

Die Wärmeinsel der Stadt Münster
Ausdehnung, Intensität und Belüftungssituation

ANDREAS MÜSKENS

Diplomarbeit an der
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster
Fachbereich Geowissenschaften
Institut für Landschaftsökologie

2004

Gutachter:

PROF. DR. O. KLEMM

DR. T. WRZESINSKY

Dank

Für die engagierte Betreuung und fachliche Beratung dieser Diplomarbeit danke ich sehr herzlich Herrn Prof. Dr. Otto Klemm.

Herzlich danken möchte ich auch Herrn Dr. Thomas Wrzesinsky und Herrn Dr. Andreas Held für ihre große Unterstützung und freundliche Hilfe bei der Durchführung der Messungen und der Datenverarbeitung.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen.....	3
2.1 Strahlungs- und Wärmebilanz.....	3
2.1.1 Albedo natürlicher und städtischer Oberflächen.....	5
2.1.2 Thermische Stoffeigenschaften.....	7
2.1.3 Atmosphärische Gegenstrahlung.....	9
2.2 Städtische Wärmeinsel.....	11
2.2.1 Strahlungs- und Wärmehaushalt der Stadt.....	12
2.2.1.1 Einfluss von Luftbeimengungen auf die Globalstrahlung.....	12
2.2.1.2 Städtische Albedo.....	12
2.2.1.3 Horizontabschirmung und zusätzliche Strahlungsumsatzflächen.....	13
2.2.1.4 Bodenwärmefluss.....	14
2.2.1.5 Latente und sensible Wärmeströme.....	14
2.2.1.6 Anthropogene Wärmeproduktion.....	14
2.2.1.7 Metabolische Wärmeproduktion.....	16
2.2.2 Ausprägungen der städtischen Überwärmung.....	16
2.2.2.1 Räumliche Differenzierung.....	16
2.2.2.2 Zeitliche Differenzierung.....	17
2.2.2.3 Einfluss der Stadtgröße.....	18
2.3 Lokale Kaltluft.....	20
2.3.1 Entstehung von Kaltluft.....	21
2.3.2 Kaltluftabfluss.....	22
2.3.3 Wirkung von Kaltluft auf einen Standort.....	23
2.4 Bedeutung des Stadtklimas für den Menschen.....	23
2.4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	23
2.4.2 Human-biometeorologischer Wirkungskomplex.....	24
3 Das Untersuchungsgebiet.....	28
3.1 Geographische Lage und klimatische Exposition.....	28
3.2 Topographie.....	28
3.3 Stadtstruktur.....	30
3.4 Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum.....	31
4 Datenerfassung.....	34
4.1 Messstrecken.....	34

4.2 Messtechnik	35
4.3 Methoden zur Datenermittlung und Datenaufbereitung	36
4.3.1 Lufttemperatur	36
4.3.1.1 Berechnung der Lufttemperatur aus der akustischen Temperatur	37
4.3.1.2 Interpolation der Temperaturmessungen von einem Zeitraum auf einen Zeitpunkt	41
4.3.2 Berechnung der Winde	44
5 Ergebnisse	48
5.1 Luftbewegungen und Temperaturunterschiede der nächtlichen Messfahrten	49
5.1.1 Messstrecke „Aasee“	49
5.1.2 Messstrecke „Hafen“	51
5.1.3 Messstrecke „Kinderbach“	53
5.1.4 Messstrecke „Schleuse“	54
5.1.5 Messstrecke „Stadt“	57
5.2 Abkühlungsbeträge	57
5.3 Temperaturanomalien im Stadtgebiet	58
5.3.1 Juli 2003	58
5.3.2 August 2003	59
5.3.3 September 2003	60
6 Diskussion	61
7 Ausblick	66
8 Literatur	68
Anhang	A1

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Abhängigkeit der langwelligen Ausstrahlung von der Horizontüberhöhung durch Häuserfronten	13
Abb. 2: Typischer Tagesverlauf der Erwärmungs- und Abkühlungsraten der Lufttemperatur in der Stadt und im Umland bei sommerlichem Strahlungswetter.....	17
Abb. 3: Querschnitt durch eine typische städtische Wärmeinsel	19
Abb. 4: Verhältnis der Wärmeinselintensität zur Einwohnerzahl von Siedlungen.....	19
Abb. 5: Relief des Stadtgebiets Münster und wichtige Wasserläufe.....	29
Abb. 6: Bodennaher Luftdruck und Tageshöchsttemperaturen in Europa am 07.08.2003	32
Abb. 7: Verlauf der fünf Messstrecken im Untersuchungsgebiet	34
Abb. 8: Fahrradanhänger mit Messgeräten	35
Abb. 9: Gemessene Lufttemperatur und akustische Temperatur am Morgen des 08.08.2003	38
Abb. 10: Gemessene akustische Temperatur und daraus berechnete Lufttemperatur am Morgen des 08.08.2003.....	40
Abb. 11: Geglätteter Temperaturverlauf an der Wetterstation auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie am Morgen des 08.08.2003.....	42
Abb. 12: An der Wetterstation auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie gemessene Lufttemperaturen am Morgen des 08.08.2003 und Interpolation dieser auf den Zeitpunkt 5:50 Uhr (MET).....	42
Abb. 13: Berechnete Lufttemperatur der Messfahrt am Morgen des 08.08.2003 und Interpolation dieser auf den Zeitpunkt des Sonnenaufgangs um 5:47 Uhr (MET).....	43
Abb. 14: Vektordarstellung der Windberechnung	46
Abb. 15: Einfluss von GPS-Ungenauigkeiten auf die Berechnung des echten Windes.....	47

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Albedowerte natürlicher und städtischer Oberflächen für kurzwellige Strahlung...	6
Tab. 2: Thermische Eigenschaften künstlicher und natürlicher Materialien	8
Tab. 3: Abhängigkeit der atmosphärischen Gegenstrahlung von der terrestrischen Ausstrahlung und der Luftfeuchtigkeit bei gegebener Oberflächen- und Lufttemperatur	10
Tab. 4: Anthropogene Energieproduktion in ausgewählten Großstädten	15
Tab. 5: Bewertungsindizes PMV und PET bei gleicher thermophysiologicaler Belastung	26
Tab. 6: Auszug aus dem Datensatz vom Morgen des 08.08.2003	44
Tab. 7: Qualität und Verwendung der Messdaten	A1

Kartenverzeichnis

Karte 1a: Messstrecke „Aasee“ Lufttemperatur am 10.07.2003 / 15:00 Uhr (MET)	A3
Karte 1b: Messstrecke „Aasee“ Lufttemperatur am 11.07.2003 / 04:22 Uhr (MET).....	A3
Karte 1c: Messstrecke „Aasee“ Lufttemperatur am 11.07.2003 / 04:22 Uhr (MET)..... (Temperaturdifferenz zum Domplatz)	A3
Karte 1d: Messstrecke „Aasee“ Luftbewegung während der Messfahrt am 11.07.2003	A3
Karte 2a: Messstrecke „Aasee“ Lufttemperatur am 07.08.2003 / 15:00 Uhr (MET).....	A4
Karte 2b: Messstrecke „Aasee“ Lufttemperatur am 08.08.2003 / 05:02 Uhr (MET).....	A4
Karte 2c: Messstrecke „Aasee“ Lufttemperatur am 08.08.2003 / 05:02 Uhr (MET)..... (Temperaturdifferenz zum Domplatz)	A4
Karte 2d: Messstrecke „Aasee“ Luftbewegung während der Messfahrt am 08.08.2003	A4
Karte 3a: Messstrecke „Hafen“ Lufttemperatur am 08.08.2003 / 15:00 Uhr (MET).....	A5
Karte 3b: Messstrecke „Hafen“ Lufttemperatur am 09.08.2003 / 05:03 Uhr (MET)	A5
Karte 3c: Messstrecke „Hafen“ Lufttemperatur am 09.08.2003 / 05:03 Uhr (MET)	A5
(Temperaturdifferenz zum Domplatz)	
Karte 3d: Messstrecke „Hafen“ Luftbewegung während der Messfahrt am 09.08.2003	A5
Karte 4a: Messstrecke „Hafen“ Lufttemperatur am 05.09.2003 / 15:00 Uhr (MET).....	A6
Karte 4b: Messstrecke „Hafen“ Lufttemperatur am 06.09.2003 / 05:49 Uhr (MET)	A6
Karte 4c: Messstrecke „Hafen“ Lufttemperatur am 06.09.2003 / 05:49 Uhr (MET)	A6
(Temperaturdifferenz zum Domplatz)	
Karte 4d: Messstrecke „Hafen“ Luftbewegung während der Messfahrt am 06.09.2003	A6

