

Abschlussbericht TransMiT

Teil B

B.2:

Blau-Grüne Infrastrukturen (BGI)

B 2.10

Auswertung von Messdaten zur Bewertung des lokalen Kleinklimas in Hannover anhand von Kenntagen

Autoren:

Jessica Gerstendörfer

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik Hannover

Kurzbeschreibung des Einzelkapitels

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Auswertung von Messdaten zur Bewertung des lokalen Kleinklimas in Hannover am Beispiel des Umsetzungspiloten „Hinterhof“. Der Innenhof ist mit blauen Elementen (zwei Teiche & neun offene, an der Oberfläche gelegene Zisternen) und grünen Elementen (Büsche, Wasserpflanzen, Bäume) ausgestattet vgl. B 2.6 und B 2.7. In TransMiT wurde untersucht, welchen Einfluss die Gestaltung auf das Kleinklima bei warmen Wetterlagen hat.

Nachfolgend zusammengestellt sind die Messungen der Wetterstation und zusätzliche Datenaufnahmen zur Globalstrahlung und Wassertemperaturen. In dem „Verdunstungsteich“ wurde darüber hinaus der Wasserstand aufgezeichnet.

Über eine einmalige punktuelle Drohnenbefliegung wurden Vergleichsdaten gemessen. Aufgenommen wurden die Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und das Windgeschehen bei einer Vertikalsondierung bis 100 m Höhe. Ergänzend hierzu fanden über die Drohnenbefliegung Aufnahmen der Oberflächentemperaturen mit einer Infrarot-Sonde statt.

Die lokalen Temperaturen werden in den Vergleich mit denen anderer Hinterhöfe bzw. weiterer urbaner Orte gestellt.

Die Ergebnisse zur Qualität des Wassers sind B 3 (QMRA) zu entnehmen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einführung	1
2 Messkampagne des Südstadt-Innenhofs	3
2.1 Untersuchungsgebiet und Messorte.....	3
2.1.1 Beschreibung Messstation Innenhof Hannover Südstadt.....	4
2.1.2 Beschreibung Wetterstationen DWD.....	6
2.2 Messergebnisse.....	8
2.2.1 Wetterstation und Sonden (Innenhof Südstadt, DWD, IMuK).....	8
2.2.2 Drohnenmessungen Innenhof.....	24
3 Simulation des Südstadt-Innenhofs	32
3.1 Modell-Beschreibung	32
3.2 Eingangsdaten und Modell-Aufbau Innenhof.....	33
3.3 Ergebnisse.....	35
3.3.1 Oberflächentemperatur	35
3.3.2 Bodennahe Lufttemperatur (2 m ü. Gr.)	37
3.3.3 Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET).....	38
3.3.4 Relative Luftfeuchte	40
3.3.5 Windgeschwindigkeit (2 m ü. Gr.)	42
3.4 Zusammenfassung	43
4 Literaturverzeichnis	44
Anhang	47

Abbildungsverzeichnis

Bild 1-1:	Vergleich der verschiedenen Skalen des Klimas anhand zeitlicher, vertikaler und horizontaler Auflösung (in Brand (2008) aus Weischet und Endlicher (2008)).....	1
Bild 1-2:	Vertikalgliederung der Troposphäre (in Brand (2008) aus Weischet und Endlicher (2008) nach Schönwiese (2008)).	2
Bild 2-1:	Standorte der betrachteten Wetterstationen, Google Maps Bildschirm-Aufnahme (Kartendaten © 2021 GeoBasis-DE/BKG © 2009, Google). Vertikal beträgt die Länge ca. 18 km und horizontal beträgt die Breite des Ausschnitts ca. 17 km.....	3
Bild 2-2:	Wetterstation im Innenhof (Südstadt). Bildquelle: ISAH	5
Bild 2-3:	Messpunkte im Innenhof (Südstadt). Gelbe Punkte sind Messungen der Wassertemperaturen (HOBO Datenlogger), der lilafarbene Punkt zeigt die Messung der Globalstrahlung, die roten Punkte sind die Messtation (unterer Punkt) und die Messung des Wasserdrucks (Mitte tiefer Teich). Bildquelle: Architekturbüro Kozjak	6
Bild 2-4:	Beobachtete Wetterstationen (außer Flughafen und IMuK) und ihre Lage im Luftbild (rote Sterne). (a,b) Marianne-Baecker-Allee, (c,d) Weidendamm, (e,f) Kattenbrookspark, (g,h) Innenhof. Die Bilder (a,c,e) wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD), Regionales Klimabüro Hamburg, zur Verfügung gestellt. Bilder (b,d,f,h) sind Google Maps Daten (Kartendaten © 2021 GeoBasis-DE/BKG © 2009, Google), Verwendung mit Genehmigung nach den allgemeinen Richtlinien von Google und dem „Fair Use Copyright“. Das Bild (g) stammt vom ISAH.	7
Bild 2-5:	Klimaprognose WETTREG für Niedersachsen und DWD-Messungen.....	8
Bild 2-6:	Maximale Lufttemperaturen verglichen im Sommer 2020 vom 01.06.2020 bis 30.09.2020 für die Stationen IMuK, Innenhof, Flughafen, Kattenbrookspark (KP), Marianne-Baecker-Allee (MBA) und Weidendamm (WD).	9
Bild 2-7:	Minimale Lufttemperaturen verglichen im Sommer 2020 vom 01.06.2020 bis 30.09.2020 für die Stationen IMuK, Innenhof, Flughafen, Kattenbrookspark (KP), Marianne-Baecker-Allee (MBA) und Weidendamm (WD).	9
Bild 2-8:	Maximale Lufttemperaturen verglichen im Sommer 2021 vom 01.06.2021 bis 30.09.2021 für die Stationen IMuK, Innenhof und Flughafen. Im August fehlen Daten für den Innenhof durch eine Umstellung der Sonden.	10
Bild 2-9:	Minimale Lufttemperaturen verglichen im Sommer 2021 vom 01.06.2021 bis 30.09.2021 für die Stationen IMuK, Innenhof und Flughafen. Im August fehlen Daten für den Innenhof durch eine Umstellung der Sonden.....	10
Bild 2-10:	Anzahl heiße Tage in Deutschland (dwd-klima-report_aufgabe-4.pdf)	11
Bild 2-11:	Hitzewelle im August 2020 in Hannover.	11

Bild 2-12:	Maximale Lufttemperaturen von 10-minütigen Zeiträumen vom 8. August 2020 (heißester Tag in Hannover) für die DWD-Wetterstationen am Flughafen, Marianne-Baecker-Allee (MBA), Weidendamm (WD), Kattenbrookspark (KP), die Station des IMuK in Herrenhausen und die TransMiT-Wetterstation im blauen Hof. Die horizontale Linie markiert die 30 °C-Grenze. Die gestrichelten vertikalen Linien markieren Sonnenaufgang und Sonnenuntergang. Die schwarzen Symbole markieren die Höchsttemperatur für jede Station. Das untere Diagramm zeigt auf der y-Achse die Differenz zwischen den Höchsttemperaturen des Innenhofs und der MBA-Station.....	13
Bild 2-13:	Serie von Tropennächten im August 2020 in Hannover.....	14
Bild 2-14:	Minimale Lufttemperaturen der jeweils letzten 10 Minuten in der Nacht vom 8. auf den 9. August 2020. Die horizontale schwarze Linie markiert 20 °C. Die schwarzen Sterne markieren die Mindesttemperaturen für jede Station.	15
Bild 2-15:	Minimale Lufttemperaturen der jeweils letzten 10 Minuten in der Nacht vom 20. August auf den 21. August 2020. Die horizontale schwarze Linie markiert 20 °C. Die schwarzen Sterne markieren die Mindesttemperaturen für jede Station.....	16
Bild 2-16:	Anzahl der heißen Tage (blau) und tropischen Nächte (rot) im Vergleich in Hannover 2020 für die Mobilstationen Marianne-Baecker-Allee, Weidendamm und Kattenbrookspark sowie Flughafen und blauer Innenhof.	16
Bild 2-17:	Temperaturamplitude am 8. August 2020 für die Stationen Innenhof, Kattenbrookspark (KP) und Marianne-Baecker-Allee (MBA).	17
Bild 2-18:	Maximale Lufttemperaturen von 10-minütigen Zeiträumen vom 18. Juni 2021 (heißester Tag in Hannover) für die DWD-Wetterstation am Flughafen (FH), die Station des IMuK in Herrenhausen und die TransMiT-Wetterstation im blauen Hof (IH). Die horizontale Linie markiert die 30 °C-Grenze. Die gestrichelten vertikalen Linien markieren Sonnenaufgang und Sonnenuntergang (für den 18. Juni). Die schwarzen Symbole markieren die Höchsttemperatur für jede Station. Das untere Diagramm zeigt auf der sekundären y-Achse die Differenz zwischen den Höchsttemperaturen des Innenhofs und der Flughafen-Station (hellblau) sowie Differenz zwischen IMUK und Innenhof (violett).	18
Bild 2-19:	Temperaturen verschiedener Oberflächen an einem Hochsommertag (Fezer F.)	18
Bild 2-20:	Minimale Lufttemperaturen der jeweils letzten 10 Minuten in der Nacht vom 20. August auf den 21. August 2020. Die horizontale schwarze Linie markiert 20 °C. Die schwarzen Sterne markieren die Mindesttemperaturen für jede Station.....	19
Bild 2-21:	Anzahl der heißen Tage (blau) und tropischen Nächte (rot) im Vergleich in Hannover 2021 für die Stationen Flughafen, blauer Innenhof und IMUK.	19

Bild 2-22:	Im Südstadt-Innenhof gemessene mittlere Lufttemperatur in °C (Primärachse) und mittlere relative Feuchtigkeit in % (Sekundärachse) von Anfang Mai 2020 bis Ende Juni 2022.....	20
Bild 2-23:	Im Südstadt-Innenhof gemessene mittlere Lufttemperatur in °C (Primärachse) und mittlere relative Feuchtigkeit in % (Sekundärachse) von Anfang Mai 2020 bis Ende September 2020.....	20
Bild 2-24:	Hitzeindex berechnet für den Südstadt-Innenhof zwischen Mai 2020 und Ende Juni 2022. Dargestellt wird nur der Index für eine Temperatur größer 27 °C und eine Luftfeuchtigkeit über 40 %.....	22
Bild 2-25:	Hitzeindex berechnet für den Südstadt-Innenhof zwischen Mai 2020 und Ende September 2020. Dargestellt wird nur der Index für eine Temperatur größer 27 °C und eine Luftfeuchtigkeit über 40 %.....	22
Bild 2-26:	10-Minuten-Daten der Globalstrahlung im Innenhof von Mai 2020 bis Dezember 2021	23
Bild 2-27:	Globalstrahlung gemessen im Innenhof (Südstadt) als tägliche Mittelwerte von Mai 2020 bis Dezember 2021. Die gestrichelte Trendlinie ist ein Polynom 6. Grades. Die senkrechte Linie markiert den heißesten Tag 2020 (08.08.2020).....	24
Bild 2-28:	Ergebnisse der Vertikal-Sondierung (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im blauen Innenhof. Die gelben Punkte stellen das potentielle Temperaturprofil dar, die roten Punkte das Temperaturprofil und die blauen Punkte das Feuchtigkeitsprofil. Der tiefste Punkt (0 m) ist der Beginn, der höchste Punkt (ca. 80 m) ist das Ende des Messzeitraums. Die y-Achse zeigt die Höhe (m), die x-Achse zeigt die Temperatur (°C).....	26
Bild 2-29:	Vergleich zwischen einem Luftbild (a) und einem Infrarotbild (b) des blauen Hofes (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).....	26
Bild 2-30:	Ergebnis der Vertikal-Sondierung (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im blauen Innenhof. Die gelben Punkte stellen das Profil des Luftdrucks dar. Der tiefste Punkt (0 m) ist der Beginn, der höchste Punkt (ca. 80 m) ist das Ende des Messzeitraums. Die y-Achse zeigt die Höhe (m), die x-Achse zeigt den Luftdruck in hPa.....	27
Bild 2-31:	Windrichtung gemessen bei der Vertikalsondierung per Drohne am 17.06.2020 um 14:22 Uhr MESZ im Innenhof Südstadt (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).....	28
Bild 2-32:	Windgeschwindigkeit gemessen bei der Vertikalsondierung per Drohne am 17.06.2020 um 14:22 Uhr MESZ im Innenhof Südstadt (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).....	28
Bild 2-33:	Windrose zur Auswertung der Windgeschwindigkeiten und -richtungen gemessen per Drohne bei der Vertikal-Sondierung (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im blauen Innenhof.....	27

Bild 2-34:	Ergebnisse der vertikalen Sondierung (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im grünen Innenhof. Die gelben Punkte stellen das potentielle Temperaturprofil, die roten Punkte das Temperaturprofil und die blauen Punkte das Feuchtigkeitsprofil dar. Der tiefste Punkt (0 m) ist der Beginn, der höchste Punkt (ca. 80 m) ist das Ende des Messzeitraums. Die y-Achse zeigt die Höhe (m), die x-Achse zeigt die Temperatur (°C).....	29
Bild 2-35:	Vergleich zwischen Luftbild (a) und Infrarotaufnahme (b) des grünen Hofes (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).....	30
Bild 2-36:	Ergebnis der Vertikal-Sondierung (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im blauen Innenhof. Die gelben Punkte stellen das Profil des Luftdrucks dar. Der tiefste Punkt (0 m) ist der Beginn, der höchste Punkt (ca. 80 m) ist das Ende des Messzeitraums. Die y-Achse zeigt die Höhe (m), die x-Achse zeigt den Luftdruck in hPa.	30
Bild 2-37:	Windrichtung gemessen bei der Vertikalsondierung per Drohne am 17.06.2020 um 14:22 Uhr MESZ im Innenhof Südstadt (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).....	31
Bild 2-38:	Windrichtung gemessen bei der Vertikalsondierung per Drohne am 17.06.2020 um 14:22 Uhr MESZ im Innenhof Südstadt (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).....	31
Bild 3-1:	Landoberflächenklassifikation des Untersuchungsgebietes.....	34
Bild 3-2:	In PALM-4U modellierte Oberflächentemperaturen für die verschiedenen Landoberflächenklassifikationen um 14:00 MESZ (links) und während der Nacht um 04:00 MESZ (rechts). Quelle: GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2021)	36
Bild 3-3:	In PALM-4U modellierte Oberflächentemperaturen für die verschiedenen Landoberflächenklassifikationen um 14:00 MESZ (a) (GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2021)) und Infrarotbild (b) des blauen Hofes (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im Vergleich.	36
Bild 3-4:	(a) Bodennahe Lufttemperatur am Tag (14:00 Uhr) und (b) in der Nacht (04:00 Uhr).....	37
Bild 3-5:	(a) PET am Tage (14:00 Uhr) und in der (b) Nacht (04:00 Uhr).....	38
Bild 3-6:	(a) Relative Luftfeuchtigkeit am Tage (14:00 Uhr) und (b) in der Nacht (04:00 Uhr).....	40
Bild 3-7:	(a) Windgeschwindigkeiten am Tage (14:00 Uhr) und (b) bei Nacht (04:00 Uhr).....	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Gemessene Variablen und entsprechende Sensorik im Innenhof (Südstadt).....	4
Tabelle 2-2: Tägliche maximale Lufttemperaturen während der Hitzewelle im August 2020 für jeden beobachteten Standort.....	12
Tabelle 2-3: Abweichung zwischen den maximalen Lufttemperaturen an den DWD-Stationen (FH, MBA, WD, KP) und der Hofstation (IH) in °C.....	12
Tabelle 2-4: Tägliche minimale Lufttemperaturen während der Hitzewelle im August 2020 für jeden beobachteten Standort.....	14
Tabelle 2-5: Abweichung zwischen den minimalen Lufttemperaturen an den DWD-Stationen (FH, MBA, WD, KP) und der Hofstation (IH) in °C.....	15
Tabelle 2-6: Konstanten zur Bestimmung des Hitzeindex (bergfreunde.de 2022).....	21
Tabelle 2-7: Warntabelle für Hitzeschäden (nach bergfreunde.de (2022)).....	23
Tabelle 2-8: Eigenschaften der untersuchten Innenhöfe.....	25
Tabelle 3-2: Temperaturprofil des Bodens.....	35
Tabelle 3-3: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden nach Matzarakis und Mayer (1996).....	39

Abkürzungsverzeichnis

AdT	Straßenname „An der Tiefenriede“
DWD	Deutscher Wetterdienst
GH	Gartenheim
HI	Hitzeindex
IMuK	Institut für Meteorologie und Klimatologie, Leibniz Universität Hannover
KP	Kattenbrookspark
MBA	Marianne-Baecker-Allee
UTC	Coordinated Universal Time
WD	Weidendamm

1 Einführung

Verglichen mit anderen Ländern sind deutsche Städte gut begrünt. Schaut man sich jedoch die Stadtteilebene an, dann sind die Grünflächen nicht gleichmäßig unter den Quartieren verteilt (Bundesministerium für Umwelt et al. 2015). Dadurch ist darauf zu schließen, dass sich diese ungleiche Verteilung von Grün auch auf das Mikroklima der einzelnen Quartiere auswirkt.

Per Definition ist das Mikroklima das Klima, das sich im Rahmen eines Baublocks oder Baumes befindet und eine Ausdehnung von etwa 1 cm bis 10 m in der Vertikalen und 1 cm bis 100 m in der Horizontalen aufweist. Zeitlich gesehen wird eine Spanne von 1 s bis 1 min angenommen (s. Bild 1-1).



Bild 1-1: Vergleich der verschiedenen Skalen des Klimas anhand zeitlicher, vertikaler und horizontaler Auflösung (in Brand (2008) aus Weischet und Endlicher (2008)).

Um die Klimawirkung blau-grüner Infrastrukturen auf Quartiersebene zu bestimmen und zu bewerten, wurden im TransMiT-Projekt Messungen per Drohne (Innenhof Linden und Innenhof Südstadt), Messungen via Wetterstation (Innenhof Südstadt und Vergleich mit DWD Stationen) und Simulationen im Klimamodell PALM-4U (Innenhof Südstadt mit benachbartem Vergleichshof) durchgeführt.

Klimatologisch betrachtet (s. Bild 1-2) liegt die Größe „Innenhof“ in der Troposphäre. Die Messungen decken die bodennahe Grenzschicht ab und der Innenhof selbst mit Gebäudehöhen von ca. 20 m liegt in der bodennahen Hindernisschicht (oder auch Prandtl-Schicht bzw. engl. *canopy layer*).

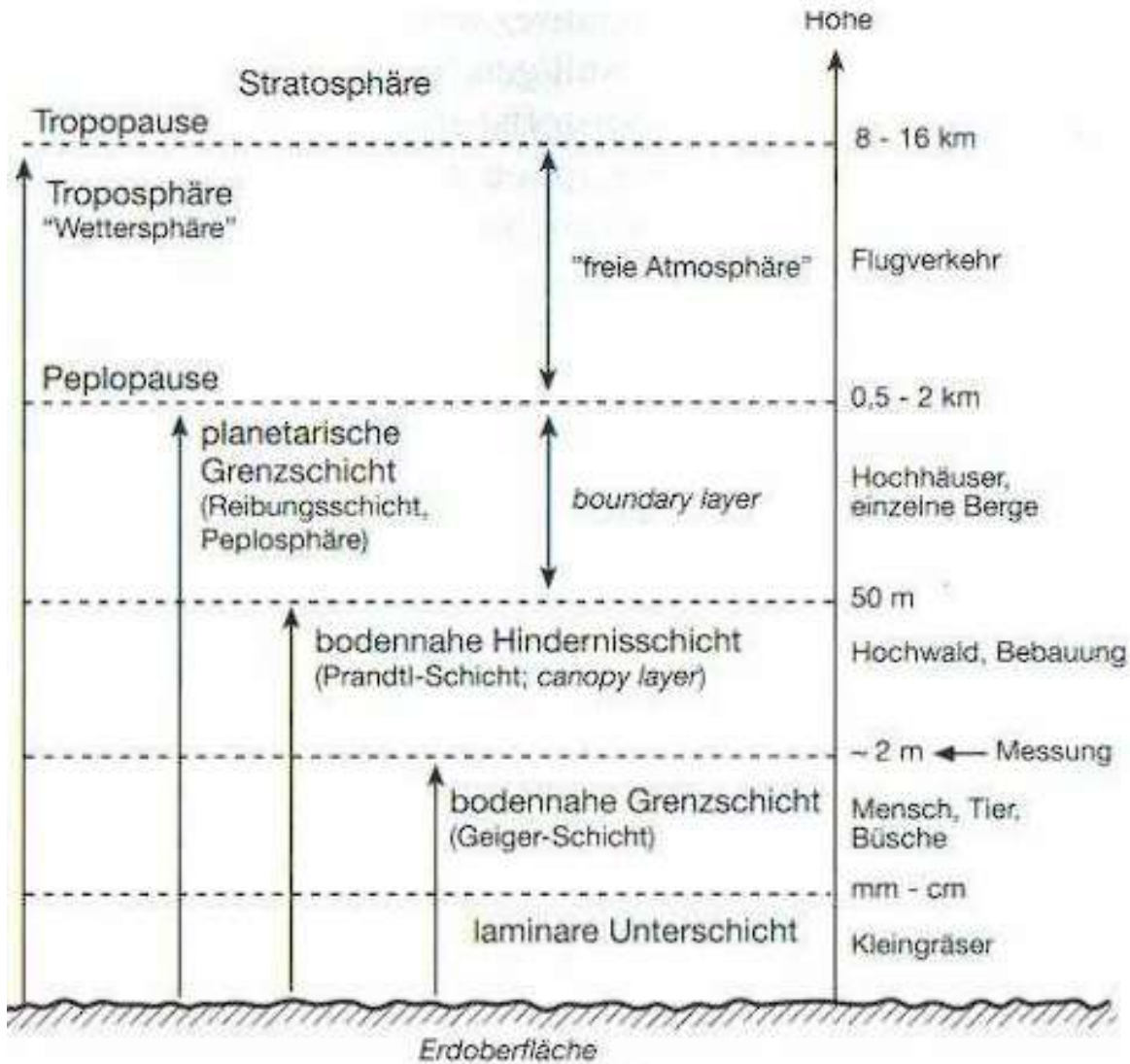


Bild 1-2: Vertikalgliederung der Troposphäre (in Brand (2008) aus Weischet und Endlicher (2008) nach Schönwiese (2008)).

Die Messungen im Südstadt-Innenhof via Wetterstation (Beschreibung s. Kapitel 2.1.1) wurden so durchgeführt, dass sie dem Messumfang von Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes entsprechen (bis auf die Messgröße Wind). Konkret wurden die Parameter Niederschlag, Temperatur, Luftdruck und relative Feuchte in 2 m Höhe sowie die Globalstrahlung mit Hilfe eines unverschattet an einer Fluchttreppe auf Gebäudehöhe angebrachten Pyranometers bestimmt.

Auf Windmessungen im Innenhof wurde aus Kostengründen und wegen fehlender Relevanz für hygienische Messungen und des besonders hohen Standorteinflusses auf die Messgröße (abgegrenzter Innenhof) verzichtet. Informationen zum Windgeschehen wurden stattdessen von naheliegenden DWD-Stationen übernommen.

Auf Basis der Innenhof-Messungen war ein Abgleich der erhobenen Werte mit mobilen DWD-Stationen in Hannover (Weidendamm, Kattenbrookspark, Marianne-Baecker-Alle) möglich (vgl. Bild 2-1). Zusätzlich standen Daten eines Messturms des Instituts für Meteorologie (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Schilke, H. 2021) der Leibniz Universität Hannover in Herrenhausen zur Verfügung. Darüber hinaus wurden die Daten mit den DWD-Messungen am Hannover Flughafen in Langenhagen verglichen. Anhand der

Indikatoren Hitzetage, Tropennächte und Hitzeindex konnte so der Einfluss der gewählten dezentralen Bewirtschaftung im Innenhof auf das Kleinklima bewertet werden (s. auch Kapitel 2.2.1).

Neben der Messkampagne wurde die Innenhof-Situation ebenfalls im Modell betrachtet. Dabei wurde im Unterauftrag von GEO-NET ein Basis-Modell in PALM-4U erstellt und eine autochthone Wetterlage simuliert (s. Kapitel 3).

2 Messkampagne des Südstadt-Innenhofs

2.1 Untersuchungsgebiet und Messorte

Untersucht wurden Messdaten aus der Region Hannover (Niedersachsen). Hannover hat ca. 534000 Einwohner (Stand Juni 2020, Landesamt für Statistik Niedersachsen (LSN) (2020)) und eine Fläche von ca. 204 km². In der Innenstadt sind 35.9% der Fläche versiegelt; 15.2% sind Straßen, Plätze und Wege; 7.8% sind begrünt; die landwirtschaftliche und gartenbauliche Fläche beträgt 17.2%; 13.2% Wälder und Gehölz; und 3.5% sind Wasserkörper (Statistisches Amt der Landeshauptstadt Hannover 2021).

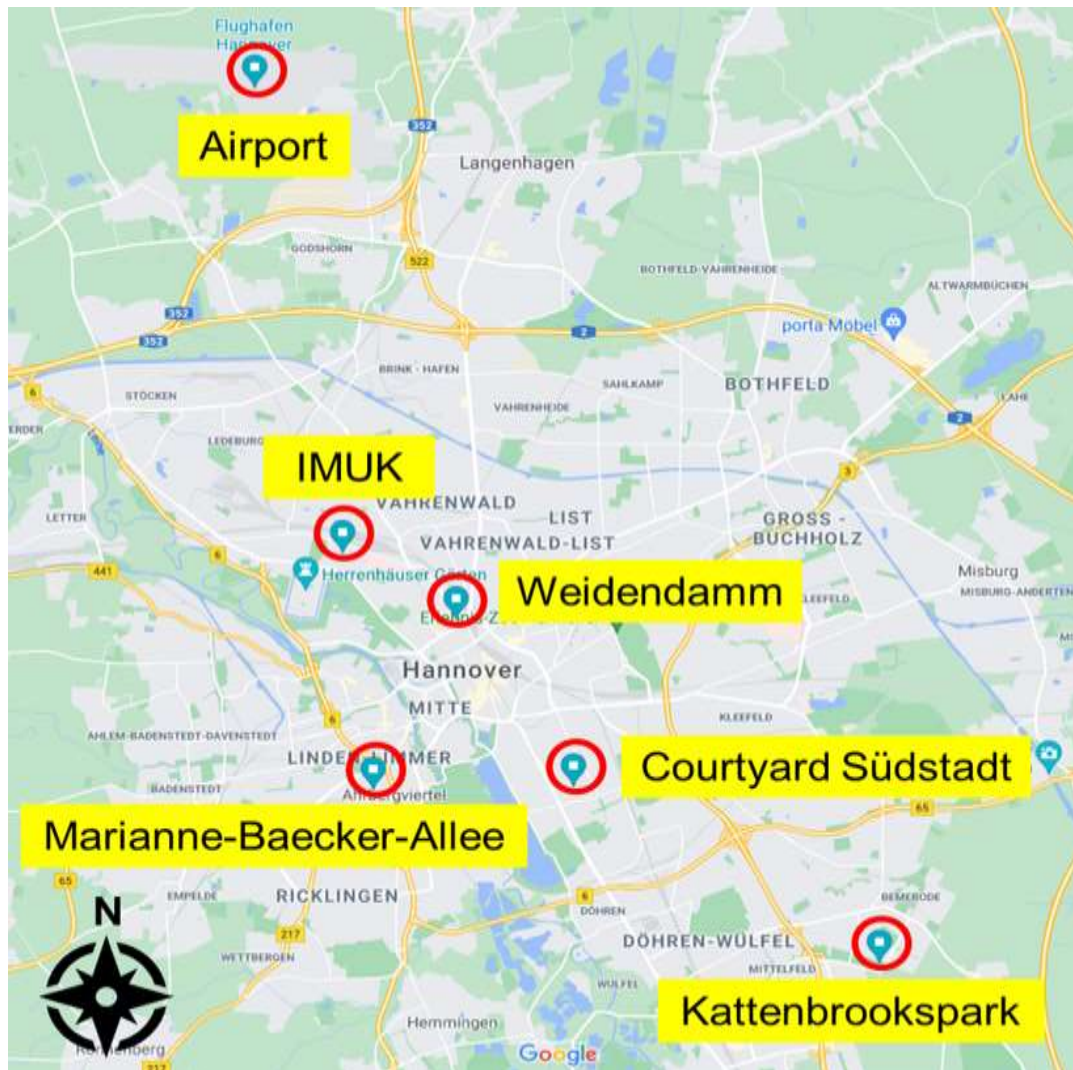


Bild 2-1: Standorte der betrachteten Wetterstationen, Google Maps Bildschirm-Aufnahme (Kartendaten © 2021 GeoBasis-DE/BKG © 2009, Google). Vertikal beträgt die Länge ca. 18 km und horizontal beträgt die Breite des Ausschnitts ca. 17 km.

