

DWD

Computersmodellierung und Messung der Temperatur- und Windverhältnisse in Ingelheim am Rhein

Projekt KlimPraxIng – Klimawandel in der Praxis am Beispiel der Mittelstadt Ingelheim am Rhein

Schlussbericht

Autorin:

Dr. Saskia Buchholz

Deutscher Wetterdienst
Abteilung Klima- und Umweltberatung
Zentrales Klimabüro, Offenbach

12.09.2022

Zusammenfassung

Der Deutschen Wetterdienst (DWD) unterstützte im Projekt „KlimPraxIng – Klimawandel in der Praxis am Beispiel der Mittelstadt Ingelheim am Rhein“ – die Stadt Ingelheim am Rhein mit meteorologischen Grundlagendaten für die Erarbeitung einer Strategie zur Klimawandelanpassung. Hierzu wurden mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 Computersimulationen der Lufttemperatur- und Windverhältnisse für einen Sommertag mit windschwacher und wolkenfreier Hochdruckwetterlage durchgeführt. Um neben der Lufttemperatur auch das thermische Empfinden des Menschen bewerten zu können, wurde aus diesen Ergebnissen die Gefühlte Temperatur berechnet. Anhand der Modellergebnisse werden zum einen Stadtquartiere mit einer starken Überwärmung gegenüber dem Umland lokalisiert und zum anderen nächtliche Kaltluftströmungen und ihre Belüftungsrelevanz für die städtischen Überwärmungsgebiete analysiert. Dazu wurden das Potential von Flächen zur Kaltluftbildung und der Kaltluftvolumenstrom in den unteren 20 m sowie der Fließweg der Kaltluft (sogenannte Trajektorien) berechnet.

Um die Güte der Modellierung verifizieren zu können, wurden die Modellsimulationen mit Messdaten ergänzt. Während einer 4-monatigen Messkampagne im Zeitraum 27. Mai bis 30. September 2021 wurden umfangreiche Wind- und Temperaturmessungen und drei Radiosondenaufstiege in Ingelheim am Rhein durchgeführt. Die im Stadtgebiet Ingelheim durchgeführten DWD-Messungen wurden durch Messdaten der agrarmeteorologischen Stationen des Landes Rheinland-Pfalz und der DWD Station Geisenheim ergänzt.

Die Modellergebnisse und die Messdaten zeigen in allen bebauten Gebieten von Ingelheim am Rhein deutlich ausgeprägte Wärmeinseln, die am Abend in den verschiedenen Stadtteilen maximale Intensitäten von 4 bis 5 Kelvin erreichen können. Im Verlauf der Nacht bilden sich räumlich komplexe und zeitlich variable Kaltluftabflüsse aus, die wesentlich zur nächtlichen Abkühlung der Siedlungsgebiete beitragen, sodass sich deren Überwärmung bis zum frühen Morgen auf Werte um 1 bis 2 Kelvin abschwächt. Auch am Tag lässt sich eine geringe Wärmeinsel von maximal 2 Kelvin feststellen. Jedoch ist die Verteilung der Lufttemperatur im Untersuchungsgebiet sehr komplex und hohe Werte am Tag überwiegend auf topografische Gegebenheiten und nicht auf städtische Bebauung zurückzuführen. Die modellierten komplexen Windverhältnisse im Selztal konnten durch Messungen belegt werden. Eine Belüftungswirkung für die Stadt Ingelheim am Rhein kann hieraus nur für den unteren Talabschnitt der Selz abgeleitet werden.

Summary

The Deutscher Wetterdienst (DWD) provided the city of Ingelheim am Rhein in the project "KlimPraxIng - climate change in practice using the example of the medium-sized town of Ingelheim am Rhein" - meteorological data for the development of a climate adaptation strategy. For this purpose, the micro-scale urban climate model MUKLIMO_3 was used to carry out computer simulations of the air temperature and wind conditions for a summer day with cloudless and calm weather conditions. In order to evaluate not only air temperature but also the thermal perception of humans, the perceived temperature was calculated from the model results. The model results are used on the one hand to localize urban districts with strong overheating compared to the surrounding area and on the other hand to analyse night-time cold air drainage flows and their ventilation relevance for the urban overheated areas. Therefore, the ventilation of heat prone urban quarters by nocturnal cold air flows has been analysed via trajectory analysis and the calculation of volume fluxes of airflow in the lowest 20 m above ground.

The model simulations were supplemented with measurement data to verify the quality of the model results. During a 4-month measurement campaign from May 27th to September 30th, 2021, wind and temperature measurements and three radiosonde ascents were carried out in Ingelheim am Rhein. The predominantly urban DWD measurements were supplemented by measurement data from the agro-meteorological stations of the state of Rhineland-Palatinate and the DWD station Geisenheim.

The model results and the measurement data show pronounced heat islands in all built-up areas of Ingelheim am Rhein, which can reach maximum intensities of 4 to 5 Kelvin in the various parts of the city in the evening. During the night, spatially complex and temporally variable cold air drainage flows contribute significantly to the nocturnal cooling of some urban areas, leading to a reduction of the temperature to values of around 1 to 2 Kelvin by the early morning. An urban heat island of a maximum of 2 Kelvin can also be observed during the day. However, the characteristics of the air temperature in the study area are very complex and high temperature values during the day are mainly related to the terrain and not to urban heat island development. The simulated complex wind conditions in the Selz valley could be proven by measurements. A ventilation effect for Ingelheim am Rhein can only be derived for the lower valley section of the Selz.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Summary	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	11
1. Einleitung und Zielstellung	12
2. Modellsimulationen	13
2.1 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3	13
2.2 Modellgebiet und Eingangsdaten	14
2.3 MUKLIMO_3 Modellkonfiguration	17
2.4 Das Klima-Michel Modell	18
3. Ergebnisse der Modellierung	20
3.1 Modellerte Lufttemperatur und Gefühlte Temperatur	20
3.2 Kaltluftanalysen	27
3.2.1 Abendliche Überwärmungsgebiete und Kaltluftentstehungsgebiete	27
3.2.2 Windverhältnisse	30
3.2.3 Kaltluftvolumenstrom	33
3.2.4 Trajektorienanalyse	35
4. Das Messprogramm	44
4.1 Agrarmeteorologische Stationsmessungen	44
4.2 Städtisches Messprogramm des DWD	45
4.2.1 Profilmessfahrten	47
4.2.2 Radiosondenaufstiege	50
4.3 Ergebnisse der Windmessungen	50
4.3.1 Situation am Tag	51
4.3.2 Situation in der Nacht	53

4.3.3	Die Wind- und Kaltluftsituation im Tal der Selz.....	56
4.4	Ergebnisse der Temperaturmessungen.....	58
4.4.1	Vergleich der Messergebnisse der Lufttemperatur von Thermobutton und von PT100 Sensor.....	58
4.4.2	Lufttemperatur und thermische Kenntage	60
4.4.3	Ergebnisse der Profilmessfahrten	68
4.4.4	Ergebnisse der Radiosondenaufstiege.....	72
5.	Vergleich der Modellergebnisse mit den Messdaten.....	74
6.	Ergebnisbetrachtung für die Klimaanpassungsstrategie	78
	Literatur.....	80
	Anhang.....	82

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Schematische Darstellung einer städtischen Wärmeinsel	12
Abb. 2	Topografische Karte des MUKLIMO_3 Modellgebietes Ingelheim am Rhein mit der lila umrandeten Stadtgrenze.	14
Abb. 3	Schematischer Ablauf der Aufbereitung der Geodaten. Die verschiedenen Eingangsdaten werden auf das gewünschte MUKLIMO_3 Rechengitter und Format transformiert (erweitert nach HEENE et al. 2018, Quelle: Copernicus CLMS).....	15
Abb. 4	MUKLIMO_3 Eingangsdaten: A) Landnutzung (rot und lila städtische Landbedeckung; grün, gelb und braun Ackerflächen und Wiesen; dunkelgrün Wälder; blau Wasserflächen), B) Geländehöhe, C) Gebäudegrundflächenanteil und D) Versiegelungsgrad ohne Gebäude. Die lila Linie kennzeichnet das Stadtgebiet Ingelheim am Rhein.	16
Abb. 5	Stärkewindrose der Station Mainz-Finthen für die Nachstunden während des Sommerhalbjahres (April bis September) im Zeitraum 1979 bis 1988	18
Abb. 6	Tagesmaximumtemperatur (°C) in 2 m über Grund. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.	20
Abb. 7	Minimumtemperatur (°C) in 2 m über Grund. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.	21
Abb. 8	Lufttemperatur in 5 m über Grund um 17:00 MESZ. Die Kontourlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.	22
Abb. 9	Lufttemperatur in 5 m über Grund um 22:00 MESZ. Die Kontourlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.	23
Abb. 10	Lufttemperatur in 5 m über Grund um 2:00 MESZ. Die Kontourlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.	24
Abb. 11	Darstellung der Gefühlten Temperatur um 17:00 MESZ. Die Kontourlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.	25
Abb. 12	Darstellung der Gefühlten Temperatur um 22:00 MESZ. Die Kontourlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.	26
Abb. 13	Darstellung der Gefühlten Temperatur um 2:00 MESZ. Die Kontourlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.	27

Abb. 14	Lage der fünf Überwärmungsgebiete (schwarze Linie) und Lufttemperatur um 21:00 MESZ im Modellgebietsausschnitt Ingelheim am Rhein. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als lila Linie eingezeichnet.	28
Abb. 15	Zwischen 22:00 und 04:00 MESZ zeitlich integrierter, fühlbarer Wärmestrom zwischen dem Boden sowie den Bäumen und der umgebenden Atmosphäre in kWh/m ² als Maß zur Beurteilung des Potentials einer Fläche für die nächtliche Kaltluftbildung. Die orangenen Konturlinien umschließen die für die weitere Untersuchung ausgewählten Kaltluftentstehungsgebiete. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.	29
Abb. 16	Bodennahes Windfeld (Vektorlänge und -richtung) und Temperatur (Vektorfarbe) um 17:00 MESZ. Der rechts oben in der Legende dargestellte Vektor entspricht einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s. Dargestellt ist jeder 4te Windvektor. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als blaue Linie eingezeichnet (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).	31
Abb. 17	Bodennahes Windfeld (Vektorlänge und -richtung) und Temperatur (Vektorfarbe) um 22:00 MESZ. Der rechts oben in der Legende dargestellte Vektor entspricht einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s. Dargestellt ist jeder 4te Windvektor. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als blaue Linie eingezeichnet (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).	32
Abb. 18	Bodennahes Windfeld (Vektorlänge und -richtung) und Temperatur (Vektorfarbe) um 2:00 MESZ. Der rechts oben in der Legende dargestellte Vektor entspricht einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s. Dargestellt ist jeder 4te Windvektor. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als blaue Linie eingezeichnet (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).	33
Abb. 19	Volumenstromdichte (Vektorlänge und -richtung) und Mitteltemperatur (Vektorfarbe) um 23:00 MESZ in den untersten 20 m über Grund. Der rechts oben in der Legende dargestellte Vektor entspricht einer Kaltluftvolumenstromdichte von 40 m ³ /(m s). Dargestellt ist jeder 4te Volumenstromdichtenvektor. Zur besseren Orientierung ist die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein als blaue Linie und die überwärmten Stadtquartiere als rote Linien eingezeichnet (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).	34
Abb. 20	Volumenstromdichte (Vektorlänge und -richtung) und Mitteltemperatur (Vektorfarbe) um 1:00 MESZ in den untersten 20 m über Grund. Der rechts oben in der Legende dargestellte Vektor entspricht einer Kaltluftvolumenstromdichte von 30 m ³ /(m s). Dargestellt ist jeder 4te Volumenstromdichtenvektor. Zur besseren Orientierung ist die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein als blaue Linie und die überwärmten Stadtquartiere als rote Linien eingezeichnet (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).	35
Abb. 21	Vorwärts-Trajektorien (V1) aus den grün umrandeten Gebieten mit hohem Kaltluftbildungspotential für den Zeitraum 22:00 bis 24:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die roten Linien zeigen die Überwärmungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).	38
Abb. 22	Vorwärts-Trajektorien (V2) aus den grün umrandeten Gebieten mit hohem Kaltluftbildungspotential für den Zeitraum 0:00 bis 2:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die roten Linien zeigen die Überwärmungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).	38

Abb. 23	Vorwärts-Trajektorien (V3) aus den grün umrandeten Gebieten mit hohem Kaltluftbildungspotential für den Zeitraum 2:00 bis 4:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die roten Linien zeigen die Überwärmungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).....	39
Abb. 24	Rückwärts-Trajektorien (R1) aus den rot umrandeten Überwärmungsgebieten für den Zeitraum 24:00 bis 22:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die dunkelgrünen Linien zeigen die ausgewählten Kaltluftentstehungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).....	41
Abb. 25	Rückwärts-Trajektorien (R2) aus den rot umrandeten Überwärmungsgebieten für den Zeitraum 2:00 bis 0:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die dunkelgrünen Linien zeigen die ausgewählten Kaltluftentstehungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).....	42
Abb. 26	Rückwärts-Trajektorien (R3) aus den rot umrandeten Überwärmungsgebieten für den Zeitraum 4:00 bis 2:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die dunkelgrünen Linien zeigen die ausgewählten Kaltluftentstehungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).....	42
Abb. 27	Überblick über die verschiedenen Messstandorte und die Messroute im Modellgebiet.....	44
Abb. 28	Foto des DWD Profilmesswagen.....	48
Abb. 29	Übersichtskarte der Messroute inklusive Höhenprofil (je dunkler die lila Farbe umso höher die Geländehöhe). Eingezeichnet sind die nahe der Route gelegenen Messstationen (grüne Quadrate) und der Start und Endpunkt der Route beim Startplatz der Radiosonde (Stern).....	49
Abb. 30	Windrosen der Windmessstationen in der Region Ingelheim am Rhein für alle Tagstunden zwischen 7:00 und 18:50 Uhr MESZ im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 (ausgewertet wurden zwischen 9120 und 9144 10-Minutenwerte).....	53
Abb. 31	Windrosen der Windmessstationen in der Region Ingelheim am Rhein für alle Nachtstunden zwischen 19:00 und 6:50 Uhr MESZ im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 (ausgewertet wurden zwischen 9110 und 9184 10-Minutenwerte).....	54
Abb. 32	Windrosen der Windmessstationen in der Region Ingelheim am Rhein für windschwache Strahlungsnächte im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 (erste Nachthälfte von 23 bis 1 Uhr MESZ, ausgewertet wurden 576 10-Minutenwerte je Station).....	55
Abb. 33	Windrosen der AWS Station Ingelheim Eulenhof für den Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 von 23 bis 1 Uhr MESZ (links 2286 10-Minutenwerte und rechts 576 10-Minutenwerte für WSSN)	57
Abb. 34	Windrosen der AWS Station Ingelheim Eulenhof für den Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 von 2 bis 4 Uhr MESZ (links 2286 10-Minutenwerte und rechts 576 10-Minutenwerte für WSSN)	57

Abb. 35	Vergleich der mittleren Tagesgänge der Temperatur (AWS mit belüfteten und strahlungsgeschütztem PT100 und Thermobutton) während windschwacher Strahlungsnächte an der Station Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz.....	59
Abb. 36	Anzahl Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 in der Region Ingelheim am Rhein (Abkürzungen der Stationen siehe Tabelle 4).....	62
Abb. 37	Anzahl Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 in der Region Ingelheim am Rhein (Abkürzungen der Stationen siehe Tabelle 4).....	63
Abb. 38	Anzahl Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 in der Region Ingelheim am Rhein (Abkürzungen der Stationen siehe Tabelle 4).....	64
Abb. 39	Mittlerer Tagesgang der Lufttemperatur an den 10 temporären DWD Messstandorten (oben belüftetes PT100, unten Thermobutton) in Ingelheim am Rhein während windschwacher Strahlungsnächte für Tage im Juni, Juli und August.....	65
Abb. 40	Gemittelter Tagesgang der Lufttemperatur an den Stadtstationen (rot) und Umlandstationen (blau) und deren Differenz (schwarz, städtische Wärmeinsel) für die WSSN Episode vom 20. Juli bis 24. Juli 2021.	67
Abb. 41	Gemessene Lufttemperaturen in Ingelheim am Rhein während der Profilmessfahrt vom 2. September 2021 um 17 Uhr MESZ	69
Abb. 42	Gemessene Lufttemperaturen in Ingelheim am Rhein während der Profilmessfahrt vom 2. September 2021 um 22:30 Uhr MESZ	70
Abb. 43	Gemessene Lufttemperaturen in Ingelheim am Rhein während der Profilmessfahrt vom 3. September 2021 um 2:20 Uhr MESZ	71
Abb. 44	Vertikalprofile der Temperatur und spezifischen Feuchte für die drei Radiosondenaufstiege am 2. September (rot 16:30 MESZ, blau 22:00 MESZ) und 3. September (grün 2:00 MESZ) 2021.....	73
Abb. 45	Relativer Vergleich der MUKLIMO_3 Lufttemperaturen um 23:00 Uhr MESZ mit den Lufttemperaturen der Profilmessfahrt um 22:30 Uhr MESZ	75
Abb. 46	Relativer Vergleich der MUKLIMO_3 Lufttemperaturen um 3:00 Uhr MESZ mit den Lufttemperaturen der Profilmessfahrt um 2:20 Uhr MESZ	76
Abb. 47	Vorwärts-Trajektorien aus dem grün umrandeten Kaltluftentstehungsgebiet im Selztal für den Zeitraum 22:00 bis 24:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe z über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe über NHN. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und der magentafarbene Punkt markiert den Standort Eulenhof (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).....	77
Abb. A1	DWD Messstation am Fridtjof-Nansen-Platz (FNP) in Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019).....	83
Abb. A2	DWD Messstation am Eulenhof (EUL) Stadt Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)	83
Abb. A3	DWD Thermobutton in der Hauffstraße (HAU) Frei-Weinheim: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019).....	84
Abb. A4	DWD Thermobutton an der Jakobus Kirche (JAK) in Heidesheim: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)	84

Abb. A5	DWD Thermobutton Neue Kirchstraße (NKI) in Heidesheim: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019).....	85
Abb. A6	DWD Thermobutton Danziger Straße (DAN) in Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)	85
Abb. A7	DWD Thermobutton Lehfeldstraße (LEH) in Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)	86
Abb. A8	DWD Thermobutton Großmarkt (GRO) in Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019).....	86
Abb. A9	DWD Thermobutton Oberer Zwerchweg (ZWE) in Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019).....	87
Abb. A10	DWD Thermobutton Kreuzstraße (KRE) in Großwinterheim: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019).....	87
Abb. A11	Wetterkarte vom 2.9.2021 0 Uhr (UTC) mit Stationswetterdaten und der Bodendruckverteilung (Isobaren) sowie der eingezeichneten Fronten.	88
Abb. A12	Topografischer Überblick über die Region Ingelheim am Rhein.	89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zusammenhang zwischen Gefühlter Temperatur, thermischem Empfinden und Belastungsstufen (VDI 2008).....	19
Tabelle 2	Matrix der Trajektorien Konnektivität zwischen Kaltluftbildungsgebieten (blaue Spalten) und abendlichen Überwärmungsgebieten (rote Zeilen) aus Analysen der MUKLIMO_3 Fallstudie für Ingelheim am Rhein.....	43
Tabelle 3	Tabelle der rheinland-pfälzischen agrarmeteorologischen Stationen in der Umgebung von Ingelheim am Rhein.....	45
Tabelle 4	Tabelle der DWD Messstandorte.....	46
Tabelle 5	Übersicht der Profilmessfahrten	49
Tabelle 6	Übersicht über die Radiosondenaufstiege	50
Tabelle 7	Mittleres Tagesminima und mittlere Abkühlung der Lufttemperatur zwischen 21 Uhr und 4 Uhr für den Zeitraum Juni, Juli und August 2021 in Ingelheim und Umgebung.....	60
Tabelle A1	MUKLIMO_3 Modellparameter für Landbedeckungsklassen mit Bebauung (hierbei ist ID die Klassennummer, N die Anzahl der Gitterzellen mit dieser Landbedeckung, g_b der Gebäudegrundflächenanteil, h_b die mittlere Gebäudehöhe in m, w_b der Wandflächenindex und v der Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden).....	82

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AWS	Automatische Wetterstation
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
CLC	Corine Land Cover
CLMS	Copernicus Land Monitoring Service
DLR RLP	Dienstleistungszentren Ländlicher Raum Rheinland-Pfalz
DWD	Deutscher Wetterdienst
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy (Arbeitsgruppe der europäischen Öl- und Gaserkundungsunternehmen die das System weltweit eindeutiger Schlüsselnummern geodätischer Datensätze (EPSG-Codes) entwickelt hat)
ETRS89	Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (dreidimensionales geodätisches Referenzsystem)
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GPS	Global Positioning System (Globales Positionsbestimmungs-system)
GUAMO	Nationales Copernicus-Vorhaben „GMES Urban Atlas für die Stadtklimamodellierung“
JJA	Sommermonate Juni, Juli und August
KLIMPRAX	Projekt KLIMawandel in der PRAXis
KlimPraxIng	Projekt Klimawandel in der Praxis am Beispiel der Mittelstadt Ingelheim am Rhein
LoD1	3D-Gebäudemodell im Level of Detail 1 (Klötzchenmodell)
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit
MUKLIMO_3	3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell
NHN	Normalhöhennull
PT100	Widerstandstemperaturfühler mit Pt100-Sensor (Platin-Messwiderstand)
UTM	Universal Transverse Mercator Koordinatensystem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WAI	Wandflächenindex
WMO	World Meteorological Organization (Weltorganisation für Meteorologie)
WSSN	Windschwache Strahlungsnacht

1. Einleitung und Zielstellung

Zur Unterstützung des rheinland-pfälzischen Mittelzentrums Ingelheim am Rhein mit meteorologischen Grundlagendaten für die Erarbeitung einer Klimaanpassungsstrategie, führte das Zentrale Klimabüro des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit dem mikroskaligen urbanen Klimamodell MUKLIMO_3 (SIEVERS, 2016) Computersimulationen der Lufttemperatur- und Windverhältnisse eines idealisierten Sommertages mit windschwacher und wolkenfreier Hochdruckwetterlage durch. Für diese Fallstudie wurde anschließend mit dem Klima-Michel Modell die Gefühlte Temperatur berechnet, ein Maß für das thermische Empfinden des Menschen. Die Modellergebnisse liegen in Form von Rasterdaten mit einer horizontalen Gitterweite von 100 m vor. Sie dienen der Lokalisierung von Stadtquartieren mit starker Überwärmung gegenüber der Umgebung, auch städtische Wärmeinseln genannt, (Abbildung 1) und der Analyse der nächtlichen Kaltluftbildungsgebiete, Kaltluftströmungen und ihrer Belüftungswirkung für das Stadtgebiet.

Zusätzlich wurden Wind- und Temperaturmessungen während einer 4-monatigen Messkampagne im Zeitraum Ende Mai bis Ende September 2021 durchgeführt. Die Messergebnisse dienen sowohl der Erfassung der städtischen Wärmeinsel, der Lokalwinde und der Evaluierung der Modellergebnisse.

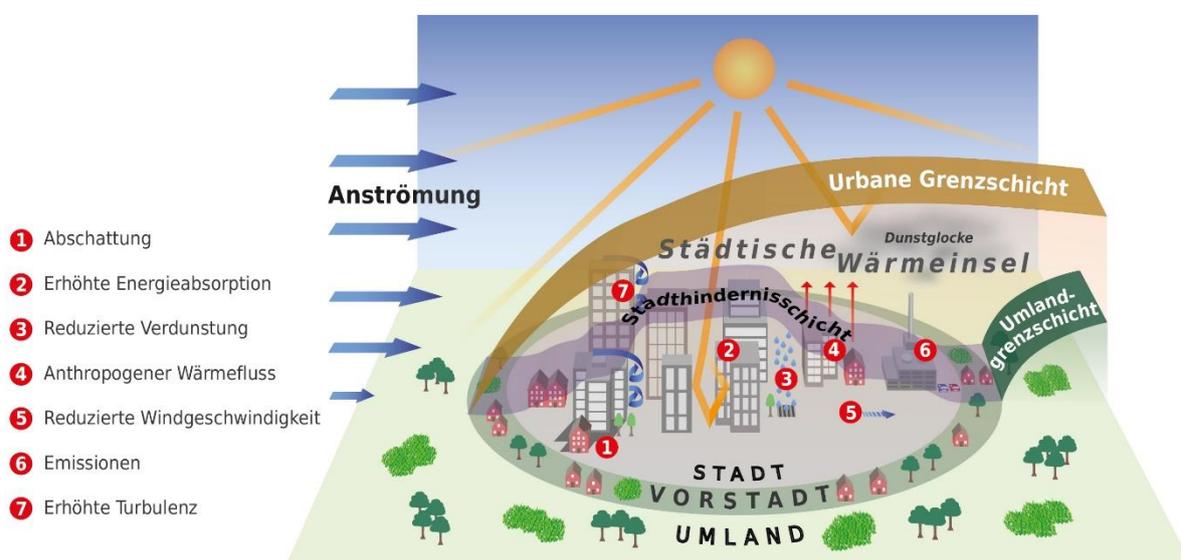


Abb. 1 Schematische Darstellung einer städtischen Wärmeinsel

Dieser Bericht beschreibt die Modellsimulationen und Messungen und präsentiert die Ergebnisse zur Identifizierung städtischer Überwärmungsgebiete und nächtlicher Kaltluftentstehungsgebiete im Umland. Zur Ermittlung der siedlungsrelevanten

Kaltluftströmungen werden die Kaltluftvolumenströme und Kaltluftverlagerungspfade (Kaltlufttrajektorien) berechnet und visualisiert.

2. Modellsimulationen

2.1 Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3

Das DWD Stadtklimamodell MUKLIMO_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) wurde speziell zur Untersuchung stadtklimatologischer und geländeklimatologischer Fragestellungen entwickelt (SIEVERS und ZDUNKOWSKI, 1986; SIEVERS, 1990, 1995, 2012 und 2016). Basierend auf den Prinzipien der Massenerhaltung, Energieerhaltung und Impulserhaltung berechnet MUKLIMO_3 auf einem 3-dimensionalen Rechengitter (3-dimensionales Modell) den Tagesgang des Windes, der Lufttemperatur und -feuchtigkeit, der solaren und thermischen Strahlung und der Temperatur und des Feuchtegehalts im Erdboden.

Die räumliche Auflösung des Modells liegt typischerweise zwischen wenigen Metern und mehreren hundert Metern. Die Rechengitterweiten können im Modellgebiet horizontal und vertikal variiert werden, wobei typischerweise in Bodennähe und in dem im Untersuchungsmittelpunkt stehenden Teil des Modellgebiets die höchste Auflösung gewählt wird. Die für Modellsimulationen benötigten Anfangs- und Randwerte für das Modellgebiet werden durch eine zusätzlich ablaufende 1-dimensionale MUKLIMO_3 Simulation (auch 1-dimensionales Vorschaltmodell genannt) mit ländlicher Landnutzung bestimmt. Simulationen mit MUKLIMO_3 werden meist für Zeiträume zwischen mehreren Stunden und einigen Tagen durchgeführt. Da die Modellphysik von MUKLIMO_3 keine Niederschlagsbildung enthält, kann das Modell nur für niederschlagsfreie Situationen eingesetzt werden. Neben den meteorologischen Eingangsgrößen benötigt das Modell für jede Gitterzelle die Geländehöhe und Informationen zur Art der Landbedeckung und deren physikalischen Eigenschaften.

Die Berechnung der Lufttemperatur in bebauten Gebieten berücksichtigt zusätzlich zu den im Umland relevanten Prozessen die Reflexion und Absorption von Strahlung durch die Gebäudeoberflächen (SIEVERS und FRÜH, 2012) sowie die Speicherung von Wärme in den Gebäuden. Die Beschreibung des Wärme- und Feuchtehaushalts des Bodens erfolgt nach der Methode von SIEVERS et al. (1983). Das Vegetationsmodell basiert auf einem erweiterten Ansatz nach SIEBERT et al. (1992). Weitere Details zum Modell MUKLIMO_3 finden sich in FRÜH et al. (2011) und NOPPEL (2017).

2.2 Modellgebiet und Eingangsdaten

Um alle wichtigen Kaltlufteinzugsgebiete zu erfassen, wurde ein auf Ingelheim am Rhein zugeschnittenes 33 km x 30 km großes Modellgebiet für die Simulation mit MUKLIMO_3 ausgewählt (Abbildung 2). Das Modellgebiet und alle Eingangsdaten beziehen sich auf das Koordinatensystem ETRS89 UTM32N (EPSG = 25832). Die Südwestecke des Modellgebietes liegt bei 412000 Ost und 5524300 West. Für die Stadtklimaanalyse von Ingelheim am Rhein wurde eine Modellrechnung mit einer konstanten Gitterweite von 100 m durchgeführt.



Abb. 2 Topografische Karte des MUKLIMO_3 Modellgebietes Ingelheim am Rhein mit der lila umrandeten Stadtgrenze.

In vertikaler Richtung hat das orthogonale Gitter ausgehend von der niedrigsten Geländehöhe im Modellgebiet von ca. 70 m über NHN bis zu 220 m über Normalhöhennull (NHN) eine Gitterweite von 10 m. Zwischen 220 m über NHN und der Obergrenze des 3-dimensionalen

Modells in ca. 930 m über NHN nimmt die vertikale Gitterweite schrittweise von 10 m auf 80 m zu. Darüber beträgt die vertikale Gitterweite 100 m, sodass das 1-dimensionale Vorschaltmodell von MUKLIMO_3 bis in ca. 1930 m über NHN reicht.

Für die Darstellung der städtischen Strukturen im Stadtklimamodell MUKLIMO_3 werden sowohl die Art der Landbedeckung, als auch verschiedene Parameter zur Beschreibung der städtischen Eigenschaften auf dem Modellgitter benötigt. Im Copernicus-Vorhaben „GMES Urban Atlas für die Stadtklimamodellierung“ (kurz GUAMO) hat der DWD eine Software entwickelt, die basierend auf Produkten des Copernicus Land Monitoring Services (CLMS) und des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) teilautomatisiert die Eingangsdaten für das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 erzeugt (Abbildung 3).

Zur Ableitung der von MUKLIMO_3 benötigten klassenbasierten Landbedeckung wurde der Copernicus Urban Atlas 2012 verwendet. In Gebieten wo keine Abdeckung durch den Urban Atlas gegeben ist, wurde auf die Copernicus Corine Land Cover (CLC) Daten 2012 zurückgegriffen. Die Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. 4 A zeigt die räumliche Verteilung der Landbedeckungsklassen für das Modellgebiet Ingelheim am Rhein. Das Raster der Geländehöhe des Modellgebietes ist in Abbildung 4 B dargestellt. Einige von MUKLIMO_3 benötigte, physikalische Parameter der Landbedeckung liegen als Mittelwerte je Landbedeckungsklasse vor.

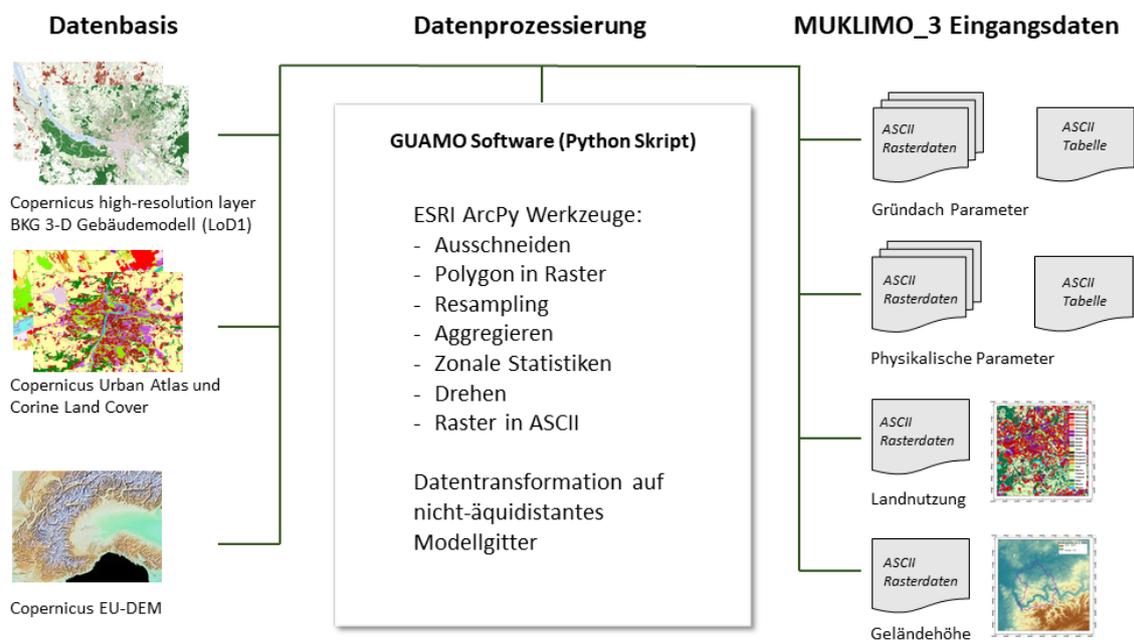


Abb. 3 Schematischer Ablauf der Aufbereitung der Geodaten. Die verschiedenen Eingangsdaten werden auf das gewünschte MUKLIMO_3 Rechengitter und Format transformiert (erweitert nach HEENE et al. 2018, Quelle: Copernicus CLMS).

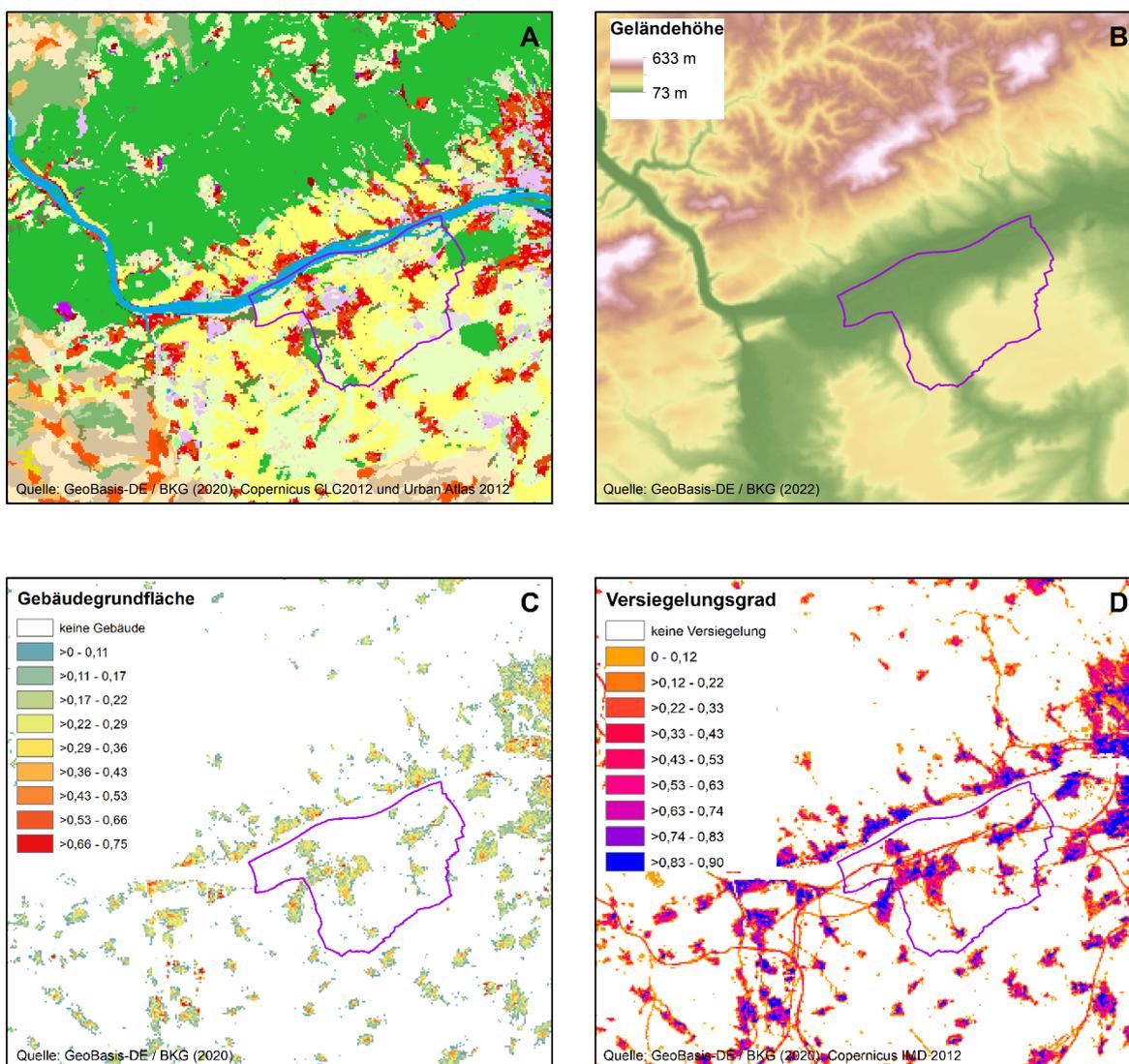


Abb. 4 MUKLIMO_3 Eingangsdaten: A) Landnutzung (rot und lila städtische Landbedeckung; grün, gelb und braun Ackerflächen und Wiesen; dunkelgrün Wälder; blau Wasserflächen), B) Geländehöhe, C) Gebäudegrundflächenanteil und D) Versiegelungsgrad ohne Gebäude. Die lila Linie kennzeichnet das Stadtgebiet Ingelheim am Rhein.