Karte 5a: Messstrecke „Kinderbach“ Lufttemperatur am 14.07.2003 / 15:00 Uhr (MET).....	A7
Karte 5b: Messstrecke „Kinderbach“ Lufttemperatur am 15.07.2003 / 04:27 Uhr (MET)	A7
Karte 5c: Messstrecke „Kinderbach“ Lufttemperatur am 15.07.2003 / 04:27 Uhr (MET)	A7
	(Temperaturdifferenz zum Domplatz)
Karte 5d: Messstrecke „Kinderbach“ Luftbewegung während der Messfahrt am 15.07.2003	A7
Karte 6a: Messstrecke „Kinderbach“ Lufttemperatur am 11.08.2003 / 15:00 Uhr (MET).....	A8
Karte 6b: Messstrecke „Kinderbach“ Lufttemperatur am 12.08.2003 / 05:08 Uhr (MET)	A8
Karte 6c: Messstrecke „Kinderbach“ Lufttemperatur am 12.08.2003 / 05:08 Uhr (MET)	A8
	(Temperaturdifferenz zum Domplatz)
Karte 6d: Messstrecke „Kinderbach“ Luftbewegung während der Messfahrt am 12.08.2003	A8
Karte 7a: Messstrecke „Kinderbach“ Lufttemperatur am 14.09.2003 / 15:00 Uhr (MET).....	A9
Karte 7b: Messstrecke „Kinderbach“ Lufttemperatur am 15.09.2003 / 06:03 Uhr (MET)	A9
Karte 7c: Messstrecke „Kinderbach“ Lufttemperatur am 15.09.2003 / 06:03 Uhr (MET)	A9
	(Temperaturdifferenz zum Domplatz)
Karte 7d: Messstrecke „Kinderbach“ Luftbewegung während der Messfahrt am 15.09.2003	A9
Karte 8a: Messstrecke „Schleuse“ Lufttemperatur am 05.08.2003 / 15:00 Uhr (MET).....	A10
Karte 8b: Messstrecke „Schleuse“ Lufttemperatur am 06.08.2003 / 04:59 Uhr (MET)	A10
Karte 8c: Messstrecke „Schleuse“ Lufttemperatur am 06.08.2003 / 04:59 Uhr (MET)	A10
	(Temperaturdifferenz zum Domplatz)
Karte 8d: Messstrecke „Schleuse“ Luftbewegung während der Messfahrt am 05.08.2003	A10
Karte 9a: Messstrecke „Schleuse“ Lufttemperatur am 10.08.2003 / 15:00 Uhr (MET)	A11

Karte 9b: Messstrecke „Schleuse“	
Lufttemperatur am 11.08.2003 / 05:07 Uhr (MET)	A11
Karte 9c: Messstrecke „Schleuse“	
Lufttemperatur am 11.08.2003 / 05:07 Uhr (MET)	A11
(Temperaturdifferenz zum Domplatz)	
Karte 9d: Messstrecke „Schleuse“	
Luftbewegung während der Messfahrt am 11.08.2003	A11
Karte 10a: Messstrecke „Schleuse“	
Lufttemperatur am 15.09.2003 / 15:00 Uhr (MET).....	A12
Karte 10b: Messstrecke „Schleuse“	
Lufttemperatur am 16.09.2003 / 06:05 Uhr (MET)	A12
Karte 10c: Messstrecke „Schleuse“	
Lufttemperatur am 16.09.2003 / 06:05 Uhr (MET)	A12
(Temperaturdifferenz zum Domplatz)	
Karte 10d: Messstrecke „Schleuse“	
Luftbewegung während der Messfahrt am 16.09.2003	A12
Karte 11a: Messstrecke „Stadt“	
Lufttemperatur am 03.08.2003 / 15:00 Uhr (MET).....	A13
Karte 11b: Messstrecke „Stadt“	
Lufttemperatur am 04.08.2003 / 04:55 Uhr (MET)	A13
Karte 11c: Messstrecke „Stadt“	
Lufttemperatur am 04.08.2003 / 04:55 Uhr (MET)	A13
(Temperaturdifferenz zum Domplatz)	
Karte 11d: Messstrecke „Stadt“	
Luftbewegung während der Messfahrt am 04.08.2003	A13
Karte 12: Abkühlung im Juli	
Abkühlung von 15:00 Uhr (MET) bis zum Sonnenaufgang am Folgetag	A14
Karte 13: Intensität der Wärmeinsel im Juli	
Lufttemperatur bei Sonnenaufgang	A15
Karte 14: Intensität der Wärmeinsel im August	
Lufttemperatur bei Sonnenaufgang	A16
Karte 15: Intensität der Wärmeinsel im September	
Lufttemperatur bei Sonnenaufgang	A17
Karte 16: Luftbewegung bei Schwachwindsituationen	
Überlagerte Messergebnisse	A18

1 Einleitung

Städte sind die am dichtesten besiedelten Gebiete dieser Erde. Obwohl sie nur einen sehr kleinen Teil der Erdoberfläche bedecken, beherbergen sie einen Großteil der Weltbevölkerung und das mit steigender Tendenz. Während im Jahr 1950 noch etwa 30 Prozent der Weltbevölkerung in Städten lebte, wird dieser Anteil laut einer Prognose der Vereinten Nationen bei einem mittleren Bevölkerungswachstum auf 50 Prozent im Jahr 2007 und weiter auf 60 Prozent im Jahr 2030 ansteigen. In absoluten Zahlen ausgedrückt bedeutet dies eine Zunahme der städtischen Bevölkerung von 750 Millionen im Jahr 1950 auf knapp fünf Milliarden Menschen im Jahr 2030.¹

Das Leben in Ballungsgebieten ist für viele Menschen attraktiv, vielerorts aber auch mit Einbußen an Umweltqualität verbunden, die sogar zu Gesundheitsschäden führen können. Insbesondere die Umweltmedien Luftqualität und Klima zeigen in urbanen Siedlungen deutliche Veränderungen zum umliegenden Freiland. Charakteristische Unterschiede sind eine Überwärmung, eine größere Trockenheit und eine höhere Konzentration von Luftbeimengungen wegen der intensiveren Freisetzung von Emissionen und des eingeschränkten Austauschs der Luftmassen in Stadtgebiet. Zusammengefasst werden diese Veränderungen als „Stadtklima“ bezeichnet.²

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts beschäftigen sich Wissenschaftler mit den klimatischen Unterschieden zwischen städtischen Siedlungen und dem unbebauten Umland. Nachdem anfangs die Erforschung der urbanen Überwärmung und die Modifikationen von Wolkenbildung und Niederschlägen im Zentrum des Interesses standen, befasste man sich ab den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts auch mit dem Einfluss des Klimas auf den Menschen. Es entstand die Wissenschaftsdisziplin der Humanbioklimatologie. Zeitgleich wurde erstmals das Eigenklima der Städte in die Stadtplanung implementiert. Mit dem im 20. Jahrhundert weltweit zu beobachtenden steigenden Stadtwachstum festigte sich auch die Erkenntnis, dass stadtklimatologische Forschung nicht nur wissenschaftlicher Selbstzweck, sondern eine notwendige Entscheidungshilfe für die Stadtplanung ist.³

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis einer klimatologischen Untersuchung der Stadt Münster mit einer mobilen Messplattform. Dabei wurde der Frage nachgegangen, wie groß

¹ Vgl.: <http://www.un.org/esa/population/publications/wup2001/wup2001dh.pdf>

² Vgl.: KUTTLER 2000, S. 420

³ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 125ff

der Wärmeinseleffekt zwischen der Stadt und dem Freiland insgesamt ist, aber auch die Ausdehnung der Wärmeinsel und kleinräumige Modifikationen im Temperaturprofil waren von Interesse. Darüber hinaus sollte das unterschiedliche Abkühlungspotenzial des unbebauten Freilands ermittelt und die Wege von Kaltluftabflüssen in die Stadt erfasst werden. Außerdem stellte sich die Frage, ob sich mit den Messungen ein thermisch induziertes Windfeld nachweisen lässt.

Die Untersuchung ist an austauscharme Strahlungswetterlagen gebunden, da sich unter diesen Voraussetzungen die städtische Wärmeinsel besonders intensiv ausbildet und sowohl die Entstehung und der gravitative Abfluss von Kaltluft als auch die Ausbildung eines thermisch induzierten Windfeldes begünstigt wird.⁴ Bei Abwesenheit von Advektion sind diese Luftbewegungen schließlich für die Versorgung der Stadt mit Frischluft von großer Bedeutung.