2.1.1 Beschreibung Messstation Innenhof Hannover Südstadt

Im Innenhof (Südstadt) wurden die Lufttemperatur, der Luftdruck, die relative Luftfeuchtigkeit, der Niederschlag sowie die Globalstrahlung im Zeitraum Mai 2020 bis Juni 2022 aufgezeichnet. Die Wetterstation im Innenhof umfasste dabei die in Tabelle 2-1 dargestellte Sensorik.

Tabelle 2-1: Gemessene Variablen und entsprechende Sensorik im Innenhof (Südstadt)

Variablen	Hersteller	Ausrüstung	Genauigkeit	Bandbreite	Auflösung
Lufttemperatur	LAMBRECHT meteo	THP[pro] Modbus	± 0.1 K (0...60 °C) und ± 0.2 K (-40...0 °C)	-40...+70 °C	0.1 °C
Luftdruck	LAMBRECHT meteo	THP[pro] Modbus	± 2 hPa (bei -30...+70 °C) ± 1 hPa (bei -10...+60 °C) ± 0.5 hPa (bei 25 °C)	500...1100 hPa	0.1 hPa
Relative Feuchtigkeit	LAMBRECHT meteo	THP[pro] Modbus	typ. $\pm 1.5\%$ (0...80%) r.F. $\pm 2\%$ (>80%) r. F.	0...100% r. F.	0.1% r. F.
Wasser-temperatur	HOBO®	Pendant® MX 2201	± 0.5 °C von -20 °C bis 70 °C	20 °C to 70 °C in der Luft -20 °C to 50 °C im Wasser	0.04 °C
Niederschlag	LAMBRECHT meteo	rain[e]one Modbus	0.1 mm oder 2%	0.005... ∞ mm (ohne Limit)	0.001 mm (Impuls Auslass: 0.01 mm)
Globalstrahlung	LAMBRECHT meteo	Second Class Pyranometer, 16,103.5 series	Langzeitstabilität $< \pm 1\%$ Änderung pro Jahr Nicht-linearität $< \pm 1\%$ (100 bis 1000 W/m ²) Richtungsfehler $< \pm 25$ W/m ² Spektrale Selektivität $< \pm 5\%$ (0.35 bis 1.5×10^{-6} m) Temperatur-verhalten $< \pm 3\%$ (-10 bis +40 °C)	Messbereich 0 bis 2000 W/m ² nominaler Betriebstemperatur-Bereich -40 to +80 °C Spektralbereich 285 bis 3000×10^{-9} m	Auflösung der Bestrahlungsstärke 0.2 W/m ²

Bild 2-2 zeigt den Aufbau der Wetterstation im Innenhof mit folgender Nummerierung:

1. Lufttemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit, Taupunkt
2. Niederschlagssensor
3. Datenlogger
4. Datenlogger

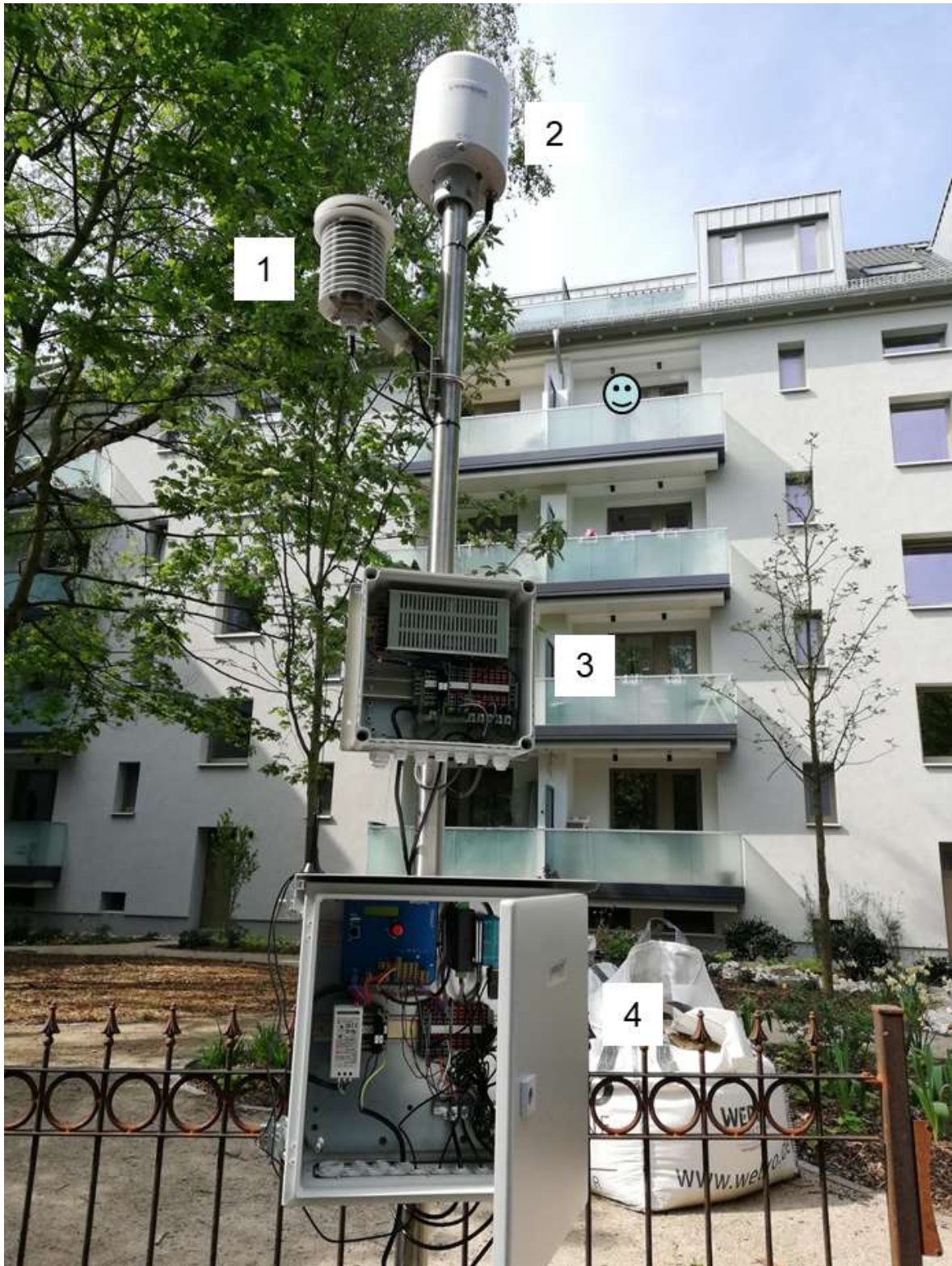


Bild 2-2: Wetterstation im Innenhof (Südstadt). Bildquelle: ISAH



Bild 2-3: Messpunkte im Innenhof (Südstadt). Gelbe Punkte sind Messungen der Wassertemperaturen (HOBO Datenlogger), der lilafarbene Punkt zeigt die Messung der Globalstrahlung, die roten Punkte sind die Messtation (unterer Punkt) und die Messung des Wasserdrucks (Mitte tiefer Teich). Bildquelle: Architekturbüro Kozjak

2.1.2 Beschreibung Wetterstationen DWD

Genutzt wurden die Daten der mobilen DWD-Stationen für das Jahr 2020. Nach Angaben des DWD, Regionales Klimabüro Hamburg, Krugmann, G. (2021) war die DWD-Station an der Marianne-Baecker-Allee (Abbildungen a,b) auf der einen Seite von benachbarten Einzelgebäuden unterschiedlicher Höhe umgeben, auf der anderen Seite befanden sich eine breite Straße und ein sehr großer versiegelter Parkplatz. Diese Messstation war von einer größeren Grünfläche umgeben.

Die DWD-Station Weidendamm war auf drei Seiten von Straßen, einem hohen Einzelgebäude, einer Reihenbebauung und anderen Gebäuden geringerer Höhe umgeben. In der Nähe befand sich auch eine große Kreuzung.

Die DWD-Station am Kattenbrookspark befand sich in einem offenen Bereich des Parks, es gab nur Büsche in der Nähe, einige einzelne Bäume waren weiter entfernt. Es wird vermutet, dass der Park im Sommer nicht bewässert wurde, so dass der Boden vermutlich nicht dauerhaft grün war. Außerdem gab es eher keinen Schatten.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Bild 2-4: Beobachtete Wetterstationen (außer Flughafen und IMuK) und ihre Lage im Luftbild (rote Sterne). (a,b) Marianne-Baecker-Allee, (c,d) Weidendamm, (e,f) Kattenbrookspark, (g,h) Innenhof. Die Bilder (a,c,e) wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD), Regionales Klimabüro Hamburg, zur Verfügung gestellt. Bilder (b,d,f,h) sind Google Maps Daten (Kartendaten © 2021 GeoBasis-DE/BKG © 2009, Google), Verwendung mit Genehmigung nach den allgemeinen Richtlinien von Google und dem „Fair Use Copyright“. Das Bild (g) stammt vom ISAH.

2.2 Messergebnisse

Stadtklima wird in der Literatur dadurch beschrieben, dass die i) Luftfeuchtigkeit gering, ii) Lufttemperatur hoch und iii) der Wasserhaushalt unausgeglichen sind (Bundesministerium für Umwelt et al. 2015). In TransMiT wurden diese Größen daher in einem Innenhof in der Hannover-Südstadt näher betrachtet, um zu bewerten, welchen Einfluss ein blau-grüner Innenhof in der dicht bebauten Stadt auf diese Variablen hat.

2.2.1 Wetterstation und Sonden (Innenhof Südstadt, DWD, IMuK)

Lufttemperatur

Die folgende Abbildung zeigt den durch WETTREG projizierten und an den DWD-Stationen tatsächlich beobachteten Verlauf der jährlichen Durchschnittstemperaturen für Niedersachsen und Bremen. Die dargestellte Streubreiten gibt die minimalen und maximalen Jahreswerte der zehn WETTREG-Realisierungen wieder (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) 2012).

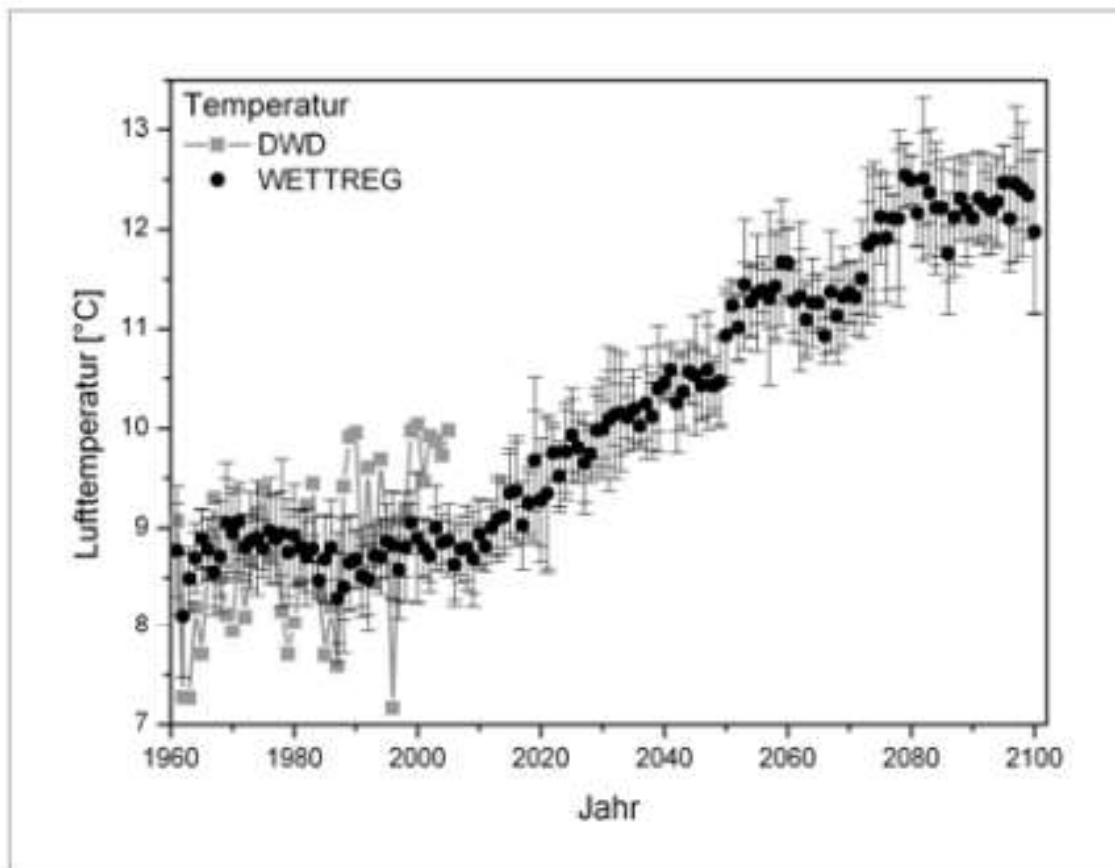


Bild 2-5: Klimaprognose WETTREG für Niedersachsen und DWD-Messungen

Die Lufttemperaturen des Innenhofs werden jeweils für das Jahr 2020 dargestellt (s. Bild 2-6) mit den Lufttemperaturen der umgebenden Stationen (IMuK, DWD mobile Stationen + Flughafen), um eine Einordnung und einen Vergleich zu ermöglichen.

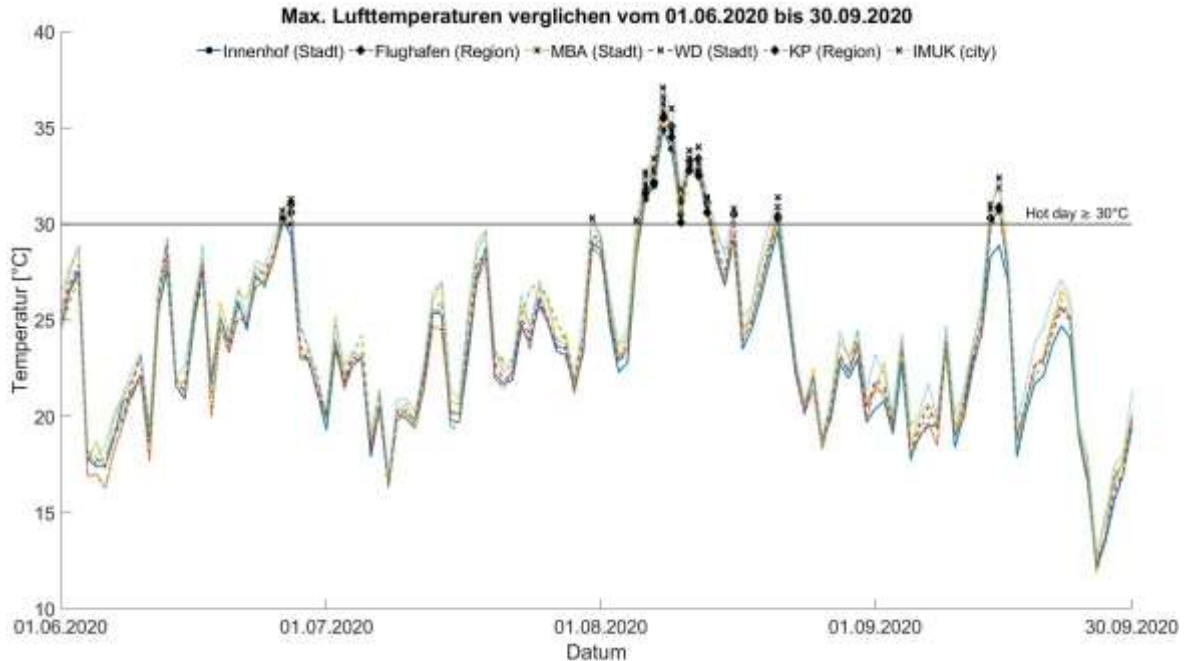


Bild 2-6: Maximale Lufttemperaturen verglichen im Sommer 2020 vom 01.06.2020 bis 30.09.2020 für die Stationen IMuK, Innenhof, Flughafen, Kattenbrookspark (KP), Marianne-Baecker-Allee (MBA) und Weidendamm (WD).

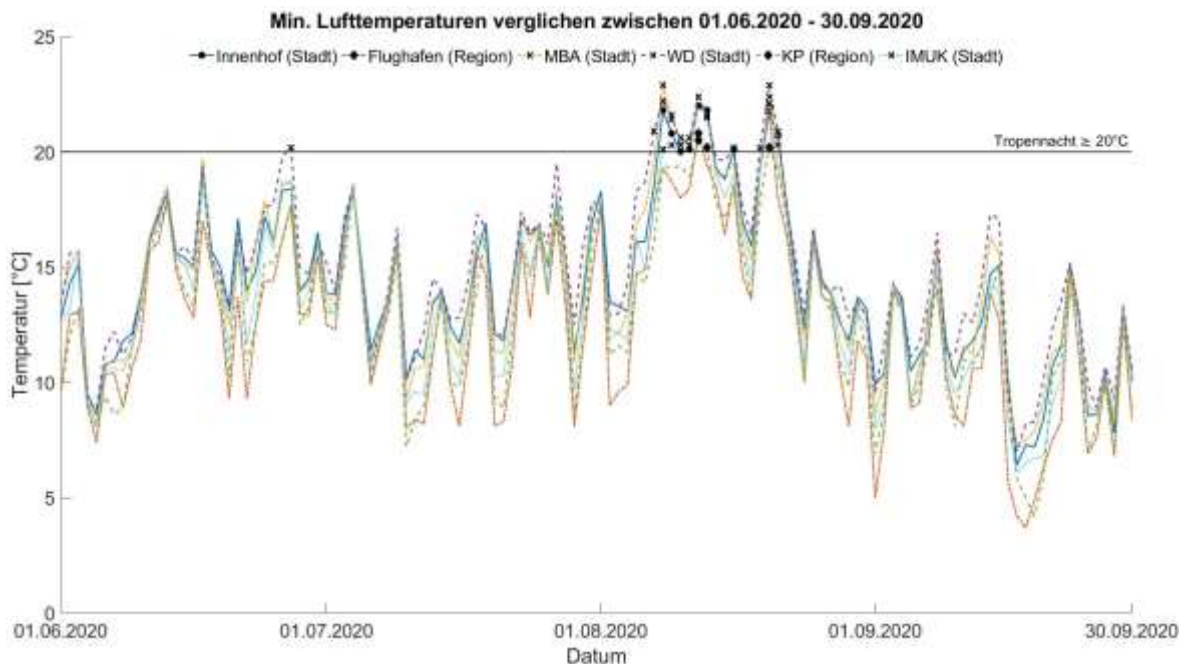


Bild 2-7: Minimale Lufttemperaturen verglichen im Sommer 2020 vom 01.06.2020 bis 30.09.2020 für die Stationen IMuK, Innenhof, Flughafen, Kattenbrookspark (KP), Marianne-Baecker-Allee (MBA) und Weidendamm (WD).

Für das Jahr 2021 (s. Bild 2-8) wurden durch die mobilen DWD Stationen keine Daten mehr erfasst, sodass hier nur noch der Vergleich zum Flughafen und zur IMuK-Station möglich ist.

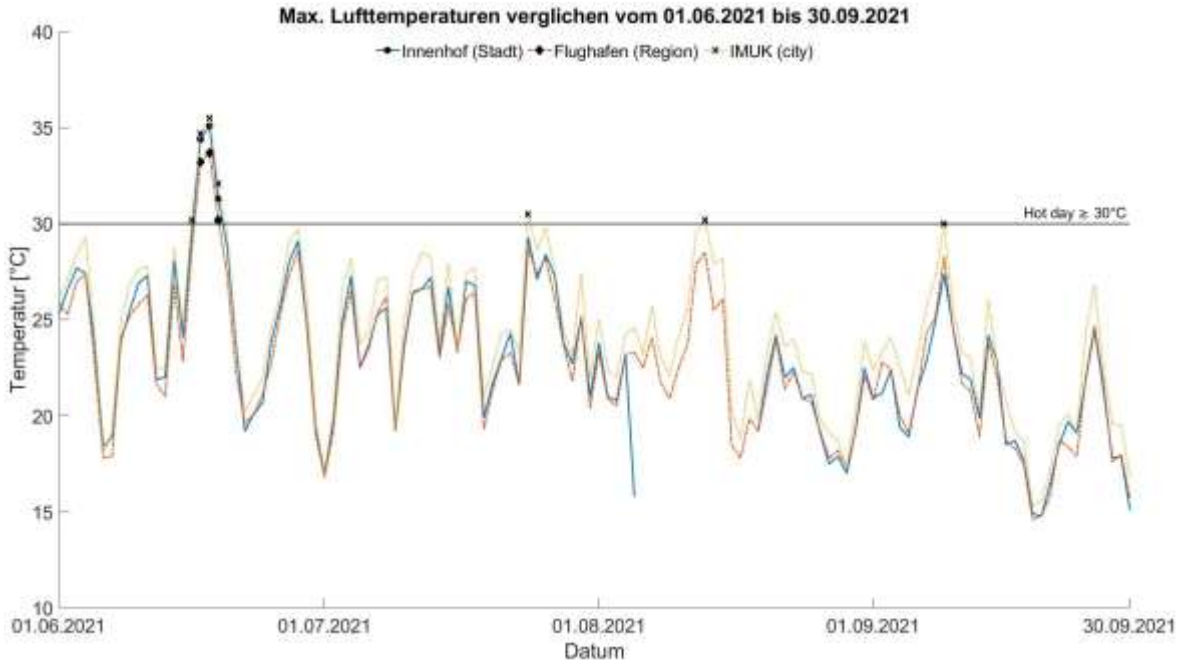


Bild 2-8: Maximale Lufttemperaturen verglichen im Sommer 2021 vom 01.06.2021 bis 30.09.2021 für die Stationen IMuK, Innenhof und Flughafen. Im August fehlen Daten für den Innenhof durch eine Umstellung der Sonden.

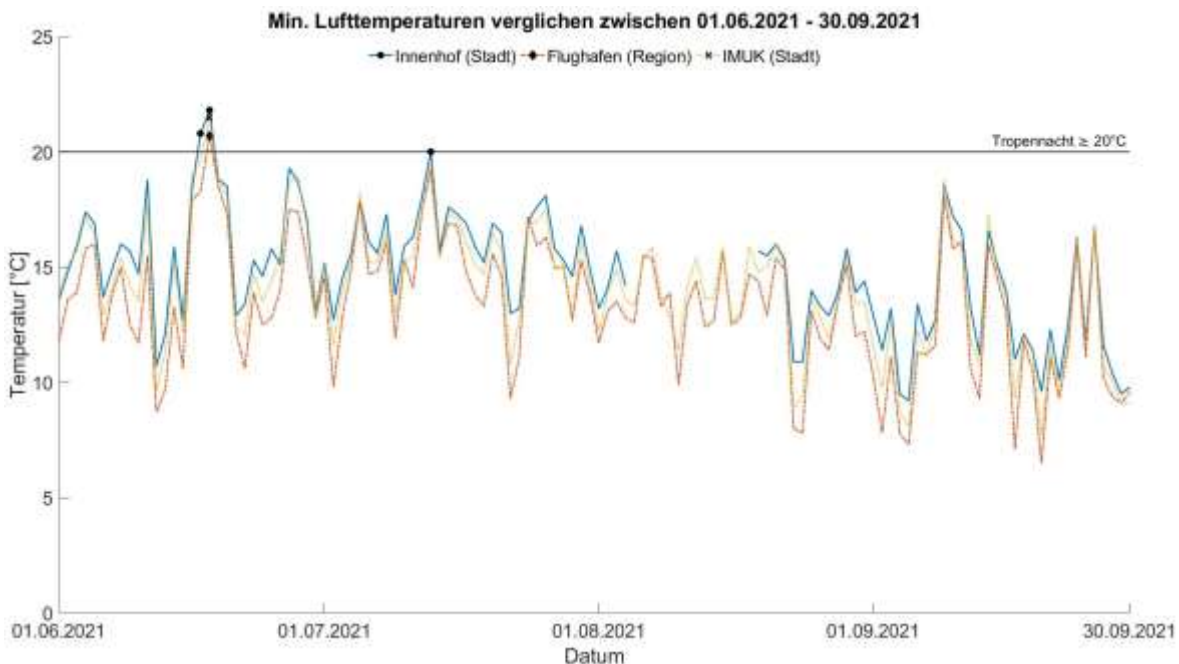


Bild 2-9: Minimale Lufttemperaturen verglichen im Sommer 2021 vom 01.06.2021 bis 30.09.2021 für die Stationen IMuK, Innenhof und Flughafen. Im August fehlen Daten für den Innenhof durch eine Umstellung der Sonden.

Heiße Tage & Tropennächte 2020

Anhand der Indikatoren Hitzetage und Tropennächte konnte der Einfluss der gewählten dezentralen Bewirtschaftung auf das Kleinklima bewertet werden. Gemäß der Definition des DWD (n.D.b) ist ein heißer Tag "[...] ein Tag, an dem die maximale Lufttemperatur ≥ 30 °C beträgt".

Die Anzahl heißer Tage pro Jahr hat in den letzten Jahrzehnten von 5 Tagen 1980 auf 10 Tage 2020 deutlich zugenommen.

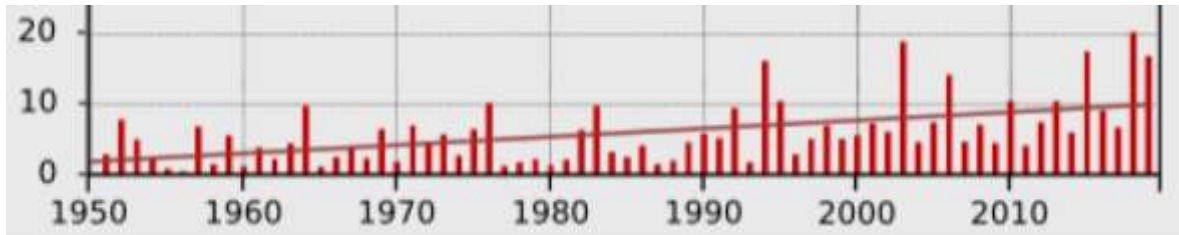


Bild 2-10: Anzahl heiße Tage in Deutschland (dwd-klima-report_aufgabe-4.pdf)

Für die Datenanalyse in TransMiT wurden die Maxima der letzten 10 Minuten jeder Stunde verwendet. Wie in Steger et al. (2020), basierend auf dem Deutschen Klimaatlas, beschrieben, ist der relevante Zeitraum für heiße Tage von Juni bis August. Davon abweichend gab es jedoch auch im September 2020 heiße Tage und Nächte in Hannover, so dass der Betrachtungszeitraum in TransMiT von Juni bis September erweitert wurde. Es zeigte sich, dass es zwischen dem 6. und 13. August eine Hitzewelle gab (vgl. Bild 2-11 und Tabelle 2-2), bei der an jedem Tag eine Lufttemperatur von über 30 °C gemessen wurde. Dem DWD (n.D.c) zufolge ist "eine Hitzewelle ein Zeitraum von mehreren Tagen mit ungewöhnlich hoher Wärmebelastung", aber es existiere keine international einheitliche Definition.