Andere Parameter können räumlich detaillierter in Form von Rasterdaten für jede Gitterzelle des Modellgebietes vorgegeben werden, zum Beispiel der Grundflächenanteil der Gebäude, die mittlere Gebäudehöhe und die Gebäudeform basierend auf dem Wandflächenindex. Alle drei Parameter werden mit Hilfe des 3D-Gebäudemodells level of detail 1 (LoD1) des BKG bestimmt. Der Versiegelungsanteil ohne Gebäude und der Baumbestandsanteil werden auf Basis der Copernicus High Resolution Layer „Versiegelungsgrad“ und „Baumbedeckung“ abgeleitet.

Für Landnutzungsclassen mit Bebauungsanteil enthält die Tabelle A1 im Berichtanhang eine Auflistung der über das Gesamtmodellgebiet gemittelten Parameter des Gebäudegrund-

flächenanteils, der Gebäudehöhe, des Versiegelungsgrads des Flächenanteils zwischen den Gebäuden und des Wandflächenindex. Die räumliche Verteilung der Gebäudeparameter belegt, dass im Innenstadtbereich (z. B. Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim) sowie in einigen Gewerbegebieten (z. B. Böhringer in Ingelheim-West) die Bebauungsdichte und der Versiegelungsgrad ohne Gebäude besonders hoch ist (Abbildung 4 C und 4 D).

2.3 MUKLIMO_3 Modellkonfiguration

Für die stadtklimatische Fallstudie zur Identifizierung der Temperaturverhältnisse und der nächtlichen Kaltluft in Ingelheim am Rhein wurde eine sommerliche Situation mit hohen Lufttemperaturen gewählt. Der MUKLIMO_3 Modellauf wurde für den Zeitraum vom 16. Juli 10:00 Uhr bis 17. Juli 9:00 Uhr Mitteleuropäischer Sommerzeit (MESZ) unter idealisierten, fast wolkenlosen (1/8 Bedeckungsgrad) Wetterbedingungen durchgeführt. Das 1-dimensionale MUKLIMO_3 Vorschaltmodell für die Bereitstellung von Initialisierungs- und Randwerten des 3-dimensionalen Modells wurde mit 24 Stunden Vorlaufzeit gestartet. Es wurde ein trockener Boden (Bodenfeuchtestufe 2 von 6, SIEVERS, 2016) und eine konstante Gewässertemperatur von 20 °C vorgegeben.

Neben Hochdruckwetterlagen mit großräumiger Strömung aus südwestlicher bis westlicher Richtung treten in der Region auch Hochdruckwetterlagen mit großräumiger Strömung aus östlicher bis südöstlicher Richtung auf (FRÜH et al. 2011). Wie im Projekt KLIMPRAX (NOPPEL, 2017, SCHAU-NOPPEL et al. 2020) wurde auch für die Modellrechnung der Stadt Ingelheim am Rhein das 1-dimensionale Vorschaltmodell mit einer schwachen westsüdwestlichen (240°) Anströmung von 1,0 m/s in 100 m über Grund initialisiert. Die gewählte westsüdwestliche Anströmung folgt damit den Windrichtungssektoren die an der Station Mainz-Finthen (Messung 10 m über Grund) im Sommerhalbjahr (April – September) im Zeitraum 1979 bis 1988 oft mit schwachwindigen Situationen einhergingen (Abbildung 5).

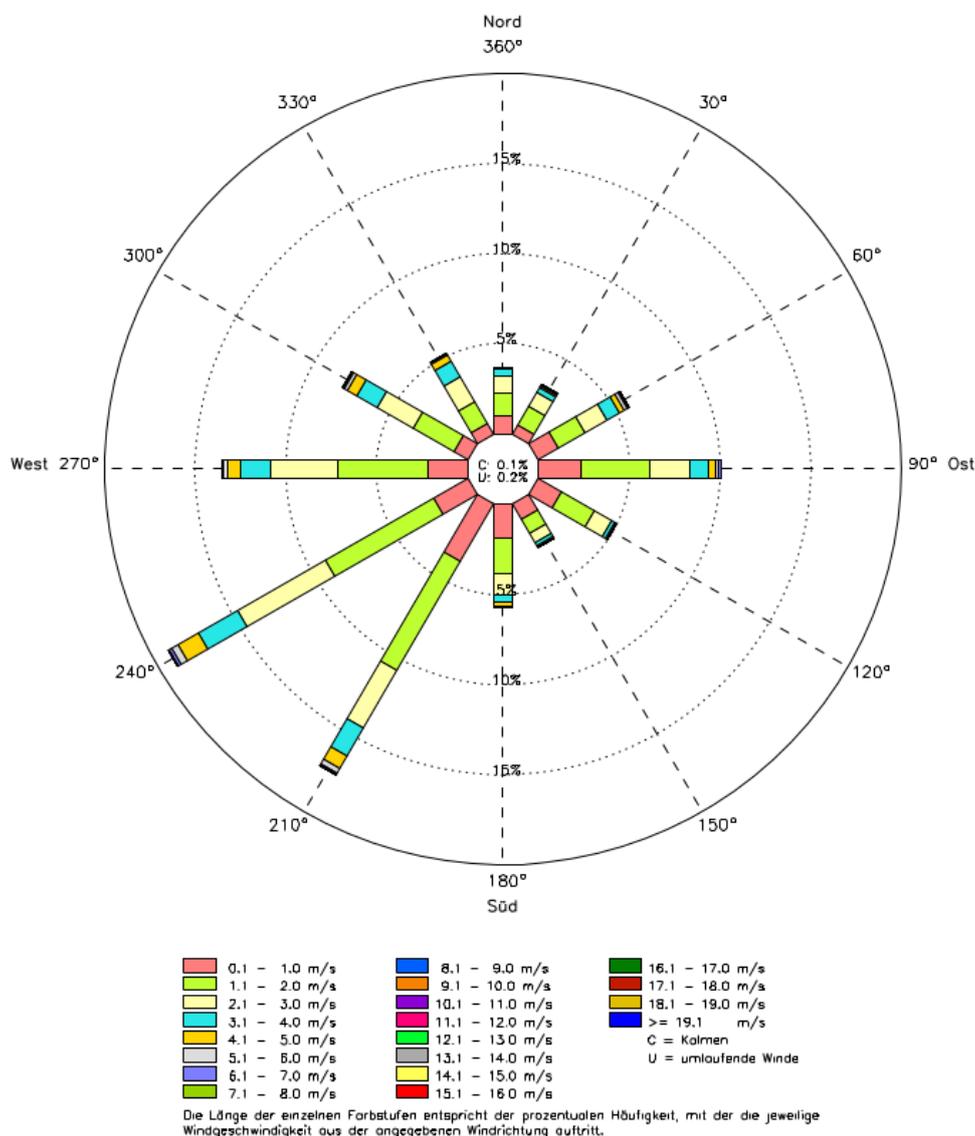


Abb. 5 Stärkewindrose der Station Mainz-Finthen für die Nachstunden während des Sommerhalbjahres (April bis September) im Zeitraum 1979 bis 1988

2.4 Das Klima-Michel Modell

Der gesunde Mensch besitzt eine außerordentlich große Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche atmosphärische Bedingungen (Akklimation). Während vom gesunden Organismus über autonome Regulationen die Anpassungsleistungen meist unbemerkt erbracht werden, wird das Anpassungsvermögen von empfindlichen Personen, älteren und kranken Menschen, Schwangeren und Kindern meist überfordert. Als Gradmesser für den allgemeinen Gesundheitszustand treten Beschwerden auf. Insbesondere im Bereich des Herz-Kreislaufsystems und der Atemwege werden bei entsprechender Prädisposition Erkrankungen ausgelöst oder verstärkt. Epidemiologische Untersuchungen zeigen entsprechende Wirkungen extremer Bedingungen (Kälte, Hitze, Luftverschmutzung, aber auch Wetterwechsel) auf

Morbidität und Mortalität. Hohe Gefühlte Temperaturen also „Wärmebelastung“ bedeuten für den Organismus starken Stress (Tabelle 1). Kühlere Bedingungen (aber nicht zu kalte) dagegen fordern den Organismus im Sinne eines Reizes, der die Regulationsfähigkeit des Organismus trainiert. Diese physiologische Anpassung wird durch geeignete Verhaltensweisen unterstützt (z. B. Anpassung der Kleidung oder Wahl des Aufenthaltsortes), womit sich Kältereize häufig auf ein „gesundes“ Maß verringern lassen, während bei Wärmebelastung die Anpassungsmöglichkeiten eher begrenzt sind.

Aufbauend auf den MUKLIMO_3 Ergebnissen wird eine biometeorologische Bewertung bezüglich der thermischen Komponente des Bioklimas durchgeführt. Diese basiert auf einer thermophysiologisch relevanten Analyse der MUKLIMO_3 Modellergebnisse mit dem Klima-Michel-Modell (VDI 2008). Es verknüpft alle für den menschlichen Wärmehaushalt relevanten Größen (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Strahlung) und liefert eine Aussage über das durchschnittliche subjektive Empfinden des Menschen (Gefühlte Temperatur). Der Name „Michel“ weist auf den Durchschnittsmenschen hin (hier: männlich, 35 Jahre, 1.75 m groß, 75 kg schwer).

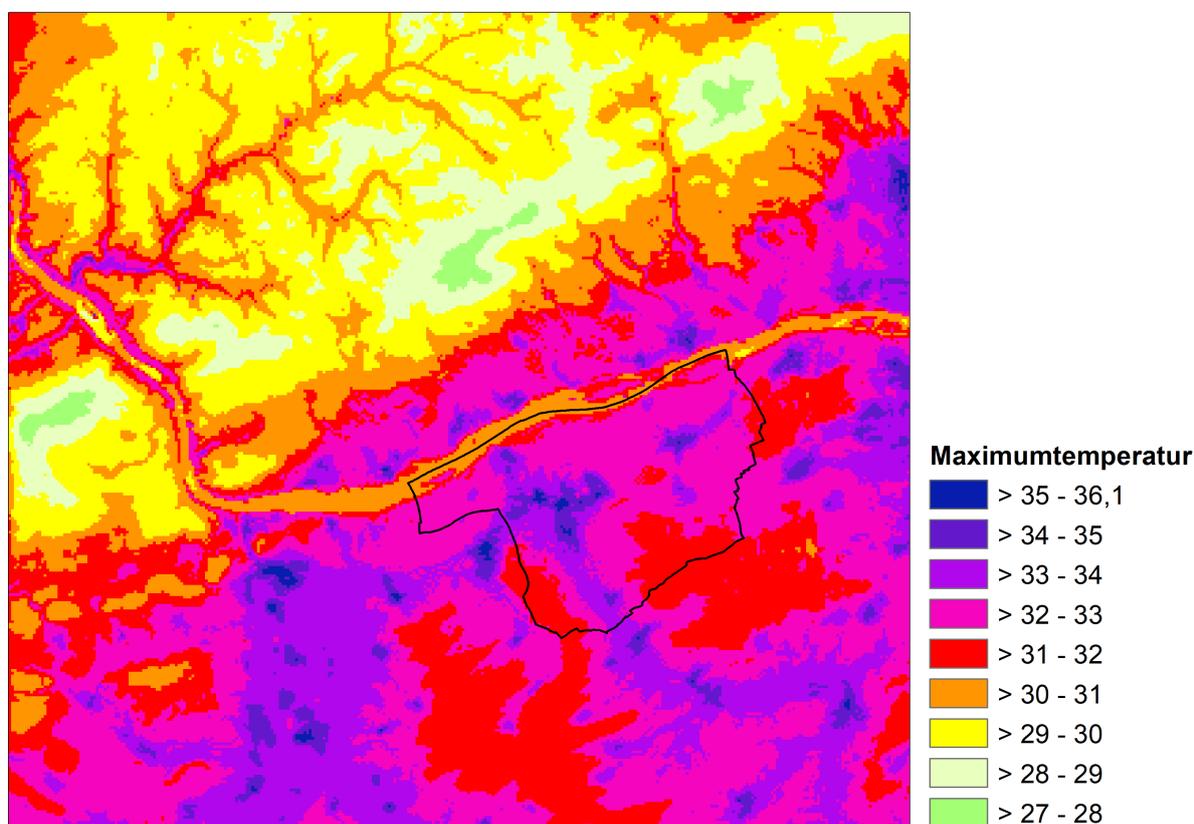
Tabelle 1 Zusammenhang zwischen Gefühlter Temperatur, thermischem Empfinden und Belastungsstufen (VDI 2008)

Gefühlte Temperatur (°C)	Thermisches Empfinden	Belastungsstufe
unter -39	sehr kalt	extreme Kältebelastung
-39 bis -26	kalt	starke Kältebelastung
-26 bis -13	kühl	mäßige Kältebelastung
-13 bis 0	leicht kühl	schwache Kältebelastung
0 bis 20	behaglich	keine Belastung
20 bis 26	leicht warm	schwache Wärmebelastung
26 bis 32	warm	mäßige Wärmebelastung
32 bis 38	heiß	starke Wärmebelastung
über 38	sehr heiß	extreme Wärmebelastung

3. Ergebnisse der Modellierung

3.1 Modellierte Lufttemperatur und Gefühlte Temperatur

Ein Vergleich der simulierten Tagesmaximum- und Tagesminimumwerte der Lufttemperatur in 2 m über Grund zeigt eine ausgeprägte Tagesamplitude für die ausgewählte sommerliche Fallstudie. Tagsüber werden bei der Fallstudie, mit Ausnahme der kühleren Höhenlagen des Rheingaugebirges (westlicher Abschnitt des Hohen Taunus), überall 30 °C überschritten (Abbildung 6), womit laut Definition ein „Heißer Tag“ erreicht wird. Die bebauten Gebiete zeigen überall im Modellgebiet eine leicht erhöhte Lufttemperatur (1-2 Kelvin) gegenüber dem direkten unbebauten Umland.

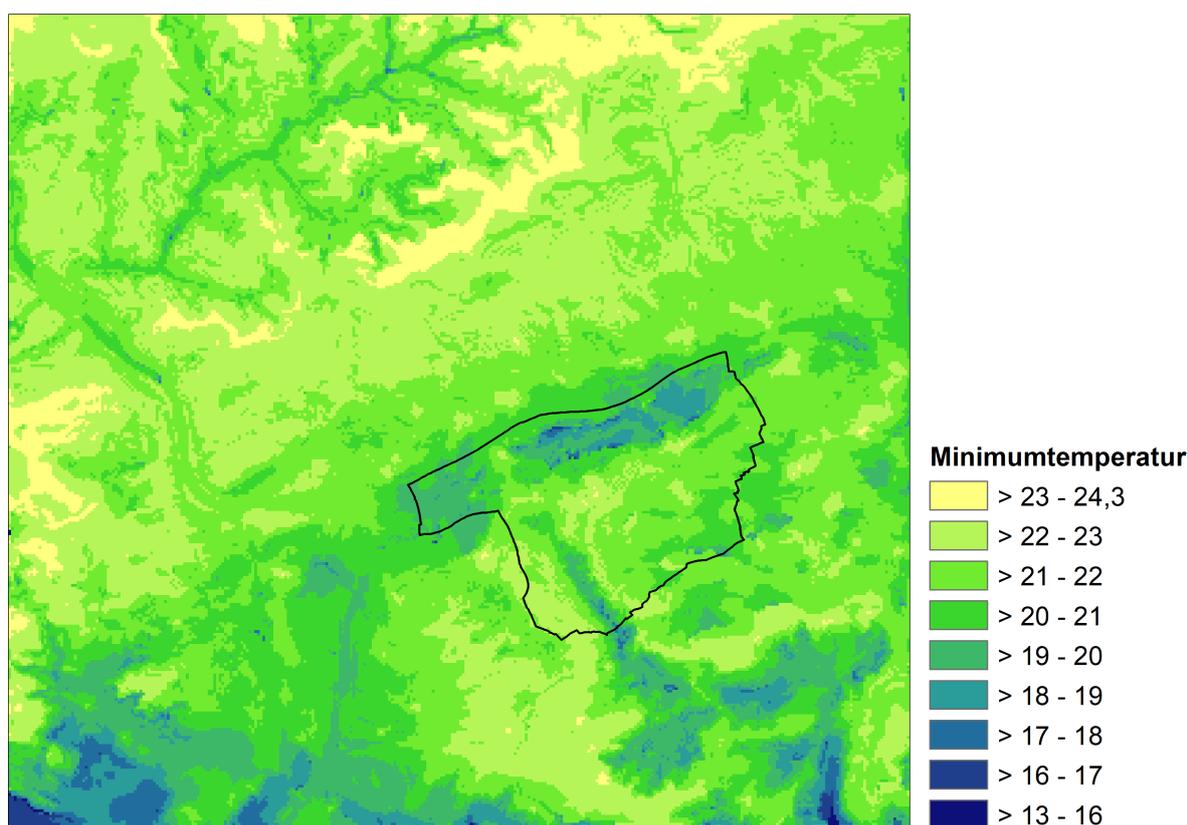


Quelle: GeoBasis-DE / BKG (2022)

Abb. 6 Tagesmaximumtemperatur (°C) in 2 m über Grund. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.

Die Minimumtemperatur sinkt in weiten Teilen des Modellgebietes nicht unter 20 °C (Abbildung 7), dies entspricht einer Tropennacht (Minimumtemperaturen ≥ 20 °C). In den Tallagen des Rheins bei Ingelheim am Rhein, in weiten Teilen des Seltzals und in einigen Bereichen des Talverlaufs der unteren Nahe werden deutlich niedrigere Lufttemperaturen zwischen 17 °C bis 20 °C simuliert. Auch bei der Minimumtemperatur treten die bebauten

Gebiete durch eine Überwärmung (1 Kelvin) zur direkten unbebauten Umgebung in Erscheinung (zum Beispiel Nieder-Ingelheim). Die Temperaturverhältnisse werden dennoch sehr stark durch die lokalen topografischen Gegebenheiten bestimmt. So findet man z. B. die höchsten Minimumtemperaturen von über 23°C vorwiegend auf den Hängen des Rheingaugebirges (sogenannte „warme Hangzone“).



Quelle: GeoBasis-DE / BKG (2022)

Abb. 7 Minimumtemperatur (°C) in 2 m über Grund. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.

Die Abbildungen 8 bis 10 zeigen für ausgewählte Zeitpunkte (17 Uhr MESZ, 22 Uhr MESZ und 2 Uhr MESZ) die simulierte Temperaturverteilung im Modellgebiet. Um überwärmte Gebiete im gesamten Untersuchungsgebiet anhand der simulierten Lufttemperatur und Gefühlten Temperatur zu den verschiedenen Zeitpunkten auszumachen, wurde mit dem Geografischen Informationssystem ArcGIS mit dem Werkzeug Hot-Spot-Analyse (Getis-Ord Gi*-Statistik) statistisch signifikante Hot-Spot identifiziert. Ein statistisch signifikanter Hot-Spot ist ein Feature mit einem hohen Wert (z. B. ein Ort mit hoher Temperatur), das darüber hinaus von anderen Features mit hohen Werten umgeben ist. Es werden die Umrisse der Hot-Spot Gebiete mit einem Konfidenzniveau von 95 % und 99 % in den Karten der Lufttemperatur und Gefühlten Temperatur als Kontourlinien angezeigt.

Am Nachmittag um 17 Uhr MESZ, das heißt etwa zur Zeit des Tagesmaximums der Lufttemperatur, zeigt sich ein starker Kontrast zwischen den heißen Tallagen des Rheins, der unteren Nahe und des Selztals, sowie die überwärmten Siedlungsgebiete und den kühleren teils bewaldeten Kuppenlagen des Rheingaugebirges (Abbildung 8). Zu dieser Uhrzeit treten die Hot-Spots nur in den Tallagen im südlichen Modellgebiet auf. Für Ingelheim am Rhein sind es die Stadtteile Ober-Ingelheim, Nieder-Ingelheim, Großwinternheim im Selztal und Heidesheim, die die größte Überwärmung aufgrund der Lufttemperatur zeigen. Vergleicht man die modellierte Lufttemperatur zwischen dem Zentrum von Ingelheim am Rhein (Kapitel 4.2, Standort Fridtjof-Nansen-Platz) mit dem Umland im Rheintal (Kapitel 4.1, Standorte Bingen-Gaulsheim und Heidenfahrt) so erhält man eine Temperaturdifferenz von 2,1 Kelvin bis 2,5 Kelvin.

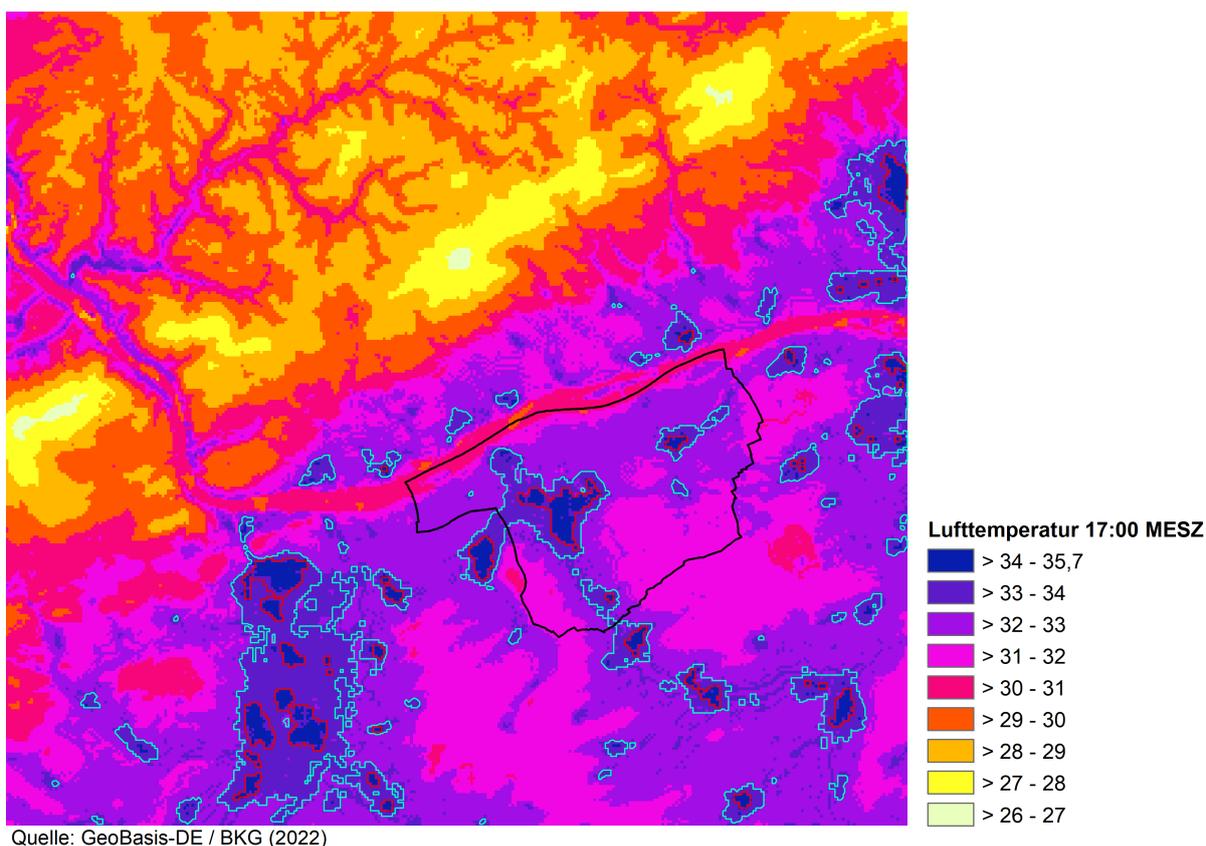


Abb. 8 Lufttemperatur in 5 m über Grund um 17:00 MESZ. Die Kontourlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.

Nach Sonnenuntergang kühlt sich das ländliche Umland etwas schneller ab als die Siedlungsgebiete und die städtische Wärmeinsel erreicht zu Beginn der Nacht ihre höchsten Werte. Die simulierte städtische Wärmeinselintensität um 22:00 MESZ (Abbildung 9) erreicht für den Fridtjof-Nansen-Platz Werte zwischen 2 Kelvin (Vergleich mit Bingen-Gaulsheim) und

4,6 Kelvin (Vergleich mit Heidenfahrt). Die Stadtteile Frei-Weinheim, Ober-Ingelheim, Ingelheim-West, Nieder-Ingelheim, Großwinternheim und Heidesheim (Abbildung A12) zeigen ebenfalls eine Überwärmung im Vergleich zum unbebauten Umland.

Bis 2 Uhr MESZ kühlt sich die Lufttemperatur im Modellgebiet weiter ab. Eine städtische Wärmeinsel ist anhand der Hot-Spot Analyse noch für Teile von Ober-Ingelheim, Nieder-Ingelheim und Heidesheim erkennbar (Abbildung 10). Die lokale Topografie und dadurch entstehende Kaltluftabflüsse und die Bereiche, wo sich die Kaltluft sammelt, haben starken Einfluss auf die Lufttemperaturverteilung und führen dazu, dass die Temperatur im Tal besonders stark absinkt. Dennoch kann für den Fridtjof-Nansen-Platz eine städtische Wärmeinsel zwischen 0,8 Kelvin (Vergleich mit Bingen-Gaulsheim) und 4,1 Kelvin (Vergleich mit Heidenfahrt) festgestellt werden.

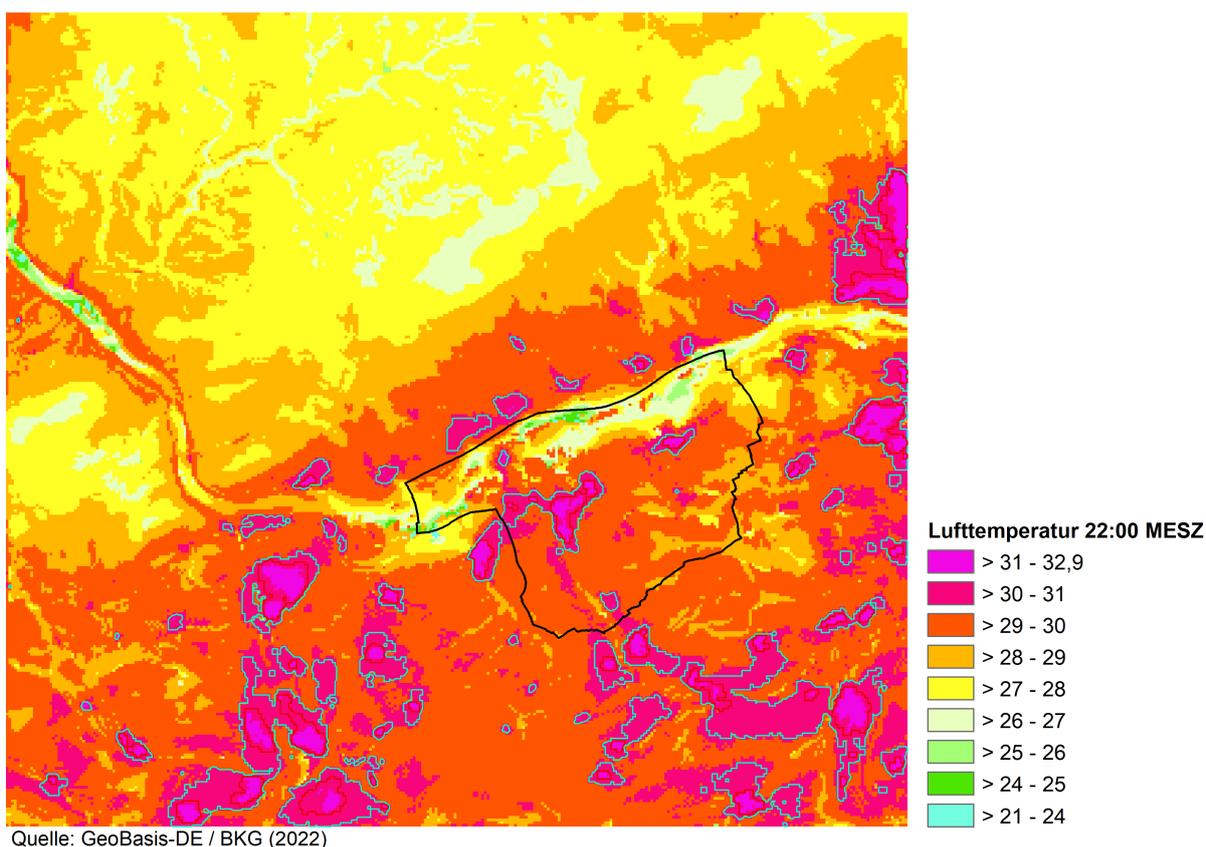


Abb. 9 Lufttemperatur in 5 m über Grund um 22:00 MESZ. Die Kontourlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.

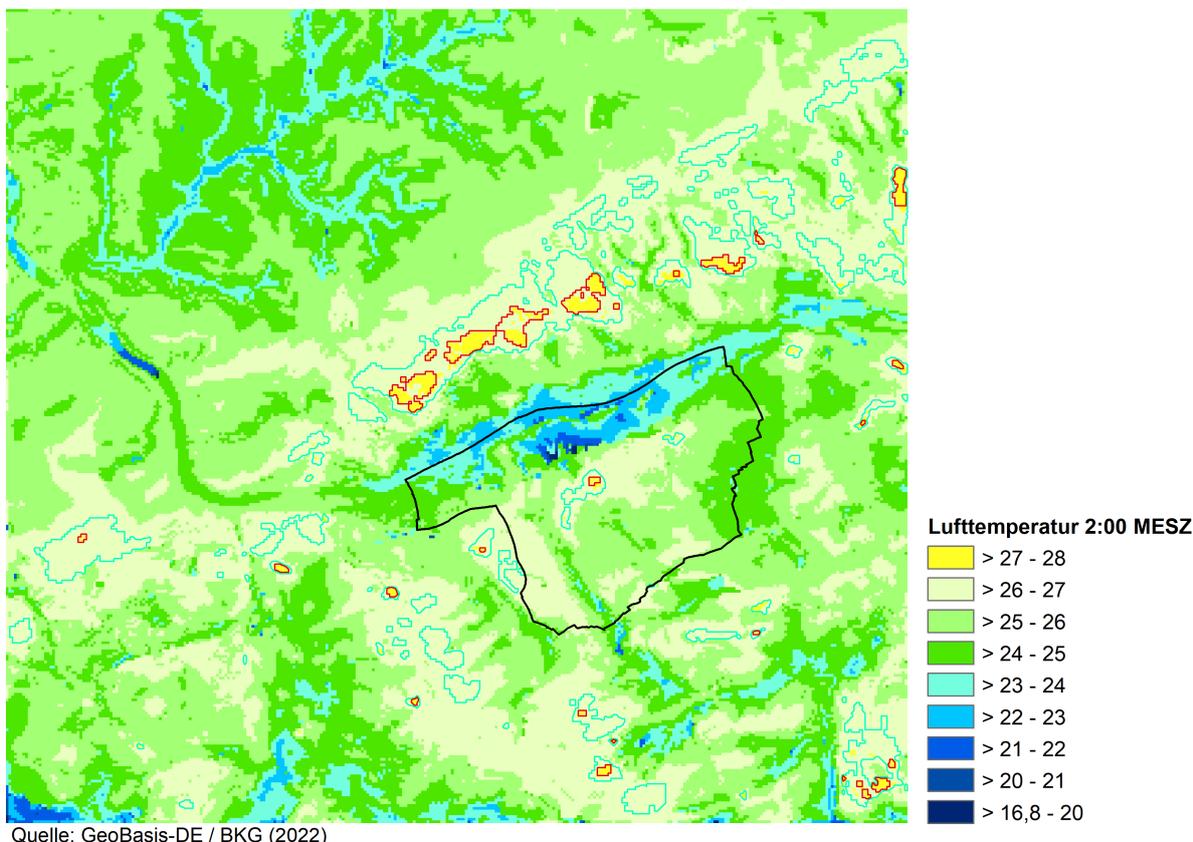
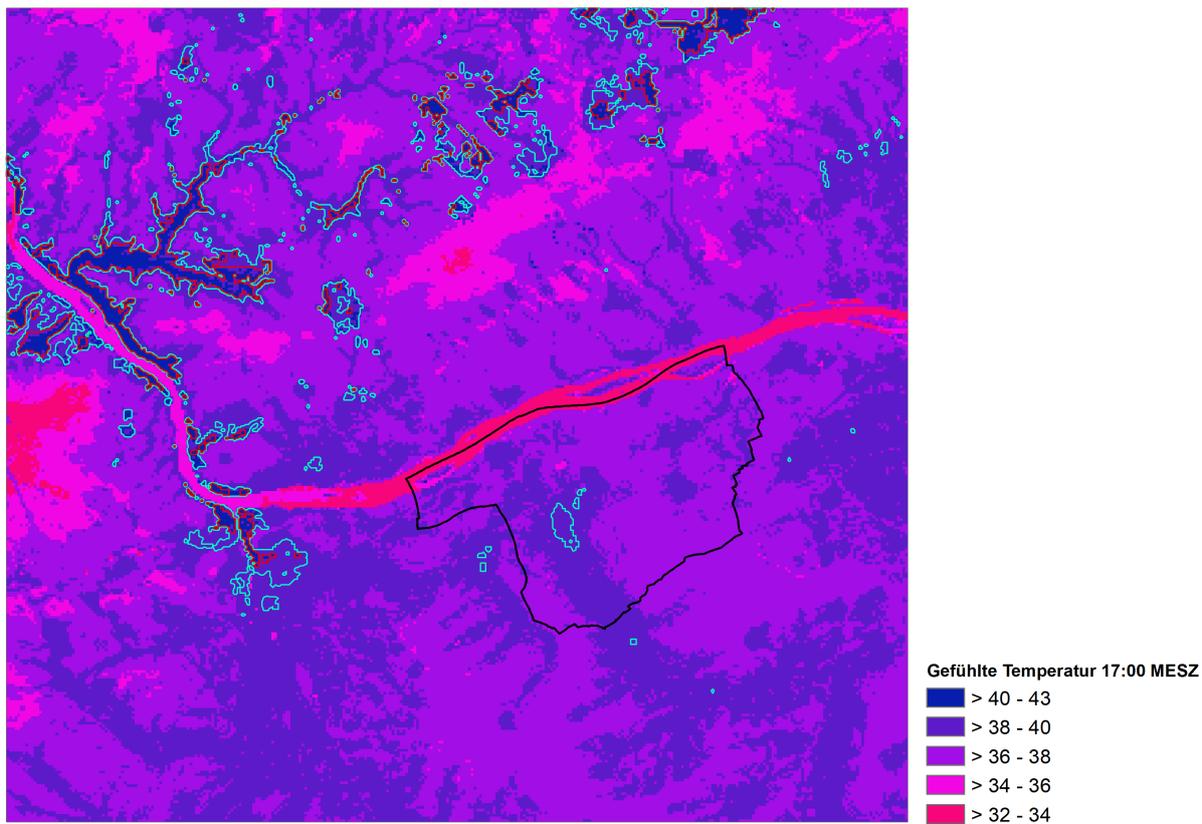


Abb. 10 Lufttemperatur in 5 m über Grund um 2:00 MESZ. Die Konturlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.

Die Gefühlte Temperatur zum Zeitpunkt 17 Uhr MESZ liegt im gesamten Modellgebiet bei Werten größer 32 °C und damit bei einer starken Wärmebelastung (Abbildung 11). Insbesondere in den Tallagen im südlichen Modellgebiet werden auch großflächig Werte der Gefühlten Temperatur erreicht, die die 38 °C Marke und damit die extreme Wärmebelastung überschreiten. Dies ist für unbebaute und bebaute Siedlungsgebiete der Fall.

Um 22 Uhr MESZ werden die höchsten Werte der Gefühlten Temperatur (> 30 °C bis 34 °C) in den bebauten Stadtregionen von Wiesbaden und entlang des nördlichen Rheinufer, im Wispertal des Rheingaugebirges und in Teilen des unteren Nahetals simuliert. Eine mäßige Wärmebelastung ist in großen Teilen des Modellgebietes feststellbar (Abbildung 12). Insbesondere entlang des Rheins bei Ingelheim am Rhein und auf den Höhenlagen des Mainzer Berges und Westerberges (Abbildung A12) werden auch Gefühlte Temperaturen unter 26 °C simuliert (schwache Wärmebelastung). Die Stadtteile von Ingelheim am Rhein zeigen Wärmebelastungen von 26 bis 30 °C.



