diffuser, kurzwelliger Strahlung, bzw. die nichtvorhandene Streuung von direkter kurzwelliger Strahlung durch Vegetation. 3) Die aufwärtsgerichtete langwellige (L_{up}) und kurzwellige (K_{up}) Strahlung werden in einem vereinfachten bidirektionalen Berechnungsansatz berechnet, der einen Projektionsfaktor beinhaltet, der zur Bestimmung der auf den menschlichen Körper einwirkenden direkten kurzwelligen Strahlung verwendet wird. Insbesondere die unter 3) genannten Vereinfachungen sind der Grund für eine Unterschätzung der mittleren Strahlungstemperatur (MRT) während der Nacht und eine Überschätzung während des Tages (aufgrund unterschätzter emittierter langwelliger und reflektierter kurzwelliger Strahlungsflüsse durch die angrenzenden Fassaden (Gál et al. 2020)). Alle drei Aspekte wurden in Programmversionen nach 2021 modifiziert: 1) wird durch das erweiterte Strahlungsmodell „Indexed View Sphere“ (IVS) berücksichtigt, 2) durch die Implementierung des Modells „Advanced Canopy Radiation Transfer“ (ACRT) und 3) durch die Implementierung eines sechsdirektionalen Berechnungsansatzes für die MRT sowie dreier Projektionsfaktoren für den menschlichen Körper. Die Anpassungen wurden seitens ENVI-met mittels Messungen validiert (Ouyang et al. 2022), (Sinsel et al. 2022).

Eine Überprüfung der Ergebnisse innerhalb des Programms mit unterschiedlichen Programmversionen wird seitens ENVI-met nicht publiziert. Bei Nachfragen nach einer Einordnung der Differenzen wird auf die Update History verwiesen (ENVI-board 2024). Hier wird die zu Beginn dieses Unterkapitels zitierte Änderung aufgeführt, es werden aber keine Ergebnisvergleiche mit den Vorgängerversionen thematisiert (ENVI-met 2026).

Ergebnisanalyse und Diskussion

Ergebnisse Version 5.6.1

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird eine Ergebnisauswahl für 44 Böden, Dächer und Wände dargestellt. Dabei werden aus Platzgründen bei Wänden und Dächern mittlere Farbgebungen und blanke Oberflächen, bei Wänden hinterlüftete Fassaden, Leichtbau und reflektierende Anstriche und bei Böden Begrünungen mit Wiesen weggelassen. Die Spannweite der Ergebnisse kann so aufgezeigt werden, die vollständigen Ergebnisse aus 83 Datensätzen sind in (Hoffmann et al. 2026) ersichtlich.

Böden

Die Auswirkung trockener Bodenbeläge auf die Lufttemperatur (DBT) und die PET in 1.7 m Höhe zeigt Abbildung 3.

PET: Um 14 Uhr weist das hochreflektierende „Whitetopping auf Asphalt“ (Albedo: 0.62) die höchste PET auf, die tiefste PET hat der dunkle „Asphalt_d“ (Albedo: 0.18). Es ergibt sich über alle Oberflächen ein Δ_{max} von 1.0 K. Über dem ausgetrockneten «Rasen» beträgt die PET 38.2 °C.

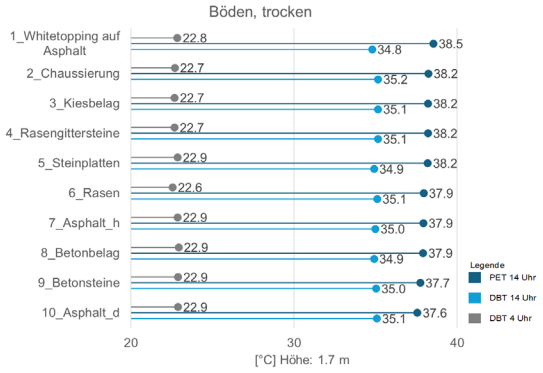


Abbildung 3: Temperaturen auf 1.7 m Höhe unterschiedlicher Bodenbeläge im Aussenbereich. DBT um 14 Uhr (türkis) und um 4 Uhr (grau), sowie PET um 14 Uhr (petrol). Die Aufbauten und Materialkennwerte für die Bodenkonstruktionen 1 – 10 sind in (Hoffmann et al. 2026) zu finden. Albedo der Materialien:1: 0.62; 2: 0.42; 3: 0.29; 4: 0.25; 5: 0.45; 6: 0.25; 7: 0.33; 8: 0.38; 9: 0.25; 10: 0.18; Verwendete Abkürzungen: d = dunkel, h = hell.