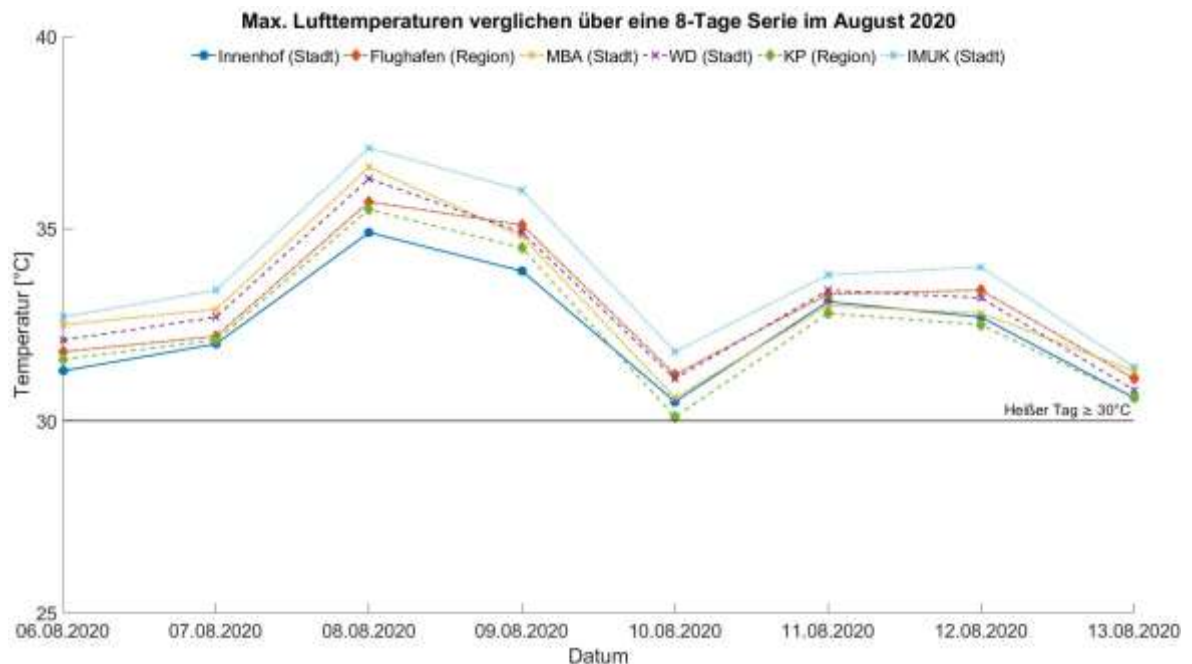


Bild 2-11: Hitzewelle im August 2020 in Hannover.

Tabelle 2-3 zeigt, dass die höchste Differenz der Lufttemperaturen mit 2,2 °C am 8. August 2020 zwischen der Hofstation und der Station des IMuK in Herrenhausen gemessen wurde. Die zweithöchste Differenz gab es ebenfalls am 8. August 2020 zwischen der Hofstation und der Station Marianne-Baecker-Allee mit 1,7 °C. Die dritthöchste Differenz gab es am 9. August 2020 zwischen der Hofstation und der Flughafenstation mit 1,2 °C. Beide Tage sind auch die Tage mit den höchsten Lufttemperaturen in ganz Hannover im Jahr 2020. Um sicherzustellen, dass die Differenzen nicht auf Messunsicherheiten der Hofstation zurückzuführen sind, sind im Anhang die Unsicherheiten der verwendeten Sensoren aufgelistet. Für die Lufttemperatur ergibt sich eine vom Hersteller angegebene Genauigkeit von $\pm 0,1$ °C (von 0 bis 60 °C) und $\pm 0,2$ °C (von -40 bis 0 °C).

Tabelle 2-2: Tägliche maximale Lufttemperaturen während der Hitzewelle im August 2020 für jeden beobachteten Standort.

	T (°C) IH	T (°C) FH	T (°C) MBA	T (°C) WD	T (°C) KP	T (°C) IMuK
6. August 2020	31.3	31.8	32.5	32.1	31.6	32.7
7. August 2020	32	32.2	32.9	32.7	32.1	33.4
8. August 2020	34.9	35.7	36.6	36.3	35.5	37.1
9. August 2020	33.9	35.1	34.8	34.9	34.5	36
10. August 2020	30.5	31.2	30.6	31.1	30.1	31.8
11. August 2020	33.1	33.3	33	33.4	32.8	33.8
12. August 2020	32.7	33.4	32.8	33.2	32.5	34
13. August 2020	30.6	31.1	31.3	30.8	30.6	31.4
MAX	34.9	35.7	36.6	36.3	35.5	37.1
MIN	30.5	31.1	30.6	30.8	30.1	31.4

Tabelle 2-3: Abweichung zwischen den maximalen Lufttemperaturen an den DWD-Stationen (FH, MBA, WD, KP) und der Hofstation (IH) in °C.

	Δ IH-FH	Δ IH-MBA	Δ IH-WD	Δ IH-KP	Δ IH-IMuK
6. August 2020	-0.5	-1.2	-0.8	-0.3	-1.4
7. August 2020	-0.2	-0.9	-0.7	-0.1	-1.4
8. August 2020	-0.8	-1.7	-1.4	-0.6	-2.2
9. August 2020	-1.2	-0.9	-1	-0.6	-2.1
10. August 2020	-0.7	-0.1	-0.6	0.4	-1.3
11. August 2020	-0.2	0.1	-0.3	0.3	-0.7
12. August 2020	-0.7	-0.1	-0.5	0.2	-1.3
13. August 2020	-0.5	-0.7	-0.2	0	-0.8
MAX Δ	-1.2	-1.7	-1.4	-0.6	-2.2
MIN Δ	-0.2	+/-0.1	-0.2	0	-0.7

Bild 2-12 zeigt die maximalen Lufttemperaturen (Höchstwert jeder 10-minütigen Periode) für den 8. August 2020 von 00:00 bis 24:00 Uhr (UTC), da hier die höchsten Temperaturen des Jahres gemessen wurden. Es zeigt sich, dass die Lufttemperaturen im Innenhof vor allem zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang am niedrigsten sind. Während der Nacht sind die Temperaturen im Innenhof höher als im KP und im Flughafen, aber niedriger als in WD und MBA. Zwischen 17:30 Uhr und Sonnenuntergang zeigt sich, dass die Lufttemperaturen am KP, am Flughafen und im Innenhof stärker und damit schneller sinken als

in der WD und der MBA. Zwischen 20 Uhr und 24 Uhr ähneln sich die Temperaturen des IMuK und des Innenhofs, allerdings sind die Temperaturen von 24 Uhr bis ca. 5 Uhr höher als die des IMuK.

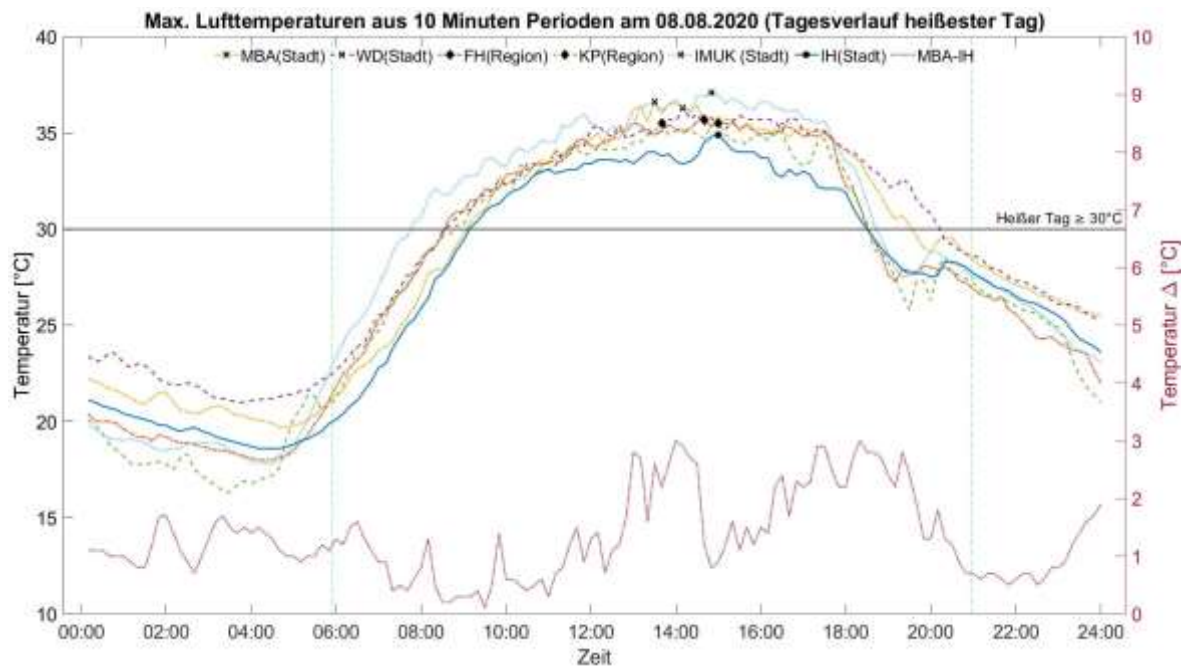


Bild 2-12: Maximale Lufttemperaturen von 10-minütigen Zeiträumen vom 8. August 2020 (heißester Tag in Hannover) für die DWD-Wetterstationen am Flughafen, Marianne-Baecker-Allee (MBA), Weidendamm (WD), Kattenbrookspark (KP), die Station des IMuK in Herrenhausen und die TransMiT-Wetterstation im blauen Hof. Die horizontale Linie markiert die 30 °C-Grenze. Die gestrichelten vertikalen Linien markieren Sonnenaufgang und Sonnenuntergang. Die schwarzen Symbole markieren die Höchsttemperatur für jede Station. Das untere Diagramm zeigt auf der y-Achse die Differenz zwischen den Höchsttemperaturen des Innenhofs und der MBA-Station.

Die hellblaue Linie (Bezug auf zweite y-Achse) zeigt den Unterschied zwischen den Höchsttemperaturen der Station MBA und der Station im Innenhof. Es zeigt sich, dass der höchste Unterschied 3 °C um 14:00 Uhr beträgt. Die MBA wurde ausgewählt, weil sie mit dem Innenhofgebiet (Südstadt) hinsichtlich der dichten Bebauung und der versiegelten Flächen in der Innenstadt vergleichbar ist.

Eine tropische Nacht ist definiert als "[...] eine Nacht, in der die minimale Lufttemperatur ≥ 20 °C beträgt" (DWD n.D.e), gemessen von 18 UTC bis 06 UTC. Nach dieser Definition wurden die Minima der letzten 10 Minuten jeder Stunde für die Datenanalyse verwendet.

Tabelle 2-4 sowie Bild 2-13 zeigen, dass es zwischen dem 9. und 14. August für die Stationen IMuK, WD, MBA und Innenhof eine Reihe von Tropennächten gab. Es fällt auf, dass die Stationen KP und Flughafen in diesem Zeitraum nur am 13. August bzw. 14. August Minimaltemperaturen über 20 °C registrierten. WD ist die einzige Station, die am 28. Juni nachts Temperaturen über 20 °C gemessen hat.

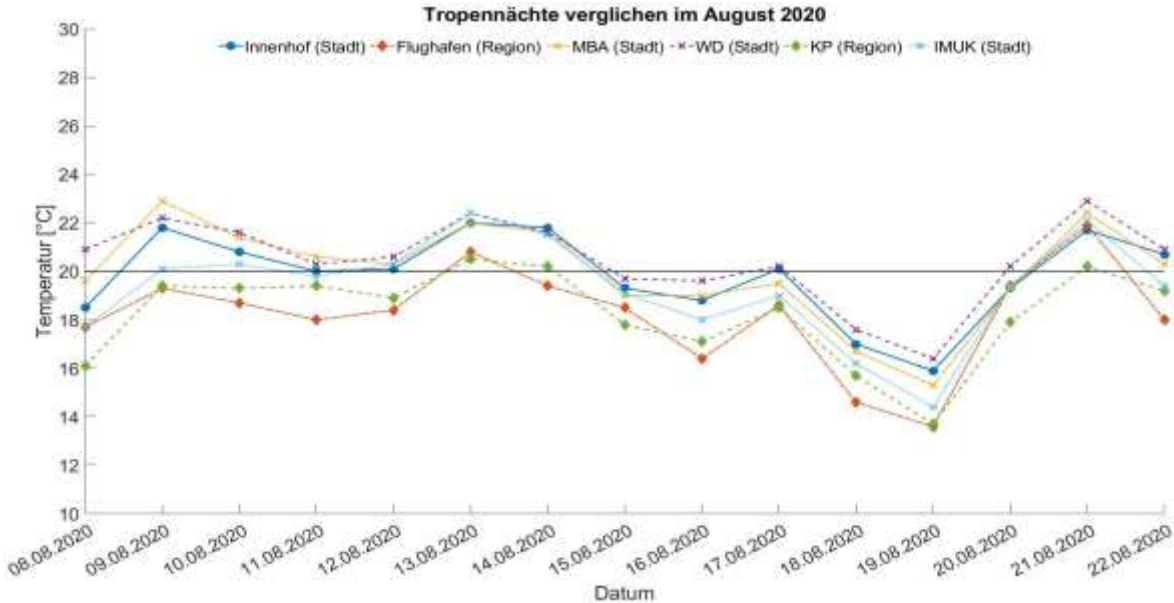


Bild 2-13: Serie von Tropennächten im August 2020 in Hannover.

Vergleicht man die Tabelle 2-2 (Maximaltemperaturen) sowie die Tabelle 2-4 (Minimaltemperaturen), so zeigt sich, dass die Lufttemperaturen zwischen den untersuchten Stationen bei den Maximaltemperaturen am Tag wesentlich ähnlicher sind als bei den Minimaltemperaturen in der Nacht, insbesondere die Unterschiede zwischen den DWD-Stationen und dem Innenhof. Ähnliche Ergebnisse wurden von Fenner et al. (2015) erzielt, die ebenfalls die Unterschiede zwischen innerstädtischen und eher ländlichen Temperaturen während der Nacht hervorheben und erklären, dass der Wärmeinseleffekt ein nächtliches Phänomen ist und sich stärker bemerkbar macht, wenn mehr bebaute oder versiegelte Flächen in der Nähe sind.

Tabelle 2-4: Tägliche minimale Lufttemperaturen während der Hitzewelle im August 2020 für jeden beobachteten Standort.

	T (°C) IH	T (°C) FH	T (°C) MBA	T (°C) WD	T (°C) KP	T (°C) IMuK
8. August 2020	18.5	17.7	19.6	20.9	16.1	17.7
9. August 2020	21.8	19.3	22.9	22.2	19.4	20.1
10. August 2020	20.8	18.7	21.4	21.6	19.3	20.3
11. August 2020	20	18	20.6	20.3	19.4	19.8
12. August 2020	20.1	18.4	20.3	20.6	18.9	20.3
13. August 2020	22	20.8	22	22.4	20.5	22.4
14. August 2020	21.8	19.4	21.6	21.6	20.2	21.5
15. August 2020	19.3	18.5	19	19.7	17.8	19.1
16. August 2020	18.8	16.4	19	19.6	17.1	18
17. August 2020	20.1	18.6	19.5	20.2	18.5	19
18. August 2020	17	14.6	16.7	17.6	15.7	16.2
19. August 2020	15.9	13.6	15.3	16.4	13.7	14.4
20. August 2020	19.3	19.4	19.3	20.2	17.9	19.4
21. August 2020	21.7	21.9	22.4	22.9	20.2	22.1
22. August 2020	20.7	18	20.3	20.9	19.2	19.4
MAX	22	21.9	22.9	22.9	20.5	22.4
MIN	15.9	13.6	15.3	16.4	13.7	14.4

Tabelle 2-5: Abweichung zwischen den minimalen Lufttemperaturen an den DWD-Stationen (FH, MBA, WD, KP) und der Hofstation (IH) in °C.

	Δ IH-FH	Δ IH-MBA	Δ IH-WD	Δ IH-KP	Δ IH-IMuK
8 August 2020	0.8	-1.1	-2.4	2.4	0.8
9 August 2020	2.5	-1.1	-0.4	2.4	1.7
10 August 2020	2.1	-0.6	-0.8	1.5	0.5
11 August 2020	2	-0.6	-0.3	0.6	0.2
12 August 2020	1.7	-0.2	-0.5	1.2	-0.2
13 August 2020	1.2	0	-0.4	1.5	-0.4
14 August 2020	2.4	0.2	0.2	1.6	0.3
15 August 2020	0.8	0.3	-0.4	1.5	0.2
16 August 2020	2.4	-0.2	-0.8	1.7	0.8
17 August 2020	1.5	0.6	-0.1	1.6	1.1
18 August 2020	2.4	0.3	-0.6	1.3	0.8
19 August 2020	2.3	0.6	-0.5	2.2	1.5
20 August 2020	-0.1	0	-0.9	1.4	-0.1
21 August 2020	-0.2	-0.7	-1.2	1.5	-0.4
22 August 2020	2.7	0.4	-0.2	1.5	1.3
MAX Δ	2.7	-1.1	-2.4	2.4	1.7
MIN Δ	-0.1	0	-0.1	0.6	-0.4

Der größte Unterschied bei den Mindesttemperaturen ist am 22. August zwischen Hof und Flughafen mit 2,7 °C zu verzeichnen. Die höchsten Minimaltemperaturen wurden bei MBA und WD an unterschiedlichen Tagen registriert, bei MBA am 9. August und bei WD am 21. August. Vom 8. auf den 9. August an der Station KP (19,4 °C) und am Flughafen wurden keine Tropennächte registriert (s. Bild 2-14), da die Temperaturen unter 20 °C fallen, obwohl die Temperaturen nahe an denen der anderen Stationen liegen, die die Grenztemperatur der Definition überschreiten. Bild 2-15 zeigt die Situation für den 20. / 21. August, als alle Stationen eine Tropennacht registrierten. Der Unterschied zwischen der niedrigsten Temperatur an der Station KP in der Nacht vom 9. August und dem 21. August beträgt 0,8 °C.

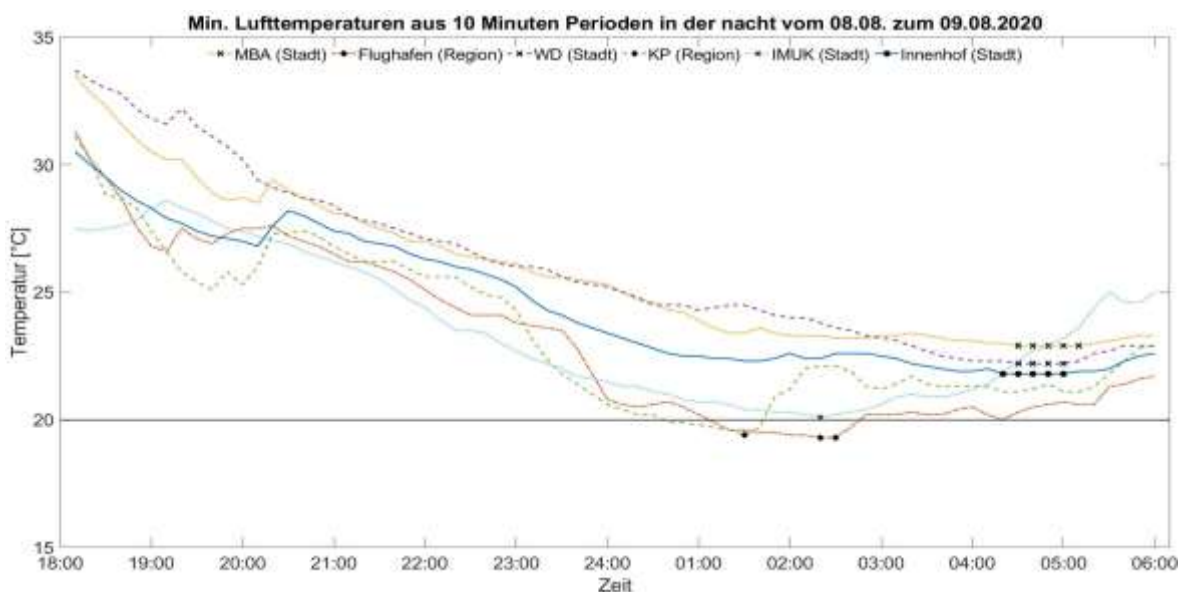


Bild 2-14: Minimale Lufttemperaturen der jeweils letzten 10 Minuten in der Nacht vom 8. auf den 9. August 2020. Die horizontale schwarze Linie markiert 20 °C. Die schwarzen Sterne markieren die Mindesttemperaturen für jede Station.

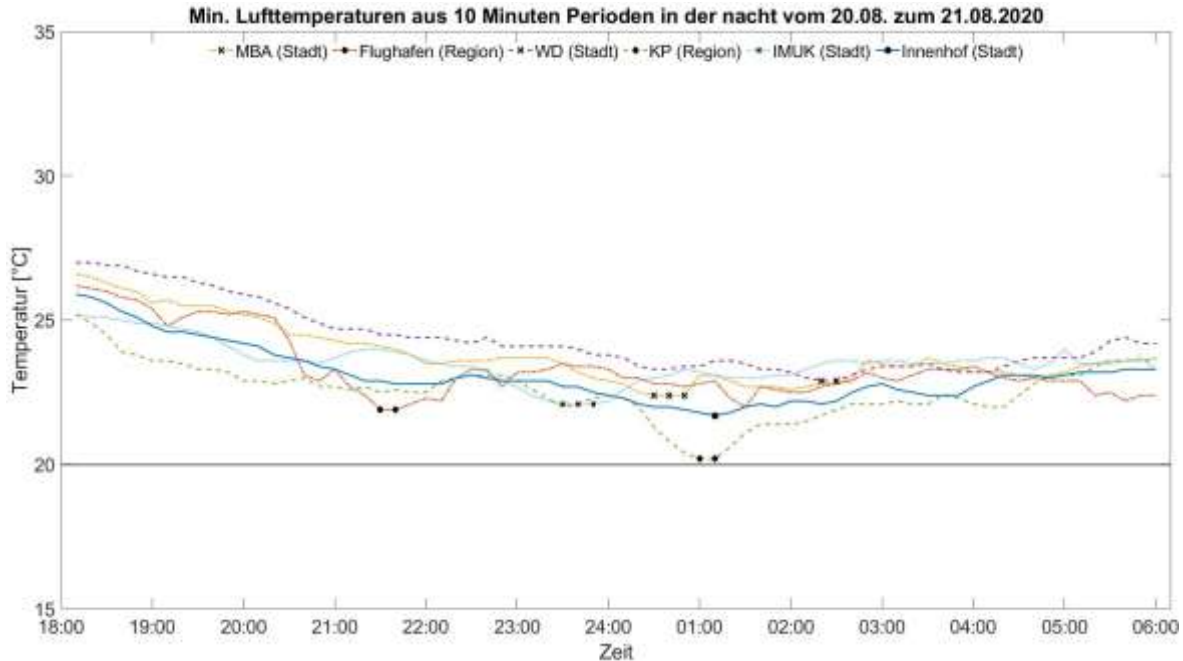


Bild 2-15: Minimale Lufttemperaturen der jeweils letzten 10 Minuten in der Nacht vom 20. August auf den 21. August 2020. Die horizontale schwarze Linie markiert 20 °C. Die schwarzen Sterne markieren die Mindesttemperaturen für jede Station.

Bild 2-16 vergleicht die Anzahl der heißen Tage und tropischen Nächte für die verschiedenen Stationen. Es zeigt sich, dass der Innenhof die geringste Anzahl heißer Tage, aber eine vergleichsweise hohe Anzahl tropischer Nächte aufweist, die über der von Flughafen, IMuK, KP und MBA liegt. Nur die Station WD weist mehr tropische Nächte auf. Außerdem ist der Unterschied zwischen der Zahl der Tropennächte und der heißen Tage zwischen Hof und WD vergleichbar, während die Unterschiede bei Flughafen, IMuK, MBA und KP viel größer sind. Im Durchschnitt gab es 12,3 heiße Tage und 6,7 tropische Nächte. Zum Vergleich: In ganz Deutschland gab es im Durchschnitt 11,4 heiße Tage (Umweltbundesamt 2020). Laut Bundesministerium für Umwelt et al. (2015, S. 56) kühlen Rasen und Wiesen nachts „durch Abgabe langwelliger Strahlung rascher ab als Bäume“.

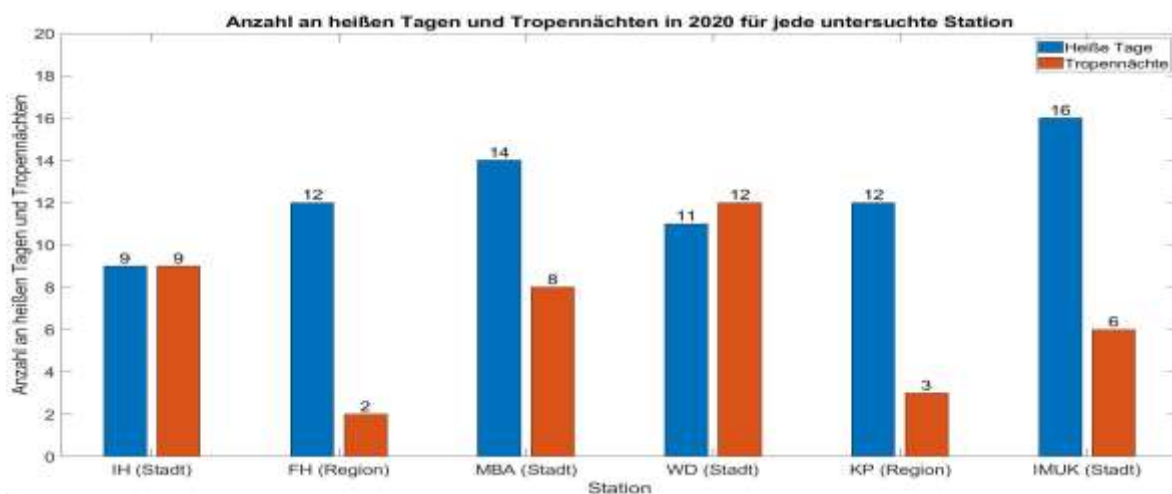


Bild 2-16: Anzahl der heißen Tage (blau) und tropischen Nächte (rot) im Vergleich in Hannover 2020 für die Mobilstationen Marianne-Baecker-Allee, Weidendamm und Kattenbrookspark sowie Flughafen und blauer Innenhof.

Temperatur-Amplitude 2020

Bild 2-17 zeigt die Temperaturamplitude für den 8. August (wärmster Tag). In diesem Fall wurde die Amplitude anhand der 10-Minuten-Maximum-Daten abzüglich der 10-Minuten-Minimum-Daten für den 8. August berechnet. Das Diagramm verdeutlicht, dass die Unterschiede zwischen Maximal- und Minimaltemperaturen im Innenhof tagsüber (~08:00 bis 16:00 Uhr; siehe roter Kreis) nicht so stark variieren wie in KP und MBA. Darüber hinaus zeigt die Abbildung, dass die Temperatur im Innenhof eine flachere Kurve aufweist, während die Amplituden in MBA während der Nacht niedrig und um die Mittagszeit höher sind. Die Werte für KP weisen während des gesamten Messzeitraums einige hohe Spitzenwerte auf. Auch nach Bundesministerium für Umwelt et al. (2015, S. 98) sind „[...] mehrere kleinere über das Stadtgebiet verteilte Grünflächen wirksamer als wenige große Parks“.

