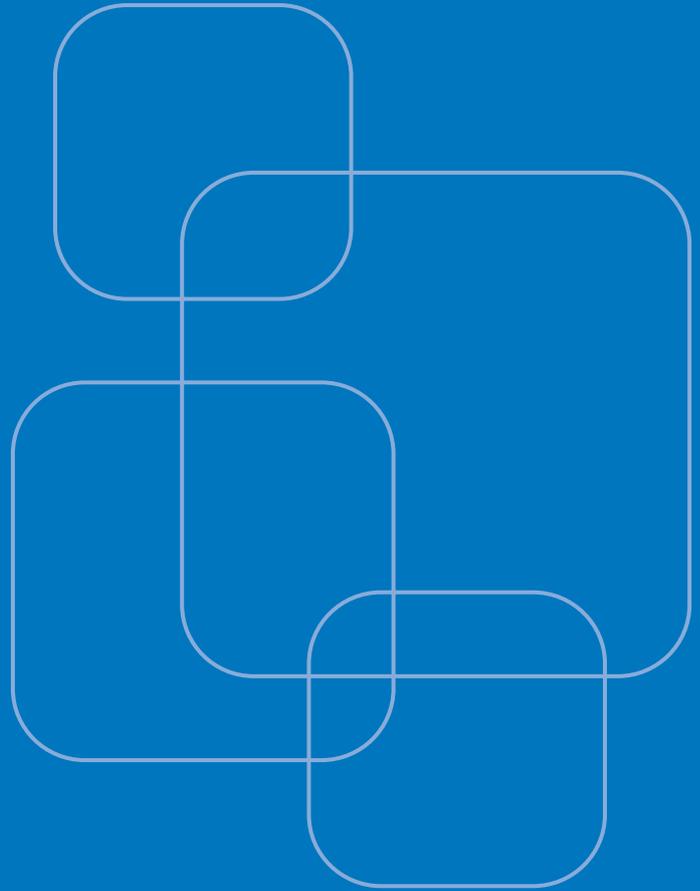


dynaklim-Publikation



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



PROGNOSE- UND DIAGNOSEANALYSEN ZUR VERBESSERUNG DES STADTKLIMAS

Stadtklimatische Untersuchungen in Oberhausen und Simulationen verschiedener Minderungsstrategien zur Reduktion der thermischen Belastung im Hinblick auf den Klimawandel

Wilhelm Kuttler, Nicole Müller¹⁾, Dirk Düttemeyer, Andreas-Bent Barlag

Universität Duisburg-Essen

Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie

<http://www.uni-due.de/klimatologie/>

dynaklim-Publikation Nr. 25 / April 2012



Zusammenfassung

In der Stadtklimatologie spielen im Rahmen der Minderung sommerlicher Wärmebelastung verdunstungsaktive Flächen (Vegetation und Gewässer) eine wichtige Rolle. Sie tragen dazu bei, die thermische Belastung der Bevölkerung innerhalb des Stadtgebietes zu reduzieren (temperatursenkende Wirkung durch Beschattung, Verdunstung und Kaltluftbildung).

Im Rahmen des BMBF-finanzierten Verbundprojektes *dynaklim* wurden in Aktivität 4.3.2 kombinierte klimatologische In-Situ-Messungen und mikroklimatologische Modellsimulationen mit dem Ziel der Quantifizierung und des Vergleiches der Verdunstung unterschiedlicher urbaner Flächennutzungen sowie deren Einfluss auf den thermischen Komfort durchgeführt.

Dazu wurden zwischen dem 01.08.2010 und dem 31.07.2011 in der Modellstadt Oberhausen (NRW, Deutschland) an acht Standorten mit verschiedenen Anteilen verdunstungsaktiver Flächen Klimastationen installiert. Die Werte dienten als Eingangsparameter für die Modellsimulationen (19 Szenarien mit Veränderung des verdunstungsaktiven Flächenanteils in den Modellgebieten) mit dem mikroskaligen Modell ENVI-met.

Die Klimatoppe bzw. Standorte zeigten durch ihre verschiedenen Versiegelungs- bzw. Frei- und Gewässerflächenanteile eine deutliche Differenzierung der thermischen Belastung an heißen Tagen. Die Simulationen ergaben eine Reduktion der thermischen Belastung durch Vegetations- und Gewässerflächen um bis zu 4 K, wobei eine optimale Verdunstungsleistung nur bei ausreichender Wasserversorgung der Pflanzen erzielt werden kann.

Gut wasserversorgte Grünanlagen können demnach einer zunehmenden Wärmebelastung und Beeinträchtigung der Stadtbevölkerung entgegenwirken.

Schlagworte (im *dynaklim*-Wiki²⁾)

Stadtklima, Human-Bioklima, PET, Klimawandel, Mitigationsmaßnahmen, verdunstungsaktive Flächen

¹⁾ Federführende Verfasserin des vorliegenden Artikels ist Frau Dipl.-Geogr. Nicole Müller

²⁾ <http://www.dynaklim.de/dynaklim/index/wissensmanagement/wiki.html>

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Wissenschaftlich-technischer Hintergrund	1
2.1 Wissenschaftlicher Stand der Forschung	1
2.2 Messtechnik	1
2.3 Simulationsmodell: ENVI-met 3.2	1
3 Ergebnisse (der klimatischen Untersuchungen und der Simulation der Minderungsszenarien).....	3
3.1 Messungen des In-Situ-Messnetzes	3
3.1.1 Repräsentanz des Messzeitraumes	3
3.1.2 Datenaufbereitung und Lückenfüllung	5
3.1.3 Auswertung der Daten	7
3.1.4 Auswertung der Strahlungstage.....	13
3.1.5 Human-biometeorologische Situation	18
3.1.6 Veränderungen im Klimawandel.....	18
3.2 Modellsimulationen der Minderungsszenarien	21
3.2.1 Auswahl der Modellgebiete und Plan-Szenarien	21
3.2.2 Validierung	27
3.2.3 Ergebnisse der Simulationen.....	29
3.3 Fazit	38
4 Literaturverzeichnis	39

1 Einleitung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Auswirkungen flächennutzungsspezifischer Unterschiede auf das Stadtklima und die human-biometeorologische Situation mit besonderem Augenmerk auf den Einfluss des urbanen Wasserhaushaltes untersucht. Speziell standen hierbei urbane verdunstungsaktive Flächen, wie Oberflächengewässer und Vegetationsflächen im Fokus. Das Ziel war die Quantifizierung des Einflusses der Evapotranspiration auf den human-biometeorologischen, thermischen Wirkungskomplex in verschiedenen urbanen Flächennutzungsstrukturen. Die Untersuchung erfolgte in der für die bebaute *dynaklim*-Region repräsentativen Modellstadt Oberhausen. Zur Analyse der Wirkung verdunstungsaktiver Flächennutzungen auf die human-biometeorologischen Wirkungsfaktoren wurde als Methode ein kombinierter Ansatz aus experimentellen Messungen und numerischen Simulationen ausgewählt. So konnte eine vergleichende Untersuchung an konkreten Flächen für den Ist-Zustand sowie für hypothetische Plan-Zustände (mit Erhöhung des verdunstungsaktiven Flächenanteils) durchgeführt werden.

2 Wissenschaftlich-technischer Hintergrund

2.1 Wissenschaftlicher Stand der Forschung

Verschiedentlich wurde bereits die thermische Belastungen reduzierende Wirkung von verdunstungsaktiven Flächen nachgewiesen. DIMOUDI and NIKOLOPOULOU (2003), GULYASA et al. (2006), HUTTNER et al. (2009), LEE et al. (2009), NARITA et al. (2008), SHASHUA-BAR and HOFFMANN (2000), SPRONKEN-SMITH and OKE (1998), UPMANIS (1999) und ZOULIA et al. (2009) beispielsweise haben Vegetationsflächen untersucht und dabei sowohl einen die thermische Belastung reduzierenden Effekt durch Verschattung, als auch durch Evapotranspiration festgestellt. Die Wirkung von Gewässerflächen und Fließgewässern im urbanen Raum wurde von KATAYAMA (1991), KUTTLER (1991) und MURAKAWA et al. (1988, 1991) analysiert. Dabei wurden temperaturreduzierende Wirkungen der Verdunstung festgestellt. Bei einer starken Erhöhung der Luftfeuchte durch die Verdunstung können allerdings auch negative Auswirkungen auf den thermischen Komfort auftreten, wie SAARONI and ZIV (2003) für Tel Aviv, Israel nachgewiesen haben. Bei hinreichender Größe der verdunstungsaktiven Flächen lassen sich sogar positive Fernwirkungen in benachbarte, bebaute Flächennutzungsstrukturen hinein beobachten (BONGARDT 2006, ELIASSON 1996).

2.2 Messtechnik

Zur Untersuchung des Stadtklimas wurde in der Modellstadt Oberhausen ein Klimamessnetz, bestehend aus acht Klimastationen installiert. Die Klimastationen waren mit Messinstrumenten der Firma Friedrichs, Schenefeld, ausgerüstet, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Zur Erfassung der Lufttemperatur, relativen Luftfeuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit wurden an jeder Station kombinierte Temperatur- und Feuchtesensoren (Pt100/kapazitives Messelement), sowie Schalenkreuzanemometer und Windfahnen eingesetzt (vgl. auch 3.1). Die Datenaufzeichnung erfolgte über Combilog 1020 Datalogger als 1-Minutenmittelwerte. Diese Methode stellt ein gängiges Verfahren mit hoher zeitlicher Auflösung zur Erfassung des Stadtklimas dar.

2.3 Simulationsmodell: ENVI-met 3.2

Bei dem Modell ENVI-met 3.2 (BRUSE 2010) handelt es sich um ein dreidimensionales mikroskaliges, gekoppeltes Strömungs-Energiebilanzmodell, das den atmosphärischen Zustand zu einem konkreten Zeitpunkt abbilden kann. Die physikalischen Grundlagen des Modells basieren auf den Gesetzen der Strömungsmechanik (Windfeld), der Thermodynamik (Temperaturberechnungen), der allgemeinen Atmosphärenphysik (z. B. Strahlungshaushalt) sowie der Human-Thermophysik (metabolischer

Wärmehaushalt des Menschen). Die Interaktion zwischen Stadtstruktur und Atmosphäre wird über die vier Teilmodelle Atmosphäre, Boden/Grenzfläche/Wasserflächen, Vegetation sowie ein Randmodell für den externen atmosphärischen Antrieb beschrieben.

Bei dem Simulationsverfahren wird die Realität in einem numerischen dreidimensionalen Raumgitter abgebildet, welches sowohl die Erdoberfläche inklusive Boden und Oberflächengewässer, Bebauung und Vegetation als auch die Atmosphäre einschließt. Für die atmosphärischen Gitterzellen werden die atmosphärischen Zustände des Impulses (Wind, Transport), der Wärme und der Feuchte berechnet. Durch die Berücksichtigung der physikalisch-mathematischen Interaktion benachbarter Atmosphärogitterzellen sowohl untereinander als auch mit der digitalisierten Erdoberfläche sowie durch die Berechnung der zeitlichen Änderung der atmosphärischen Zustandsgrößen in diskreten Zeitschritten kann der atmosphärische Zustand abgebildet werden.

Um das Modell operabel halten zu können, ist eine bei numerischen Modellen allgemein übliche, vereinfachende Abstraktion der Realität notwendig, indem der reale Raum in ein diskretes Raumgitter zerlegt wird. Ferner müssen die Oberflächeneigenschaften parametrisiert werden, da die Vielzahl der in natura anzutreffenden Objekte (Bau-, Gesteins- und Bodenmaterialien sowie Vegetationsarten) einschließlich ihrer morphologischen und thermophysikalischen Eigenschaften nicht in ihrer Gesamtheit erfasst werden kann. Stattdessen können nur einige wenige repräsentative Objekttypen berücksichtigt werden, die zur Parametrisierung der übrigen Typen herangezogen werden. Die Parametrisierungen in ENVI-met 3.2 erlauben auch die Klassifizierung von Oberflächengewässern, Dachbegrünungen und verschiedenen Vegetationsformen.

Neben der Information zur Beschreibung der Erdoberfläche ist für die Simulation die Vorgabe von meteorologischen Randbedingungen erforderlich. Diese beinhalten sowohl Angaben zu den gewünschten Witterungsbedingungen, zum Monatsdatum (aus dem die solaren Strahlungsbedingungen und damit der Wärmehaushalt zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre berechnet werden) sowie zu lokal- und regionalspezifischen klimatischen Besonderheiten, insbesondere Windverhältnisse und aerodynamische Oberflächenrauigkeit.

Das Modell wird in der Version 3.2 verwendet. Diese Version erlaubt die Vorgabe von Tagesgängen der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte, die durch das Modell nachgebildet werden (sog. Forcing), während die Vorgängerversionen die Lufttemperatur und relative Luftfeuchte nur über Initialwerte zum Startzeitpunkt der Modellierung simuliert haben. Die Forcing-Tagesgänge werden aus den Messdaten der Klimastationen (Inputdaten) generiert.

Ausgehend von den topographischen und klimatischen Eingangsparametern können anschließend für die atmosphärischen Gitterzellen zahlreiche klimatische Zustandsgrößen berechnet werden, unter anderem die hier benötigte Windgeschwindigkeit und -richtung, Lufttemperatur, Luftfeuchte und thermische Behaglichkeit.

Die thermische Behaglichkeit wird anhand der physiologischen Äquivalenttemperatur (PET) nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (VDI 2008) bewertet. Sie wird direkt aus den meteorologischen Modellergebnisgrößen Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Strahlungstemperatur und Windgeschwindigkeit unter zusätzlicher Berücksichtigung humanphysiologischer Kenngrößen sowie des Grades der körperlichen Aktivität und der Bekleidungsart berechnet.

3 Ergebnisse (der klimatischen Untersuchungen und der Simulation der Min- derungsszenarien)

3.1 Messungen des In-Situ-Messnetzes

Es wurde ein Messnetz aus acht Klimastationen in der Modellstadt Oberhausen installiert. Die Festlegung der Messstandorte erfolgte in repräsentativen Klimatopen nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (VDI 1997/2003) (Tab. 1 und Abb. 1), die durch ihre nutzungsbedingten mikroklimatischen Ausprägungen charakterisiert sind. Die Flächennutzungsstruktur der Umgebung der jeweiligen Klimastationen in einer 0,25 km² umfassenden Fläche ist in Abb. 2 dargestellt. Diese Flächengröße wurde auch für die Modellsimulationen verwendet (s. 3.2.1). Die Klimastationen (Fa. Friedrichs, Schenefeld) erfassen die Lufttemperatur (t_a) und relative Luftfeuchtigkeit (rH) mit kombinierten Temperatur- und Feuchtesensoren (Pt100/kapazitives Messelement) in ca. 3,4 m Höhe, sowie die Windgeschwindigkeit (WG) und -richtung (WR) durch Schalenkreuzanemometer und Windfahnen in etwa 3,9 m Messhöhe (Tab. 1). Die Messhöhe wurde wegen des Sicherheitsaspektes gegen Vandalismus gewählt, da die Geräte zur exakten Wiedergabe des jeweiligen Klimatopuntergrundes an Laternenmasten befestigt waren und somit nicht durch Zäune abgesichert werden konnten. Die Daten wurden mittels Combilog 1020 Dataloggern als 1-Minutenmittelwerte aufgezeichnet, zur statistischen Auswertung auf Stundenwerte gemittelt und ganzjährig in der Mitteleuropäischen Zeit (MEZ) wiedergegeben. Zur Übersicht werden in Abb. 1 und Tab. 2 die Standorte und erfassten Parameter sowohl von A4.3.2 als zusätzlich auch der Aktivitäten 4.1.3. und 4.3.1 angegeben.

Tab. 1: Übersicht über die Bezeichnung und Lage der Klimamessstationen

Stationsname	Nr.	Kürzel	Klimatop	Strasse	Geogr. Koord.		Fläche in km ²	Klimatopanteil in % bezogen auf OB	Höhe NN in m	Höhe der Messsensoren in m ü. Gr.		
					Länge	Breite				t_a /rH	WR	WG
Innenstadt (hochversiegelt)	1	INHO	Innenstadt	Marktstr. 129	6° 51' 33" E	51° 28' 12" N	3.0	3.9	43	3.6	3.8	4.1
Innenstadt	2	INN	Innenstadt	Hermann-Albertz-Str./ Wörthstr.	6° 51' 19" E	51° 28' 06" N			40	3.7	3.9	4.2
Park	3	PARK	Park	Königshütter Park	6° 51' 30" E	51° 28' 37" N	6.4	8.3	36	3.1	3.3	3.6
Gewerbe	4	GEW	Gewerbe	Im Lipperfeld 40	6° 52' 02" E	51° 29' 14" N	7.2	9.4	37	3.5	3.7	4.0
Stadttrand	5	STA	Stadttrand	Quellstr. 66	6° 54' 36" E	51° 29' 34" N	11.8	15.3	35	3.3	3.5	3.8
Gewässer	6	WAS	Gewässer	Einbleckstr.-Brücke	6° 54' 43" E	57° 70' 61" N	0.9	1.2	37	3.4	3.6	3.9
Wald	7	WALD	Wald	Laubstr. 51	6° 50' 02" E	51° 32' 08" N	10.8	14.1	57	3.3	3.5	3.8
Freiland	8	FREI	Freiland	Grasshofstr. 180	6° 47' 23" E	51° 32' 05" N	13.8	17.9	32	3.3	3.5	3.8
			Industrie				3.1		4			
			Vorstadt				14.0		18.1			
			Halde				0.6		0.7			
			Stadt				5.5		7.1			
			Gesamt				77.0		100			

© UDE (AGAK)

3.1.1 Repräsentanz des Messzeitraumes

Die klimatische Repräsentativität des Untersuchungszeitraumes (01.08.2010-31.07.2011) wird anhand langjähriger Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag (1961-1990) überprüft (Abb. 3, rechts). Die mittlere monatliche Lufttemperatur zeigt nur geringe Abweichungen vom langjährigen Mittelwert. Auffallend sind jedoch der zu kalte und schneereiche Dezember 2010 (ca. - 5 K im Vergleich zur Periode 1961-1990) und der zu warme April 2011 (+ 5 K). Des Weiteren ist die Untersuchungsperiode geprägt durch einen überdurchschnittlich feuchten August (166 mm = 267 % der langjährigen monatlichen Niederschlagssumme) und November 2010 (121 mm = 168 %) sowie eine sehr trockene Episode im März (21 mm = 34 %), April (19 mm = 36 %) und Mai 2011 (14 mm = 22 %). Die registrierte Niederschlagssumme in den Monaten August 2010 sowie November 2010 übertraf dabei sogar die jeweiligen absoluten Niederschlagsmaxima zwischen 1961 und 1990 (August: 130 mm, 1968; November: 113 mm, 1977). Demgegenüber lag die Niederschlagssumme im März 2011 unter dem absoluten Minimum von 22 mm (1973).

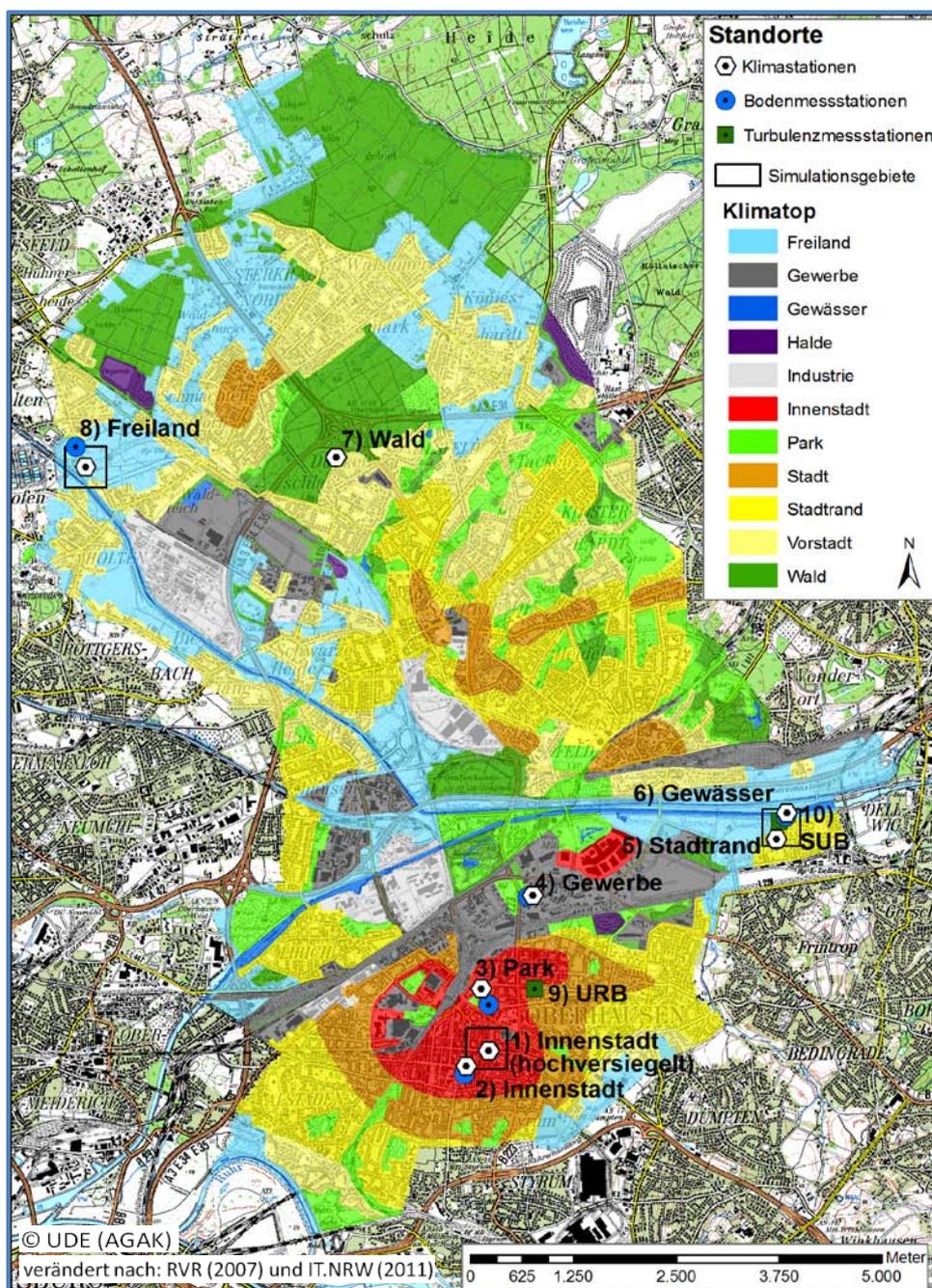


Abb. 1: Übersicht über die Klimatope, Messstandorte und Modellgebiete in Oberhausen (verändert nach RVR (2007) und IT.NRW (2011))

Abb. 3 (links) zeigt eine vergleichende Häufigkeitsverteilung der Großwettertypen¹ während des Untersuchungszeitraums und dem langjährigen Mittel (1881-2009). Der Großwettertyp „West“ tritt im langjährigen Mittel am häufigsten auf, während er bezogen auf die einjährige Messperiode unterrepräsentiert ist. Die Großwettertypen „Nordost“ und „Nordwest“ traten im Messzeitraum ebenfalls seltener auf. Demgegenüber steht ein erhöhtes Vorkommen der Großwettertypen „Ost“, „Süd“ und „Südwest“ während des Untersuchungszeitraumes. Durch die nur einjährige Messperiode sind die

¹ Die Großwettertypen beschreiben die „mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes, mindestens von der Größe Europas während eines mehrtägigen Zeitraumes, in welchem gewisse Züge aufeinanderfolgender Wetterlagen gleichbleiben, eben jene Züge, welche die Witterung in den einzelnen Teilgebieten des Großraums bedingen“ (WERNER und GERSTENGARBE 2010).

aufgezeigten Abweichungen in der Häufigkeitsverteilung der Großwettertypen gegenüber dem langjährigen Mittel nicht ungewöhnlich. Für stadtklimatische Fragestellungen sind jedoch vor allem austauscharme Wetterlagen („Strahlungstage“) von Bedeutung, so dass der Fokus der Datenauswertung auf diesen Wetterlagen liegt (s. 3.1.4). Abb. 4 gibt eine Übersicht über die Verteilung der 76 Strahlungstage während des Messzeitraumes (01.08.2010-31.07.2011). Hierbei wird auch das Auftreten antizyklonaler Großwetterlagen im Frühjahr (Abb. 5) durch die hohe Anzahl an Strahlungstagen in dieser Jahreszeit deutlich.