DBT: um 14 Uhr weist „Asphalt_d“ eine um 0.3 K höhere DBT auf als „Whitetopping auf Asphalt“ (Δ_{max}: 0.4 K). Nachts liegt die DBT auf einer Höhe von 1.7 m um 0.4 K auseinander, auf einer Höhe von 10.7 m sind es 0.1 K.

Wie sich unterschiedliche Erdreicharten mit Rasen in trockenem und feuchtem Zustand, sowie mit und ohne Beschattung durch Bäume auf die DBT und PET auswirken, zeigt Abbildung 4. Generell weisen unbeschattete Böden eine höhere PET als beschattete Böden auf.

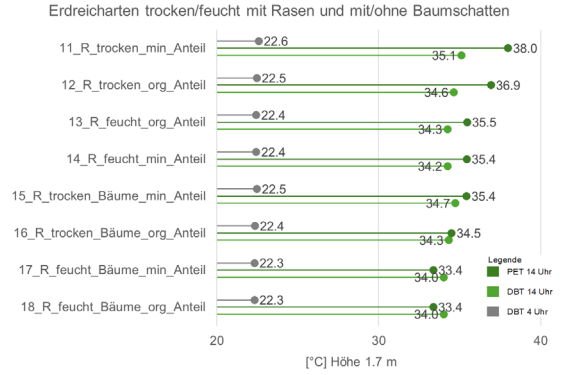


Abbildung 4: Temperaturen auf 1.7 m Höhe unterschiedlicher Erdreicharten mit Rasen (trocken/feucht, mit/ohne Baumschatten). DBT um 14 Uhr (hellgrün) und um 4 Uhr (grau), sowie PET um 14 Uhr (dunkelgrün). Albedo Rasen: 0.25. Boden mit mineralischen Anteil, trocken: ρ = 2000 kg m^{-3}; λ = 2.4 W*(m K)$^{-1}$; Boden mit mineralischen Anteil, feucht: ρ = 2200 kg m^{-3}; λ = 2.4 W*(m K)$^{-1}$; Boden mit organischem Anteil, trocken: ρ = 400 kg m^{-3}; λ = 0.2 W*(m K)$^{-1}$; Boden mit organischem Anteil, feucht: ρ = 900 kg m^{-3}; λ = 0.5 W*(m K)$^{-1}$; Verwendete Abkürzungen: min = mineralisch, org = organisch, λ – Wärmeleitfähigkeit, ρ – Rohdichte.

PET: Die höchste PET hat «trockener Boden mit erhöhtem mineralischem Anteil», die tiefste PET haben feuchte, beschattete Böden mit erhöhtem organischem Anteil. Bei derselben Bodenart haben immer die feuchten Böden eine tiefere PET. Es ergibt sich ein Δ_{max} von 4.6 K.

DBT: die Rangfolge um 14 Uhr ist ähnlich wie bei der PET (Δ_{max}: 1.1 K). Nachts um 4 Uhr tritt ein Δ_{max} von 0.3 K auf.

Dach

Bei den Dachdeckungen wird nur die DBT 1.6 m über der Dachebene ausgewiesen, da die Dächer (ausser ggf. die Gründächer) nicht zum Aufenthalt von Menschen konzipiert sind und damit der thermische Komfort nicht relevant ist (Abbildung 5).