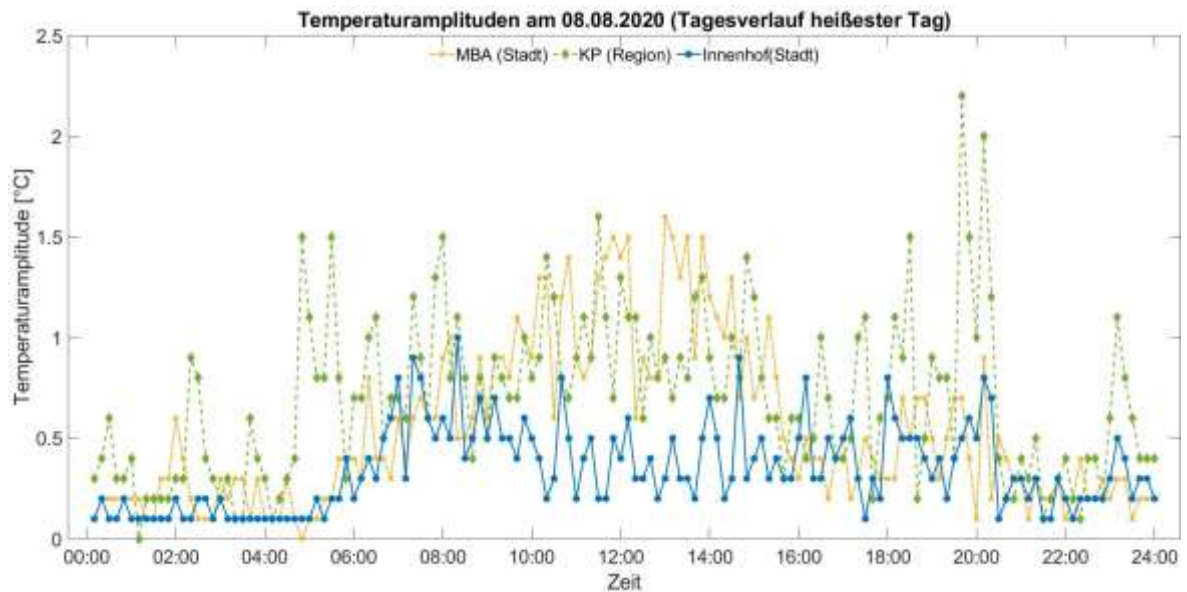


Bild 2-17: Temperaturamplitude am 8. August 2020 für die Stationen Innenhof, Kattenbrookspark (KP) und Marianne-Baecker-Allee (MBA).

Heiße Tage & Tropennächte 2021

Bild 2-18 zeigt die maximalen Lufttemperaturen (Höchstwert jeder 10-minütigen Periode) für den 18. Juni 2021 von 00:00 bis 24:00 Uhr (UTC), da hier die höchsten Temperaturen des Jahres gemessen wurden. Es zeigt sich, dass die Lufttemperaturen im Innenhof vor allem zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang am niedrigsten sind. Während der Nacht sind die Temperaturen im Innenhof größtenteils höher als am Flughafen sind, aber vor allem am Vormittag niedriger als in Herrenhausen (IMuK). Besonders hervor treten die Temperaturen zwischen 02:00 und 04:00 Uhr. Das Minimum am Tag tritt in der Regeln kurz nach Sonnenaufgang auf (Wetter.net). Das Minimum verschiebt sich je nach Beschaffenheit der Oberfläche (s. Bild 2-19). Der Innenhof zeigt hier von den drei Stationen die höchsten Temperaturen.

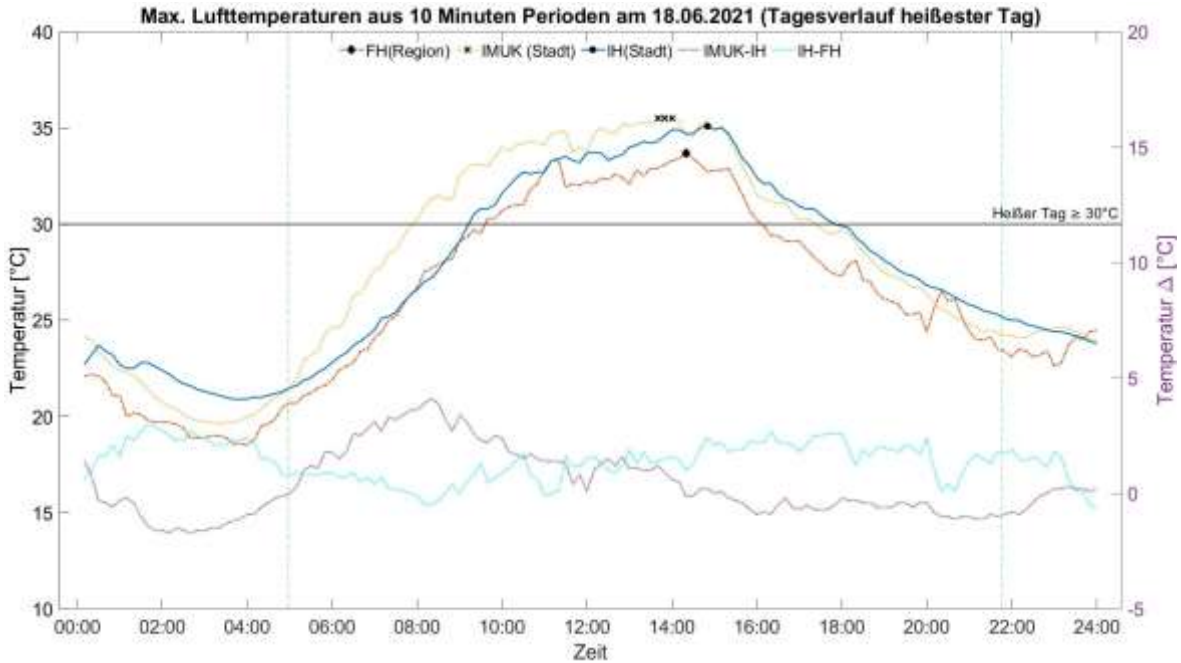


Bild 2-18: Maximale Lufttemperaturen von 10-minütigen Zeiträumen vom 18. Juni 2021 (heißester Tag in Hannover) für die DWD-Wetterstation am Flughafen (FH), die Station des IMuK in Herrenhausen und die TransMIT-Wetterstation im blauen Hof (IH). Die horizontale Linie markiert die 30 °C-Grenze. Die gestrichelten vertikalen Linien markieren Sonnenaufgang und Sonnenuntergang (für den 18. Juni). Die schwarzen Symbole markieren die Höchsttemperatur für jede Station. Das untere Diagramm zeigt auf der sekundären y-Achse die Differenz zwischen den Höchsttemperaturen des Innenhofs und der Flughafen-Station (hellblau) sowie Differenz zwischen IMUK und Innenhof (violett).

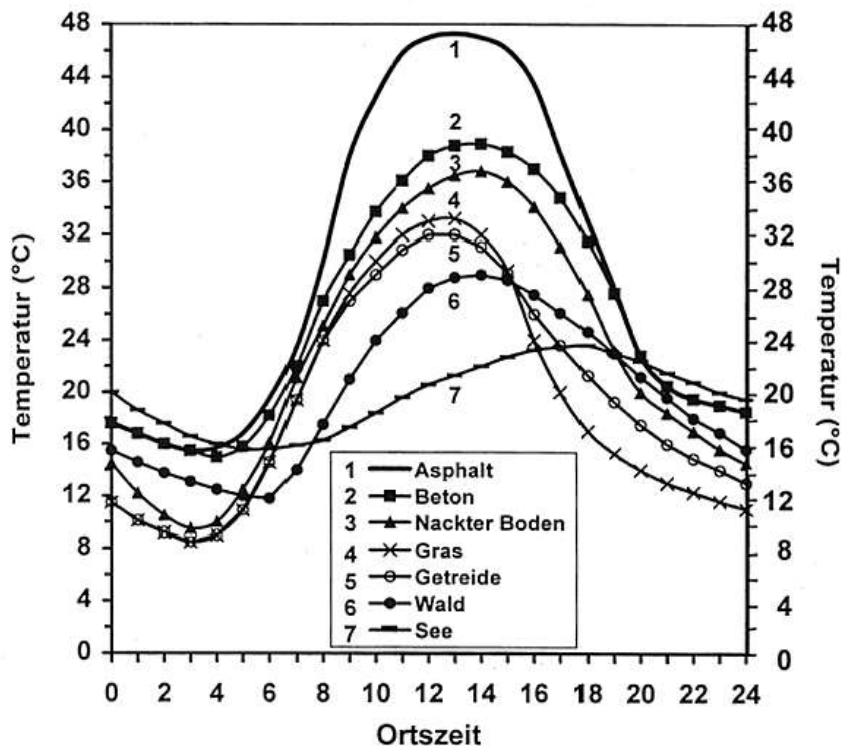


Bild 2-19: Temperaturen verschiedener Oberflächen an einem Hochsommertag (Fezer F.)

Bild 2-20 zeigt die minimalen Lufttemperaturen der jeweils letzten 10 Minuten in der Nacht vom 20. August auf den 21. August 2020. In dieser Nacht wurde an allen hier aufgeführten Stationen eine Tropennacht registriert in der die Lufttemperatur nicht unter 20 °C gesunken ist. Die Lufttemperaturen am Flughafen weisen deutlich stärkere Schwankungen auf, was darauf zurückzuführen ist, dass hier ein größerer Luftaustausch stattfindet als am bebauten Innenhof und in der Nähe des bebauten Stadtgebiet Herrenhausens (IMUK-Station).

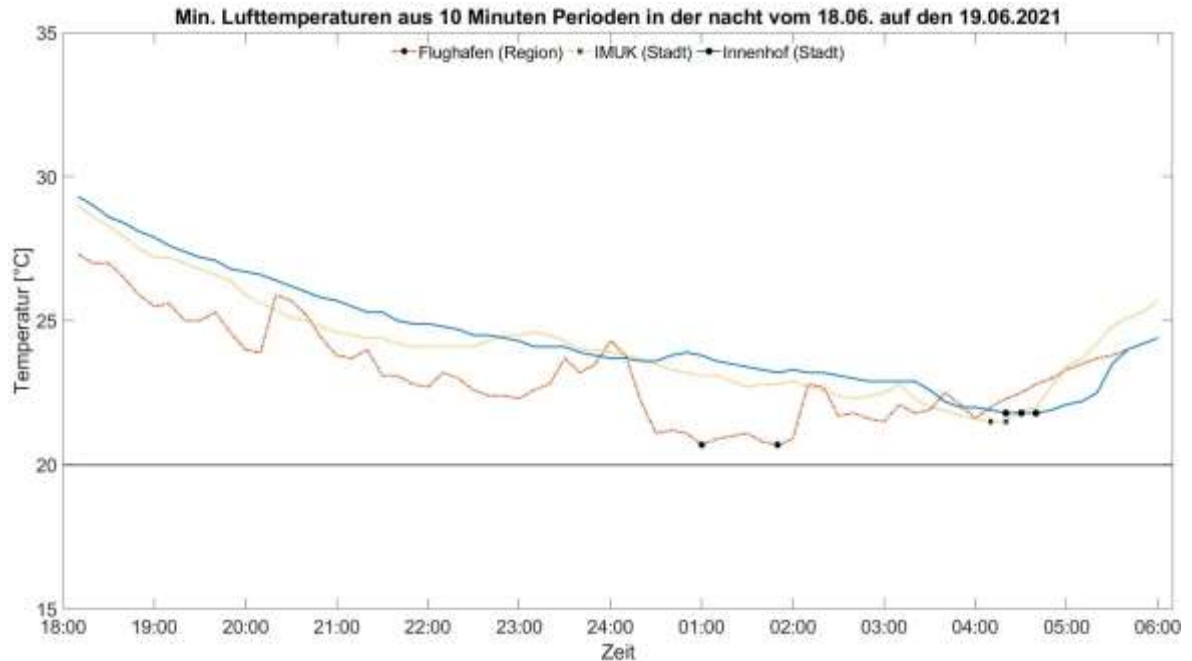


Bild 2-20: Minimale Lufttemperaturen der jeweils letzten 10 Minuten in der Nacht vom 20. August auf den 21. August 2020. Die horizontale schwarze Linie markiert 20 °C. Die schwarzen Sterne markieren die Mindesttemperaturen für jede Station.

Bild 2-21 vergleicht die Anzahl der heißen Tage und tropischen Nächte für die verschiedenen Stationen. Es zeigt sich, dass der Innenhof die höchste Anzahl heißer Tage aufweist, die über der von Flughafen und IMuK liegt. Am IMuK wurden die meisten Tropennächte gemessen. Zum Vergleich: Im Sommer 2021 gab es im Schnitt 0,6 Tropennächte und 4,0 Hitzetage (Hoffmann 2021).



Bild 2-21: Anzahl der heißen Tage (blau) und tropischen Nächte (rot) im Vergleich in Hannover 2021 für die Stationen Flughafen, blauer Innenhof und IMUK.

Luftfeuchtigkeit & gefühlte Temperatur

Bild 2-22 zeigt die Luftfeuchtigkeit im Vergleich zur Lufttemperatur im Innenhof (Südstadt). Hier ist gut zu erkennen, dass niedrige Lufttemperaturen in der Regel mit höheren Luftfeuchtigkeiten einhergehen.

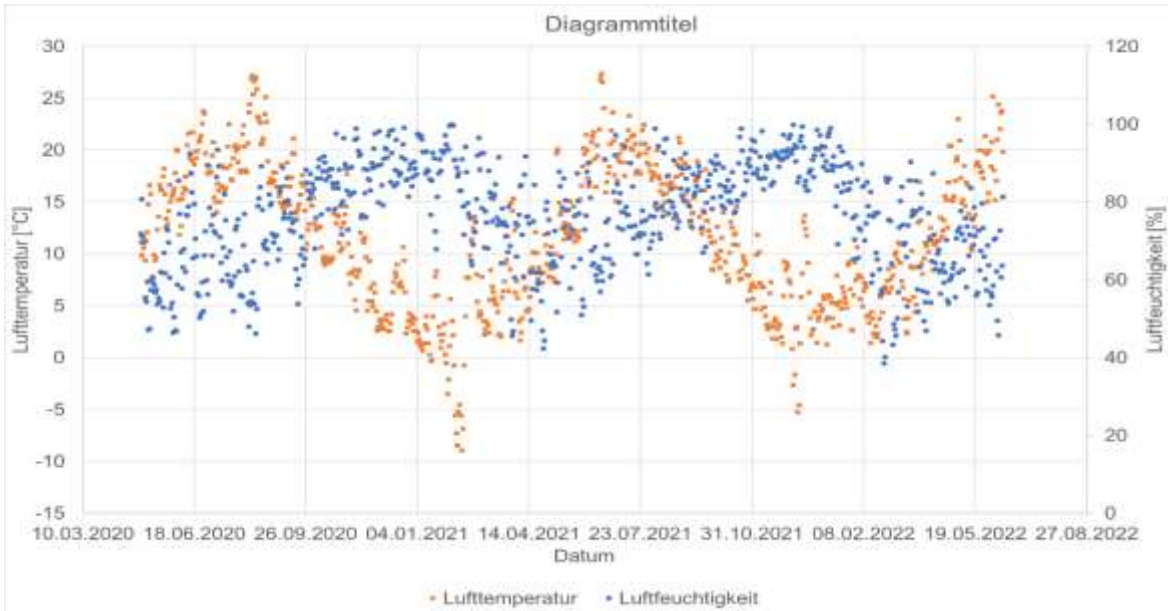


Bild 2-22: Im Südstadt-Innenhof gemessene mittlere Lufttemperatur in °C (Primärachse) und mittlere relative Feuchtigkeit in % (Sekundärachse) von Anfang Mai 2020 bis Ende Juni 2022.

Die Lufttemperaturen und -feuchtigkeit für den spezifisch betrachteten Zeitraum im TransMIT Projekt (Mai bis September 2020) werden in Bild 2-23 dargestellt.

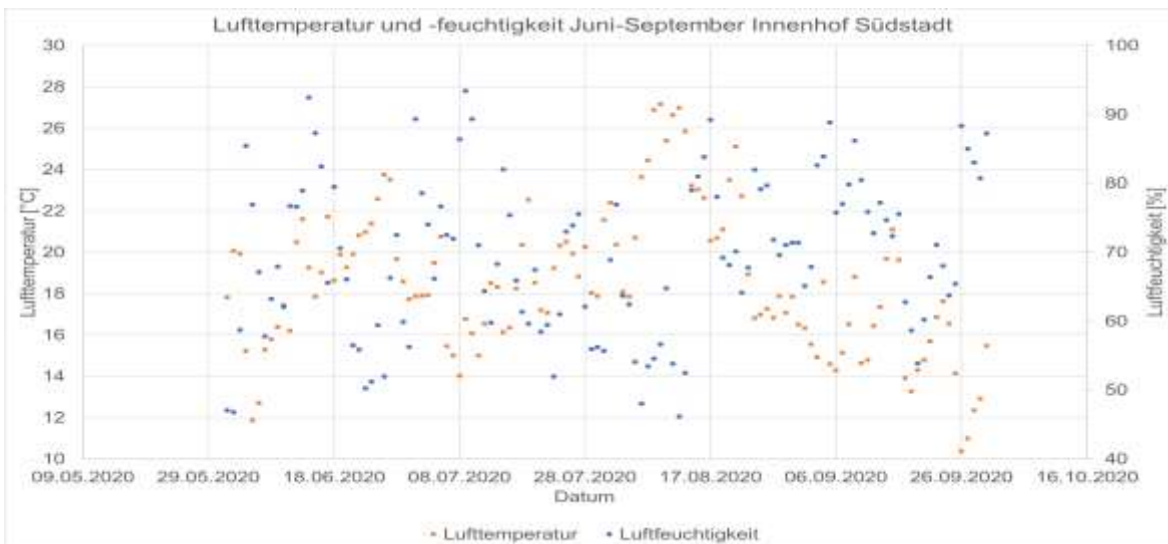


Bild 2-23: Im Südstadt-Innenhof gemessene mittlere Lufttemperatur in °C (Primärachse) und mittlere relative Feuchtigkeit in % (Sekundärachse) von Anfang Mai 2020 bis Ende September 2020.

Eine Erhöhung der gefühlten Temperatur im Vergleich zur tatsächlichen Temperatur wird durch den „Hitzeindex“ aufgezeigt. Dieser Index ist ein Maß für die zu erwartende Belastung des menschlichen Körpers durch hohe Luftfeuchtigkeit gemeinsam mit hohen Temperaturen (bergfreunde.de 2022).

Neben der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit haben Parameter wie z.B. Herkunft, Alter, Gewicht, Größe, Geschlecht und Gesundheitszustand einer Person eine große Rolle hinsichtlich des Wohlbefindens bei bestimmten Temperaturen (bergfreunde.de 2022). Diese Parameter wurden in TransMiT noch nicht zur Analyse hinzugezogen. Die Einführung und Erprobung eines Agentenmodells bei der Bewertung erfolgt in der Verstetigungsphase *TransKOM* (siehe Teil C).

Bis ca. 27 °C hat die Luftfeuchtigkeit keinen eindeutigen Einfluss auf die gefühlte Temperatur. Danach zeigt sich eine deutliche Zunahme im Empfinden, während die minimale relative Luftfeuchtigkeit 40 % beträgt (bergfreunde.de 2022). Zur Berechnung des Hitzeindex (HI) wird folgende Formel angewendet (bergfreunde.de 2022):

$$HI = c_1 + c_2T + c_3\varphi + c_4T\varphi + c_5T^2 + c_6\varphi^2 + c_7T^2\varphi + c_8T\varphi^2 + c_9T^2\varphi^2 \quad (1)$$

T entspricht dabei der jeweiligen Temperatur in °C, φ ist die relative Luftfeuchtigkeit in %. Die Koeffizienten c_1 bis c_9 sind definierte Konstanten (s. Tabelle 2-6).

Tabelle 2-6: Konstanten zur Bestimmung des Hitzeindex (bergfreunde.de 2022)

Konstante	°C
c1	-8.78500000
c2	1.61100000
c3	2.33900000
c4	-0.14600000
c5	-0.01231000
c6	-0.01642000
c7	0.00221200
c8	0.00072550
c9	-0.00000358

Bild 2 24 zeigt den Hitzeindex für den Südstadt-Innenhof zwischen dem 01. Mai 2020 und 28. Juni 2022. Dargestellt werden nur die Indizes für Temperaturen über 27 °C und Luftfechtigkeiten über 40 %. Die Schattierung des Diagramm-Hintergrunds gibt verschiedene Hitzeindex-Bereiche entsprechend Tabelle 2 7 an. Bis zu 27 °C gefühlter Temperatur besteht keine Gefahr (grüner Bereich). Zwischen 27 °C und 32 °C sind bereits Erschöpfungserscheinungen möglich (gelber Bereich). Bei 33 °C bis 40 °C sind zusätzlich Sonnenstich, Hitzekrampf und Hitzekollaps möglich (roter Bereich). Die weiteren Bereiche treffen auf den Innenhof nicht zu, daher sind sie im Diagramm nicht dargestellt, aber dennoch in der Tabelle aufgeführt.

Aus Bild 2-24 ist zu entnehmen, dass die gefühlte Temperatur im Innenhof teilweise so hoch war, dass der rote Bereich erreicht wird (August 2020, Juli 2021, Juni 2022). Es werden teilweise gefühlte Temperaturen bis über 35 °C angegeben (Juli 2021).

Bild 2-25 zeigt den Hitzeindex zum Vergleich für den Zeitraum Mai 2020 bis Ende September 2020, da dieser Zeitraum auch für die Analyse der Hitzetage und Tropennächte verwendet wurde. Es ist festzustellen, dass nicht nur die Tage eine Belastung für den Menschen darstellen, die auch zu Hitzetagen bestimmt wurden, sondern auch Tage, die nicht so heiß waren, aber dafür eine höhere Luftfeuchtigkeit aufwiesen. So war beispielsweise der 13.06.2020 laut Definition kein Hitzetag, da die Temperatur unter 30 °C lag. Gegen 10 Uhr wurde an diesem Tag eine Lufttemperatur von 27,1 °C gemessen. Die Luftfeuchtigkeit lag bei 60,7 %. Damit ergibt sich ein Hitzeindex von ca. 28,5 °C (gefühlte Temperatur), was

bereits im gelben Bereich liegt und damit bereits zu Erschöpfungserscheinungen führen könnte.

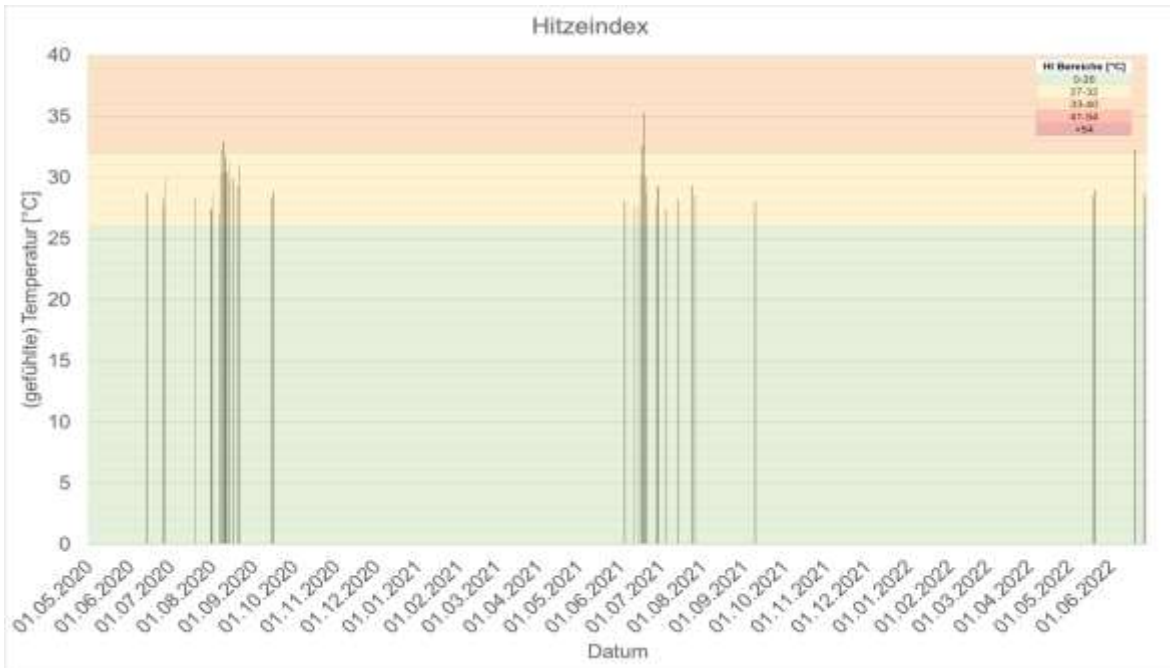


Bild 2-24: Hitzeindex berechnet für den Südstadt-Innenhof zwischen Mai 2020 und Ende Juni 2022. Dargestellt wird nur der Index für eine Temperatur größer 27 °C und eine Luftfeuchtigkeit über 40 %.

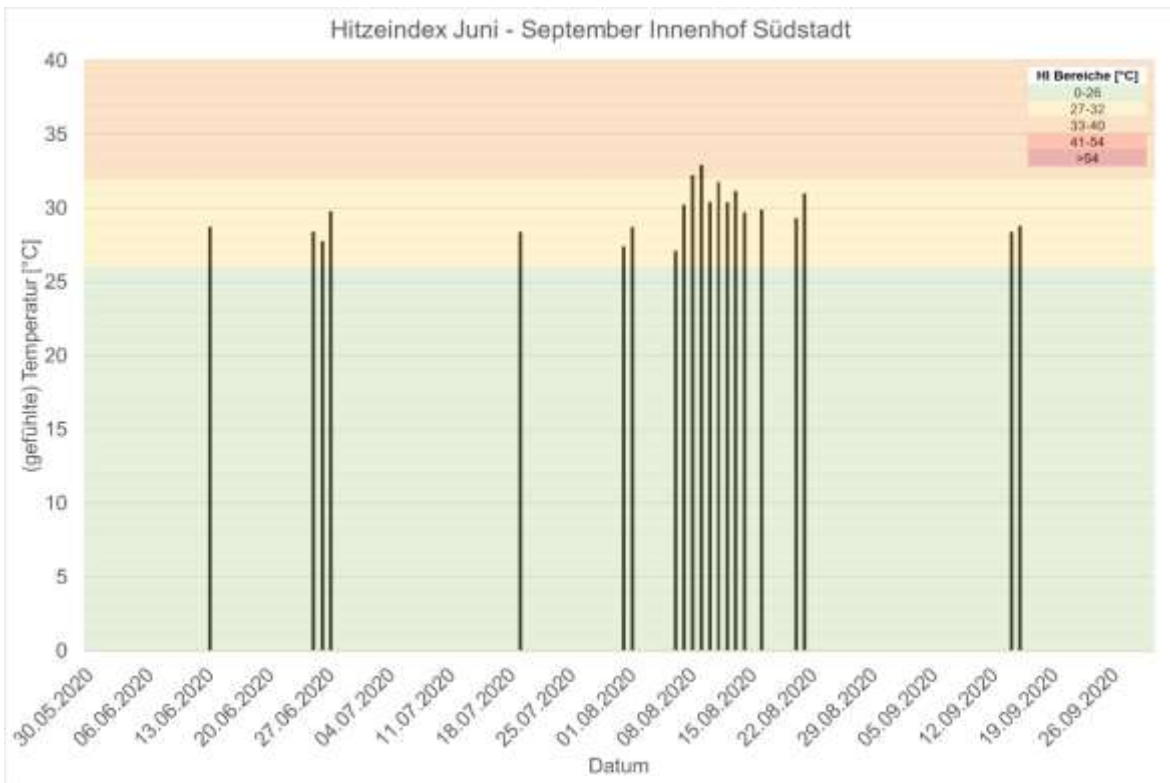


Bild 2-25: Hitzeindex berechnet für den Südstadt-Innenhof zwischen Mai 2020 und Ende September 2020. Dargestellt wird nur der Index für eine Temperatur größer 27 °C und eine Luftfeuchtigkeit über 40 %.