Tab. 2: Übersicht über die Stationen des Klimamessnetzes der Aktivitäten 4.1.3, 4.3.1 und 4.3.2 und der erfassten Messgrößen

Nr.	Klimatop	Stationsname	Kürzel	Messgrößen	Aktivitäten
1	Innenstadt	Innenstadt (hochversiegelt)	INHO	t_a , rH, WR, WG, t_B	4.1.3/ 4.3.2
2	Innenstadt	Innenstadt	INN	t_a , rH, WR, WG, t_B , Q_B , θ	4.1.3/ 4.3.2
3	Park	Park	PARK	t_a , rH, WR, WG, t_B	4.1.3/ 4.3.2
4	Gewerbe	Gewerbe	GEW	t_a , rH, WR, WG, t_B , Q_B	4.1.3/ 4.3.2
5	Stadtrand	Stadtrand	STA	t_a , rH, WR, WG, t_B , Q_B	4.1.3/ 4.3.2
6	Gewässer	Gewässer	WAS	t_a , rH, WR, WG, t_B , Q_B	4.1.3/ 4.3.2
7	Wald	Wald	WALD	t_a , rH, WR, WG, t_B , Q_B	4.1.3/ 4.3.2
8	Freiland	Freiland	FREI	t_a , rH, WR, WG, t_B , Q_B , θ	4.1.3/ 4.3.2
9	Innenstadt	urbaner Standort ¹	URB	Q_H , Q_E , Q^* , WR, WG	4.3.1
10	Gewässer	suburbaner Standort ²	SUB	Q_H , Q_E , Q^* , WR, WG	4.3.1

¹ im näheren Umfeld der Stationen 1 und 2 © UDE (AGAK)

² im näheren Umfeld der Station 6

t_a : Lufttemperatur (in °C), rH: relative Feuchte (in %); WR: Windrichtung (in °),
 WG: Windgeschwindigkeit (in m/s), t_B : Bodentemperatur (in °C), θ : Bodenfeuchte (in Vol.-%),
 Q_B : Bodenwärmestrom (in W/m²), Q_H : turbulente sensible Wärmeflussdichte (in W/m²),
 Q_E : turbulente latente Wärmeflussdichte (in W/m²), Q^* : Strahlungsbilanz (in W/m²)

3.1.2 Datenaufbereitung und Lückenfüllung

Die als Minutenwerte erfassten Parameter Lufttemperatur (t_a), relative Luftfeuchtigkeit (rH), Windgeschwindigkeit (WG) und –richtung (WR) wurden zur Auswertung auf Stundenwerte gemittelt. Außerdem erfolgte die Füllung der beispielsweise durch Batterieausfall aufgetretenen Datenlücken mittels eines sogenannten gapfilling-Verfahrens. Für die Lückenfüllung wurde zunächst durch eine Kreuzkorrelation aller Parameter an allen Stationen die Station bestimmt, die die beste Übereinstimmung mit der zu korrigierenden Station aufwies (Tab. 3). Durch Korrelation der so gefundenen Stationspaare wurde in linearer Abhängigkeit die Gleichung zur Lückenfüllung bestimmt. Tab. 4 stellt die Datenlücken der acht Stationen vor und nach Anwendung des gapfilling-Verfahrens dar. Für den Parameter Windrichtung (WR) konnte dieses Verfahren nicht angewandt werden, da an fünf der acht Stationen die Korrelation der Stationspaare unter die gewählte Gütegrenze von $r^2 = 0,7$ (entsprechend dem Grenzwert eines guten Modellfit nach MEIBNER und WENDER (2008)) fiel. Nach der beschriebenen Auffüllung der Datenlücken erfolgte eine weitere Bearbeitung des Datensatzes, um statistisch belastbare Aussagen treffen zu können. In diesem Schritt wurden die bei einem Parameter an einer Station noch auftretenden Datenlücken auch aus der Auswertung der anderen Stationen herausgenommen, so dass ein Datensatz entstand, der für alle Stationen dieselbe Anzahl der Daten jedes Parameters enthält. So weist der Datensatz insgesamt für die Lufttemperatur eine Lücke von

1,1 %, für die relative Luftfeuchtigkeit 4,6 %, für die Windgeschwindigkeit 1,4 % und für die Windrichtung 18,4 % auf (Tab. 4).

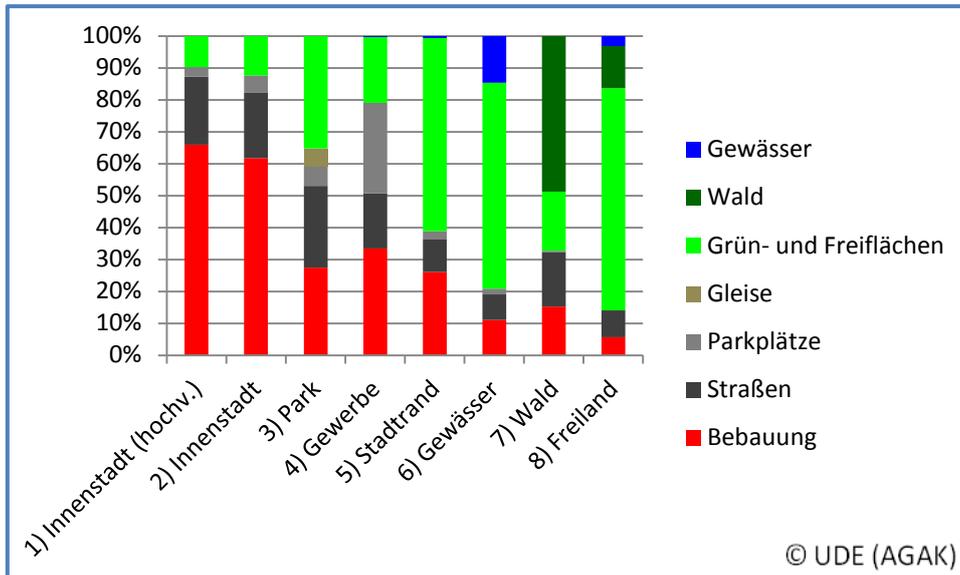


Abb. 2: Flächennutzungsanteile der Klimatope in der Umgebung (0,25 km²) der Messstationen in Oberhausen

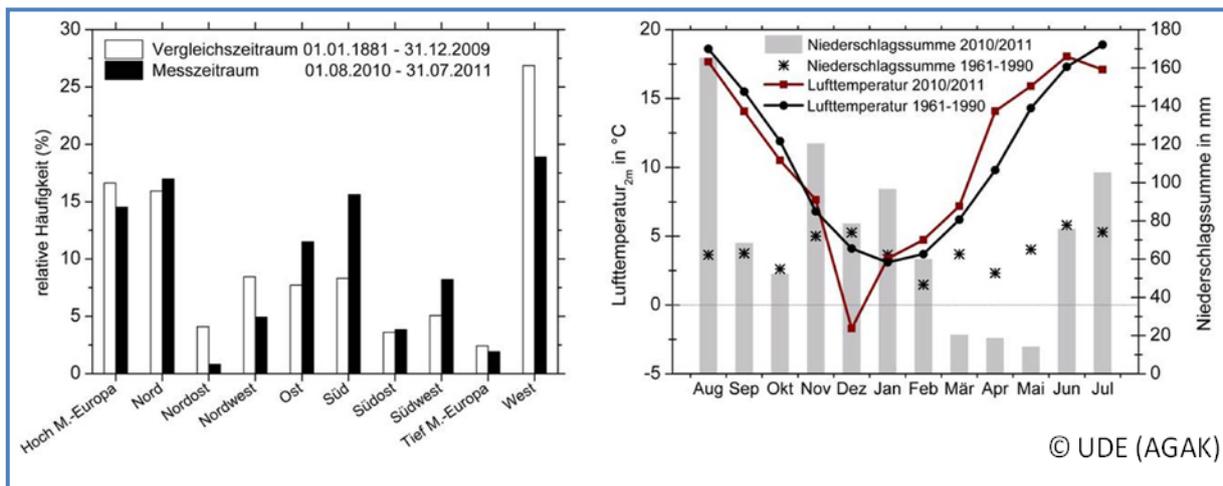


Abb. 3: links: Vergleich der Großwettertypen des langjährigen Vergleichszeitraumes 01.01.1881-31.12.2009 (DWD 2010/11, WERNER und GERSTENGARBE 2010) mit den Großwettertypen des Messzeitraumes 01.08.2010-31.07.2011 rechts: Vergleich der monatlichen Niederschlagssumme und der mittleren monatlichen Lufttemperatur der Referenzperiode 1961-1990 mit den Werten aus der vorliegenden Untersuchung (Temperaturdaten der Station Duisburg-Laar (DWD 2011) im Vergleich zu Lufttemperaturwerten gemessen in 3,3 m ü. Gr. am Stadtrand von Oberhausen (Station 5); Niederschlagsdaten der Station Oberhausen-Buschhausen für den Messzeitraum und die Referenzperiode (EGLV 2011)

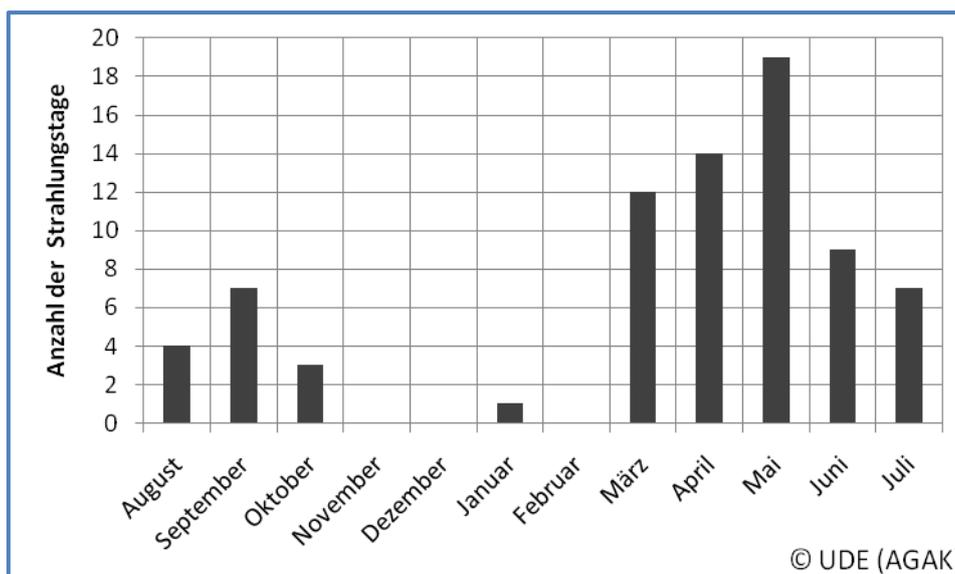


Abb. 4: Übersicht über die Verteilung der Strahlungstage in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010-31.07.2011 nach Monaten

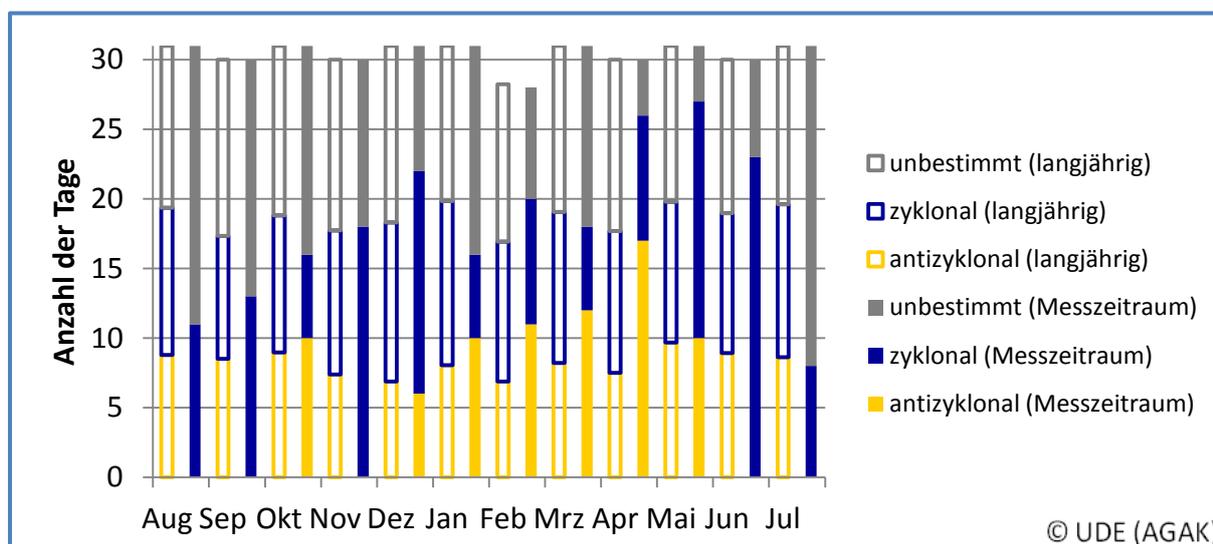


Abb. 5: Vergleich der Verteilung der Witterungscharakteristika (antizyklonal, zyklonal, unbestimmt) der aufgetretenen Großwettertypen im langjährigen Mittel 01.01.1881-31.12.2009 (DWD 2010/11, WERNER und GERSTENGARBE 2010) mit dem Messzeitraum 01.08.2010-31.07.2011 nach Monaten

3.1.3 Auswertung der Daten

Die Auswertung der Daten erfolgte unter Betrachtung des Einflusses unterschiedlicher Flächennutzungsstrukturen auf den thermischen Komfort. Dazu wurden einerseits separate Auswertungen der gemessenen Einzelparameter Lufttemperatur (t_a), relative Luftfeuchte (rH), Windgeschwindigkeit (WG) und -richtung (WR) durchgeführt. Andererseits wurde auch die thermische Belastung (ausgedrückt durch die physiologische Äquivalenttemperatur PET) zur Synopse der Wirkungen meteorologischer Parameter auf die Human-Biometeorologie betrachtet (vgl. 3.1.5). In Abb. 6 wird zur Übersicht für den Vergleich mit den Anomalien (Abb. 7 und Abb. 8) der Jahresgang der Monatsmittelwerte der Parameter Lufttemperatur (t_a) und relative Luftfeuchte (rH) als arithmetisches Gebietsmittel der acht Klimastationen in Oberhausen dargestellt. Die Einordnung und Repräsentativitätsprüfung des Messjahres erfolgte bereits in 3.1.1. Die Abbildung zeigt im Jahresgang den inversen Verlauf von Lufttem-

peratur und relativer Luftfeuchte mit hohen Temperaturwerten in den Sommermonaten (Juni, Juli, Aug.) und korrespondierenden geringen relativen Luftfeuchtwerten sowie niedrigen Temperaturen in den Wintermonaten (Dez. und Jan.) und entsprechend hohen relativen Luftfeuchtwerten. Als Besonderheiten nochmals erwähnenswert sind die niedrige Lufttemperatur des Dezembers 2010, die deutlich von den Werten des langjährigen Mittels abweicht, sowie die geringe relative Luftfeuchtigkeit, die im April und Mai 2011 sogar niedrigere Werte als in den Sommermonaten annimmt, wodurch die geringen Niederschläge und das häufige Auftreten antizyklonaler Strahlungswetterlagen in diesen Monaten widerspiegelt werden (vgl. 3.1.1).

Tab. 3: Korrelation der Daten der Stationspaare, die zur Auffüllung der Datenlücken der Parameter Lufttemperatur t_a , relativen Luftfeuchte rH und Windgeschwindigkeit WG der acht Klimastationen in Oberhausen verwendet wurden

© UDE (AGAK)	INHO (1)	INN (2)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	WALD (7)	FREI (8)
Lufttemperatur t_a								
wird aufgefüllt durch	INN T	INHO T	GEW T	INN T	WAS T	GEW T	PARK T	STA T
r^2 der Korrelation	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
relative Luftfeuchte rH								
wird aufgefüllt durch	INN rH	INHO rH	GEW rH	PARK rH	WAS rH	STA rH	PARK rH	STA rH
r^2 der Korrelation	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Windgeschwindigkeit WG								
wird aufgefüllt durch	PARK WG	GEW WG	INHO WG	INN WG	INN WG	FREI WG	PARK WG	STA WG
r^2 der Korrelation	0.7	0.9	0.7	0.9	0.8	0.7	0.6 ¹	0.7

¹Ausnahme: für den Standort WALD (7) wurde eine Korrelation von $r^2 = 0.6$ akzeptiert, da der Wald aufgrund seiner Eigenschaften deutlich von den anderen Standorten abweicht, dennoch aber eine Lückenfüllung für den Parameter Windgeschwindigkeit wichtig und sinnvoll war

Tab. 4: Aufgetretene prozentuale Datenlücken im Jahressatz der Stundenmittelwerte der Parameter Lufttemperatur t_a , relativen Luftfeuchte rH, Windgeschwindigkeit WG und –richtung WR der acht Klimastationen in Oberhausen vor und nach Auffüllung der Lücken für den Messzeitraum 01.08.2010-31.07.2011

© UDE (AGAK)	INHO (1)	INN (2)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	WALD (7)	FREI (8)	Gesamt
Lufttemperatur t_a									
Anteil Datenlücken vor Lückenfüllung in %	4.8	3.1	3.6	1.8	4.4	3.9	1.4	1.7	
Anteil Datenlücken nach Lückenfüllung in %	1.1	1.1	0.8	0.8	0.5	0.6	0.1	0.3	1.1
relative Luftfeuchte rH									
Anteil Datenlücken vor Lückenfüllung in %	6.9	6.8	3.6	1.8	8.2	3.9	5.8	7.5	
Anteil Datenlücken nach Lückenfüllung in %	3.2	3.2	1.7	1.7	1.4	1.4	0.4	0.4	4.6
Windgeschwindigkeit WG									
Anteil Datenlücken vor Lückenfüllung in %	4.8	3.1	3.6	1.8	5.0	4.4	1.8	1.7	
Anteil Datenlücken nach Lückenfüllung in %	1.2	0.8	1.2	0.8	0.7	0.3	0.1	0.3	1.4
Windrichtung WR									
Anteil Datenlücken vor Lückenfüllung in % (Windstillen werden nicht als Datenlücken gewertet)	5.5	3.1	3.3	1.7	5.0	4.5	5.3	1.7	18.4

In Abb. 7 und Abb. 8 ist die Abweichung der Monatsmittelwerte der einzelnen Stationen vom Gebietsmittel in Oberhausen zu sehen. Sowohl für die Lufttemperatur, als auch für die relative Feuchte zeigt sich eine stärkere Differenzierung der Stationen und somit höhere Abweichungen im Frühjahr und Sommer (März bis September); im Winter hingegen sind Unterschiede weniger stark ausgeprägt. Die beiden Innenstadtstandorte (1 und 2) sowie der Gewerbestandort (4) zeigen ganzjährig eine positive Abweichung der Temperatur vom Gebietsmittel und eine negative Abweichung der Feuchte. Die Rangfolge der Standorte bleibt ganzjährig gleich: Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) zeigt die höchsten Abweichungen (T_a : maximal 0,9 K im Mai und rH: maximal –5,1 % im April) vor Innenstadt (Station 2) und Gewerbe (Station 4). Zwei Standorte (Park (Station 3) und Stadtrand (Station 5)) weisen im Jahresverlauf das Vorzeichen wechselnde Abweichungen auf. Der Parkstandort (3) zeigt im Frühjahr (März bis Mai) eine geringe positive Temperaturabweichung im Vergleich zum Gebietsmittel, im Rest des Jahres hingegen eine negative. Dies lässt sich mit dem aufgrund der hohen Anzahl

antizyklonaler Großwetterlagen (Abb. 5) außergewöhnlich trockenen und strahlungsreichen Frühjahr erklären, so dass der Park unzureichend bewässert war und ähnliche Charakteristiken aufweist, wie die umgebenden Innenstadtstandorte (vgl. auch Ergebnisse des Schlussberichtes aus A4.1.3 und A4.3.1). Dementsprechend ist die Abweichung der relativen Feuchte des Parks (Station 3) im Frühjahr negativ. Die restlichen Klimatope Gewässer (Station 6), Wald (Station 7) und Freiland (Station 8) weisen im gesamten Messzeitraum negative Temperaturabweichungen und positive Feuchteabweichungen vom Gebietsmittel auf. Die Rangfolge der Standorte variiert. Bei der Temperatur zeigt der Gewässerstandort (6) die geringsten Abweichungen, während der Wald (Station 7) im Sommer und das Freiland (Station 8) im Frühjahr die höchste Abweichung aufweist. Ähnliches gilt für die relative Feuchte: Station 7 (Wald) zeigt im Sommer die höchsten Abweichungen und Freiland (Station 8) im Frühjahr, wobei Station 6 (Gewässer) im Frühjahr ähnlich hohe Werte wie Station 8 (Freiland) erreicht.

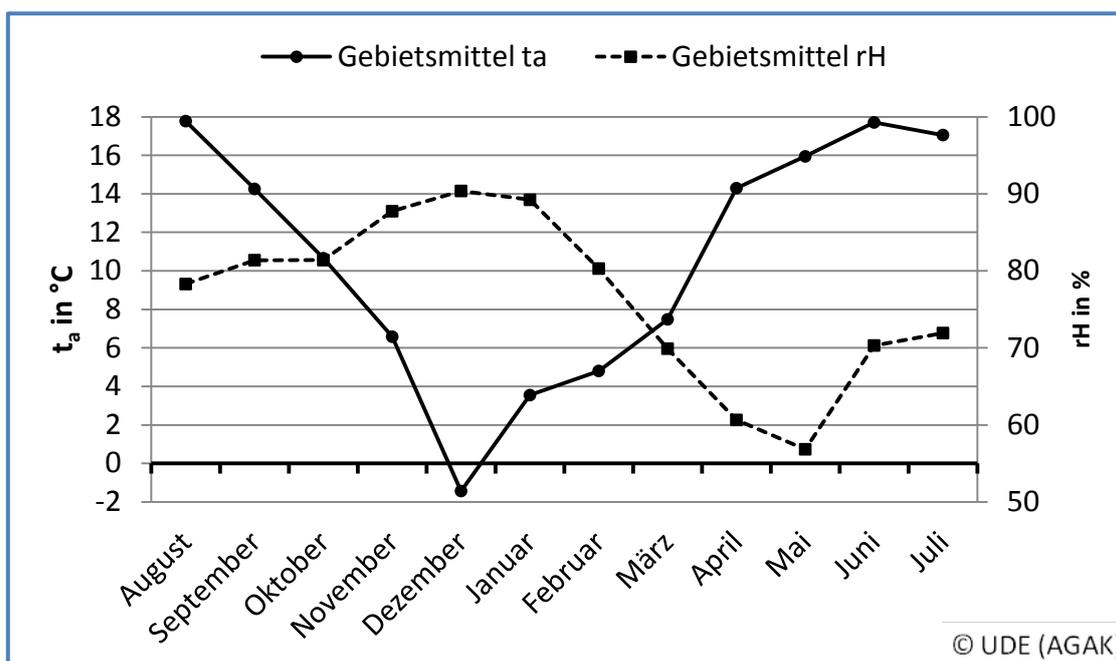


Abb. 6: Jahresgang der Monatsmittelwerte des Gebietsmittels der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit in Oberhausen im Messzeitraum 01.08.2010-31.07.2011 (auf Basis von Stundenmittelwerten)

Die relativ seltenen Ereignisse, in welchen die Stadt höhere Feuchtwerte als das Umland aufweist (sog. UME-Ereignisse von engl. „urban moisture excess“ (KUTTLER et al. 2007)), sind in Abb. 9 am Beispiel der Stationen Freiland (8) und Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) als Differenz des Dampfdruckes (e) dargestellt. Sie werden durch die geringere Abkühlung in der Stadt im Vergleich zu den Umlandstationen bedingt, so dass eine höhere Taupunkttemperatur einen höheren Luftfeuchtegehalt ermöglicht. Entsprechende Ereignisse treten vor allem in der zweiten Nachthälfte auf. Dieser Tagesgang des UME-Verlaufs zeigt sich vor allem im Sommer, wohingegen im Winter kaum Differenzen auftreten (Abb. 9).

Desweiteren können die Klimatope bzw. die sie repräsentierende Stationen durch die Auftrittshäufigkeit meteorologischer Ereignistage charakterisiert werden. Tab. 5 und Tab. 6 geben eine Übersicht der meteorologischen Parameter der acht Klimastationen in Oberhausen im Vergleich mit dem Gebietsmittel aus den acht Stationen, sowie der Eintrittshäufigkeit meteorologischer Ereignistage.