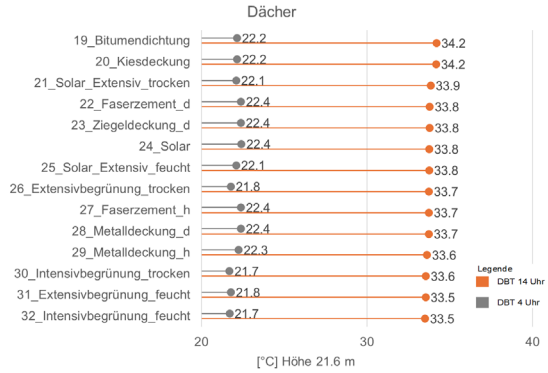


Abbildung 5: Temperaturen 1.6 m über der Dachebene (21.6 m Höhe) mit unterschiedlichen Dachdeckungen. DBT um 14 Uhr (orange) und um 4 Uhr (grau). Albedo der Materialien: 19: 0.26; 20: 0.29; 21: 0.43; 22: 0.26; 23: 0.40; 24: 0.16; 25: 0.28; 26:0.25; 27: 0.75; 28: 0.07; 29; 0.67; 30 - 32: 0.25. Aufbauten: Gedämmte Flachdachaufbauten: 19; 20; Gründachaufbau: 21; 25; 26; 30 – 362; Hinterlüftete Dächer (einfach belüftet): 22; – 24; 27 – 29. Verwendete Abkürzungen: dunkel = dunkel, h = hell.

Tag: Die höchste DBT um 14 Uhr weist das Nacktdach mit Bitumendichtung auf, das in der Schweiz nicht mehr zugelassen ist. Die tiefste DBT haben Dachbegrünungen in feuchtem Zustand (Δ_{max}: 0.7 K).

Nacht: Die Temperaturen über dunklen Deckungen mit wenig Speichermasse sind tendenziell hoch. Tiefe Temperaturen haben die begrünten Dächer (mit und ohne 50 % Solarbelegung). Es ergibt sich ein Δ_{max} von 0.7 K.

Fassade

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse für verputzte Aussenwanddämmungen und zweischalige Wandkonstruktionen.

PET: Die höchste PET tritt bei Wandmaterialien mit einer hellen Farbe auf, dunklere Farben bewirken eine tiefere PET. Über die gezeigten Materialien ergibt sich Δ_{max} von 3.7 K.

DBT: um 14 Uhr weisen dunkle Oberflächen höhere Temperauren auf als helle Oberflächen.

Die höchste DBT hat der dunkle Einschalenbackstein mit Aerogeldämmputz (Nr. 40), die tiefste DBT die helle Kompaktfassade mit EPS (Nr. 37). Es ergibt sich ein Δ_{max} von 0.7 K. Nachts, um 4 Uhr beträgt das Δ_{max} 0.8 K.

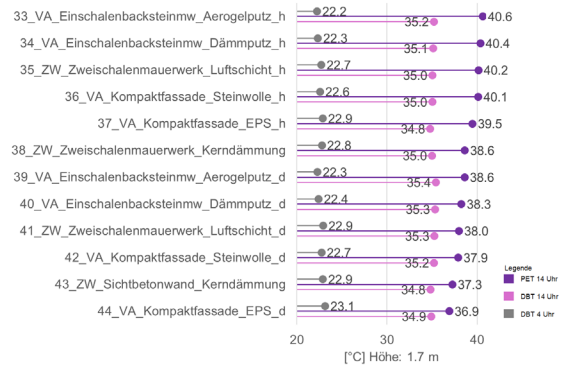


Abbildung 6: Temperaturen auf 1.7 m Höhe unterschiedlicher Wandmaterialien im Aussenbereich. DBT um 14 Uhr (rosa) und um 4 Uhr (grau), sowie PET um 14 Uhr (magenta). Die Aufbauten und Materialkennwerte für die Wandkonstruktionen 33 – 44 sind in (Hoffmann et al. 2026) zu finden. Albedo der Materialien:33 - 37: 0.75; 38: 0.55; 39 – 42, 44: 0.26; 43: 0.38; Verwendete Abkürzungen: d = dunkel, h = hell, mw = Mauerwerk, VA = verputzte Aussenwanddämmung, ZW = Zweischalige Wandkonstruktion.