Tabelle 2-7: Warntabelle für Hitzeschäden (nach bergfreunde.de (2022))

Hitzeindex	Gesundheitliche Gefahr
27-32 °C	Erschöpfungserscheinungen möglich bei längerem Aufenthalt und körperlicher Aktivität
33-40 °C	möglich: Sonnenstich, Hitzekrampf, Hitzekollaps
41-54 °C	wahrscheinlich: Sonnenstich, Hitzekrampf, Hitzekollaps, möglich: Hitzeschlag
>54 °C	hohe Gefahr, Hitzschlag und Sonnenstich sehr wahrscheinlich

Globalstrahlung

Als Globalstrahlung bezeichnet man den Anteil der direkten und diffusen Strahlung der Sonnenstrahlung, der horizontal auf die Erdoberfläche auftritt (Grünes Haus 2021). Gemessen wird die Globalstrahlung über Pyranometer in Watt pro Quadratmeter (W/m^2). Für die Photovoltaiknutzung ist die Jahressumme der Globalstrahlung wichtig, sie wird in Kilowattstunden pro Quadratmeter pro Jahr (kWh/m^2), ausgedrückt.

Unter direkter Strahlung versteht man „den Anteil der Sonnenstrahlung, der direkt auf der Erdoberfläche ankommt“.

Die diffuse (oder indirekte) Strahlung bezeichnet den Anteil der Sonnenstrahlung, der nicht direkt von der Sonne emittiert und der durch Reflexionen bzw. Streuung durch Wolken oder Luftpartikel von seinem direkten Weg zur Oberfläche abgelenkt wird. Zur Mittagszeit (hoher Sonnenstand) und wolkenlosem Himmel besteht die Globalstrahlung zu einem Großteil (ca. $\frac{3}{4}$) aus direkter Sonnenstrahlung. Bei tieferen Sonnenständen nimmt der Anteil an direkter Strahlung ab (nur noch ca. $\frac{1}{4}$). In Deutschland beträgt die Globalstrahlung durchschnittlich ca. $133,67 W/m^2$ (Grünes Haus 2021). Maximal betrug sie im Jahr 2020 $1320 kWh/m^2$ (DWD 2022a). Die Jahressumme der Globalstrahlung hat sich in Deutschland im Mittel jährlich um $2,93 kWh/m^2$ erhöht (DWD 2022b). Im Südstadt-Innenhof wurde zwischen 2020 und 2021 ein Globalstrahlung-Maximum von $1104,7 W/m^2$ gemessen (s. 10-Minuten-Werte in Bild 2-26). Bild 2-27 verdeutlicht, dass der heißeste Tag nicht auch der Tag mit der höchsten Globalstrahlung sein muss.

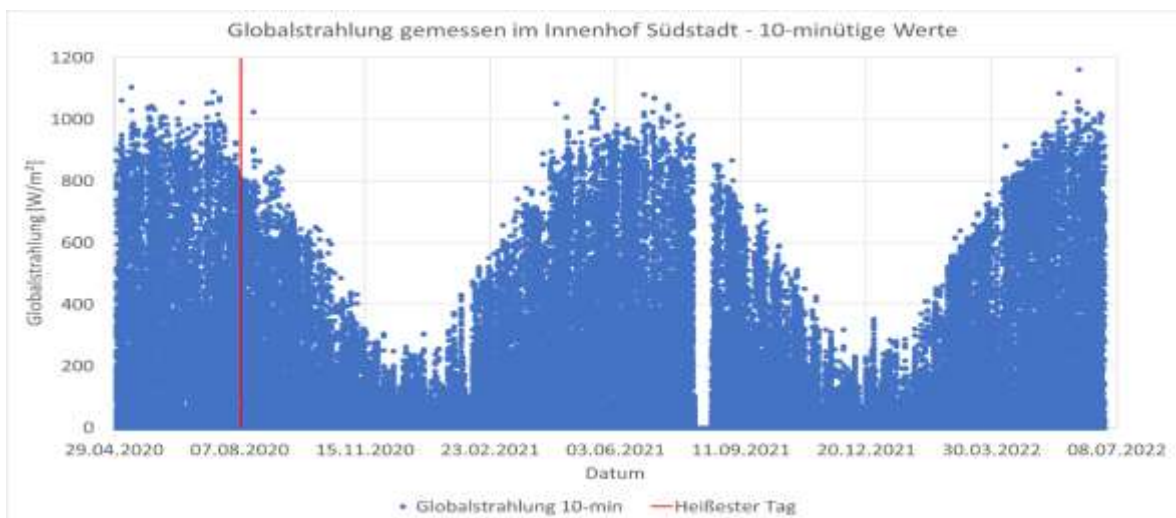


Bild 2-26: 10-Minuten-Daten der Globalstrahlung im Innenhof von Mai 2020 bis Dezember 2021

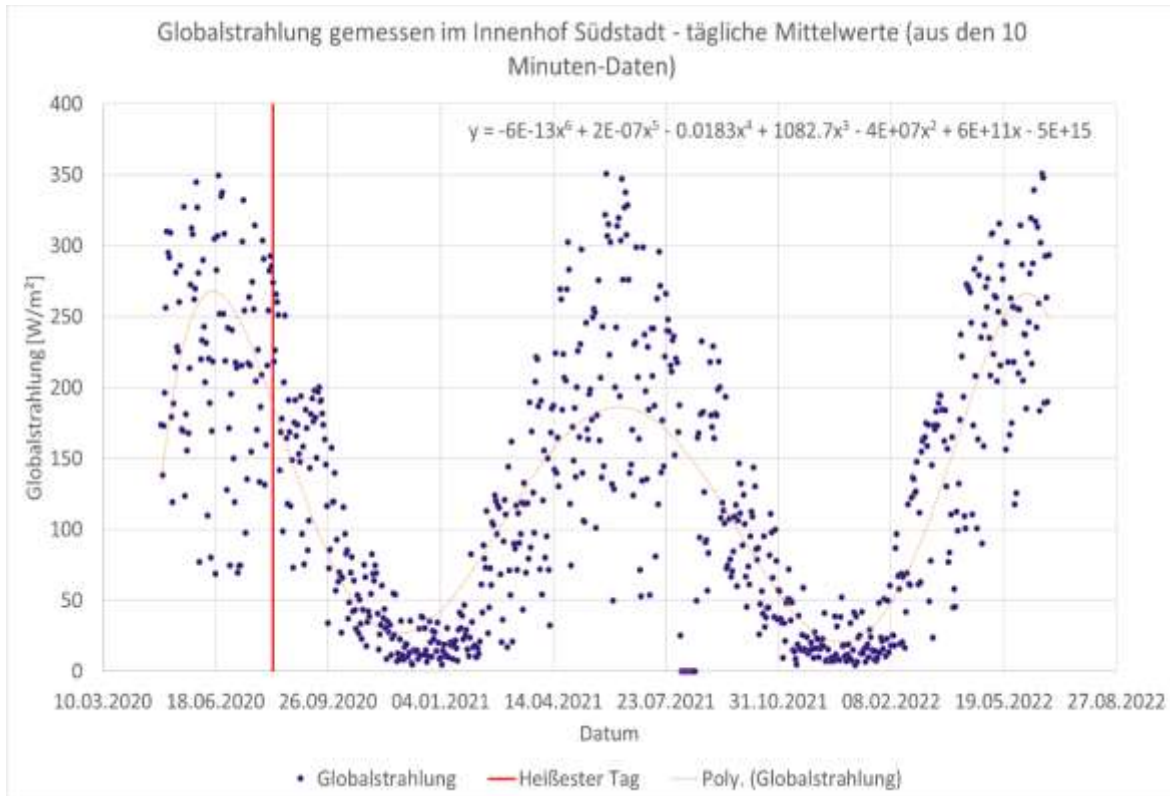


Bild 2-27: Globalstrahlung gemessen im Innenhof (Südstadt) als tägliche Mittelwerte von Mai 2020 bis Dezember 2021. Die gestrichelte Trendlinie ist ein Polynom 6. Grades. Die senkrechte Linie markiert den heißesten Tag 2020 (08.08.2020).

2.2.2 Drohnenmessungen Innenhof

Es gibt zwei Arten von Ergebnissen für die Drohnenmessungen am 17. Juni 2020 und 31. Juli 2020. Der erste Teil besteht aus den Ergebnissen der vertikalen Sondierung und der zweite Teil ist das Ergebnis der Infrarotmessung. Die Ergebnisse werden im Folgenden für jeden Hof getrennt dargestellt.

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Höfe und durchgeführte Messungen/Simulationen pro Hof sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

Blauer Innenhof (Südstadt)

Potentielle Temperatur, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit

Bild 2-28 zeigt die berechnete potenzielle Temperatur (°C), die gemessenen Temperaturen (°C) und die relative Luftfeuchtigkeit (%) als vertikales Profil für den blauen Innenhof. Es zeigt sich, dass die Temperatur von ca. 26,2 °C bei 0 m auf ca. 27,2 °C bei ca. 18 m ansteigt. Mit zunehmender Höhe nimmt die Temperatur ab. Ein ähnliches Muster (aber umgekehrt) zeigt sich für die relative Luftfeuchtigkeit. Die Luftfeuchtigkeit beginnt bei 0 m mit etwa 46 %, sinkt bis 20 m auf 42,6 % und nimmt danach mit der Höhe zu. Die potenzielle Temperatur weist ein ähnliches Muster auf. Meteorologen bezeichnen dieses Phänomen der Temperaturumkehr als "Inversion" (DWD n.D.d) des Temperaturprofils, die laut DWD (n.D.a) nachts auf eine autochthone Wetterlage am Tag folgen kann.

Tabelle 2-8: Eigenschaften der untersuchten Innenhöfe

Information	Innenhof 1	Innenhof 3
Benennung	Blauer Innenhof	Grüner Innenhof
Eigentümer	Wohnungsgenossenschaft Gartenheim eG	Wohnungsgenossenschaft spar + bau
Ort	Hannover Südstadt	Hannover Linden
Größe	~3652.10 m ²	~3700 m ²
BGI Eigenschaften	Blaue Elemente <ul style="list-style-type: none"> • Teich 1: 140 m² Oberfläche (nach Plan), tiefster Punkt 45 cm • Teich 2: 70 m² Oberfläche (nach Plan), tiefster Punkt 110 cm • Wasservolumen beider Teiche zusammen ca. 50 m³ • 3 Kaskadensysteme mit je 3 offenen Zisternenbecken, 0.64 m², 40 cm Tiefe, 235 l 	Keine blauen Elemente
	Grüne Elemente Büsche, Bäume Wenig Rasenfläche	Grüne Elemente Hochbeete → in allen 4 Ecken des Hofes je 6 Beete auf befestigtem Untergrund, 160 m ² Hecken, 5 Bäume in der Mitte Große Rasenfläche, dominierend
	Andere Elemente Spielplatz (Sand) Gehwege (feiner Kies)	Andere Elemente Gehwege (Beton und andere Steinmaterialien)
Bewertung	Wetterstation	-
	Drohnenmessung	Drohnenmessung
	Simulation	-

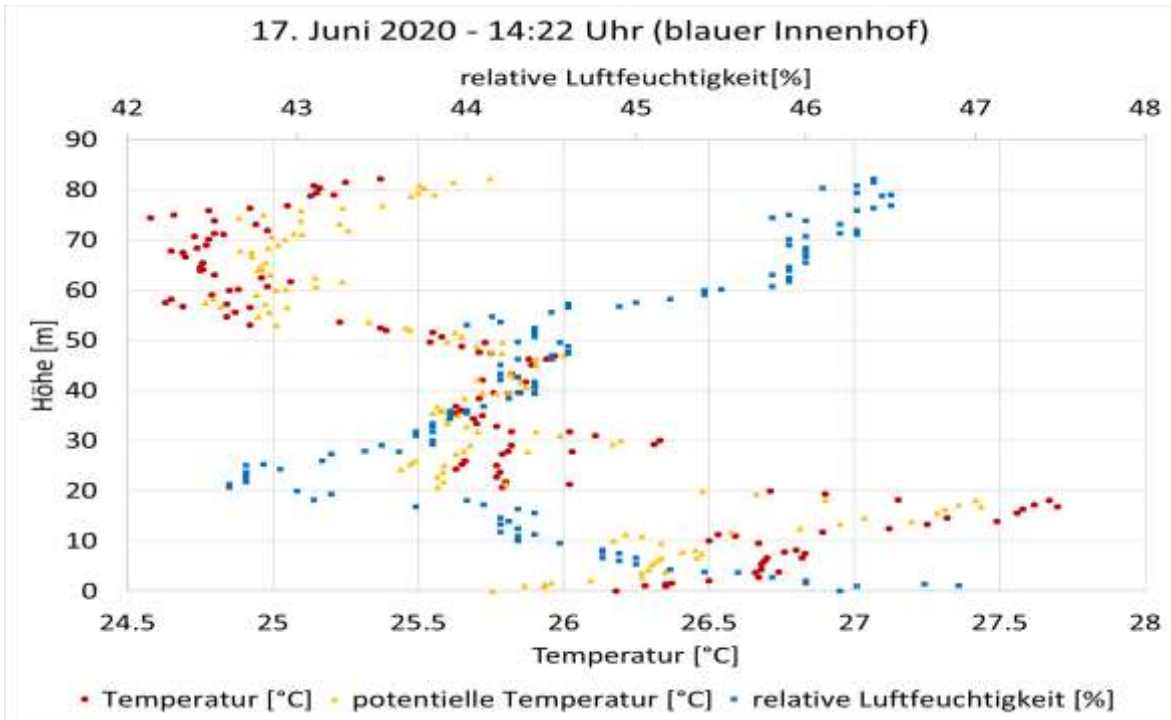


Bild 2-28: Ergebnisse der Vertikal-Sondierung (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im blauen Innenhof. Die gelben Punkte stellen das potentielle Temperaturprofil dar, die roten Punkte das Temperaturprofil und die blauen Punkte das Feuchtigkeitsprofil. Der tiefste Punkt (0 m) ist der Beginn, der höchste Punkt (ca. 80 m) ist das Ende des Messzeitraums.

In Bild 2-29 sind das Luftbild (a) und das Infrarotbild (b) des blauen Innenhofs nebeneinander dargestellt. Es zeigt, dass die Dächer eine hohe Oberflächentemperatur von etwa 50 °C aufweisen, während die Temperaturen der Oberflächen im Innenhof zwischen 22 °C und 28 °C schwanken. Die nahe gelegene Straße weist eine Oberflächentemperatur von etwa 40 °C auf. Die schattigen Bereiche im Innenhof weisen die niedrigsten Temperaturen auf, während die in der Sonne liegenden Flächen höhere Temperaturen aufweisen, wobei die Durchschnittstemperatur im Innenhof etwas niedriger ist als auf der Straße vor dem Stadthaus.

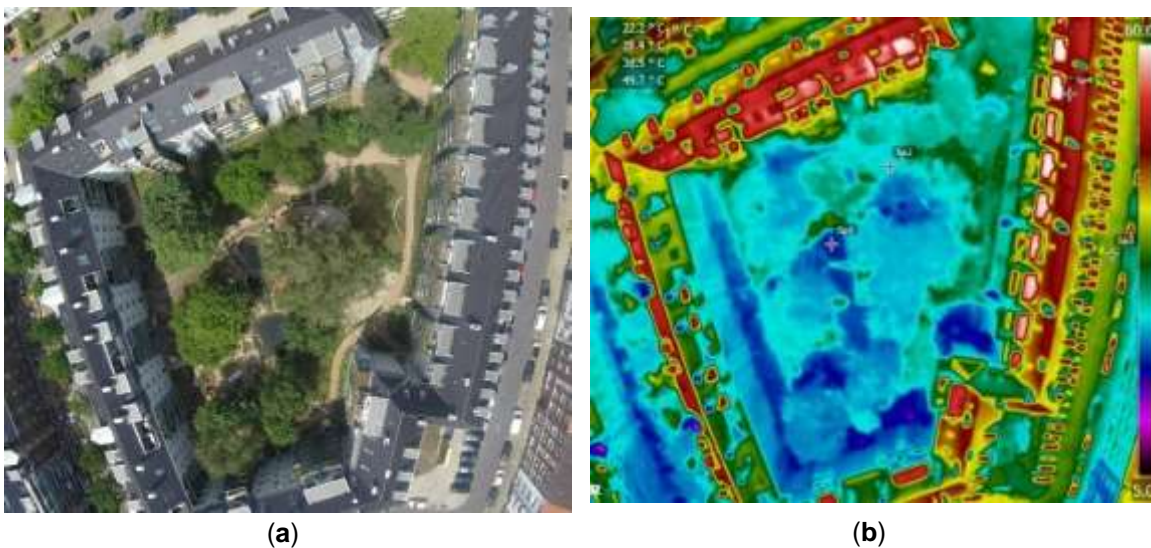


Bild 2-29: Vergleich zwischen einem Luftbild (a) und einem Infrarotbild (b) des blauen Hofes (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).

Luftdruck

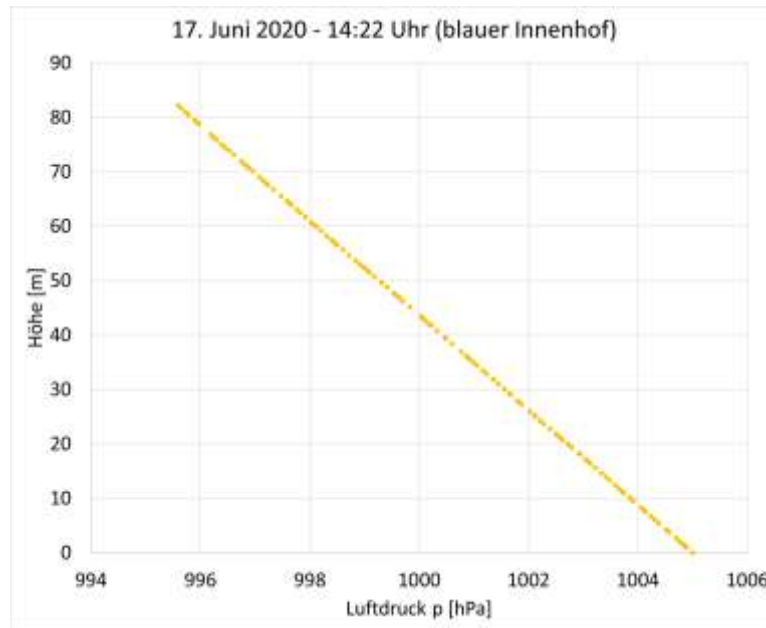


Bild 2-30: Ergebnis der Vertikal-Sondierung (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im blauen Innenhof. Die gelben Punkte stellen das Profil des Luftdrucks dar. Der tiefste Punkt (0 m) ist der Beginn, der höchste Punkt (ca. 80 m) ist das Ende des Messzeitraums. Die y-Achse zeigt die Höhe (m), die x-Achse zeigt den Luftdruck in hPa.

Windrichtung/-geschwindigkeit

Die Bilder Bild 2-32 bis Bild 2-31 zeigen die Windrichtungen sowie Windgeschwindigkeiten im Innenhof Südstadt bei der Vertikalsondierung mit Drohne. Es zeigt sich, dass der Wind im Innenhof während der Drohnenmessung hauptsächlich aus dem Osten, teils aus dem Nordosten kam. Die Windgeschwindigkeiten lagen bei 1,56 m/s bis 7,56 m/s.



Bild 2-31: Windrose zur Auswertung der Windgeschwindigkeiten und -richtungen gemessen per Drohne bei der Vertikal-Sondierung (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im blauen Innenhof.

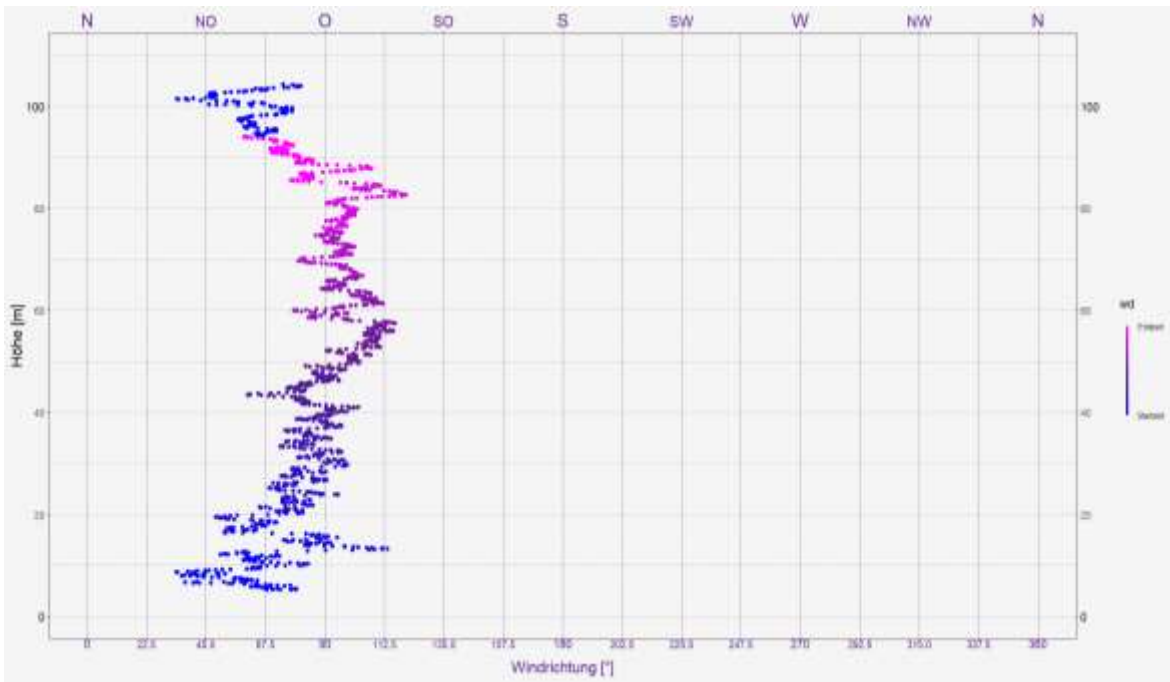


Bild 2-32: Windrichtung gemessen bei der Vertikalsondierung per Drohne am 17.06.2020 um 14:22 Uhr MESZ im Innenhof Südstadt (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).

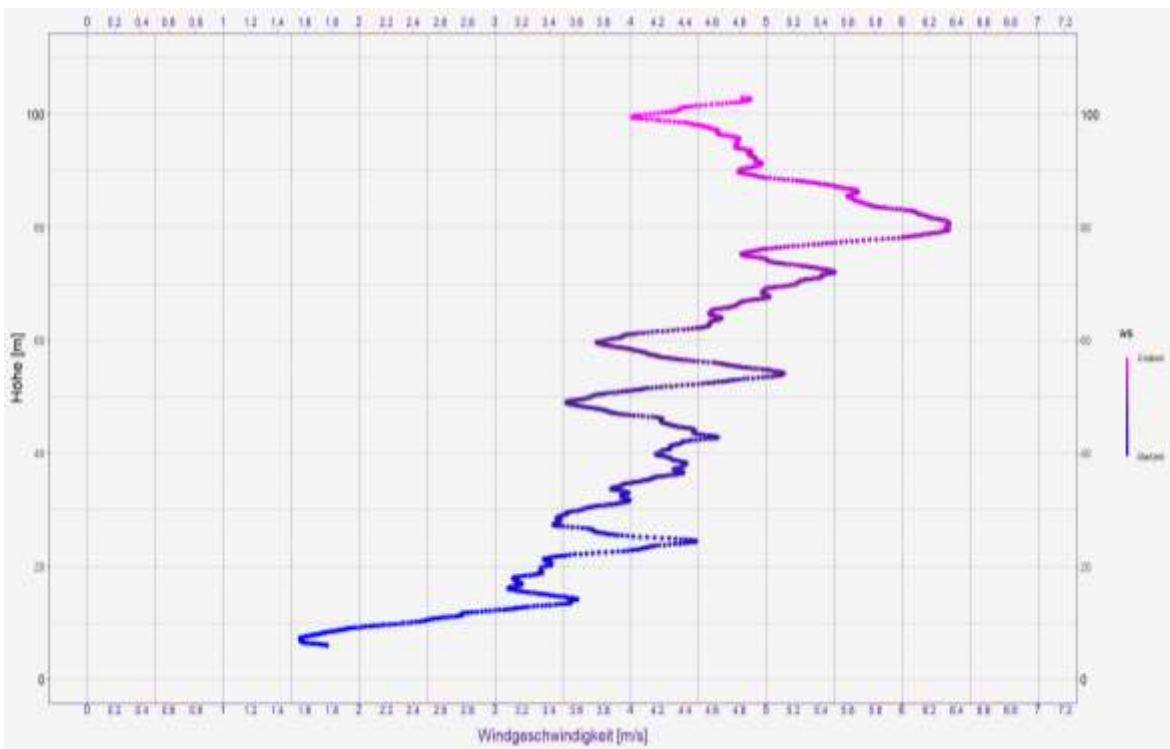


Bild 2-33: Windgeschwindigkeit gemessen bei der Vertikalsondierung per Drohne am 17.06.2020 um 14:22 Uhr MESZ im Innenhof Südstadt (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).

Grüner Innenhof (Linden)

Potentielle Temperatur, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit

Bild 2-34 zeigt die berechnete potenzielle Temperatur ($^{\circ}\text{C}$), die gemessenen Temperaturen ($^{\circ}\text{C}$) und die relative Luftfeuchtigkeit (%) als vertikales Profil für den grünen Innenhof. Es zeigt sich, dass die potenzielle Temperatur von ca. 30°C in 0 m Höhe auf ca. 27°C in ca. 18 m Höhe ansteigt. Bis zu einer Höhe von 30 m misst die Drohne ein oszillierendes Temperaturprofil mit einem Anstieg auf ca. $27,4^{\circ}\text{C}$, einem Rückgang auf ca. $25,8^{\circ}\text{C}$ in 45 m Höhe und einem erneuten Anstieg auf ca. $25,5^{\circ}\text{C}$ in 65 m Höhe, der bei einer Temperatur von $25,6^{\circ}\text{C}$ in 70 m Höhe endet. Die relative Luftfeuchtigkeit beginnt bei etwa 34,7 % in Bodennähe, steigt auf ca. 40,2 % in 20 m Höhe und dann auf 42,8 % in 80 m Höhe. Zwischen 20 und 80 m Höhe ist ein geringer Rückgang zu verzeichnen.