Quelle: GeoBasis-DE / BKG (2022)

Abb. 11 Darstellung der Gefühlten Temperatur um 17:00 MESZ. Die Konturlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.

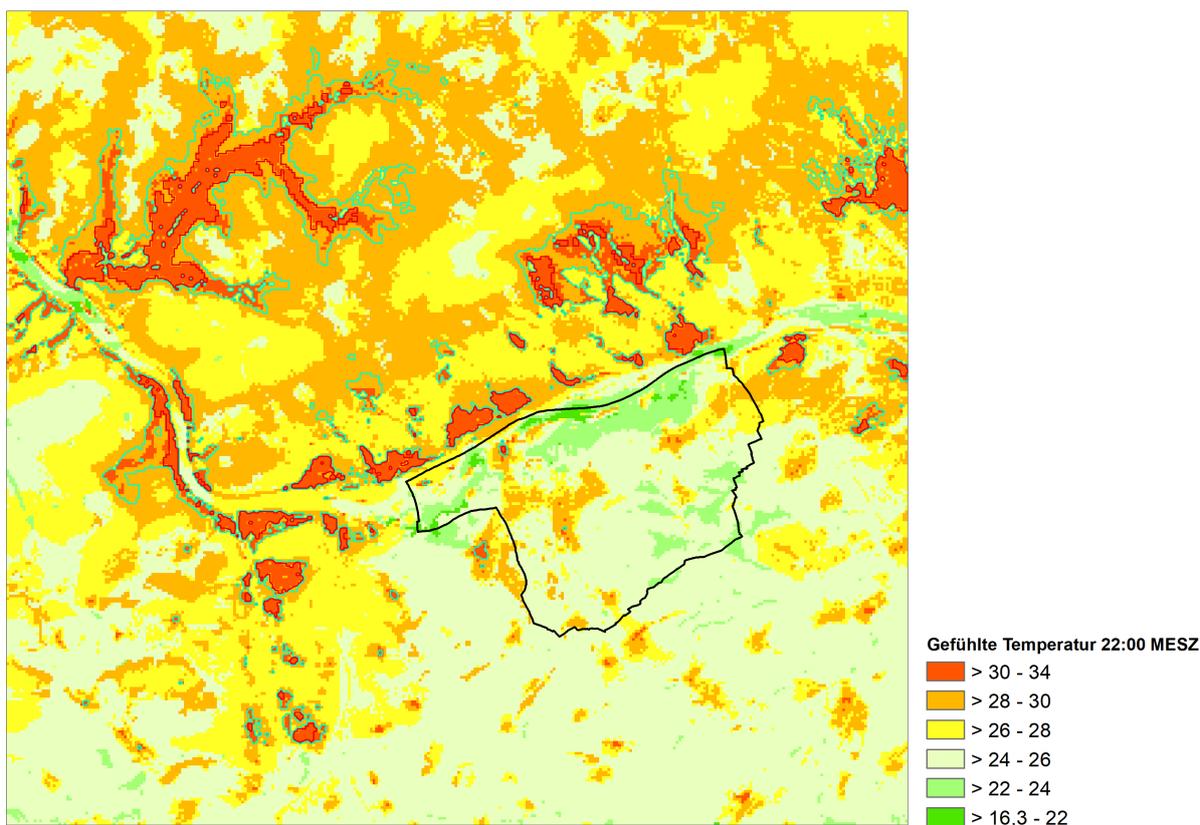


Abb. 12 Darstellung der Gefühlten Temperatur um 22:00 MESZ. Die Konturlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.

Bis 2 Uhr MESZ sinkt auch die Gefühlte Temperatur merklich ab. Gefühlte Temperaturen über 26 °C (mäßige Wärmebelastung) werden insbesondere noch an den Hangzonen des Rheingaugebirges und im Wispertal und in Teilen Wiesbadens und Mainz am östlichen Modellrand simuliert (Abbildung 13). In Heidesheim und Nieder-Ingelheim treten auch zwei kleinere Hot Spots (95 % Konfidenzniveau) der Gefühlten Temperatur auf.

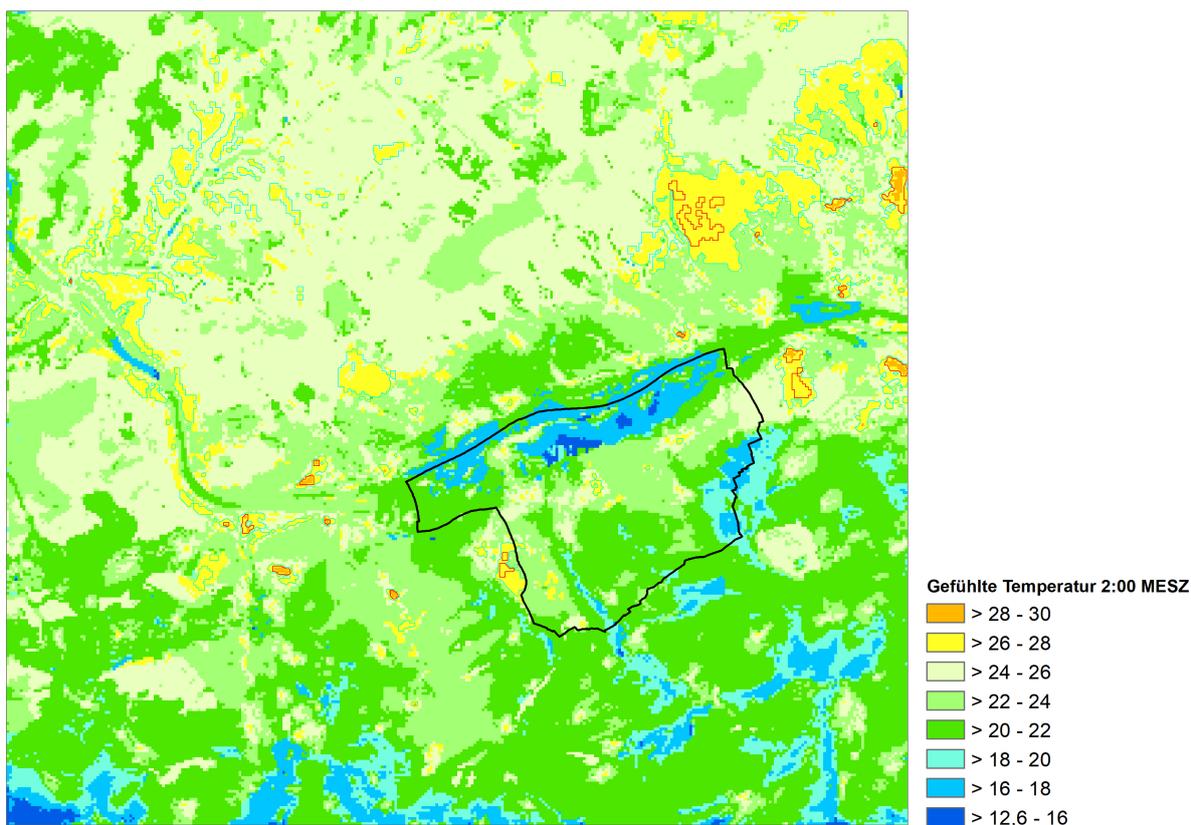


Abb. 13 Darstellung der Gefühlten Temperatur um 2:00 MESZ. Die Kontourlinien repräsentieren die signifikanten Hot-Spots (türkis 95 % und rot 99 % Konfidenzniveau). Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.

3.2 Kaltluftanalysen

Aufgrund der besonderen Bedeutung der nächtlichen Kaltluftabflüsse für die klimaangepasste Stadtentwicklung in Ingelheim am Rhein, werden in diesem Kapitel die Modellergebnisse der Fallstudie bezüglich der Kaltluftbildung und der Kaltluftvolumenstromdichte ausgewertet. Es wird auch die nächtliche Belüftung durch die Berechnung von Trajektorien untersucht. Dies umfasst zum einen Vorwärts-Trajektorien, durch die ermittelt wird, ob die im Umland lokal gebildete Kaltluft die Siedlungsgebiete von Ingelheim am Rhein erreicht und dort zur Kühlung und Belüftung beiträgt. Zum anderen wird für abendliche Überwärmungsgebiete durch Rückwärts-Trajektorien bestimmt woher die Luft kommt, die zur Belüftung dieser überwärmten Stadtquartiere beiträgt.

3.2.1 Abendliche Überwärmungsgebiete und Kaltluftentstehungsgebiete

Anhand der Ergebnisse der Hot-Spot Analysen der Lufttemperatur und Gefühlten Temperatur für den Zeitpunkt 21 Uhr MESZ, also zu einer Zeit kurz vor dem Einsetzen der Kaltluftabflüsse, wurden vier städtisch bebaute Gebiete (Polygone) in Ingelheim am Rhein und ein städtisches

Gebiet in der Nachbargemeinde Gau-Algesheim als Überwärmungsgebiete für weitere Untersuchungen ausgewählt (Abbildung 14):

- Frei-Weinheim (FR)
- Heidesheim (HM)
- Ingelheim-West (IW)
- Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim (ON)
- Gau-Algesheim (GA)

Um zu untersuchen woher die Luft kommt, die nachts diese Stadtquartiere belüftet, wurden die überwärmten Quartiere als Startpunkte für die Berechnung von Rückwärts-Trajektorien gewählt (Kapitel 3.2.4).

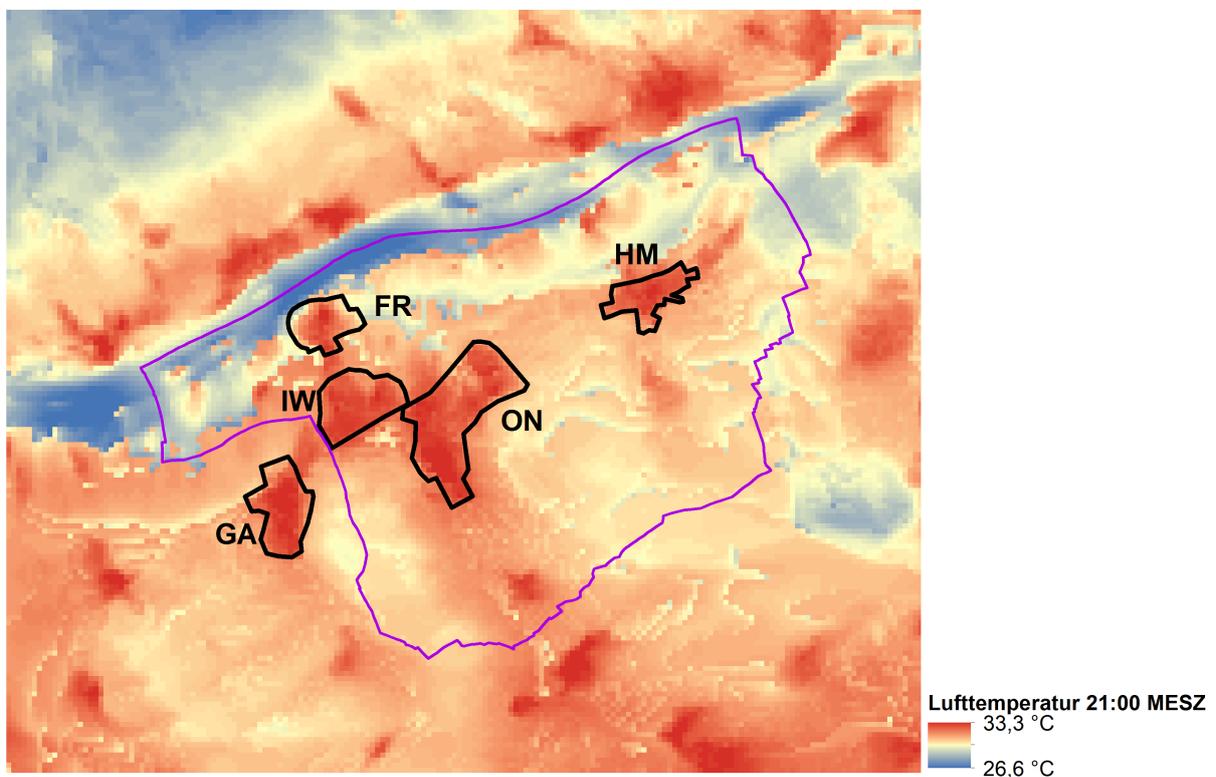


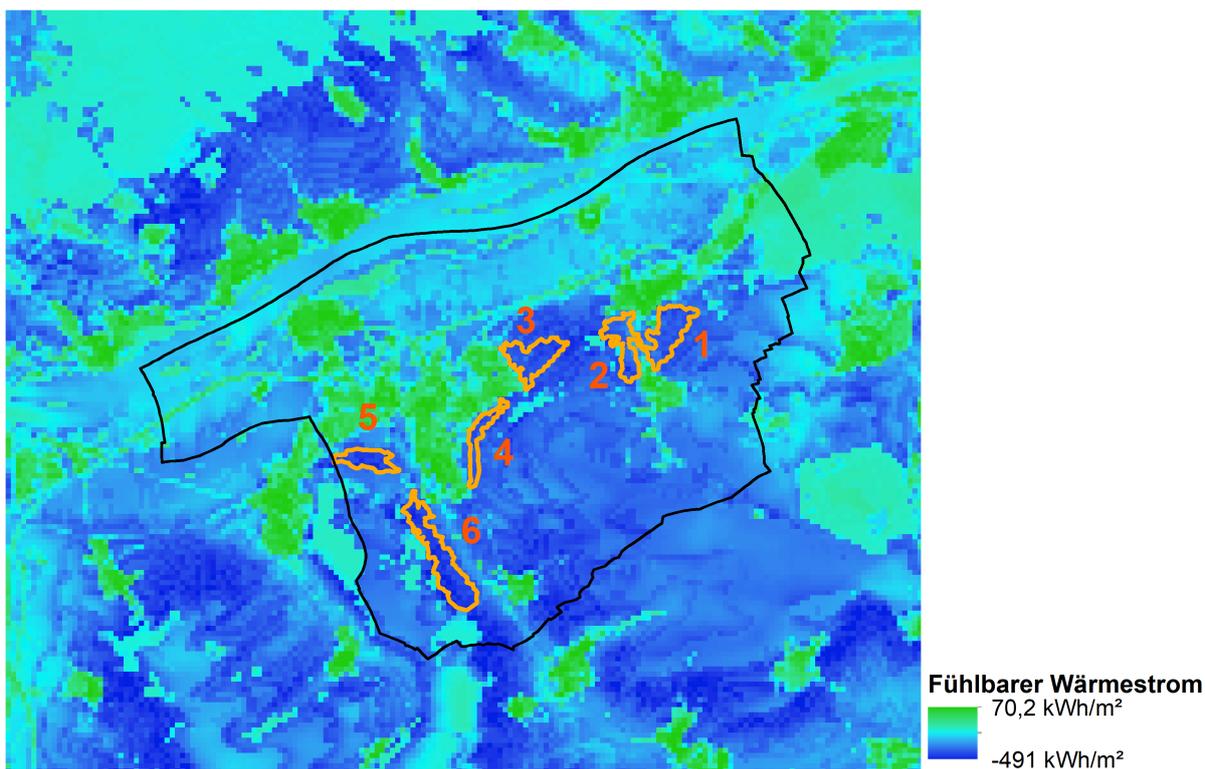
Abb. 14 Lage der fünf Überwärmungsgebiete (schwarze Linie) und Lufttemperatur um 21:00 MESZ im Modellgebietsausschnitt Ingelheim am Rhein. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als lila Linie eingezeichnet.

Zur Beurteilung des Potentials von Flächen für die nächtliche Kaltluftbildung zeigt Abbildung 15 den zwischen 22:00 und 04:00 MESZ zeitlich integrierten (aufsummierten) fühlbaren Wärmestrom zwischen dem Boden sowie den Bäumen und der umgebenden Atmosphäre. Das Potential zur Kaltluftbildung ist auf den umgebenden unbebauten Hängen und Kuppen des Mainzer Berges und Westerberges (Abbildung A12) besonders bedeutsam.

Auch die Freifläche zwischen Heidesheim und Nieder-Ingelheim hat ein großes Kaltluftbildungspotential. In der Umgebung von Ingelheim am Rhein wurden daraufhin folgende sechs stadtnahe Freiflächenbereiche mit einem besonders hohen Potential Kaltluft zu bilden, in Abbildung 15 durch orange Linien markiert, ausgewählt:

- 1) Heidesheim 1 (1)
- 2) Heidesheim 2 (2)
- 3) Nieder-Ingelheim (3)
- 4) Ober-Ingelheim (4)
- 5) Westerberg Nord (5)
- 6) Selztal (6)

Um zu untersuchen welche Stadtquartiere nachts eine thermische Entlastung durch Kaltluft aus diesen Gebieten erfahren, werden diese Gebiete mit hohem Kaltluftbildungspotential als Startpunkte für die Berechnung von Vorwärts-Trajektorien gewählt (Kapitel 3.2.4).



Quelle: GeoBasis-DE / BKG (2022)

Abb. 15 Zwischen 22:00 und 04:00 MESZ zeitlich integrierter, fühlbarer Wärmestrom zwischen dem Boden sowie den Bäumen und der umgebenden Atmosphäre in kWh/m² als Maß zur Beurteilung des Potentials einer Fläche für die nächtliche Kaltluftbildung. Die orangenen Konturlinien umschließen die für die weitere Untersuchung ausgewählten Kaltluftentstehungsgebiete. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als schwarze Linie eingezeichnet.

3.2.2 Windverhältnisse

Die Abbildungen 16 bis 18 zeigen das bodennahe Windfeld (5 m über Grund) als Vektordarstellung um 17:00, 22:00 und 2:00 MESZ. Die Vektorlänge entspricht der Windgeschwindigkeit, die Vektorrichtung entspricht der Windrichtung aus der der Wind weht und die Vektorfarbe entspricht der Lufttemperatur.

Um 17:00 MESZ weht der Wind im südlichen Modellgebiet überwiegend aus südwestlicher Richtung. Auf den Kuppen des Mainzer Berges und Westerberges weht der Wind stärker als in den Tallagen des Selztals (Abbildung 16). Auch auf den Höhen des Rheingaugebirges weht der Wind überwiegend aus der vorgegebenen regionalen südwestlichen Anströmrichtung. Im Rheintal stellt sich eine leicht modifizierte Strömung ein die vom Rhein weg, hangaufwärts in Richtung Süden beziehungsweise Richtung Norden führt. Um 22:00 MESZ, ca. eine Stunde nach Sonnenuntergang, nimmt die turbulente Durchmischung stark ab und lokale Windsysteme wie Hangabwinde bilden sich aus (Abbildung 17). An den südlichen Hängen des Rheingaugebirges bilden sich Hangabwinde in Richtung Rhein, die teilweise sogar über den Rhein hinaus reichen. Auf den Hängen südlich des Rheins, also im Bereich von Ingelheim, sind die Hangabwinde um 22 MESZ noch recht schwach ausgebildet. Auf den Kuppenlagen des Mainzer Berges und Westerberges bilden sich Hangabwinde die in verschiedene Richtungen zeigen. So gibt es zum Beispiel Hangabwinde in Richtung des Selztals oder vom Mainzer Berg in nördliche Richtung des Rheins. Später in der Nacht, um 2:00 MESZ, treten diese lokalen Windsysteme noch viel deutlicher in Erscheinung (Abbildung 18). So verstärken sich die Hangabwinde des Mainzer Berges und Westerberges in Richtung Norden nach Ingelheim am Rhein und Gau-Algesheim. Markant sind nun auch die Bergwinde im Tal des Welzbaches in Richtung Gau-Algesheim, im unteren Talabschnitt der Selz in Richtung Ingelheim am Rhein und am Nordost Rand des Mainzer Berges zwischen dem Flugplatz Mainz-Finthen und dem Höllenberg (Abbildung A12).

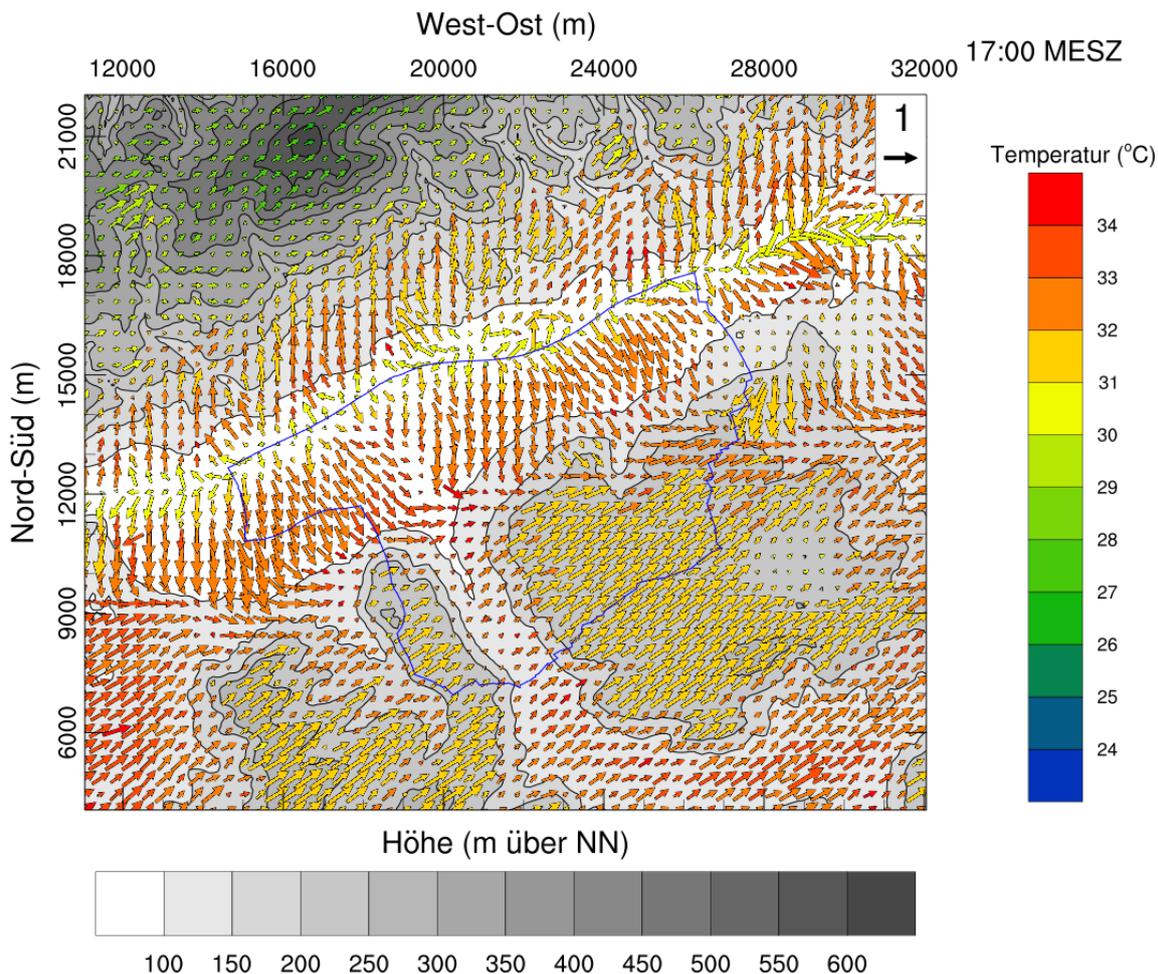


Abb. 16 Bodennahes Windfeld (Vektorlänge und -richtung) und Temperatur (Vektorfarbe) um 17:00 MESZ. Der rechts oben in der Legende dargestellte Vektor entspricht einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s. Dargestellt ist jeder 4te Windvektor. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als blaue Linie eingezeichnet (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

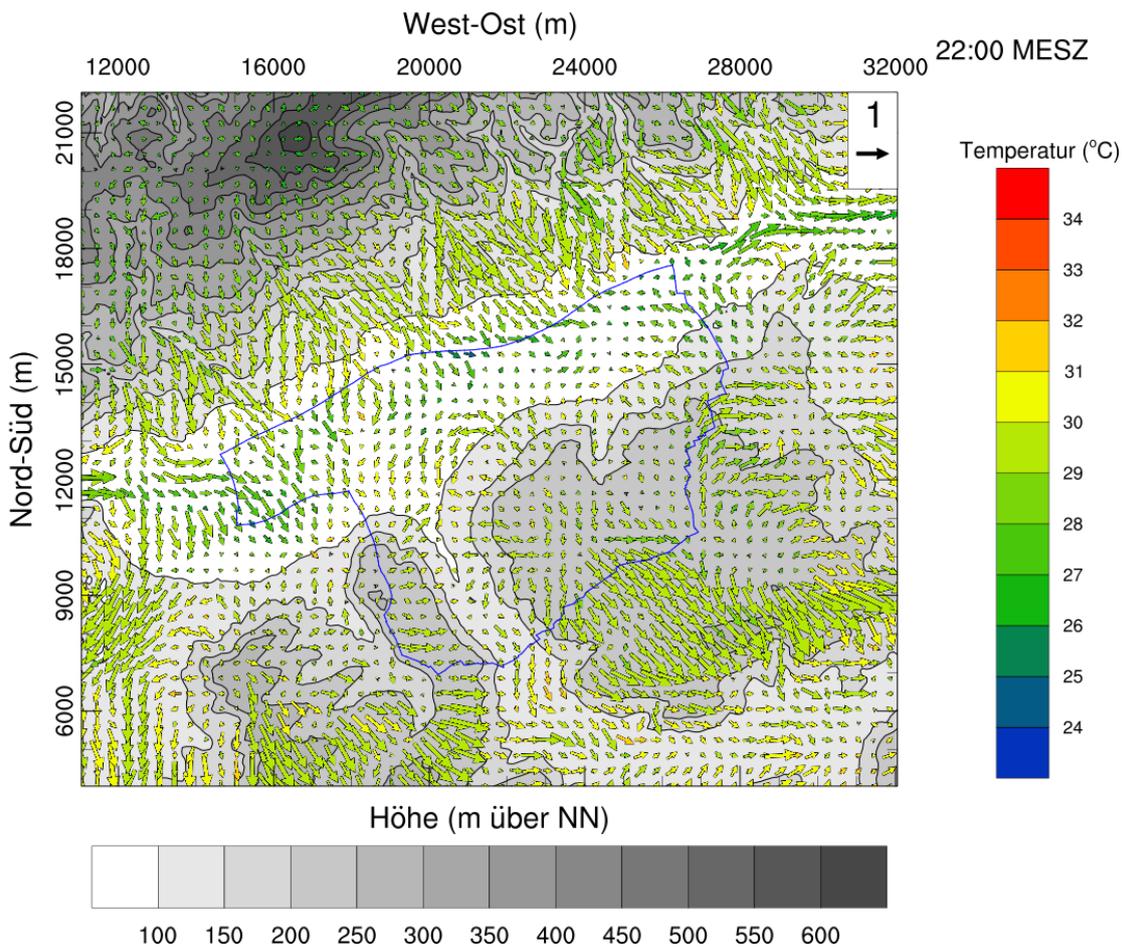


Abb. 17 Bodennahes Windfeld (Vektorlänge und -richtung) und Temperatur (Vektorfarbe) um 22:00 MESZ. Der rechts oben in der Legende dargestellte Vektor entspricht einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s. Dargestellt ist jeder 4te Windvektor. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als blaue Linie eingezeichnet (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

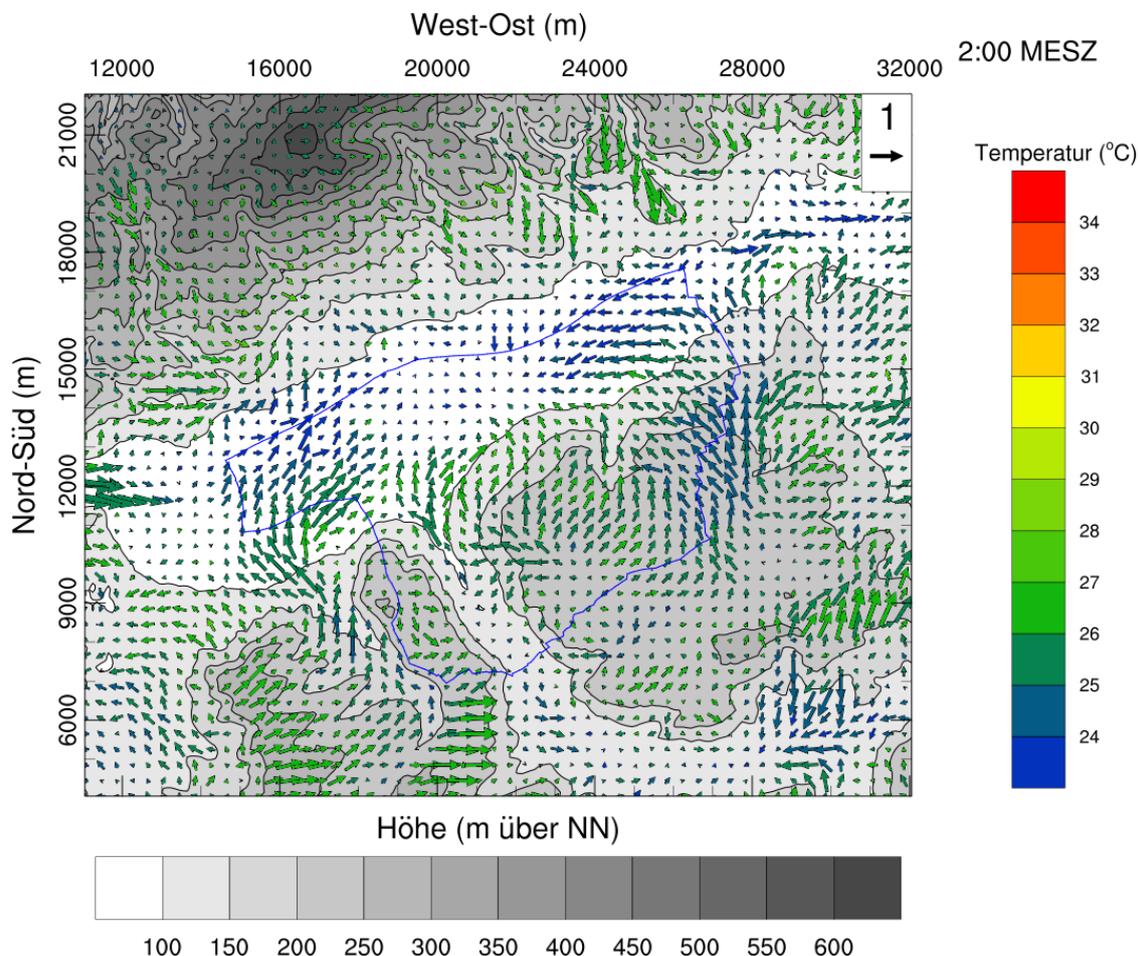


Abb. 18 Bodennahes Windfeld (Vektorlänge und -richtung) und Temperatur (Vektorfarbe) um 2:00 MESZ. Der rechts oben in der Legende dargestellte Vektor entspricht einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s. Dargestellt ist jeder 4te Windvektor. Die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein ist als blaue Linie eingezeichnet (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

3.2.3 Kaltluftvolumenstrom

Um die Belüftungswirkung von nächtlichen Kaltluftabflüssen zu bewerten, ist es sinnvoll die Betrachtung der bodennahen Windverhältnisse durch die Berechnung von Volumenströmen zu ergänzen (VDI, 2003). Hierzu wurden die vom Stadtklimamodell berechneten Wind- und Lufttemperaturwerte vertikal über die von der Oberfläche bis in 20 m über Grund reichende Schicht gemittelt (SÜHRING, 2015). In den Abbildungen 19 und 20 sind die Ergebnisse des Volumenstroms und dessen Temperatur für die 23:00 MESZ und 1:00 MESZ Ergebnisse im Auswertebereich dargestellt. Die größeren, grün oder auch blaugrün eingefärbten Vektoren repräsentieren die für die nächtliche Belüftung und Kühlwirkung bedeutsamsten Kaltluftvolumenströme. Diese treten insbesondere ab 1 Uhr MESZ auf. Die größten Volumenströme und niedrigsten Temperaturen treten im Tal des Welzbaches in Richtung Gau-

Algesheim und am Nordost Rand des Mainzer Berges zwischen dem Flugplatz Mainz-Finthen und dem Höllenberg auf.

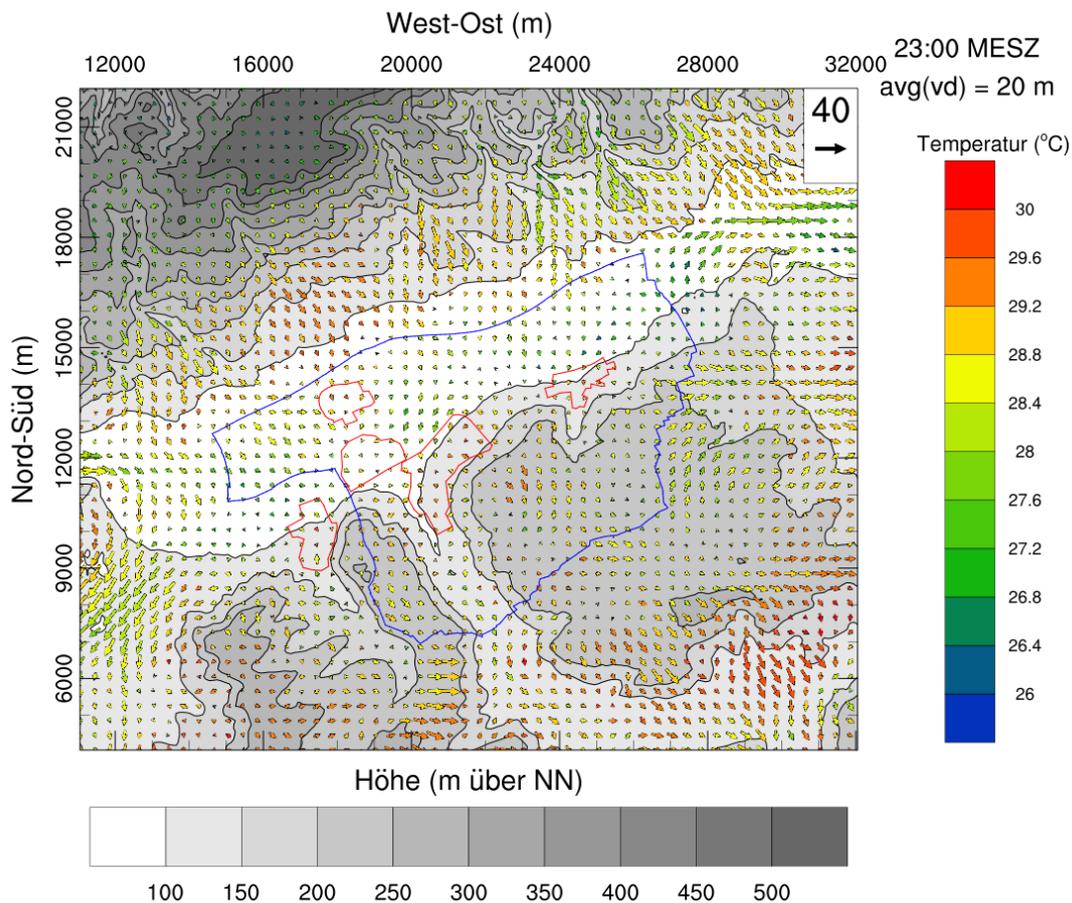


Abb. 19 Volumenstromdichte (Vektorlänge und -richtung) und Mitteltemperatur (Vektorfarbe) um 23:00 MESZ in den untersten 20 m über Grund. Der rechts oben in der Legende dargestellte Vektor entspricht einer Kaltluftvolumenstromdichte von $40 \text{ m}^3/(\text{m s})$. Dargestellt ist jeder 4te Volumenstromdichtenvektor. Zur besseren Orientierung ist die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein als blaue Linie und die überwärmten Stadtquartiere als rote Linien eingezeichnet (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

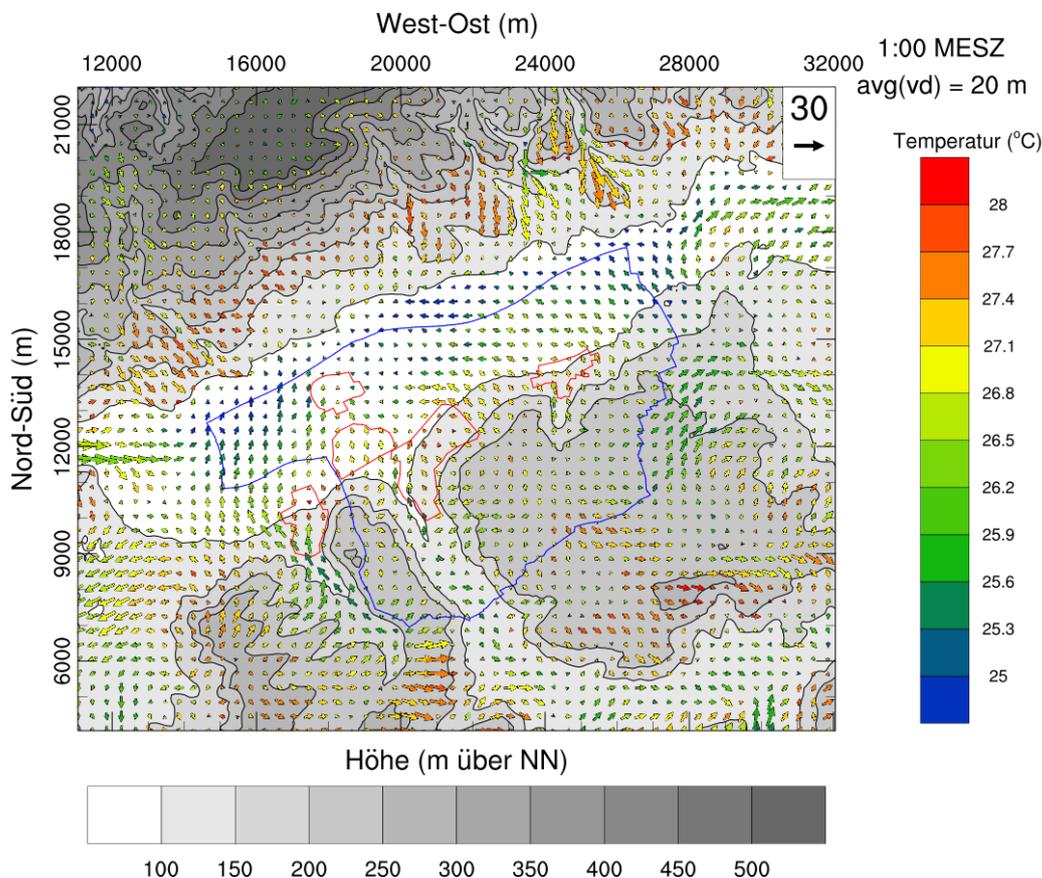


Abb. 20 Volumenstromdichte (Vektorlänge und -richtung) und Mitteltemperatur (Vektorfarbe) um 1:00 MESZ in den untersten 20 m über Grund. Der rechts oben in der Legende dargestellte Vektor entspricht einer Kaltluftvolumenstromdichte von $30 \text{ m}^3/(\text{m s})$. Dargestellt ist jeder 4te Volumenstromdichtenvektor. Zur besseren Orientierung ist die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein als blaue Linie und die überwärmten Stadtquartiere als rote Linien eingezeichnet (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

3.2.4 Trajektorienanalyse

Die Berechnung von Trajektorien erfolgte als Postprocessing-Verfahren (KECK, 2014) auf Basis der stündlich abgespeicherten dreidimensionalen Windfelder der MUKLIMO_3 Simulation. Trajektorien beschreiben den Pfad des Schwerpunktes eines Luftpaketes durch die Atmosphäre. Sie ermöglichen Aussagen über die Transportrichtung. Vorwärtstrajektorien geben an, wohin sich ein Luftpaket bewegt, Rückwärtstrajektorien dagegen, woher es kommt. Die hier gezeigten Vorwärts-Trajektorien aus den sechs identifizierten Kaltluftentstehungsgebieten (Abbildung 15) wurden mit einer Dichte von 20 Trajektorien pro Quadratkilometer gestartet, wobei deren Anfangskoordinaten im Quellgebiet über einen Zufallsgenerator bestimmt wurden. Die Rückwärts-Trajektorien aus den 5 überwärmten städtischen Gebieten (Abbildung 14) wurden mit einer Dichte von 40 Trajektorien pro

Quadratkilometer gestartet. Auch hier wurden die Anfangskordinaten im Zielgebiet per Zufallsgenerator bestimmt.