Diskussion Ergebnisse Version 5.6.1

Beim Vergleich der Ergebnisse für die PET fällt auf, dass über hellen Materialien eine höhere PET festzustellen ist als über dunkleren Materialien. Die DBT über hellen Bodenbelägen ist tiefer als über dunklen Belägen. In die Berechnung der PET gehen die MRT, die DBT, die relative Feuchte (RH) und die Windgeschwindigkeit ein. Die Grösse mit dem räumlich verteilt breitesten Wertebereich zu einem Zeitpunkt tagsüber ist die MRT (14 Uhr Boden Nr.1, Δ Sensor 1-10: MRT, Δ_{max}: 13.2 K, DBT, Δ_{max}: 0.4 K, Luftgeschwindigkeit, Δ_{max}: 1.7 m/s, RH, Δ_{max} 0.6 %). Werden für eine Sensitivitätsbetrachtung beispielhaft alle in die PET eingehenden Werte um jeweils 10 % erhöht, verändert sich die PET wie folgt:

- MRT (Bezug 52.6 auf 57.9 °C): Anstieg PET um 4.6 %,
- DBT (35.2 auf 38.7 °C): Anstieg um 4.4 %,
- RH (32 auf 35 %): Anstieg um 0.4 %,
- Windgeschwindigkeit (0.9 auf 1.0 m/s): Senkung um -0.3 %.

Ein Anstieg der MRT macht also bei der Bewertung der PET einen deutlichen Unterschied aus und kann durch die leicht tiefere DBT über den hellen Böden offensichtlich nicht kompensiert werden.

Eine Validierung der Simulationsergebnisse für Böden und Dächer durch eine Literaturstudie, die Messungen und Simulationen auswertet, wird in (C. Hoffmann et al. 2025) vorgestellt. Die Validierung zeigt, dass die Simulationen im Bereich der in der Literaturstudie ausgewerteten Ergebnisse liegen. Die Validierung bestätigt auch, dass die Weiterentwicklung des Programmes ENVI-met zu insgesamt plausiblen Ergebnissen führt, insbesondere bezüglich PET in Abhängigkeit von der Albedo der Oberfläche. Um das Simulationsmodell speziell für die Begrünungen zu validieren, werden Vergleichsmessungen gemacht. Diese sind in (Caroline Hoffmann et al. 2025) beschrieben.

Die Simulationen werden für ein gemässigtes Ozeanklima mit warmen Sommern (Köppen Cfb) erstellt. Damit ist zu erwarten, dass die Grundaussage der Ergebnisse auch für andere Regionen mit einem ähnlichen Klima gilt. Das spezifische Mikroklima variiert jedoch auch innerhalb der breitgefassten Cfb Klimaregion.

Sensitivität Programmversionen

Versionsvergleich

Abbildung 7 zeigt die Simulationsergebnisse für Böden und Fassaden beider untersuchter Programmversionen für die PET in Abhängigkeit von der Albedo. Im Mittel für alle Konstruktionen liegt die PET um 14 Uhr bei Version 5.6.1 um 3.4 K höher als mit Version 4.4.5. Um 4 Uhr morgens beträgt die mittlere Differenz zwischen beiden Programmen 0.9 K, wobei auch hier Version 5.6.1 die höheren Werte aufweist.

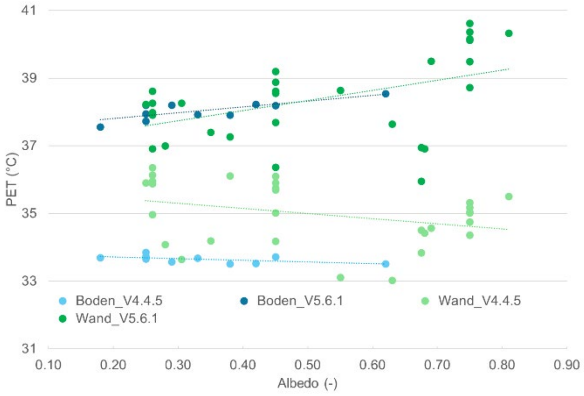


Abbildung 7: Vergleich Simulationsergebnisse für Boden und Wand mit Programmversion (V) 4.4.5 und 5.6.1.