Die Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert. Im Anschluss an diese Einleitung werden im zweiten Kapitel die theoretischen Grundlagen sowohl für die Entwicklung der städtischen Wärmeinsel, als auch für die Entstehung und den Abfluss lokaler Kaltluft ausführlich dargestellt. Außerdem wird eine Einführung in die Bedeutung des Stadtklimas für den Menschen gegeben. Kapitel drei stellt das Untersuchungsgebiet vor und schildert den Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum. Das folgende, vierte Kapitel beschreibt die Messstrecken sowie die zur Datenerfassung eingesetzten Messtechniken und veranschaulicht ausführlich den mathematischen Umgang mit den Daten. Die Analyse der Ergebnisse geschieht in Kapitel fünf. In Kapitel sechs werden die gewonnenen Erkenntnisse diskutiert. Die Diskussion bezieht sich insbesondere auf den im Jahr 1992 vom Oberstadtdirektor der Stadt Münster herausgegebenen Werkstattbericht „Stadtklima Münster“. Dieser basiert auf den gesammelten Daten von 21 über das Stadtgebiet verteilten stationären Messstationen, die bis zu zwei Jahre im Dauereinsatz waren, sowie von zwei Befliegungen bei denen mit Infrarotthermalaufnahmen die Oberflächentemperaturen der Stadt und ihres Umlands erfasst wurden. Kapitel sieben gibt zum Abschluss einen Ausblick.

⁴ Vgl.: KIESE 1996, S. 49f

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Strahlungs- und Wärmebilanz

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Unterschiede der Lufttemperatur in einer Höhe von zwei Metern über dem Grund zwischen dem bebauten Gebiet der Stadt Münster und ihrem unbebauten Umland resultieren im wesentlichen aus den unterschiedlichen Strahlungs- und Wärmebilanzen der jeweils an das Luftpaket angrenzenden Oberflächen.

Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge sollen die Bilanzgleichungen im Folgenden dargelegt werden. Konventionsgemäß haben alle zu einer Energieumsatzfläche gerichteten Energieflüsse positive, von ihr weg gerichtete Flüsse negative Vorzeichen. Jeder einzelne Term beschreibt eine Energieflussdichte mit der Einheit Wm^{-2} . Da für die Gleichungen eine Umsatzfläche ohne Speichermöglichkeit angenommen wird, ist die Summe aller Terme gleich Null.⁵

Die Strahlungsbilanz Q_S an der Erdoberfläche setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$(1) \quad Q_S = S + H - R_K - A_L - R_L + G$$

mit

Q_S	Strahlungsbilanz
S	direkte Sonnenstrahlung
H	diffuse Himmelsstrahlung
R_K	kurzwellig reflektierte Strahlung
A_L	langwellige Ausstrahlung
R_L	langwellig reflektierte Strahlung
G	atmosphärische Gegenstrahlung

Da der kurzwellige Anteil der Strahlungsbilanz nur bei Sonnenstrahlung auftritt, und der langwellige folglich die vollständige Strahlungsbilanz bei Nacht darstellt, ist eine Differenzierung sinnvoll.⁶

Für die kurzwellige Strahlungsbilanz Q_K gilt:

$$(2) \quad Q_K = S + H - R_K$$

⁵ Vgl.: KRAUS 2000, S. 95

⁶ Vgl.: ZMARSLY 2002, S. 31

Die Gleichung zeigt, dass sich die kurzwellige Strahlungsbilanz Q_K aus der auf die Oberfläche eintreffenden Globalstrahlung ($S + H$) und der diesen Betrag reduzierenden kurzwelligen Reflexion R_K zusammensetzt.

Die unterschiedlichen Reflexionsvermögen verschiedener Oberflächen für kurzwellige Strahlung haben somit einen großen Einfluss auf die jeweilige kurzwellige Strahlungsbilanz. Gekennzeichnet wird das Reflexionsvermögen einer Oberfläche durch deren Albedo-Wert, der den prozentualen Anteil der reflektierten kurz- bzw. langwelligen Strahlung an der eintreffenden Strahlung darstellt.⁷

Die langwellige Strahlungsbilanz Q_L lautet:

$$(3) \quad Q_L = G - A_L - R_L$$

Die emittierte Wärmestrahlung A_L hängt gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz von der absoluten Temperatur T_0 der Oberfläche und ihrem mittleren effektiven Emissionsgrad ϵ im langwelligen Spektralbereich ab:

$$(4) \quad A_L = \epsilon \sigma T_0^4$$

mit

$$\sigma \quad \text{Stefan-Boltzmann-Konstante} = 5,6698 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

Außerdem hängt die Menge der reflektierten Wärmestrahlung R_L von der atmosphärischen Gegenstrahlung G ab:

$$(5) \quad R_L = (1 - \epsilon) G$$

Die gesamte von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung E_L setzt sich somit nach folgender Gleichung zusammen:

$$(6) \quad E_L = A_L + R_L = \epsilon \sigma T_0^4 + (1 - \epsilon) G$$

Durch Einsetzen der Formeln (4) und (5) in Formel (3) stellt sich die Gleichung für die langwellige Strahlungsbilanz nun so dar:

$$(7) \quad Q_L = G - \epsilon \sigma T_0^4 - (1 - \epsilon) G = \epsilon(G - \sigma T_0^4)$$

⁷ Vgl.: ZMARSLY 2002, S. 16f

Da die natürlichen Materialien der Erdoberfläche im Durchschnitt mit 95% eines schwarzen Strahlers emittieren⁸, kann unter der Annahme, dass $\epsilon = 1$ gesetzt wird, die langwellige Strahlungsbilanz mit hinreichender Genauigkeit wie folgt formuliert werden:

$$(8) \quad Q_L = G - \sigma T_0^4$$

Durch die dargelegten Umformungen der Ausgangsformel (2) zeigt Gleichung (7) nun, dass sich die langwellige und damit die gesamte nächtliche Strahlungsbilanz der Erdoberfläche aus der emittierten terrestrischen Wärmestrahlung und der diesen Betrag reduzierenden atmosphärischen Gegenstrahlung zusammensetzen.⁹

Die Strahlungsbilanz Q_S fließt schließlich in Wärmebilanz Q_W ein. Ihre Gleichung lautet:

$$Q_W + Q_S + Q_H/A + Q_E/A + Q_B/A + Q_N/A + Q_M/A + Q_A/A = 0$$

mit:

Q_W	Wärmebilanz
Q_S	Strahlungsbilanz
Q_H	sensibler Wärmestrom
Q_E	latenter Wärmestrom
Q_B	Bodenwärmestrom
Q_N	durch Niederschlag verursachter Wärmestrom
Q_M	metabolischer Wärmestrom
Q_A	anthropogener Wärmestrom
A	Fläche

Die Wärme- und Strahlungsbilanz besitzen die Einheit Wm^{-2} , die Wärmeströme werden in Watt angegeben und die Bezugsflächen für die Wärmeströme in m^2 .¹⁰

2.1.1 Albedo natürlicher und städtischer Oberflächen

Die Albedo beschreibt das Reflexionsvermögen einer Oberfläche für kurz- bzw. langwellige Strahlung als prozentualen Anteil der reflektierten an der eintreffenden Strahlung. Unterschiedliche Reflexionsvermögen verschiedener Oberflächen, wie sie in Tabelle 1 aufgeführt sind, haben somit einen großen Einfluss auf die jeweilige Strahlungsbilanz.

⁸ Vgl.: KRAUS 2000, S. 121

⁹ Vgl.: ZMARSLY 2002, S. 26ff

¹⁰ Vgl.: ZMARSLY 2002, S. 31f

Tab. 1: Albedowerte natürlicher und städtischer Oberflächen für kurzwellige Strahlung (Zusammenstellung aus HÄCKEL 1999, Kuttler 1998, Kraus 2000 und Zmarsly 2002)

Natürliche Oberflächen	Albedo [%]	Städtische Oberflächen	Albedo [%]
Neuschnee	75 – 90	Asphalt	5 – 20
Altschnee	40 – 70	Beton	10 – 35
Trockener Sand	25 – 40	Ziegel	20 – 40
Nasser Sand	15 – 30	Naturstein	20 – 35
Ackerboden	7 – 17	Dachziegel	10 – 35
Laubwälder (mittlere geographische Breite im Sommer)	15 – 25	Wellblech	10 – 16
Nadelwälder	5 – 15	Anstrich weiß	50 – 90
Wiesen, Weiden	12 – 30	Anstrich rot, braun, grün	20 – 35
Landwirtschaftliche Kulturen	15 – 25	Anstrich schwarz	2 – 15
Tiefes Wasser (unbewegt) bei hoch stehender Sonne	3 – 10		
Tiefes Wasser (unbewegt) bei tief stehender Sonne (5°)	≈ 80		