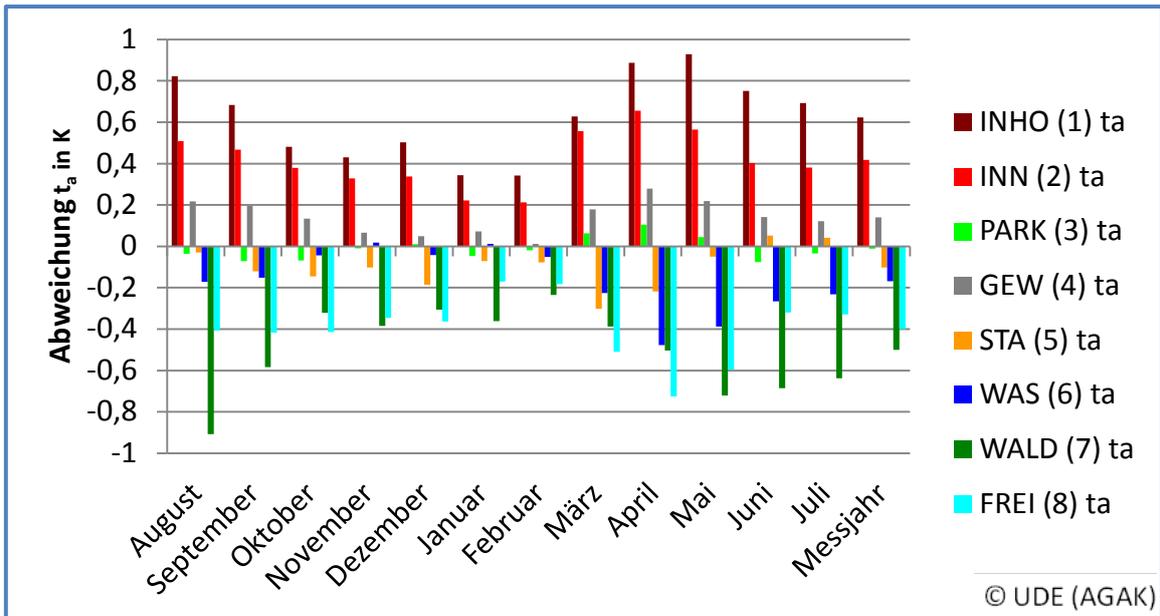


Abb. 7: Abweichung der Monatsmittelwerte der Standorte der Lufttemperatur vom Gebietsmittel Oberhausens, zusätzlich Abweichung der Jahresmittelwerte der Stationen der Lufttemperatur vom Gebietsmittel des Messjahres 01.08.2010-31.07.2011 in Oberhausen

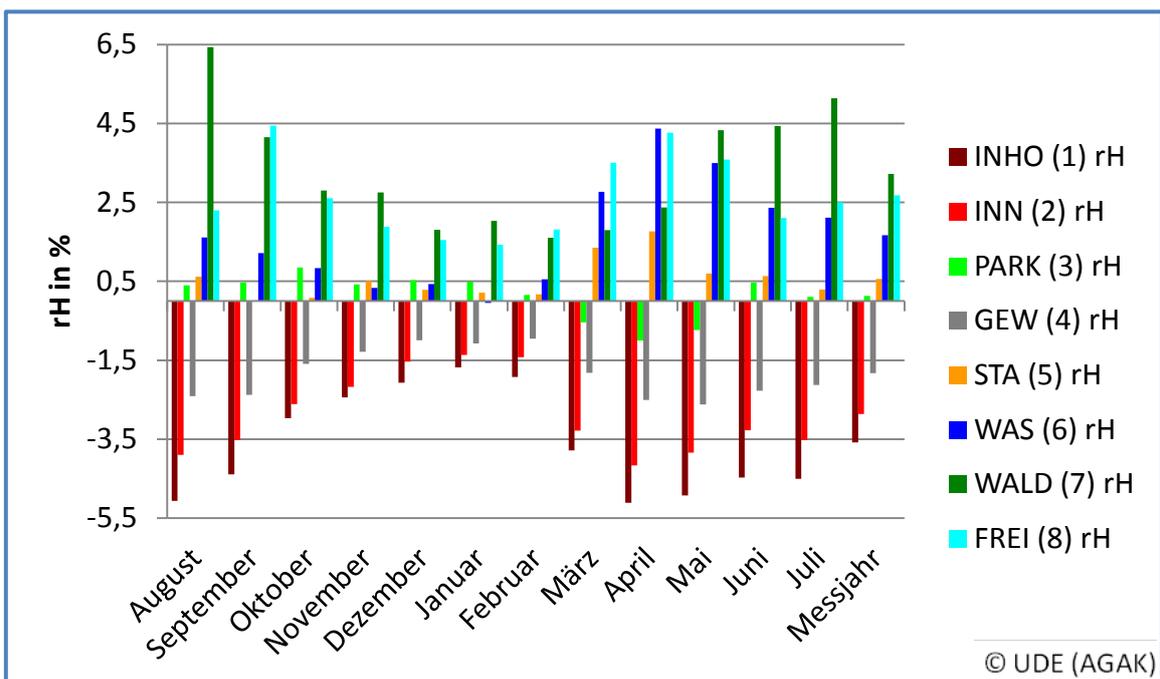


Abb. 8: Abweichung der Monatsmittelwerte der Standorte der relativen Luftfeuchte vom Gebietsmittel Oberhausens, zusätzlich Abweichung der Jahresmittelwerte der Stationen der relativen Luftfeuchte vom Gebietsmittel des Messjahres 01.08.2010-31.07.2011 in Oberhausen

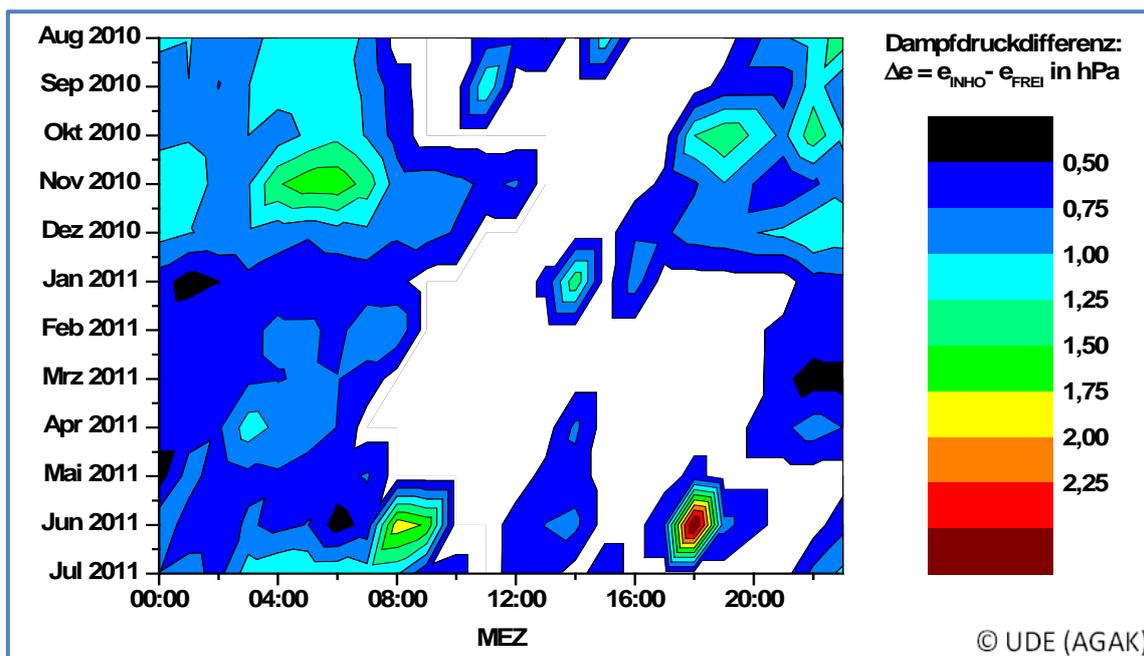


Abb. 9: Auftreten von UME-Ereignissen, dargestellt als Dampfdruckdifferenz (Δe) zwischen Innenstadt (hochversiegelt) (1) und Freiland (8), als Tages- und Jahresgang (berücksichtigt wurden nur Stunden, in denen UME ($e_{\text{urban(INHO)}} - e_{\text{rural(FREI)}} > 0,5 \text{ hPa}$) war) für den Messzeitraum 01.08.2010-31.07.2011

Tab. 5: Übersicht über die meteorologischen Parameter der acht Klimastationen in Oberhausen als Mittel über den Messzeitraum 01.08.2010-31.07.2011 auf Basis von Stundenmittelwerten

© UDE (AGAK)	INHO (1)	INN (2)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	WALD (7)	FREI (8)	Gebietsmittel Oberhausen
Mittlere Lufttemperatur t_a in °C	11.3	11.1	10.7	10.8	10.6	10.5	10.2	10.3	10.7
Min. t_a in °C	-6.9	-7.0	-8.3	-8.1	-10.4	-8.5	-8.3	-10.8	-8.2
Max. t_a in °C	35.3	35.2	34.4	34.9	35.0	34.2	34.3	34.3	34.6
Mittlere rel. Luftfeuchte rH in %	72.9	73.7	76.6	74.7	77.1	78.2	79.7	79.2	76.5
Mittlere Windgeschwindigkeit WG in m/s	0.6	1.5	0.6	1.4	0.7	2.0	0.3	1.0	1.0
Hauptanströmungsrichtung WR	W	SSW	SSW	SSW	W	WSW	SSO	W	SW
Häufigkeit der Hauptwindrichtung	14.9%	29.5%	21.6%	14.5%	25.2%	41.2%	14.7%	16.8%	21.64%

Tab. 6: Anzahl klimatologischer Ereignistage an den acht Klimastationen in Oberhausen während des Messzeitraumes 01.08.2010-31.07.2011 (auf Basis von Stundenmittelwerten)

Ereignistage	© UDE (AGAK)	INHO (1)	INN (2)	PARK (3)	GEW (4)	STA (5)	WAS (6)	WALD (7)	FREI (8)
Heiße Tage	$t_{\text{max}} \geq 30^\circ\text{C}$	3	3	3	3	3	3	2	3
Sommertage	$t_{\text{max}} \geq 25^\circ\text{C}$	35	24	26	25	29	19	16	23
tropische Nächte	$t_{0\text{Uhr}} > 20^\circ\text{C}$	12	12	9	12	8	6	5	5
Grillpartytage	$t_{21\text{Uhr}} > 20^\circ\text{C}$	40	42	25	33	26	25	16	17
Frosttage	$t_{\text{min}} < 0^\circ\text{C}$	51	55	60	59	69	61	64	72
Eistage	$t_{\text{max}} < 0^\circ\text{C}$	18	18	18	18	19	17	19	19

Die Innenstadtstandorte (Station 1 und 2) zeigen sowohl im Lufttemperaturmittel, als auch in den Extremwerten eine deutliche Überwärmung im Vergleich zum Gebietsmittel. Bei den weiteren Stationen ist auffällig, dass Station 7 (Wald) und 6 (Gewässer) im Vergleich zu den Stationen 5 (Stadtstrand) und 8 (Freiland) höhere Minimumtemperaturen aufweisen und somit eine ausgleichende, den Kältestress reduzierende Wirkung haben. Dies wird auch bei Betrachtung der klimatologischen Ereignistage deutlich. Für die jeweils extremsten Hitze und Kälte bedingten Kenntage – heiße Tage und Eistage – besteht quasi keine Differenzierung durch die Flächennutzungen. Dies kann durch unterschiedliche Faktoren zustande kommen, entweder durch allochthone Luftmassen, wodurch die lokal-klimatischen Gegebenheiten in den Hintergrund treten, so dass die Eigenschaften der heran transportierten Luftmasse alle Klimatope gleichermaßen beeinflussen oder durch so extreme Verhältnisse, dass sich auch in den thermisch ausgleichend wirkenden Klimatopen (z. B. Gewässer und Freiland) die Eigenschaften von heißen Tagen oder Eistagen erreicht werden. Für die intermediären Ereignistage (Sommer-, Frost- und Grillpartytage) stellt sich hingegen eine deutliche Abhängigkeit zu den lokalen Gegebenheiten der Klimatope dar. Beispielsweise treten Sommer- und Grillpartytage in der hochversiegelten Innenstadt (Station 1) fast doppelt so oft auf, wie in den Klimatopen Gewässer und Wald (Stationen 6 und 7). Auch bei den Frosttagen lässt sich diese Differenzierung beobachten, wobei hier in den anthropogen unbeeinflussten Klimatopen höhere Eintrittshäufigkeiten erreicht werden. Ein eingängiges Beispiel für die anthropogene Beeinflussung und Überwärmung der Stadt mit ihren negativen Auswirkungen stellt der Kenntag „tropische Nacht“ dar, da hier der direkte Einfluss auf den Schlafkomfort der Stadtbevölkerung deutlich wird. Während des Messzeitraumes traten in den Innenstadtklimatopen (Station 1 und 2) sowie im Gewerbeklimatop (Station 4) doppelt so viele tropische Nächte auf, wie in den naturnahen Klimatopen Gewässer, Wald und Freiland (Stationen 6-8). Insgesamt gesehen zeigt die Innenstadt (Stationen 1 und 2) ein häufiges Auftreten der durch hohe Temperaturen begrenzten Ereignistage, während Station 6 und 7 sowohl eine geringere Eintrittshäufigkeit der Hitze, als auch der Kälte bedingten Kenntage aufweisen, als Station 5 und 8. Somit wird hier wiederum die ausgleichende Wirkung von Gewässer- und Vegetationsflächen auf das lokale Humanbioklima deutlich (s. auch 3.2.3).

Die Windrichtungsverteilung und –geschwindigkeit werden nicht nur durch die mikroklimatischen Gegebenheiten, sondern auch durch die Aufstellung der Stationen beeinflusst. Die Windgeschwindigkeit wird dabei durch die Oberflächenrauigkeit, also das Vorhandensein von Strömungshindernissen beeinflusst. Die größte Spanne der Windgeschwindigkeit liegt zwischen den Klimatopen Gewässer (Station 6) und Wald (Station 7) (Abb. 10). An der Gewässerstation (6) ist aufgrund der geringen Oberflächenrauigkeit des Rhein-Herne-Kanals quasi keine Beeinträchtigung der Strömung durch Reibung gegeben. Im Waldklimatop hingegen wird durch die Baumvegetation die Strömung stark reduziert, so dass an dieser Station auch am häufigsten Windstillen auftreten mit einem Calmenanteil von 60 % (Abb. 11). An den Stadtstationen hingegen erfolgt die reibungsbedingte Abschwächung der Strömung durch den Gebäudebestand. Auffällig ist hierbei Station 2 (Innenstadt) die eine vergleichsweise hohe mittlere Windgeschwindigkeit aufweist. Dies ist durch die Aufstellung der Station innerhalb einer offenen mehrspurigen Straßenkreuzung bedingt, wodurch eine relativ freie Anströmung möglich ist. Ähnliche Verhältnisse sind auch im Gewerbeklimatop (Station 4) gegeben. In der hochversiegelten Innenstadt (Station 1), sowie am Stadtstrand hingegen kommt der deutliche Einfluss der Bebauung mit geringen Windgeschwindigkeiten zu tragen.

Des Weiteren wird aufstellungsbedingt die Richtung der Windströmung beeinflusst. An Station 6 (Gewässer) treten durch die Anbringung der Station auf einer Brücke des Rhein-Herne-Kanals Kanalisationseffekte auf, so dass durch die Hauptwindrichtungen deutlich der Verlauf des Kanals in WSW-ENE-Richtung widergespiegelt wird (Abb. 11). Auch die weiteren Stationen zeigen teilweise Umlenkungs- und Abweichungserscheinungen zur ungestörten Anströmungsrichtung. So treten beispielsweise an der Freilandstation (8) hauptsächlich Anströmungen aus E und W auf, die von der eigentlichen Hauptanströmungsrichtung von SW-NE (am besten an Station 2 (Innenstadt) ausgebildet) durch den Einfluss nahegelegener Baumgruppen abweichen. Innenstadt hochversiegelt (Station 1) und Stadtstrand (5) zeigen hingegen deutliche Beeinflussung durch die Bebauung, so tritt am Stadtstrand N

kaum als Anströmungsrichtung auf, was auf ein nahe stehendes Gebäude zurückzuführen ist. In der Innenstadt hingegen ist die Südanströmung unterrepräsentiert, da diese Station auf der südlichen Seite eines Platzes in der Fußgängerzone der Innenstadt aufgestellt war, so dass eine bessere Anströmung aus Norden gegeben war (Abb. 11).

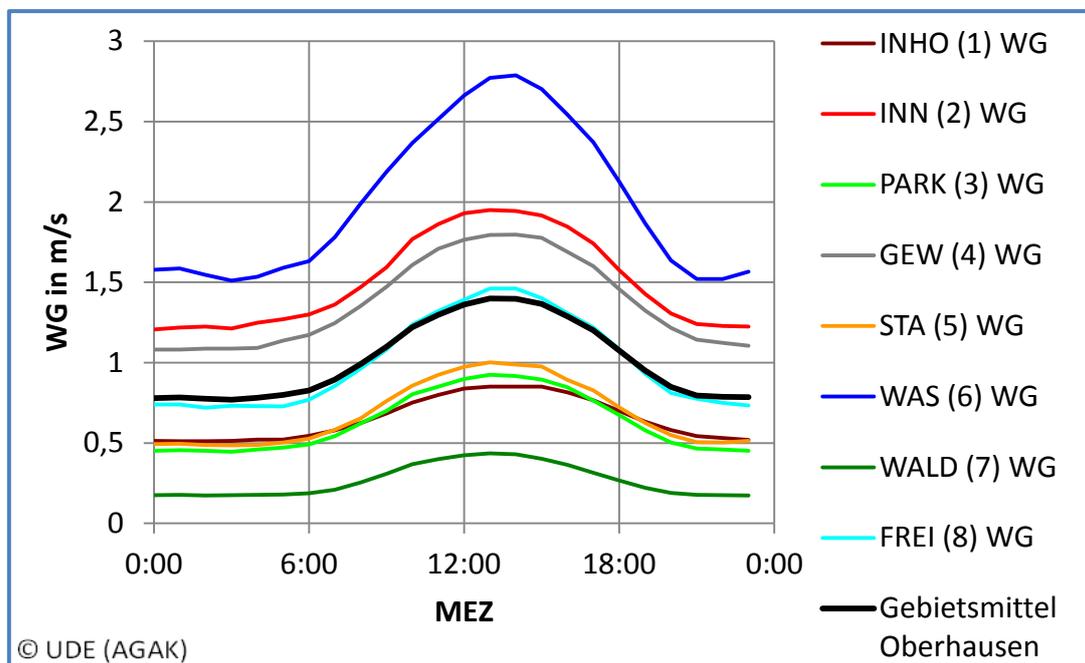


Abb. 10: Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit aller Stationen in Oberhausen während des Messzeitraumes 01.08.2010-31.07.2011 (auf Basis von Stundenmittelwerten)

3.1.4 Auswertung der Strahlungstage

Charakteristische mikro- und lokalklimatische Verhältnisse in der Stadtklimatologie bilden sich vor allem während autochthoner Witterungsbedingungen aus. Diese sind durch windschwache und strahlungsreiche Wetterlagen gekennzeichnet und werden daher auch als „Strahlungstage“ bezeichnet. Die Strahlungstage wurden in dieser Untersuchung mittels der atmosphärischen Austauschverhältnisse nach PASQUILL (1961) und POLSTER (1968, 1969) klassifiziert, die anhand von Strahlungsbilanz- und Windgeschwindigkeitswerten ein Schema zur Klassifizierung der atmosphärischen Schichtungs- und Stabilitätsverhältnisse aufgestellt haben (Tab. 7). Zur Ausweisung dieser Stabilitätsverhältnisse wurden die Temperatur- und Winddaten der Stationen 1, 2, 5 und 6 (Innenstadt, Stadtrand und Gewässer) verwendet, sowie der Turbulenzstationen 9 und 10 (urban und suburban), von welchen zusätzlich Strahlungsbilanzwerte mit in die Berechnung eingingen. Die Einordnung als Strahlungstage erfolgte demnach bei einem Auftreten der Diffusionskategorien A und B (stark bis mäßig labile Schichtungsverhältnisse) an mindestens 50 % der Tagstunden, sowie der Kategorien G und F (stark bis mäßig stabile Schichtungsverhältnisse) an mindestens 75 % der Nachtstunden (DÜTEMEYER 2000). Nach dieser Methode wurden 76 Tage des Messzeitraumes als Strahlungstage klassifiziert (zur Verteilung s. Abb. 4).

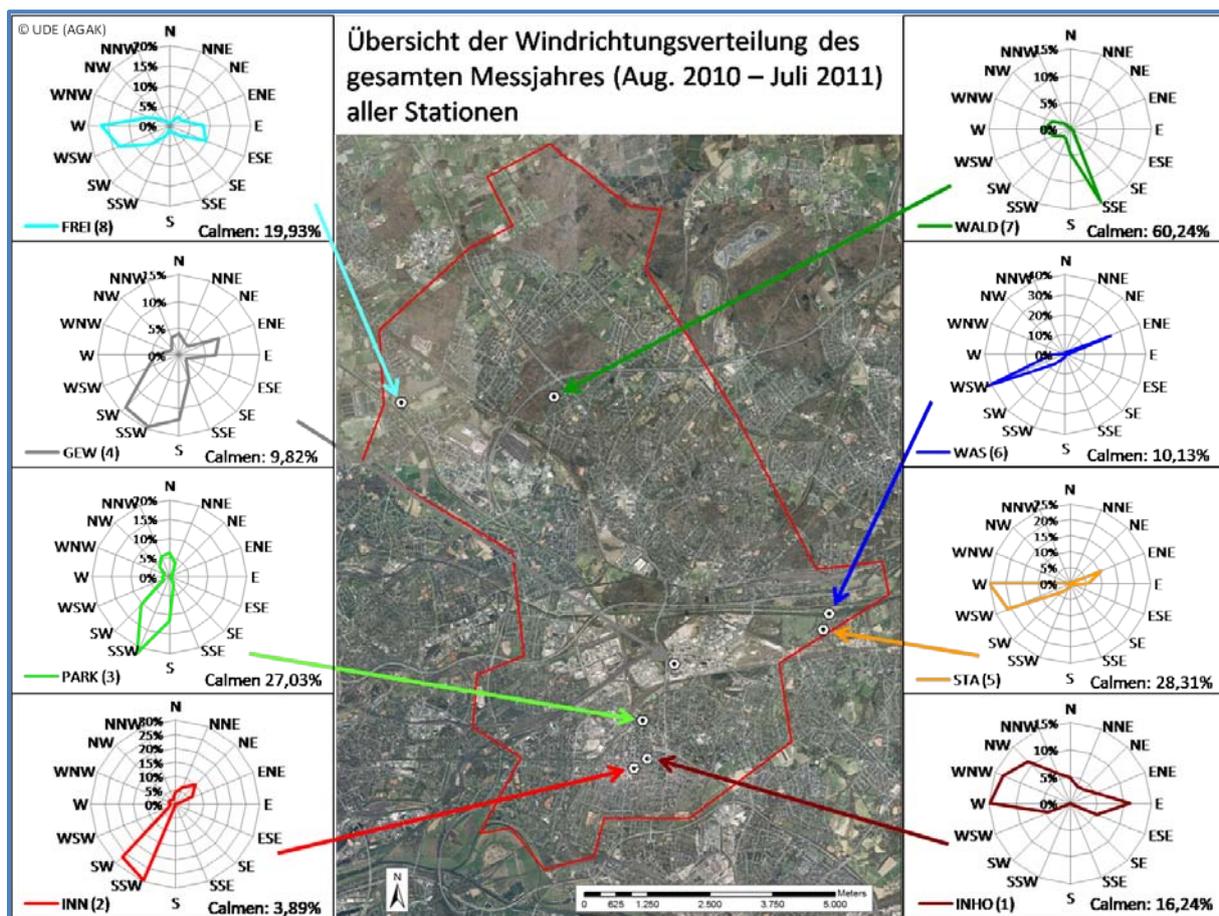


Abb. 11: Übersicht über die Windrichtungsverteilung aller Stationen während des Messzeitraumes 01.08.2010 bis 31.07.2011 (auf Basis von Stundenmittelwerten) in Oberhausen

Lufttemperatur

Strahlungstage zeichnen sich wie oben beschrieben durch hohe Ein- und Ausstrahlungswerte aus, die die lokalen klimatischen Standorteigenschaften in den Vordergrund treten lassen. Die unterschiedliche thermische Charakterisierung der Klimatope mit den verschiedenen Flächennutzungsstrukturen konnte so durch eine Temperaturmessfahrt während solch einer nächtlichen Strahlungswetterlage im April 2011 aufgezeigt werden. Die Innenstadt, sowie Gewerbeflächen zeigen eine deutliche Überwärmung im Vergleich zum Gebietsmittel (Abb. 12), wohingegen die durch Gewässer und Vegetation bestimmten Klimatope Gewässer, Wald und Freiland im Vergleich zum Gebietsmittel kühler ausfallen.