Betrachtet man die einzelnen Konstruktionen getrennt nach Albedo, so zeigt sich, dass bei Version 4.5.4 Konstruktionen mit einer sehr hellen Farbe (Albedo 0.75) eine tiefere PET und MRT aufweisen als Konstruktionen mit einer dunklen Farbgebung (Albedo 0.26). Bei Version 5.6.1 ist es bei der PET und bei der MRT

umgekehrt. Die DBT ist bei beiden Versionen bei der hellen Farbe am tiefsten (Tabelle 1).

Bei der Interpretation der Ergebnisse sei daran erinnert, dass das Strahlungsmodell des Programms stark überarbeitet wurde und der reflektierte, diffuse Strahlungsanteil im neuen Modell ein höheres Gewicht erhält. In Tabelle 1 gelten die Ergebnisse für alle 10 Sensoren (siehe Abbildung 1) im Mittel. Um zu überprüfen, ob die Überarbeitung des Strahlungsmodells tatsächlich der wahrscheinliche Grund für die Umkehrung der Farbbewertung ist, werden ein Sensor mit einem hohen direkten Strahlungsanteil (S10, Abbildung 1) und ein Sensor mit vorwiegend reflektierter Strahlung (S8, Abbildung 1) miteinander verglichen. Bei Version 5.6.1 ist der reflektierte Anteil der Strahlung deutlich höher als bei der Version 4.4.5 (Tabelle 2). So sind auch die höheren Werte für MRT für helle Oberflächen in Version 5.6.1. erklärbar. Bei der Lufttemperatur DBT (hier nicht dargestellt) liegt die Abweichung zwischen 1 % und 3 % (Bezug °C).

Tabelle 1: Unterschiede Version 4.5.1 und 5.6.1 für das Material Einschalenbacksteinmauerwerk mit 4 cm Aerogeldämmputz. Die Angaben gelten für eine Höhe von 1.7 m. Die Werte entsprechen Mittelwerten aus allen Sensoren. Verwendete Abkürzungen: V = Programmversion

	V 4.4.5			**V 5.6.1**		
Albedo	**PET**	**DBT**	**MRT**	**PET**	**DBT**	**MRT**
	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0.75	35.3	34.4	39.6	40.6	35.2	50.6
0.45	36.1	34.7	41.3	39.2	35.4	49.0
0.26	36.4	34.8	41.7	38.6	35.4	47.5

Tabelle 2: Vergleich MRT für einen Sensor mit hohem Direktstrahlungsanteil (S10) und einen Sensor mit hohem Diffusanteil (S8). Die Abweichung wird mit Bezug auf Version 4.4.5 angegeben. Verwendete Abkürzungen: V = Programmversion.

	V 4.4.5		**V 5.6.1**		**Abweichung**	
	S8	**S10**	**S8**	**S10**	**S8**	**S10**
Albedo	**Refl.**	**Dir.**	**Refl.**	**Dir.**	**Refl.**	**Dir.**
	°C	°C	°C	°C	%	%
0.75	36.0	47.2	51.7	56.6	44	20
0.45	38.0	48.4	47.6	54.4	25	13
0.26	38.6	48.6	45.9	53.5	19	10

Vorlaufzeit

Die für die Simulationen gewählte Vorlaufzeit beträgt drei Tage. Im Rahmen der Vorarbeiten zu (Hoffmann et al. 2022) wurde festgestellt, dass eine Verkürzung der Vorlaufzeit um 24 Stunden zu einer Abnahme um 0.5 K bei der DBT und um 1.1 K bei der PET führen kann. Bei Simulationsstudien mit ENVI-met ist die gewählte Vorlaufzeit bei anderen Projekten mit wenigen Stunden deutlich kürzer (Sinsel et al. 2022), (Gál et al. 2020), (Forouzandeh 2018), (Elraouf et al. 2022), (Crank et al. 2018), (Jänicke et al. 2015), (Ouyang et al. 2022), (Aleksandrowicz et al. 2023). Es ist davon auszugehen, dass die Verkürzung der Vorlaufzeit keinen Einfluss auf die Rangfolge von Varianten hat.