Die Ermittlung der städtischen Albedo ist wegen der dreidimensionalen Gestalt und der Materialvielfalt des Baukörpers nicht einfach. Sie hängt in jedem Fall von den Farben der jeweiligen Oberflächen ab, wird aber darüber hinaus von den Expositionen der Flächen zur einfallenden Strahlung bestimmt, die wiederum von den wechselnden Sonnenständen im Tages- und Jahresverlauf abhängig sind. Europäische und nordamerikanische Städte weisen Albedowerte von 10 bis 30 Prozent bei einem Mittelwert von 15 Prozent auf.¹¹ Wie Tabelle 1 zeigt, unterscheiden sich diese Zahlen nur geringfügig von denen natürlicher

¹¹ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 132

Oberflächen. Ihre Werte liegen zwischen sieben bis zehn Prozent bei dunklem Ackerboden und 25 bis 45 Prozent bei trockenem hellem Sandboden. Darüber hinaus kann eine Bedeckung der Böden mit Vegetation, Laubstreu oder auch Schnee deren Reflexionsvermögen immens ändern.¹² Vor allem Neuschnee reflektiert die eintreffende Strahlung sehr gut. Die städtische Überwärmung verkürzt im Winter allerdings die Dauer der Schneebedeckung der Stadt im Vergleich zu ihrem Umland und erhöht dadurch den urbanen Strahlungsgewinn.¹³

2.1.2 Thermische Stoffeigenschaften

Von der Erdoberfläche aus wird sowohl die Luft, als auch der Boden- bzw. Baukörper erwärmt oder abgekühlt. Die langwellige Ausstrahlung der verschiedenen Oberflächen ist dabei gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz von deren Temperatur abhängig und steht in engem Zusammenhang mit den thermischen Eigenschaften des Materials. Diese sind:

- die Dichte,
- die spezifische Wärmekapazität,
- die Wärmekapazitätsdichte,
- der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient,
- der Temperaturleitfähigkeitskoeffizient und
- der Wärmeeindringkoeffizient.¹⁴

Eine Übersicht über die thermischen Eigenschaften verschiedener Materialien gibt Tabelle 2. Während natürlicher, trockener Lehmboden mit 40 Prozent Porenvolumen ebenso wie die in der Stadt häufig verbaute Materialien Asphalt, Schwebeton und Lehmziegel spezifische Wärmekapazitäten um $0,9 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ aufweisen, ist die Wärmekapazitätsdichte der genannten städtischen Materialien bis zu 1,5-fach größer als beim trockenen Lehmbo- den. Die für den Bodenwärmestrom ebenfalls bedeutsamen Parameter Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit sowie der Wärmeeindringkoeffizient erreichen bei sämtlichen städtischen Baumaterialien deutlich höhere Werte als beim trockenen Lehmbo- den. Diesbe- züglich besonders auffällig ist der Werkstoff Stahl, der über eine extrem gute Wärme- und Temperaturleitfähigkeit verfügt. Da Schwebetonteile in der Regel von einem Geflecht aus

12 Vgl.: SCHEFFER 1998, S. 226f

13 Vgl.: KUTTLER 1998, S. 132

14 Vgl.: KUTTLER 2000, S. 423

stählernen Armieisen durchzogen sind, kann der Temperatur- und Wärmeaustausch entlang dieser besonders tief in den Baukörper eindringen.

Tab. 2: Thermische Eigenschaften künstlicher und natürlicher Materialien (nach Kuttler 1998)

Material	Dichte [kg m ⁻³ ·10 ³]	Spezifische Wärme- kapazität [J kg ⁻¹ K ⁻¹ ·10 ³]	Wärme- kapazitäts- dichte [J m ⁻³ K ⁻¹ ·10 ⁶]	Wärmeleit- fähigkeits- koeffizient [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Tempera- turleitfähig- keitskoeffi- zient [m ² s ⁻¹ · 10 ⁶]	Wärme- eindring- koeffizient [J m ⁻² s ^{-0,5} · K ⁻¹]
Asphalt	2,11	0,92	1,94	0,75	0,38	1205
Schwerbe- ton	2,40	0,88	2,11	1,51	0,72	1785
Lehmziegel	1,92	0,92	1,77	0,84	0,47	1220
Stahl	7,85	0,50	3,93	53,30	13,60	14475
Glas	2,48	0,67	1,66	0,74	0,44	1110
Lehmboden (40% Poren- vol., wasser- gesättigt)	2,00	1,55	3,10	1,58	0,51	2210
Lehmboden (40% Poren- vol., trocken)	1,60	0,89	1,42	0,25	0,18	600
Wasser 4°C, unbewegt	1,00	4,18	4,18	0,57	0,14	1545
Luft 10°C, unbewegt	0,0012	1,01	0,0012	0,025	20,50	5

Wie Tabelle 2 außerdem am Beispiel des nassen und trockenen Lehmbodens zeigt, unterscheiden sich die thermischen Eigenschaften des natürlichen Bodenkörpers in Abhängigkeit von seinem Wassergehalt. Wasser besitzt mit 4,18 J kg⁻¹ K⁻¹ · 10³ die größte spezifische Wärmekapazität aller Stoffe. Eine Erhöhung des Wassergehalts führt folglich immer zu einer Steigerung der spezifischen Wärmekapazität und der Wärmekapazitätsdichte des Bodens. Und auch die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit sowie der Wärmeeindringkoeffizient des Bodenkörpers hängen vom Wassergehalt ab. Dies liegt daran, dass Böden nicht aus einer festen Substanz, sondern aus Einzelpartikeln bestehen. Da die Luft in den Bo-

denporen Wärme nur sehr schlecht leitet, erfolgt die Wärmeübertragung an den Berührungsstellen der Partikel, deren Anzahl sich je nach Korngröße und Lagerung unterscheiden. Wasser steigert die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, da es im Vergleich zu Luft Wärme fast 30Mal besser leitet und zudem durch die Bildung von Wassermenisken zwischen den einzelnen Bodenpartikeln den Leitungsquerschnitt für die Wärmeübertragung vergrößert.

2.1.3 Atmosphärische Gegenstrahlung

Die atmosphärische Gegenstrahlung stammt von verschiedenen Gasen, die im langwelligen Spektrum Strahlung emittieren. Die Intensität der Strahlung hängt dabei von den Absorptionsspektren und den Konzentrationen der jeweiligen Gase ab.¹⁵ Im Mittel setzt sich die atmosphärische Gegenstrahlung folgendermaßen zusammen:¹⁶

▪ H ₂ O	62 %
▪ CO ₂	22 %
▪ O ₃ (bodennah)	7 %
▪ N ₂ O	4 %
▪ CH ₄	2,5 %
▪ Weitere	2,5 %

Da die Zusammensetzung der Luft weder räumlich noch zeitlich konstant ist, ändern sich, in Abhängigkeit von Quellen und Senken bestimmter Gase, auch die Beiträge dieser an der atmosphärischen Gegenstrahlung. Verglichen mit dem CO₂ und den genannten Spurengasen unterliegt die Strahlenemission des atmosphärischen Wasserdampfes aufgrund der größeren Variabilität des Wasserdampfanteils am Luftvolumen deutlich stärkeren Schwankungen.¹⁷ Tabelle 3 zeigt die Abhängigkeit der Gegenstrahlung von der relativen Luftfeuchtigkeit für verschiedene Ausstrahlungsverhältnisse.

Die besondere Relevanz des Wasserdampfes für die atmosphärische Gegenstrahlung ist auf sein Absorptionsspektrum zurückzuführen, das zu großen Teilen im gleichen Spektralbe-

¹⁵ Vgl.: MALBERG 2002, S. 48f

¹⁶ Vgl.: SCHÖNWIESE 2000, S. 337

¹⁷ Vgl.: HÄCKEL 1999, S. 183

reich wie das der nächtlichen langwelligen Ausstrahlung liegt.¹⁸ Eine wolkenfreie Atmosphäre mit geringem Wassergehalt ermöglicht folglich einen maximalen Energieverlust der Erdoberfläche über ihre langwellige Ausstrahlung. Bezüglich der verschiedenen Wetterlagen weisen Hochdruckgebiete, insbesondere die warmen Hochs wie das Azorenhoch, die beschriebenen Bedingungen für eine intensive Ausstrahlung auf.¹⁹

Tab. 3: Abhängigkeit der atmosphärischen Gegenstrahlung von der terrestrischen Ausstrahlung und der Luftfeuchtigkeit bei gegebener Oberflächen- und Lufttemperatur (nach HÄCKEL 1999)

Temperatur [°C]	Terrestrische Ausstrahlung [W/m ²]	Atmosphärische Gegenstrahlung [W/m ²] bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von:		
		30%	60%	90%
20	426	300	320	334
10	370	250	262	272
0	321	209	216	222
-10	276	175	180	183