Daher lässt sich auch die als städtische Wärmeinsel UHI (engl. „urban heat island“) bezeichnete Temperaturdifferenz zwischen einem Stadt- und einem Umlandstandort besonders gut während Strahlungswetterlagen nachweisen. In Abb. 13 ist am Beispiel der Stationen 1 und 8 (Innenstadt hochversiegelt und Freiland) der Tages- und Jahresgang der urbanen Wärmeinsel dargestellt. Es zeigt sich, dass der Temperaturunterschied vor allem nachts besonders ausgeprägt ist. Dies wird vor allem im Frühjahr (häufiges Auftreten antizyklonaler Großwettertypen und Strahlungstage) mit einer hohen UHI-Intensität deutlich. Nach Abb. 14 ist die UHI zwischen der Innenstadt (Station 1) und dem Freilandklimatop (Station 8) am deutlichsten ausgebildet, kann aber auch im Vergleich mit anderen Standorten nachgewiesen werden. Dabei zeigt sich im Allgemeinen mit abnehmendem Versiegelungsgrad eine Verstärkung des Temperaturunterschiedes zur Innenstadt.

Tab. 7: Übersicht über die Definition der Diffusionskategorien nach PASQUILL und POLSTER auf Basis der Strahlungsbilanz und der Windgeschwindigkeit (verändert nach DÜTEMEYER 2000)

Windgeschwindigkeit WG in m/s	Strahlungsbilanz Q* in W/m ²						
	≤ -34.8	-34.7 bis -13.9	-13.8 bis 62.5	62.6 bis 111.2	111.3 bis 243.5	243.6 bis 417.6	> 417.6
≤ 0.8	G	G	D	C	B	A	A
0.9 bis 1.6	G	G	D	C	B	B	A
1.7 bis 2.6	F	E	D	D	C	B	A
2.7 bis 4.3	E	D	D	D	C	B	B
4.4 bis 6.2	E	D	D	D	D	C	C
≥ 6.3	D	D	D	D	D	D	D
Diffusionskategorien des atmosphärischen Schichtungszustandes							
A: stark labil		D: indifferent		E: leicht stabil			
B: mäßig labil				F: mäßig stabil			
C: leicht labil				G: stark stabil			

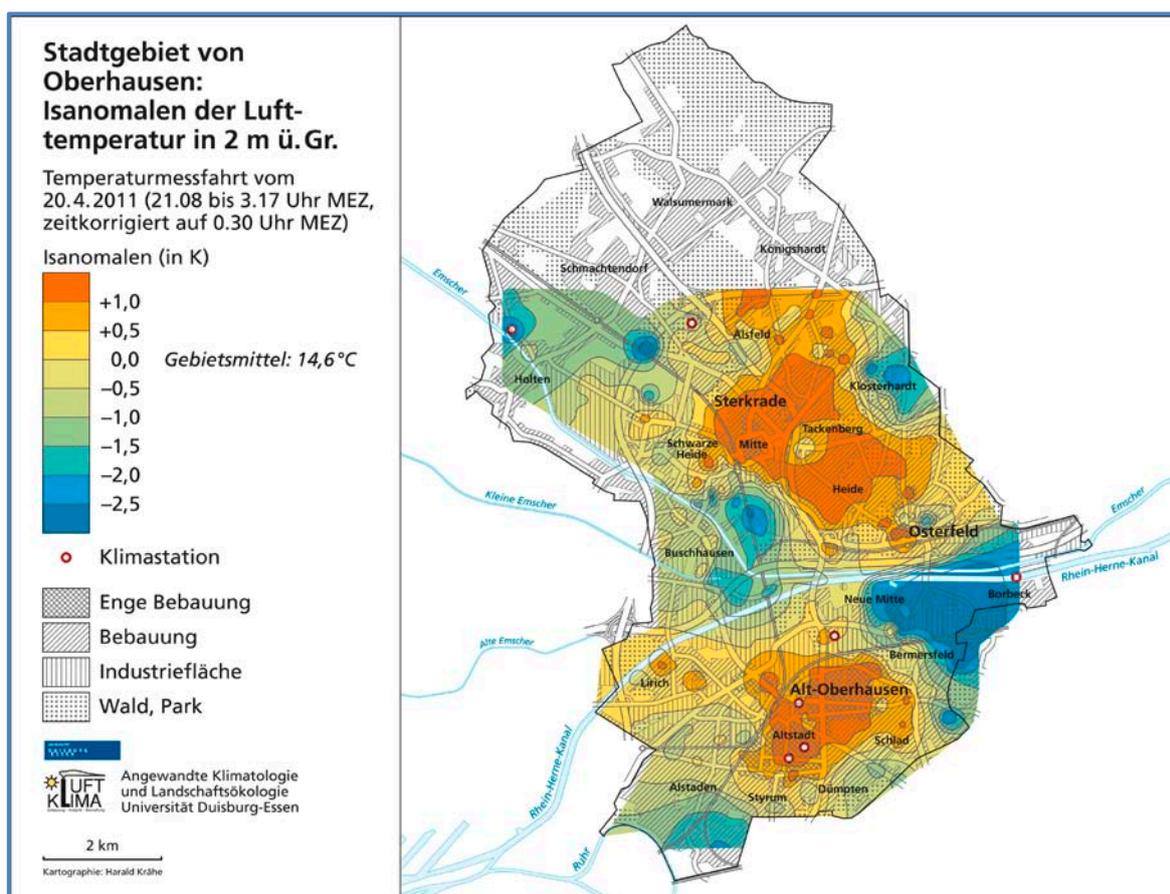


Abb. 12: Ergebnisse der Temperaturmessfahrt während einer nächtlichen Strahlungswetterlage am 20.4.2011 in Oberhausen; dargestellt wird die Abweichung der auf 0.30 Uhr MEZ zeitkorrigierten Lufttemperatur vom Gebietsmittel

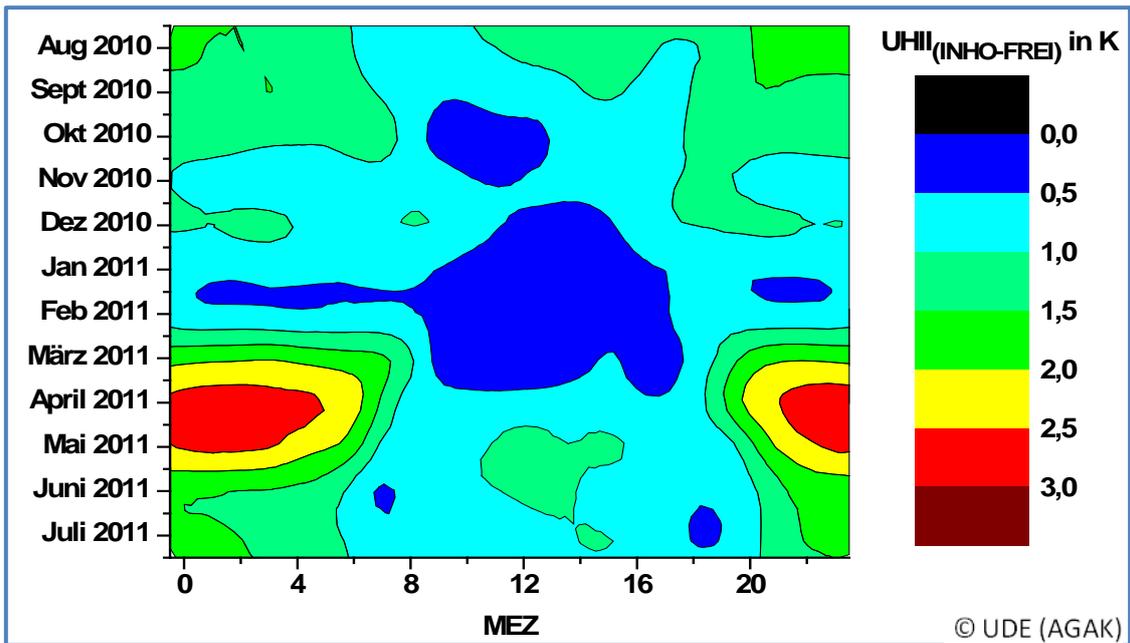


Abb. 13: Ausprägung der UHI am Beispiel des Klimatops Innenstadt hochversiegelt im Vergleich zum Freiland (Stationen 1 (INHO) und 8 (FREI)) als Tages- und Jahresgang des Messzeitraumes 01.08.2010-31.07.2011

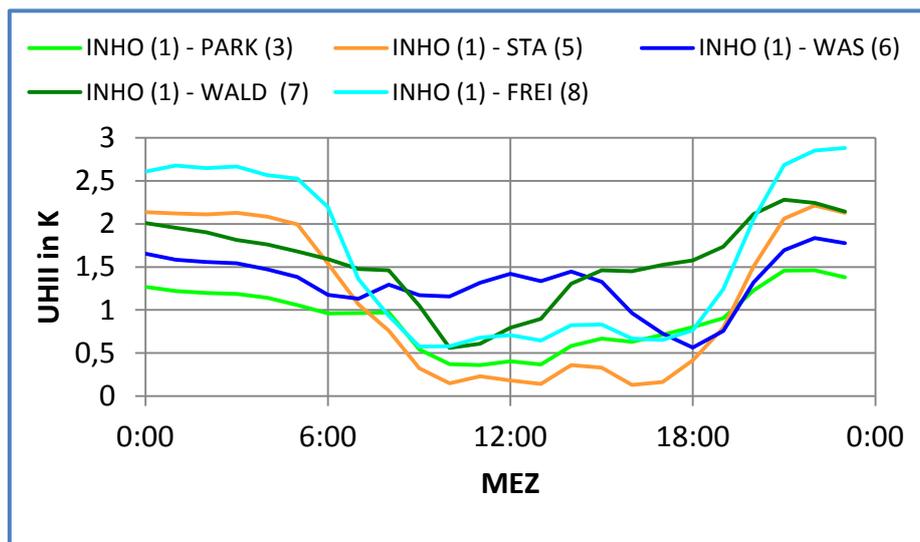


Abb. 14: Tagesgang der UHI-Intensität (UHI) zwischen der Innenstadt hochversiegelt (Station 1 – INHO) und ausgewählten Klimatopsen (Stationen 3, 5, 6, 7 und 8) an 76 Strahlungstagen des Messzeitraumes 01.08.2010-31.07.2011

Austauschverhältnisse

Da es bei typischen Strahlungswetterlagen zur Abkopplung der bodennahen Ventilation vom übergeordneten Strömungsfeld kommen kann, ist die Windgeschwindigkeit während dieser Wetterlagen vergleichsweise gering und kann hauptsächlich dem Schwachwindbereich ($< 1,5 \text{ m/s}$) zugeordnet werden. Insbesondere dann kommt es zur Ausbildung des typischen Tagesganges mit konvektionsbedingter höherer Windgeschwindigkeit vor allem in den Mittag- und Nachmittagstunden (Abb. 15). Tagsüber werden die höchsten, den Schwachwindbereich überschreitenden Windgeschwindigkeiten am Gewässerstandort (Station 6) erreicht, der durch seine Lage am Rhein-Herne-Kanal eine sehr geringe Oberflächenrauigkeit besitzt. Nachts hingegen ist in allen Klimatopsen durch die geringe Strömungsgeschwindigkeit der Luftaustausch eingeschränkt. Besonders in Gebieten, die bedingt durch

die Bebauung eine hohe Oberflächenrauigkeit aufweisen (z. B. Stationen 1, 3, 5 und 7 (Abb. 15), vgl. 3.1.3), trägt die eingeschränkte Durchlüftung während solcher Wetterlagen zur Überwärmung bei. Der Wald (Station 7) weist auch eine hohe Oberflächenrauigkeit auf, zeigt aber aufgrund seines thermisch ausgleichend wirkenden Bestandsklimas keine solche Wärmebelastung. Durch die Ausbildung der städtischen Wärmeinsel kann andererseits auch ein thermisch induziertes Windsystem entstehen, der sog. Flurwind (BARLAG and KUTTLER 1991), weshalb an den Stadtstandorten (z. B. Station 2 und 4) nachts höhere Windgeschwindigkeiten erreicht werden können als beispielsweise am Freilandstandort (Station 8).

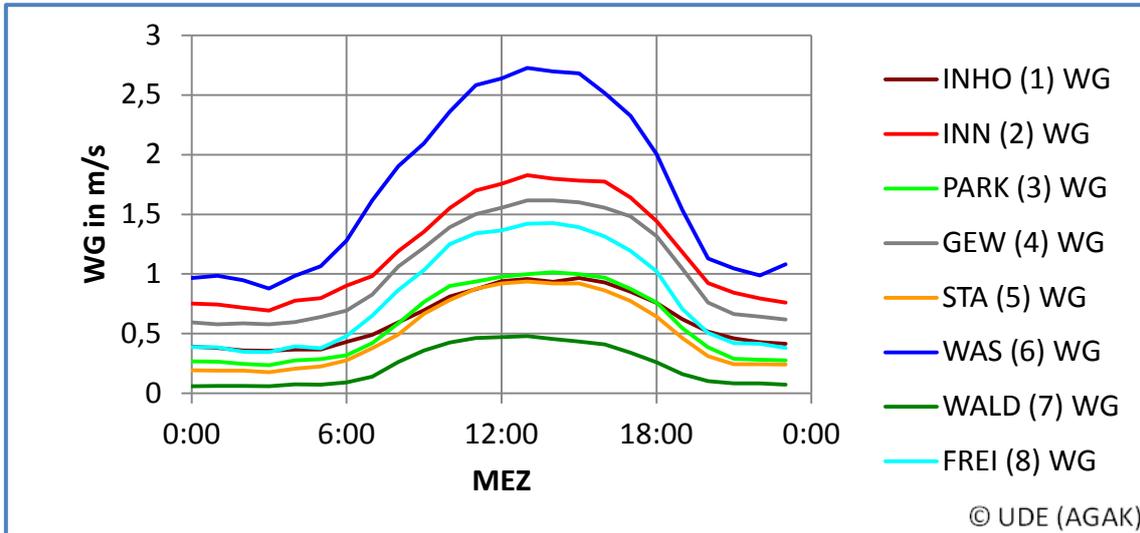


Abb. 15: Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit aller Stationen in Oberhausen an 76 Strahlungstagen des Messzeitraumes 01.08.2010-31.07.2011 (auf Basis von Stundenmittelwerten)

Ein weiteres typisches Merkmal ist der Wechsel der Hauptanströmungsrichtung von der sonst vorherrschenden Westwindströmung auf eine östliche Anströmungsrichtung, die durch das Auftreten von antizyklonalen Großwettertypen, die häufig Strahlungswetterlagen verursachen, angezeigt wird. In Abb. 16 ist die Anströmungssituation für die Strahlungstage dargestellt. Besonders in der Nachtsituation (Abb. 16 links) tritt die Ostkomponente (hier E bis NE) der Strömung deutlich hervor.

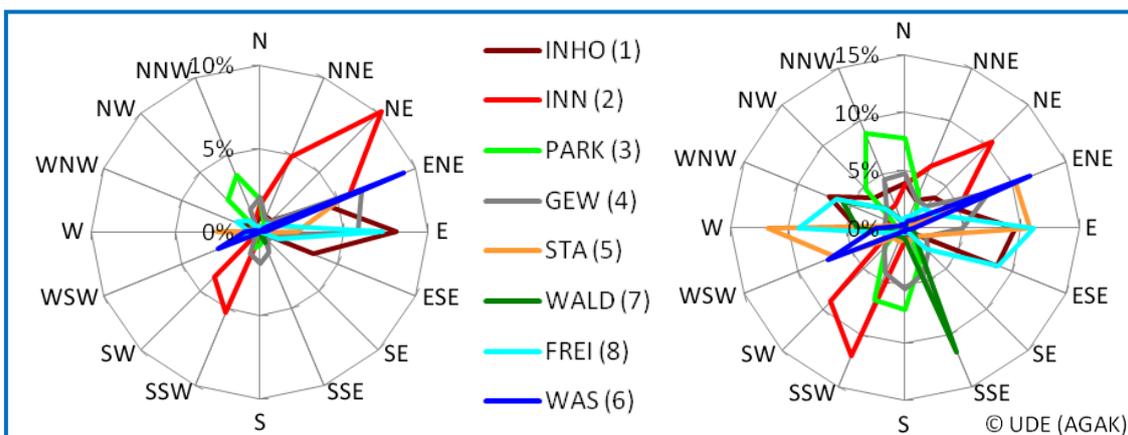


Abb. 16: Übersicht über die Windrichtungsverteilung (links Nachtsituation, rechts Tagsituation) während der Strahlungstage (76 während des Messzeitraumes: 01.08.2010-31.07.2011) (die Kurve der Station 6 wurde aus Darstellungsgründen um 50 % gestaucht)

3.1.5 Human-biometeorologische Situation

Die Auswertung der Auswirkungen unterschiedlicher Flächennutzungsstrukturen auf die human-biometeorologischen Verhältnisse erfolgt anhand des thermischen Index PET (Physiologische Äquivalenttemperatur) nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (VDI 2008). In die Berechnung der PET gehen verschiedene meteorologische Größen (t_a , rH, WG und Strahlungstemperatur), sowie zusätzlich human-physiologische Größen, wie z.B. die Bekleidungsart und die körperliche Aktivität, ein. Die Berechnung der PET der Messdaten erfolgte mit Hilfe des Programms RayMan Pro, Version 2.1 (MATZARAKIS 2010). Als Eingangsparameter der Humanphysiologie (Aktivität, Bekleidung, Alter, Geschlecht etc.) wurden dieselben Werte verwendet, die auch als Grundlage zur Berechnung der PET in den Simulationsläufen durch das Modell ENVI-met dienten (vgl. 3.2). Die Einteilung der PET-Werteskala erfolgt in °C, diesen Werten werden verschiedene physiologische Belastungsstufen zugeordnet, die auch das thermische Empfinden wiedergeben (Tab. 8).

Tab. 8: PET-Werteskala (verändert nach Kuttler 1999)

PET	thermisches Empfinden	physiologische Belastungsstufe
4°C	sehr kalt	extreme Kältebelastung
8°C	kalt	starke Kältebelastung
13°C	kühl	mäßige Kältebelastung
18°C	leicht kühl	schwache Kältebelastung
20°C	behaglich	keine thermische Belastung
23°C	leicht warm	schwache Wärmebelastung
29°C	warm	mäßige Wärmebelastung
35°C	heiß	starke Wärmebelastung
41°C	sehr heiß	extreme Wärmebelastung

Abb. 17 gibt die unterschiedlichen Auswirkungen der verschiedenen Klimatope auf den thermischen Komfort des Menschen wieder: dargestellt ist die PET für Strahlungstage, die gleichzeitig auch Sommertage waren, in Abhängigkeit von unterschiedlichen (hypothetisch angenommenen) Windgeschwindigkeiten und dem versiegelten Flächenanteil (Bebauung, Straßen etc.). Es ist zu sehen, dass mit einem höheren Anteil an unversiegelten Flächen die thermische Belastung abnimmt. Außerdem ist eine starke Abhängigkeit der PET von der Windgeschwindigkeit zu sehen. Somit werden die lokal-klimatischen Effekte der Flächennutzung besonders bei windschwachen Strahlungswetterlagen deutlich.

3.1.6 Veränderungen im Klimawandel

Im Zuge des Klimawandels wird u. a. von einem häufigeren und längeren Auftreten von Hitzewellen mit höheren Maximaltemperaturen ausgegangen (MUNLV NRW 2010). Dies wirkt sich auch auf das Bioklima und die thermische Belastung der Bevölkerung aus. In Tab. 9 bis Tab. 12 sind die Veränderungen verschiedener Hitze und Kälte bedingter meteorologischer Ereignistage aufgeführt (zur Situation des Messjahres (01.08.2010-31.07.2011) s. Tab. 6); sie basieren auf regionalen Klimaprojektionen des Modells CLM („climate local model“ des DWD) im Treibhausgas-Emissionsszenario A1B (IPCC 2007). Dieses „moderate“ Szenario geht davon aus, dass auf globaler Ebene die fossilen Energieträger sukzessiv durch regenerative Energieerzeugung ersetzt werden und dass das Wachstum der Weltbevölkerung ab Mitte des Jahrhunderts zurückgeht. Entsprechend werden auch die Treibhausgasemissionen zurückgehen. Die hierdurch bedingte globale Erwärmung wird zum Ende des Jahrhunderts auf ca. 2,8 K geschätzt. Das Szenario A1B wird vor dem Hintergrund der derzeitigen globalpolitischen Bestrebungen als das realistischste Szenario angesehen, so dass aktuell die öffentliche Diskussion über die Auswirkungen des Klimawandels auf Basis von Klimasimulationen mit diesem Szenario stattfindet.

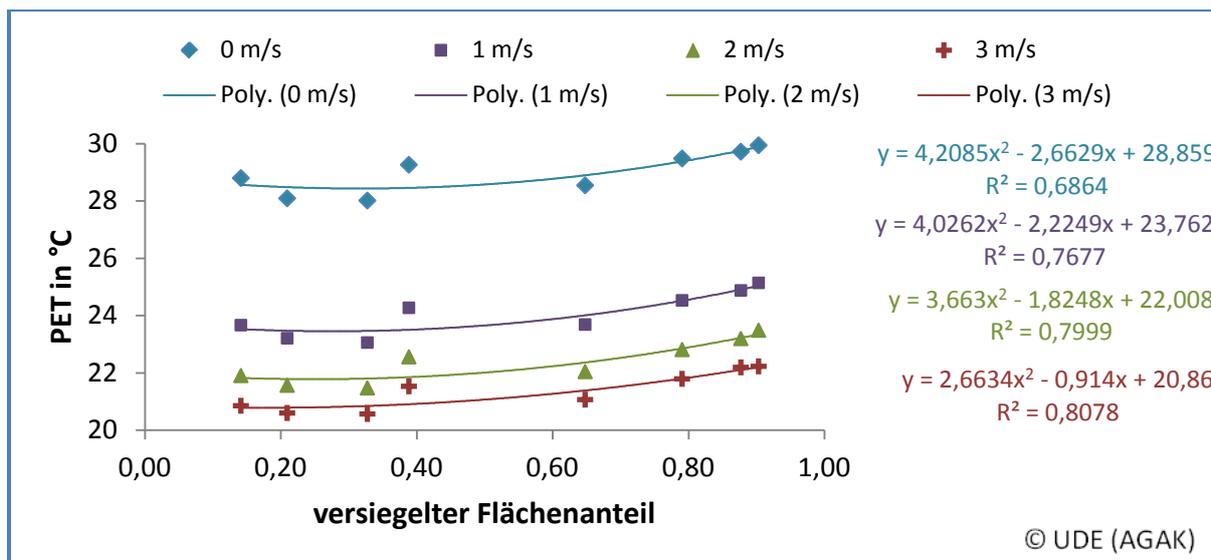


Abb. 17: Abhängigkeit der Wärmebelastung (dargestellt anhand der PET) vom versiegelten Flächenanteil (0,25 km² der Stationsumgebung vgl. Abb. 3) und der Windgeschwindigkeit (berechnet mit RayMan (MATZARAKIS 2010)) aus Werten von Strahlungstagen (gleichzeitig auch Sommertage) des Messzeitraumes 01.08.2010-31.07.2011 in Oberhausen

Es ist klar zu sehen, dass Hitze bedingte Ereignistage in der Zukunft eine deutliche Erhöhung erfahren werden, wobei in der nahen Zukunft (2021-2050) noch eine moderate Zunahme erfolgt, die sich bis hin zur fernen Zukunft (2071-2100) verstärken wird. Beispielsweise liegt die jährliche Zunahme der Sommertage in der nahen Zukunft je nach Realisierung für das Gebietsmittel zwischen 4 und 11 Tagen (13 % bzw. 40 %), in der fernen Zukunft hingegen wird sich ihre Anzahl mit einer Zunahme von über 30 Tagen (über 100 %) mehr als verdoppeln. Die Kälte bedingten Kenntage hingegen werden deutlich seltener auftreten. Somit ist es besonders wichtig, schon heute Anpassungs- und Minderungsmaßnahmen vorzunehmen, um der zukünftigen thermischen Belastung entgegen wirken zu können, da der Mensch auf Wärmebelastung schlechter reagieren kann als auf Kältestress (z. B. durch angepasste Bekleidung) (vgl. auch FRÖHLICH und MATZARAKIS 2011).