Diskussion Sensitivität

Mit gleichen Rahmenbedingungen sind die Ergebnisse innerhalb einer Programmversion reproduzierbar. Die Abweichungen zwischen den Ergebnissen aus Version 4.4.5 und 5.6.1 sind jedoch beträchtlich. Der Vergleich der Sensoren mit unterschiedlichem Direkt- und Diffusstrahlungsanteil stützt die Annahme, dass die Ursache der Abweichungen auf das überarbeitete Strahlungsmodell zurückzuführen ist. Eine abschliessende kausale Zuordnung ist mit den gemachten Untersuchungen nicht möglich. Wenn das Ziel einer Simulationsstudie der relative Vergleich von Projektvarianten untereinander ist, sind absolute Unterschiede zwischen Programmversionen unkritisch. Da sich allerdings auch die Rangfolge von Ergebnissen ändert, hat dies einen Einfluss auf die Aussage, die mit den Simulationen getroffen wird. Die resultierende Empfehlung ist damit versionsabhängig. Im Fall des Materialkatalogs resultierte aus den Ergebnissen mit Version 4.4.5 die Empfehlung Materialien mit möglichst hellen Oberflächen zu verwenden um einen guten thermischen Komfort von Fussgängern zu gewährleisten. Basierend auf den Ergebnissen aus Version 5.6.1, die sich nun auch auf eine Literaturstudie stützen, musste diese Empfehlung revidiert werden. Es muss zwischen einer Verbesserung des städtischen Mikroklimas, für das helle Oberflächen vorteilhaft sind, und dem (tagsüber) empfundenen Hitzestress auf der Ebene von Fussgängern, der durch reflektierende Oberflächen verstärkt wird, differenziert werden. Eine ausführlichere Validierung der Simulationsergebnisse mit Version 4.4.5 hätte vielleicht früher Fragen aufgeworfen, da die Mehrheit der in (C. Hoffmann et al. 2025) untersuchten Studien eine Erhöhung der PET durch helle Oberflächen feststellt. Allerdings gibt es auch eine geringe Anzahl von Studien (15 %), die eine Senkung der PET durch helle Oberflächen feststellen.

Grundsätzlich ist es notwendig und wünschenswert, dass Simulationsprogramme stetig verbessert und weiterentwickelt werden. Erste Priorität hat dabei die Validierung der Weiterentwicklung mit Messungen. Nutzer-

freundlich wäre allerdings auch der Hinweis auf eine Veränderung der Ergebnisse bei einem Versionswechsel. In der Gebäudesimulation haben sich bei open source Software sogenannte Testcases bewährt, z. B. (ESP-r 2026), mit denen die Auswirkungen der Veränderung eingeschätzt werden können.

Bei gleichen Rahmenbedingungen mit veränderten Vorlaufzeiten sind die Ergebnisse innerhalb einer Programmversion nicht reproduzierbar. Beispielsweise ist in der Gebäudesimulation gerade bei Gebäuden mit viel Speichermasse eine mehrmonatige Vorlaufzeit üblich und empfohlen. Da die Rechenzeiten bei Simulationen des Mikroklimas deutlich länger sind, ist eine mehrmonatige Simulationsdauer unrealistisch. Die Simulationsvorlaufzeit ist je nach Ziel der Simulationen (z. B. Vergleich Simulationen und Messung oder Variantenstudium) zu wählen.