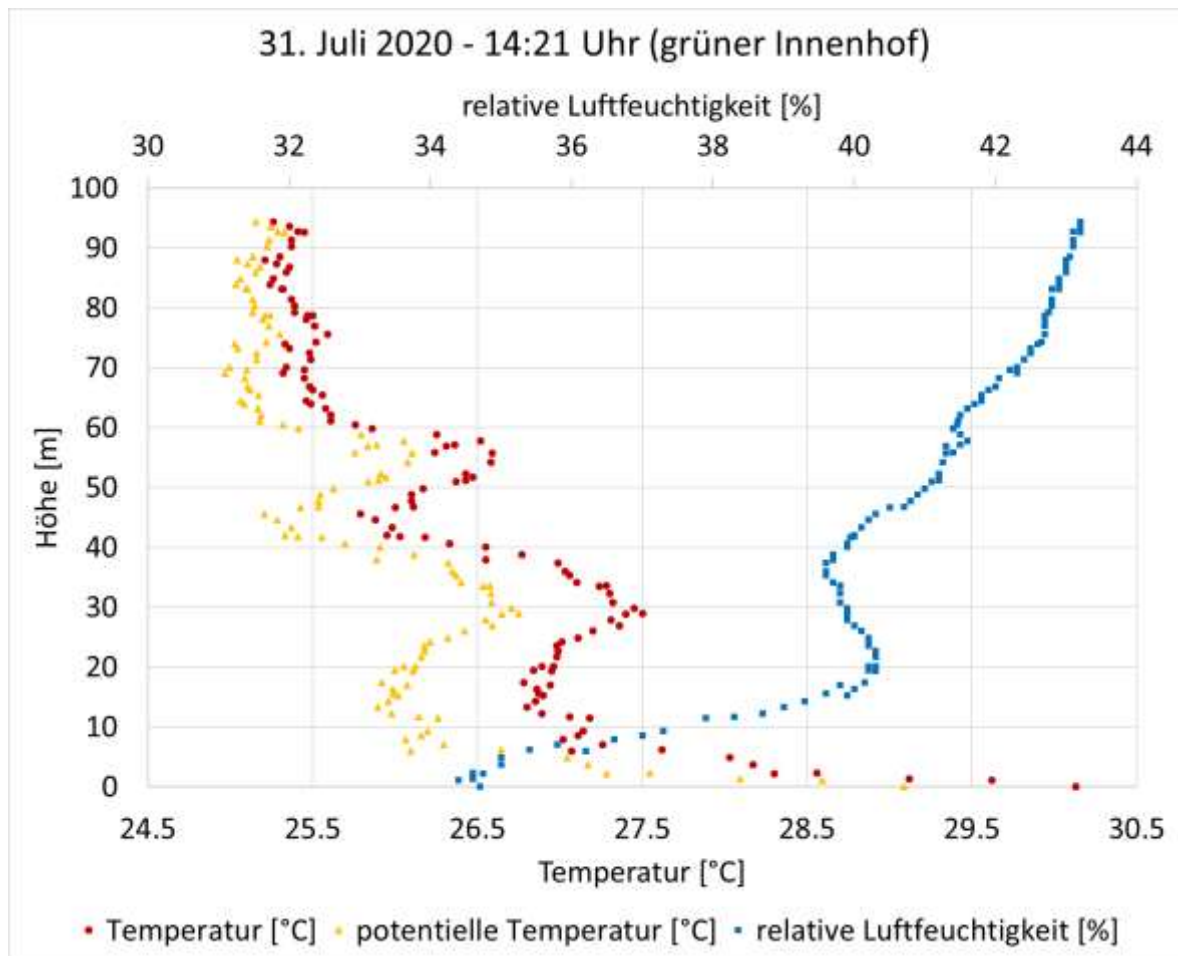


Bild 2-34: Ergebnisse der vertikalen Sondierung (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im grünen Innenhof. Die gelben Punkte stellen das potentielle Temperaturprofil, die roten Punkte das Temperaturprofil und die blauen Punkte das Feuchtigkeitsprofil dar. Der tiefste Punkt (0 m) ist der Beginn, der höchste Punkt (ca. 80 m) ist das Ende des Messzeitraums. Die y-Achse zeigt die Höhe (m), die x-Achse zeigt die Temperatur ($^{\circ}\text{C}$).

In Bild 2-35 wird wiederum das Luftbild (a) mit der Infrarotaufnahme (b) verglichen, jetzt für den grünen Hof. Ähnlich wie beim blauen Hof ist der grundlegende Temperaturtrend. Die Dächer haben hier eine sehr hohe Oberflächentemperatur von etwa 68°C , während die Temperaturen des Hofbodens niedriger sind und zwischen 26°C und 42°C schwanken. Die Baumoberfläche in der Mitte weist eine Temperatur von $33,6^{\circ}\text{C}$ auf, und der schattige

Bereich zeigt eine Temperatur von etwa 26 °C. Unerwartet hoch war die Temperatur der Rasenfläche.

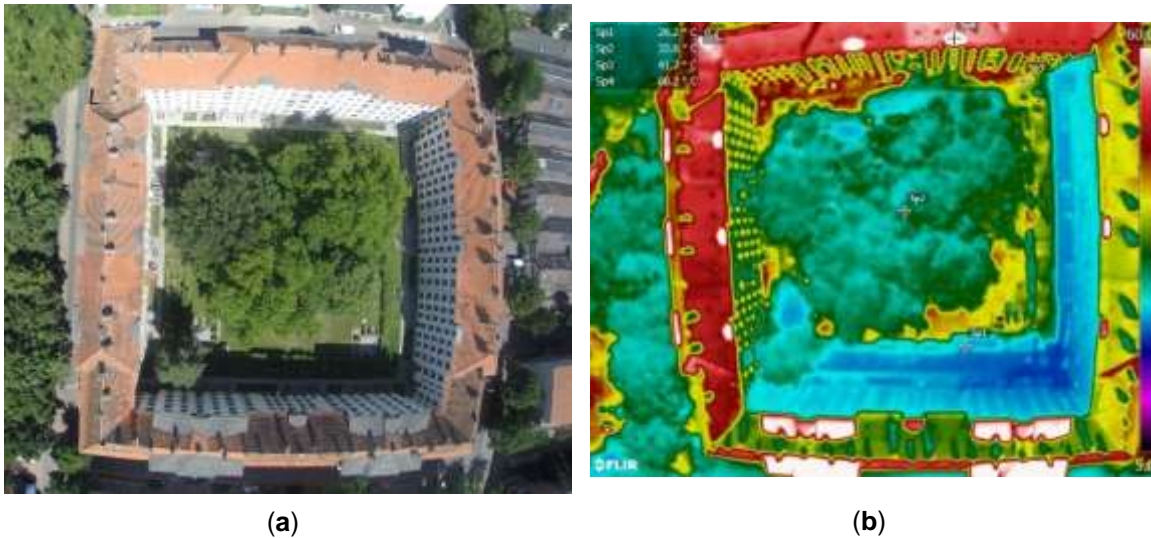


Bild 2-35: Vergleich zwischen Luftbild (a) und Infrarotaufnahme (b) des grünen Hofes (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).

Luftdruck

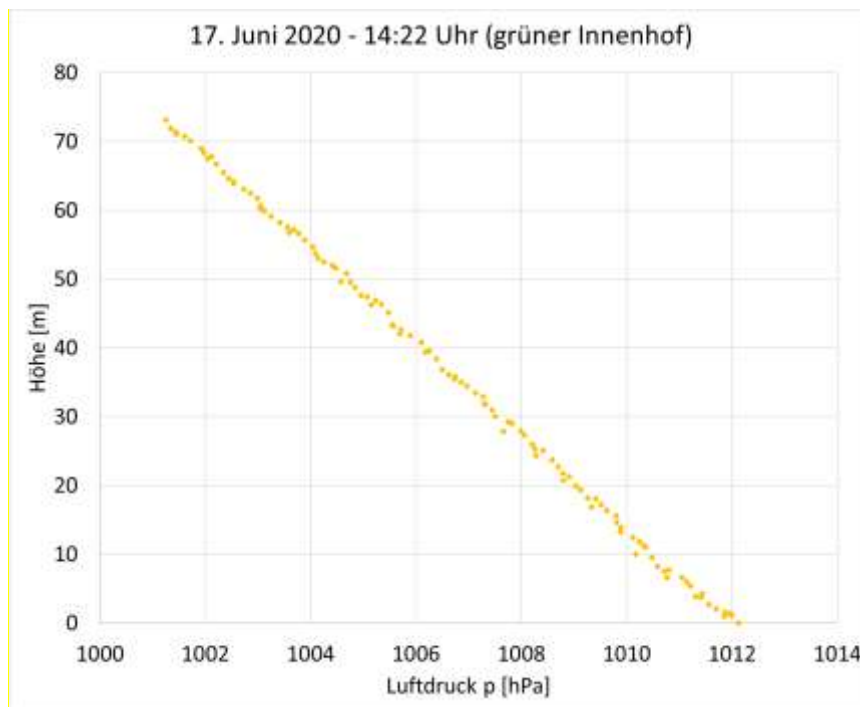


Bild 2-36: Ergebnis der Vertikal-Sondierung (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im blauen Innenhof. Die gelben Punkte stellen das Profil des Luftdrucks dar. Der tiefste Punkt (0 m) ist der Beginn, der höchste Punkt (ca. 80 m) ist das Ende des Messzeitraums. Die y-Achse zeigt die Höhe (m), die x-Achse zeigt den Luftdruck in hPa.

Windrichtung/-geschwindigkeit

Bild 2-37 und Bild 2-38 zeigen die Windrichtungen sowie Windgeschwindigkeiten im Innenhof Linden bei der Vertikalsondierung mit Drohne. Es zeigt sich, dass der Wind im Innenhof

Linden während der Drohnenmessung deutlich weniger eindeutig aus einer Richtung auszumachen ist als im Innenhof Südstadt. In Gebäudehöhe wurde eher Wind aus Nord-Osten gemessen, ab 40 m Höhe bis 100 m Höhe wurde die südliche bis östliche Richtung registriert. Die Windgeschwindigkeiten sind deutlich niedriger als im Südstadt Innenhof und variieren zwischen ca. 0,9 m/s und 2,9 m/s. Da die Drohnenmessungen an unterschiedlichen Tagen durchgeführt wurden, sind die Daten nicht direkt vergleichbar, jedoch könnte die unruhigere Windlage daraus resultieren, dass der Innenhof Linden eine Öffnung (Tor) zwischen den Gebäuden hat, während der Südstadt Innenhof völlig geschlossen ist.

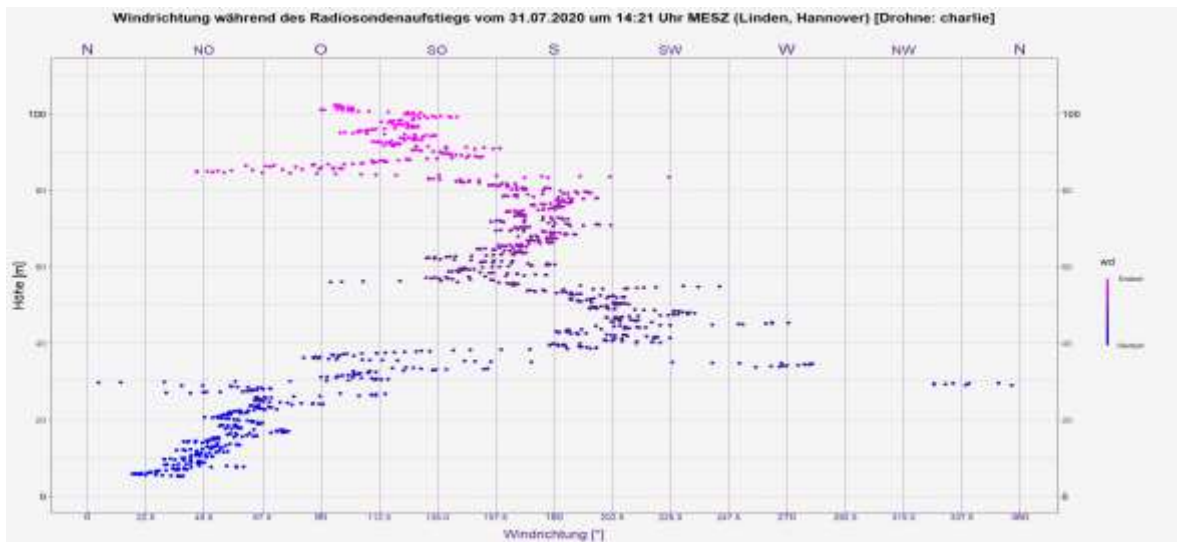


Bild 2-37: Windrichtung gemessen bei der Vertikalsondierung per Drohne am 17.06.2020 um 14:22 Uhr MESZ im Innenhof Südstadt (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).

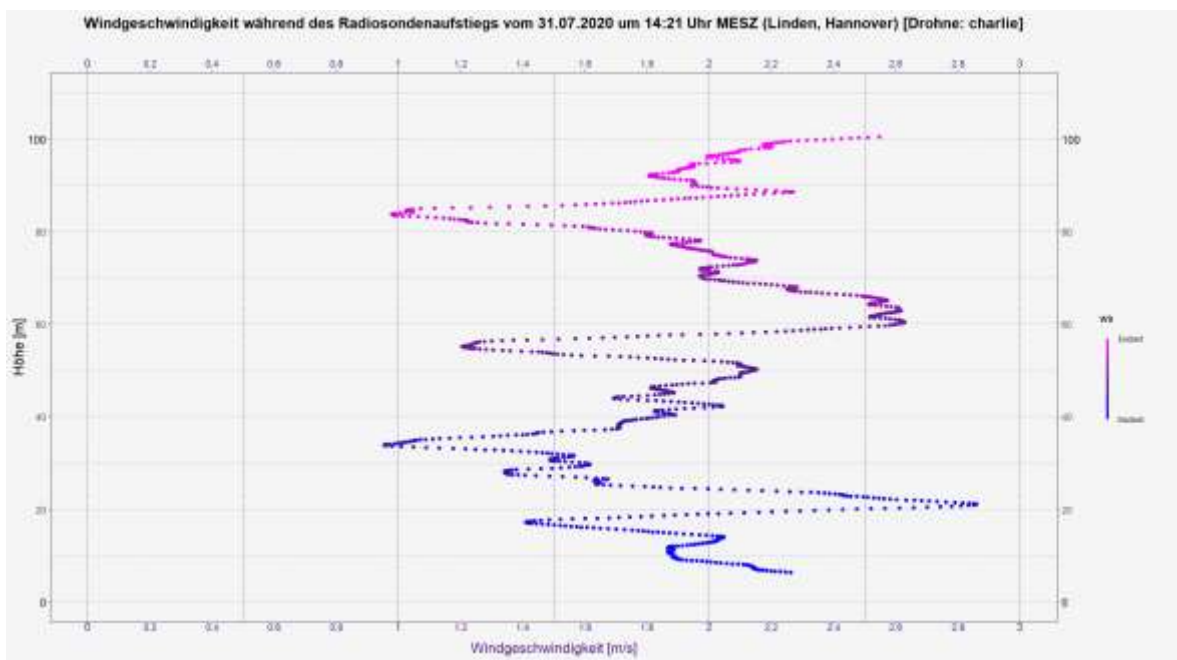


Bild 2-38: Windrichtung gemessen bei der Vertikalsondierung per Drohne am 17.06.2020 um 14:22 Uhr MESZ im Innenhof Südstadt (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020).

3 Simulation des Südstadt-Innenhofs

Die Inhalte dieses Kapitels wurden im Rahmen eines Unterauftrags der GEO-NET GmbH für das ISAH erarbeitet (vgl. Pavlik et al. 2022).

Die Zielstellung für die Durchführung einer Simulation der Innenhöfe in der Südstadt war es, zu modellieren, wie sich blaue und grüne Maßnahmen, insbesondere Gewässer, auf das Kleinklima auswirken.

Seit 2016 wird im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojekts „[UC]²- Stadtklima im Wandel“ (<http://uc2-program.org/>) das Stadtklimamodell PALM-4U für kommunale Anwender und private Klimadienstleister entwickelt.

Die umfangreichen Möglichkeiten des Modells wie beispielsweise die Berücksichtigung hochaufgelöster dreidimensionaler Gebäude- und Vegetationsstrukturen, die Berechnung bioklimatischer Indizes oder die Simulation von begrünten Dächern und Fassaden, sowie die Entwicklung des Modells an der Leibniz Universität Hannover (Institut für Umweltmeteorologie und Klimatologie), waren Anlass für die Auswahl und Anwendung von PALM-4U für das TransMIT-Projekt.

3.1 Modell-Beschreibung

PALM-4U ist ein Modellsystem für die Simulation von meteorologischen Prozessen in der städtischen atmosphärischen Grenzschicht. Es kann für verschiedene stadtklimatische Anwendungen von der Meso- bis zur Mikroskala eingesetzt werden. Im engeren Sinne ist PALM-4U kein eigenständiges Modell, sondern besteht aus einer Vielzahl von Komponenten, die für das Modell PALM entwickelt wurden. PALM ist ein meteorologisches Modell für die Simulation von atmosphärischen und ozeanischen Strömungen in der Grenzschicht. Es wurde als turbulenzauflösendes *Large-Eddy-Simulation*-Modell (LES-Modell) entwickelt, das speziell für die Ausführung auf parallelen Computerarchitekturen designet wurde (Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F. et al. 2015; Maronga et al. 2020).

PALM-4U erlaubt die räumlich hochaufgelöste Simulation des städtischen Mikroklimas und bietet verschiedene Komponenten zur Berechnung physikalischer Prozesse in urbaner Umgebung. Die wichtigsten sind z.B.:

- ein Land- Oberflächenmodell zur Berechnung des Austauschs von Wärme, Energie und Feuchte zwischen Oberfläche und Atmosphäre über bewachsenen, versiegelten oder Wasseroberflächen,
- ein Gebäudemodell zur detaillierten Berücksichtigung von Gebäudeoberflächen, Fenstern sowie begrünten Fassaden und Dächern,
- ein Pflanzenmodell zur Berücksichtigung von Impuls, Verdunstung und Erwärmung der Vegetation,
- ein Strahlungstransfermodell zu Berechnung komplexer dreidimensionaler Strahlungsinteraktionen zwischen Oberflächen und Pflanzen,
- ein Innenraummodell für Gebäude,
- sowie ein biometeorologisches Modell zur Berechnung des thermischen Komforts und der Exposition von Personen gegenüber UV-Strahlung.

PALM-4U ist in der Lage detaillierte Informationen der realen Umgebung zu verarbeiten. So werden Gebäude explizit räumlich aufgelöst und es ist möglich Informationen über höhere Vegetation (Bäume, Gehölze, Sträucher) dreidimensional zu berücksichtigen. Das Modell kann im LES- oder im RANS-Modus (*Reynolds-Averaged-Navier-Stokes*) betrieben werden

und ist in der Lage online genestete oder mesoskalig angetriebene Simulationen durchzuführen.

Wichtig ist, dass PALM-4U aktuell (Stand: 08/2022) mit einer hohen Dynamik weiterentwickelt wird und einige Komponenten noch nicht oder noch nicht vollständig implementiert sind. Weiterhin wird PALM-4U zurzeit (Stand 08/2022) im BMBF-geförderten Verbundprojekt „[UC]² - Stadtklima im Wandel“ anhand umfangreicher und komplexer Messkampagnen validiert. Bis zum vollständigen (und vor allem erfolgreichen) Abschluss dieser Validierung müssen alle mit PALM-4U erzeugten Ergebnisse als vorläufig und nicht vollständig gesichert angesehen werden. Eine Vielzahl nationaler und internationaler Veröffentlichungen zeigen jedoch auf, dass PALM sowie PALM-4U bisher vertrauenswürdige Ergebnisse liefern.

In diesem Projekt wurde PALM-4U in den Versionen 21.10 und 22.04.1 verwendet.

3.2 Eingangsdaten und Modell-Aufbau Innenhof

Ziel war die Ermittlung und Darstellung der klimaökologischen Rahmenbedingungen in dem von Baublöcken umschlossenen Südstadt-Innenhof zur Ergänzung der zuvor beschriebenen Messdaten. Dies erfolgte mit einer räumlich hochaufgelösten (2 m) Klimasimulation des Tagesganges mit dem Stadtklimamodell PALM-4U (Maronga et al. 2020). Bewertet wurden die Tag- und Nachtsituation.

Die Modelldomain wurde über den Innenhof hinaus so erweitert, dass der ebenfalls von Baublöcken umschlossene westliche gelegene Hof zu Vergleichszwecken in die Simulation mit aufgenommen werden kann.

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Höfe und durchgeführte Messungen/Simulationen pro Hof sind in Tabelle 2-8 dargestellt.

Für die Ermittlung der klimaökologischen Rahmenbedingungen im Untersuchungsgebiet wird mit dem Stadtklimamodell PALM-4U ein Zeitraum von 36 Stunden unter festgelegten meteorologischen Randbedingungen modelliert. Aus den Ergebniszeitreihen werden jeweils ein Tag- und ein Nachtzeitpunkt (stündliche Mittelwerte) ausgewählt und verschiedene meteorologische Parameter dargestellt und bewertet. Dies sind 2 m Temperatur (Nachtsituation), Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET, Tagsituation), Windgeschwindigkeit, Windrichtung und relative Feuchte.

Ein numerisches Modell wie PALM-4U benötigt für eine mikroskalige Rechnung (horizontale Gitterauflösung beträgt 2 m) spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Struktur des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Daten vorliegen:

- Geländehöhe
- Landnutzung
- Gebäudeinformation
- Vegetation
- Strukturhöhe
- Bodenart

Aus den flächenhaft vorliegenden Informationen zu den jeweiligen von PALM-4U geforderten Daten wurde ein punkthaft gerastertes Modellgitter mit einer Gitterweite von 2 m erzeugt, welches in das vom Modell benötigte Eingangsdatenformat (NetCDF) konvertiert wurde (Bild 3-1). Aufgrund der mikroskaligen Auflösung der Modellrechnung sind Bäume

direkt als Einzelbäume mit individuellen Eigenschaften (bspw. Kronendurchmesser, Kronenlänge, Brusthöhendurchmesser, LAI etc.) berücksichtigt.



Land surface classification for PALM

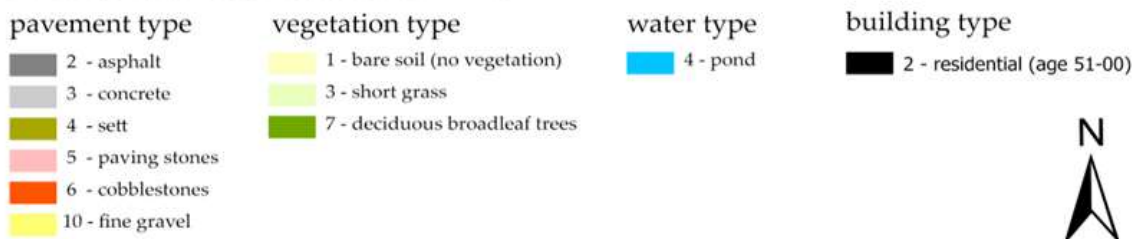


Bild 3-1: Landoberflächenklassifikation des Untersuchungsgebietes.

Für die Simulation des eingangs beschriebenen Untersuchungsgebietes wurden folgende meteorologische Randbedingungen festgelegt:

- Temperatur an der Oberfläche: 21 °C um 21:00 Uhr MESZ
- Relative Feuchte: 50 %
- Wind: ca. 0,5 m/s aus nordwestlicher Richtung
- Bodenwassergehalt: 0,3 m³/m³ (über gesamtes Bodenprofil)

- tiefe Inversion während der Nachtstunden
- Bodentemperaturen (s. Tabelle 3-1)

Tabelle 3-1: Temperaturprofil des Bodens

Tiefe [m]	0,01	0,02	0,04	0,06	0,14	0,26	0,54	1,86
T [K]	295,05	295,05	296,15	296,45	296,45	292,35	288,15	286,15

PALM-4U benötigt, bei dem hier gewählten Modellansatz, weiterhin vertikale Profile der potenziellen Temperatur und der spezifischen Feuchte. Diese wurden aus Radiosondendaten der DWD-Station Bergen abgeleitet, die sich ca. 50 km nördlich des Untersuchungsgebietes befindet. Es wurden die Daten des Radiosondenaufstieges vom 17.06.2020 um 00:00 Uhr verwendet.

Die Gitterweite für die gesamte Domain beträgt in x- und y-Richtung 2 m. Für die vertikale Ausdehnung (z-Richtung) wurde ein gestrecktes Gitter (*stretching*) verwendet, um Rechenzeit zu sparen. Bis in 200 m Höhe wurde eine Gitterweite von 2 m verwendet, ab 500 m bis 1000 m Höhe eine Gitterweite von 5 m und von 1000 m bis zum Modelloberrand bei ca. 2000 m Höhe eine Gitterweite von 10 m. In der horizontalen Ausdehnung wurden 138 x 138 Gitterpunkte (276 m x 276 m) festgelegt. Die Stadtklimasimulation wurde im RANS-Modus mit zyklischen Randbedingungen durchgeführt.

Für die Berücksichtigung aller benötigten und mit dem Modell abbildbaren meteorologischen Prozesse im urbanen Raum wurden folgende Modellmodule von PALM-4U verwendet (siehe <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/app>):

- *land surface*
- *urban surface*
- *radiation*
- *plant canopy*
- *biometeorology*

In der Modellrechnung wurde ein Zeitraum von 36 Stunden simuliert, wobei alle 15 Minuten Daten ausgegeben wurden und zusätzlich jeder Stundenmittelwert abgespeichert wurde. Die Simulation startete um 21:00 Uhr MESZ, sodass für die Tagsituation die stündlichen Mittelwerte von 14:00 Uhr und für die Nachtsituation von 04:00 der zweiten Nacht verwendet werden konnten.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Oberflächentemperatur

Bild 3-2 zeigt die Oberflächentemperatur während der Tages- und Nachtzeit und damit wie differenziert dieser Parameter in PALM auf die verschiedenen Landoberflächen reagiert. Tagsüber sind die heißesten Stellen mit etwa 75 °C bis über 85 °C auf den Dächern zu finden, da diese Flächen direkt der Sonne ausgesetzt sind. Die niedrigsten Oberflächentemperaturen von weniger als 20 °C sind in den schattigen südlichen Teilen der Höfe zu finden. Darüber hinaus weisen die Teiche im untersuchten blauen Hof das Temperaturminimum während des Tages auf, wie es sich aus den Eingabeparametern ergibt. Diese im Vergleich zu den anderen Flächen niedrige Tagestemperatur weist auch auf das Entlastungspotenzial der Gewässer hin.

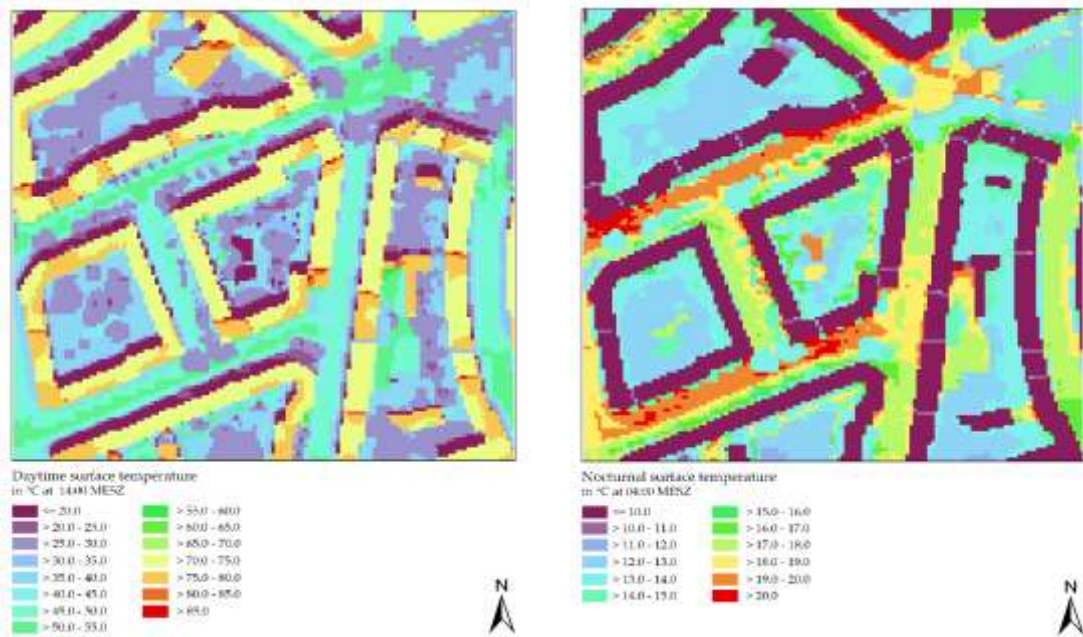


Bild 3-2: In PALM-4U modellierte Oberflächentemperaturen für die verschiedenen Landoberflächenklassifikationen um 14:00 MESZ (links) und während der Nacht um 04:00 MESZ (rechts). Quelle: GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2021)

Verglichen mit der Drohnenmessung zeigt sich, dass die simulierten Oberflächentemperaturen schon relativ dicht an die Messungen heran kommt (s. Bild 3-3: In PALM-4U modellierte Oberflächentemperaturen für die verschiedenen Landoberflächenklassifikationen um 14:00 MESZ (a) (GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2021)) und Infrarotbild (b) des blauen Hofes (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im Vergleich.