Sowohl die städtische Wärmeinsel als auch die lokale Kaltluft sind nächtliche Phänomene. Wie in Gleichung (8) dargelegt wurde, setzt sich die gesamte nächtliche Strahlungsbilanz der Erdoberfläche aus der emittierten terrestrischen Wärmestrahlung und der diesen Betrag reduzierenden atmosphärischen Gegenstrahlung zusammen. Bei einer sehr geringen atmosphärischen Gegenstrahlung resultieren die nächtlichen Lufttemperaturen in zwei Metern über dem Grund folglich fast nur noch aus der unterschiedlichen Erwärmung der Luft an den angrenzenden Oberflächen.²⁰

¹⁸ Vgl.: MALBERG 2002, S. 47f

¹⁹ Vgl.: MALBERG 2002, S. 154

²⁰ Vgl.: HÄCKEL 1999, S. 185

2.2 Städtische Wärmeinsel

Das „Stadtklima“ ist ein anthropogener Klimatyp. Er wird maßgeblich von drei Faktoren verursacht, deren Wirkungen auf die unterschiedliche Flächennutzung von bebautem und unbebautem Gelände beruhen. Diese sind

- „die Umwandlung ursprünglich natürlichen Bodens in versiegelte, überwiegend aus künstlichen Materialien bestehende Flächen mit starker dreidimensionaler Strukturierung,
- die Reduzierung der mit Vegetation bestandenen Fläche und
- die Freisetzung von gasförmigen, festen und flüssigen Luftbeimengungen sowie von Abwärme aus technischen Prozessen.“²¹

Die genannten Veränderungen leisten verschiedene Beiträge zur Entwicklung des Stadtklimas. So erhöhen Gebäude die Rauigkeit der Erdoberfläche und verringern damit den bodennahen atmosphärischen Luftaustausch. Wie bereits in Kapitel 2.1.2 ausgeführt wurde, ändern sich mit den verschiedensten verbauten Materialien die thermischen Eigenschaften der Oberflächen und angrenzenden Körper. Außerdem erhöht die horizontale und vertikale Strukturierung des Baukörpers die für den Energie- und Strahlungsumsatz zur Verfügung stehende Fläche. Die großflächige Verdichtung und Versiegelung städtischer Oberflächen führt zu einer schnellen oberflächlichen Ableitung von Niederschlagswasser in die Kanalisation und verhindert die Versickerung des Wassers in den Boden. Das Evaporations- und Wasserspeichervermögen des Bodens wird folglich stark eingeschränkt und führt zusammen mit der städtischen Vegetationsarmut zu einer Erhöhung des sensiblen Wärmetransportes zu Lasten des latenten Wärmestromes. Der Einfluss der technischen Einrichtungen beruht im Wesentlichen auf Verbrennungsprozessen in Gewerbe- und Industrieanlagen, dem Hausbrand und dem Kraftfahrzeugverkehr.²² Im Zusammenspiel der einzelnen Beiträge entstehen die mikro- und mesoklimatischen Eigenheiten der Städte gegenüber ihrem Umland. Die Eigenschaften des Stadtklimas sind weltweit vergleichbar ausgeprägt, zeigen aber in Abhängigkeit von der wirtschaftlichen und infrastrukturellen Gestaltung einer Stadt Modifikationen in ihren Ausprägungen.²³

²¹ MALBERG 2002, S. 421

²² Vgl.: KUTTLER 1998, S. 127f

²³ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 141

2.2.1 Strahlungs- und Wärmehaushalt der Stadt

Die städtische Strahlungs- und Energiebilanz wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Städtische Luftbeimengungen verändern durch Streuung, Reflexion und Absorption die Globalstrahlung und die Stadt weist aufgrund ihrer dreidimensionalen Baukörperstruktur eine deutlich größere Strahlungsumsatzfläche als das unbebaute Umland auf. Das menschliche Leben in der Stadt wird darüber hinaus von einer Vielzahl von Verbrennungsprozessen begleitet, die als anthropogene Wärmeproduktion in die Bilanz eingehen. Außerdem führen die Verdichtung und Versiegelung des Bodens zu einer Erhöhung des sensiblen Wärmetransportes auf Kosten des latenten Wärmestromes.²⁴ Die Wirkung der einzelnen Parameter auf die städtische Energiebilanz und ihre Veränderungen gegenüber dem unbebauten Umland sollen im Folgenden erläutert werden.

2.2.1.1 Einfluss von Luftbeimengungen auf die Globalstrahlung

Eine verschmutzte Stadtatmosphäre verändert die Globalstrahlung auf zweierlei Weise. Zum einen verkleinert sie das Verhältnis von direkter zu indirekter Solarstrahlung und zum anderen schwächt sie die Globalstrahlung insgesamt. Letztere Wirkung ist aber nicht nur von der Konzentration der in der Luft enthaltenen Beimengungen und deren optischen Eigenschaften, sondern auch von der Zenitdistanz der Sonne abhängig. Das Wertespektrum des durchschnittlichen Strahlungsverlustes liegt – je nach Luftverschmutzung - bei 4 bis 20 Prozent im Vergleich zum Umland. Es treten allerdings deutliche Unterschiede zwischen den Jahreszeiten auf. So ist der Verlust im Sommer wegen des hohen Sonnenstandes und dem relativ geringeren Anteil an Luftbeimengungen im Mittel nur halb so groß wie im Winter. Außerdem können Emissions- oder Immissionsquellen über ihre Abluffahnen Relationen zu einzelnen Windrichtungen erzeugen.²⁵

2.2.1.2 Städtische Albedo

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 ausgeführt, ist die Ermittlung der städtischen Albedo wegen der Materialvielfalt und der dreidimensionalen Gestalt des Baukörpers nicht einfach. In

²⁴ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 131 und KUTTLER 2000, S. 435

²⁵ Vgl.: KUTTLER 2000, S. 436

jedem Fall hängt die Albedo der Oberflächen von deren Farben ab, wird aber darüber hinaus von den Expositionen der Flächen zur einfallenden Strahlung bestimmt. Diese sind wiederum von den wechselnden Sonnenständen im Tages- und Jahresverlauf abhängig. Das Spektrum der Albedowerte für städtische Oberflächen liegt bei rund 10 bis 30 Prozent und unterscheidet sich damit nur geringfügig von den Albedowerten natürlicher Oberflächen.²⁶

2.2.1.3 Horizontabschirmung und zusätzlichen Strahlungsumsatzflächen

Die dreidimensionale Gestalt des städtischen Baukörpers hat ebenfalls einen Einfluss auf den Strahlungshaushalt. Die eintreffende Strahlung wird in der Stadt nicht nur nach oben in die freie Atmosphäre reflektiert, sondern, je nach Exposition der Fläche zum Einfallswinkel, auch in andere Richtungen weitergeleitet. Dort stoßen die Strahlen erneut auf Flächen und bewirken einen zusätzlichen Energieumsatz.²⁷ Dieser Effekt macht sich nicht nur bei der Globalstrahlung, sondern auch bei der terrestrischen Ausstrahlung bemerkbar. Eine Verdeutlichung dieses Phänomens bietet Abbildung 1. Die Darstellung spiegelt den Vergleich der langwelligen Ausstrahlung von verschiedenen breiten Straßen mit unterschiedlich hoher Randbebauung. Während bei einer im Verhältnis zur Gebäudehöhe fünffach breiteren Straße die langwelligen Ausstrahlung nur um 10 Prozent reduziert wird, liegt die Minderung in städtischen Straßenschluchten, wo die Straße nur halb so breit wie die Randbebauung hoch ist, bei 72 Prozent. Die eingeschränkte Ausstrahlung in verdichteten Stadtteilen mit hoher Horizontüberhöhung verstärkt folglich die Ausbildung der Wärmeinsel.²⁸

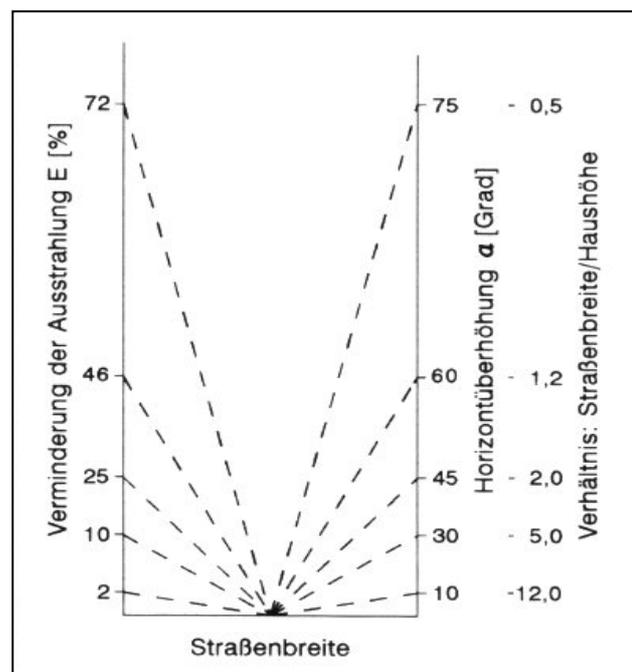


Abb. 1: Abhängigkeit der langwelligen Ausstrahlung von der Horizontüberhöhung durch Häuserfronten (aus Kuttler 1998)