Tab. 9: Absolute und prozentuale Zunahme der Eintrittshäufigkeit des meteorologischen Ereignistages „heißer Tag“ nach CLM Szenario A1B – Realisierung 1 und 2 für die Zukunftsprojektionen 2021-2051 und 2071-2100 bezogen auf den Referenzzeitraum 1961-1990 für die vier Gitterzellen des CLM, die der Modellstadt Oberhausen entsprechen (nach LAUTEN-SCHLÄGER et al. 2009a-d, verändert)

Zunahme "heiße Tage" ($t_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$)						© UDE (AGAK)
bezogen auf Referenzklimanormalperiode 1961-1990						
Gitterzelle	mittlere jährliche Anzahl 1961-1990		mittlere jährliche Zunahme 2021-2050		mittlere jährliche Zunahme 2071-2100	
	Realisierung 1	Realisierung 2	Realisierung 1	Realisierung 2	Realisierung 1	Realisierung 2
GP_086_088	7.3	8.4	+6.4 (+88.1%)	+1.6 (+19.0%)	+20.4 (+281.2%)	+20.1 (+238.3%)
GP_086_089	8.1	9.2	+6.5 (+80.2%)	+1.3 (+14.5%)	+20.7 (+256.0%)	+20.2 (+219.9%)
GP_085_088	13.5	15.0	+7.7 (+57.1%)	+1.5 (+9.8%)	+23.5 (+173.9%)	+22.9 (+152.3%)
GP_085_089	12.1	12.7	+7.3 (+60.8%)	+2.0 (+16.0%)	+22.3 (+184.8%)	+22.5 (+177.2%)
Gebiets-Mittelwert	10.2	11.3	+7.0 (+68.3%)	+1.6 (+14.2%)	+21.8 (+212.4%)	+21.4 (+189.0%)

Tab. 10: Absolute und prozentuale Zunahme der Eintrittshäufigkeit des meteorologischen Ereignistages „Sommertag“ nach CLM Szenario A1B – Realisierung 1 und 2 für die Zukunftsprojektionen 2021-2051 und 2071-2100 bezogen auf den Referenzzeitraum 1961-1990 für die vier Gitterzellen des CLM, die der Modellstadt Oberhausen entsprechen (nach LAUTENSCHLÄGER et al. 2009a-d, verändert)

Zunahme "Sommertage" ($t_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) © UDE (AGAK)						
bezogen auf Referenzklimanormalperiode 1961-1990						
Gitterzelle	mittlere jährliche Anzahl 1961-1990		mittlere jährliche Zunahme 2021-2050		mittlere jährliche Zunahme 2071-2100	
	Realisierung 1	Realisierung 2	Realisierung 1	Realisierung 2	Realisierung 1	Realisierung 2
GP_086_088	23.0	24.8	+10.9 (+47.5%)	+2.4 (+9.8%)	+32.2 (+139.9%)	+29.8 (+119.9%)
GP_086_089	23.8	25.4	+10.8 (+45.4%)	+2.4 (+9.4%)	+32.0 (+134.6%)	+29.9 (+117.4%)
GP_085_088	32.2	32.6	+11.3 (+35.1%)	+5.1 (+15.7%)	+32.1 (+99.8%)	+30.9 (+94.6%)
GP_085_089	29.6	29.9	+10.3 (+34.7%)	+4.4 (+14.8%)	+31.1 (+105.2%)	+29.8 (+99.7%)
Gebiets-Mittelwert	27.2	28.2	+10.8 (+39.9%)	+3.6 (+12.8%)	+31.9 (+117.4%)	+30.1 (+106.7%)

Tab. 11: Absolute und prozentuale Abnahme der Eintrittshäufigkeit des meteorologischen Ereignistages „Frosttag“ nach CLM Szenario A1B – Realisierung 1 und 2 für die Zukunftsprojektionen 2021-2051 und 2071-2100 bezogen auf den Referenzzeitraum 1961-1990 für die vier Gitterzellen des CLM, die der Modellstadt Oberhausen entsprechen (nach LAUTENSCHLÄGER et al. 2009a-d, verändert)

Abnahme "Frosttage" ($t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) © UDE (AGAK)						
bezogen auf Referenzklimanormalperiode 1961-1990						
Gitterzelle	mittlere jährliche Anzahl 1961-1990		mittlere jährliche Abnahme 2021-2050		mittlere jährliche Abnahme 2071-2100	
	Realisierung 1	Realisierung 2	Realisierung 1	Realisierung 2	Realisierung 1	Realisierung 2
GP_086_088	53.2	55.6	-16.9 (-31.8%)	-20.7 (-37.2%)	-38.2 (-71.8%)	-38.3 (-68.9%)
GP_086_089	57.0	60.2	-18.1 (-31.8%)	-21.2 (-35.2%)	-40.0 (-70.2%)	-41.0 (-68.1%)
GP_085_088	56.5	59.4	-20.4 (-36.2%)	-21.6 (-36.3%)	-40.0 (-70.9%)	-41.0 (-69.1%)
GP_085_089	61.4	64.9	-19.4 (-31.6%)	-22.3 (-34.4%)	-42.4 (-69.1%)	-43.9 (-67.7%)
Gebiets-Mittelwert	57.0	60.0	-18.7 (-32.8%)	-21.4 (-35.7%)	-40.2 (-70.4%)	-41.1 (-68.4%)

Tab. 12: Absolute und prozentuale Abnahme der Eintrittshäufigkeit des meteorologischen Ereignistages „Eistag“ nach CLM Szenario A1B – Realisierung 1 und 2 für die Zukunftsprojektionen 2021-2051 und 2071-2100 bezogen auf den Referenzzeitraum 1961-1990 für die vier Gitterzellen des CLM, die der Modellstadt Oberhausen entsprechen (nach LAUTENSCHLÄGER et al. 2009a-d, verändert)

Abnahme "Eistage" ($t_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) © UDE (AGAK)						
bezogen auf Referenzklimanormalperiode 1961-1990						
Gitterzelle	mittlere jährliche Anzahl 1961-1990		mittlere jährliche Abnahme 2021-2050		mittlere jährliche Abnahme 2071-2100	
	Realisierung 1	Realisierung 2	Realisierung 1	Realisierung 2	Realisierung 1	Realisierung 2
GP_086_088	13.0	16.3	-4.0 (-30.7%)	-9.8 (-59.9%)	-10.6 (-81.3%)	-14.1 (-86.5%)
GP_086_089	13.8	17.0	-4.3 (-31.1%)	-10.0 (-58.8%)	-11.2 (-81.0%)	-14.5 (-85.1%)
GP_085_088	13.6	16.7	-4.0 (-29.6%)	-10.1 (-60.8%)	-11.1 (-81.2%)	-14.3 (-85.6%)
GP_085_089	15.6	18.4	-4.9 (-31.1%)	-10.8 (-58.5%)	-12.8 (-81.9%)	-15.4 (-83.9%)
Gebiets-Mittelwert	14.0	17.1	-4.3 (-30.6%)	-10.2 (-59.5%)	-11.4 (-81.4%)	-14.6 (-85.2%)

Dies hat auch Auswirkungen auf den Energiebedarf, wie durch eine Auswertung der Heiz- und Kühlgradtage (nach VDI 3807 und 4710 (VDI 2007)) aufgezeigt werden kann. Hierbei werden die Heizgradtage zukünftig nur eine geringfügige Reduzierung erfahren (ca. 3 % und 12 % in naher und ferner Zukunft), die Kühlgradtage hingegen deutlich ansteigen (40 % und über 300 % in naher und ferner Zukunft) (Tab. 13 und Tab. 14). Daher ist im Zuge des Klimawandels wichtig, der Temperaturerhöhung auf kleinräumiger Basis durch entsprechende Planungsmaßnahmen (wie z.B. Erhöhung des unversiegelten Flächenanteils) entgegen zu wirken (vgl. A4.3.3 Handlungsleitfaden).

Tab. 13: Prozentuale Abnahme der Heizgradtage (HGT) (bestimmt nach PRETTENTHALER und GOBIET 2008) nach CLM Szenario A1B – Realisierung 1 und 2 für die Zukunftsprojektionen 2021-2051 und 2071-2100 bezogen auf den Referenzzeitraum 1961-1990 für die vier Gitterzellen des CLM, die der Modellstadt Oberhausen entsprechen (nach LAUTENSCHLÄGER et al. 2009a-d, verändert)

HGT	mittlere jährliche Änderung bezogen auf © UDE (AGAK) Referenzklimanormalperiode 1961-1990			
Gitterzelle	2021-2050		2071-2100	
	Realisierung 1	Realisierung 2	Realisierung 1	Realisierung 2
GP_085_088	-2.6%	-4.4%	-11.3%	-12.8%
GP_085_089	-2.4%	-3.8%	-9.8%	-11.0%
GP_086_088	-2.9%	-4.7%	-11.5%	-12.7%
GP_086_089	-3.2%	-4.4%	-10.7%	-11.6%
Gebietsmittel	-2.8%	-4.4%	-10.8%	-12.0%

Tab. 14: Prozentuale Zunahme der Kühlgradtage (KGT) (bestimmt nach PRETTENTHALER und GOBIET 2008) nach CLM Szenario A1B – Realisierung 1 und 2 für die Zukunftsprojektionen 2021-2051 und 2071-2100 bezogen auf den Referenzzeitraum 1961-1990 für die vier Gitterzellen des CLM, die der Modellstadt Oberhausen entsprechen (nach LAUTENSCHLÄGER ET AL. 2009a-d, verändert)

KGT	mittlere jährliche Änderung bezogen auf © UDE (AGAK) Referenzklimanormalperiode 1961-1990			
Gitterzelle	2021-2050		2071-2100	
	Realisierung 1	Realisierung 2	Realisierung 1	Realisierung 2
GP_085_088	89.4%	36.8%	267.2%	240.6%
GP_085_089	93.6%	39.7%	304.7%	280.8%
GP_086_088	99.5%	41.4%	334.0%	304.6%
GP_086_089	99.4%	41.4%	338.6%	316.5%
Gebietsmittel	95.5%	39.8%	311.1%	285.6%

3.2 Modellsimulationen der Minderungsszenarien

3.2.1 Auswahl der Modellgebiete und Plan-Szenarien

Die Simulationen erfolgten für drei unterschiedliche Flächennutzungsstrukturen. Der Zielsetzung der Aktivität entsprechend wurden dazu die Klimatope Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1), Stadtrand (Station 5) und Freiland (Station 8) ausgewählt (s. Abb. 18 bis Abb. 20). Die dicht bebaute und stark versiegelte Innenstadt weist bereits gegenwärtig die höchsten thermischen Belastungen auf, so dass dort durch den Klimawandel mit weiteren Beeinträchtigungen zu rechnen ist. Das Stadtrand-Klimatop (Station 5) stellt ein intermediäres Klimatop dar, das heute noch keine starke Belastung aufweist, dessen human-biometeorologische Verhältnisse sich im Klimawandel aber hin zu den Gegebenheiten des Innenstadt-Klimatops verschieben könnten. Außerdem liegt die Station in unmittelbarer Nähe zum Gewässer-Klimatop (Station 6), so dass dort speziell die Wirkung von Gewässerflächen auf den thermischen Komfort untersucht werden konnte. Das Freiland-Klimatop (Station 8) hingegen weist den höchsten unversiegelten Flächenanteil auf und kann somit einen Vergleich für die bestmögliche Realisierung der Plan-Szenarien belegen.

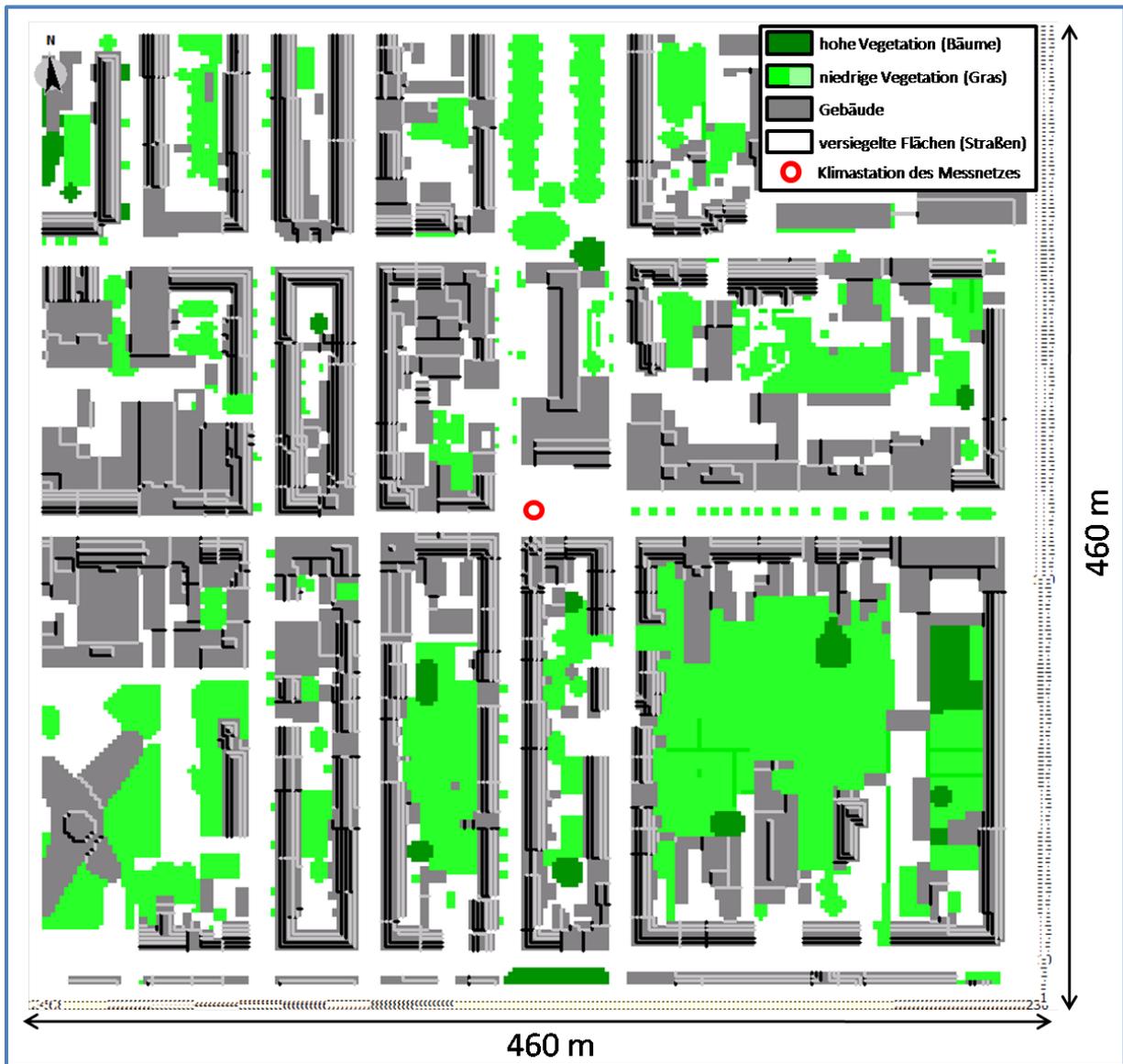


Abb. 18: Digitales Geländemodell: Ist-Zustand: Innenstadt hochversiegelt (Station1) in Oberhausen



Abb. 19: Digitales Geländemodell: Ist-Zustand: Stadtrand (Station 5) in Oberhausen

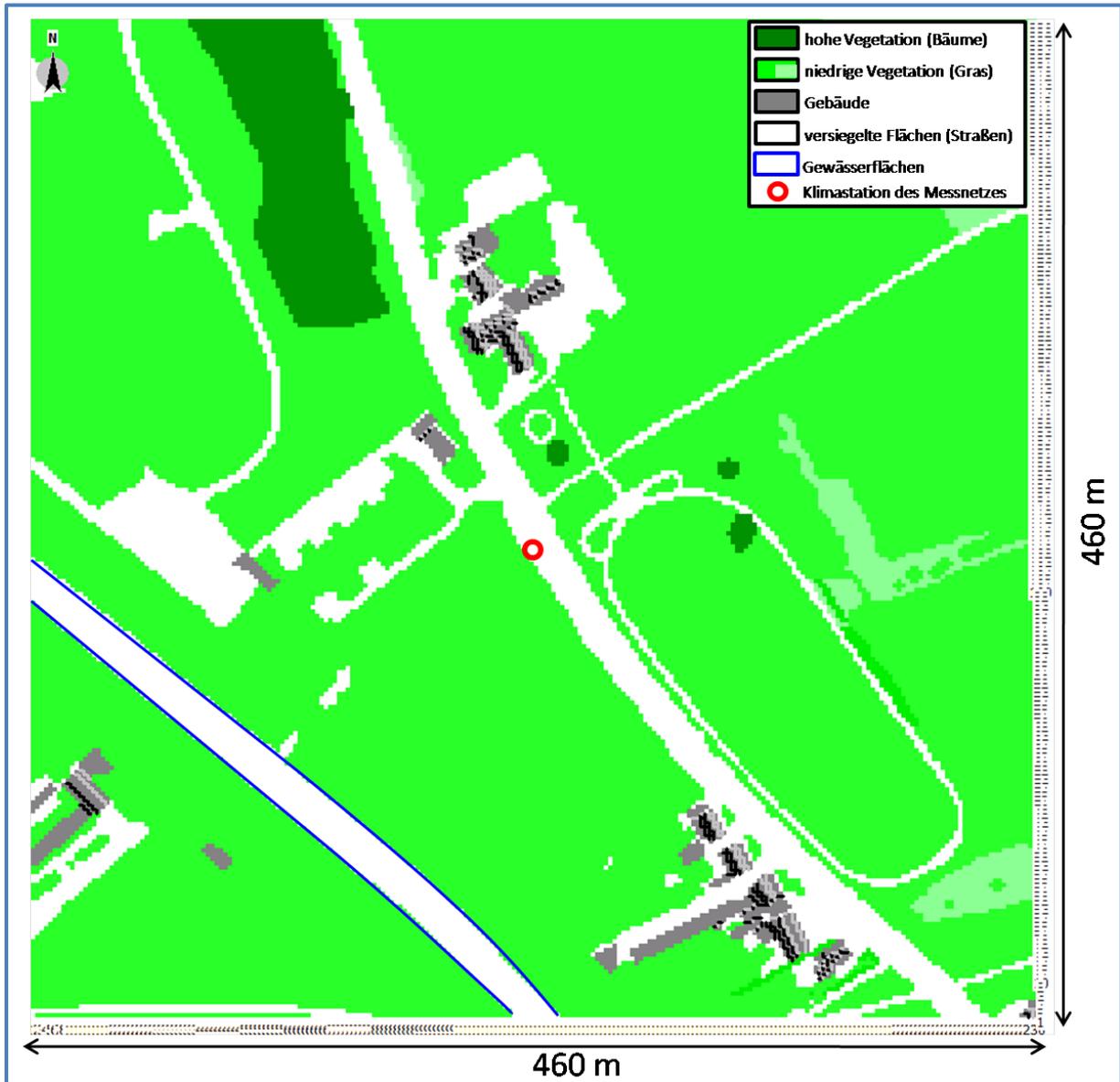


Abb. 20: Digitales Geländemodell: Ist-Zustand: Freiland (Station 8) in Oberhausen

Für die Modellierungen wurden quadratische Flächen mit einer Größe von ca. 0,25 km² entsprechend einer Seitenlänge von knapp 500 m verwendet, die so angeordnet waren, dass die jeweilige Klimastation im Zentrum dieser Fläche lag bzw. im Fall des Stadtrandes sowohl die Stadtrand-, als auch die Gewässer-Station in der Simulationsfläche mit eingeschlossen wurden. Bei dieser Flächengröße konnte eine hohe räumliche Modell-Auflösung von 2 x 2 m gewährleistet und gleichzeitig eine ausreichend große Fläche abgedeckt werden, so dass repräsentative Aussagen für das entsprechende Klimatop getroffen werden können.

Für Validierungszwecke erfolgte zunächst eine Simulation des Ist-Zustandes in allen Modellgebieten. Darauf basierend wurden verschiedene Plan-Szenarien modelliert, die einen höheren Anteil an verdunstungsaktiven Elementen aufweisen. Die Erhöhung des verdunstungsaktiven Flächenanteils hat Einfluss auf den latenten Wärmefluss Q_E , der sich nach Gleichung 1 berechnet und Bestandteil der Wärmebilanzgleichung (Gleichung 2) ist. Aus den Gleichungen lässt sich ableiten, dass je größer Q_E ist, desto kleiner der fühlbare Wärmestrom Q_H werden muss und somit weniger Energie für die Erwärmung der Umgebungsluft zur Verfügung steht. Hierdurch kann eine Reduktion der thermischen Belastung erreicht werden. Simulationen wurden für verschiedene Vegetationstypen und Flächengrößen der verdunstungsaktiven Elemente durchgeführt. Die maximal veränderte Arealfläche betrug 1 ha. Diese Größe ließ sich mit ausreichender Genauigkeit und entsprechendem Detailgrad im Modell abbilden bei gleichzeitiger Berücksichtigung eines ausreichend großen ggf. bebauten Umgebungsumfeldes. Die Analyse der Plan-Szenarien erfolgte überwiegend im Modellgebiet der hochversiegelten Innenstadt (Station 1), da dort die höchsten thermischen Belastungen auftreten und so die Wirkungsweise der Minderungsmaßnahmen am besten abgebildet werden kann. Eine Übersicht der 22 Simulationen und Planszenarien gibt Tab. 15 wieder.

$$Q_E = -\rho_w * q_v * K_w * (\pm) \frac{ds}{dz} \quad (1)$$

mit ρ_w = absolute Feuchte in $\frac{g}{m^3}$

q_v = spezifische Verdunstungswärme in $\frac{J}{kg}$

K_w = turbulenter Diffusionskoeffizient für Wasserdampf in Luft in $\frac{m^2}{s}$

$\frac{ds}{dz}$ = mittlerer vertikaler Gradient der spezifischen Feuchte in $\frac{g}{kg * m}$

$$Q^* - Q_H - Q_E - Q_B = 0 \quad (2)$$

mit Q^* = Strahlungsbilanz in $\frac{W}{m^2}$

Q_H = turbulente fühlbare Wärmeflussdichte in $\frac{W}{m^2}$

Q_B = Bodenwärmeflussdichte in $\frac{W}{m^2}$

Als klimatisches Ausgangsszenario wurden in allen drei Simulationsgebieten die Daten eines meteorologischen „heißen Tages“ (Temperaturmaximum > 30°C) verwendet (Abb. 21). Die aus den Messwerten der Klimastationen gewonnenen Eingangsdaten unterscheiden sich durch die verschiedenen Flächennutzungsstrukturen und lokalen Gegebenheiten im Tagesgang (Abb. 21). Das Szenario „heißer Tag“ wurde verwendet, da unter diesen Bedingungen bereits heute thermische Belastungen für die Bevölkerung auftreten und die Anzahl dieses meteorologischen Ereignistages noch zunehmen wird, wie durch die Analyse eines CLM-Datensatzes nachgewiesen wurde. So zeigt Tab. 9 die durch das CLM projizierte Zunahme der Anzahl der heißen Tage für die beiden Zukunftszeiträume in den vier, der Modellstadt Oberhausen entsprechenden Gitterzellen sowie als Gebietsmittelwert. Die Bodentemperaturwerte, die aus den Messungen der A4.1.3 stammen, die weiteren verwendeten Eingangsparameter, sowie die vorgenommenen Veränderungen der meteorologischen Parameter in den Plan-Szenarien werden in Tab. 16 dargestellt.