Zusammenfassung

Simulationsergebnisse

Im Ergebnisteil wird aufgezeigt, dass sich bei Böden eine sehr helle Farbgebung negativ auf den thermischen Komfort auswirkt. Weiter können helle Beläge auch den visuellen Komfort der Nutzenden durch Blendung einschränken. Die DBT über hellen Böden ist allerdings tiefer als über dunklen Böden. Bei Dächern verhält es sich gleich, allerdings hat hier in der Regel der thermische Komfort keine Relevanz. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich Empfehlungen für die Material- bzw. Farbwahl von Dach- und Bodenflächen ableiten, die sich je nach stadtklimatischer Zielsetzung unterscheiden. Zur Verbesserung des Stadtklimas und des thermischen Komforts ist wo immer möglich bei Dächern eine Begrünung und bei Böden eine Begrünung in Kombination mit Bäumen zu wählen. Allerdings ist dabei auch ein ressourcenschonendes Bewässerungskonzept einzuplanen, da nur eine feuchte Begrünung einen nennenswerten Beitrag zu einer Verbesserung des Mikroklimas leisten kann. Ist keine Begrünung möglich, sind zur Verbesserung des thermischen Komforts eher mittelgetönte, versickerungsfähige Beläge zu wählen (in Kombination mit einer wirksamen Verschattung). Der städtische Wärmeinseleffekt, bezogen auf die Oberflächentemperatur am Tag und die Lufttemperatur in der Nacht, wird durch möglichst helle Oberflächen verringert. Daher sollten auch Dachflächen eher hell sein.

Sensitivität

Verbesserungen des Simulationsprogramms können sich auf die Simulationsergebnisse auswirken. Die Anpassung des Strahlungsmodells führt zu einer Erhöhung der PET und zu einer Veränderung der Rangfolge der Ergebnisse. Abgesehen von der Veränderung der resultierenden Empfehlungen, ist dies in der Regel tolerabel, da es nicht notwendig ist, ein und dasselbe Projekt mit unterschiedlichen Programmversionen zu berechnen. Eine programmseitige Information ist dennoch wünschenswert und erhöht die Transparenz.

Bei ein und derselben Programmversion reagiert das Programm sensitiv auf die Dauer der Vorlaufzeit. In Abhängigkeit von der Arealgrösse, der Fragestellung und der Wetterdaten ist es daher innerhalb des Simulationsprojektes zu prüfen, wie lange eine geeignete Vorlaufzeit sein muss.

Abkürzungen

Δ_{max} Differenz zwischen der höchsten und tiefsten Maximaltemperatur in einer Bauteilgruppe (z. B: Böden ohne GI) zum gleichen Zeitpunkt.

GI Grüne Infrastruktur

DBT Lufttemperatur (Dry Bulb Temperature), in °C, Angabe hier in Celsiusskala

PET Physiologisch äquivalente Temperatur, in °C, , Angabe hier in Celsiusskala

MRT Strahlungstemperatur (Mean Radiant Temperature), in °C, , Angabe hier in Celsiusskala

RH relative Feuchte (Relative Humidity), in %

Dank

Das Projekt wurde vom Bundesamt für Energie (BFE) unter der Vertragsnummer SI/502573-01 und vom Bundesamt für Wohnungswesen (BWO) unter der Vertragsnummer F1-068-22 gefördert. Ein Dank gilt auch den Projektpartnern von wohnen&mehr, Basel.

Literatur

Aleksandrowicz, O., Saroglou, T., & Pearlmutter, D. (2023). Evaluation of Summer Mean Radiant Temperature Simulation in ENVI-Met in a Hot Mediterranean Climate. *Building and Environment*, *245*, 1–15. doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110881

Crank, P. J., Sailor, D. J., Ban-Weiss, G., & Taleghani, M. (2018). Evaluating the ENVI-met microscale model for suitability in analysis of targeted urban heat mitigation strategies. *Urban Climate*, *26*(September), 188–197. doi: 10.1016/j.uclim.2018.09.002

Elraouf, R. A., ELMokadem, A., Megahed, N., Eleinen, O. A., & Eltarabily, S. (2022). Evaluating urban outdoor thermal comfort:

a validation of ENVI-met simulation through field measurement. *Journal of Building Performance Simulation*, *15*(2), 268–286. doi: 10.1080/19401493.2022.2046165

ENVI-board. (2024, May 29). Differences between version V 5.6.1 and V 4.5.5. *ENVI-Met Support Center*. Retrieved from https://www.envi-hq.com/viewtopic.php?f=3&t=5906&p=23178&sid=7b69aa12535c3fdb08b14f8513aa0262#p23178

ENVI-met. (2026, April 21). *ENVI-met Update History*. Https://Envi-Met.Info/Doku.Php?Id=apps:Updates.