²⁶ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 132

²⁷ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 132

²⁸ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 141

2.2.1.4 Bodenwärmefluss

In der städtischen Energiebilanz stellt der Bodenwärmefluss einen besonderen Parameter dar. Man versteht unter ihm nicht nur den Wärmefluss in den Untergrund, sondern auch den in die Gebäudemasse. Die hohen Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeitsfaktoren der städtischen Baumaterialien, wie Asphalt, Stahl und Beton, machen den Baukörper samt seines Untergrundes zu einem riesigen thermischen Speicher. Dieser heizt sich am Tag auf und gibt Energie über Nacht wieder ab. Dass der Bodenwärmefluss ein wesentlicher Faktor für die städtische Überwärmung ist, zeigt auch die enge Relation zwischen der horizontalen Ausdehnung der Bodenwärmeinsel und der bestehenden Baukörperstruktur.²⁹

2.2.1.5 Latente und sensible Wärmeströme

Die weitgehende Vegetationsarmut und der hohe Versiegelungsgrad der Stadt verändern das Verhältnis vom sensiblen zum latenten Wärmestrom im Vergleich zum unbebauten Umland. Niederschläge werden oberflächlich in die Kanalisation abgeleitet und dringen kaum mehr in den Boden ein. Somit steht in urbanen Gebieten deutlich weniger Wasser für die pflanzliche Transpiration und für die Verdunstung zur Verfügung als im Umland. Die nicht mehr für die energieaufwändige Wasserverdunstung eingesetzte Strahlungsenergie wird stattdessen in fühlbare Wärme umgesetzt. Sie heizt nun zusätzlich die Energieumsatzflächen auf und vergrößert dadurch deren Ausstrahlung, den turbulenten sensiblen Wärmefluss und den Bodenwärmefluss.³⁰

2.2.1.6 Anthropogene Wärmeproduktion

Die vom Menschen künstlich erzeugte Wärme wird von Kraftfahrzeugen, Industrieanlagen, Kraftwerken, dem Hausbrand und mancherorts auch von Klimaanlage freigesetzt. Wie Tabelle 4 veranschaulicht erreichen die Wärmeflussdichten dabei sehr unterschiedliche Werte und sind sowohl von der Einwohnerdichte als auch vom Pro-Kopf-Energieverbrauch abhängig. Die anthropogene Energieproduktion setzt in Großstädten in jedem Fall so viel Wärme frei, dass sie einen deutlichen Einfluss auf die Wärmebilanzen

²⁹ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 136f

³⁰ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 133f und KUTTLER 2000, S. 442ff

der jeweiligen Städte hat. So betrug die durch die anthropogene Wärmeproduktion zusätzlich freigesetzte Energie in Relation zur Strahlungsbilanz im Jahr 1970 in Vancouver mit 19 W/m² rund 33 Prozent und in Budapest mit 43 W/m² sogar fast 90 Prozent der dortigen durchschnittlichen Strahlungsbilanz.³¹ Der Vergleich der Berliner Werte von 1967 mit Werten aus dem Jahr 2000 zeigt einen deutlichen Anstieg des jährlichen Energieverbrauchs pro Kopf um fast 40 Prozent. Dass sich dieser Trend allerdings nicht in den Werten der flächenbezogenen anthropogenen Energieproduktion widerspiegelt, liegt in diesem Fall an den nicht identischen Bezugsflächen und den daraus resultierenden unterschiedlichen Einwohnerdichten. Die Stadt Münster fällt in Relation zu den Großstädten durch ihre deutlich geringere anthropogene Energieproduktion von 1,8 W/m² auf. Verglichen mit den im selben Jahr in Berlin erhobenen Werten resultiert sie zum einen aus dem deutlich geringeren Energieverbrauch pro Kopf, vor allem aber aus der viel geringeren Einwohnerdichte.

Tab. 4: Anthropogene Energieproduktion in ausgewählten Großstädten (nach OKE 1990, STADT MÜNSTER 2000, www.statistik-berlin.de 2003 und www.stadtentwicklung.berlin.de 2003, verändert)

Stadt [geograph. Breite]	Jahr	Einwohnerdichte [Einw./km ²]	Jährlicher Pro-Kopf-Verbrauch [MWh/Einw.]	anthropogene Energieproduktion [W/m ²]	mittlere Strahlungsbilanz [W/m ²]
Budapest (47° N)	1970	11500	32,8	43,0	46
Vancouver (49° N)	1970	5360	31,1	19,0	57
Berlin (West) (52° N)	1967	9830	18,6	20,9	57
Berlin (52° N)	2000	3792	26,0	11,3	keine Angabe
Münster (52° N)	2000	926	17,3	1,8	keine Angabe

³¹ Vgl.: OKE 1992, S. 276

2.2.1.7 Metabolische Wärmeproduktion

Der Mensch setzt bei einem „mittleren Aktivitätszustand“ etwa 200 Watt Leistung frei. Es liegt somit nahe, auch den durch den Stoffwechsel der Menschen geleisteten Beitrag zur Erwärmung der Stadt zu quantifizieren. In einer Großstadt mit einer Einwohnerdichte von 3000 Personen pro Quadratkilometer liegt der metabolisch erzeugte Energiebeitrag der Menschen bei 0,6 Watt pro Quadratmeter. Da dieser Betrag im Verhältnis zu den anderen in der Stadt auftretenden Energieflussdichten, wie der anthropogenen Energieproduktion oder der Strahlungsbilanz, sehr klein ist, kann er in der Bilanz vernachlässigt werden.³² Für die Stadt Münster, deren Einwohnerdichte mit 926 Personen pro Quadratkilometer (Stand 30.06.2000)³³ noch geringer ausfällt, ergibt sich ein Beitrag metabolisch erzeugter Energie von rund 0,2 Watt pro Quadratmeter.

2.2.2 Ausprägungen der städtischen Überwärmung

Städte weisen aufgrund der beschriebenen Veränderungen der urbanen Strahlungs- und Energiebilanz höhere Lufttemperaturen als das sie umgebende Umland auf. Diese Überwärmung wird vor allem nachts während autochthoner Wetterlagen mit Windarmut und hoher Ein- und Ausstrahlung deutlich. Bei allochthonem Wetter mit Bewölkung, höheren Windgeschwindigkeiten und dem Auftreten von Niederschlägen lassen sich diese stadtypischen Klimamodifikationen kaum nachweisen.³⁴

Die genaue Erfassung der thermischen Unterschiede erfolgt über den räumlichen und zeitlichen Vergleich von Erwärmungs- und Abkühlungsraten verschiedener Standorte. Hierzu werden die Luft- bzw. die Oberflächentemperaturen gemessen.³⁵

2.2.2.1 Räumliche Differenzierung

In ihrer horizontalen Ausdehnung zeigt die anhand von Oberflächentemperaturen ermittelte Bodenwärmeinsel eine enge Bindung an die Baukörperstruktur. Misst man hingegen die

³² Vgl.: KUTTLER 2000, S. 438f

³³ <http://www.muenster.de/stadt/exwest/portrait.html>

³⁴ Vgl.: KUTTLER 2000, S. 441ff

³⁵ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 136f

Lufttemperatur in einer Höhe von zwei Metern über dem Grund, ist die Deckungsgleichheit der so genannten Wärmeinsel der Stadthindernisschicht mit dem Baukörper aufgrund der auch bei austauscharmen Strahlungswetterlagen auftretenden Schwachwinde nicht mehr unbedingt gegeben. Eine Warmluftfahne kann dann ein eigentlich kühleres Areal und der Zufluss von lokaler Kaltluft ein wärmeres Gebiet thermisch überprägen. Der turbulente Fluss von latenter und sensibler Wärme aus der Stadthindernisschicht in die über dem Baukörper befindliche Luftschicht, der Stadtgrenzschicht, erzeugt eine dritte Form der städtischen Wärmeinsel. Diese ragt bereits so hoch in die Atmosphäre, dass sie in der Regel vom übergeordneten Wind erfasst und als Wärme- und Abluftfahne mehrere Kilometer weit ins Umland verdriftet wird.³⁶

2.2.2.2 Zeitliche Differenzierung

Im zeitlichen Verlauf lassen sich ein Tagesgang und ein Jahresgang der Wärmeinselintensität feststellen. Zur Veranschaulichung des in Abbildung 2 dargestellten Tagesverlaufs der bodennahen Stadt- und Umlandlufttemperaturen soll ein Strahlungstag mit idealen Bedingungen zur Erzeugung einer ausgeprägten Wärmeinsel angenommen werden.