Tab. 15: Übersicht über die 22 Simulationen in Oberhausen: Ist-Zustand (3) und Planszenarien (19)

© UDE (AGAK)	Innenstadt (hochversiegelt) Station 1	Stadtrand Station 5	Freiland Station 8	Szenario-Kürzel	
Simulationen des Ist-Zustandes	Ist-Zustand	Ist-Zustand	Ist-Zustand	INHO-/STA-/FREI-Ist	
Simulationen der Plan-Szenarien	Gewässerszenarien	Gewässer (1 ha, 0.5 ha, 0.1 ha)	Gewässer 1 ha	Gewässer 1 ha	INHO-/STA-/FREI-Wasser 1 ha/0,5 ha/0,1 ha
	Vegetationsszenarien	Gras (1 ha)			INHO-Gras 1 ha
		Wald (1 ha)			INHO-Wald 1 ha
		Park (1 ha, 0.5 ha)			INHO-Park 1 ha/0,5 ha
		Dachbegrünung (alle Dächer) - (als Flachdächer angenommen)			INHO-Dach
	Dach- und Fassadenbegrünung (verkleinerter Bereich)	Ohne Begrünung			ohne grün
		Fassadenbegrünung			Fassaden grün
		Dach- und Fassadenbegrünung			Dach-Fassaden grün
		Dachbegrünung			Dach-grün
	Veränderung meteorologischer Eingangsparameter	höhere Windgeschwindigkeit INHO-Ist			INHO-WG-Ist
		höhere Windgeschwindigkeit Park 1 ha			INHO-WG-Park
		höhere Windgeschwindigkeit Wasser 1 ha			INHO-WG-Wasser
		geringe Bodenfeuchte Park 1 ha			INHO-BF-gering
		hohe Bodenfeuchte Park 1 ha			INHO-BF- hoch

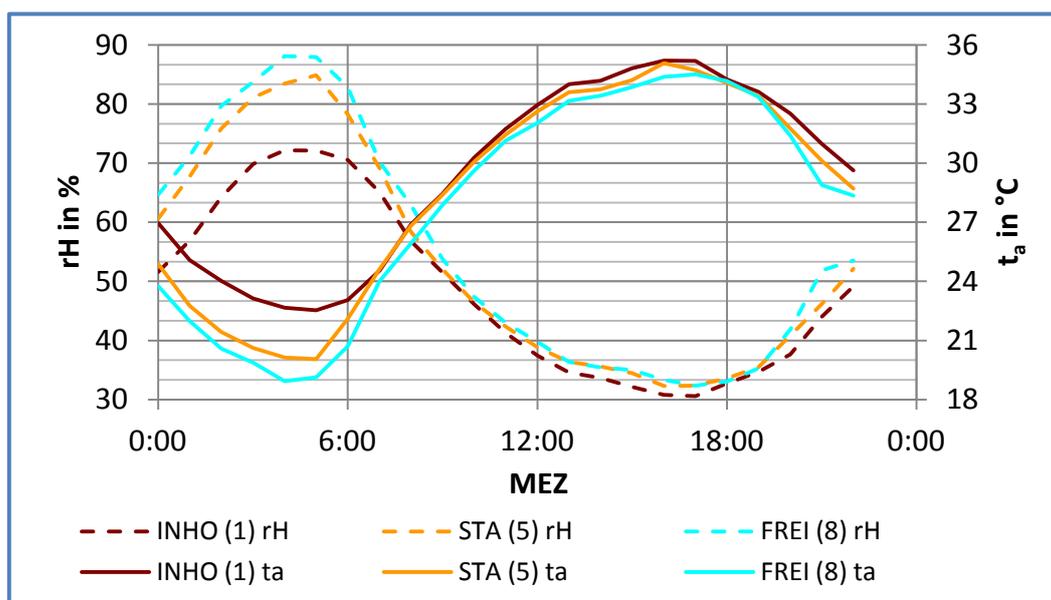


Abb. 21: Eingangsparemeter der Lufttemperatur (t_a) und relativen Luftfeuchtigkeit (rH) (Forcing-Tagesgänge) in den verwendeten Modellgebieten, generiert aus Messdaten der Station 1 (Innenstadt (hochversiegelt)), Station 5 (Stadtrand) und Station 8 (Freiland) als Stundenmittelwerte für einen „heißen Tag“ (10.07.2010)²

² Der Tagesgang des 10.7.2010 (vor offizieller Messperiode) wurde gewählt, um den Zeitplan der Aktivität 4.3.2 nicht zu gefährden. Da im August 2010 kein „heißer Tag“ aufgetreten ist, war damit zu rechnen, dass bei einer durchschnittlichen Simulationszeit von 4 Wochen bei 22 Szenarien ein Zeitkonflikt entstehen könnte, wenn nicht vor dem Sommer 2011 (mit möglichem Auftreten eines heißen Tages) mit den Modellierungen begonnen würde. Da das Messnetz zur Überprüfung schon einen Monat vor Messbeginn installiert wurde, kann dieser Tagesgang verwendet werden, da die Kalibrierung der Messgeräte bereits abgeschlossen war.

Tab. 16: Übersicht der Modelleingangsparameter für ENVI-met 3.2

© UDE (AGAK)	1) Innenstadt (hochversiegelt)	5) Stadtrand	8) Freiland
Position			
Geografische Lage	51°47'0"N, 06°85'00"E	51°47'0"N, 06°85'00"E	51°47'0"N, 06°85'00"E
Dimensionierung			
Gitteranzahl (x, y, z)	230, 230, 30	230, 230, 30	230, 230, 30
Gittergröße (x, y, z)	2 m, 2 m, mit Höhe zunehmend	2 m, 2 m, 2 m	2 m, 2 m, 2 m
Gebietsgröße (x, y, z)	460 m, 460 m, 128,4 m	460 m, 460 m, 59 m	460 m, 460 m, 59 m
Übergangsgitterzellen (Nesting Grids) (x, y, z)	9, 9, 9	9, 9, 9	9, 9, 9
Rotation des Modells gegen Uhrzeigersinn	5,5°	-	-
Veränderte Dimensionierung bei Dach- und Fassadenbegrünung			
Gitteranzahl (x, y, z)	228, 228, 30		
Gittergröße (x, y, z)	0,2 m, 0,2 m, mit Höhe zunehmend		
Gebietsgröße (x, y, z)	45,6 m, 45,6 m, 53,9 m		
Übergangsgitterzellen (Nesting Grids) (x, y, z)	10, 10, 10		
Rotation des Modells gegen Uhrzeigersinn	5,5°		
Meteorologische Randbedingung			
Dauer Modelllauf	44 h	44 h	44 h
Start Simulation am Tag	10.07.2010	10.07.2010	10.07.2010
Start Simulation zur Ortszeit (HH:MM:SS)	04:00:00	04:00:00	04:00:00
Windgeschwindigkeit in 10 m ü. Gr.	Normal: 0,18 m/s hoch: 1 m/s	0,2 m/s	0,25 m/s
übergeordnete Windrichtung	75°	250°	112°
Bodenparameter			
Bodenart	Sandiger Boden	Lehmiger Boden	Lehmiger Boden
Initialtemperatur obere Schicht (0-20 cm)	304,5 K	296,4 K	294,4 K
Initialtemperatur mittlere Schicht (20-50 cm)	303,0 K	294,9 K	292 K
Initialtemperatur untere Schicht (> 50 cm)	299,6 K	292,5 K	290 K
Bodenwassergehalt obere Schicht (0-20 cm)	Normal: 40 % niedrig: 20% hoch: 60%	40%	40%
Bodenwassergehalt mittl. Schicht (20-50 cm)	Normal: 50 % niedrig: 30% hoch: 60%	50%	50%
Bodenwassergehalt untere Schicht (> 50 cm)	Normal: 60 % niedrig: 30% hoch: 70%	60%	60%
Gebäudeparameter			
Gebäudeinnentemperatur	296 K	296 K	296 K
Wärmeübergangskoeffizient Fassaden	1,94 W/(m²K)	1,94 W/(m²K)	1,94 W/(m²K)
Wärmeübergangskoeffizient Dächer	6 W/(m²K)	6 W/(m²K)	6 W/(m²K)
Albedo Fassaden	0,2	0,2	0,2
Albedo Dächer	0,3	0,3	0,3
Thermisches Bioklima (PET)			
Fortbewegungsgeschwindigkeit	0,8 m/s	0,8 m/s	0,8 m/s
Metabolische Leistung	54,9 W	54,9 W	54,9 W
Mech. Faktor	0,0	0,0	0,0
Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung (clo)	0,5 (Sommerbekleidung)	0,5 (Sommerbekleidung)	0,5 (Sommerbekleidung)

3.2.2 Validierung

Die Validierung der Modellergebnisse erfolgte durch die gemessenen Tagesgänge der Lufttemperatur (t_a) und relativen Luftfeuchtigkeit (rH) der jeweiligen Station, die auch als Eingangsparameter bzw. Forcing-Tagesgang vorgegeben wurden und durch das Modell möglichst genau nachgebildet werden sollen. Der Vergleich fand mit den Modellwerten der Gitterzelle, die die Klimastation repräsentiert, statt. Zur Validierung erfolgten verschiedene statistische Fehleranalysen, wie die Berechnung der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE (engl. Root mean square error)), sowie der Korrelation der Mess- und Modellwerte über das Bestimmtheitsmaß (r^2) (Tab. 17). Diese Analysen wurden sowohl für den Einschwingtagesgang, als auch für den zur Auswertung verwendeten zweiten Tag der Modellsimulationen durchgeführt. Da die Simulationsdauer 44 Stunden betrug, bestand der Einschwingtagesgang aus 19 Modellstunden (Startzeitpunkt der Modellierung: 4 Uhr), der ausgewertete zweite Tagesgang hingegen aus einem vollständigen Tageszyklus von 24 Stunden.

Tab. 17: Übersicht über die Modellvalidierung und Fehlerberechnung für die drei Modellgebiete in Oberhausen (Station 1, 5 und 8) anhand des RMSE und r^2 für den Einschwingtagesgang des Modells (Tag 1), sowie den zur Auswertung verwendeten zweiten Tagesgang (Tag 2) der Parameter Lufttemperatur (t_a) und relativer Luftfeuchte (rH)

Tag 1: n=19 Tag 2: n=24		1) Innenstadt (hochv.)		5) Stadtrand		8) Freiland	
		Tag 1	Tag 2	Tag 1	Tag 2	Tag 1	Tag 2
t_a	RMSE	2.6	5.5	1.8	2.4	1.0	1.1
	r^2	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0
rH	RMSE	39.1	84.5	36.7	45.5	19.4	22.0
	r^2	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9

Die Ergebnisse zeigen, dass die Lufttemperatur im Modell gut wiedergegeben wird, wobei die Abweichung am Standort Freiland (Station 8) geringer ausfällt als am Standort Innenstadt (Station 1). So wird an allen Stationen der vorgegebene Temperaturtagesgang eines „heißen Tages“ mit Erreichen einer Maximaltemperatur von über 30°C nachgebildet (Abb. 22). Der Fehler beim Tagesgang des zweiten Tages, der zur Auswertung diente, ist meist höher, was vor allem dadurch zustande kommt, dass, aufgrund der simulierten Modelllaufdauer von 44 Stunden, die Aufzeichnung der Modellierungsergebnisse an Tag 1 um 5 Uhr begann (Modellstart: 4 Uhr) und an Tag 2 auch die Nachtstunden von 0 bis 5 Uhr mit eingeschlossen wurden, für die die Abweichung größer ist (Abb. 22).

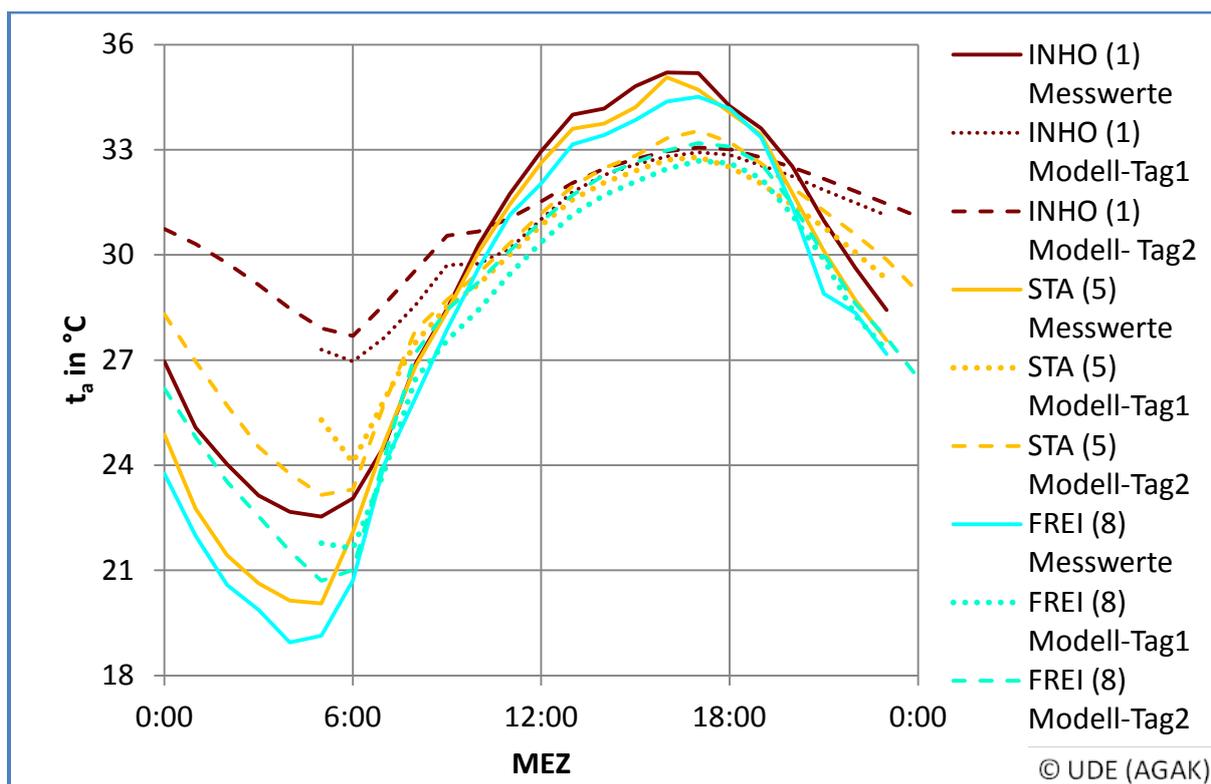


Abb. 22: Vergleich des Lufttemperaturtagesganges der Messwerte (Forcing-Tagesgang) und Modellergebnisse für den Einschwingtagesgang des Modells (Tag 1), sowie den zur Auswertung verwendeten zweiten Tagesgang (Tag 2) an den Stationen 1, 5 und 8 in Oberhausen

Daher wurden auch die RMSE-Werte für den Tagesgang als Mittel aller Modellgebiete und der beiden Modell-Tagesgänge bestimmt (Tab. 18). Dabei ist zu sehen, dass vor allem in den Nachtstunden vor Sonnenaufgang relativ hohe Abweichungen auftreten. Dennoch konnte durch das Bestimmtheitsmaß r^2 , das für die Lufttemperatur in allen Gebieten für den zweiten Modelltag über 0,88 liegt, nachgewiesen werden, dass die Modellwerte gut den Forcing-Tagesgang wiedergeben.

Tab. 18: Übersicht über die Modellvalidierung und Fehlerberechnung anhand der Parameter Lufttemperatur (t_a) und relativer Luftfeuchte (rH) der einzelnen Stunden im Tagesverlauf als Mittel aller Modellgebiete (Stationen 1, 5 und 8) in Oberhausen, sowie beider Modelltage

© UDE (AGAK)		0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
t_a	RMSE	4.8	8.0	8.8	8.6	7.7	8.3	3.1	1.9	0.9	0.5	0.4	1.0
rH	RMSE	38.8	75.2	142.1	177.2	175.5	204.4	88.7	49.3	23.3	16.8	11.8	13.0
		12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
t_a	RMSE	4.8	2.0	1.4	8.6	2.3	1.7	3.1	0.6	0.1	0.5	1.0	1.7
rH	RMSE	15.2	16.6	12.0	11.3	14.5	12.2	7.1	3.4	1.3	17.2	30.3	41.5

Für die Validierung der Modellergebnisse der relativen Luftfeuchte (rH) konnten ähnliche Ergebnisse wie für die Lufttemperatur beobachtet werden. Insgesamt liegt der Fehler höher als bei der Lufttemperatur. Die größten Abweichungen treten wiederum in den Nachtstunden vor Sonnenaufgang auf (Tab. 18). Dennoch wird der Verlauf des vorgegebenen Forcing-Tagesganges durch das Modell wiedergegeben, wobei die Innenstadt erneut größere Abweichungen aufweist als die Standorte mit geringerem Versiegelungsanteil. Das Bestimmtheitsmaß der relativen Luftfeuchte für den zweiten Modelltag liegt an allen Standorten über $r^2 = 0,85$. Somit ist eine gute Übereinstimmung der Mess- und Modellwerte gegeben und die Simulationsergebnisse der Minderungsmaßnahmen können aussagekräftig interpretiert werden.

3.2.3 Ergebnisse der Simulationen

Durch die numerischen Modellsimulationen wurde zum einen der Verdunstungswärmefluss Q_E unterschiedlicher Flächennutzungen quantifiziert und zum anderen die Auswirkungen verdunstungsaktiver Flächen auf den thermischen Komfort untersucht.

Die Quantifizierung des Verdunstungswärmeflusses verschiedener Flächennutzungsstrukturen erfolgte über die numerische Simulationen in unterschiedlich strukturierten Modellgebieten. Zur Auswertung wurde die Flächennutzungsstruktur der modellierten Klimatope detaillierter aufgeschlüsselt, beispielsweise in Gewässerflächen, Wald oder versiegelte Straßenflächen. Die Erfassung der Verdunstungswärmeflüsse ist von Bedeutung, da durch die zur Verdunstung aufgewendete Energie die thermische Belastung für die Bevölkerung reduziert werden kann und somit die Erhöhung verdunstungsaktiver Elemente eine wichtige Minderungsstrategie darstellt (s. 3.2.1). Durch die Quantifizierung des Verdunstungswärmeflusses der Plan-Szenarien kann deren Wirkung bewertet und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die modellierten Wärmeflüsse werden in Tab. 19 gegenübergestellt und mit den Flussmessungen der Turbulenzmessstationen der A4.3.1 in der hochversiegelten Innenstadt (URB – Station 9) sowie der verdunstungsaktiven Vergleichsstation im Umland (SUB – Station 10) verglichen (zur Lage der Stationen vgl. Abb. 1). Allerdings muss bei der Betrachtung der Modell- und Messergebnisse beachtet werden, dass sich die Wärmeflüsse des Modells auf einzelne Gitterzellen (2 x 2 m) der entsprechenden Flächennutzung beziehen, wohingegen die Messwerte mittlere Flüsse für ein Footprintgebiet urbaner bzw. suburbaner Flächennutzung im Stationsumfeld mit einem mittleren Radius von ca. 1 km darstellen.

Tab. 19: Vergleich der modellierten Oberflächentemperaturen (t_{surface}) in °C, der sensiblen (Q_H) und latenten Wärmeflüsse (Q_E) in W/m^2 unterschiedlicher Flächennutzungsstrukturen der Ist-Zustände und Plan-Szenarien für die Modellgebiete in Oberhausen sowie der Messergebnisse aus A4.3.1

Parameter	Zeitpunkt	Ist-Zustand										Plan-Szenarien 1 ha (an Station 1 durchgeführt)										Messungen A4.3.1																		
		Freiland Station 8					Stadttrand Station 5					Innenstadt (hochv.) Station 1					Wald					Park					Park Bodenfeuchte gering					Park Bodenfeuchte hoch					Station 9		Station 10	
		Wald	Feld	Kanal	Gras	Straßen	Wald	Wasser	Wald	Gras	Bäume	Gras	Wald	Wasser	Wald	Gras	Bäume	Gras	Bäume	Gras	Bäume	Gras	Bäume	Gras	Bäume	Gras	Bäume	Gras	Bäume	Gras	URB	SUB								
t_{surface}	4Uhr	20.4	13.8	19	20	24.5	<29.5	<25.5-26	26.5-27	<25.5	26.5-27	<25.5-26.5	25.5-26	<25.5	27-27.5	27-27.5																								
in °C	12Uhr	29	42.6	30.5	43.2	45.5	ca. 42.5	<32	<32	35-38	<32	34-36.5	31.5-34	36.5-39	31.5-34	31.5-34	34-36.5	39-41.5	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34											
	16Uhr	31.2	46.6	31.8	47.5	45.7	ca. 44	34-36.5	31.5-34	36.5-39	31.5-34	34-36.5	31.5-34	36.5-39	31.5-34	31.5-34	34-36.5	39-41.5	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34	31.5-34											
	24Uhr	14.2	20.2	22.8-24.5	21.3	29	32-32.5	29-29.5	28.5-29	<28.5	29-<28.5	<28.5	28.5-29	<28.5	29-<28.5	<28.5	<28.5	<28.5	<28.5	29.5-30	30-30.5	30-30.5	30-30.5	30-30.5	30-30.5	30-30.5	30-30.5	30-30.5	30-30.5											
Q_H	4Uhr	-0.5 bis -1	-3	-8.5 bis -20	-1	2-5	2-5-5	0	0	-0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-33.49	-23.30										
in W/m^2	12Uhr	0 bis -3	240	-5 bis +0.5	250	550	525-600	-8 bis -10	-10	150-225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3-6	3-6	3-6	3-6	3-6	3-6	3-6	3-6	3-6	198.31	132.38										
	16Uhr	0 bis -3	285	-2 bis -10	250-300	450-460	>400	0	0 bis -0.6	200-300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	101.64	40.05											
	24Uhr	-1	-2.6	-3 bis -45	-2 bis +2	6-10	9-12	-0.05	0	-0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-30.20	-28.21											
Q_E	4Uhr	9.5-22.8	-0.6	18-20	-0.2	0	0	0.5-0.7	0.7 bis >0.9	0.4-0.5	>0.9	0.4	0.4	0.4	>0.9	>0.9	0.4	0.4	42-70	42-70	42-70	42-70	42-70	42-70	42-70	42-70	42-70	20.00	9.55											
in W/m^2	12Uhr	10-130	230	330-340	225-300	0	0	>675	<75 bis 225-300	300-375	75-150	>675	>675	>675	75-150	75-150	>675	>675	4.5-6	4.5-6	4.5-6	4.5-6	4.5-6	4.5-6	4.5-6	4.5-6	4.5-6	77.53	182.97											
	16Uhr	45	25	260-290	25	0	0	1-2	<75 bis 150-225	75-150	<75	75-150	<1.5-4.5	4.5-6	10-20	350-360	350-360	350-360	350-360	350-360	350-360	350-360	350-360	350-360	350-360	350-360	350-360	38.39	156.44											
	24Uhr	2-15	0.4	25-35	0-1.5	0	0	>0.9	0.8-0.9	0.2-0.3	0.8-0.9	0.3-0.4	<0.1	<0.1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	ca. 1	1-9	1-9	1-9	1-9	1-9	1-9	1-9	1-9	21.95	10.30												

Es ist klar zu sehen, dass der Verdunstungswärmestrom in den natürlichen Flächennutzungsstrukturen deutlich höher ist als in den anthropogenen Gebieten. Im Vergleich mit den Plan-Szenarien konnte festgestellt werden, dass zumindest kleinräumig durch die Minderungsmaßnahmen in der veränderten Fläche, für welche verdunstungsaktive Elemente eingesetzt wurden, eine Erhöhung des Verdunstungswärmeflusses erreicht werden kann. Doch unterscheiden sich die erreichten Veränderungen durchaus in ihrer Intensität, so kann vor allem über der Gewässerfläche (1 ha) im Plan-Szenario um 12 Uhr mit über 675 W/m^2 eine enorme Erhöhung des Verdunstungswärmeflusses erzielt werden. Das Szenario Wald 1 ha hingegen erzielt maximal Werte von 300 W/m^2 für Q_E . Dies scheint immer noch sehr viel höher als die Messwerte, allerdings ist bei den Messungen zu bedenken, dass diese in 30 m Höhe im Einzugsgebiet einer stark heterogenen urbanen bzw. suburbanen Flächennutzung stattfinden, was die geringeren Werte erklärt. Desgleichen ist auch bei Betrachtung der Verdunstungsflüsse im Ist-Zustand der Station 1 (hochversiegelte Innenstadt) zu beachten. Die Messwerte liegen dabei deutlich über den Modellwerten. Das lässt sich dadurch erklären, dass das Modell Straßen und bebauten Flächen als versiegelte und somit vollkommen undurchlässige Flächen und daher Q_E mit 0 W/m^2 annimmt. Somit können insgesamt die Ergebnisse durch die Messergebnisse von A4.3.1 bestätigt werden.