ESP-r. (2026, April 22). *ESP-r*. Retrieved from www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm

Forouzandeh, A. (2018). Numerical modeling validation for the microclimate thermal condition of semi-closed courtyard spaces between buildings. *Sustainable Cities and Society*, *36*(March 2017), 327–345. doi: 10.1016/j.scs.2017.07.025

Gál, C. V., & Kántor, N. (2020). Modeling mean radiant temperature in outdoor spaces, A comparative numerical simulation and validation study. *Urban Climate*, *32*(November 2019), 100571. doi: 10.1016/j.uclim.2019.100571

Hoffmann, C., Geissler, A., Mutti, M., Wicki, A., & Schwager, F. (2021). Building materials for cities and climate change - A material catalogue with recommendations. *Journal of Physics: Conference Series*, *2042*(1). doi: 10.1088/1742-6596/2042/1/012057

Hoffmann, C., & Geissler, A. (2022). *Baumaterialien für Städte im Klimawandel. Materialkatalog mit Empfehlungen* (1st ed.). Bern: Bundesamt für Wohnungswesen.

Hoffmann, C., & Geissler, A. (2026). *Baumaterialien für Städte im Klimawandel. Materialkatalog mit Empfehlungen* (2nd ed.). Bern: Bundesamt für Wohnungswesen.

Hoffmann, C., Geissler, A., & Wicki, A. (2025). Differences in microclimate of paved and green areas. *Urban Climate*, *64*, 102595. doi: 10.1016/j.uclim.2025.102595

Hoffmann, C., Wicki, A., & Geissler, A. (2025). Auswahl von Oberflächenmaterialien für Dächer und Böden zukunftsfähiger Städte. *Bauphysik*, *47*(4), 247–260. doi: 10.1002/bapi.202500019

Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, *43*(2), 71–75. doi: 10.1007/s004840050118

Jänicke, B., Meier, F., Hoelscher, M. T., & Scherer, D. (2015). Evaluating the effects of façade greening on human bioclimate in a complex Urban environment. *Advances in Meteorology*, *2015*. doi: 10.1155/2015/747259

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, *15*(3), 259–263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130

Mayer, H., & Matzarakis, A. (1999). Die Richtlinie VDI 3787 Blatt 2 “Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima.” K. R. der L. im V. und DIN (Ed.), Umweltsimulation: Methodik, Anwendung, Nutzen (pp. 53–62). Düsseldorf: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN.

Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, *305*(5686), 994–997. doi: 10.1126/science.1098704

Ouyang, W., Sinsel, T., Simon, H., Morakinyo, T. E., Liu, H., & Ng, E. (2022). Evaluating the thermal-radiative performance of ENVI-met model for green infrastructure typologies: Experience from a subtropical climate. *Building and Environment*, *207*(PB), 108427. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108427

Sinsel, T., Simon, H., Ouyang, W., dos Santos Gusson, C., Shinzato, P., & Bruse, M. (2022). Implementation and evaluation of mean radiant temperature schemes in the microclimate model ENVI-met. *Urban Climate*, *45*, 1–20. doi: 10.1016/j.uclim.2022.101279

Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., M., T., & Allen, S. K. (2013). *Climate change 2013. The physical science basis. Working group I contribution to the 5th assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Cambridge: Cambridge University Press.

Walther, E., & Goestchel, Q. (2018). The P.E.T. comfort index: Questioning the model. *Building and Environment*, *137*(April), 1–10. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.054