Planerisch bedeutsam sind insbesondere bodennahe Kaltluftverlagerungen, das heißt Kaltluft-Trajektorien in den untersten 40 bis 50 Metern. Trajektorienverläufe die eine Höhe von 95 m über Grund überschreiten, werden in den Ergebnisabbildungen ausgeblendet.

Vorwärts-Trajektorien

Alle Vorwärts-Trajektorien starteten in den Kaltluftentstehungsgebieten in einer Höhe von 5 m über Grund. Die Vorwärts-Trajektorien wurden um 22:00 MESZ (Abbildung 21), um 0:00 MESZ (Abbildung 22) und um 02:00 MESZ (Abbildung 23) gestartet und jeweils für einen Zeitraum von 2 Stunden berechnet. Im Verlauf der Nacht, mit zunehmender Ausprägung der Hangabwinde, zeigen die Vorwärts-Trajektorien aus den Kaltluftentstehungsgebieten am Fuße des Mainzer Berges und Westerberges eine Kaltluftverlagerung in Richtung der angrenzenden bebauten Ingelheimer Stadtgebiete.

Kaltluftentstehungsgebiete Heidesheim (1 und 2)

Beide Kaltluftentstehungsgebiete erstrecken sich zwischen den Stadtteilen Heidesheim und Wackernheim an den Hängen des Mainzer Berges. Zwischen beiden Gebieten verläuft der Wildgraben. Die dort um 22:00 MESZ gestarteten Vorwärts-Trajektorien verlaufen zuerst hangabwärts in Richtung Heidesheim um dann kurz nach Erreichen der Bebauung abzuheben und wieder in südliche Richtung gegen die Hänge des Mainzer Berges zu verlaufen (Abbildung 21). Ursache dafür sind vermutlich die nach Süden gerichteten Kaltluftabflüsse aus dem Rheingau (Taunus). Im Laufe der Zeit intensivieren sich auch die Hangabwinde am Rand des Mainzer Berges. Die Vorwärts-Trajektorien um 0:00 MESZ (Abbildung 22) und 2:00 MESZ (Abbildung 23) zeigen einen bodennahen nach Norden gerichteten Verlauf über das Stadtgebiet von Heidesheim hinweg. Erst danach heben die Vorwärts-Trajektorien in größere Höhen ab.

Kaltluftentstehungsgebiet Nieder-Ingelheim (3)

Das Kaltluftentstehungsgebiet grenzt östlich an den Stadtteil Nieder-Ingelheim. Die um 22:00 MESZ gestarteten Vorwärts-Trajektorien nehmen überwiegend einen nach Nordwesten gerichteten Verlauf. Nur die Vorwärts-Trajektorien im südwestlichen direkt an die Stadt angrenzenden Bereich verlaufen bodennah über einen Teil des Gebietes Nieder-Ingelheim. Dies gilt auch für die Vorwärts-Trajektorien, welche um 0:00 MESZ starten. Die um 2:00 MESZ gestarteten Vorwärts-Trajektorien zeigen ebenfalls eine nach Nordwesten gerichtete Strömung, ohne jedoch bebauten Gebiete von Nieder-Ingelheim zu queren.

Kaltluftentstehungsgebiet Ober-Ingelheim (4)

Das Kaltluftentstehungsgebiet schmiegt sich an die westlichen Hänge des Mainzer Berges in direkter Nähe zu den Stadtteilen Nieder-Ingelheim und Ober-Ingelheim. Die dort um 22:00 MESZ gestarteten Vorwärts-Trajektorien verlaufen bodennah in westlicher Richtung in die bebauten Stadtgebiete. Dort heben sie ziemlich schnell in höhere Höhen ab und ändern ihre Richtung. Die um 0:00 MESZ gestarteten Vorwärts-Trajektorien verlaufen überwiegend in nordwestlicher Richtung. Auch um diese Zeit heben die Trajektorien jedoch schnell über der Bebauung in größere Höhen ab. Die Vorwärts-Trajektorien mit der Startzeit 2:00 MESZ verlaufen ebenfalls durch die bebauten Gebiete, diesmal aber in nördlicher Richtung und bodennah.

Kaltluftentstehungsgebiet Westerberg Nord (5)

Das Kaltluftentstehungsgebiet liegt am nordöstlichen Hang des Westerbergs in direkter Nähe zu den Stadtteilen Ober-Ingelheim und Ingelheim-West. Die Vorwärts-Trajektorien um 22:00 MESZ verlaufen nach Norden und Osten und erreichen teilweise die bebauten Gebiete im Westen von Ober-Ingelheim und im Süden von Ingelheim-West. Dort bleiben sie auch überwiegend bodennah. Die dort um 0:00 und 2:00 MESZ gestarteten Vorwärts-Trajektorien überströmen bodennah den Stadtteil Ingelheim-West. Die Vorwärts-Trajektorien um 2:00 MESZ zeigen eine starke Bündelung. Grund hierfür sind die starken Windströmungen aus dem unteren Selztal und dem Tal des Welzbaches die zu einem Kanalisationseffekt in diesem Bereich des Westerberges beitragen (Abbildung 18).

Kaltluftentstehungsgebiet Selztal (6)

Das Kaltluftentstehungsgebiet Selztal liegt im Selztal am östlichen Hang des Westerbergs. Um 22:00 MESZ verlaufen die Vorwärts-Trajektorien in Richtung Südost in das Selztal hinein. Sie heben relativ schnell in große Höhen über 60 m ab. Die um 0:00 MESZ gestarteten Vorwärts-Trajektorien zeigen sowohl nördliche als auch südliche Richtungen. Insbesondere die Trajektorien aus dem nördlichen Teil des Kaltluftentstehungsgebietes folgen dem Verlauf des Selztals in Richtung Ingelheim am Rhein. Allerdings dringen Sie nur am westlichen Rand von Ober-Ingelheim in die Bebauung ein. Ein ähnliches Bild mit Vorwärts-Trajektorien sowohl in nördliche als auch südliche Richtungen zeigt sich auch für 2:00 MESZ. Die Trajektorien aus dem nördlichen Bereich des Kaltluftentstehungsgebietes erreichen bodennah die bebauten Gebiete des Stadtteils Ingelheim-West. Ober-Ingelheim wird von ihnen nur gestreift.

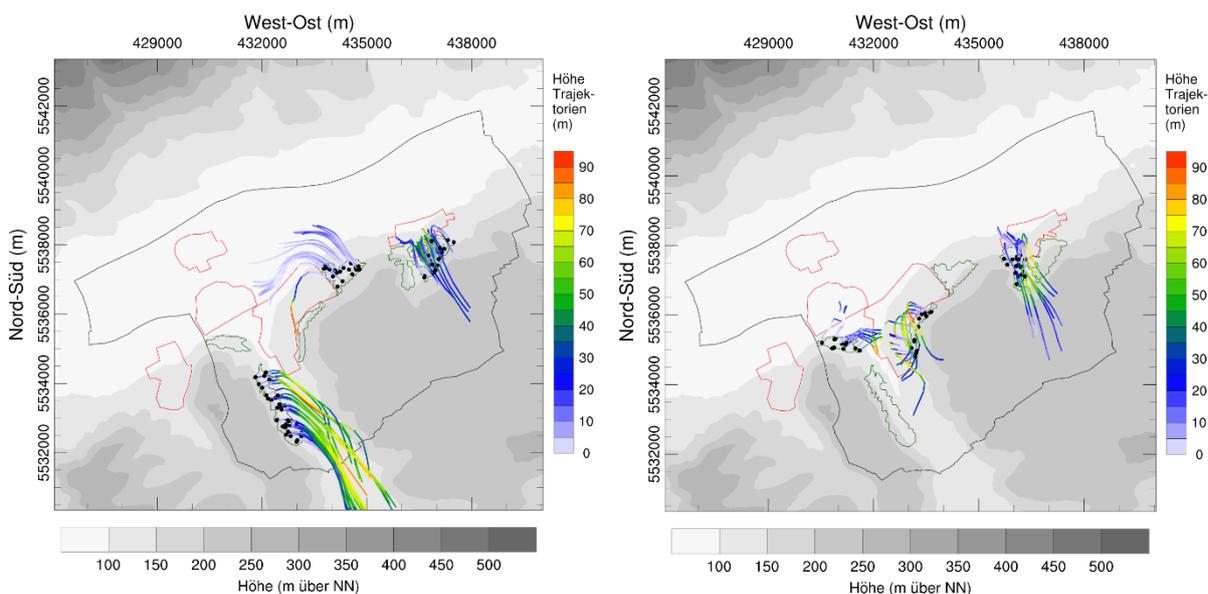


Abb. 21 Vorwärts-Trajektorien (V1) aus den grün umrandeten Gebieten mit hohem Kaltluftbildungspotential für den Zeitraum 22:00 bis 24:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die roten Linien zeigen die Überwärmungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

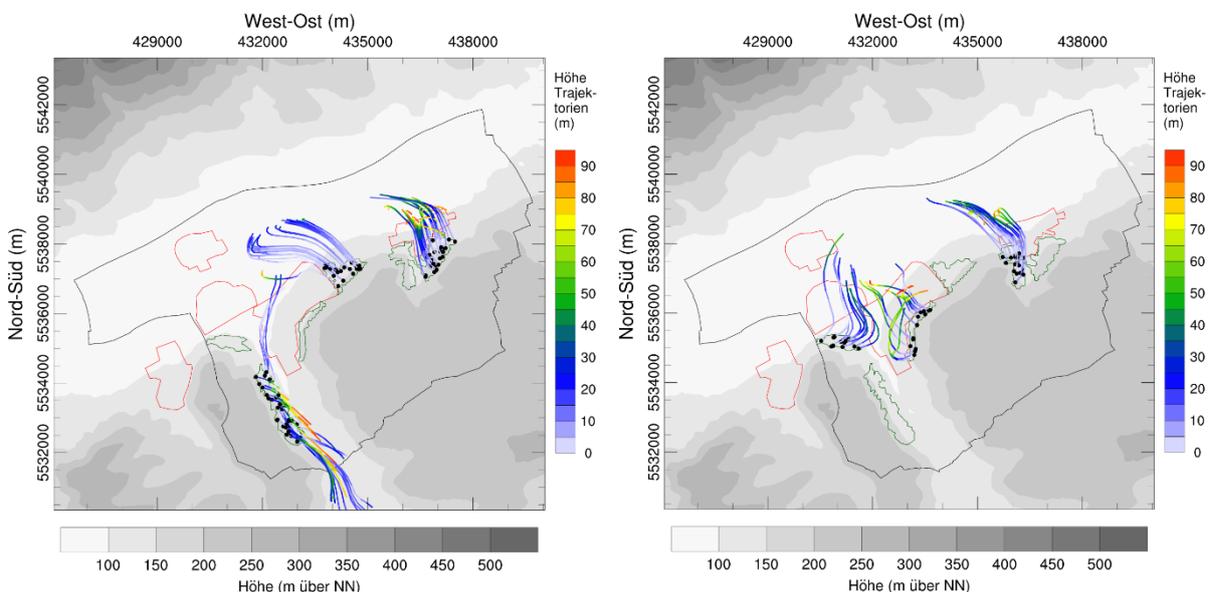


Abb. 22 Vorwärts-Trajektorien (V2) aus den grün umrandeten Gebieten mit hohem Kaltluftbildungspotential für den Zeitraum 0:00 bis 2:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die roten Linien zeigen die Überwärmungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

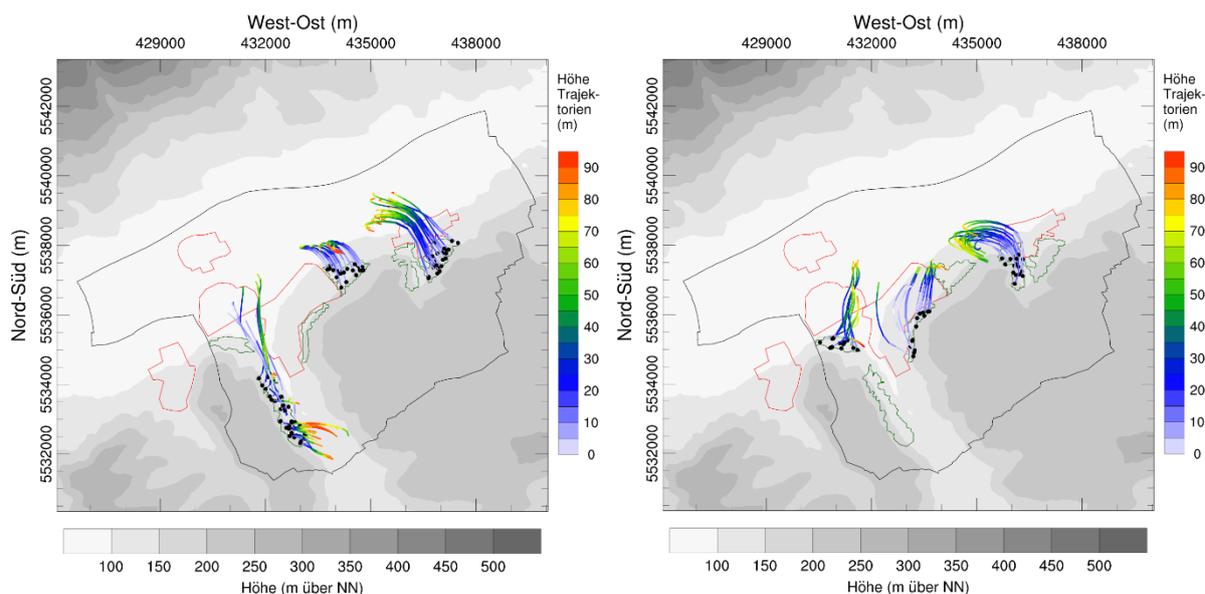


Abb. 23 Vorwärts-Trajektorien (V3) aus den grün umrandeten Gebieten mit hohem Kaltluftbildungspotential für den Zeitraum 2:00 bis 4:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die roten Linien zeigen die Überwärmungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

Insgesamt ist aus den berechneten Vorwärts-Trajektorien zu schließen, dass die nachts in den untersuchten Kaltluftbildungsgebieten entstehende Kaltluft einige städtische Überwärmungsgebiete erreicht und somit für diese planerisch bedeutsam ist.

Rückwärts-Trajektorien

Da Wind in der Bebauung eine hohe Variabilität aufweist und die Gebäude auch vertikale Umlenkungen der Strömung bewirken, wurden alle Rückwärts-Trajektorien in den abendlichen Überwärmungsgebieten (Abbildung 14) in einer Höhe zwischen 5 m und 15 m über Grund gestartet. Die Starthöhe der individuellen Trajektorien innerhalb dieses Höhenbereichs wurde über einen Zufallsgenerator vorgegeben. Die Rückwärts-Trajektorien wurden um 0:00 MESZ (Abbildung 24), um 2:00 MESZ (Abbildung 25) und um 4:00 MESZ (Abbildung 26) gestartet und bis zu dem Punkt zurück berechnet, an dem sich die Luftpartikel 2 Stunden vorher befanden.

Stadtgebiet Frei-Weinheim (FR)

Das abendlich überwärmte Stadtgebiet von Frei-Weinheim ist das nördlichste der Stadtgebiete und liegt direkt am Rhein. Die von dort um 24:00 MESZ gestarteten Rückwärts-Trajektorien belegen eine Luftzufuhr aus nordwestlicher Richtung direkt von den südlichen Hängen des Rheingaugebirges, und zwar vor allem aus dem Pfinzbachtal

und dem Elsterbachtal, über den Rhein hinweg nach Frei-Weinheim. Die Rückwärts-Trajektorien von 2:00 MESZ und 4:00 MESZ zeigen einen Windrichtungswechsel, sodass die Luftzufuhr im Laufe der Nacht aus südwestlicher Richtung und später aus westlicher Richtung entlang des Rheintals erfolgt.

Stadtgebiet Heidesheim (HM)

Der abendlich überwärmte Stadtteil Heidesheim schließt sich östlich in einiger Entfernung zum Stadtzentrum von Ingelheim an. Ingelheim und Heidesheim trennt eine größere Freifläche auf der in der Nacht Kaltluft entsteht. Die in Heidesheim gestarteten Rückwärts-Trajektorien belegen zu allen Zeitpunkten (24:00, 2:00 und 4:00 MESZ) eine bodennahe Luftzufuhr von den nördlichen Hängen des Mainzer Berges. Die Rückwärts-Trajektorien zeigen einen ganz ähnlichen Verlauf wie die Vorwärts-Trajektorien aus den Kaltluftentstehungsgebieten Heidesheim 1 und 2 und bestätigen die hohe Konnektivität von Kaltluftentstehungsgebiet und überwärmtem Stadtgebiet.

Stadtgebiet Ingelheim-West (IW)

Das abendlich überwärmte Stadtgebiet im Westen von Ingelheim liegt in der südlichen Rheinebene am Talausgang der Selz. Die dort um 24:00 MESZ gestarteten Rückwärts-Trajektorien zeigen eine bodennahe Luftzufuhr aus dem Rheintal herkommend aus nordöstlichen (über die Freiflächen zwischen Frei-Weinheim und Nieder-Ingelheim) und nordwestlichen Richtungen (über die Freiflächen westlich von Frei-Weinheim). Betrachtet man die Rückwärts-Trajektorien von 2:00 MESZ, so zeigen diese eine bodennahe Luftzufuhr von den nordöstlichen Hanglagen des Westerberges und des dort definierten Kaltluftentstehungsgebietes. Die um 4:00 MESZ gestarteten Rückwärts-Trajektorien kommen aus dem Selztal beziehungsweise aus westlicher Richtung aus dem Rheintal und dem Tal des Welzbaches am Westerberg.

Stadtgebiet Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim (ON)

Die überwärmten Stadtgebiete von Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim liegen am Ausgang des Tals der Selz beziehungsweise am Fuße der nordwestlichen Flanke des Mainzer Berges. Betrachtet man die Rückwärts-Trajektorien von 24:00 MESZ, so stellt man fest, dass die Luftzufuhr in diese beiden Stadtteile aus verschiedenen Richtungen erfolgt. In Ober-Ingelheim sind das überwiegend die Luftzufuhr von den Hängen des Mainzer Berges und Westerberges sowie aus dem Tal der Selz. In Nieder-Ingelheim kommt die Luft ebenfalls von den Hängen des Mainzer Berges und damit aus Richtung des Kaltluftentstehungsgebietes Ober-Ingelheim und aus nordöstlicher Richtung und damit aus Richtung des Kaltluftentstehungsgebietes Nieder-Ingelheim. Die um 2:00 MESZ

gestarteten Rückwärts-Trajektorien bringen die Luft überwiegend bodennah aus südöstlicher Richtung und damit aus Richtung des Selztals und von den Hängen des Mainzer Berges. In Nieder-Ingelheim erfolgt die Luftzufuhr für einige Rückwärts-Trajektorien nicht mehr bodennah. Die um 4:00 MESZ gestarteten Rückwärts-Trajektorien zeigen die Luftzufuhr aus den gleichen Richtungen wie um 2:00 MESZ. Die Belüftung aus dem Tal der Selz spielt dabei eine entscheidende Rolle für Ober-Ingelheim.

Stadtgebiet Gau-Algesheim (GA)

Das westlich gelegene Stadtgebiet der Nachbargemeinde von Ingelheim am Rhein ist Gau-Algesheim. Die dort um 24:00 MESZ gestarteten Rückwärts-Trajektorien zeigen eine Luftzufuhr aus nordwestlicher und nordöstlicher Richtung vom Rhein herkommend und aus südlicher Richtung vom Tal des Welzbaches kommend. Alle Trajektorien verlaufen bodennah bis 30 m Höhe. Die Rückwärts-Trajektorien von 2:00 MESZ und 4:00 MESZ zeigen eine dominante bodennahe Luftzufuhr vom Tal des Welzbaches kommend.

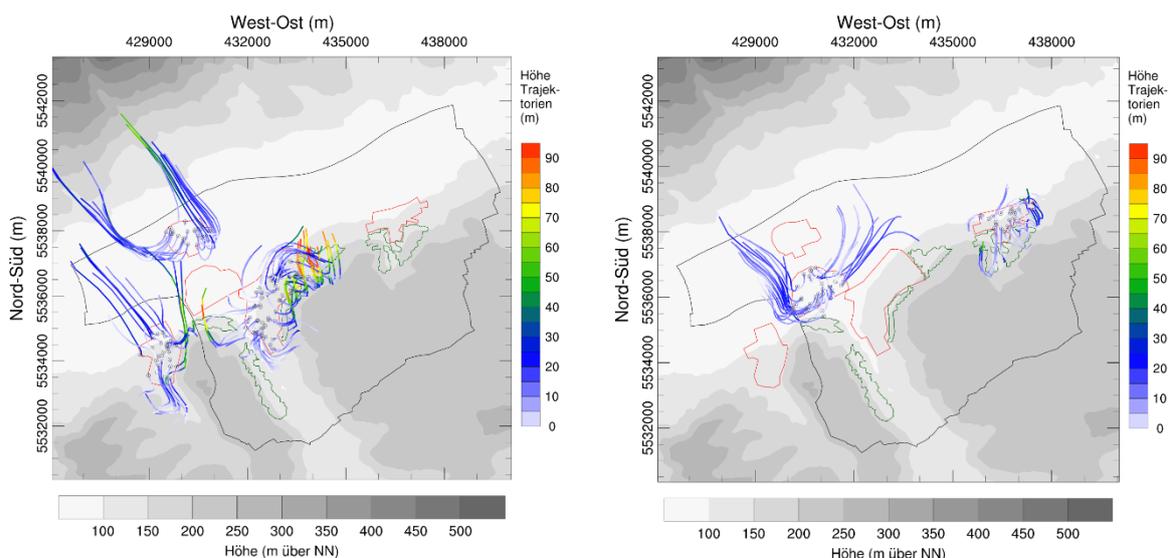


Abb. 24 Rückwärts-Trajektorien (R1) aus den rot umrandeten Überwärmungsgebieten für den Zeitraum 24:00 bis 22:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die dunkelgrünen Linien zeigen die ausgewählten Kaltluftentstehungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

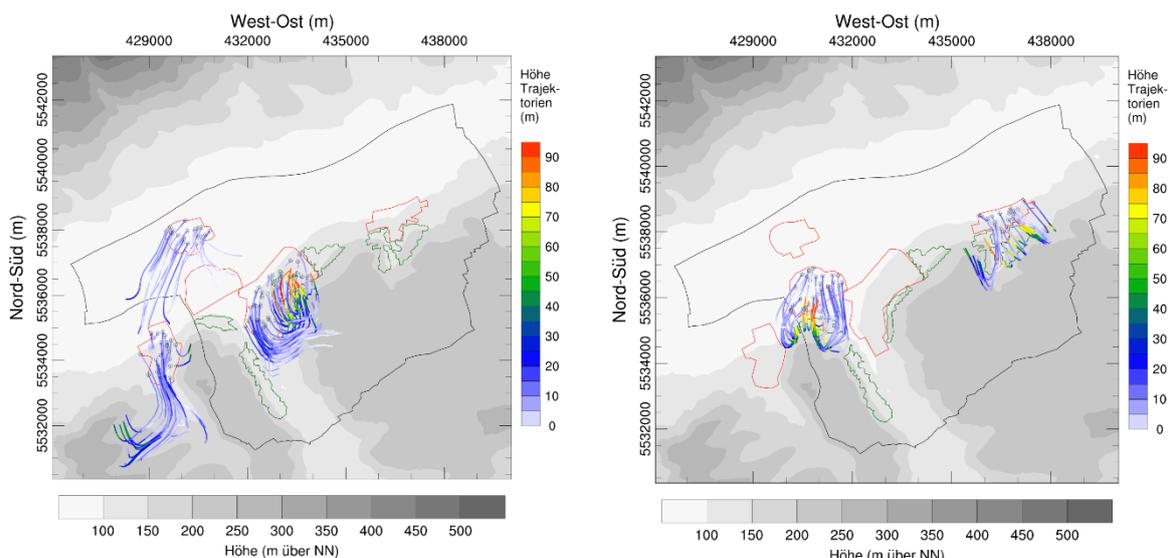


Abb. 25 Rückwärts-Trajektorien (R2) aus den rot umrandeten Überwärmungsgebieten für den Zeitraum 2:00 bis 0:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die dunkelgrünen Linien zeigen die ausgewählten Kaltluftentstehungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

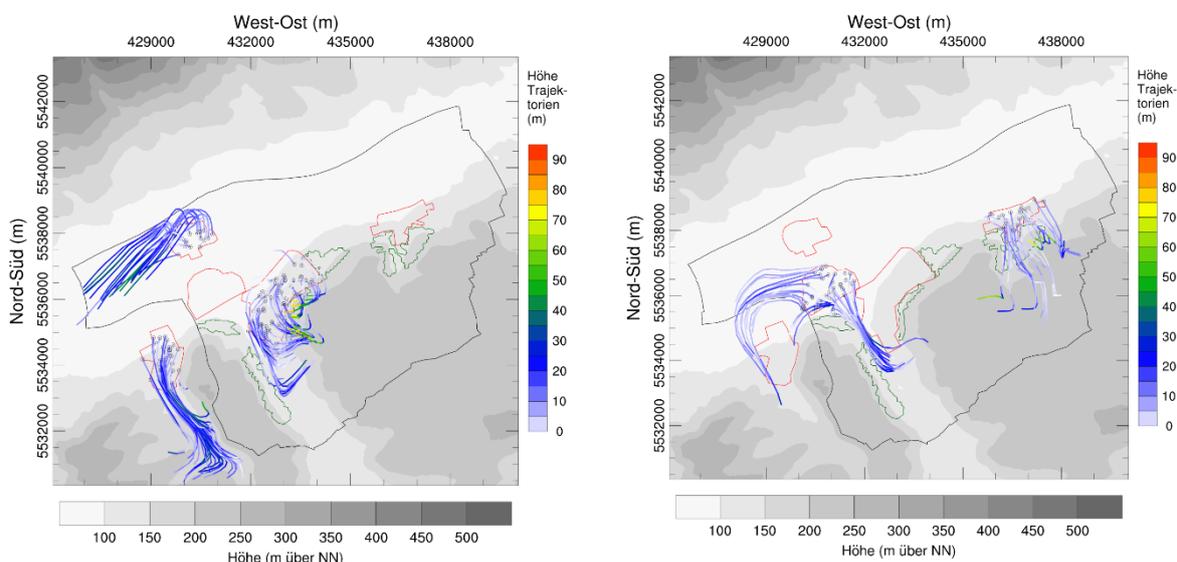


Abb. 26 Rückwärts-Trajektorien (R3) aus den rot umrandeten Überwärmungsgebieten für den Zeitraum 4:00 bis 2:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe in m über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und die dunkelgrünen Linien zeigen die ausgewählten Kaltluftentstehungsgebiete (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

Die Analyse der Rückwärts-Trajektorien ergänzt die Erkenntnisse aus den Vorwärts-Trajektorien und bestätigt die nächtliche Belüftung der untersuchten Überwärmungsgebiete durch Luftzufuhr aus den umgebenden Kaltluftbildungsgebieten. Die Ergebnisse der

Trajektorienanalyse wurde in eine tabellarische Matrix (Tabelle 2) überführt. Die Matrix zeigt sehr übersichtlich zwischen welchen Kaltluftbildungsgebieten und welchen städtischen Überwärmungsgebieten ein nächtlicher Luftaustausch durch Lokalwinde besteht. Das in Grüntönen visualisierte Maß der Trajektorien Konnektivität beschreibt hierbei für wie viele der präsentierten Trajektorien-Berechnungen sich die Verbindung zwischen zwei Gebieten ergab. Die höchste Konnektivität zeigt die Matrix zwischen dem Stadtgebiet Heidesheim und den beiden Kaltluftbildungsgebieten südlich von Heidesheim an den Hängen des Mainzer Berges. Ferner weisen die Stadtteile Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim eine große Konnektivität zu dem Kaltluftbildungsgebiet Ober-Ingelheim am nordwestlichen Hang des Mainzer Berges auf. Eine hohe Konnektivität besteht ebenfalls zwischen dem Stadtgebiet Ingelheim-West und dem Kaltluftbildungsgebiet Westerberg Nord. Für Frei-Weinheim und Gau-Algesheim spielen die gewählten Kaltluftbildungsgebiete keine Rolle (Tabelle 2) aber für Frei-Weinheim haben die Kaltluftentstehungsgebiete an den Hängen des Rheingaugebirges und die dortigen Hangabwinde eine belüftende Wirkung insbesondere zu Beginn der Nacht.

Tabelle 2 Matrix der Trajektorien Konnektivität zwischen Kaltluftbildungsgebieten (blaue Spalten) und abendlichen Überwärmungsgebieten (rote Zeilen) aus Analysen der MUKLIMO_3 Fallstudie für Ingelheim am Rhein.

Vorwärts-Trajektorien V1: 22:00 – 24:00 MESZ V2: 0:00 – 2:00 MESZ V3: 2:00 – 4:00 MESZ VB: V1, V2, V3 Rückwärts-Trajektorien R1: 24:00 – 22:00 MESZ R2: 2:00 – 0:00 MESZ R3: 4:00 – 2:00 MESZ RB: R1, R2, R3 Konnektivität 		Heidesheim 1	Heidesheim 2	Nieder-Ingelheim	Ober-Ingelheim	Westerberg Nord	Westerberg Selztal
	ID/Nr.	1	2	3	4	5	6
Frei-Weinheim	FR						
Heidesheim	HM	VB, RB	VB, RB				
Ingelheim-West	IW					VB, RB	V3
Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim	ON			V1, V2, R1	VB, RB	V1, V2	V2, V3
Gau-Algesheim	GA						

4. Das Messprogramm

Um die MUKLIMO_3 Modellergebnisse in der Stadt Ingelheim am Rhein und ihrem Umland zu evaluieren, wurde vom DWD ein temporäres städtisches Messprogramm für den Zeitraum 27. Mai bis 30. September 2021 initiiert. Das Messprogramm umfasst Messungen mit Hilfe von automatischen Wetterstationen (abgekürzt AWS) an zwei verschiedenen Standorten jeweils an einem 2 m und einem 10 m Messmast, acht Messtandorte mit Thermobuttons, drei Messfahrten und drei Radiosondenaufstiege (Abbildung 27). Ergänzend wurde auf Stationsmessdaten der agrarmeteorologischen Stationen des Landes Rheinland-Pfalz und der DWD Station Geisenheim zurückgegriffen.

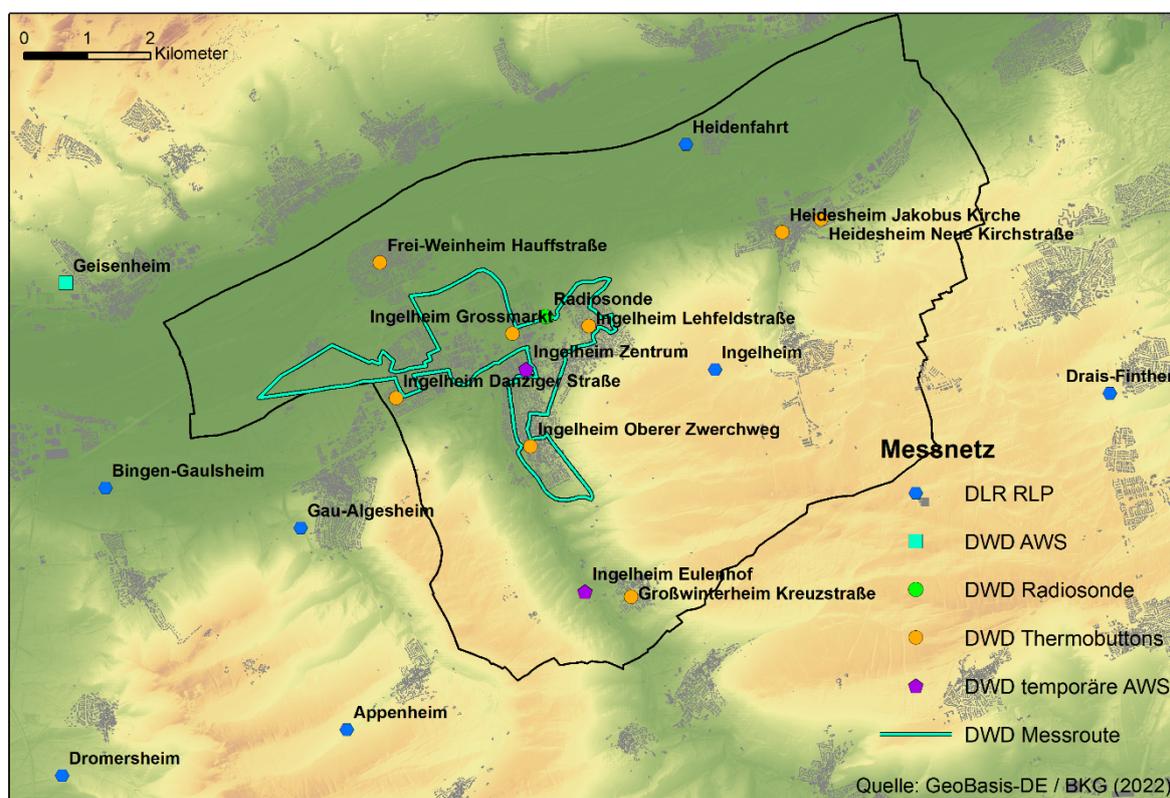


Abb. 27 Überblick über die verschiedenen Messtandorte und die Messroute im Modellgebiet.