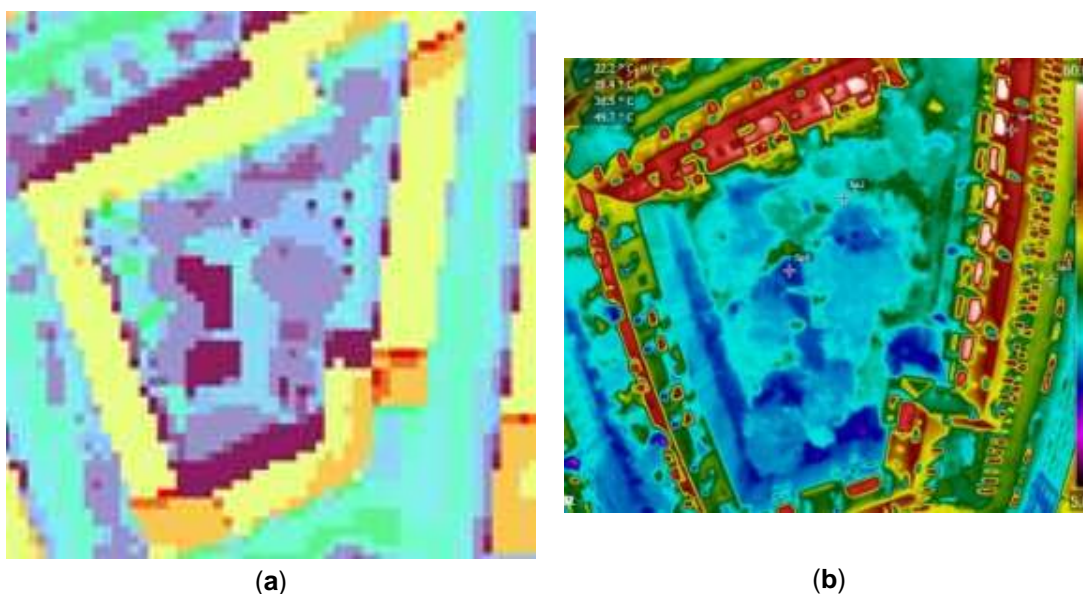


Bild 3-3: In PALM-4U modellierte Oberflächentemperaturen für die verschiedenen Landoberflächenklassifikationen um 14:00 MESZ (a) (GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2021)) und Infrarotbild (b) des blauen Hofes (Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. 2020) im Vergleich.

3.3.2 Bodennahe Lufttemperatur (2 m ü. Gr.)

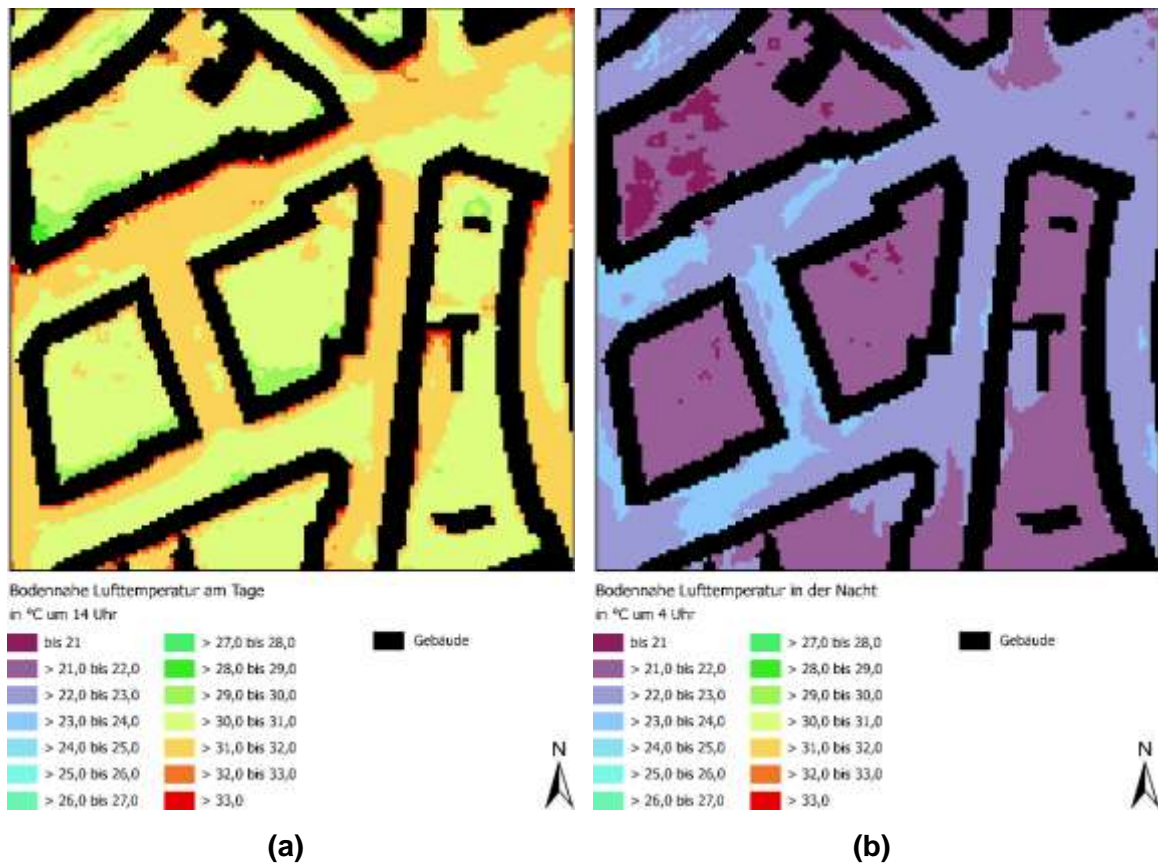


Bild 3-4: (a) Bodennahe Lufttemperatur am Tag (14:00 Uhr) und (b) in der Nacht (04:00 Uhr)

Die bodennahe Lufttemperatur liegt laut Modell am Tage (14:00 Uhr) zwischen minimal 28,7 °C im Kernschatten der Gebäude des Untersuchungsraums und maximal knapp 35 °C direkt an den sonnenbeschienenen Fassaden der Gebäude (Bild 3-4 a). Der Mittelwert beträgt 30,9 °C und so repräsentiert die Modellierung einen heißen Tag ($T_{\max} \geq 30$ °C). Verglichen mit der Drohnenmessung am 17. Juni 2020 (max. 27,7 °C um 14:22 Uhr) und den Daten der Wetterstation vom 17. Juni 2020 (max. 26,8 °C um 14:00 Uhr), überschätzt das Modell die Temperaturen oder die Eingabedaten der Station Bergen weichen stark von den Temperaturen in Hannover ab. Laut Messungen gab es keinen heißen Tag am 17.06., sondern erstmals im Jahr 2020 am 26. Juni.

Neben den sonnenbeschienenen Fassaden sind mit Temperaturen zwischen 31 °C und 32 °C die vollversiegelten Flächen im Straßenraum durch großflächig höhere Temperaturen ersichtlich. In den Innenhöfen zeigen sich Temperaturen zwischen 30 °C und 31 °C. Somit lässt sich, trotz der turbulenten Austauschbedingungen, bereits am Tage eine Abkopplung des Innenhofklimas von den äußeren Bedingungen erkennen. Ein Hinweis auf die direkte Wirkung von Einzelbäumen oder der blau-grünen Ausgestaltung des Haupt- zum Vergleichsinnenhof in der bodennahen Lufttemperatur tagsüber nicht ablesbar. Für eine genauere Betrachtung der Wirkung von Vegetation und Wasserelementen ist die Verwendung eines humanbiometeorologischen Index angebracht. Dies wird in Kapitel 3.3.3 anhand der PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) durchgeführt.

In der Nacht (s. Bild 3-4 b) steht weniger der Aufenthalt im Freien, sondern die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum im Vordergrund. Nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 besteht ein Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft, sodass die Temperatur

der Außenluft die entscheidende Größe für die Beurteilung der Nachtsituation darstellt (VDI - Verein Deutscher Ingenieure 2008). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 – 18 °C angegeben (Umweltbundesamt 2016), wobei Tropennächte mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C als besonders belastend gelten. In der Nacht ist die horizontale Verteilung der bodennahen Lufttemperatur noch homogener, als es bereits am Tage zu beobachten war. Zum Analysezeitpunkt der 04 Uhr-Situation ist das Untersuchungsgebiet auf Temperaturen von minimal 20,6 °C und maximal 24,6 °C abgekühlt, die mittlere Lufttemperatur beträgt 22,1 °C. Dies entspricht laut Definition einer Tropennacht ($T_{\min} \geq 20$ °C). Verglichen mit den realen Messungen um 00:00 Uhr im Innenhof am 17. Juni zeigt sich, dass es tatsächlich keine Tropennacht gab. Zwar betrug die Temperatur um 00:00 Uhr laut Aufzeichnung 21,7 °C, allerdings war sie zuvor um 03:00 Uhr bei ihrem Minimum von 15,0 °C (aus den Minimum-Werten). Das zeigt, dass auch hier die Werte des Modells zu hoch liegen.

Wie bereits zur Tagsituation weisen sich die Innenhöfe zudem durch geringere Temperaturen als die Straßenbereiche aus und es zeigt sich eine Trennung der klimaökologischen Bedingungen der Innenhöfe vom Außenbereich. Flächenhaft beträgt die Temperatur hier etwa 21 °C, lokal wird das Temperaturminimum von weniger als 21 °C erreicht. Auch in der Nacht ist wie bereits am Tage kein Hinweis auf Wirkung von Einzelmaßnahmen abzuleiten. Nichtsdestotrotz zeigt sich eine gewisse Richtung von kühleren Temperaturen oberhalb grüugegliederter Strukturen wie den Innenhöfen im Vergleich zu den höheren Temperaturen in den vollversiegelten Straßenzügen.

3.3.3 Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)

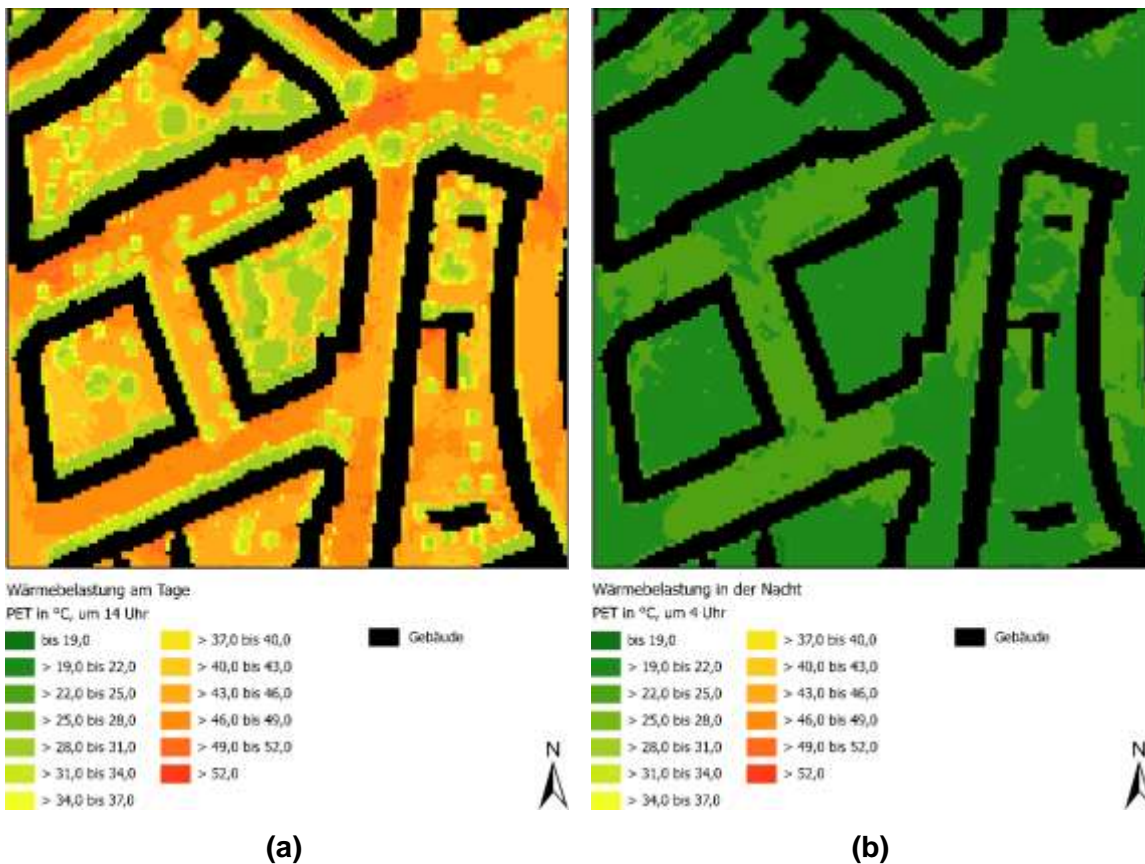


Bild 3-5: (a) PET am Tage (14:00 Uhr) und in der (b) Nacht (04:00 Uhr).

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung

werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen. In diesem Kapitel wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Matzarakis und Mayer 1996). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tag einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifiziert (z.B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tabelle 3-2). Die PET wird in einer Höhe von 1,1 m ü. Gr. untersucht, da dies die humanbioklimatisch relevante Höhe ist (mittlere Höhe des Körperschwerpunktes eines Menschen).

Tabelle 3-2: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden nach Matzarakis und Mayer (1996).

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastung
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mäßige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwache Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht Warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mäßige Wärmebelastung
35 °C	Heiß	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

Die PET am Tage reicht von 26,8 °C bis maximal 53,2 °C und beträgt im Mittel 40,9 °C (vgl. Bild 3-5). Das heißt im Untersuchungsraum wird an jedem Punkt eine PET erreicht, welche mindestens einer schwachen Wärmebelastung entspricht. Durch die geringste Wärmebelastung mit Werten um 31 °C zeichnen sich die Bereiche der Gebäudeschatten aus. Auch unterhalb von Baumkronen sinkt die PET. Die höchste Wärmebelastung ist direkt neben den sonnenbeschienenen Fassaden der Gebäude und im unverschatteten Straßenraum erkennbar. Durch die flächenhafte Verteilung der PET lässt sich direkt der positive Einfluss von Schattenwurf auf die Wärmebelastung am Tage erkennen. Zudem ist hervorzuheben, dass die Verdunstungskühlung der Vegetation auch zu diesem Effekt beiträgt und so der Mehrwert von Grünelementen während hitzebelasteter Sommertage zu erkennen ist. Es sei erwähnt, dass mittels der vorliegenden Modellierung die Vegetation in einem vitalen Zustand abgebildet wurde. In der verwendeten PALM-4U Modellversion ist die Vegetation stets mit Wasser versorgt und erreicht keinen Trockenheitszustand. Folglich kann die Ve-

getation tagsüber optimal verdunsten und so zur Verringerung der Wärmebelastung dauerhaft beitragen. Dies kann dazu führen, dass eventuell die Wirksamkeit der Vegetation zur Reduzierung der Wärmebelastung im Vergleich zu Realbedingungen etwas überschätzt in der Modellierung dargestellt ist. Neben schattenspendenden Elementen besitzen Wasserflächen am Tage nachweislich einen positiven Effekt für die Reduzierung der Wärmebelastung. Wie weit dieser Effekt wirkt, hängt von der Größe des Wasservolumens ab. Somit ist davon auszugehen, dass die Teiche im zentral gelegenen Innenhof auch einen Beitrag zur Reduzierung der Wärmebelastung vor Ort leisten. Durch die gemeinsame Modellierung von sowohl grünen als auch blauen Elementen im Innenhof ist jedoch die Wirkung der Wasserelemente mit der der Vegetation überlagert und kann nicht getrennt betrachtet werden. Um quantitative Wirkungen der grünen und blauen Elemente in einer städtischen Umgebung abzuleiten wäre eine getrennte Modellierung der Wirkungsfaktoren notwendig sowie eine Modellierung des Zustandes im Innenhof ohne diese Elemente als Referenz.

In der Nacht (04:00 Uhr) liegt die PET zwischen 18,3 °C und 25,2 °C, der Mittelwert beträgt 21,5 °C (Bild 3-5). Durch u.a. die fehlende Sonneneinstrahlung, die geringere Lufttemperatur und die höhere Luftfeuchte in der Nacht ist die Wärmebelastung im Außenraum somit auf ein Niveau gesunken, welches laut der Einordnung nach VDI maximal einer schwachen Wärmebelastung und im Mittel keiner Wärmebelastung entspricht. Eine Wirksamkeit der grün-blauen Elemente zeigt sich in der Nacht nicht. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass in der Nacht eigentlich die PET im Innenraum der Gebäude ausgewertet werden müsste, da dies zu dieser Uhrzeit in der Mehrheit dem Aufenthaltsort der Menschen entspricht. PALM-4U selbst besitzt ein Modul zur Berechnung des Innenraumklimas.

3.3.4 Relative Luftfeuchte

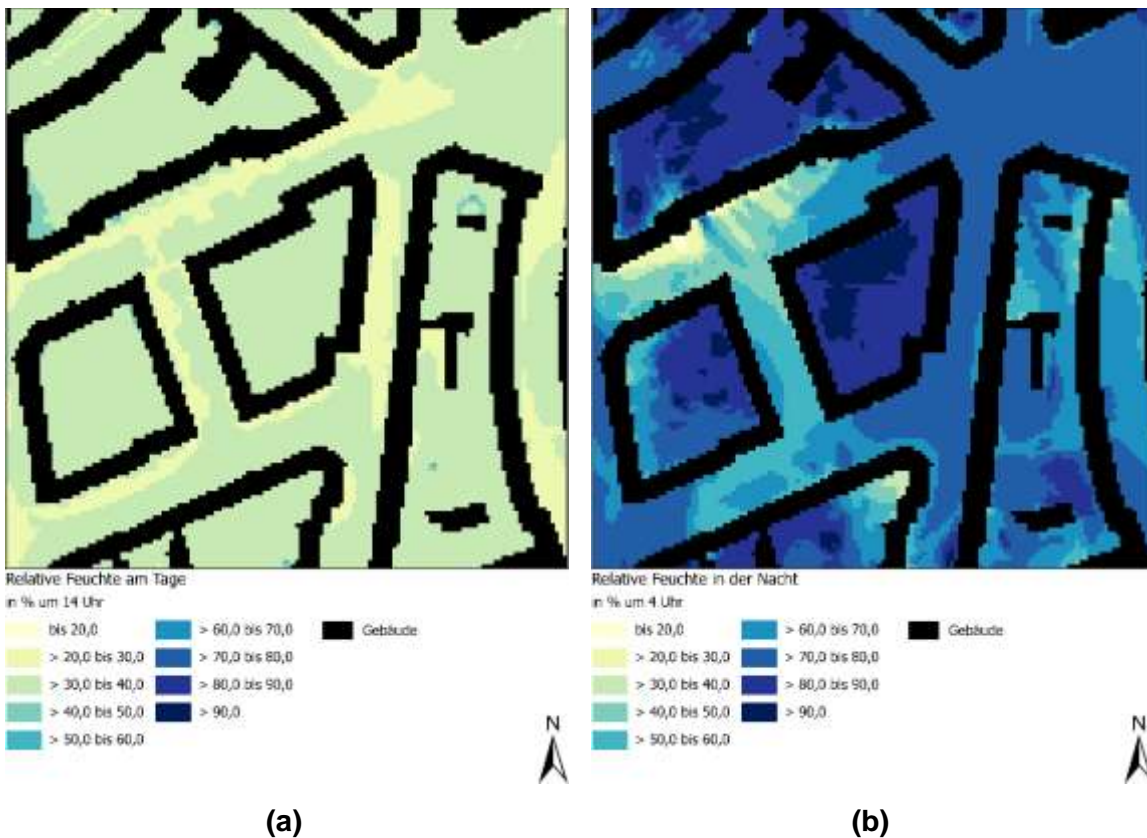


Bild 3-6: (a) Relative Luftfeuchtigkeit am Tage (14:00 Uhr) und (b) in der Nacht (04:00 Uhr).

Am Tage (14:00 Uhr) liegen die Werte der relativen Luftfeuchte in der gesamten Domain zwischen 25 % und 56 %, wobei der Mittelwert 32 % beträgt (Bild 3-6). Insgesamt sind dies sehr trockene Bedingungen, wobei die Höfe innerhalb der Wohnblöcke eine um etwa 5 – 10 % höhere Luftfeuchte aufweisen als die Straßenzüge. Durch die Vegetation und die weitaus geringere Versiegelung in den Höfen treten höhere Raten der Verdunstung und Transpiration auf, welche zu einer höheren Luftfeuchte beitragen. Zusätzlich sind die Austauschbedingungen, also die Abfuhr der feuchten Luft durch Ventilation gegenüber dem Straßenraum reduziert. Trotz der etwas höheren Luftfeuchte herrschen in den Höfen zur Tagzeit um 14:00 Uhr ebenfalls eher trockene Bedingungen. Die Vegetation ist, wie bereits erwähnt, in der Modellsimulation stets mit Wasser versorgt, somit verdunsten und transpirieren die Pflanzen permanent am Tage, auch unter sehr warmen und trockenen Bedingungen.

In der Nacht ist die relative Luftfeuchte aufgrund der niedrigeren Lufttemperaturen wesentlich höher als am Tag. Die Werte liegen zwischen 16 % und 100 % bei einem räumlichen Mittelwert von 73 % (Bild 3-6). Auch in der Nacht sind die höchsten Werte in den Innenhöfen zu finden. Da nachts Transpiration und Verdunstung nur eingeschränkt stattfinden spielt die Ventilation bei der Interpretation der räumlichen Verteilung die entscheidende Rolle. Bei einer austauscharmen Wetterlage, wie sie mit PALM-4U hier modelliert wurde, treten in der Nacht aufgrund der ausbleibenden Konvektion nur sehr geringe Windgeschwindigkeiten auf. Diese ist nachts in den Höfen, wie auch am Tage, nochmals reduziert.

Die Messdaten zeigen im Vergleich eine Luftfeuchtigkeit von 44,8 % um 14:00 Uhr am 17.06.2020 sowie 98,1 % um 04:00 Uhr.

Die Luftfeuchtigkeit hat Einfluss auf das thermische Empfinden des Menschen und die empfundene Luftqualität. So wird eine hohe Lufttemperatur bei gleichzeitig hoher Luftfeuchtigkeit (> ca. 65 %) als thermisch unangenehmer empfunden als bei geringer Luftfeuchtigkeit (< ca. 30%) (Niehaber et al. 2021). Weiterhin wird die Luftqualität bei hoher Luftfeuchtigkeit geringer eingeschätzt als bei niedriger Luftfeuchte (Berglund L. G. 1998). Grenzwerte für die Luftfeuchte werden hauptsächlich im Innenbereich von Gebäuden betrachtet. Im Außenbereich wird anhand von biometeorologischen Indizes und Parametern (z.B. physiologisch äquivalente Temperatur oder gefühlte Temperatur), berechnet mit Bilanzmodellen, der Einfluss von Temperatur und Luftfeuchte auf das Wohlbefinden des Menschen berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.3.3). Die geringe relative Luftfeuchte am Tage führt im Zusammenhang mit den hohen 2 m Temperaturen zu einer starken bis extremen Wärmebelastung im Untersuchungsgebiet. In den Höfen sorgt vor allem die Verschattung durch Bäume für weitaus geringere PET-Werte und bedingt somit einen höheren thermischen Komfort als im Straßenraum. Die Luftfeuchtigkeit spielt in diesem Zusammenhang eine eher untergeordnete Rolle.

3.3.5 Windgeschwindigkeit (2 m ü. Gr.)

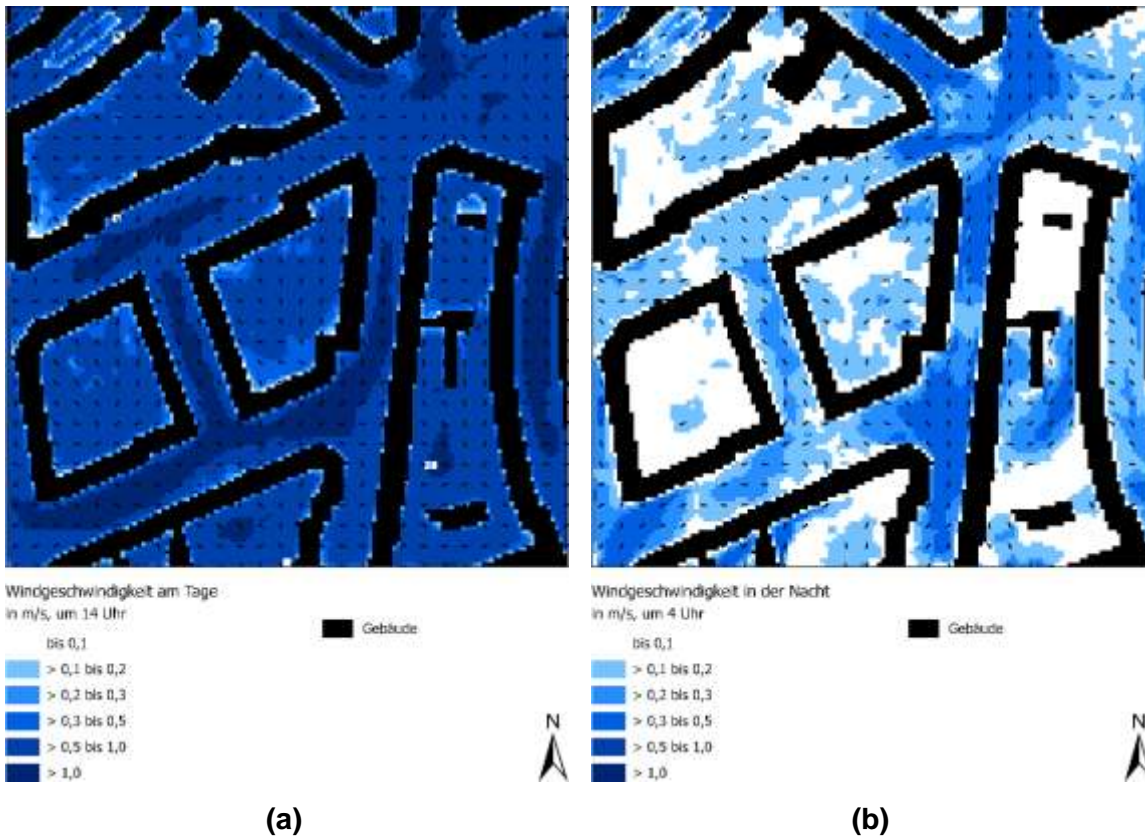


Bild 3-7: (a) Windgeschwindigkeiten am Tage (14:00 Uhr) und (b) bei Nacht (04:00 Uhr).