Wichtig ist auch die Betrachtung der Wirkung des erhöhten Verdunstungswärmeflusses für den thermischen Wirkungskomplex, da nur so die Auswirkungen insgesamt bewertet werden können. So kann sich unter Umständen bei Erhöhung der Luftfeuchtigkeit auch ein negativer Effekt für den thermischen Komfort einstellen (SAARONI and ZIV 2003). Daher erfolgt die weitere Auswertung der Modellergebnisse anhand des thermischen Indexes physiologische Äquivalenttemperatur (PET), der die thermisch-hygrischen Verhältnisse, sowie die Strahlungs- und Windverhältnisse unter Berücksichtigung der Humanphysiologie zusammenfasst. In Tab. 8 werden zur Übersicht die PET-Werte dem thermischen Empfinden bzw. der physiologischen Belastung des Menschen gegenübergestellt (vgl. auch 3.1.5).

Die Auswertung der Simulationen erfolgt für zwei Zeitpunkte: 4 Uhr MEZ (Zeitpunkt des Temperaturminimums im Tagesverlauf) und 16 Uhr MEZ (Zeitpunkt des Temperaturmaximums im Tagesverlauf). Da die Zeitpunkte der Temperaturextrema im Tagesgang betrachtet werden, können somit die größten Effekte der simulierten Maßnahmen erfasst werden.

Im Vergleich der Simulationen des Ist-Zustandes (Abb. 23) ist zu sehen, dass in den kaum versiegelten Modellgebieten Freiland (Station 8) und Stadtrand (Station 5) eine geringere thermische Belastung auftritt, als im hochversiegelten Innenstadtbereich. Dennoch wird in den drei simulierten Gebieten für den angenommenen „heißen Tag“ in der Tagsituation die physiologische Belastungsstufe „extreme Wärmebelastung“ überschritten, daher ist eine Reduktion dieser Belastung im Hinblick auf die Erhöhung der „heißen Tage“ im Klimawandel sinnvoll. In der für den Schlafkomfort bedeutenden Nachtsituation hingegen zeigt nur der Standort Innenstadt (hochversiegelt) (Station 1) eine schwache bis mäßige Wärmebelastung, wohingegen die Umlandstandorte Stadtrand (Station 5) und Freiland (Station 8) keine Belastung aufweisen. Die Minderungswirkungen der in Tab. 15 genannten Plan-Szenarien wurden daher für den schon stark thermisch belasteten Bereich der Station 1 (Innenstadt (hochversiegelt)) simuliert.

Die Maßnahmenauswahl durch Erhöhung der verdunstungsaktiven Flächen kann durch die Auswertung der Ist-Szenarien und den Vergleich der PET-Werte der einzelnen Standorte bestätigt werden, da die an Station 5 und 8 (Stadtrand und Freiland) vorhandenen Vegetations- und Gewässerflächen sowohl tags, als auch nachts im 2 m ü. Gr.-Niveau eine geringere PET aufweisen, als die anthropogenen Flächen (Abb. 23).

Die Ergebnisse der Plan-Szenarien werden als Differenzkarten dargestellt, dabei erfolgt die Subtraktion des Ist-Zustandes vom Plan-Zustand, so dass ein negativer Wert eine Abnahme des Parameters im Plan-Zustand darstellt und ein positiver eine Zunahme. In Abb. 24 und Abb. 25 werden beispielhaft die Differenzkarten des Plan-Szenarios INHO-Park 1 ha gezeigt, weitere

Differenzkarten sind im Anhang zu sehen. Eine Übersicht über die Wirkung der einzelnen Maßnahmen enthält Tab. 20.

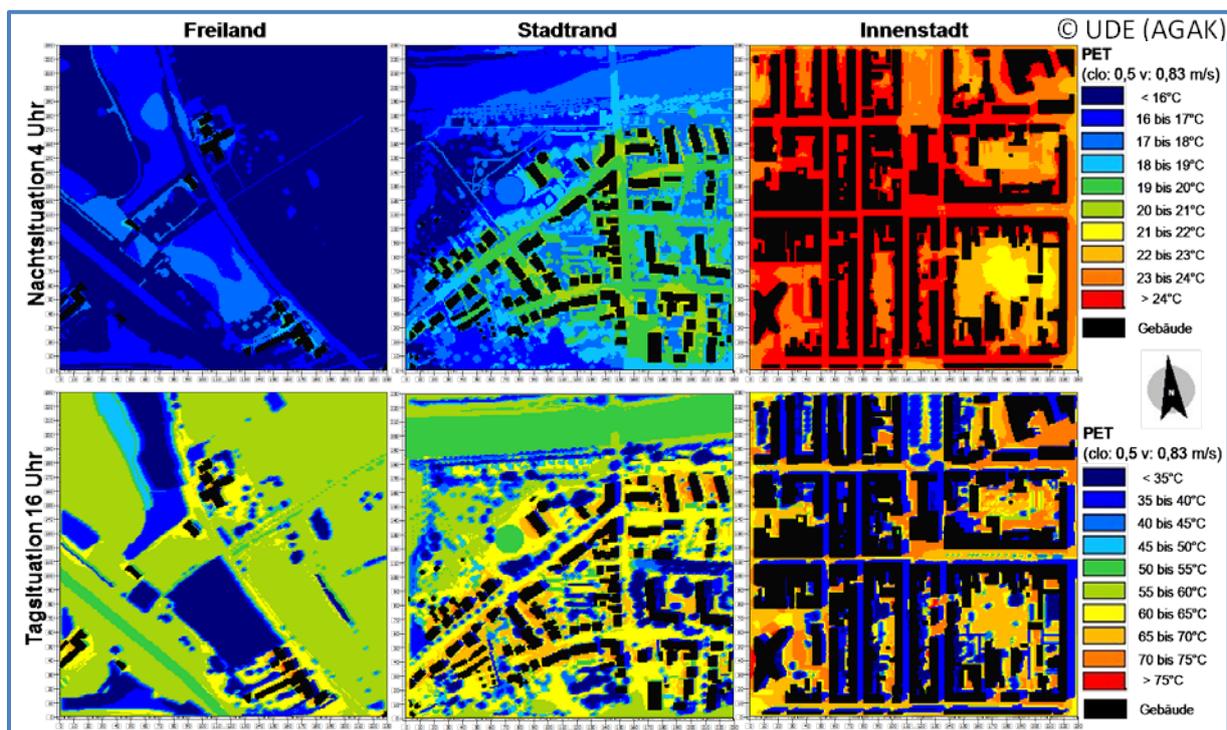


Abb. 23: ENVI-met Simulationsergebnis: PET Ist-Zustand der drei Modellgebiete Freiland (Station 8), Stadtrand (Station 5) und Innenstadt hochversiegelt (Station 1) im Vergleich für Tag- und Nachtzustand in Oberhausen am 11.07.2011

Bei der Darstellung der Differenzkarten ist zu beachten, dass durch die Minderungsmaßnahmen auf Flächen die zuvor mit einem Gebäude bestanden waren immer eine Erhöhung der PET und somit eine Verschlechterung des thermischen Komfort stattfindet. Dies hängt mit der im Modell als fix angenommenen Innenraumtemperatur zusammen. Da sich die Differenzbildung somit auf die feste Innenraumtemperatur von 296 K (23°C) bezieht, ist die thermische Belastung im Außenraum auch bei den Minderungsszenarien höher, wodurch dieser Effekt zustande kommt. Da aber das Innenraumklima des Ist-Zustandes nicht mit dem Außenklima des Plan-Zustandes gleich gesetzt werden kann, sind diese Flächen von der Auswertung auszunehmen.

Wie Tab. 20 zeigt, findet durch die Vegetations- und Gewässer-Szenarien eine Reduktion der thermischen Belastung statt (Abb. 24 und Abb. 25). Dabei bewirkt die Grasfläche eine Reduktion der PET zwischen -3 und -0,5 K, die sich nachts in geringer Entfernung (ca. 20 m) im Süden und Westen nachweisen lässt. Tagsüber wird vor allem im Osten mit ca. 50 m eine deutliche höhere Reichweite der Kühlwirkung erreicht.

Durch den Park wird ebenfalls eine Reduktion der thermischen Belastung von über -3 K erzielt. Diese Wirkung lässt sich nachts mit einer Verringerung von mindestens -0,5 K der PET im Westen und Süden bis in eine Entfernung von fast 100 m nachverfolgen, im Norden noch ca. 35 m (Abb. 25). Tagsüber ist die Reichweite des Effekts geringer mit einer maximalen Reichweite der Reduktion von 50 m im Osten (Abb. 24).

Auch die Waldfläche zeigt eine deutliche Reduktion der thermischen Belastung. Besonders auffällig sind die großen Reichweiten des Effekts. So kann nachts im Osten eine Reduktion von mindestens -0,5 K in ca. 30 m Entfernung zur Waldfläche nachgewiesen werden und reicht im Westen sogar bis zu 100 m weit in die Bebauung hinein. Tagsüber lässt sich die Wirkung mit mindestens -0,5 K Minderung der thermischen Belastung im Westen ca. 100 m, im Süden etwa 80 m und im Norden ca. 30 m weit nachweisen.

Tab. 20: Übersicht über die Wirkung der einzelnen Plan-Szenarien in den Simulationsgebieten in Oberhausen auf den thermischen Wirkungskomplex dargestellt anhand der PET

© UDE (AGAK) Szenario	Uhrzeit		maximale Wirkung in K	Reichweite in m	Richtung der höchsten Wirkung
Plan-Szenarien Innenstadt (hochversiegelt) Station 1					
INHO-Gras 1 ha	4 Uhr		-3	20	S und W
	16 Uhr		-4	5-60	N und O
INHO-Park 1 ha	4 Uhr		-3	10-100	S und W
	16 Uhr		-2.5	30-70	N und O
INHO-Wald 1 ha	4 Uhr		-3	10- >100	W und S
	16 Uhr		-4.5	15-100	W und S
INHO-Wasser 1 ha	4 Uhr		-2.5	10	S, W, N
	16 Uhr		-3	10-100	W und O
INHO-Park 0,5 ha	4 Uhr		-1.5 (-2.0)	10-70	W und S
	16 Uhr		-0.5	-	
INHO-Wasser 0,5 ha	4 Uhr		-0.75	15	W, O und S
	16 Uhr		-1	15-100	W und S
INHO-Wasser 0,1 ha	4 Uhr		-1	10	N, O, W
	16 Uhr	kein Effekt			
INHO-Dach	4 Uhr	kein Effekt im			
	16 Uhr	Straßenniveau			
INHO-BF-gering	4 Uhr		-0.6	0	-
	16 Uhr		+3 bis -1.5	0-60	O (Reduktion)
INHO-BF-hoch	4 Uhr		+0.5	0	-
	16 Uhr		-5	25	W
INHO-WG-Wasser	4 Uhr		-1	20	W
	16 Uhr		-3	45	O und W
INHO-WG-Park	4 Uhr		-2	80	W und S
	16 Uhr		-3	45	O und W
Ausschnitt Dach-/Fassadenbegrünung					
Dach-grün	4 Uhr	kein Effekt im Straßenniveau über			
	16 Uhr				
Fassaden grün	4 Uhr	Fassadenbreite hinreichend			
	16 Uhr				
Dach-Fassaden grün	4 Uhr				
	16 Uhr				
Stadtrand Station 5/ Freiland Station 8					
FREI-Wasser 1 ha	4 Uhr		+1.3	0	-
	16 Uhr		-7.5	60	W
STA-Wasser 1 ha	4 Uhr		-1.5	0	-
	16 Uhr		-13	0	-

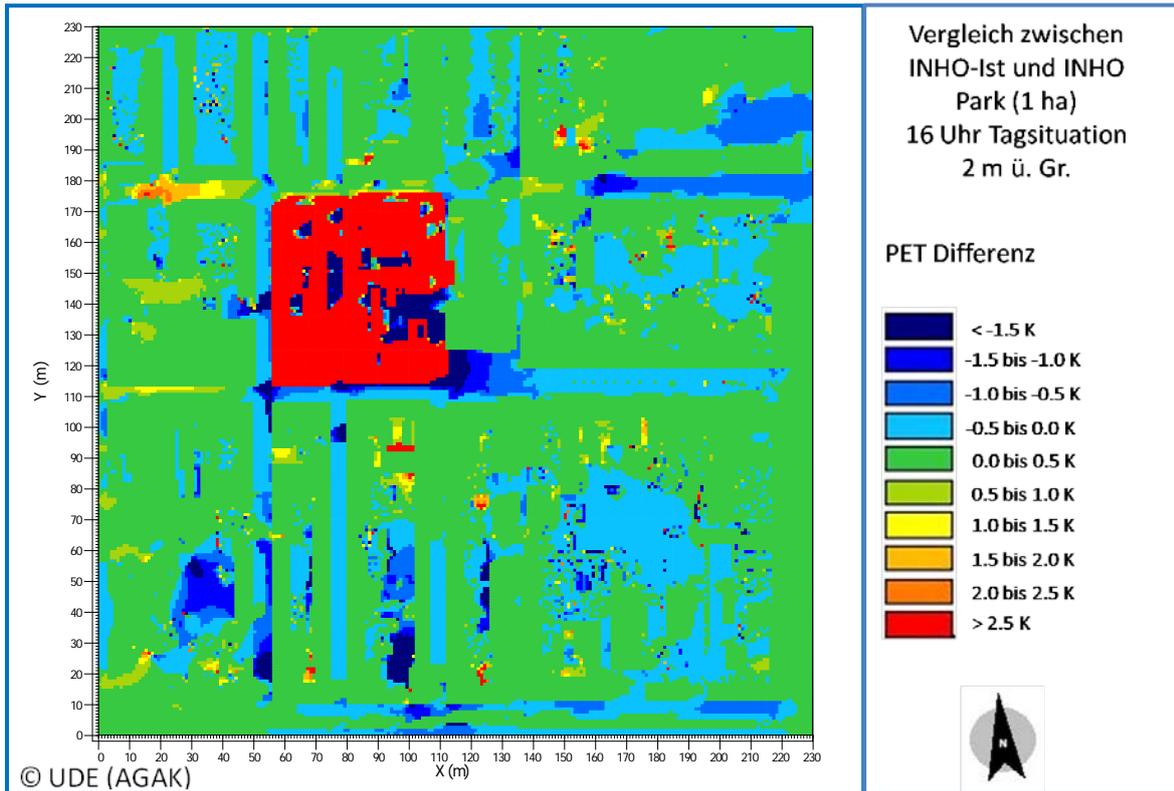


Abb. 24: ENVI-met Simulationsergebnis: PET-Differenzenkarte Park 1 ha Tagsituation in Oberhausen

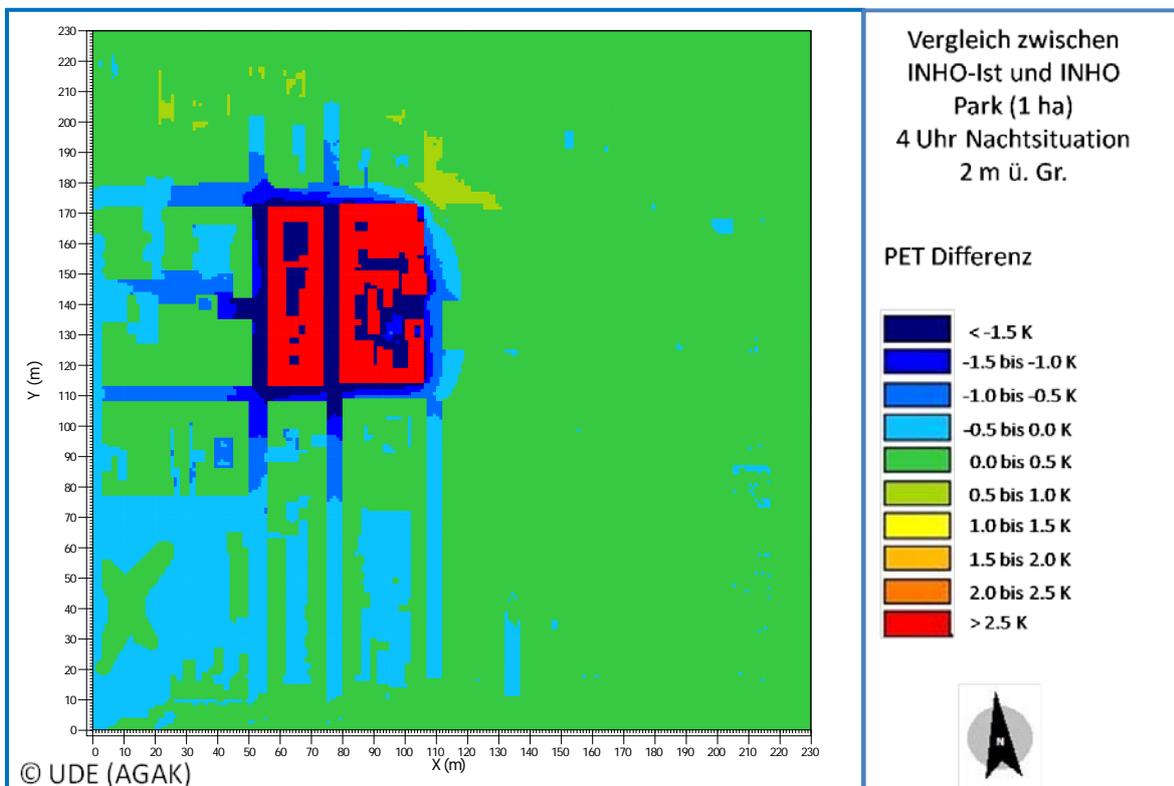


Abb. 25: ENVI-met Simulationsergebnis: PET-Differenzenkarte Park 1 ha Nachtsituation in Oberhausen

Die Wasserfläche bewirkt nachts innerhalb ihrer eigenen Begrenzung ebenfalls eine PET Reduktion von fast -3 K (Abb. 26). Allerdings kommt durch die Wasserfläche fast kein Effekt auf die Umgebung zustande (max. 10 m Reichweite). Tagsüber lässt sich eine PET reduzierende Wirkung der Wasserfläche mit über -0,5 K im Osten und Westen in ca. 35-100 m Entfernung zum Wasser feststellen (Abb. 27).

Die 0,5 ha große Parkfläche erzielt eine ähnliche Wirkung auf die PET, wie die größere Parkfläche. Es wird eine Reduktion von ca. -2 K erreicht, die sich mit -0,5 K nachts im Westen bis in 60 m und im Süden bis in 30 m Entfernung zum Park nachweisen lässt. Tagsüber zeigt die 0,5 ha-Parkfläche kaum einen Effekt auf die bebaute Umgebung.

Die kleineren Wasserflächen weisen in der Nachtsituation direkt über den Flächen Reduktionen der PET um ca. -2 K auf. Ähnlich der 1 ha-Fläche haben sie jedoch keine Wirkung auf die Umgebung. Tagsüber erzielt die kleinste Flächengröße mit 0,1 ha kaum eine nachweisbare Wirkung auf die PET und hat somit auch keinen Effekt auf die Umgebung. Durch die 0,5 ha-Fläche hingegen wird eine Verringerung der thermischen Belastung erreicht, die sich auch vor allem im Westen bis in ca. 100 m Entfernung zur Gewässerfläche feststellen lässt.

Durch die Begrünung der Dachflächen (im Mittel in 15 m ü. Gr.) im gesamten Modellgebiet wird für den thermischen Komfort im Straßenniveau (ca. 2 m ü. Gr.) eine kaum nachweisbare Kühlwirkung erzielt. Im Dachniveau selbst lässt sich hingegen in der Tagsituation eine Reduktion der PET feststellen. Durch die differenziertere Untersuchung der Dach- und Fassadenbegrünungs-Szenarien in einem verkleinerten Modellausschnitt konnte kein Effekt nachgewiesen werden, wobei sicherlich auch die Modellstruktur des Simulationsmodells ENVI-met 3.2 eine Rolle spielt, die Fassadenbegrünung nur unzureichend abbildet.

Die Szenarien mit unterschiedlichen Bodenfeuchtegehalten zeigen, dass durch die Grünfläche auch im Fall der geringeren Bodenfeuchte während des Tages eine Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand auftritt. Allerdings wird im Vergleich mit der Standardsituation des Szenarios INHO Park 1 ha deutlich, dass es auf den meisten Grünflächen zu einer Verschlechterung des thermischen Komforts durch die eingeschränkte Evapotranspiration der Pflanzen bei unzureichender Wasserversorgung kommt (vgl. auch 3.1.3 sowie Ergebnisse aus A4.1.3 und A4.3.1). Wohingegen beim Szenario des höheren Bodenfeuchtegehaltes eine Verbesserung der thermischen Behaglichkeit durch eine Reduktion der PET um ca. -5 K auf allen Grünflächen des Modellgebietes sowohl gegenüber dem Ist-Zustand, als auch im Vergleich mit dem Szenario INHO Park 1 ha stattfindet. Allerdings wird in der Tagsituation kaum eine Wirkung über die eigentlichen Vegetationsflächen hinaus erreicht. Nachts hingegen zeigen sowohl die geringere, als auch die erhöhte Bodenfeuchte eine deutliche Reduktion der PET im Vergleich mit dem Ist-Zustand, demzufolge ergeben sich im Vergleich zu der Standard Situation INHO Park 1 ha in der Nachtsituation kaum Unterschiede bei beiden Szenarien (Abb. 28 und Abb. 29).

Die Auswirkungen der Erhöhung der Windgeschwindigkeit, die einmal für die Szenarien INHO Park 1 ha und INHO Wasser 1 ha durchgeführt wurden, haben in der Tagsituation im Vergleich mit dem Ist-Zustand bei derselben Windgeschwindigkeit eine Reduktion der PET um ca. -3 K zur Folge. Die Ergebnisse sind somit vergleichbar mit jenen, die bei geringerer Windgeschwindigkeit erzielt werden. In der Nachtsituation stellen sich Park- und Wasserfläche deutlich unterschiedlich dar. Beide Flächen erzeugen eine Reduktion der thermischen Belastung, doch zeigt nur die Parkfläche einen Effekt, der auch in die Umgebung hineinreicht, während die Wasserfläche kaum über ihre Begrenzung hinweg kühlend wirkt.