4.1 Agrarmeteorologische Stationsmessungen

Die zum Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum des Landes Rheinland-Pfalz (DLR-RLP) gehörende „Agrarmeteorologie Rheinland-Pfalz“ betreibt über das ganze Bundesland verteilt Wetterstationen zur Erfassung verschiedener meteorologischer Parameter um den Einfluss des Wetters und Klimas auf die Landwirtschaft zu berücksichtigen und Landwirte entsprechend beraten zu können. Im Modellgebiet liegen insgesamt sieben Wetterstationen

(Tabelle 3), deren Daten hilfreich für die Interpretation und Evaluierung der Modellergebnisse sind. Alle Stationen repräsentieren ein Lokalklima, welches von städtischer Bebauung unbeeinflusst ist und die eher jeweiligen orografischen Gegebenheiten widerspiegelt. Von allen sieben Stationen stehen über den Datenaustausch der DWD Partnernetze unter anderem Messdaten der Lufttemperatur in 2 m Höhe und des Windes (Windrichtung und Windgeschwindigkeit) in 2,5 m Höhe zur Verfügung.

Tabelle 3 Tabelle der rheinland-pfälzischen agrarmeteorologischen Stationen in der Umgebung von Ingelheim am Rhein.

Station	Abkürzung	Betreiber	Länge Dezimalgrad WGS1984	Breite Dezimalgrad WGS1984	Höhe über NHN in m
Appenheim	APP	DLR-RLP	8,01825	49,92236	200
Bingen Gaulsheim	OCK	DLR-RLP	7,96418	49,95658	88
Drais-Finthen	DRA	DLR-RLP	8,18595	49,97190	211
Dromersheim	DRO	DLR-RLP	7,95554	49,91520	123
Gau-Algesheim	GAU	DLR-RLP	8,00744	49,95122	116
Heidenfahrt	HEI	DLR-RLP	8,09151	50,00694	88
Ingelheim	WAC	DLR-RLP	8,09864	49,97467	219

4.2 Städtisches Messprogramm des DWD

Die sieben rheinland-pfälzischen Stationen wurden durch die seit 1884 in Geisenheim operationell betriebene DWD Messstation am nördlichen Rheinufer ergänzt. Die letzte Verlegung der Station zu dem nun aktuellen Standort erfolgte im Jahr 2006. Bei der Station handelt es sich um eine Klimastation, die unter anderem die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte in 2 m über Grund und den Wind in 10 m über Grund misst.

Für das städtische Messprogramm wurden zwei temporäre automatische Wetterstationen (abgekürzt AWS) aufgebaut (Tabelle 4). Die Messstation am Fridtjof-Nansen-Platz ist eine typisch städtisch geprägte Innenstadt Station. An der Station wurde die Lufttemperatur mit einem PT100 und die relative Luftfeuchte in einer belüfteten Strahlungsschutzhütte in 2 m Höhe über Grund gemessen. Der Wind wurde in 2,50 m über Grund mittels Ultraschallanemometer gemessen. Die Station am Gasthof Eulenhof ist ländlich geprägt und soll helfen die Windzirkulation im Selztal zu charakterisieren. Hierzu wurde der Wind mit einem Ultraschallanemometer in einer Höhe von 10 m über Grund erfasst. Auch an dieser Station wurde die Lufttemperatur mit einem PT100 und die relative Luftfeuchte in einer belüfteten Strahlungsschutzhütte in 2 m Höhe über Grund gemessen.

Ergänzt wurden die beiden AWS Messstandorte durch acht Messstandorte (Tabelle 4) an denen die Lufttemperatur in ca. 3 m über Grund mittels eines Thermobuttons in einer unbelüfteten Strahlungsschutzhütte gemessen wurde. Ein Thermobutton ist ein 16 mm kleiner runder Temperaturlogger zur Aufzeichnung von Temperaturdaten über einen längeren Zeitraum. Die Messungen mittels Thermobuttons dienen der Erfassung der Lufttemperatur in den bebauten Gebieten der Ingelheimer Stadtteile. Die Abbildungen A1 bis A10 im Anhang dieses Berichtes zeigen für jeden temporären DWD Messstandort (AWS und Thermobutton) ein Stationsfoto und die Landbedeckung (Luftbild) im Umkreis von 100 m um die Station.

Tabelle 4 Tabelle der DWD Messstandorte

Station	Abkürzung	Messtyp	Länge Dezimalgrad WGS1984	Breite Dezimalgrad WGS1984	Höhe über NNH in m
Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz	ZEN	AWS	8,056795	49,97437	87
Ingelheim Eulenhof	EUL	AWS	8,070483	49,942579	110
Geisenheim	GEI	AWS	7,954826	49,985894	110
Frei-Weinheim Hauffstraße	HAU	Thermobutton	8,024175	49,989409	82
Heidesheim St. Philippus und Jakobus Kirche	JAK	Thermobutton	8,113037	49,99451	94
Heidesheim Neue Kirchstraße	NKI	Thermobutton	8,121608	49,99641	105
Ingelheim Danziger Straße	DAN	Thermobutton	8,02815	49,969996	91
Ingelheim Lehfeldstraße	LEH	Thermobutton	8,070585	49,98071	116
Ingelheim Großmarkt	GRO	Thermobutton	8,053676	49,979453	87
Ingelheim Oberer Zwerchweg	ZWE	Thermobutton	8,058027	49,96331	106
Großwinterheim Kreuzstraße	KRE	Thermobutton	8,08064	49,941927	121

Bei den Stationsmessungen am Fridtjof-Nansen-Platz und am Eulenhof wurden 10-Minuten Mittelwerte abgespeichert. Die Thermobuttons zeichnen hingegen im Abstand von 10-Minuten den gerade aktuell gemessenen Temperaturwert auf.

Im gesamten Messzeitraum (27.05. bis 30.09.2021) gab es technisch bedingt kürzere Messausfälle. Die Verfügbarkeit der Temperaturmessdaten lag mit 96,6 % bei der Station Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz etwas niedriger als bei der Station Eulenhof mit 100 % Datenverfügbarkeit. Die Datenverfügbarkeit für die Temperatur lag bei den DLR RLP Stationen bei 100 %, mit Ausnahme der Stationen Heidenfahrt (99,8 %) und Bingen-Gaulsheim (99,9 %). Bei den Thermobuttons wurde eine Datenverfügbarkeit von bis zu 99,6 %

erreicht, wobei an den Stationen Frei-Weinheim Hauffstraße und Ingelheim Großmarkt die Datenverfügbarkeit 95,6 % beziehungsweise 89,4 % beträgt.

4.2.1 Profilmessfahrten

Durch die temporären Stationsmessungen an einzelnen Punkten in der Stadt können nur die lokalen atmosphärischen Verhältnisse wiedergegeben werden, denn innerhalb der Bebauung können diese auf kleinstem Raum stark variieren. Unterschiedliche Nutzungsansprüche (zum Beispiel durch Verkehr, Anwohner oder Energieversorgung) erschweren zusätzlich die Standortauswahl für städtische Messstandorte mit größerer Repräsentativität. Mit insgesamt zehn über die Stadtteile verteilten Messtellen, davon acht Standorte mit Lufttemperaturmessung durch Thermobuttons, ist die „Stichprobe“ an städtischen Messtellen gut. Mitunter befinden sich die Messstandorte in Gebieten mit ähnlicher Bebauung entsprechend Versiegelungsgrad und Gebäudegrundflächenanteil aber etwas unterschiedlicher Topografie.

Ergänzend zu den temporären Stationsmessungen wurden noch drei Profilmessfahrten durchgeführt. Der Profilmesswagen des Deutschen Wetterdienstes ist an der Fahrzeugfront mit Messwertgebern in 2 m und 0,7 m Höhe zur Erfassung der Trocken- und Feuchttemperatur sowie mit einem GPS-Gerät ausgestattet (Abbildung 28). Ein Luftdruckgeber dient als Höhenmesser und liefert das Geländeprofil. Auf einer festgelegten Fahrtroute werden kontinuierlich die verschiedenen atmosphärischen Parameter sowie der Standort des Fahrzeugs im Abstand von einer Sekunde aufgezeichnet. Unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit einzelner Streckenabschnitte wurde die Messroute so gewählt, dass typische städtische Strukturen des Ingelheimer Stadtgebietes mit ihren jeweiligen lokalklimatischen Besonderheiten erfasst werden konnten.



Abb. 28 Foto des DWD Profilmesswagen.

Die drei Messfahrten wurden in der Zeit vom 2. bis 3. September 2021 durchgeführt und zwar mit einer Fahrt am späten Nachmittag, einer Fahrt in der ersten Nachthälfte und einer weiteren Fahrt zur Nachtmitte (Tabelle 5). Zu diesem Zeitpunkt prägend war ein blockierendes Hochdruckgebiet von 1035 Hektopascal (hPa) über dem Nordmeer und dem Seegebiet zwischen Island und Schottland (Abbildung A11). Ein Keil des Hochdruckgebietes erstreckte sich südostwärts nach Mitteleuropa und brachte in der Südhälfte Deutschlands und der Region Ingelheim am Rhein viele Sonnenstunden und sommerliche Tageshöchsttemperaturen. Es herrschte schwachgradientiges Wetter mit wolkenfreiem Himmel oder nur geringer Bewölkung. An der Station Frankfurt-Flughafen wurde eine windschwache Strahlungsnacht registriert.

Die gewählte Messroute ist insgesamt 24 km lang und führt durch die Stadtteile Ingelheim-West, Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim (Abbildung 29). Der Start- und Endpunkt der drei Routen war der Wohnmobilstellplatz Ingelheim in der Nähe des Freibades. Die Fahrtdauer betrug für alle drei Fahrten ca. 1 Stunde und 5 Minuten. Die Route weist eine maximale Höhendifferenz zwischen den Messpunkten von 58 m auf (Maximum = 142 m NHN, Minimum = 84 m NHN, Abbildung 29). Die Stationen Großmarkt, Lehfeldstraße, Oberer Zwerchweg,

Zentrum (Fridtjof-Nansen-Platz) und Danziger Straße sind nahe der Messroute gelegen und können somit als Vergleichsstationen herangezogen werden. Am 02.09.2021 ging die Sonne über Ingelheim am Rhein um 20:09 Uhr MESZ unter. Der Sonnenaufgang kann für den 03.09.2021 auf 6:45 Uhr MESZ datiert werden.

Tabelle 5 Übersicht der Profilmessfahrten

Datum	Uhrzeit MESZ	Mittelwert 2 m Temperatur (°C)	Maximale 2 m Temperatur (°C)	Minimale 2 m Temperatur (°C)	Mittelwert 2 m Relative Feuchte (%)
02.09.2021	17:00 – 18:00	24,4	25,6	23,3	44,5
02.09.2021	22:30 – 23:30	15,6	18,6	12,7	72,1
03.09.2021	2:20 – 3:20	12,9	14,6	9,7	89,8

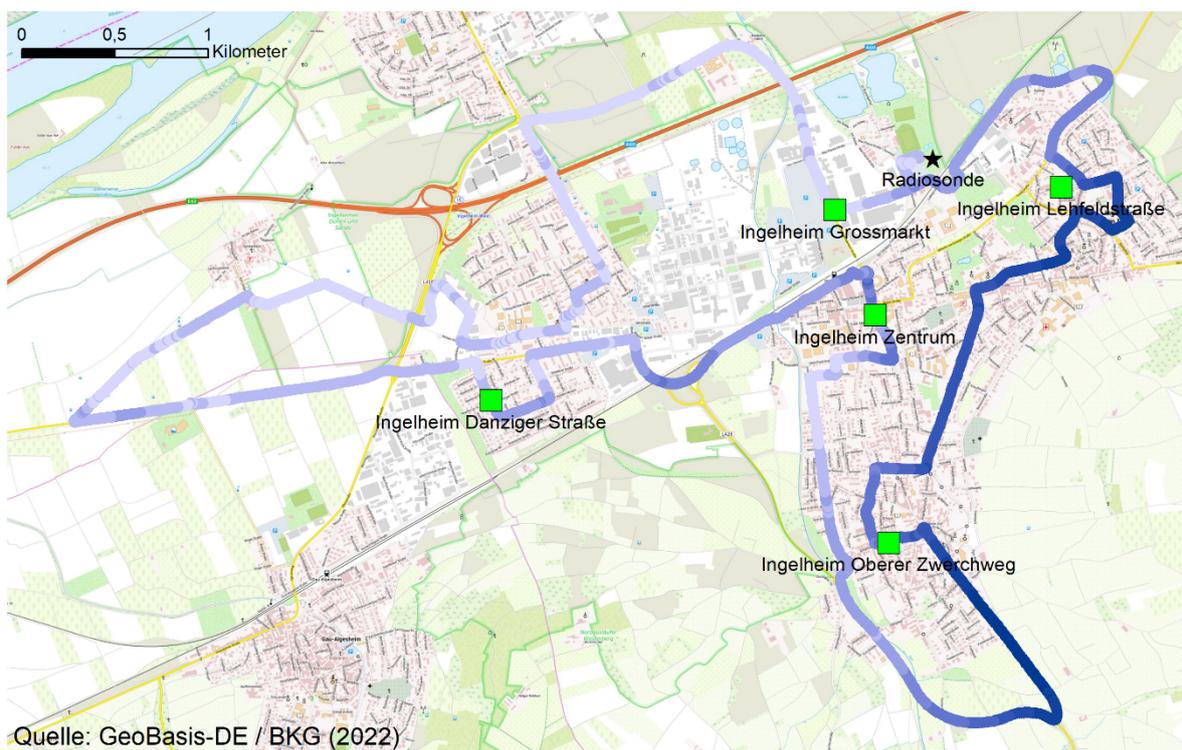


Abb. 29 Übersichtskarte der Messroute inklusive Höhenprofil (je dunkler die lila Farbe umso höher die Geländehöhe). Eingezeichnet sind die nahe der Route gelegenen Messstationen (grüne Quadrate) und der Start und Endpunkt der Route beim Startplatz der Radiosonde (Stern).

4.2.2 Radiosondenaufstiege

Eine halbe Stunde vor jeder der drei Profilmessfahrten wurde eine Radiosonde gestartet (Tabelle 6). Die Radiosonde ist ein Messgerät, das in der Aerologie eingesetzt wird. Direkt gemessen werden der Luftdruck, die Luftfeuchte und die Lufttemperatur. Indirekt wird aus dem Windversatz der Radiosonde der Höhenwind bestimmt. Die Radiosonde wird mit Hilfe eines Gasballons vom Startplatz aus bis in große Höhen befördert. Während des Aufstieges werden über die Messfühler ständig Messwerte genommen und über die Sendeeinheit an die Bodenempfangsstation übertragen. Ziel der Radiosondenaufstiege war die Bestimmung der Ausprägung der nächtlichen Kaltluftschicht im Rheintal zur Bewertung der beobachteten (modellierten) Kaltluftströmung. Der Startplatz der Radiosonde lag am Wohnmobilstelleplatz in Ingelheim, südlich des Freibades und Sportstadiums (Abbildung 29). Da nur die unteren 3000 m der atmosphärischen Grenzschicht von Interesse waren, wurde der Aufstieg jeweils bei ca. 3000 m über Grund abgebrochen.

Tabelle 6 Übersicht über die Radiosondenaufstiege

Nr.	Datum	Uhrzeit MESZ
1	02.09.2021	16:30
2	02.09.2021	22:00
3	03.09.2021	2:00

4.3 Ergebnisse der Windmessungen

Der Wind sorgt für den Luftaustausch zwischen Stadt und Umland und verringert somit beispielsweise die Unterschiede im Temperaturniveau und in der Luftqualität. Hohe Windgeschwindigkeiten führen daher zu einer geringeren Intensität der städtischen Wärmeinsel und im Allgemeinen auch zu einer geringeren Belastung mit Luftschadstoffen in den Städten. Der zur Belüftung der Städte führende Wind kann entweder durch die großräumige Wetterlage oder auch durch lokale Windsysteme bedingt sein. Diese Windsysteme werden durch kleinräumige Lufttemperatur- und Luftdruckdifferenzen aufgrund orografischer (Geländeform) oder anthropogener (Landnutzung) Gegebenheiten angeregt. Die Druckdifferenzen der großräumigen Wetterlage überlagern meist die kleinräumigen Druckdifferenzen und unterdrücken bei gradientstarken (allochtonen) Wetterlagen die lokalen Ausgleichsströmungen.

Bei großräumig windschwachen und wolkenarmen Wetterlagen (Strahlungswetterlagen) oder bei Abkopplung der bodennahen Strömung durch stabile Schichtung der Atmosphäre treten die lokalen Luftströmungen in Erscheinung und können maßgeblich zur Belüftung einer Stadt beitragen. Neben dem horizontalen Luftaustausch beeinflussen sie auch die Höhe der

Mischungsschicht und somit den vertikalen Luftaustausch über der Stadt. Während windschwacher Strahlungsächte (kurz WSSN) kühlt die Luft durch Wärmeausstrahlung des Bodens gegen den wolkenarmen Himmel kräftig ab. Unterschiede in der Lufttemperatur zwischen der Stadt und ihrem Umland (städtische Wärmeinsel) sowie zwischen den verschiedenen bebauten Stadtteilen (Landnutzung) bilden sich besonders prägnant heraus.

Für die folgenden Ergebnisdarstellungen werden deshalb die Mittelwerte sowohl über alle Termine als auch über die Termine, an denen windschwache Strahlungsächte aufgetreten sind, betrachtet. Von einer windschwachen Strahlungsnacht wird ausgegangen, wenn in der Zeit von 17 Uhr bis 5 Uhr UTC (19 Uhr bis 7 Uhr MESZ) mindestens 7 zusammenhängende Stunden oder an mindestens 10 Gesamtstunden die Windgeschwindigkeit im Stundenmittel höchstens 2,6 m/s (oder 5 Knoten) und der Bedeckungsgrad des Himmels mit Wolken höchstens 4 Achtel beträgt. Die windschwachen Strahlungsächte an der Station Frankfurt-Flughafen (WMO Kennziffer 10637) wurden für die Auswertung in diesem Bericht herangezogen.

Für den Zeitraum der Messungen vom 27.05.2021 bis 30.09.2021 wurden an der Station Frankfurt-Flughafen insgesamt 32 windschwache Strahlungsächte und drei längere Episoden mit mindestens drei aufeinanderfolgenden windschwachen Strahlungsächten identifiziert:

- Episode 1: 30.05.2021 bis 02.06.2021 (3 aufeinanderfolgende WSSN),
- Episode 2: 18.07.2021 bis 24.07.2021 (6 aufeinanderfolgende WSSN) und
- Episode 3: 31.08.2021 bis 06.09.2021 (6 aufeinanderfolgende WSSN).

Da für diesen Bericht insbesondere die Windverhältnisse im Tal der Selz zwischen Ober-Ingelheim und Großwinternheim untersucht werden sollen, wird das Hauptaugenmerk auf die Windmessung am 10 m Mast am Standort Ingelheim Eulenhof gelegt. Die Ergebnisse sollen Aufschluss darüber geben, inwieweit das Tal der Selz zur Belüftung des Stadtteils Ober-Ingelheim beiträgt und ob die Ergebnisse des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 diese Bedingungen realistisch wiedergeben.

4.3.1 Situation am Tag

Die Windrosen der einzelnen Stationen unterscheiden sich deutlich voneinander. Dies liegt insbesondere an den unterschiedlichen Standortbedingungen welche maßgeblich durch die lokale Topografie bedingt sind. Kleinere Abweichungen ergeben sich ferner durch die verschiedenen Höhen der Messwertgeber (2,5 m und 10 m über Grund).

Die Messstandorte Geisenheim, Heidenfahrt, Gau-Algesheim und Bingen-Gaulsheim liegen im oder am Rande des Rheintals, welches sich in Ostnordost-West-südwest Richtung erstreckt. Alle vier Stationen zeigen tagsüber das Maximum der Windrichtungshäufigkeit überwiegend aus westlicher Richtung (Abbildung 30). Am Standort Geisenheim weht der Wind am häufigsten aus Richtung Südsüdwest und West-südwest (210° bis 240°) und Nordnordwest (330°). Das Häufigkeitsminimum liegt bei 30° bis 60° . Der Standort Heidenfahrt zeigt ein primäres Maximum der Windrichtungshäufigkeit bei West (270°) und ein sekundäres Maximum bei nördlicher Richtung (360°). Selten treten hingegen Windrichtungen aus Südsüdost (150°) und Süd (180°) auf. Am Standort Bingen-Gaulsheim treten Windrichtungen aus West (270°) und West-südwest (240°) am häufigsten auf, sehr selten sind hingegen Windrichtungen aus südlichen Richtungen (150° , 180° und 210°). Die Station kann aus südlicher Richtung nicht frei angeströmt werden, da Bäume und zwei Gebäude in nächster Nähe stehen. Die Station Gau-Algesheim zeigt, ebenfalls wie Heidenfahrt, das Maximum der Windrichtungsverteilung bei westlichen Richtungen (270° , 300° und 240°). Südliche Windrichtungen treten ähnlich wie bei Heidenfahrt und Bingen-Gaulsheim sehr selten auf. Geprägt sind die Windmessstationen im Rheintal neben der Hauptwindströmung aus westlicher Richtung dem Rheintal folgend, insbesondere durch Winde aus nördlichen Richtungen. Durch die Tallage und die umgebenden Hügel des Rheinhessischen Hügellandes (z. B. Rheingaugebirge) wird die Luft kanalisiert und verstärkt die Windrichtungshäufigkeiten aus Südwest und Nordost.

Die am Ostrand des unteren Nahetals gelegene Station Dromersheim zeigt eine Windrichtungsverteilung mit Maxima aus Nord (360°) und Südsüdwest beziehungsweise West-südwest (210° und 240°). Diese Windrichtungsverteilung in Richtung Nord-Süd folgt dem Talverlauf. Auch die Stationen Appenheim und Ingelheim Eulenhof zeigen eine Windrichtungsverteilung die den Verlauf der Topographie des Tals des Wethbaches (ein Seitental des Welzbachtales) in Richtung Appenheim (West-südwest-Ostnordost) beziehungsweise des Tals der Selz (Südsüdosten nach Nordnordwesten) entspricht, in der die Stationen liegen. So zeigt die Station Eulenhof ihre Windrichtungshäufigkeitsmaxima aus westnordwestlicher und nordnordwestlicher (300° und 330°) und ost-südöstlicher und südsüdöstlicher Richtung (130° und 150°), welches exakt der Orientierung des Selztals entspricht. An der Station Appenheim weht der Wind am häufigsten aus west-südwestlichen Richtungen (240°), ostnordöstlichen (60°) und östlichen Richtungen (90°). Die Windrichtungsverteilung entspricht somit dem Verlauf der Talachse des Wethbaches, welche parallel zum Rheintal orientiert ist. Für die auf dem Mainzer Berg gelegene Station Ingelheim ergeben sich Hauptwindrichtungen aus West (270°) und West-südwest (240°) beziehungsweise Ostnordost (60°). Die Station Ingelheim befindet sich auf der Hochfläche des nördlichen rheinhessischen Tafel- und Hügellandes und spiegelt recht gut die großräumige,

für die Region typische Windrichtungsverteilung wieder, welche auch am Standort Frankfurt-Flughafen gemessen wird (Hauptwindrichtungen Südwest und Nordost). Die Windrichtungsverteilung an der Station Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz ist maßgeblich durch die lokale Bebauung und den Straßenverlauf geprägt. Das Windrichtungsmaximum liegt bei Süd (180°) und Südsüdost (150°). Die Messwerte der Station Drais-Finthen zeigen eine ungewöhnliche Verteilung die von der Windrichtungsverteilung an der ehemaligen nicht weit entfernten DWD Station Mainz-Finthen (Abbildung 5) deutlich abweicht. In diesem Bericht werden die Werte daher nicht weiter interpretiert, da Fehler des Messwertgebers oder lokale Barrieren nicht ausgeschlossen werden können.

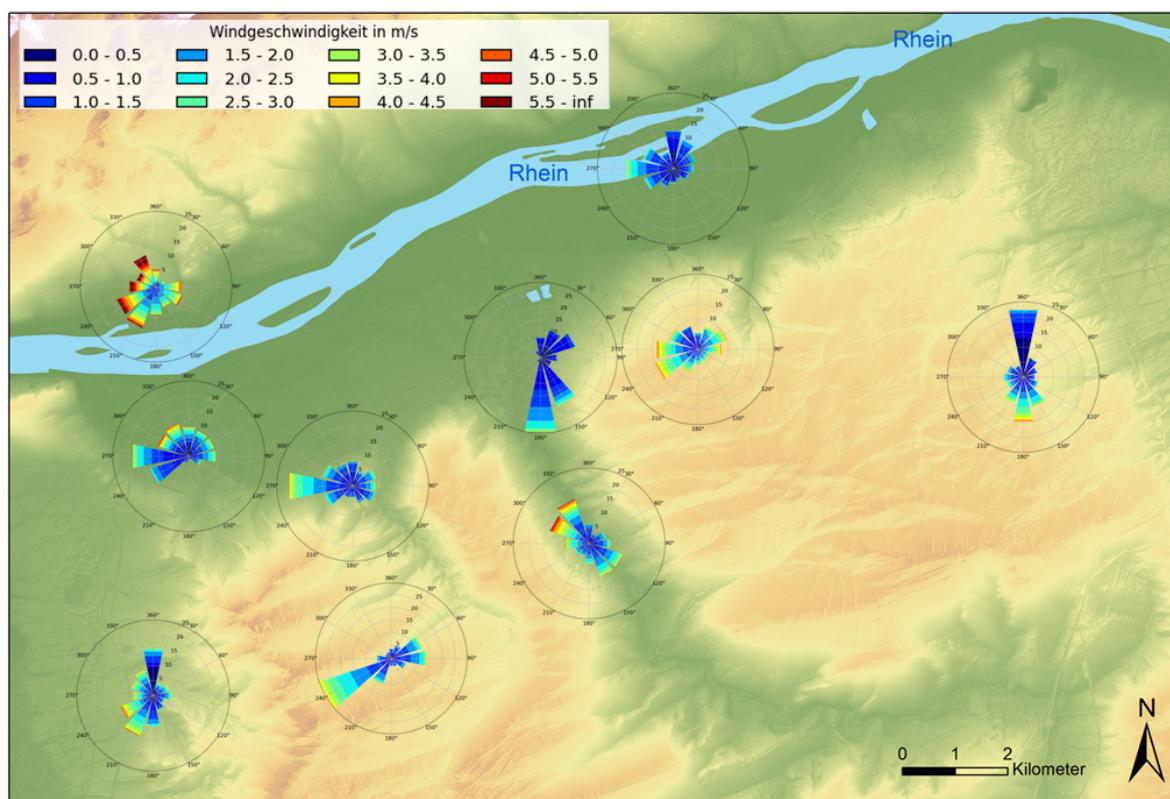


Abb. 30 Windrosen der Windmessstationen in der Region Ingelheim am Rhein für alle Tagstunden zwischen 7:00 und 18:50 Uhr MESZ im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 (ausgewertet wurden zwischen 9120 und 9144 10-Minutenwerte)

4.3.2 Situation in der Nacht

Während der Nachtstunden, wenn in den bodennahen Luftschichten die mittlere Windgeschwindigkeit aufgrund einer eher stabil geschichteten Atmosphäre abnimmt, zeigen die lokalen Luftströmungen einen starken Einfluss auf die Windrichtungsverteilung. Dies ist an den Messstationen daran erkennbar, dass die Windrichtungsverteilungen am Tag und in der Nacht stark voneinander abweichen. Die Stationen Heidenfahrt, Bingen-Gaulsheim und

Geisenheim im Rheintal sowie die Station Dromersheim im unteren Nahetal zeigen ein stark ausgeprägtes nördliches, bei Geisenheim auch nordwestliches, Maximum der Windrichtungshäufigkeit (Abbildung 31). Maßgeblich hierfür sind insbesondere Hangabwinde vom Rheingaugebirge bis ins Rheintal beziehungsweise ins untere Nahetal, die in der ersten Nachthälfte auftreten. Die Station Dromersheim zeigt während der ersten Nachthälfte auch größere Windrichtungshäufigkeiten aus östlicher Richtung, die kleinräumigere Hangabwinde vom östlich gelegenen Westerberg belegen.

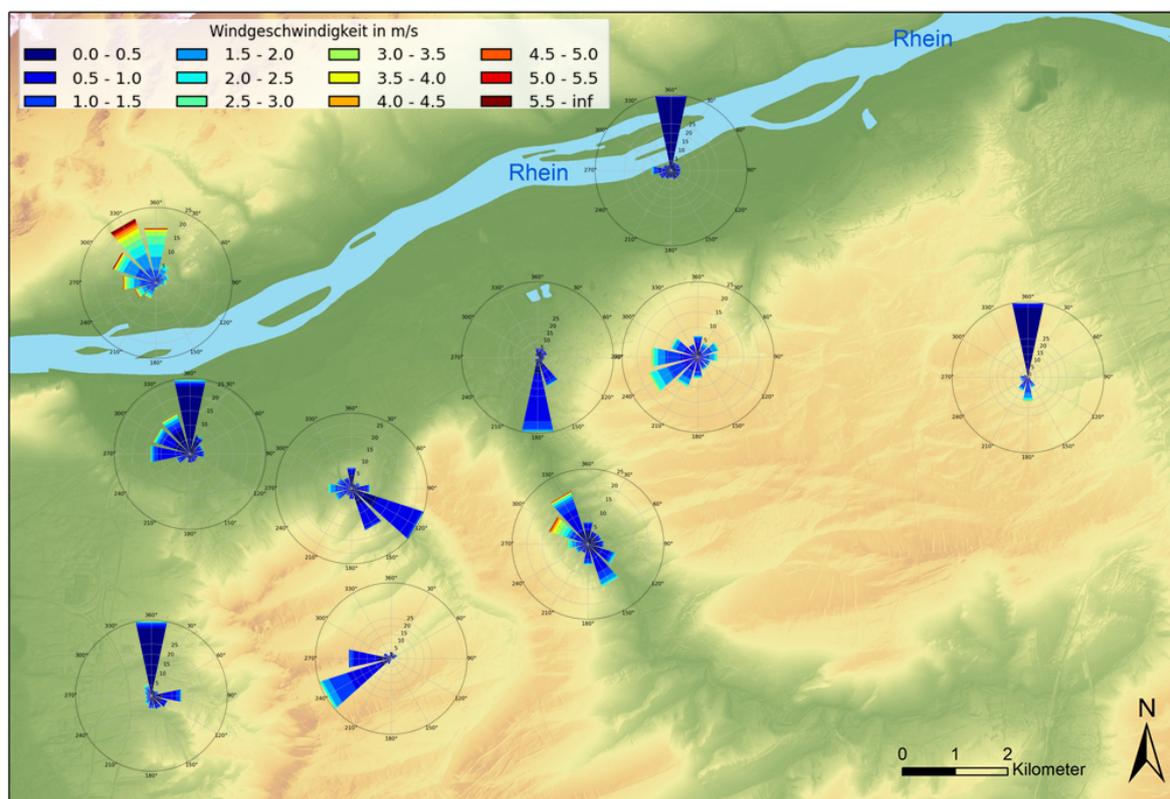


Abb. 31 Windrosen der Windmessstationen in der Region Ingelheim am Rhein für alle Nachtstunden zwischen 19:00 und 6:50 Uhr MESZ im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 (ausgewertet wurden zwischen 9110 und 9184 10-Minutenwerte)

Die Windmessstation Ingelheim zeigt eine ähnliche nächtliche Windrichtungsverteilung wie auch die ehemalige DWD Station Mainz-Finthen (Abbildung 5). In dieser exponierten Hochlage herrschen vor allem Windrichtungen aus Westsüdwest und Südsüdwest (240 und 210°) sowie aus West (270°) vor. Diese nächtliche Windrichtungsverteilung zeigt die eher überregionalen Verhältnisse.

Die Windrichtungsverteilung an den beiden Stationen Gau-Algesheim und Appenheim spiegelt die lokalen topografischen Gegebenheiten und daraus resultierende Hangabwinde oder Bergwinde wieder. Für Gau-Algesheim werden insbesondere Windrichtungen aus Ost-südost

und Südsüdost (120° und 150°) und damit aus Richtung des Tales des Welzbaches gemessen. An der Station Appenheim dominieren in der Nacht die Windrichtungen Westsüdwest (240°) und West (270°), was auf Bergwinde hindeutet, allerdings auch dem Regionalwind aus westlicher und südwestlicher Richtung entspricht. Entlang des Selztales werden auch in der Nacht am Standort Eulenhof überwiegend Winde aus Nordnordwest (330°) und Südsüdost (150°) registriert.

Während windschwacher Strahlungs Nächte verändert sich die nächtliche Richtungsverteilung der Windrichtung gegenüber allen Nächten nur wenig (Abbildung 32). Die Windgeschwindigkeiten liegen aber deutlich unter 3 m/s, mit Ausnahme der Station Geisenheim. An den Stationen Bingen-Gaulsheim und Heidenfahrt sind sowohl während der ersten als auch während der zweiten Nachthälfte (nicht gezeigt) die nördlichen Windrichtungen dominant. Ähnliches gilt für Geiseheim, wo sich besonders in der ersten Nachthälfte die nordnordwestlichen und nördlichen Windrichtungen (330° und 360°) ausprägen und in der zweiten Nachthälfte die Windrichtungen aus Westnordwest und Nordnordwest (300° und 330°) überwiegen. Es dominieren also die nördlichen Hangabwinde vom Rheingaugebirge, welche bis zur südlichen Rheinaue wirksam sind.

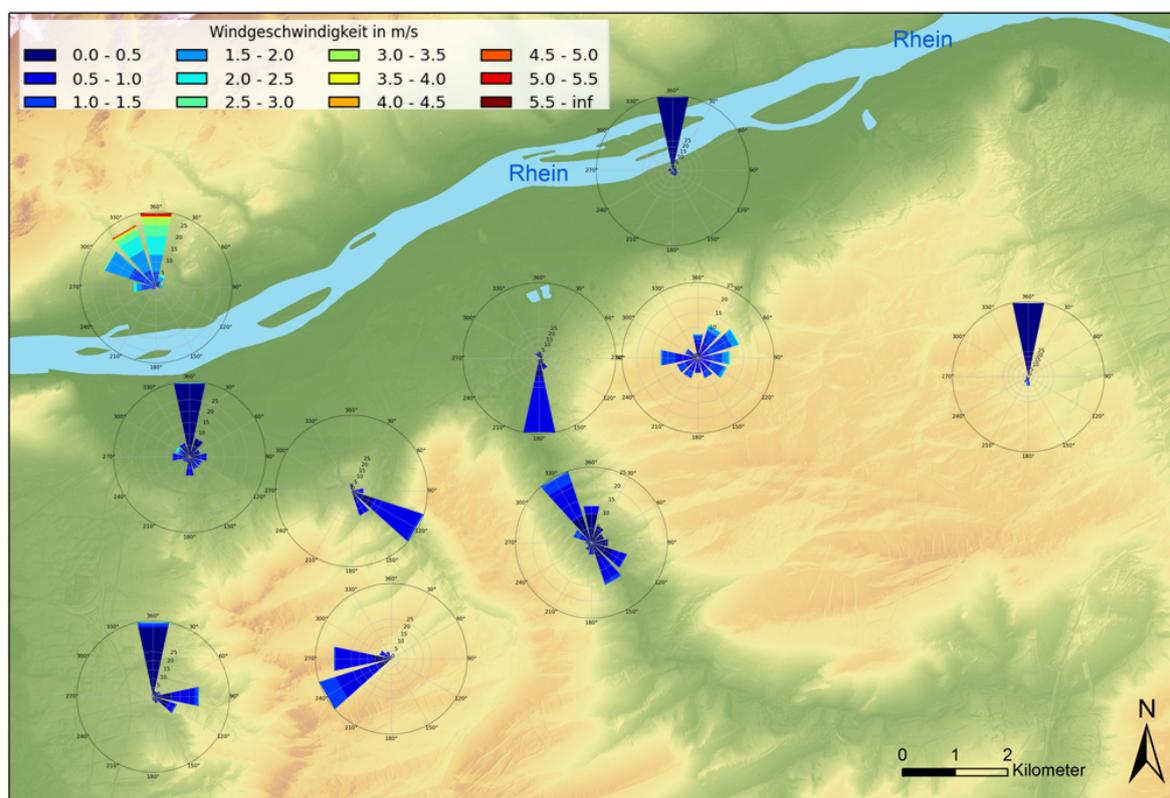


Abb. 32 Windrosen der Windmessstationen in der Region Ingelheim am Rhein für windschwache Strahlungsnächte im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 (erste Nachthälfte von 23 bis 1 Uhr MESZ, ausgewertet wurden 576 10-Minutenwerte je Station)

Für Dromersheim, Appenheim und Gau-Algesheim ergeben sich durch die Beschränkung auf windschwache Strahlungs Nächte keine wesentlichen Änderungen der nächtlichen Hauptwindrichtungen. Bei Gau-Algesheim fällt sowohl in der ersten als auch in der zweiten Nachthälfte (nicht gezeigt) auf, dass die Häufigkeiten von Windrichtungssektoren die nicht Ost-südost und Süd-südost (120° und 150°) entsprechen, auf fast Null zurückgehen. Es dominieren also die Hangabwinde und der Bergwind aus dem Tal des Welzbaches während der windschwachen Strahlungs Nächte.