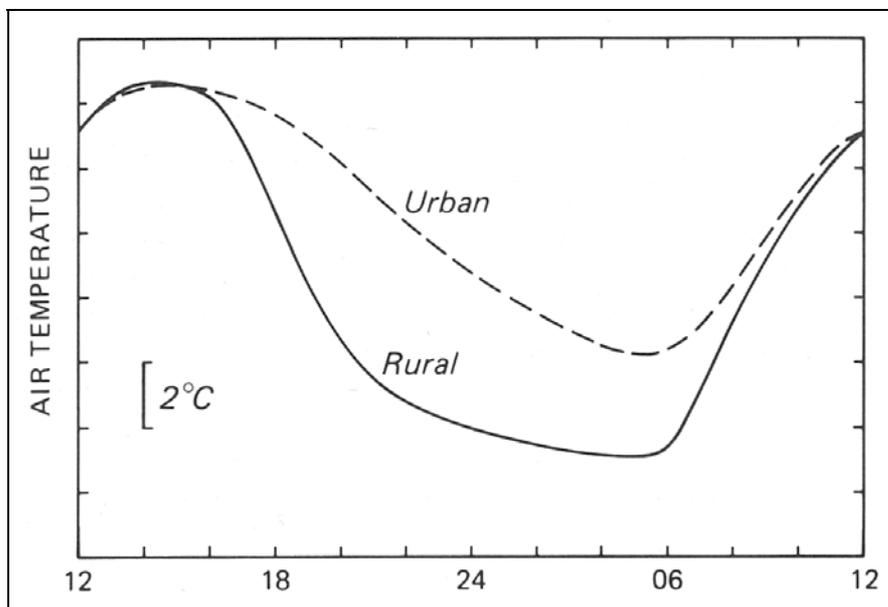


Abb. 2: Typischer Tagesverlauf der Erwärmungs- und Abkühlungsraten der Lufttemperatur in der Stadt und im Umland bei sommerlichem Strahlungswetter (nach OKE 1992, verändert)

³⁶ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 136f und KUTTLER 2000, S. 443

Während die Stadt und das Umland zur Zeit des Temperaturmaximums am frühen Nachmittag weitgehend gleiche Lufttemperaturen zeigen, kühlt sich der Baukörper wegen seiner thermischen Speichereigenschaften nachmittags, abends und nachts viel langsamer ab als das Freiland. Die Freisetzung der sensiblen Wärmeströme in der Stadt und der verminderte Luftaustausch in Strahlungs Nächten führen zu einer deutlichen Überwärmung der Stadt gegenüber ihrem Umland. Die jeweiligen Minimumtemperaturen werden kurz nach Sonnenaufgang erreicht. Am Morgen erwärmt sich das Umland dann schneller als die thermisch trägere Baumasse der Stadt. Beide erreichen am frühen Nachmittag, unterstützt durch die bei solarer Einstrahlung auftretenden turbulenten Austauschvorgänge, wieder ein annähernd gleiches Temperaturmaximum.³⁷

Bezüglich des Jahresgangs ist die abends, nachts und frühmorgens auftretende städtische Überwärmung im Sommer deutlich stärker ausgeprägt als im Winter.³⁸ Dies liegt zum einen an der höheren Intensität der solaren Einstrahlung im Sommer und zum anderen an der längeren Dauer der Einstrahlung als im Winter. In Münster pendelt die Tageslänge zwischen 16,75 Stunden zur Sommersonnenwende und 7,75 Stunden zur Wintersonnenwende³⁹ und die extraterrestrische Sonnenstrahlung ändert ihre Intensität entsprechend von 484,6 W/m² am 21. Juni auf 73,0 W/m² am 21. Dezember.⁴⁰ Die städtische Wärmeinsel ist somit ein Phänomen, das sich am deutlichsten in sommerlichen Strahlungsnächten zeigt.

2.2.2.3 Einfluss der Stadtgröße

Neben den bereits behandelten Parametern der Strahlungs- und Energiebilanz beeinflusst auch die Größe einer Stadt die Höhe ihrer maximalen Überwärmung gegenüber dem Umland. OKE hat ein Modell zur Berechnung der Wärmeinselintensität aus der Stadtgröße entwickelt. Wie Abbildung 3 veranschaulicht, geht er von einem steilen Anstieg der Lufttemperatur um bis zu vier Kelvin innerhalb eines 1000 Meter breiten Bereichs am Stadtrand aus. An dieses „Cliff“ schließt sich laut seiner Ansicht das „Plateau“ mit einer konti-

³⁷ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 137ff und KUTTLER 2000, S. 444ff

³⁸ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 140 und KUTTLER 2000, S. 446f

³⁹ Vgl.: <http://lexikon.astronomie.info/java/astrojava.html>

⁴⁰ Vgl.: VAN EIMERN 1984, S. 258

nuierlichen, aber schwächeren Erhöhung der Lufttemperatur bis zum „Peak“, dem Wärmezentrum, an.⁴¹

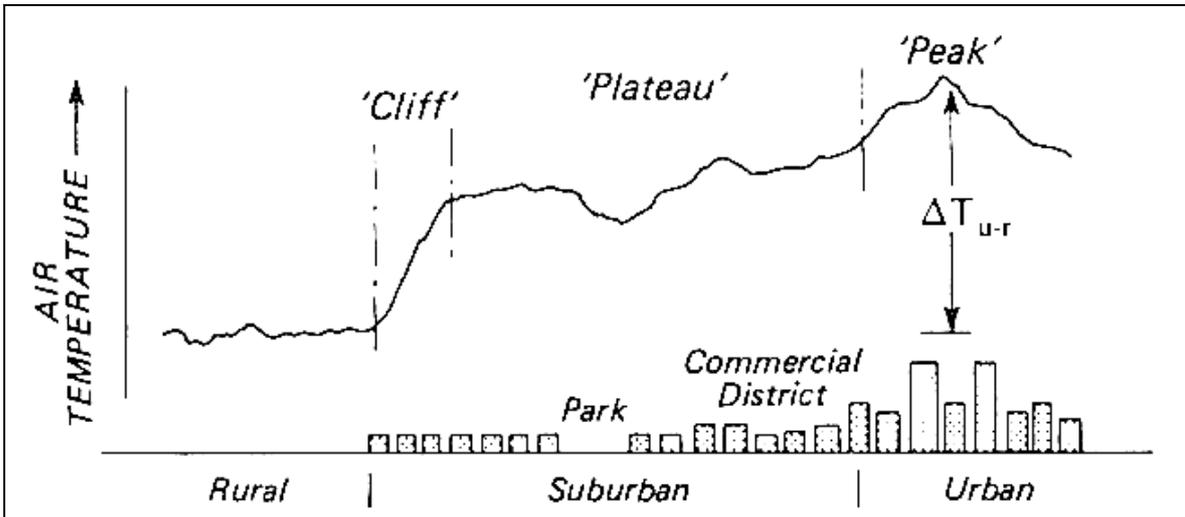


Abb. 3: Querschnitt durch eine typische städtische Wärmeinsel (aus Oke 1992)

Einen Überblick über den Zusammenhang zwischen der Größe einer Stadt und ihrer maximalen Wärmeinselintensität gibt Abbildung 4. Dargestellt sind die ermittelten maximalen Überwärmungen unterschiedlich großer Städte in den Untersuchungsräumen Nordamerika, Westeuropa und Westjapan in Relation zu ihrer jeweiligen Stadtgröße. Die Stadtgröße wurde anhand ihrer Einwohnerzahl bestimmt.