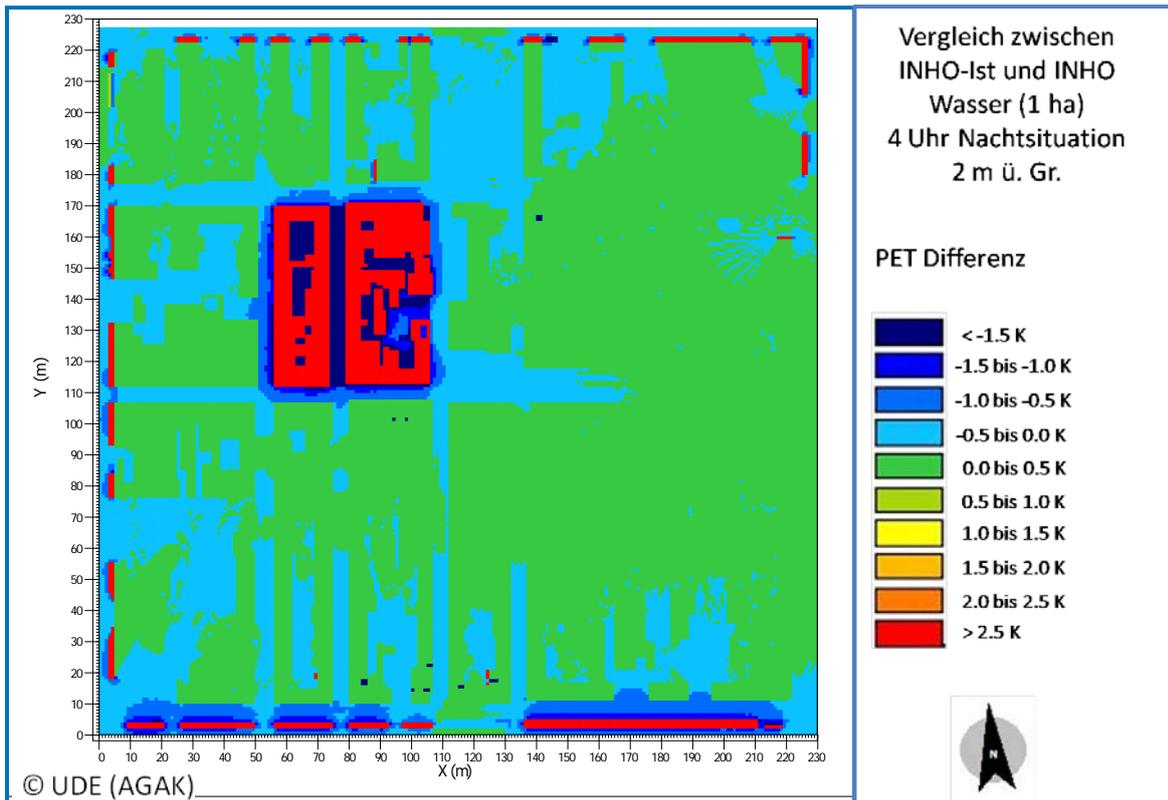


Abb. 26: ENVI-met Simulationsergebnis: PET-Differenzkarte Wasser 1 ha Nachtsituation in Oberhausen

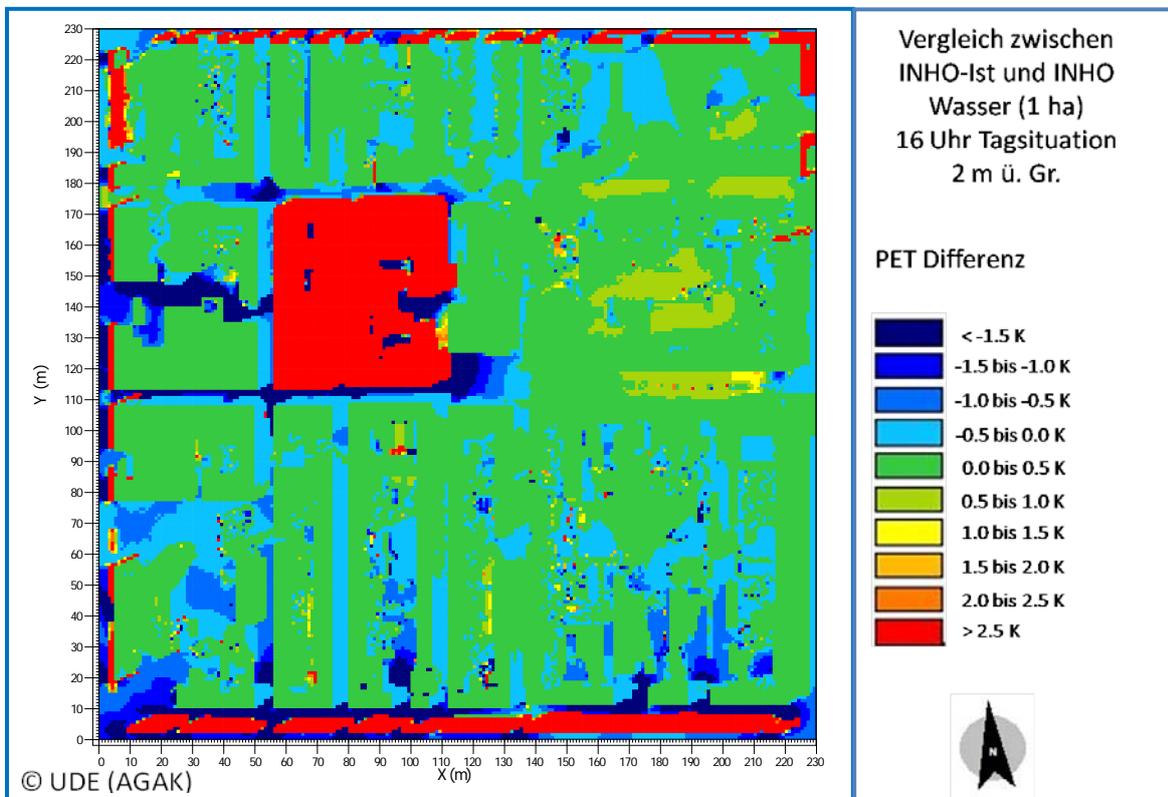


Abb. 27: ENVI-met Simulationsergebnis: PET-Differenzkarte Wasser 1 ha Tagsituation in Oberhausen

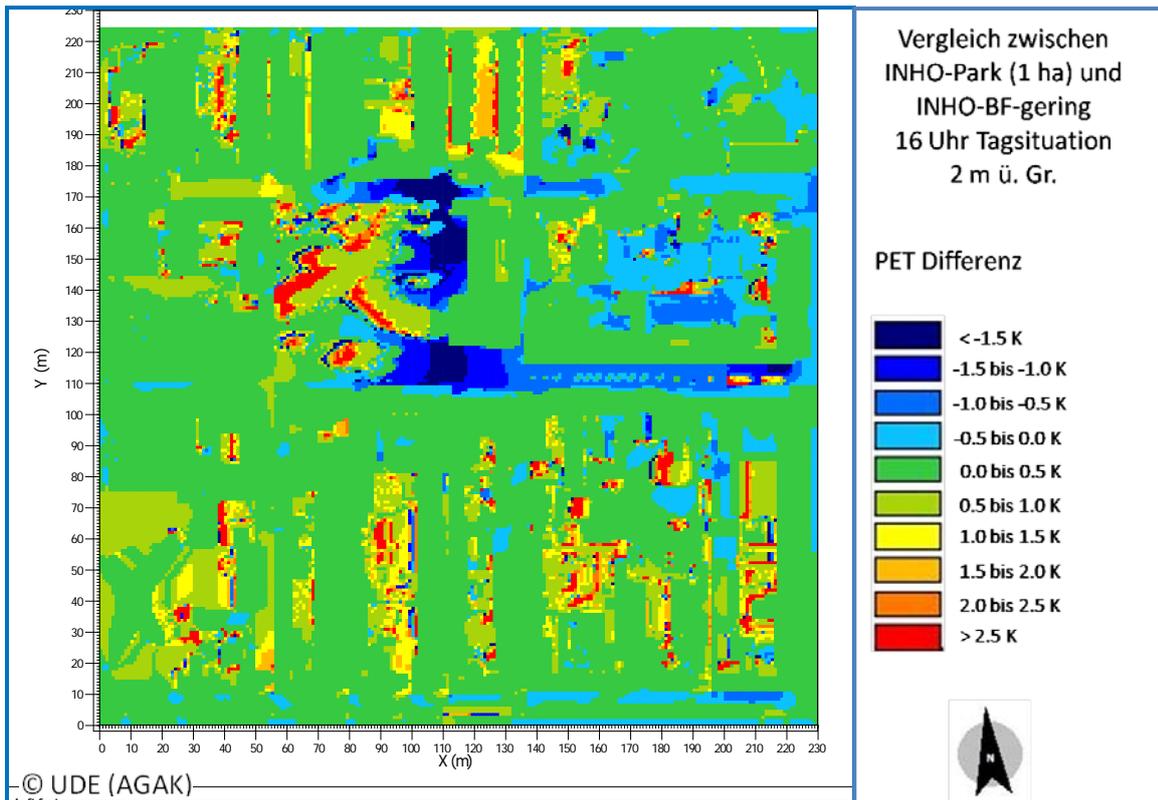


Abb. 28: ENVI-met Simulationsergebnis: PET-Differenzenkarte Bodenfeuchte gering Tagsituation im Vergleich mit INHO Park 1 ha in Oberhausen

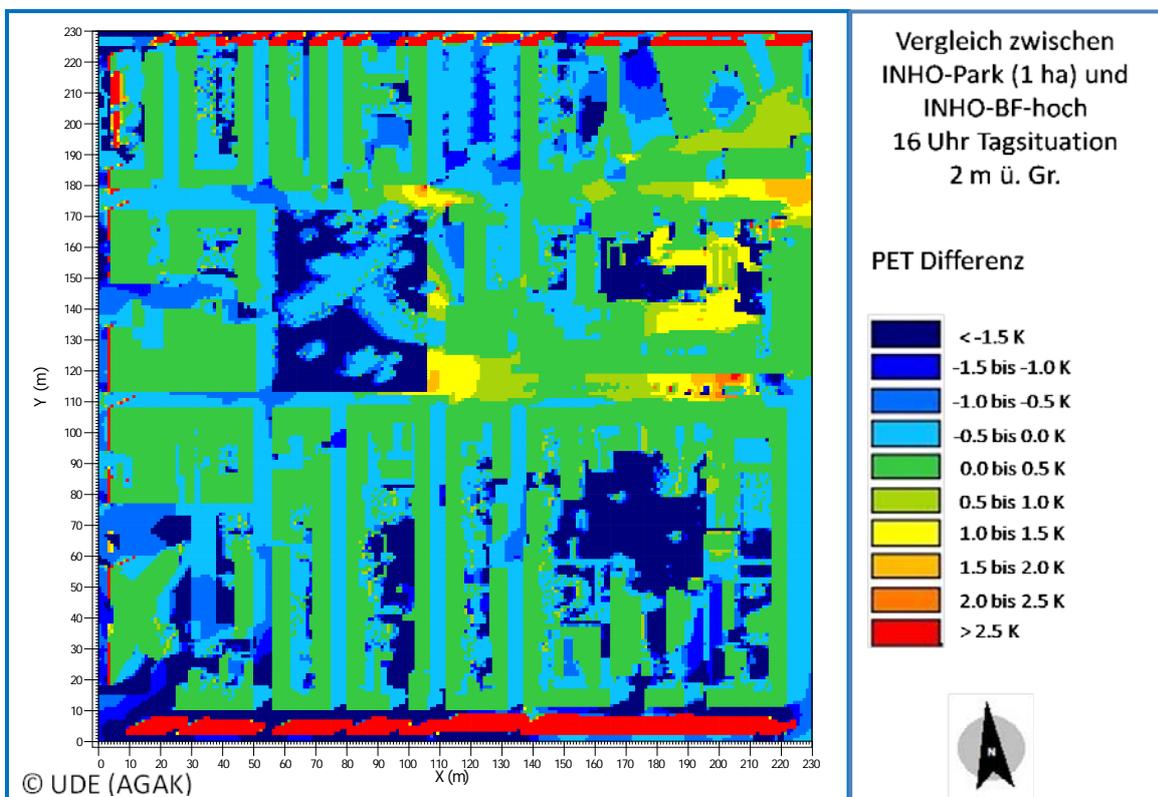


Abb. 29: ENVI-met Simulationsergebnis: PET-Differenzenkarte Bodenfeuchte hoch Tagsituation im Vergleich mit INHO Park 1 ha in Oberhausen

Die Situation durch die Erhöhung des Gewässeranteils in den geringer versiegelten Modellgebieten Stadtrand (Station 5) und Freiland (Station 8) stellt sich unterschiedlich dar. An Station 8 wurden überwiegend Gras- bzw. Ackerflächen durch die Wasserfläche ersetzt. In der Tagsituation ergibt sich dadurch eine Reduktion der PET zwischen -6 und -8 K, bis auf einen kleinen Flächenteil, der zuvor durch einen Baumbestand gekennzeichnet war. Dort ist eine Erhöhung der PET um ca. 10 K zu sehen durch den nun fehlenden Schatten. Die PET-Reduktion durch die Wasserfläche hält im Westen der veränderten Fläche noch ca. 50 m an. Nachts hingegen ist die PET über der Wasserfläche um 1 K höher, als im Ist-Zustand, zeigt aber keine über die Fläche selbst hinaus reichende Wirkung. An Station 5 wurde sowohl ein Teil der Bebauung, als auch die die Bebauung umgebenden Grünflächen (und Parkplätze) durch die Wasserfläche ersetzt. Dementsprechend differenziert fällt die Veränderung aus. Im Bereich der ehemaligen Grünflächen (und der Parkplatzfläche) zeigt die Wasserfläche eine Reduktion der PET um ca. -10 K. Dies gilt allerdings nicht, wenn auf den Grünflächen im Ist-Zustand Bäume angenommen wurden. Dort ergibt sich durch die Wasserfläche durch die nun fehlende Abschattung eine Erhöhung der PET um ca. 18 K in der Tagsituation. Nachts findet im Bereich der ehemaligen versiegelten Parkplatzfläche die größte Reduktion der PET mit -1 K durch die Wasserfläche statt. Die Auswirkungen für die restlichen Flächen fallen geringer aus und können leicht positiv oder negativ sein.

3.3 Fazit

Wie mithilfe der Messwerte nachgewiesen wurde, können Standorte je nach Flächennutzungsstruktur starke Einflüsse auf den thermischen Komfort des Menschen ausüben (s. Abb. 17). So zeigt sich, dass hohe unversiegelte Flächenanteile positiv auf das Humanbioklima wirken. Daher sind Minderungsmaßnahmen, die eine Erhöhung des unversiegelten Flächenanteils vorsehen, ein geeignetes Mittel zur Reduktion des heutigen und des im Zuge des Klimawandels noch zunehmenden Hitzestresses. Wie diese Flächen gestaltet sein sollten, um einen möglichst hohen positiven Einfluss auf den thermischen Komfort der Bevölkerung zu erzielen, konnte durch die Modellsimulationen konkretisiert werden.

Die Modellsimulationen zeigen, dass sowohl Wasser, als auch verschiedene Vegetationsflächen eine positive Wirkung auf den thermischen Komfort aufweisen. Wasserflächen erzielen tagsüber einen den Vegetationsflächen vergleichbaren Effekt. Jedoch hat die PET reduzierende Wirkung von Wasserflächen meist kaum einen über ihre eigentliche Fläche hinausgehenden Einfluss auf die Umgebung. Nachts können sie sogar leicht negative Auswirkungen auf den thermischen Komfort haben (v.a. im Sommer), da das Wasser meist höhere Temperaturen als die Umgebung aufweist (vgl. Abb. 26 und Abb. 27). Vegetationsflächen hingegen zeigen, in Abhängigkeit von ihrer Wasserversorgung, sowohl tagsüber, als auch nachts einen die thermische Belastung reduzierenden Effekt von bis zu -3 bis -4 K. Dabei erzielen sie Reichweiten der den thermischen Komfort verbessernden Wirkung von bis zu 100 m. Somit sind gut wasserversorgte Vegetationsflächen den Wasserflächen als Minderungsmaßnahme vorzuziehen. Besonders Parks, die aus einer Mischung von niedrigen Grasflächen und schattenspendenden Bäumen aufgebaut werden, sind zu favorisieren (vgl. Abb. 24 und Abb. 25). Tagsüber erzielen sie durch Verschattung eine positive Wirkung auf den thermischen Komfort sowie nachts durch Kaltluftproduktion. Bei ausreichendem Abstand der Baumvegetation zueinander schränken sie den Luftaustausch nicht ein, wodurch ein Kaltlufttransport aus den Vegetationsflächen in die umgebende Bebauung hinein möglich wird. Wie die Ergebnisse gezeigt haben (vgl. Abb. 28, Abb. 29, 3.1.3, 3.2.3. und Ergebnisse aus A4.1.3 Kap. und A4.3.1) gilt es für die Erreichung der optimalen Effektivität eine Rahmenbedingung zu beachten: die Vegetationsflächen müssen ausreichend mit Wasser versorgt sein, dies kann während Trockenperioden eine zusätzliche Bewässerung erforderlich machen.

4 Literaturverzeichnis

- AGAK (Arbeitsgruppe Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie) (Hrsg.) (2011): Internetpräsenz der Universität Duisburg-Essen (Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie). Internetressource. <http://www.uni-due.de/klimatologie>. (Stand Oktober 2011).
- BARLAG, A.-B. and KUTTLER, W. (1991): The Significance of Country Breezes for Urban Planning. In: *Energy and Buildings*, Lausanne, 15, 3-4:291-297
- BONGARDT, B. (2006): Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen - dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. = Essener Ökologische Schriften, 24.
- BRUSE, M. and FLEER, H. (1998): Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. In: *Environmental Modelling and Software*, 13: 373-384.
- BRUSE, M. (2003): Stadtgrün und Stadtklima- Wie sich Grünflächen auf das Mikroklima in Städten auswirken. – LÖBF-Mitteilungen, 1/2003, 66 – 70.
- BRUSE, M. (2010): ENVI-met Version 3.2. Persönliche Mitteilung.
- DIMOUDI, A. and NIKOLOPOULOU, M. (2003): Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. In: *Energy and Buildings*, 35: 69-76.
- DR.PAPADAKIS GMBH (2011): Workshop Klimadaten (22.03.2010) – Materialien.
- DÜTEMEYER, D. (2000): Urban-orographische Bodenwindssysteme in der städtischen Peripherie Kölns. = Essener Ökologische Schriften, 12.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) 2011: Klimadaten Deutschland.
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten__kostenfrei%2Fausgabe__mittelwerte__akt__node.html%3F__nnn%3Dtrue (27.07.2011).
- DWD 2010/2011: Witterungsreport Express. Offenbach 2010-2011. – Ausgaben 08/2010 bis 07/2011. <http://www.dwd.de/wr> (31.10.2011).
- EGLV (Emschergenossenschaft/Lippeverband) (Hrsg.) 2011: Niederschlagsdaten der Station Oberhausen-Buschhausen für den Referenzzeitraum 1961-1990, sowie die Messperiode Aug 2010 bis Jul 2011.
- ELIASSON, I. (1996): Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. In: *Atmospheric Environment*, 30 (3), 379 – 392.
- FRÖHLICH, D. und MATZARAKIS, A. (2011): Hitzestress und Stadtplanung. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 71, 7/8: 333-337.
- GULYÁS, A.; UNGER, J. and MATZARAKIS, A. (2006): Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: Modelling and measurements. In: *Building and Environment*, 41: 1713–1722.
- HUTTNER, S.; BRUSE, M.; DOSTAL, P. and KATZSCHNER, A. (2009): Strategies for mitigating thermal heat stress in central european cities: The project KLIMES; Seventh International Conference on Urban Climate ICUC-7, 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: *Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen*. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor

- und H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin.
- IT.NRW (Information und Technik Nordrhein-Westfalen) (2011): Geoinformationszentrum. <http://www.gis4.nrw.de/DienstlisteInternet/> (31.05.2011).
- KATAYAMA, T. (1991): Cooling Effects of a River and Sea Breeze on the Thermal Environment in a Built-up Area. In: *Energy and Buildings*, 15–16: 973-978.
- KUTTLER, W. (1991): Zum klimatischen Potential urbaner Gewässer. – In: Schuhmacher, H. und B. Thiesmeier (Hrsg.) (1991): *Urbane Gewässer - mit Beiträgen zu Limnologie, Stadtökologie, Wasserwirtschaft und Planung*. Westarp Verlag, Essen.
- KUTTLER, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. *Wiss. Mitt. Inst. Met. Leipzig* 13: 100–115.
- KUTTLER, W., WEBER, S., SCHONNEFELD, J. and HESSELSCHWERDT, A. (2007): Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. - In: *International Journal of Climatology*, 27 (14): 2005-2015.
- LAUTENSCHLAGER, M., KEULER, K., WUNRAM, C., KEUP-THIEL, E., SCHUBERT, M., WILL, A., ROCKEL, B. and BOEHM, U. (2009a): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no. 1, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. [doi: 10.1594/WDCC/CLM_A1B_1_D3]
http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Entry.jsp?acronym=CLM_A1B_1_D3
- LAUTENSCHLAGER, M., KEULER, K., WUNRAM, C., KEUP-THIEL, E., SCHUBERT, M., WILL, A., ROCKEL, B. and BOEHM, U. (2009b): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no. 2, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. [doi: 10.1594/WDCC/CLM_A1B_2_D3]
http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Entry.jsp?acronym=CLM_A1B_2_D3
- LAUTENSCHLAGER, M., KEULER, K., WUNRAM, C., KEUP-THIEL, E., SCHUBERT, M., WILL, A., ROCKEL, B. and BOEHM, U. (2009c): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no. 1, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. [doi: 10.1594/WDCC/CLM_A1B_1_D3]
http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Entry.jsp?acronym=CLM_A1B_1_D3
- LAUTENSCHLAGER, M., KEULER, K., WUNRAM, C., KEUP-THIEL, E., SCHUBERT, M., WILL, A., ROCKEL, B. and BOEHM, U. (2009d): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no. 2, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate. [doi: 10.1594/WDCC/CLM_A1B_2_D3]
http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Entry.jsp?acronym=CLM_A1B_2_D3
- LEE, S.-H., LEE, K.-S., JIN, W.-C. and SONG, H.-K. (2009): Effect of an urban park on air temperature differences in a central business district area. In: *Landscape Ecol. Eng.*, 5: 183-191.
- MATZARAKIS, A. (2010): RayMan. <http://www.urbanclimate.net/rayman/> (31.10.2011).
- MAYER, H. und MATZARAKIS, A. (Hrsg.) (2010): Projekte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Rahmen der BMBF Forschungsinitiative klimazwei. Berichte des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg Nr. 22
- MEIßNER, J.-D. und WENDLER, T. (2008): *Statistikpraktikum mit Excel*. Vieweg & Teubner, Wiesbaden.
- MUNLV NRW (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen) (Hrsg.) (2010): *Handbuch Stadtklima – Maßnahmen und*

- Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Langfassung.
http://www.umwelt.nrw.de/klima/klimawandel/anpassungspolitik/projekte/staedte_und_ballungsraeume/projektseite_01/index.php (11.04.2011).
- MURAKAWA, S., SEKINE, T. and NARITA, K. (1991): Study of the Effects of a River on the Thermal Environment in an Urban Area. In: *Energy and Buildings*, 15–16: 993-1001.
- MURAKAWA, S., SEKINE, T., NARITA, K. and NISHINA, D. (1988): Study on the effect of river on thermal environment in urban area. – *Nihon Kenchiku Gakkai* 396: 25-34.
- NARITA, K.-I., SUGAWARA, H. and HONJO, T. (2008): Effects of roadside trees on the thermal environment within a street canyon. In: *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 43: 41-48.
- PASQUILL, F. (1961): The estimation of the dispersion of windborne material. In: *Meteorol. Mag.*, 90: 33-49.
- POLSTER, G (1968): Meteorologische Untersuchungen der turbulenten Diffusion in der Atmosphäre. In: *Arbeitsbericht 1967 der Zentralabteilung Strahlenschutz, KFA Jülich*. Jülich: 160-173.
- POLSTER, G (1969): Erfahrungen mit Strahlungs-, Temperaturgradient- und Windmessungen als Bestimmungsgrößen der Diffusionskategorien. In: *Meteorologische Rundschau*, 22: 170-175.
- RVR (Regionalverband Ruhr) (Hrsg.) (2007): *Gesamtstädtische Klimaanalyse – Stadt Oberhausen*.
- SAARONI, H. and ZIV, B. (2003): The impact of small lake on heat stress in a Mediterranean urban park: the case of Tel Aviv, Israel. In: *International Journal of Biometeorology*, 47: 156-165.
- SHASHUA-BAR, L. and HOFFMAN, M.E. (2000): Vegetation as a climatic component in the design of an urban street An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. In: *Energy and Buildings*, 31: 221–235.
- SPRONKEN-SMITH, R.A. and OKE, T.R. (1998): The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. In: *Int. Journal of Remote Sensing*, 19 (11): 2085-2104.
- UPMANIS, H. (1999): *Influence of parks on local climate*. Earth Sciences Centre, Göteborg University A43.
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure (1997, 2003): *VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 – Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen*. VDI, Düsseldorf.
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure (1998): *VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 – Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I : Klima*. VDI, Düsseldorf.
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2007): *VDI-Richtlinie 3807, Blatt 1 - Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude – Grundlagen*. VDI, Düsseldorf.
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2007): *VDI-Richtlinie 4710, Blatt 2 - Meteorologische Daten in der technischen Gebäudeausrüstung – Gradtage*. VDI, Düsseldorf.
- WERNER, P. C. und GERSTENGARBE, F.-W. (2010): *Katalog der Großwetterlagen Europas 1881-2009*. In: *PIK Report Nr. 119*.
- ZOULIA, I., SANTAMOURIS, M. et DIMOUNDI, A. (2009): Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens. in: *Environ. Monit. Assess.*, 156: 275-292.

Ansprechpartner

Jens Hasse
hasse@fiw.rwth-aachen.de

Birgit Wienert
wienert@fiw.rwth-aachen.de

Projektbüro *dynaklim*

Mozartstraße 4
45128 Essen

Tel.: +49 (0)201 104-33 38

www.dynaklim.de