4.3.3 Die Wind- und Kaltluftsituation im Tal der Selz

In diesem Kapitel soll anhand von Messdaten gezeigt werden, welche Rolle das Tal der Selz, zwischen Westerberg und Mainzer Berg gelegen (Abbildung A12), für die nächtliche Belüftung der Stadt Ingelheim am Rhein (Stadtteil Ober-Ingelheim) spielt. Hierfür werden die Ergebnisse der Station Eulenhof genauer betrachtet. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage ob im Tal der Selz eine nordwärts gerichtete Strömung vorherrscht, die während windschwacher Strahlungs Nächte zur Belüftung und Kühlung des südlich gelegenen Stadtteils Ober-Ingelheim beitragen kann.

Ein Vergleich der Windrichtungsverteilung für die Zeit von 23 Uhr bis 1 Uhr MESZ zeigt sowohl für den gesamten Untersuchungszeitraum als auch für die windschwachen Strahlungs Nächte ähnliche Windrichtungsverteilungen (Abbildung 33). Für den Gesamtzeitraum traten am Standort Eulenhof in 19 % der Fälle die Windrichtung Nordnordwest (330°) auf, gefolgt von Süd-südost (150°) mit ca. 16 % und Wind aus dem Sektor Westnordwest (300° mit ca. 11 %). Winde aus dem Sektor Westnordwest (300°) zeigen höhere Windgeschwindigkeiten von über 3 m/s. Während windschwacher Strahlungs Nächte dominieren ebenfalls aber mit einem höheren Anteil von ca. 26 % die Windrichtung Nordnordwest (330°), gefolgt von Süd-südost (150°) mit ca. 15 % Anteil. Ebenso treten mit ca. 13 % Anteil Windrichtungen aus den Sektoren Nord (360°) und Ost-südost (120°) auf. Wie bei windschwachen Strahlungs Nächten üblich, sind die Windgeschwindigkeiten eher gering und überschreiten die 2 m/s nicht. Dennoch werden vor allem aus dem Sektor Nordnordost (330°) höhere Windgeschwindigkeiten von über 1 m/s registriert.

Auch in der zweiten Nachthälfte von 2 bis 4 Uhr MESZ ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 34). Über alle Nächte dominieren die Windrichtungssektoren Nordnordwest (330°) und Süd-südost (150°). Ähnliches zeigt sich auch bei den windschwachen Strahlungs Nächten. Dominant sind nordnordwestliche (330°) Windrichtungen mit ca. 30 %, gefolgt von Süd-südost (150°) mit ca. 17 %. Auch in der zweiten Nachthälfte dominiert der Wind aus Richtung des Rheintals.

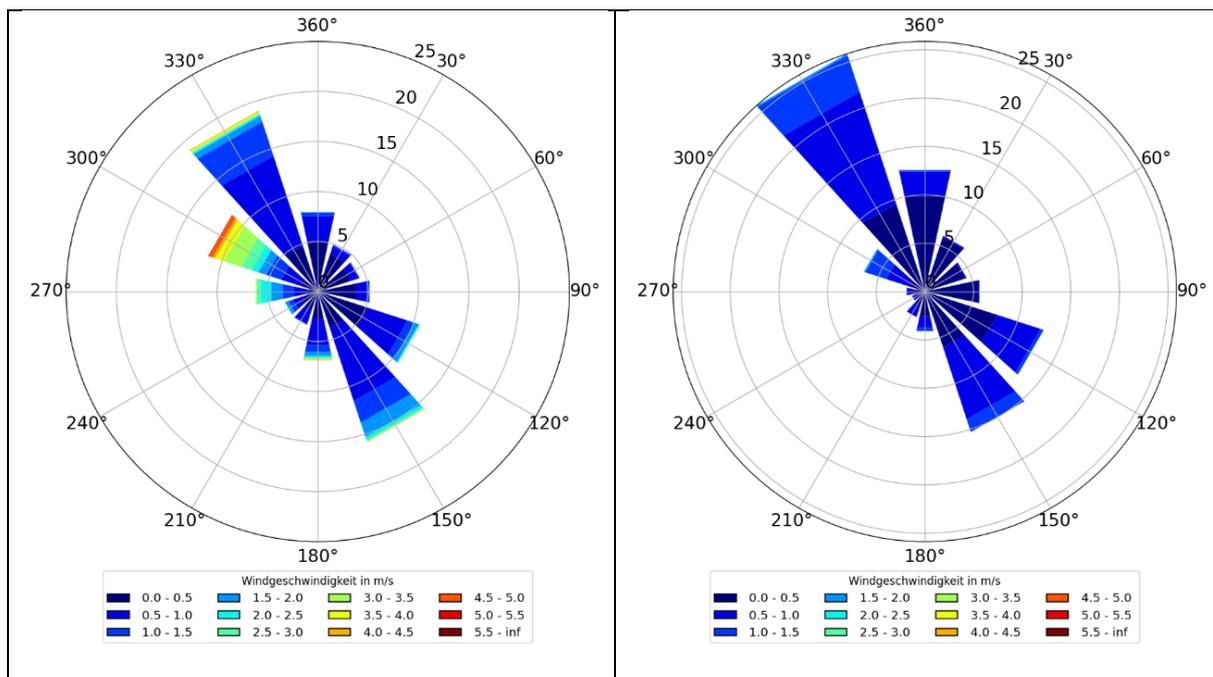


Abb. 33 Windrosen der AWS Station Ingelheim Eulenhof für den Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 von 23 bis 1 Uhr MESZ (links 2286 10-Minutenwerte und rechts 576 10-Minutenwerte für WSSN)

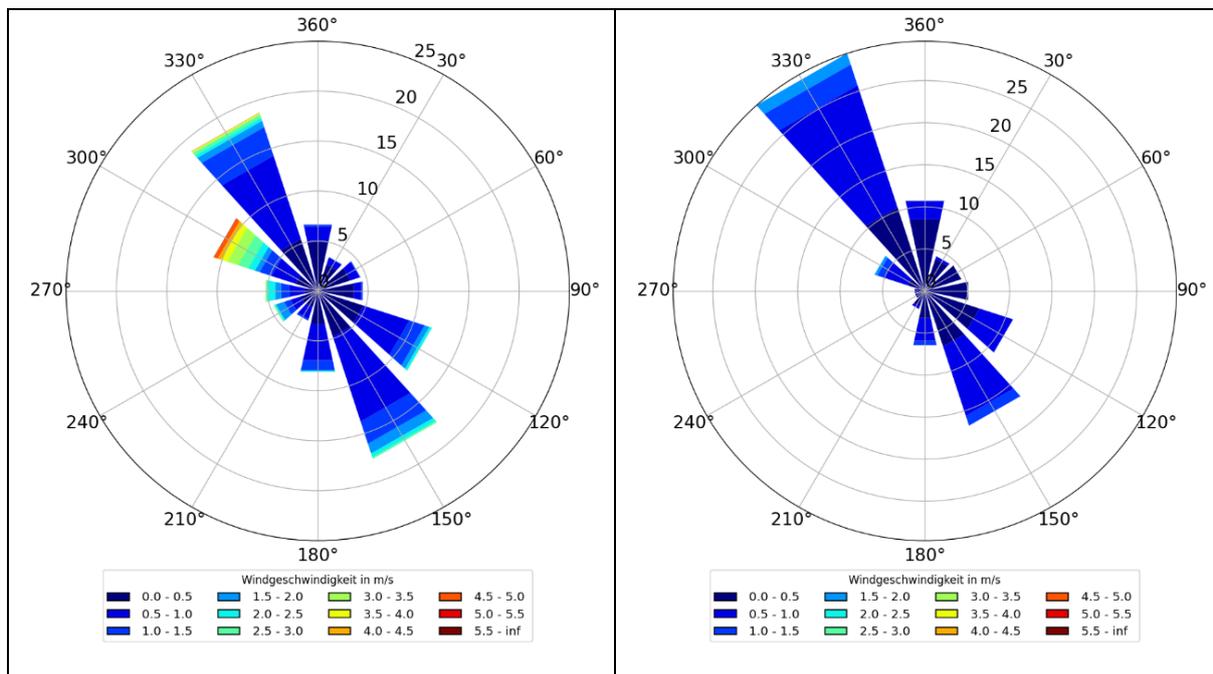


Abb. 34 Windrosen der AWS Station Ingelheim Eulenhof für den Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 von 2 bis 4 Uhr MESZ (links 2286 10-Minutenwerte und rechts 576 10-Minutenwerte für WSSN)

Die Hangneigungen erreichen im Selztal vereinzelt 15° liegen aber meist bei 5° bis 10°. Während der Nacht bildet sich an den Ost- und Westhängen (Mainzer Berg und Westerberg) des Selztales Kaltluft, die die Hänge abwärts zum Talgrund fließt und dann auf Grund des geringen Talbodengefälles sehr langsam talabwärts zur bei Ingelheim beginnenden

Rheinniederung. Der Kaltluftfluss wird im Talgrund oftmals durch Hindernisse zum Beispiel leichte Geländeerhebungen, Bewuchs oder Bebauung gehemmt, sodass sich kleinere Kaltluftansammlungen bilden können. Spätestens bei Ingelheim blockiert die städtische Bebauung den Kaltluftabfluss erheblich und führt zu einem Rückstau der Kaltluft der weit talaufwärts reichen kann. Da der Abfluss talabwärts erschwert wird und sich der Wind von den Hängen des Westerberges einen anderen Weg sucht und talaufwärts drängt, treten insbesondere während windschwacher Strahlungsnächte sehr häufig Talwinde am Standort Eulenhof auf.

4.4 Ergebnisse der Temperaturmessungen

4.4.1 Vergleich der Messergebnisse der Lufttemperatur von Thermobutton und von PT100 Sensor

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der Temperaturmessungen zwischen einem PT100 Element und einem Thermobutton verglichen, um die Qualität der Messungen mit den Thermobuttons einschätzen zu können. Die Messung mit dem PT100 gilt hierbei als Referenz mit hoher Genauigkeit. Im Zeitraum vom 17.06.2021 bis 30.09.2021 wurden am Standort Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz parallel Messungen der Lufttemperatur mit einem PT100 Element in einer belüfteten Strahlungsschutzhütte und mit einem Thermobutton in einer unbelüfteten Strahlungsschutzhütte durchgeführt. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben unterscheiden sich die Messungen ebenfalls noch darin, dass die PT100 Werte als 10-Minutenmittelwerte abgespeichert werden, während bei den Thermobuttons alle 10-Minuten die aktuell gemessenen Werte abgespeichert werden. Weiterhin liegt die Messhöhe bei den Thermobuttons mit ca. 3 m über Grund etwas höher als die Standardhöhe von 2 m. Diese Messhöhe war notwendig um die Thermobuttons vor Vandalismus und Diebstahl zu schützen.

Wie Abbildung 35 zeigt, liegt die gemessene Lufttemperatur des Thermobuttons immer etwas über der Temperatur des belüfteten PT100 Sensors. In den Abend- und Nachtstunden liegt die Temperaturdifferenz bei 0,2 bis 0,3 Kelvin. Über den Tag steigt die Temperaturdifferenz kontinuierlich an und erreicht zwischen etwa 11 Uhr und 15 Uhr MESZ ihr Maximum von ca. 1,4 Kelvin. Danach sinkt die Temperaturdifferenz langsam wieder ab und erreicht gegen 18 bis 19 Uhr MESZ wieder Werte um die 0,2 bis 0,3 Kelvin.

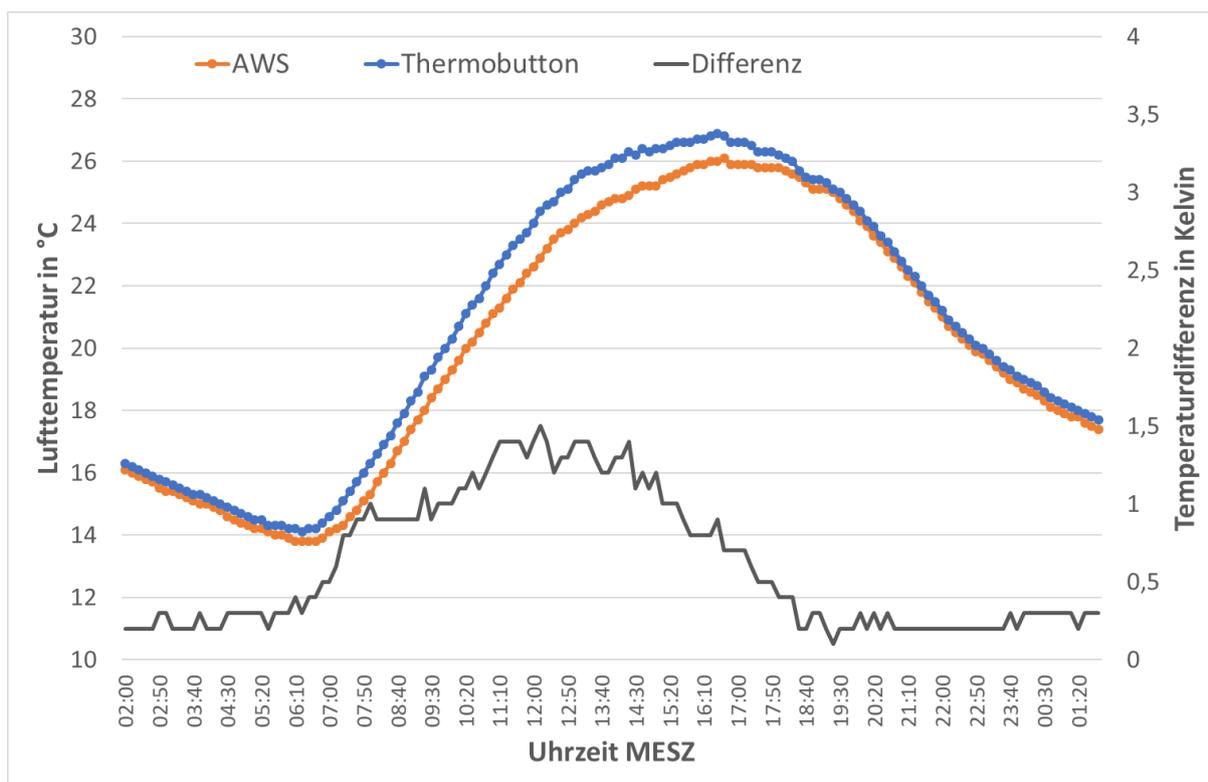


Abb. 35 Vergleich der mittleren Tagesgänge der Temperatur (AWS mit belüfteten und strahlungsgeschütztem PT100 und Thermobutton) während windschwacher Strahlungsnächte an der Station Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz

Der Tagesgang der Temperaturdifferenz zeigt deutlich, dass mit einem Einfluss der fehlenden Belüftung auf die Lufttemperatur des Thermobuttons zu rechnen ist. Die Lufttemperatur wird am Tag, wenn der Einfluss der Strahlung am größten ist, deutlich überschätzt. Dies kann auch zu einer Überschätzung der Anzahl von Kenntagen führen, die auf Tagesmaximumtemperaturmessung mittels Thermobutton beruhen. Ein Vergleich der Anzahl der Kenntage an der Station Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz für den Zeitraum 17.06. bis 30.09.2021 (nur vollständige Tage mit 144 10-Minutenwerten) belegt dies. So lag die Anzahl der Sommertage (ein Tag an dem das Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C beträgt) für diesen Zeitraum aus Messdaten des Thermobuttons bei 53 Tagen, im Vergleich zu 40 Tagen aus Daten des belüfteten PT100 Sensors. Auch die Anzahl Heiße Tage (ein Tag an dem das Maximum der Lufttemperatur ≥ 30 °C beträgt) wurde durch die Thermobutton Messung mit 9 Tagen gegenüber 6 Tagen aus belüfteter PT100 Messung überschätzt. Die Anzahl der Tropennächte (eine Nacht in der das Minimum der Lufttemperatur zwischen 18 UTC bis 06 UTC ≥ 20 °C beträgt) lag für beide Messgeräte bei 3 Nächten.

Um die Überschätzung der Kenntage basierend auf der Maximumtemperatur an den Stationen mit den Messungen der Thermobuttons zu korrigieren, wurden die Anzahl der Sommertage und der Heißen Tage nach unten korrigiert. Hierzu wurde der Faktor genommen, der sich aus

den Messergebnissen an der Station Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz für die Sommertage (Faktor = 0,755) und Heißen Tage (Faktor = 0,667) ergibt. Da ein Strahlungsfehler für den Zeitraum des Auftretens der Minimumtemperatur ausgeschlossen werden kann und die Vergleichsmessungen die gleiche Anzahl an Tropennächten ergab, wird auf die Korrektur der Zahl der Tropennächte verzichtet.

4.4.2 Lufttemperatur und thermische Kenntage

Die Stationsmessungen dienen vor allem dazu, typische klimatische Unterschiede zwischen dem Umland und der Stadt beziehungsweise innerhalb der Stadt zu analysieren. Die in diesem Kapitel präsentierten Ergebnisse basieren alle auf der Auswertung der 10-Minutenwerte im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021. Da es in der vorliegenden Untersuchung um sommerliche Verhältnisse und die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel und die nächtliche Abkühlung geht, werden neben dem gesamten Messzeitraum auch das Tagesminima und die mittlere Abkühlungsrate zwischen 21 Uhr und 4 Uhr über die Sommermonate (Juni, Juli und August) betrachtet (Tabelle 7).

Tabelle 7 Mittleres Tagesminima und mittlere Abkühlung der Lufttemperatur zwischen 21 Uhr und 4 Uhr für den Zeitraum Juni, Juli und August 2021 in Ingelheim und Umgebung

Station	Stationstyp	Mittleres Tagesminimum in °C	Mittlere nächtliche Abkühlung in °C zwischen 21 bis 4 Uhr
DLR RLP Appenheim	Umland	12,9	4,0
DLR RLP Drais-Finthen	Umland	13,3	3,8
DLR RLP Dromersheim	Umland	13,5	4,8
DLR RLP Gau-Algesheim	Umland	13,0	4,4
DLR RLP Bingen-Gaulsheim	Umland	13,5	4,6
DLR RLP Heidenfahrt	Umland	12,8	4,8
DLR RLP Ingelheim	Umland	13,3	3,8
DWD Geisenheim	Umland	14,2	3,3
DWD Eulenhof	Umland	12,2	4,6
DWD Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz	Stadt	15,3	5,0
Frei-Weinheim Hauffstraße	Stadt	15,6	3,8
Heidesheim Jakobus Kirche	Stadt	14,8	3,6
Heidesheim Neue Kirchstraße	Stadt	14,9	3,7
Ingelheim Danziger Straße	Stadt	14,9	4,0
Ingelheim Lehfeldstraße	Stadt	15,8	3,7
Ingelheim Großmarkt	Stadt	15,4	3,4
Ingelheim Oberer Zwerchweg	Stadt	15,2	3,8
Großwinterheim Kreuzstraße	Stadt	14,2	3,4

Das mittlere Tagesmittel der Sommermonate Juni, Juli und August (JJA) lag an den Umlandstationen zwischen 18,4 °C und 19,5 °C (nicht gezeigt). Im Durchschnitt war es im Umland um die 1,5 Kelvin kühler als in den bebauten Gebieten. Hier lag das mittlere Tagesmittel der Sommermonate zwischen 20,1 °C und 20,7 °C. In den mittleren Sommertemperaturen zeigt sich an den Umlandstationen sehr schön die Abnahme der Temperatur mit der Höhe. So lag die Temperatur an den höher gelegenen Stationen bei 18,4 °C bis 18,7 °C, während die Mitteltemperaturen im Rheintal mit 19,2 °C bis 19,5 °C etwas höher waren.

Im Mittel wurden an den Umlandstationen 50 Sommertage (Tage mit einer Maximumtemperatur höher oder gleich 25 °C) gemessen (Abbildung 36). Die niedrigste Zahl an Sommertagen (41-43 Tage) trat an den höher gelegenen Stationen Appenheim, Ingelheim und Drais-Finthen auf. Die niedrig gelegenen Stationen im Rheintal (Heidenfahrt, Bingen-Gaulsheim und Dromersheim) zeigen hingegen eine höhere Anzahl an Sommertagen (56-61 Tage). In der Region wurden im Mittel 7 Heiße Tage (Tage mit einer Maximumtemperatur höher oder gleich 30 °C) gemessen. Auch bei den Heißen Tage zeigt sich deutlich die Temperaturabnahme mit der Höhe in den Messdaten (Abbildung 37). So wurden auf den Höhenlagen nur 4 bis 5 Heiße Tage verzeichnet, während im Rheintal 9 bis 11 Tage gemessen wurden. Die Anzahl der Tropennächte ist mit einer Nacht an allen Stationen gleich, Ausnahme ist die Station Ingelheim mit 2 Tropennächten (Abbildung 38). Das mittlere Tagesminima über die drei Sommermonate lag bei den Umlandstationen im Mittel bei 13,2 °C (12,2 °C bis 14,2 °C). Die Abkühlung zwischen 21 Uhr abends und 4 Uhr morgens lag zwischen 3,3 °C in Geisenheim und 4,8 °C in Heidenfahrt (Tabelle 7).

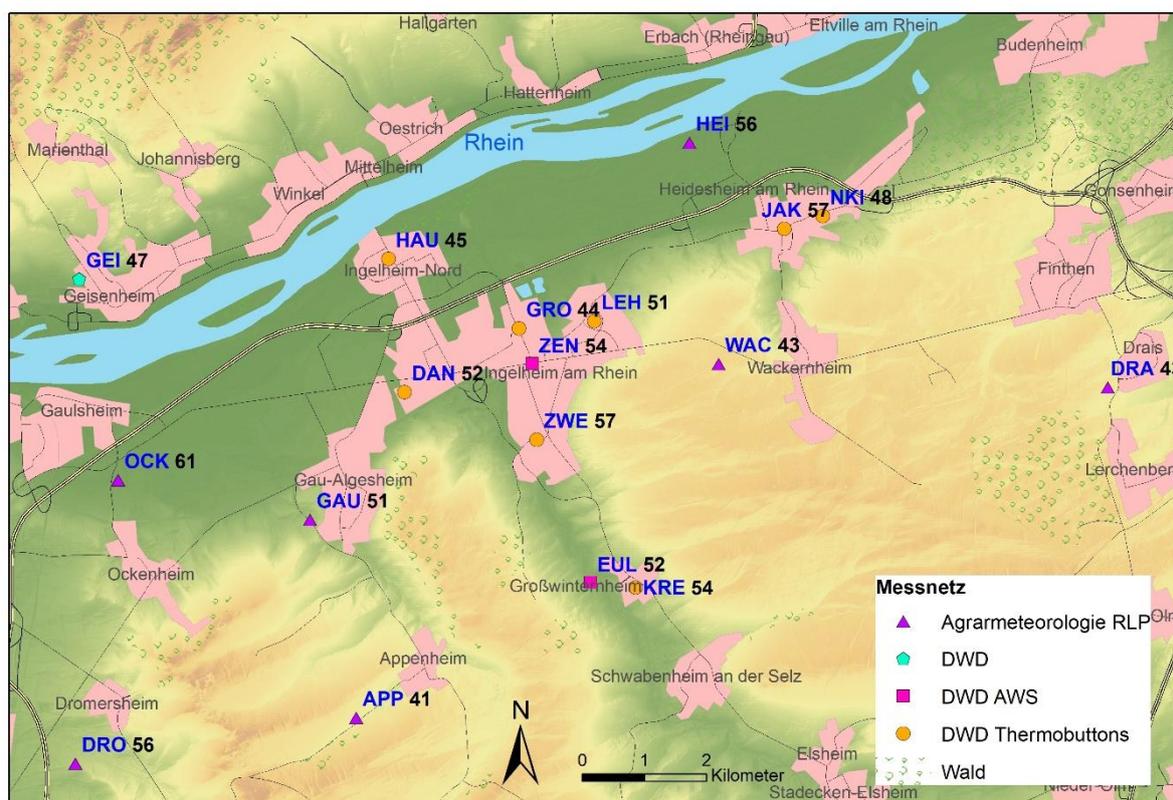
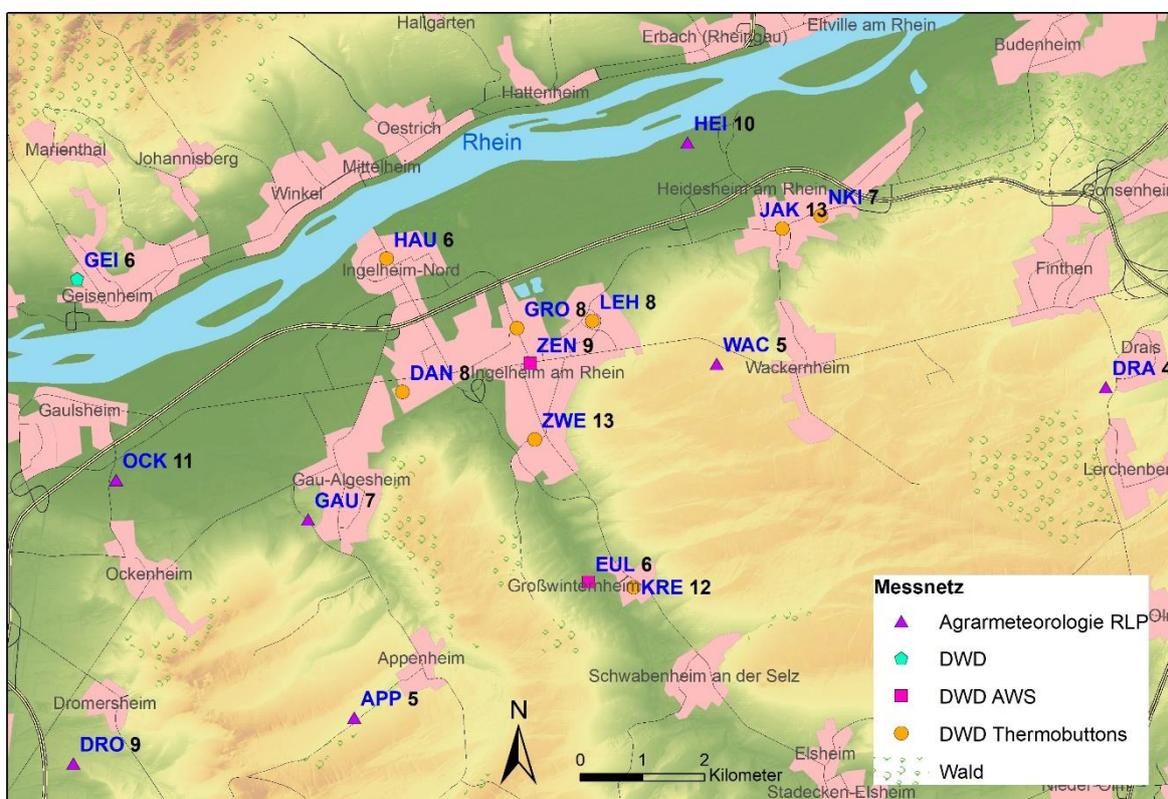


Abb. 36 Anzahl Sommertage ($T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 in der Region Ingelheim am Rhein (Abkürzungen der Stationen siehe Tabelle 4).

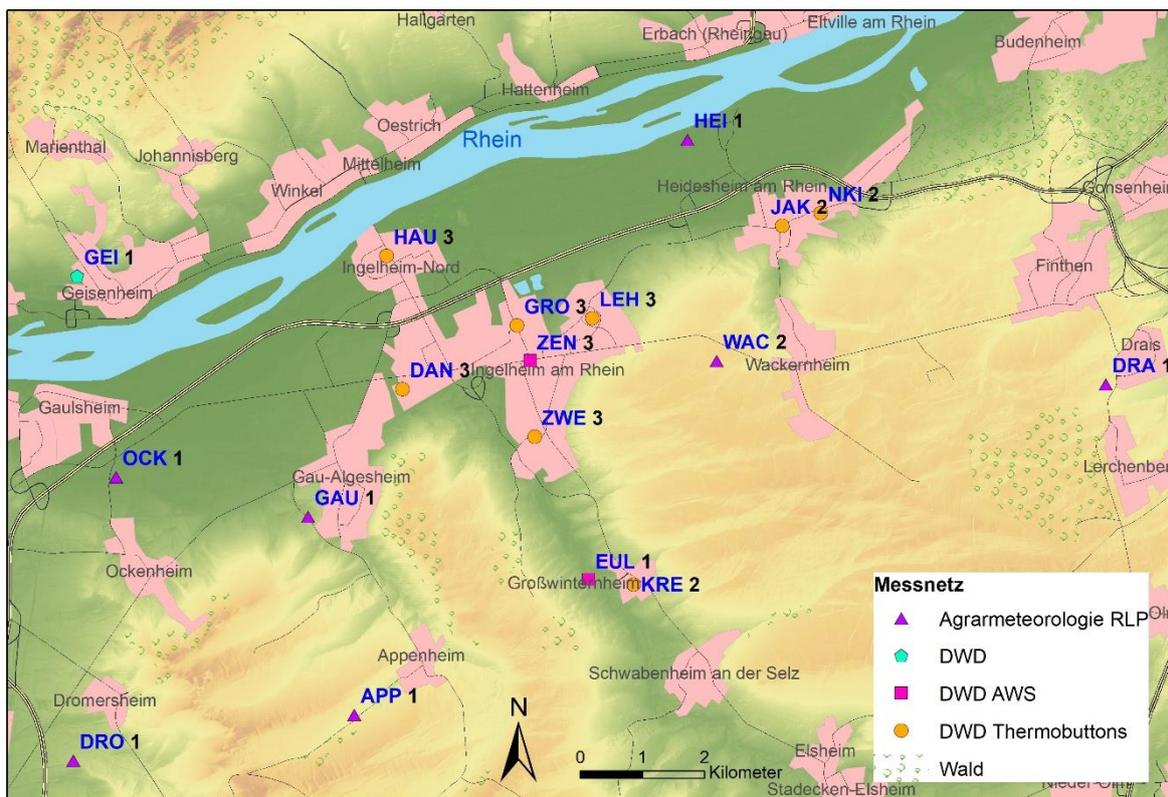
Mit durchschnittlich 51 Tagen liegt die Anzahl der Sommertage in bebautem Gebiet nur wenig höher. Die höchste Anzahl an Sommertagen (54 bis 57 Tage) wurde an den städtischen Stationen Heidesheim St. Philippus und Jakobus Kirche, Ingelheim Oberer Zwerchweg, Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz und Großwinternheim Kreuzstraße erfasst (Abbildung 36). Diese vier Stationen zeigen auch die höchste Anzahl an Heißen Tagen (9 bis 13 Tage). Die drei Stationen Ingelheim Großmarkt, Frei-Weinheim Hauffstraße und Heidesheim Neue Kirchstraße haben mit 44 bis 48 Sommertagen die niedrigste Anzahl an Sommertagen. Die Stationen Frei-Weinheim Hauffstraße und Heidesheim Neue Kirchstraße haben mit 6 bzw. 7 Tagen auch eine deutlich niedrigere Anzahl an Heißen Tagen (Abbildung 37). Die geringere Anzahl der Kennwerte Sommertage an den Stationen Ingelheim Großmarkt und Frei-Weinheim Hauffstraße kann allerdings auch darauf zurückzuführen sein, dass an den Stationen längere Datenausfälle vorhanden waren. Bei beiden Stationen fielen diese in Zeiträume an denen die anderen Stationen Sommertage registriert hatten. Dies gilt auch für die Anzahl der Heißen Tage, die an den zwei genannten Stationen und an der Station Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz deshalb unterschätzt wird. Die Anzahl der Tropennächte ist mit durchschnittlich 3 Nächten in bebauten Gebieten etwas höher als im

unbebauten Umland (Abbildung 38). Anhand der Tropennächte zeigt sich auch der Temperaturunterschied zwischen Stadt und ihrem Umland, auch bekannt unter dem Begriff der städtischen Wärmeinsel, besonders deutlich. Die mittleren Tagesminima liegen an den Stadtstationen zwischen 14,2 °C in der Kreuzstraße in Großwinterheim und 15,8 °C in der Lehfeldstraße. Die Werte sind damit um 1,9 Kelvin höher als die Werte der Umlandstationen und spiegeln ebenfalls die überwärmten Verhältnisse in der Stadt wieder. Die Abkühlung zwischen 21 Uhr abends und 4 Uhr morgens ist in der Stadt etwas geringer im Vergleich zu den Umlandstationen. Sie lag in der Stadt zwischen 3,4 °C in der Kreuzstraße in Großwinterheim und 5,0 °C am Fridtjof-Nansen-Platz (Tabelle 7).



Quelle: GeoBasis-DE / BKG (2021), Datenlizenz Deutschland – DLM 25 – Version 2.0, <http://www.dcat-ap.de/def/licenses/dl-by-de/2.0>

Abb. 37 Anzahl Heiße Tage ($T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 in der Region Ingelheim am Rhein (Abkürzungen der Stationen siehe Tabelle 4)



Quelle: GeoBasis-DE / BKG (2021), Datenlizenz Deutschland – DLM 25 – Version 2.0, <http://www.dcat-ap.de/de/def/licenses/dl-by-de/2.0>

Abb. 38 Anzahl Tropennächte ($T_{min} \geq 20^{\circ}C$) im Zeitraum 27.05. bis 30.09.2021 in der Region Ingelheim am Rhein (Abkürzungen der Stationen siehe Tabelle 4)

Um einen besseren Überblick über die Temperaturunterschiede in den bebauten Gebieten zu bekommen, wurde ein mittlerer Tagesgang für jede der temporären DWD Stationen in bebautem Gebiet und im Selztal erstellt. Es wurden nur Tage in den Sommermonaten Juni, Juli und August 2021 herangezogen, an denen an der Station Frankfurt-Flughafen eine windschwache Strahlungsnacht verzeichnet wurde.

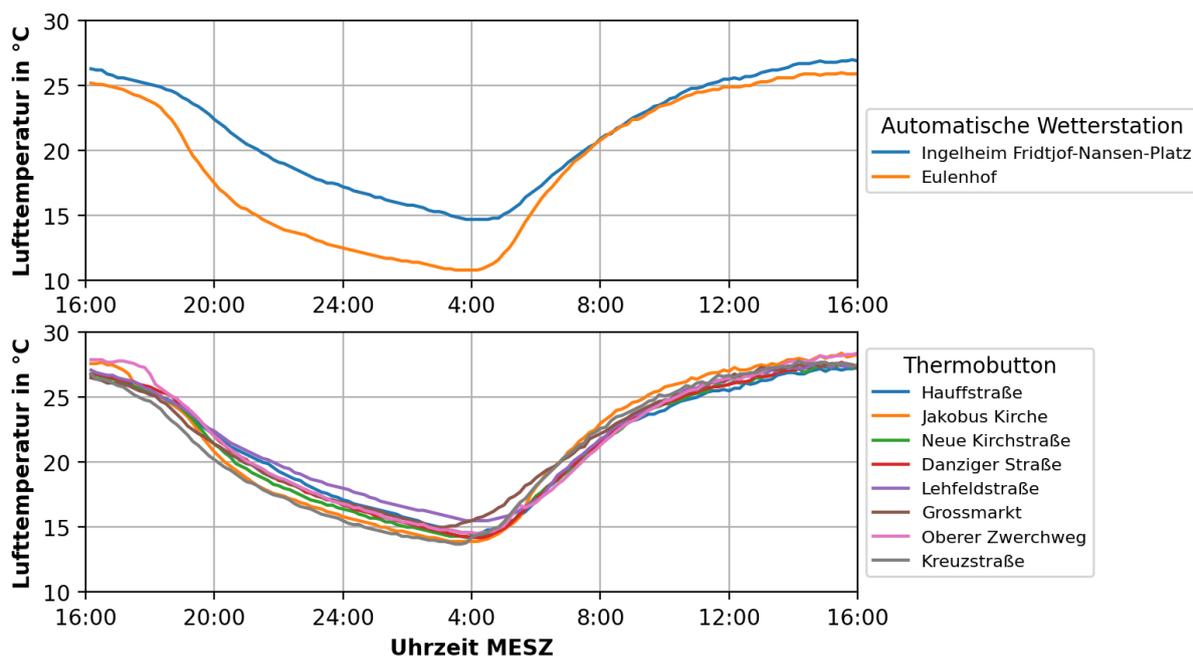


Abb. 39 Mittlerer Tagesgang der Lufttemperatur an den 10 temporären DWD Messstandorten (oben belüftetes PT100, unten Thermobutton) in Ingelheim am Rhein während windschwacher Strahlungsnächte für Tage im Juni, Juli und August.