Am Tag treten im Untersuchungsgebiet in 2 m über Grund Windgeschwindigkeiten zwischen 0,0 m/s und 1,3 m/s bei einem Mittelwert von 0,8 m/s auf (Bild 3-7). Die höchsten Werte finden sich in den Straßenzügen, da die Bebauung hier eine, wenn auch nur geringe, Strömung zulässt. In den abgeschlossenen Innenhöfen treten die geringsten Windgeschwindigkeiten auf. Hier kann sich aufgrund der räumlichen Enge, verbunden mit Strömungshindernissen in Form von Bäumen, keine nennenswerte horizontale Zirkulation entwickeln. Nach der Beaufort-Skala entsprechen die Windgeschwindigkeiten in den Innenhöfen einer „Windstille“ und im Straßenraum einem „leichten Zug“. Auf den thermischen Komfort haben die Windgeschwindigkeiten am Tage keinen erleichternden Einfluss. In der Nacht nehmen die Windgeschwindigkeiten aufgrund der ausbleibenden Konvektion im Vergleich zur Tagsituation nochmals ab und liegen nur noch zwischen 0,0 m/s und 0,5 m/s bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 0,2 m/s. Dies entspricht sehr gut den autochthonen Bedingungen im Untersuchungsgebiet während der Nachtstunden.

Aufgrund der geringen Domaingröße ist die Ausbildung eines markanten Flurwindsystems nicht erkennbar und auch nicht zu erwarten. Dennoch ist die, wenn auch geringe, Strömung jeweils hin zu den wärmeren Arealen gerichtet. Dies führt bspw. im nördlichen Abschnitt der Straße „An der Tiefenriede“ und in der westlich und parallel gelegenen „Büntestraße“ zu einer nord-süd gerichteten Strömung, welche entgegengesetzt der Tagsituation verläuft. Aufgrund der abgeschlossenen Wohnbebauung (sog. Blockrand) findet kein Luftaustausch zwischen Innenhöfen und Straßenraum statt. Die Belüftungssituation im Untersuchungsgebiet kann mit dem verwendeten Modellansatz nur begrenzt wiedergegeben werden, da die

Ausbildung der Strömungsmuster räumlich nur auf den Bereich der Modelldomain beschränkt ist. Eventuelle, in der Realität auftretende Strömungen aus Bereichen außerhalb der Domain können vom Modell nicht berücksichtigt werden.

3.4 Zusammenfassung

Für ein urbanes Untersuchungsgebiet in Hannover Südstadt wurde mit dem Stadtklimamodell PALM-4U der Tagesgang eines warmen Tages mit autochthonen nächtlichen Bedingungen simuliert. Das Gebiet ist geprägt von Blockrandbebauung mit umschlossenen Innenhöfen. Die räumliche Auflösung der Modelldomain betrug 2 m und PALM-4U wurde mit zyklischen Randbedingungen im RANS-Modus betrieben. Insgesamt wurde ein Zeitraum von 36 Stunden berechnet, wobei die Simulation um 21:00 Uhr startete. Ausgewertet wurden die Zeitpunkte 14:00 Uhr als Tagsituation und 04:00 der zweiten Nacht als Nachtsituation. Zur Beschreibung der klimaökologischen Bedingungen wurden die Variablen 2 m Temperatur, Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET), Windgeschwindigkeit, Windrichtung und relative Feuchte jeweils zum Tages- und Nachtzeitpunkt ausgewertet. Die Tagsituation ist durch einen heißen Sommertag ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) charakterisiert, wobei die Variabilität der 2 m Temperaturen im Straßenraum größer ist als in den Innenhöfen. Im Flächenmittel beträgt die PET rund 41 °C, was laut VDI-Richtlinie einer starken bis extremen Wärmebelastung entspricht. In den Innenhöfen ist die Wärmebelastung aufgrund von Verschattung durch Bäume und Fassaden, sowie Verdunstungskühlung durch Vegetation deutlich geringer als im Straßenraum. Die relative Luftfeuchte beträgt im Mittel 32 %, wobei die Innenhöfe etwa 5 – 10% höhere Luftfeuchtigkeiten aufweisen als der Straßenraum. Geringe Windgeschwindigkeiten von 0 bis 1,3 m/s liefern keinen wesentlichen Beitrag zur thermischen Entlastung, wobei die bessere Durchströmbarkeit der Straßenzüge höhere Windgeschwindigkeiten zulässt als in den Innenhöfen. In der Nacht kommt es erwartungsgemäß zu einer Abkühlung, wobei die 2 m Temperatur im räumlichen Mittel mit 22 °C (entspricht einer Tropennacht) für einen erholsamen Schlaf als zu hoch einzustufen ist. Die Innenhöfe sind auch in der Nacht etwas kühler als der Straßenraum. Die niedrigeren Temperaturen verbunden mit einer sehr eingeschränkten Ventilation, besonders in den Innenhöfen, führen zu einer hohen relativen Luftfeuchtigkeit, wobei lokal Maximalwerte bis zu 100 % erreicht werden. Im Mittel liegt die relative Luftfeuchte bei 73 %, was als hoch einzuschätzen ist. Aufgrund der ausbleibenden Konvektion sind die Windgeschwindigkeiten in der Nacht gegenüber dem Tag nochmals reduziert, was jedoch den durch das Modell-Setup initiierten autochthonen Bedingungen sehr gut entspricht. Aufgrund der geringen Domaingröße ist die Ausbildung eines markanten Flurwindsystems nicht zu erkennen und auch nicht zu erwarten. PALM-4U ist für die Bewertung der klimaökologischen Situation im eingangs beschriebenen Untersuchungsgebiet im RANS-Modus durchaus geeignet. Limitationen treten eher durch die Wahl des Setups, der Domaingröße, der räumlichen Auflösung sowie des damit verbundenen Bedarfs an IT-Ressourcen auf. Für die Bewertung des Einflusses einzelner Elemente blau-grüner Infrastruktur auf klimaökologische Bedingungen bedarf es detaillierterer Untersuchungs- und Modellierungsansätze mit PALM-4U als in diesem Projekt umgesetzt.

Verglichen mit den Messungen im Innenhof lässt sich feststellen, dass auf Basis der Messungen im simulierten Zeitraum entgegen der Modellergebnisse keine Tropennacht und kein Hitzetag aufgetreten sind. Hier besteht ebenfalls weiterer Untersuchungsbedarf, ob die Standortwahl der Wetterstation der entscheidende Faktor für die Differenzen ist oder aber die unzureichend detaillierte Modellierung.

4 Literaturverzeichnis

bergfreunde.de (2022): Hitzeindex | Gefühlte Temperatur bei hoher Luftfeuchtigkeit. Online verfügbar unter <https://www.bergfreunde.de/hitzeindex-rechner/>, zuletzt aktualisiert am 22.08.2022, zuletzt geprüft am 22.08.2022.

Berglund L. G. (1998): Comfort and Humidity. In: *ASHRAE Journal*, S. 35–41.

Brand, S. (2008): Das Meso- und Mikroklima. Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Tübingen.

Bundesministerium für Umwelt; Naturschutz; Bau und Reaktorsicherheit (BMUB); www.bmub.bund.de (2015): Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft, zuletzt geprüft am 23.08.2022.

DWD (n.D.a): Wetter- und Klimalexikon. Autochthone Witterung. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100072&lv3=100304>, zuletzt geprüft am 28.02.2022.

DWD (n.D.b): Wetter- und Klimalexikon. Heißer Tag. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=101162>, zuletzt geprüft am 23.09.2021.

DWD (n.D.c): Wetter- und Klimalexikon. Hitzewelle. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=624852>.

DWD (n.D.d): Wetter- und Klimalexikon. Inversion. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101224&lv3=101280>, zuletzt geprüft am 17.11.2021.

DWD (n.D.e): Wetter- und Klimalexikon. Tropennacht. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=102672&lv3=102802>, zuletzt geprüft am 23.09.2021.

DWD (2022a): Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Global-, Diffus- und Direktstrahlung (Monats- und Jahressummen sowie Abweichungen). Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_sum.html;jsessionid=7B0E6B895F0F29CC1E7C157A85A4B35B.live11041?nn=16102, zuletzt aktualisiert am 09.08.2022, zuletzt geprüft am 09.08.2022.

DWD (2022b): Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Trend der Jahressummen der Globalstrahlung. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/Trend_seit1991.html;jsessionid=7B0E6B895F0F29CC1E7C157A85A4B35B.live11041?nn=16102, zuletzt aktualisiert am 09.08.2022, zuletzt geprüft am 09.08.2022.

DWD, Regionales Klimabüro Hamburg, Krugmann, G. (2021): Informationen über die Umgebung der mobilen Wetterstationen des DWD, persönliche Kommunikation, 14.07.2021. E-Mail an Jessica Gerstendörfer.

Fenner, D.; Mücke, H.-G.; Scherer, D. (2015): Innerstädtische Lutttemperatur als Indikator gesundheitlicher Belastungen in Großstädten am Beispiel Berlins. In: *Umwelt und Mensch - Informationsdienst* (1), zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Fezer F.: Lokalklimatische Interpretation von Thermal-Luftbildern in Bildmessung und Luftbildwesen. In: Städtebauliche Klimafibel. Online verfügbar unter <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=6&p2=2.3>, zuletzt geprüft am 07.10.2022.

Grünes Haus (2021): Globalstrahlung einfach erklärt - Grünes Haus. Online verfügbar unter <https://gruenes.haus/globalstrahlung/>, zuletzt aktualisiert am 09.02.2022, zuletzt geprüft am 08.08.2022.

Hoffmann, M. (2021): So war das Wetter im Sommer 2021: Deutlich zu warm, zu nass mit ausgeglichener Sonnenscheinbilanz. Online verfügbar unter <https://www.wetterprognose-wettervorhersage.de/wetter-jahreszeiten/sommer/wetter-sommer-2021/9792-so-war-das-wetter-im-sommer-2021-deutlich-zu-warm-zu-nass-mit-ausgeglichener-sonnenscheinbilanz.html>, zuletzt geprüft am 07.10.2022.

Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Meusel, G. (2020): Datenübergabe nach Drohnenbefliegung, persönliche Kommunikation, 2020 an Gerstendörfer, J. (ISAH).

Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMuK), Schilke, H. (2021): Messwerte der Klimastation Herrenhausen, persönliche Kommunikation, 2021. E-Mail an Gerstendörfer, J. (ISAH).

Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e.V. Leipzig (13).

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) (2012): Klimawandel und Bodenwasserhaushalt. GeoBerichte 20. Hannover. Online verfügbar unter https://www.lbeg.niedersachsen.de/download/66598/GeoBerichte_20.pdf, zuletzt geprüft am 19.10.2022.

Landesamt für Statistik Niedersachsen (LSN) (2020): Statistische Berichte Niedersachsen. Bevölkerung der Gemeinden am 30. Juni 2020. Online verfügbar unter https://www.statistik.niedersachsen.de/startseite/themen/bevolkerung/bevolkerungsstand_einwohnerzahl_niedersachsens/bevolkerungsstand-einwohnerzahl-niedersachsens-statistische-berichte-201961.html, zuletzt geprüft am 31.05.2022.

Maronga, B.; Banzhaf, S.; Burmeister, C.; Esch, T.; Forkel, R.; Fröhlich, D. et al. (2020): Overview of the PALM model system 6.0. In: *Geoscientific Model Development* 13 (3), S. 1335–1372. DOI: 10.5194/gmd-13-1335-2020.

Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F.; Kanani-Sühring, F., Keck, M., Ketelsen, K., Letzel, M.; O., Sühring, M., Raasch, S. (2015): The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives. In: *Geoscientific Model Development* 8, 2015, S. 2515–2551.

Matzarakis, A.; Mayer, H. (1996): Another kind of environmental stress: thermal stress. WHO Newsletter (18), S. 7–10.

Niehaber, F.; Rewitz, K.; Seiwert, P.; Müller, D. (2021): Einfluss der Luftfeuchte auf den Menschen und seine Gesundheit. White Paper RWTH-EBC 2021-001. DOI: 10.18154/RWTH-2021-01238.

Pavlik, D.; Mendzigall, K.; Tils, R. von (2022): Mikroskalige Klimamodellierung Hannover Südstadt. Schlussbericht. Hg. v. GEO-NET Umweltconsulting GmbH. Hannover.

Schönwiese, Christian-Dietrich (2008): *Klimatologie*. 3., wesentl. verb. und aktualisierte Aufl. Stuttgart: Ulmer (utb.de Bachelor-Bibliothek, 1793).

Statistisches Amt der Landeshauptstadt Hannover (2021): Die Stadtfläche der Landeshauptstadt Hannover in Zahlen. Online verfügbar unter <https://www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Politik/Wahlen-Statistik/Statistikstellen-von-Stadt-und-Region/Statistikstelle-der-Landeshauptstadt-Hannover/Hannover-kompakt/Stadtgebiet>, zuletzt aktualisiert am 01.06.2021, zuletzt geprüft am 18.11.2021.

Steger, L.; Well, F.; Ludwig, F. (2020): Blau-grüne Infrastrukturen. Transformationsstudien urbaner Freiräume am Beispiel von Frankfurt. In: *Transforming Cities* 5 (1), S. 58–63, zuletzt geprüft am 09.11.2021.

Umweltbundesamt (2016): Heizen, Raumtemperatur. Online verfügbar unter www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaftskonsum/umweltbewusstleben/heizenraumtemperatur, zuletzt geprüft am 26.06.2019.

Umweltbundesamt (2020): Indikator: Heiße Tage. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-heisse-tage#die-wichtigsten-fakten>.

VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2008): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.

Weischet, W.; Endlicher, W. (2008): Einführung in die allgemeine Klimatologie. Mit 13 Tabellen. 7., vollst. neu bearb. Aufl. Berlin, Stuttgart: Borntraeger (Studienbücher der Geographie).

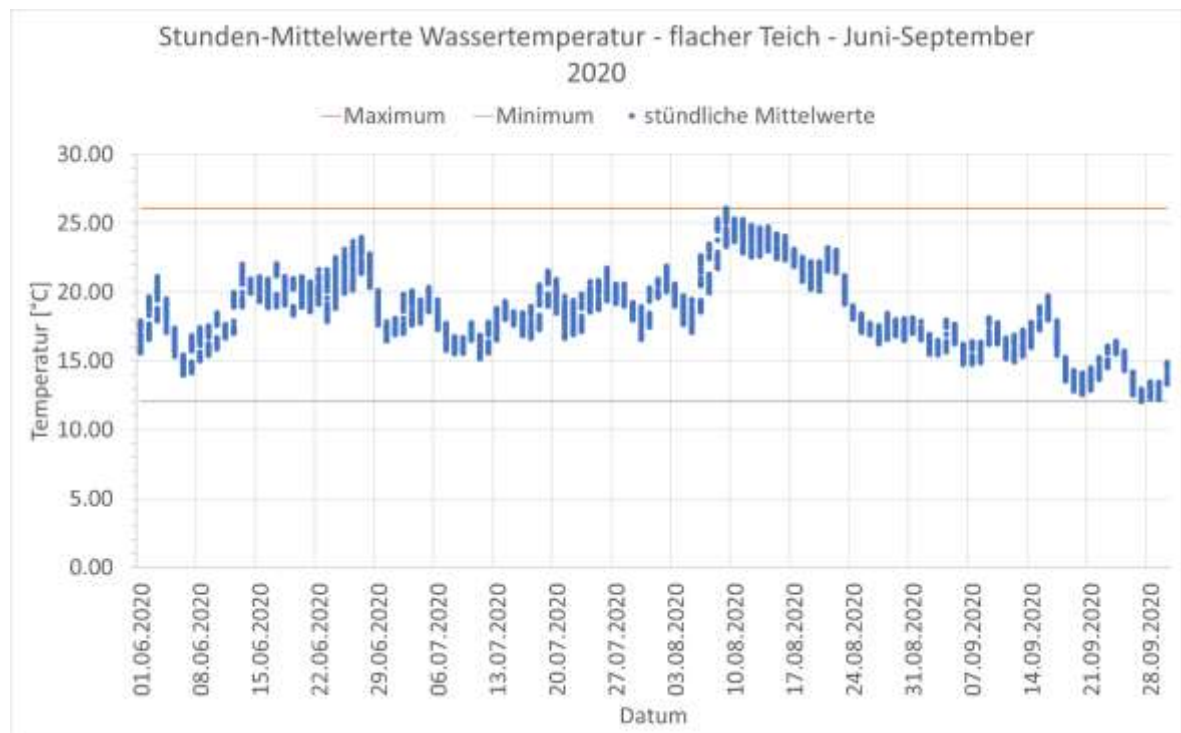
Wetter.net: Tagesgang. Wetterlexikon. Online verfügbar unter <https://www.wetter.net/wetterlexikon/eintrag/tagesgang>, zuletzt geprüft am 07.10.2022.

Anhang

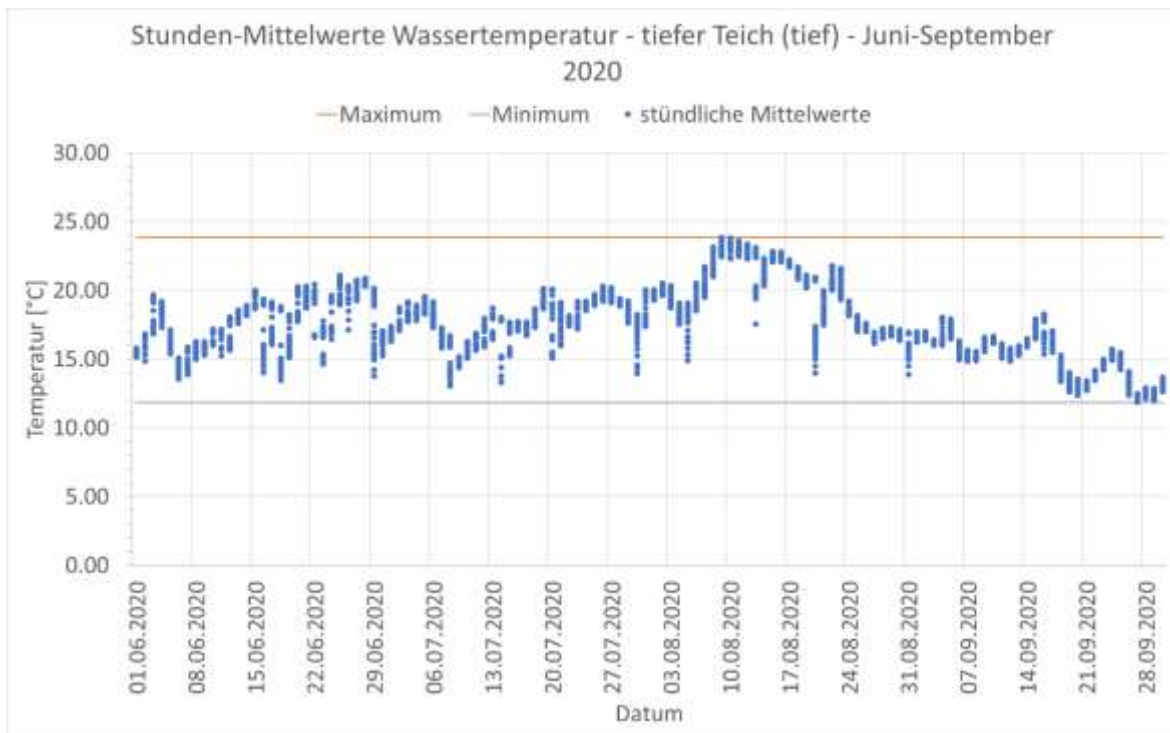
Weitere gemessene Parameter, aus denen im Rahmen des TransMIT-Projekts keine Rückschlüsse auf das Mikroklima gezogen wurden.

Wassertemperaturen Innenhof

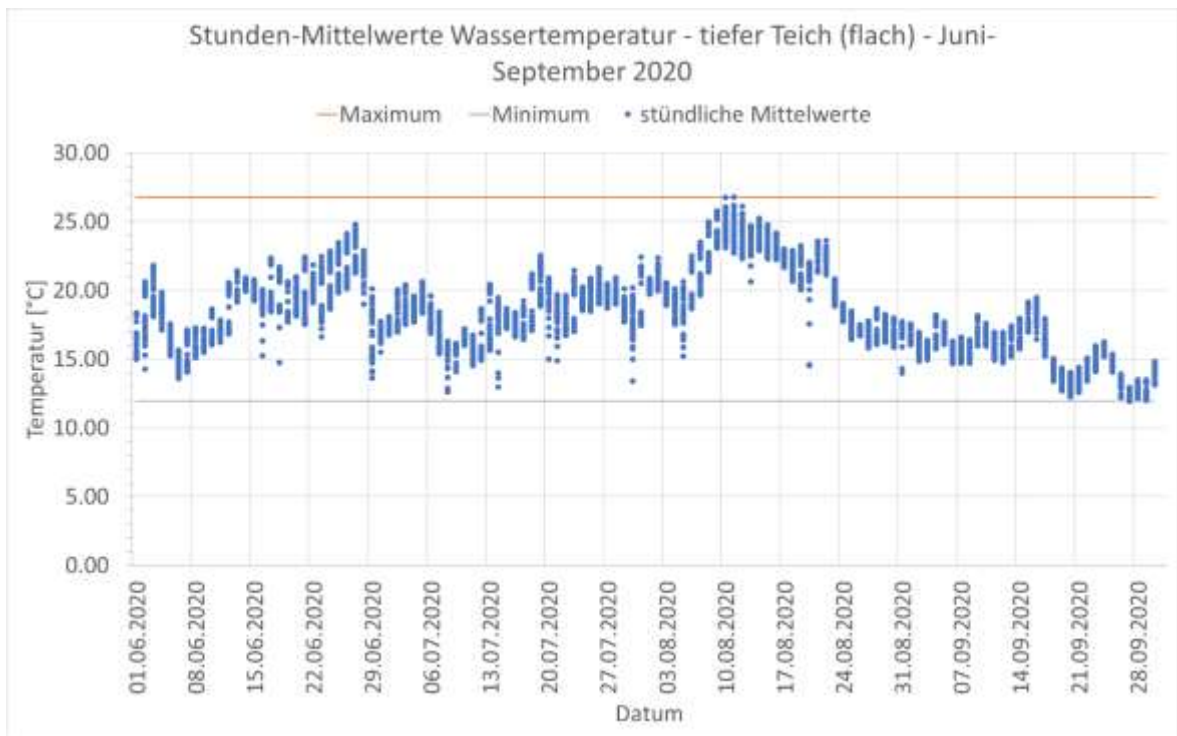
flacher Teich



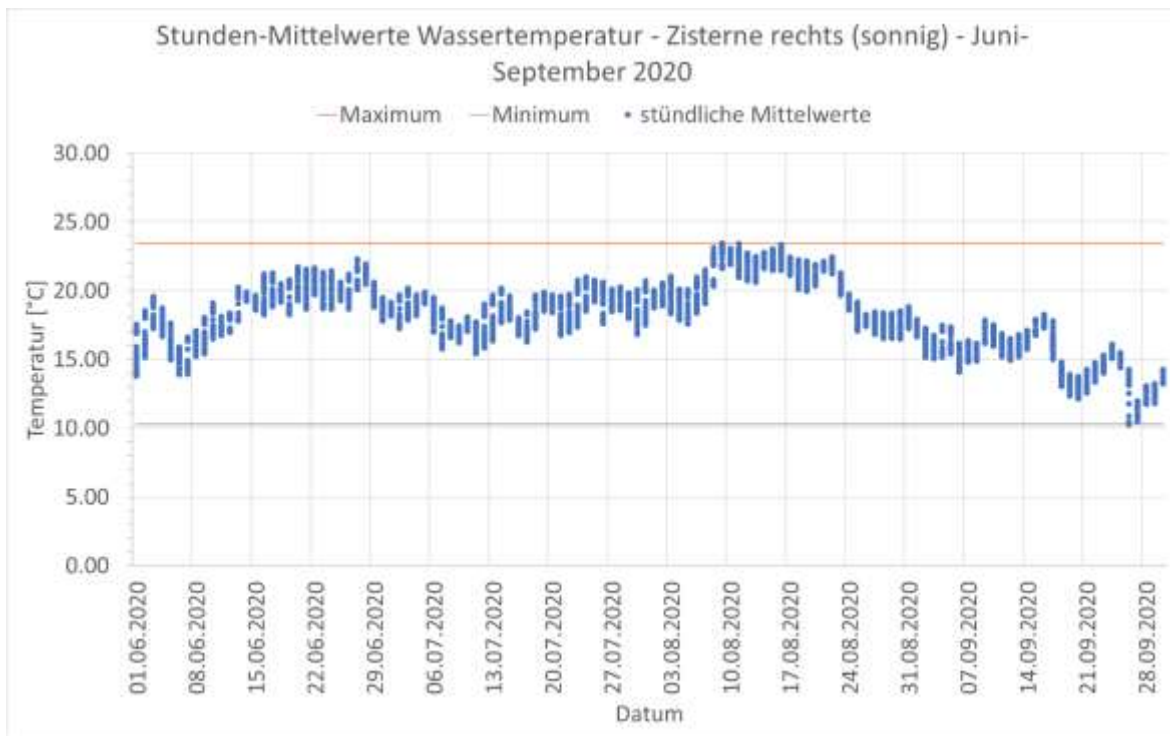
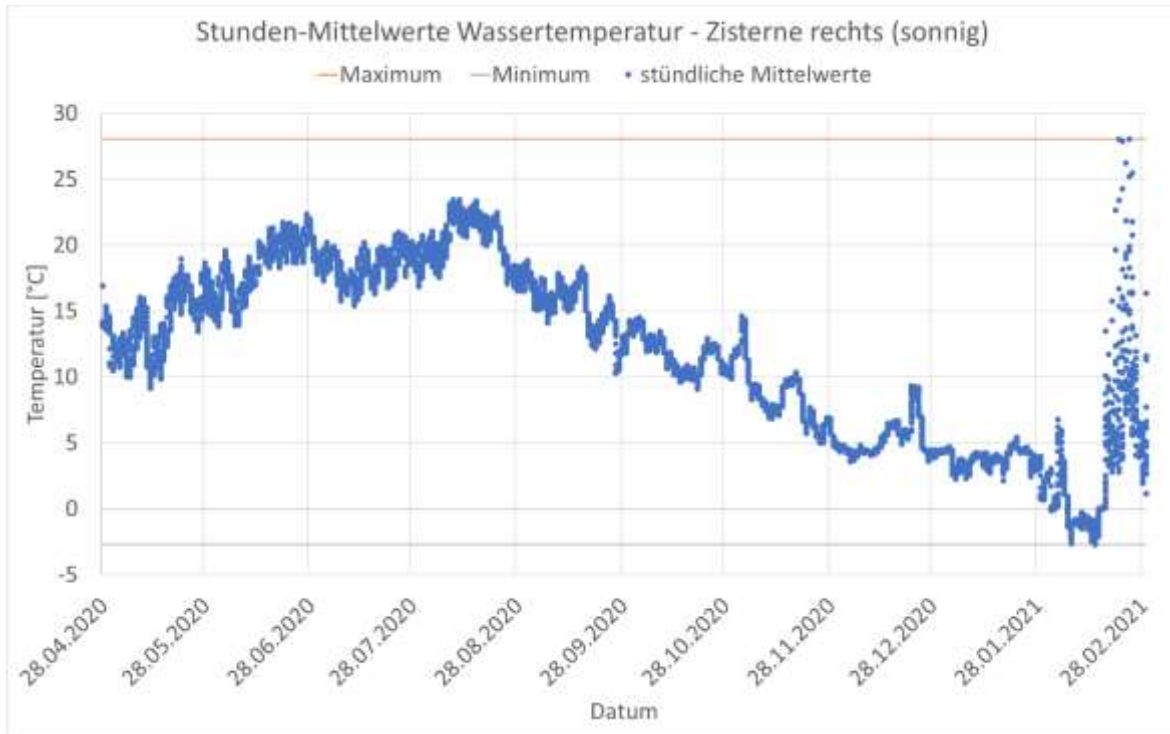
tiefer Teich (tief)



tiefer Teich (flach)



Zisterne (sonnig)



Zisterne (schattig)