Um 17 Uhr MESZ (Abbildung 39), zu Zeiten der Maximumtemperatur an den meisten Stationen, liegen die Lufttemperaturen an den verschiedenen städtischen Messstationen um bis zu 1,6 Kelvin auseinander (höchste Lufttemperatur 27,9 °C und kühlsste Lufttemperatur 26,3 °C). Betrachtet man nur die acht Stationen mit den Thermobuttons, dann ist die Temperaturdifferenz im Mittel zwischen den Stationen mit 1,1 Kelvin etwas geringer. Dies ist auf den Messfehler durch die fehlende Belüftung zurückzuführen, weshalb die Stationen mit dem PT100 und dem Thermobutton getrennt betrachtet werden. Im Mittel über alle städtischen Stationen liegt die Lufttemperatur bei 27,0 °C. Die Stationen Ingelheim Oberer Zwerchweg und Heidesheim Jakobuskirche sind mit 27,7 °C die zwei Stationen mit den höchsten Lufttemperaturen. Etwas geringere Lufttemperaturen aber immer noch über oder gleich dem Mittelwert wurden an der Danziger Straße (27,0 °C) und der Lehfeldstraße (27,1 °C) gemessen. Mit 26,3 °C am kühlssten ist die Lufttemperatur an der Station Zentrum (Fridtjof-Nansen-Platz). 1 °C kühler als der Fridtjof-Nansen-Platz ist die Station Eulenhof im Umland der Stadt. Beide Temperaturmesssysteme sind belüftet, wodurch sich die geringeren Lufttemperaturen ergeben. Die Station Eulenhof ist außerdem eine Umland Station. Die Temperaturdifferenz beider Stationen wird herangezogen um den städtischen Wärmeineffekt von Ingelheim am Rhein zu bewerten. Dieser ist mit 1 Kelvin tagsüber gering.

Um 22 Uhr MESZ (Abbildung 39), also kurz nach Sonnenuntergang unterscheiden sich die Lufttemperaturen an den verschiedenen Stationen sehr viel deutlicher als um 17 Uhr MESZ. Die gemittelte Temperaturdifferenz zwischen der wärmsten (22,9 °C) und kühlgsten (20,7 °C) städtischen Station beträgt jetzt 2,2 Kelvin. Im Mittel über alle städtischen Stationen liegt die Lufttemperatur bei 22,2 °C. Die höchsten Temperaturen werden am Fridtjof-Nansen-Platz (22,9 °C), an der Lehfeldstraße (22,8 °C), Danziger Straße (22,7 °C), Oberer Zwerchweg (22,7 °C) und in der Hauffstraße (22,6 °C) gemessen. Die niedrigsten Temperaturen werden an den Stationen Großwinterheim Kreuzstraße (22,1 °C) und Heidesheim Jacobus Kirche (21,6 °C) registriert. Diese beiden Standorte erfahren sehr wahrscheinlich eine rasche Abkühlung die auf lokale Hangabwinde und damit das Heranföhren kühlerer Luft zurückzuführen ist. Im Falle der Station Heidesheim Jakobuskirche kommen die Hangabwinde aus Richtung Mainzer Berg den Wildgraben entlang. Im Falle der Station Großwinterheim Kreuzstraße kommt die Abkühlung zum einen durch Hangabwinde vom Westerberg und Mainzer Berg hinunter in das Selztal und zum anderen durch die Talwinde entlang des Selztals. Die städtische Wärmeinsel als Temperaturunterschied zwischen der Station Fridtjof-Nansen-Platz (22,9 °C) und der Station Eulenhof (18,3 °C) beträgt um diese Zeit 4,6 Kelvin. Dieser Temperaturunterschied ist deutlich größer zu Beginn der Nacht als am Tag. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Umland bereits eine Abkühlung der unteren Atmosphärenschichten vom Boden her einsetzt, während in der Stadt die Abkühlung wesentlich später einsetzt und langsamer vonstattengeht. Grund hierfür ist unter anderem die große Menge an Energie die in den Gebäuden gespeichert ist und langsam als Wärmestrahlung im Laufe der Nacht an die Atmosphäre abgegeben wird.

Um 6 Uhr MESZ (Abbildung 39) in der Zeitspanne, wenn die Minimumtemperatur registriert wird, beträgt die über alle städtischen Stationen gemittelte Lufttemperatur 14,6 °C. Die höchsten Lufttemperaturen werden mit 15,6 °C an der Lehfeldstraße und mit 15,4 °C am Großmarkt gemessen. Die kühlgsten Lufttemperaturen treten mit 13,9 °C an den Stationen Heidesheim Jacobus Kirche und Großwinterheim Kreuzstraße auf. Die Lufttemperaturdifferenz zwischen den städtischen Stationen beträgt im Mittel 1,8 Kelvin und liegt damit zwischen den Werten von 17 Uhr MESZ und 22 Uhr MESZ. Die städtische Wärmeinsel als Temperaturdifferenz zwischen Fridtjof-Nansen-Platz (14,8 °C) und Eulenhof (10,8 °C) beträgt 4 Kelvin und ist nun etwas geringer als zu Beginn der Nacht aber deutlich höher als am Tag.

Ein Vergleich des Temperaturverlaufes über die mehrtägige WSSN Episode im Juli ist in Abbildung 40 dargestellt. Für alle Stadtstationen und alle Umlandstationen wurde ein Temperaturmittelwert basierend auf aggregierten Stundenwerten gebildet. Beginnend am 20. Juli, ein Tag nach dem ersten Auftreten einer windschwachen Strahlungsnacht, steigen die Temperaturen sowohl an den Umlandstationen als auch an den Stadtstationen kontinuierlich

von Tag zu Tag an. Am 20. Juli liegen die Maximumtemperaturen im Mittel für die Umlandstationen bei 24,4 °C und im Mittel für die Stadtstationen bei 26,4 °C. Zum 21. Juli steigen die Maximumtemperaturen um ein weiteres Grad an, zum 22. Juli dann nur noch um wenige Zehntel Grad. Am 23. Juli wird es im Raum Ingelheim am Rhein noch deutlich wärmer. Die gemittelte Maximumtemperatur der Umlandstationen liegt nun bei 27,1 °C und die der Stadtstationen bei 29,1 °C. Die Tageshöchsttemperaturen nehmen zum 24. Juli 2021 wieder deutlich ab und erreichen nur noch 22,7 °C (mittlere Temperatur der Umlandstationen) beziehungsweise 23,7 °C (mittlere Temperatur der Stadtstationen). Auch die Minimumtemperatur der Umlandstationen (Stadtstationen) steigen in besagtem Zeitraum deutlich an, von 11,5 °C (13,7 °C) am 20. Juli bis auf 15,0 °C (16,9 °C) am 24. Juli.

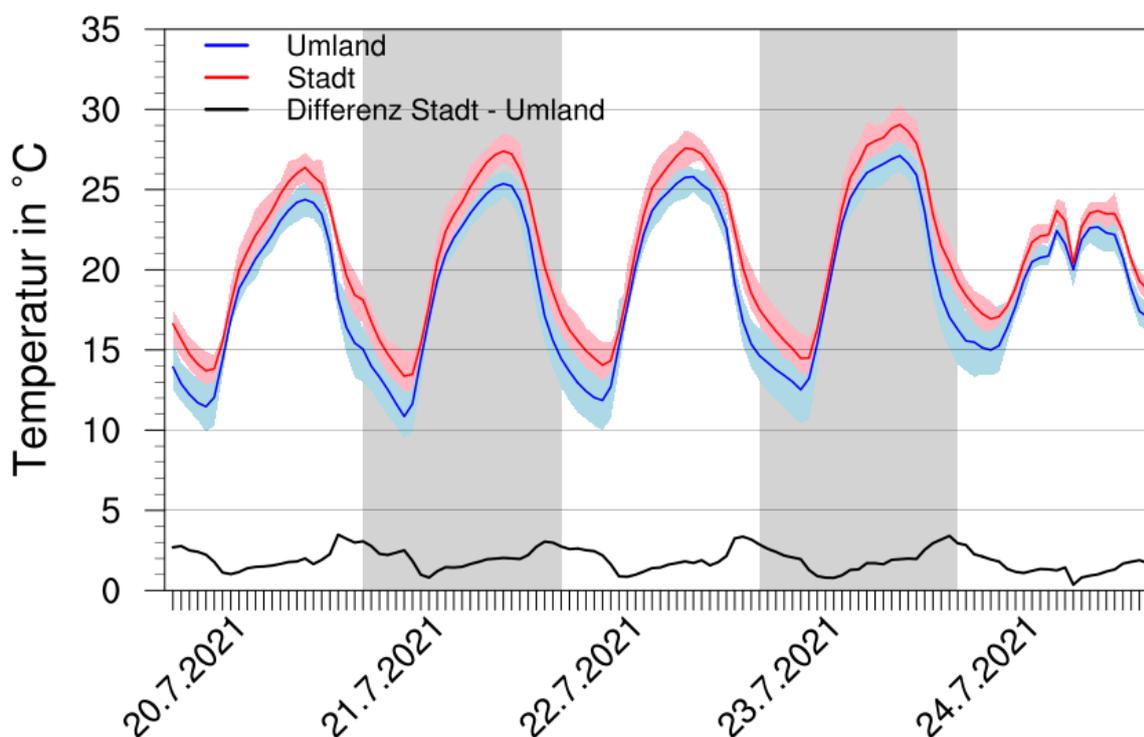


Abb. 40 Gemittelter Tagesgang der Lufttemperatur an den Stadtstationen (rot) und Umlandstationen (blau) und deren Differenz (schwarz, städtische Wärmeinsel) für die WSSN Episode vom 20. Juli bis 24. Juli 2021.

Interessant ist der Verlauf der Differenz der Temperaturkurven zwischen den Stadtstationen und den Umlandstationen (Abbildung 40, schwarze Linie). Diese Temperaturdifferenz spiegelt die städtische Wärmeinsel wieder. Sie zeigt sehr schön, dass die Maxima der städtischen Wärmeinsel in der Nacht auftreten und am Tag die Differenzen wieder kleiner werden. Während der WSSN Episode ändert sich die Größenordnung der städtischen Wärmeinsel jedoch nicht. Während des Zeitraums 20. bis 23. Juli 2021 werden nachts Werte von 3,1 bis 3,5 Kelvin erreicht. Die während des Tages auftretenden Minima liegen zwischen 0,8 und 1

Kelvin und ändern sich somit ebenfalls kaum. Überträgt man diese Beobachtungen, die auch in anderen Studien bereits beschrieben wurden, auf ein mögliches zukünftiges Klima, so ist davon auszugehen, dass sich sowohl die Stadt als auch das Umland in gleichem Maße erwärmen werden. Sollten keine städtebaulichen Veränderungen (Verdichtung der Bebauung oder Anpassungsmaßnahmen) vorgenommen werden oder größere Landnutzungsänderungen im Umland von Ingelheim am Rhein erfolgen, wird sich das Niveau der städtischen Wärmeinsel auch in Zukunft nicht groß verändern.

4.4.3 Ergebnisse der Profilmessfahrten

Die Bedingungen hinsichtlich der Ausprägung einer städtischen Wärmeinsel waren während der Profilmessfahrten gut. Am Standort Frankfurt-Flughafen wurden im Zeitraum vom 1. September 2021 bis zum 6. September 2021 sechs aufeinanderfolgende windschwache Strahlungsnächte registriert. An den zwei Tagen der Profilmessfahrten gab es im Untersuchungsgebiet keinen Niederschlag. Die mittleren Windgeschwindigkeiten waren mit 2,3 m/s (Geisenheim) am 2. September 2021 und 2,0 m/s (Geisenheim) am 3. September 2021 jedoch etwas zu hoch für eine optimale Ausprägung der städtischen Wärmeinsel. Auch sind die Strahlungsverhältnisse im September nicht mehr so optimal wie in den Sommermonaten, da die Länge der Tage wieder deutlich abgenommen hat, und sie weichen deutlich von denen der Modellsimulation (Juli) ab.

Da die Messfahrt etwas über eine Stunde dauerte, kann sich die Temperatur schon aufgrund ihres Tagesganges während der Messfahrt deutlich ändern. Damit die Messwerte zu Beginn und gegen Ende der Messfahrt dennoch vergleichbar sind, müssen die Daten korrigiert, das heißt „endtrendet“ werden. Der Höhenunterschied entlang der Messroute liegt bei 58 m. Er wird in den Auswertungen nicht weiter berücksichtigt, da davon ausgegangen werden kann, dass der Effekt auf die Lufttemperatur zwar vorhanden aber nur marginal sein wird.

Die Profilmessfahrt während des späten Nachmittags am 2. September 2021 ist in Abbildung 41 dargestellt. Gezeigt werden neben der Lufttemperatur entlang der Fahrtstrecke auch die Lufttemperatur an den temporären Messstandorten nahe der Fahrtroute (Stationen mit Thermobutton Großmarkt, Lehfeldstraße, Oberer Zwerchweg und Danziger Straße und mit PT100 Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz). Die Lufttemperatur im Bereich der Binger Straße im Stadtteil Ingelheim-West erreicht mit maximal 25,7 °C die höchste entlang der Route gemessene Lufttemperatur. Im weiteren Verlauf der Binger Straße in Richtung Ingelheim Mitte und entlang der Römerstraße werden ebenfalls hohe Temperaturen mit über 25°C gemessen. Im weiteren Verlauf der Binger Straße in die L419 Richtung West nach Bingen und Büdesheim werden noch hohe Temperaturen über 24,5 °C erreicht. Im Stadtgebiet gibt es kleinere

Straßenabschnitte zum Beispiel „Am Großmarkt“ oder im Bereich der Rheinstraße nördlich der A 60, wo Lufttemperaturen knapp über 24,5 °C gemessen wurden. Alle anderen Bereiche – sowohl städtische als auch ländlich geprägte Bereiche – entlang der Messroute zeigen deutlich niedrigere Lufttemperaturen von unter 24,5 °C. Am kältesten ist es im südlichen Bereich von Ober-Ingelheim. Dort erreichen die Lufttemperaturen Werte von 23,3 °C bis 24,1 °C. Die Temperaturdifferenz zwischen wärmsten und kältesten Punkt entlang der Messroute beträgt 2,4 Kelvin und ist sowohl auf die lokalen orografischen Bedingungen als auch auf die lokale Bebauung und Versiegelung zurückzuführen.

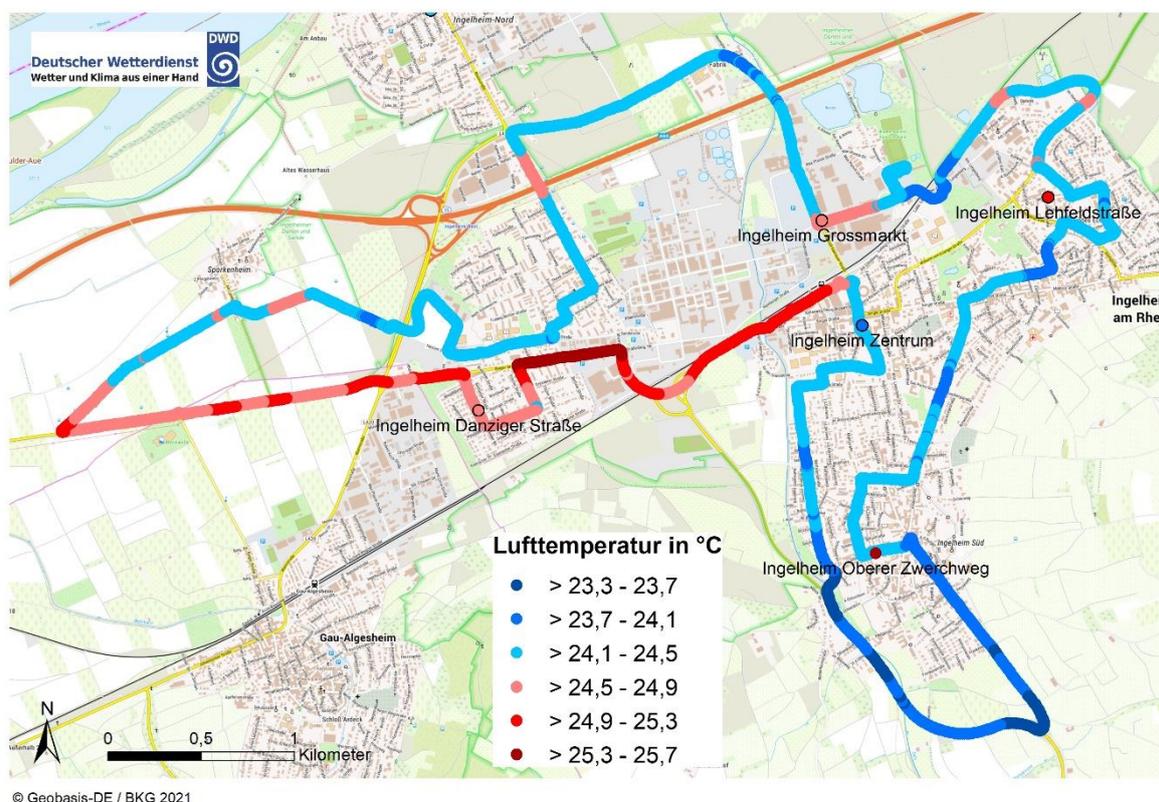


Abb. 41 Gemessene Lufttemperaturen in Ingelheim am Rhein während der Profilmessfahrt vom 2. September 2021 um 17 Uhr MESZ

Der Vergleich der Lufttemperatur mit den temporären Messtationen ergibt eine gute Übereinstimmung an den Standorten Danziger Straße, Großmarkt und Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz. Hier liegt die Abweichung bei unter 0,2 Kelvin. Deutliche Abweichungen von 0,9 Kelvin beziehungsweise 1,2 Kelvin ergeben sich für die Lufttemperaturen an den Standorten Ingelheim Lehfeldstraße und Oberer Zwerchweg. Grund für die Überschätzung durch die Thermobuttons kann die fehlende Belüftung der Strahlungsschutzhütte und die damit einhergehenden höheren Temperaturen sein (Kapitel 4.4.1). Ferner ist der Standort Lehfeldstraße auch nicht in unmittelbarer Umgebung entlang der Messroute, wie die anderen

Stationen. Dadurch ergeben sich Unterschiede in der städtischen Bebauung und damit auch im Temperaturniveau.

Die Profilmessfahrt um 22:30 Uhr MESZ zeigt sehr schön, dass zum Anfang der Nacht insbesondere die städtisch dicht bebauten Gebiete von Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim die höchsten Lufttemperaturen aufweisen (Abbildung 42). Die höchsten Lufttemperaturen werden mit über 17,7 °C bis maximal 18,6 °C entlang der Breitbachstraße, Grundstraße, Ottonenstraße, Untere Stiftstraße, Oberböhl und Sternbornstraße gemessen. Hohe Lufttemperaturen zwischen 15,7 °C und 17,7 °C gibt es ebenfalls im südlichen Bereich des Stadtteils Ober-Ingelheim auf der Mühlstraße, Unterer Zwerchweg, Altegasse, Marktplatz und Neuweg.

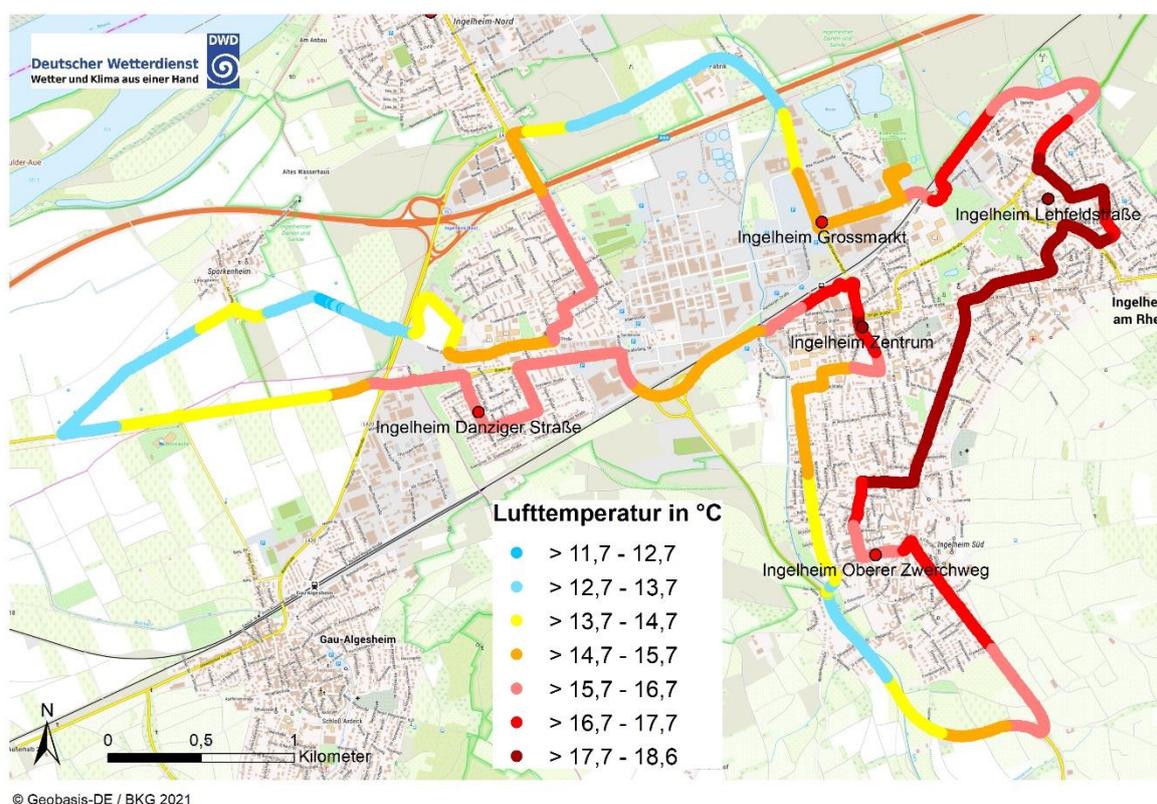


Abb. 42 Gemessene Lufttemperaturen in Ingelheim am Rhein während der Profilmessfahrt vom 2. September 2021 um 22:30 Uhr MESZ

Auch das Ingelheimer Stadtzentrum entlang der Böhringer Straße, Untere Sohlstraße, Konrad-Adenauer-Straße und Römerstraße zeigt noch deutlich erhöhte Lufttemperaturen bis 17,7 °C. Im unbebauten Umland nach Westen und Norden erreichen die Lufttemperaturen weniger hohe Werte. Dort liegen die Temperaturen zwischen 11,7 °C und 14,7 °C. Im Bereich der L 428, parallel der Westernhausstraße, gibt es einen etwas kühleren Temperaturabschnitt im Vergleich zur Messroute davor und danach. Hier sinken die Temperaturen bis auf ca. 13,4 °C

ab. Der Abschnitt liegt im Selztal und zeigt eine erste Akkumulation von Kaltluft in diesem Bereich.

Die Temperaturdifferenz zwischen wärmsten und kältesten Punkt entlang der Messroute beträgt 6,9 Kelvin und ist zu dieser frühen Nachtzeit vor allem auf die unterschiedlich schnelle Abkühlung der städtischen Bebauung zurückzuführen. Stadtteile die dicht bebaut und hoch versiegelt sind, kühlen am langsamsten ab, da sie im Baukörper viel Wärme gespeichert haben. Die hohen Temperaturen in Nieder-Ingelheim und Ober-Ingelheim könnten zusätzlich auf die warme Hangzone am Mainzer Berg zurückzuführen sein. Im westlichen Teil von Ober-Ingelheim spielen um diese Uhrzeit Hangabwinde und Kaltluftansammlungen aufgrund orografischer Gegebenheiten eine große Rolle.

Der Vergleich der Lufttemperatur mit den temporären Messtationen ergibt eine gute Übereinstimmung an den Standorten Danziger Straße und Lehfeldstraße. Hier liegt die Abweichung bei unter 0,2 Kelvin. Etwas höhere Abweichungen zwischen 0,4 und 0,7 Kelvin ergeben sich für die drei anderen Stationen.

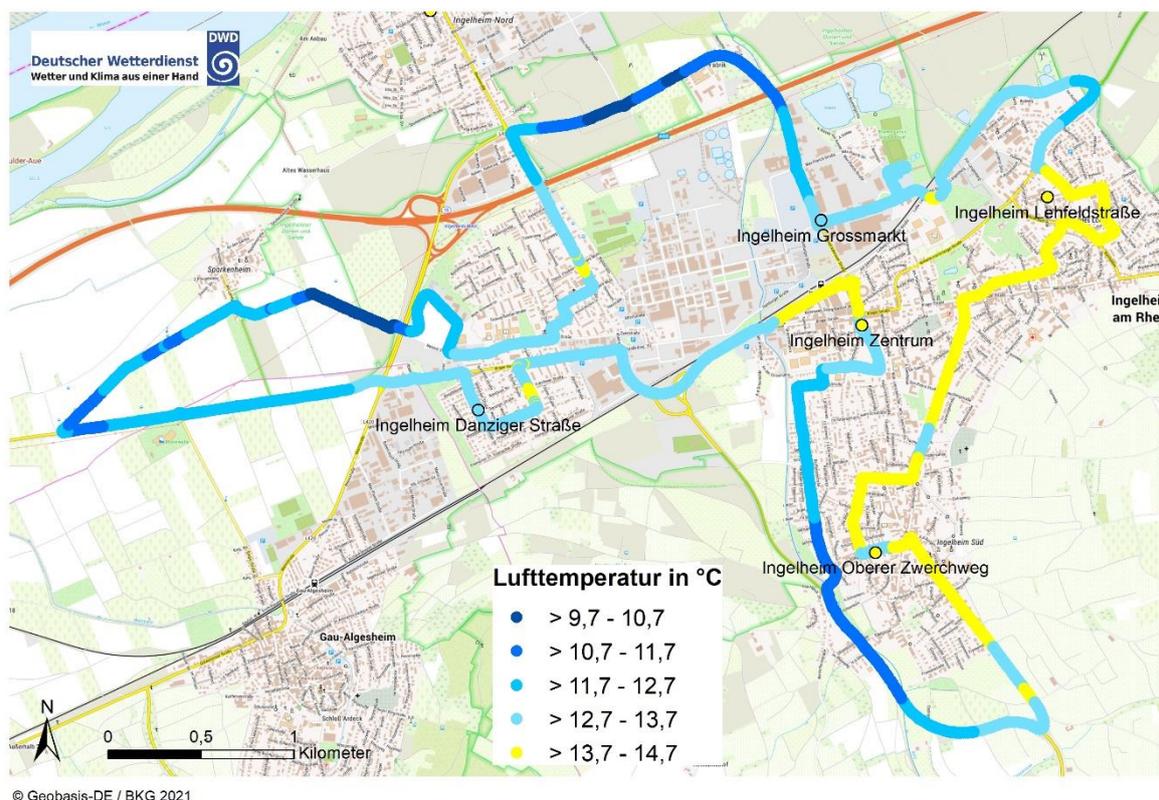


Abb. 43 Gemessene Lufttemperaturen in Ingelheim am Rhein während der Profilmessfahrt vom 3. September 2021 um 2:20 Uhr MESZ

Die Profilmessfahrt um 2:20 Uhr MESZ zeigt die weitere Abkühlung im Laufe der Nacht (Abbildung 43). Die Temperaturen erreichen jetzt nur noch Werte bis maximal 14,7 °C. Wie auch zu Beginn der Nacht werden die höchsten Temperaturen zwischen 13,7 °C und 14,7 °C in den Stadtteilen Nieder-Ingelheim, Ober-Ingelheim und Ingelheim Zentrum Fridtjof-Nansen-Platz gemessen. Auch das unbebaute Umland von Ingelheim am Rhein kühlt sich weiter ab und erreicht entlang der Messroute nur noch Werte zwischen 9,7 °C und 11,7 °C. Die Kaltluftansammlung entlang der L 428 (Selztal) nimmt weiter zu. In diesem Bereich sinken die Lufttemperaturen weiter bis auf 11 °C. Auch schiebt sich die Kaltluft immer weiter Richtung Norden und Ingelheim vor. Während die Kaltluft um 22:30 Uhr MESZ bis zum Kreisverkehr reichte, sind die niedrigeren Temperaturen und damit die Kaltluft nun auch bis zur Selztalstraße Kreuzung Im Brühl nachweisbar.

Der Vergleich der Lufttemperatur mit den temporären Messtationen ergibt eine etwas schlechtere Übereinstimmung im Vergleich zu den beiden anderen Profilmessfahrten. Die Abweichungen liegen zwischen 0,4 Kelvin (Danziger Straße) und 1,2 Kelvin (Lehfeldstraße). Messunsicherheiten ergeben sich nicht nur durch die unbelüfteten Thermobuttons, hier ist der Fehler in der Nacht als gering anzusehen, sondern auch durch die Fahrtgeschwindigkeit des Messfahrzeuges. Die Messhöhe der Thermobuttons ist etwas höher als die 2 m Höhe am Messfahrzeug. Auch hieraus können sich insbesondere in der Nacht kleinere Abweichungen ergeben.

4.4.4 Ergebnisse der Radiosondenaufstiege

Die Ergebnisse der drei Radiosondenaufstiege werden in Abbildung 44 dargestellt. Am Wohnmobilstellplatz Ingelheim konnte die nächtliche Ausbildung einer Temperaturinversion erfasst werden. Diese baut sich zu Beginn der Nacht auf und erreicht Mächtigkeiten von ca. 200 m über Grund. In der zweiten Nachthälfte nimmt die Mächtigkeit der bodennahen Kaltluft auf 300 m über Grund noch einmal zu. Die Temperatur der Kaltluftschicht erreicht bodennah die tiefsten Werte mit ca. 16 °C um 22:00 Uhr MESZ und knapp über 13 °C um 2:00 MESZ. Die Temperaturinversion wirkt als Barriere gegen die vertikale Durchmischung. Sie ist in den unteren 40 m besonders stark ausgeprägt. In den beiden nächtlichen Vertikalprofilen findet sich auch eine abgehobene Inversion im Bereich von ca. 1500 bis 1700 m. Diese Inversion repräsentiert die Obergrenze der Mischungsschicht tagsüber.

Aus den bodennahen Temperaturen der Profile lässt sich erkennen, dass auf der Rheintalseite der thermische Antrieb des Flurwindes dem Bergwind entgegengesetzt ist. Zu Beginn der Nacht ist die bodennahe Luft im Selztal etwa 3 Kelvin kälter als in gleicher Höhe im Rheintal und ca. 6 Kelvin kälter als in der Innenstadt (Fridtjof-Nansen-Platz). Um 2 Uhr MESZ ist die

Temperatur im Selztal weiterhin etwa 3 Kelvin kälter als im Rheintal und noch etwa 4,5 Kelvin kälter als in der Innenstadt. Somit ändert sich der Bergwindantrieb nicht sehr stark. Der thermische Antrieb für Flurwinde aus dem Rheintal nimmt in der Nacht etwas ab. Die Überwärmung der Innenstadt gegenüber dem Rheintal (Radiosondenstartplatz) nimmt von etwa 3 Kelvin zu Beginn der Nacht auf 1,5 Kelvin um 2 Uhr MESZ ab.

Das Vertikalprofil der spezifischen Feuchte der beiden nächtlichen Aufstiegstermine zeigt nachts eine deutliche Zunahme der Feuchte und damit des Wasserdampfgehaltes der Luft, insbesondere in den unteren 300 m über der Talbodensohle. Der bodennahe Wind kam um 22:00 Uhr MESZ aus Ostnordost (60° bis 70°) und drehte bis zum Termin um 2:00 Uhr MESZ noch etwas weiter in östliche Richtung (80° bis 90°). Die Zunahme der spezifischen Feuchte könnte zum einen durch das Heranführen (Advektion) von eher feuchter Luft vom nahe gelegenen Rhein und den Grünflächen verursacht sein und zum anderen auch auf die sinkende vertikale Durchmischung und Anreicherung aufgrund der stabilen Schichtung zurückgeführt werden.

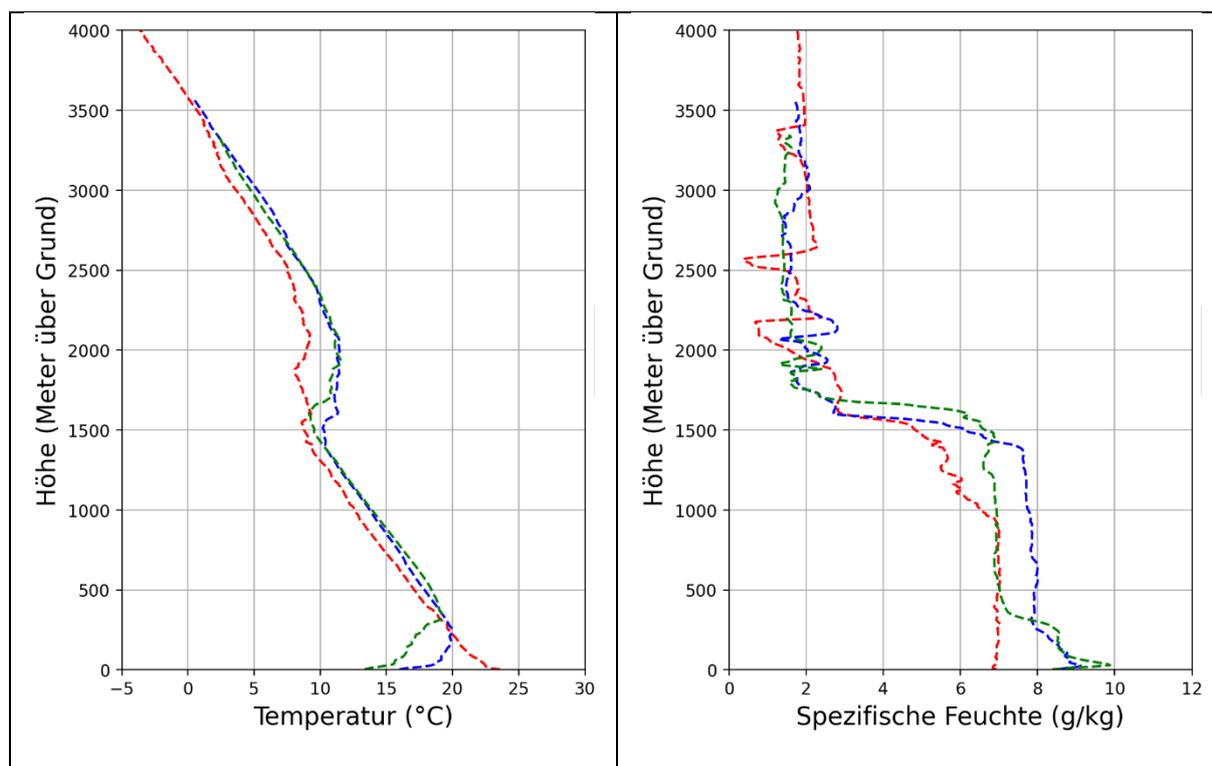


Abb. 44 Vertikalprofile der Temperatur und spezifischen Feuchte für die drei Radiosondenaufstiege am 2. September (rot 16:30 MESZ, blau 22:00 MESZ) und 3. September (grün 2:00 MESZ) 2021

5. Vergleich der Modellergebnisse mit den Messdaten

Die Durchführung der Messungen hatte insbesondere zum Ziel die Ergebnisse der Stadtklimamodellierung in Bezug auf die richtige Wiedergabe der thermischen Strukturen in Ingelheim am Rhein zu verifizieren. Ein weiteres wichtiges Ziel war die modellierte Windsituation im Selztal für Fragen der Belüftungsrelevanz korrekt wiederzugeben und mit Messdaten der Station Ingelheim Eulenhof zu vergleichen.

Da in dem vorliegenden Bericht insbesondere die nächtliche Überwärmung und Abkühlung von Interesse ist, wurden die MUKLIMO_3 Modellläufe qualitativ mit den beiden nächtlichen Profilmessfahrten verglichen. Ein quantitativer Vergleich ist nicht möglich, da mit MUKLIMO_3 eine Fallstudie für einen Sommertag im Juli simuliert wurde und die Ergebnisse mit Profilmessfahrten von Anfang September verglichen werden, für die etwas andere Wetterbedingungen vorherrschten. Ein quantitativer Vergleich zwischen Modellergebnissen und Profilmessdaten gestaltet sich darüber hinaus schwierig, weil die für eine Gitterzelle simulierten Werte ein Gebiet von 100 m x 100 m beschreiben für das mittlere Bedingungen der Bebauung, Vegetation, Wind und Temperatur angenommen werden. Im Gegensatz dazu sind die Daten aus der Profilmessfahrt direkt von den örtlichen baulichen Bedingungen geprägt (z. B. Wind und Verschattung in einer Straßenschlucht) und daher nicht mit den mittleren Bedingungen vergleichbar. Dennoch soll ein qualitativer Vergleich belegen, dass das MUKLIMO_3 Modell in der Lage ist, die thermischen Strukturen in Ingelheim am Rhein während der Nacht wiederzugeben.

Hierzu wurden die MUKLIMO_3 Ergebnisfelder der bodennahen Lufttemperatur um 23:00 Uhr und 3:00 Uhr den Temperaturdaten der Profilmessfahrten um 22:30 Uhr und 2:20 Uhr gegenübergestellt (Abbildungen 45 und 46). Die Temperaturdaten der Profilmessfahrten wurden mit der Station Ingelheim Eulenhof (10-Minutenwerte) normiert und auf eine relative Skala zwischen 0 und 1 (Minimum und Maximum) gebracht um nur die räumlichen Unterschiede sichtbar zu machen. Der Wert 0 (blau) bedeutet hierbei die geringsten Temperaturen und der Wert 1 (rot) bedeutet die höchsten Temperaturen während der Messfahrt.

Die räumlichen Temperaturunterschiede zu Beginn der Nacht (Abbildung 45) werden von MUKLIMO_3 gut wiedergegeben. Die höchsten Werte werden sowohl vom Modell als auch von der Profilmessfahrt in den Stadtteilen Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim verzeichnet. Die erhöhte Temperatur im Ingelheimer Zentrum um den Fridtjof-Nansen-Platz wird vom Modell gut getroffen. Eine gute Übereinstimmung herrscht bezüglich der geringeren Temperaturen im westlichen Bereich entlang der Bingener Straße (L 419). Im Bereich des

Bogens der Bingener Straße (L 428) zwischen Zentrum und Ingelheim-West werden ebenfalls leicht kühlere Temperaturen simuliert, die auch in der Profilmessfahrt nachweisbar sind. Die tieferen Temperaturen im südlichen Bereich von Ober-Ingelheim an der L 428 entlang des Selztals und im nördlichen Bereich der Profilmessfahrt entlang des Industriegebietes Böhlinger Ingelheim werden vom Modell ebenfalls gut getroffen. Jedoch wird der Bereich entlang der Konrad-Adenauer-Straße, der in den Profilmessfahrten durch deutlich kühlere Temperaturen gekennzeichnet ist, vom Modell deutlich wärmer modelliert.

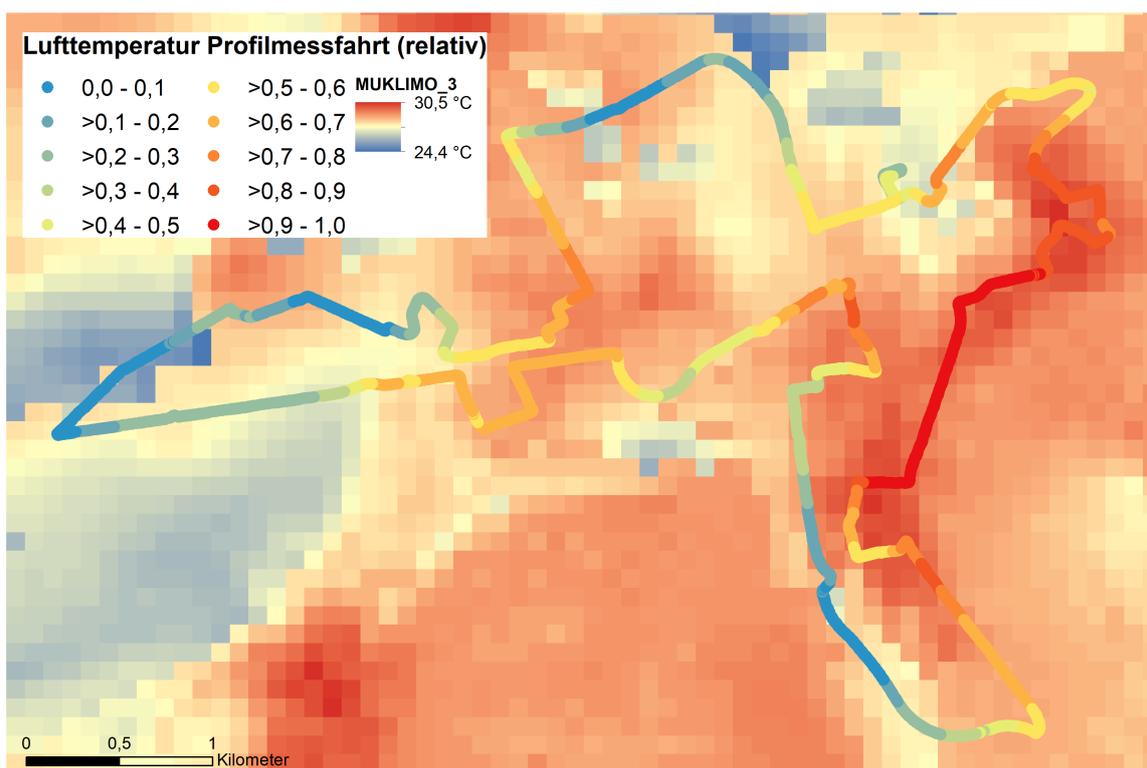


Abb. 45 Relativer Vergleich der MUKLIMO_3 Lufttemperaturen um 23:00 Uhr MESZ mit den Lufttemperaturen der Profilmessfahrt um 22:30 Uhr MESZ

Die räumlichen Temperaturunterschiede im weiteren Verlauf der Nacht (Abbildung 46) werden von MUKLIMO_3 ebenfalls gut wiedergegeben. Wie auch schon zu Beginn der Nacht ergeben sich die höchsten Werte sowohl im Modell als auch in der Profilmessfahrt in Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim. Hinzu kommt auch noch das überwärmte Stadtzentrum um den Fridtjof-Nansen-Platz. Alle drei überwärmten Abschnitte werden vom Modell erfasst. Auch die anderen städtisch, bebauten Gebiete, die in den Profilmessfahrten in den orangen Farbtönen dargestellt sind, werden mit MUKLIMO_3 gut erfasst. Sie werden nicht so warm modelliert wie die Gebiete in Ober-Ingelheim und Nieder-Ingelheim aber sie sind wärmer als die unbebauten Umlandgebiete. Die kühleren Bereiche im westlichen Teil entlang der Bingener Straße (L 419) und im südlichen Teil von Ober-Ingelheim entlang der L 428 (Selztal) werden wie auch schon

um 23:00 vom Modell räumlich gut erfasst. Der Bereich nördlich entlang des Böhlinger Industriegebietes (Konrad-Adenauer-Straße) wird vom Modell um diese Zeit besser wiedergegeben als das 23:00 Uhr der Fall war.

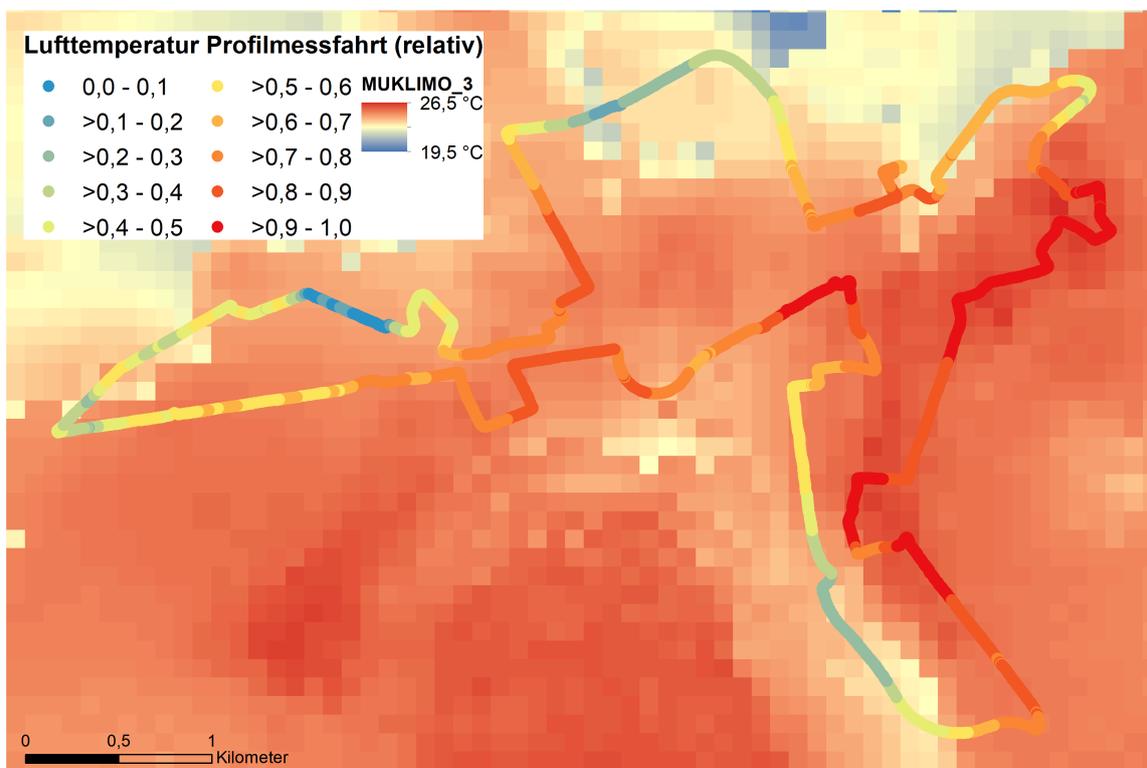


Abb. 46 Relativer Vergleich der MUKLIMO_3 Lufttemperaturen um 3:00 Uhr MESZ mit den Lufttemperaturen der Profilmessfahrt um 2:20 Uhr MESZ

Mit dem MUKLIMO_3 Modell wurden im Bereich des unteren und mittleren Selztals Windrichtungen simuliert, die dafürsprechen, dass nur der untere Selztalabschnitt für die Belüftung der Stadt Ingelheim am Rhein eine Rolle spielt. Die Windrichtungen im Selztal sind komplex und während der Nacht geprägt von Hangabwinden des Westerbergs und Mainzer Bergs und Tal- und Bergwinden. Um die Modellergebnisse bezüglich des Windes zu verifizieren, können die Messungen der Station Eulenhof herangezogen werden. Die Windrosen an der Station Eulenhof (Abbildungen 33 und 34) zeigen während windschwacher Strahlungsnächte für die erste und zweite Nachthälfte eine große Häufigkeit von Windrichtungen aus Nordnordost (330°), also talaufwärts, an. Diese Beobachtung wird tatsächlich auch vom MUKLIMO_3 Modell so wiedergegeben, wenn man sich die Windfelder (Abbildungen 17 bis 20) und Trajektorien ansieht (Abbildung 47). Sowohl zwischen 22:00 und 24:00 Uhr als auch zwischen 0:00 Uhr 2:00 Uhr (nicht gezeigt) verlaufen die Trajektorien aus MUKLIMO_3 am Standort Eulenhof von Nordwesten in Richtung Südosten. Am Hang sind sie noch überwiegend bodennah um dann im Bereich des Selztals abzuheben in größere Höhen

von über 40 m über Grund. Die sehr geringe Talsohlenneigung, die leicht wellige Ausprägung des Talgeländes, die Bebauung im Bereich des Talausgangs und die wieder etwas tiefer gelegene Stelle (geringere Geländehöhe über NHN) nördlich vom Eulenhof führen dazu das die Hangabwinde vom Westerberg in diesem Bereich des Tales in Richtung mittleres Selztal geführt werden und nicht in Richtung Ingelheim.

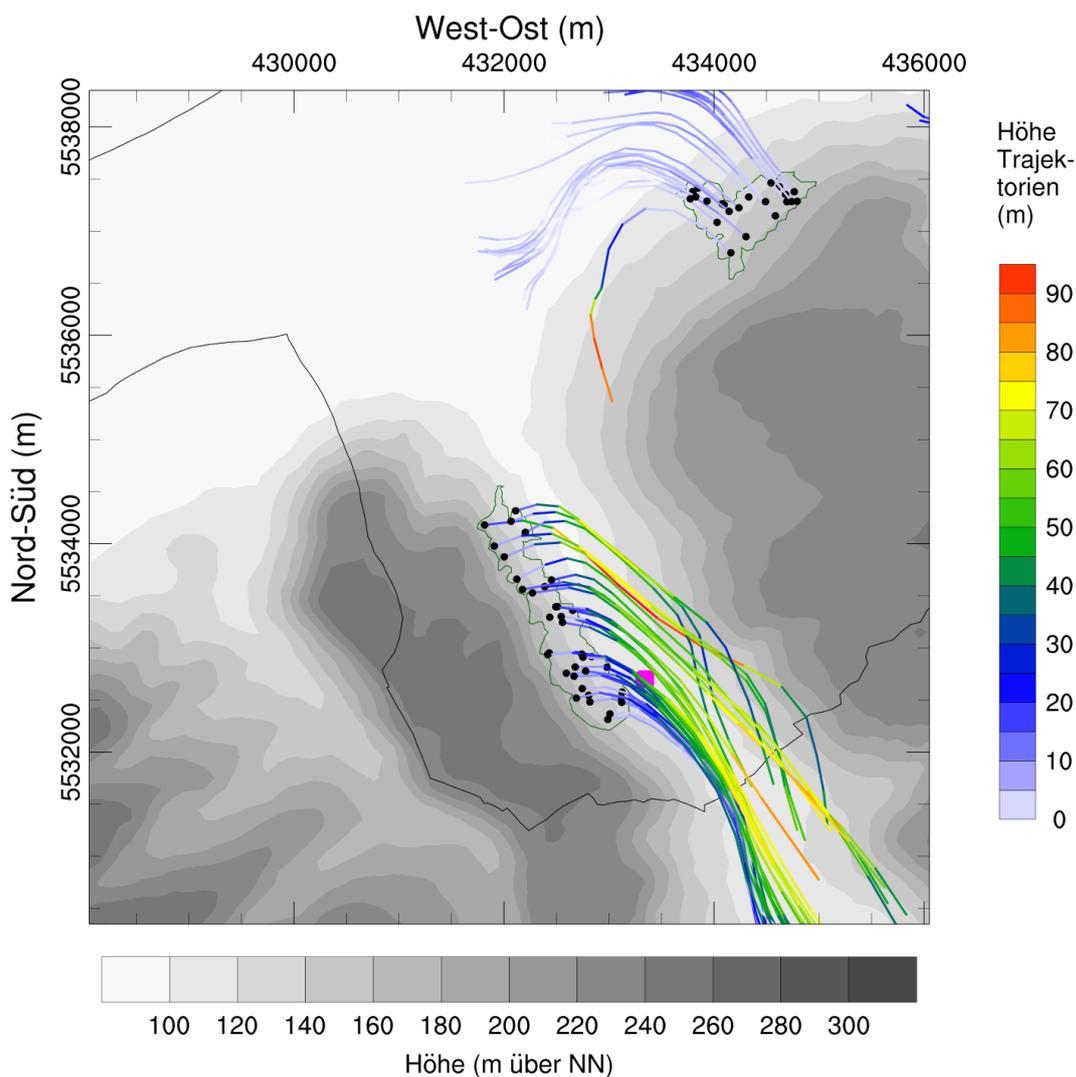


Abb. 47 Vorwärts-Trajektorien aus dem grün umrandeten Kaltluftentstehungsgebiet im Selztal für den Zeitraum 22:00 bis 24:00 MESZ. Die Linienfarbe der Trajektorien beschreibt ihre Höhe z über Grund. Die Konturflächen in Grautönen illustrieren die Geländehöhe über NHN. Die schwarze Linie zeigt die Stadtgrenze von Ingelheim am Rhein und der magentafarbene Punkt markiert den Standort Eulenhof (Quelle: GeoBasis-DE / BKG 2022).

Zusammenfassend ist das MUKLIMO_3 Modell gut in der Lage die thermischen Verhältnisse, sowie die Wind- und Belüftungsverhältnisse in Ingelheim am Rhein wiederzugeben. Den Ergebnissen der Modellierung kann im Rahmen der Klimaanpassungsstrategie Vertrauen geschenkt werden.

6. Ergebnisbetrachtung für die Klimaanpassungsstrategie

Dieser Bericht beschreibt die mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO_3 durchgeführten Stadtklimasimulationen, die Messkampagne und die Auswertung der Daten zur Lokalisierung von städtischen Hitzeinseln und dem Auftreten nächtlicher Kaltluftströmungen im Rahmen der Zusammenarbeit im Projekt „KlimPraxIng – Klimawandel in der Praxis am Beispiel der Mittelstadt Ingelheim am Rhein“. Die Ergebnisse des Berichtes können als Grundlage dienen um die Klimaanpassungsstrategie der Stadt Ingelheim am Rhein weiter zu entwickeln. Die Modellergebnisse stellen eine gute meteorologische Grundlage für die Erarbeitung von städtebaulichen Planungsunterlagen zum Beispiel von Klimafunktions- und Klimahinweiskarten dar.

Die Modellierungsergebnisse wurden dem Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen und Burghardt und Partner Ingenieure im Auftrag der Stadt Ingelheim am Rhein in Form einer Geodatenbank mit Raster- und Vektordaten für verschiedene meteorologische Parameter (z. B. Wind U-Komponente und V-Komponente, Temperatur und Gefühlte Temperatur) und Uhrzeiten für weitere Analysen zur Verfügung gestellt (Dezember 2020 und März 2022).

Die Modellergebnisse und Messdaten zeigen eine hohe Wärmebelastung in Ingelheim am Rhein und im gesamten Teilabschnitt des Rheintals am Tag und in der frühen Nacht. Die Untersuchungen belegen die thermische Entlastung von bebauten Siedlungsgebieten durch nächtliche Kaltluftabflüsse vom Mainzer Berg und Westerberg. Für die Klimaanpassung an sommerliche Hitze sollte daher deren Wirkung geschützt werden, zum einen durch den Erhalt der umliegenden Flächen die erhebliche Mengen an Kaltluft bilden können und zum anderen durch die Freihaltung der Kaltluftverlagerungspfade von Strömungshindernissen und Hitzeemittenten. Da einerseits relevante Kaltluftbildungs- und Verlagerungsgebiete auch außerhalb der Stadtgrenzen liegen können und andererseits auch Nachbarkommunen bei Hitzelagen von im Stadtgebiet Ingelheim am Rhein entstehenden Kaltluftströmungen profitieren (siehe Rückwärts-Trajektorien), sollte die Klimaanpassungsstrategie die Kommunikation mit den Nachbargemeinden mit einschließen.

Die Gebiete, für die in diesem Bericht Trajektorienberechnungen durchgeführt wurden, stellen eine Auswahl repräsentativer und bedeutsamer Gebiete der abendlichen Überwärmung beziehungsweise der nächtlichen Kaltluftbildung dar. Darüber hinaus gibt es im Umland von Ingelheim am Rhein weitere Gebiete für die eine Trajektorienanalyse stadtklimatologisch interessant ist, die aber aus zeitlichen Gründen in dieser Studie nicht durchgeführt werden konnte.

Zur Abschwächung der städtischen Wärmeinsel sollte auch versucht werden, die Erwärmung im Bereich der städtischen Bebauung am Tag zu reduzieren. Dies kann beispielsweise durch die Entsiegelung von Flächen (z. B. versiegelte Hinterhöfe oder Vorgärten) und den Ausbau von Stadtgrün (Parks, Alleen, Stadtbäume, Dach- und Fassadenbegrünung) erfolgen. Auch die Nutzung von Baumaterialien mit günstigen Strahlungseigenschaften (englisch „Cool Colours“) und geeignete Verschattungsmaßnahmen können eine wichtige Rolle spielen, wenn es darum geht die Hitze in der Stadt zu reduzieren. Der Vergleich der Modellergebnisse mit den Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse für die Lufttemperatur mit den Messungen. Auch die modellierten, komplexen Windverhältnisse im Selztal konnten durch die Messungen in Ingelheim Eulenhof bestätigt werden.

Danksagung

An dieser Stelle sei allen projektbeteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Stadt Ingelheim am Rhein und des DWD Sachgebietes Stadt- und Regionalklimatologie im Zentralen Klimabüro in Offenbach gedankt. Mein besonderer Dank gilt den Mobilien Messeinheiten des DWD in Potsdam, Essen und München für die Durchführung der Messungen, durch die eine Bewertung der Ergebnisse des Stadtklimamodells MUKLIMO_3 erst ermöglicht wurde.

Literatur

- FRÜH, B., M. KOSSMANN und M. ROOS, 2011: Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237, 68 Seiten, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201106095249> .
- HEENE, V., M. KOSSMANN, und P. FUCHS, 2018: Copernicus-Daten für Stadtklimasimulationen, Kapitel 3.4 in Ehlert, I. und Schweitzer, C. (Hrsg.) Copernicus für das Umweltmonitoring – Eine Einführung. S. 38-42. https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Tutorial_Copernicus_online.pdf
- KECK, M., 2014: TRACA Manual – Technical Instructions for Installation and Application. Internes Technisches Dokument des Deutschen Wetterdienstes und des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover, 29 S.
- NOPPEL, H., 2017: Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz: Abschlussbericht zum Arbeitspaket 3 des Projekts KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz - Stadtklima in der kommunalen Praxis. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 249, 105 Seiten, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201709282078>
- SCHAU-NOPPEL, H., M. KOSSMANN, und S. BUCHHOLZ, 2020: Meteorological information for climate-proof urban planning - The example of KLIMPRAX. Urban Climate 32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100614>.
- SIEBERT, J., U. SIEVERS und W. ZDUNKOWSKI, 1992: A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere. Boundary-Layer Meteorology 59, S. 1-34.
- SIEVERS, U., R. FORKEL und W. ZDUNKOWSKI, 1983: Transport equations for heat and moisture in the soil and their application to boundary layer problems. Beitr. Phys. Atmosph. 56, S. 58-83.
- SIEVERS, U., 1990: Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. Umweltmeteorologie, Schriftenreihe Band 15: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf. S. 92-105.
- SIEVERS, U., 1995: Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. Meteorologische Zeitschrift, N. F. 4, S. 3-15.
- SIEVERS U., 2012: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 240, 142 Seiten, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-2014081319909> .
- SIEVERS, U. und B. FRÜH, 2012: A practical approach to compute short-wave irradiance at the surface of sub-grid scale buildings. Meteorologische Zeitschrift. 21, 349-364.
- SIEVERS U., 2016: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 248, 151 Seiten, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201606173510> .
- SIEVERS, U. und W. ZDUNKOWSKI, 1986: A microscale urban climate model. Beitr. Phys. Atmosph. 59, 13-40.

- SÜHRING, M., 2015: CAFCA Manual – Technical Instructions for Installation and Application. Internes Technisches Dokument des Deutschen Wetterdienstes und des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover, 26 S.
- VDI, 2003: Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft, Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure 3787, Blatt 5. Beuth Verlag GmbH Berlin, 85 S.
- VDI, 2008: Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung Teil 1: Klima. VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2, Beuth-Verlag, Berlin.

Anhang

Tabelle A1 MUKLIMO_3 Modellparameter für Landbedeckungsklassen mit Bebauung (hierbei ist ID die Klassennummer, N die Anzahl der Gitterzellen mit dieser Landbedeckung, g_b der Gebäudegrundflächenanteil, h_b die mittlere Gebäudehöhe in m, w_b der Wandflächenindex und v der Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden)

ID	N	Beschreibung	g_b *	h_b	w_b	v #
1	2290	Durchgehend städtische Prägung mit sehr dichter Bebauung (Urban Atlas 2012)	0,26	9,6	2,90	0,68
2	1276	Städtische Prägung mit dichter Bebauung (CLC2012)	0,16	8,1	2,62	0,41
3	3780	Städtische Prägung mit dichter Bebauung (Urban Atlas 2012)	0,18	8,8	2,83	0,48
4	661	Städtische Prägung mit mitteldichter Bebauung (Urban Atlas 2012)	0,11	8,5	2,96	0,20
5	219	Städtische Prägung mit lockerer Bebauung (Urban Atlas 2012)	0,04	6,7	2,94	0,03
6	44	Städtische Prägung mit sehr lockerer Bebauung (Urban Atlas 2012)	0,09	7,3	2,69	0,25
7	174	Vereinzelte Gebäude (Urban Atlas 2012)	0,05	7,2	2,27	0,02
8	127	Industrie und Gewerbe (CLC2012)	0,18	8,6	0,86	0,33
9	2657	Industriell, gewerblich, öffentlich, militärisch und andere privat genutzte Gebäude (Urban Atlas 2012)	0,19	9,1	1,65	0,51
11	278	Straßen und zugehöriges Land (Urban Atlas 2012)	0,04	8,7	2,63	0,46
12	76	Schienenwege und zugehöriges Land (Urban Atlas 2012) (Urban Atlas 2012)	0,04	7,9	2,37	0,57
13	44	Hafen (Urban Atlas 2012)	0,26	9,4	1,11	0,72
16	73	Baustellen (Urban Atlas 2012)	0,04	5,7	1,78	0,18
17	109	Landflächen ohne derzeitige Nutzung (Urban Atlas 2012)	0,04	7,9	2,44	0,26

* Die Zahl 0,26 ist gleichbedeutend mit 26 % der Fläche sind Gebäude.

Der Wert des Versiegelungsanteils bezogen auf die Gesamtfläche ist abhängig vom Gebäudegrundflächenanteil. Wenn 26 % Prozent der Fläche Gebäude sind, so verteilt sich der Rest ($100 - 26 = 74$) 74 % auf die übrigen Flächenanteile. Ein Versiegelungswert von 0,68 bedeutet in diesem Fall 68 % der verbleibenden 74 % der Fläche. Auf die Gesamtfläche betrachtet, sind dann 0,5 bzw. 50 % der Fläche versiegelt (ohne Gebäude).



Abb. A1 DWD Messstation am Fridtjof-Nansen-Platz (FNP) in Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)

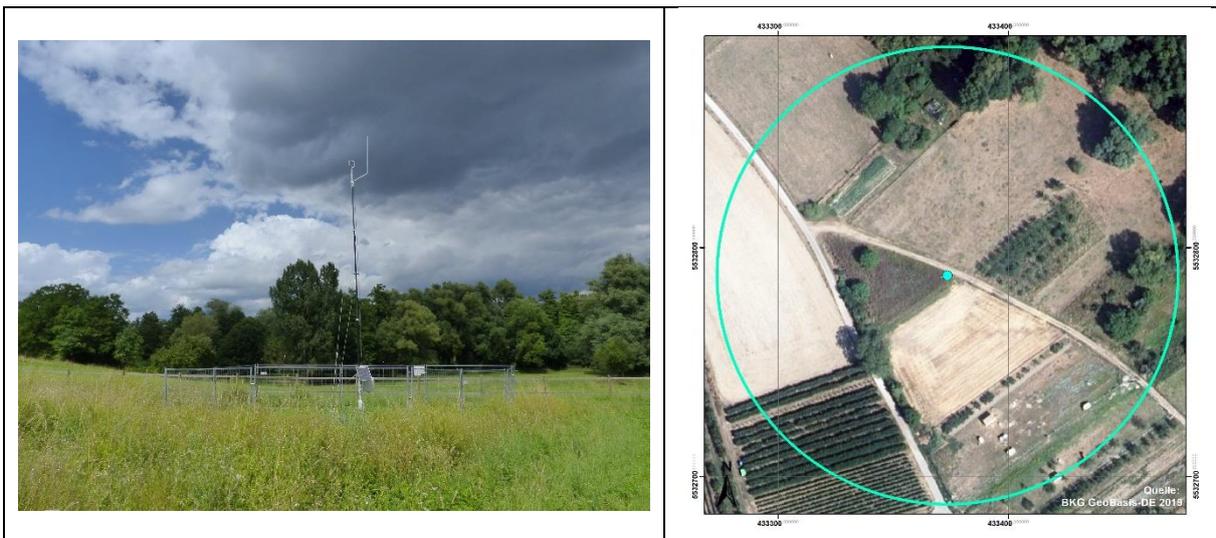


Abb. A2 DWD Messstation am Eulenhof (EUL) Stadt Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)



Abb. A3 DWD Thermobutton in der Hauffstraße (HAU) Frei-Weinheim: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)

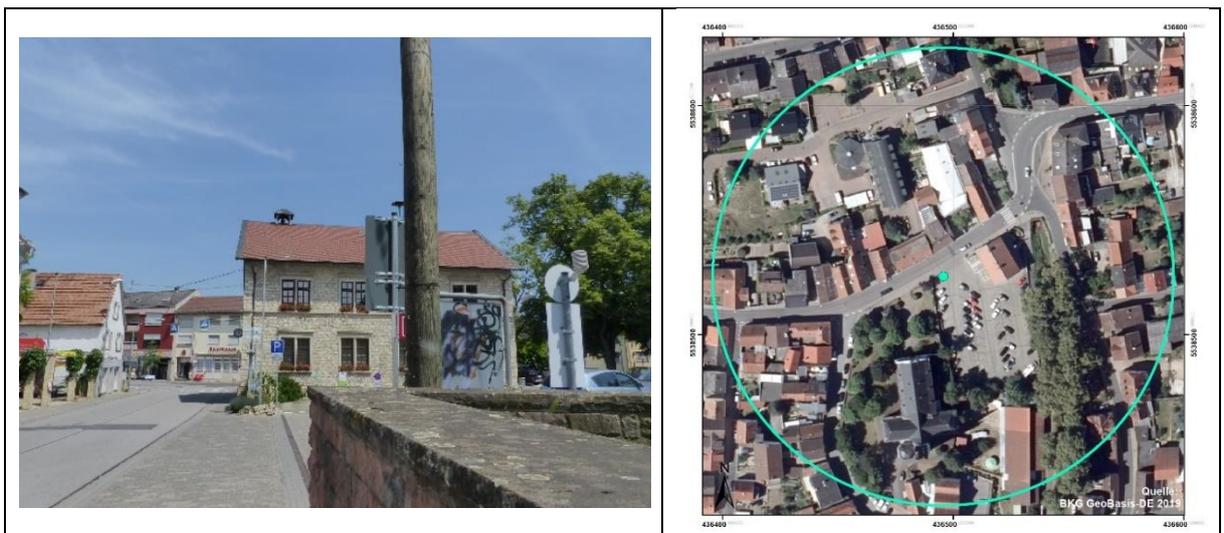


Abb. A4 DWD Thermobutton an der Jakobus Kirche (JAK) in Heidesheim: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)



Abb. A5 DWD Thermobutton Neue Kirchstraße (NKI) in Heidesheim: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)



Abb. A6 DWD Thermobutton Danziger Straße (DAN) in Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)



Abb. A7 DWD Thermobutton Lehfeldstraße (LEH) in Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)



Abb. A8 DWD Thermobutton Großmarkt (GRO) in Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)



Abb. A9 DWD Thermobutton Oberer Zwerchweg (ZWE) in Ingelheim am Rhein: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)



Abb. A10 DWD Thermobutton Kreuzstraße (KRE) in Großwinterheim: links Foto (Quelle DWD) und rechts Luftbild mit Lage der Station im 100 m Radius (Quelle eigene Darstellung, GeoBasis-DE / BKG 2019)

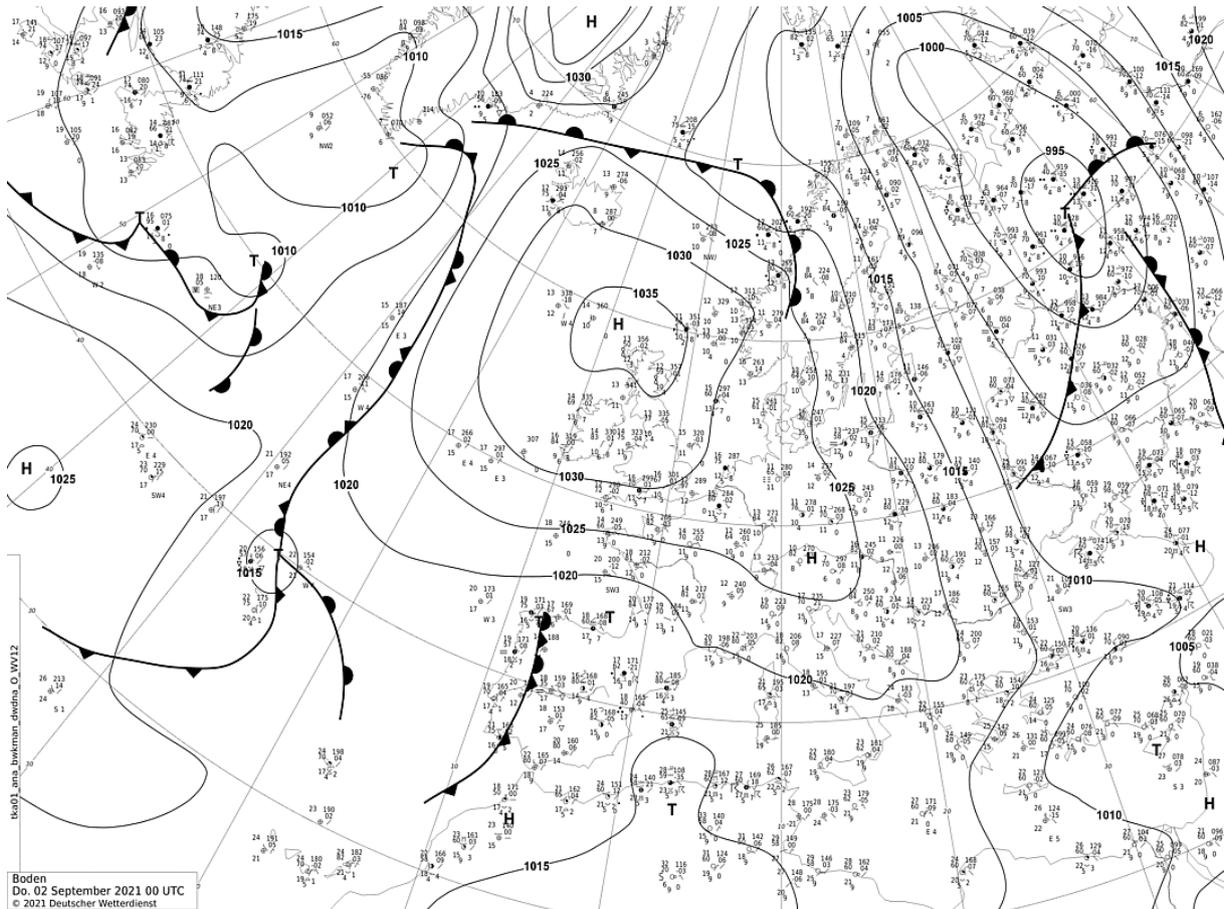


Abb. A11 Wetterkarte vom 2.9.2021 0 Uhr (UTC) mit Stationswetterdaten und der Bodendruckverteilung (Isobaren) sowie der eingezeichneten Fronten.

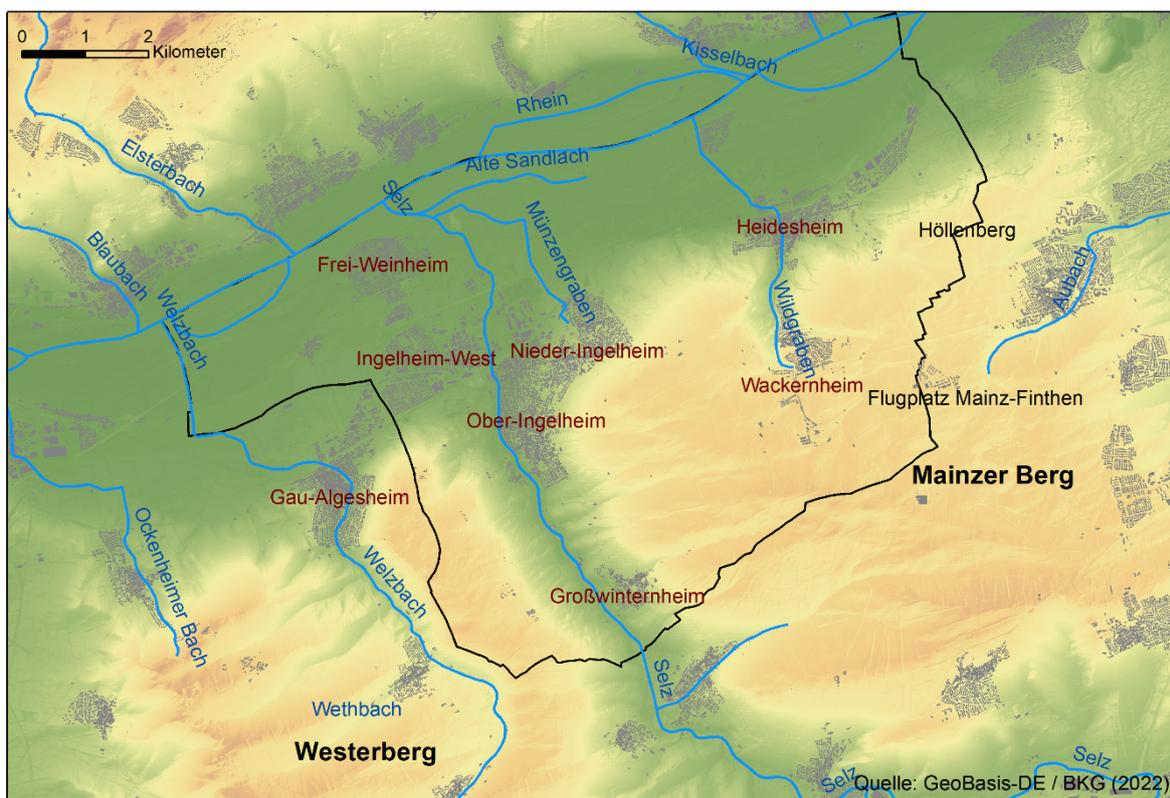


Abb. A12 Topografischer Überblick über die Region Ingelheim am Rhein.