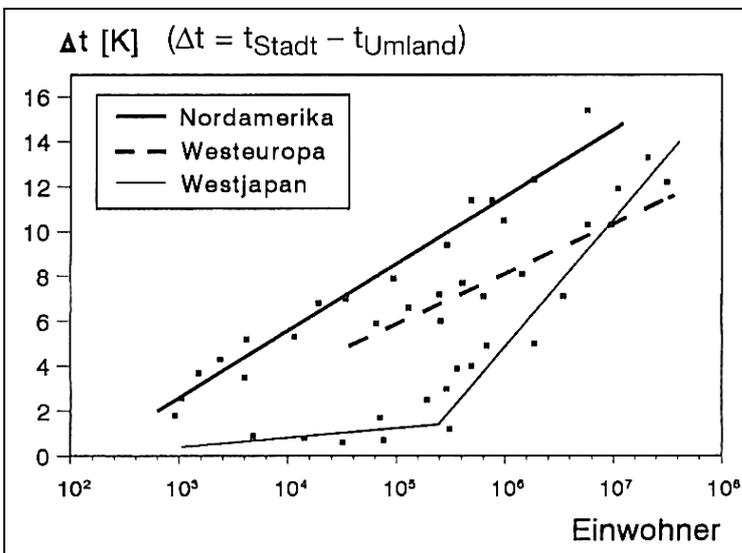


Abb. 4: Verhältnis der Wärmeinselintensität zur Einwohnerzahl von Siedlungen (aus BUSCH 1990)

⁴¹ Vgl.: OKE 1992, S. 288f

Es ist zu erkennen, dass innerhalb der einzelnen Untersuchungsräume ein linearer Zusammenhang zwischen der Größe einer Stadt und ihrer Wärmeinselintensität besteht, wobei sich die Erwärmungsraten pro Einwohner allerdings deutlich unterscheiden. So weisen nordamerikanische Millionenstädte eine positive Temperaturanomale gegenüber ihrem Umland von maximal 12 K auf, während gleich große Städte in Europa 8 K und in Japan lediglich 5 K erreichen. Die wesentlichen Gründe für diese Differenzen sind die unterschiedlichen Stadt- und Gebäudestrukturen und das unterschiedliche Energieverbrauchsverhalten der jeweiligen Bevölkerung.⁴²

2.3 Lokale Kaltluft

Als lokale Kaltluft bezeichnet man bodennahe Luft, die kälter als die Atmosphäre ihrer Umgebung ist. Für ihre Bildung sind eine negative Strahlungsbilanz der Erdoberfläche und Windarmut, um eine Vermischung der abgekühlten Luft mit wärmerer zu verhindern, notwendig. Solche Voraussetzungen finden sich vor allem in Strahlungsnächten während ausgeprägter Hochdruckwetterlagen,⁴³ in denen, wie bereits beschrieben, auch die städtische Überwärmung besonders intensiv auftritt. Im Gegensatz zur städtischen Wärmeinsel, die den Unterschied der Lufttemperaturen zwischen Stadt und Umland charakterisiert, stellt das Phänomen lokaler Kaltluft eine Temperaturanomale innerhalb des unbebauten Freilands dar.

Ein Kaltluftpaket kann durch die Größe des abgekühlten Luftvolumens und durch die erreichte Untertemperatur gegenüber einem Referenzwert charakterisiert werden. Es existieren allerdings keine Schwellenwerte, mit deren Hilfe eine exakte Definition von Qualität und Quantität lokaler Kaltluft vorgenommen werden könnten.⁴⁴ Neben den meteorologischen Verhältnissen und den thermischen Eigenschaften des die Strahlungsumsatzfläche bildenden Materials beeinflussen die Geländeform und -exposition die Entstehung und den Abfluss von lokaler Kaltluft. Im Rahmen der Stadtklimatologie und der Betrachtung der städtischen Überwärmung gegenüber dem Umland kommt dem Phänomen lokale Kaltluft eine besondere Bedeutung zu. Denn durch den Zustrom von sauberer Kaltluft kann die

⁴² vgl.: BUSCH 1990, S. 69f

⁴³ vgl.: MALBERG 2002, S. 154

⁴⁴ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2003, S. 10

überhitzte Stadt sowohl thermisch als auch lufthygienisch entlastet werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die lokale Kaltluft vereinfacht als Kaltluft bezeichnet.

2.3.1 Entstehung von Kaltluft

Die Entstehung von Kaltluft über natürlichen Oberflächen hängt von der Exposition der Geländeoberfläche zur einfallenden Strahlung sowie von deren Farbe und den thermischen Stoffeigenschaften des Bodensubstrates ab. Wie Tabelle 1 zeigt, liegen die Albedowerte verschiedener Bodenoberflächen zwischen sieben und 45 Prozent, woraus eine Strahlungsabsorption von 93 bis 55 Prozent resultiert. Eine Bedeckung des Bodens mit Vegetation, Laubstreu oder auch Schnee kann das Absorptionsvermögen der Erdoberfläche hingegen immens ändern.⁴⁵

Die thermischen Eigenschaften des Bodens werden vor allem durch die Art und den Zustand des Bodensubstrates bestimmt. Tabelle 2 veranschaulicht den Einfluss der Parameter Dichte, Porenvolumen sowie des Luft- und Wassergehalts auf die Wärmekapazitätsdichte und den Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten des Bodenkörpers. Da die Wärmespeicher- und Wärmeleitfähigkeit und damit der Bodenwärmestrom und die nächtliche langwellige Ausstrahlung sowohl bei einer geringeren Dichte als auch mit einer Verringerung des Wassergehalts von Böden sinken, ist die Kaltluftentstehung über trockenen Böden mit hohem Porenvolumen gut, während sie über trockenen verdichteten Böden nicht stattfindet. Bezüglich feuchter Böden sind die Verhältnisse etwas komplizierter. Ein höherer Wassergehalt vergrößert zwar den Bodenwärmestrom, allerdings verliert die Oberfläche solcher Böden über den latenten Wärmefluss Energie. Das Absinken der Lufttemperatur über feuchten Böden hängt somit von der Abkühlung der Bodenoberfläche durch die Verdunstung von Bodenwasser ab und ist mit der Aufnahme des verdunsteten Wassers in das Luftpaket verbunden.⁴⁶ Neben all diesen physikalischen Eigenschaften hat auch die nächtliche Dauer der terrestrischen Ausstrahlung, die in Münster zwischen 7,25 Stunden zur Sommersonnenwende Sommer und 16,25 Stunden zur Wintersonnenwende pendelt, einen beachtlichen Einfluss auf die Kaltluftproduktion.⁴⁷

⁴⁵ Vgl.: SCHEFFER 1998, S. 226f

⁴⁶ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2003, S. 23f

⁴⁷ Vgl.: <http://lexikon.astronomie.info/java/astrojava.html>

2.3.2 Kaltluftabfluss

Im Vergleich zur wärmeren Umgebungsluft entwickelt ein kaltes Luftpaket während seiner Abkühlung neben dem thermischen Unterschied auch eine größere Dichte und wird damit schwerer als diese. Unter dem Einfluss der Schwerkraft fließt Kaltluft folglich den tiefsten Stellen eines Geländes zu.

Das Relief eines Untersuchungsraumes gibt damit schon Hinweise, wo und in welche Richtungen Kaltluftflüsse zu erwarten sind. So stellen Rinnen und Täler mit Gefälle oft Kaltluftleitbahnen dar, während sich in tiefer liegenden konkaven Geländeteilen die Kaltluft sammeln und Kaltluftseen entstehen können. Bezogen auf einen Wirkungsraum, wie zum Beispiel eine Siedlung, lassen sich Kaltlufteinzugsgebiete bestimmen. Definitionsgemäß umfassen sie ausschließlich diejenigen Kaltluftentstehungsgebiete, die für den betrachteten Standort von Bedeutung sind.⁴⁸

Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft hängt von der Neigung und der Rauigkeit der Oberfläche ab. Gebäude und Dämme stellen ebenso wie Hecken und Bäume Strömungshindernisse dar. Während erstere einen Kaltluftstau verursachen und mit zunehmender Dicke der Kaltluftschicht um- bzw. überströmt werden können, führen Baumgruppen und Hecken bei ihrer Durchströmung zu einer Änderung der Strömungscharakteristika. Diese äußern sich in der Verringerung des bodennahen Volumenstroms oder einer horizontalen und vertikalen Verlagerung des Strömungsmaximums. Die Reichweite der Störungen in Lee hängen von der Größe und Form der Hindernisse sowie von der Strömungsmächtigkeit, der Geschwindigkeit und dem Turbulenzgrad der Kaltluft ab.⁴⁹

Entsteht die Kaltluft über natürlichen Flächen wie Wiesen, Äckern und Wäldern, so weist sie in der Regel keine über das Maß der lufthygienischen Hintergrundbelastung hinausgehenden unerwünschten Luftbeimengungen auf. Diese treten erst auf, wenn im Laufe des Abflusses der Luft diese über Emissionsquellen driftet. Da Kaltluftmassen in der Regel eine stabile bodennahe Schichtung mit geringer turbulenter Durchmischung aufweisen, werden emittierte Schadstoffe kaum verdünnt mittransportiert. Der horizontale Transport dieser Stoffe ist dabei an die maximale Reichweite der Kaltluft gekoppelt und kann mehrere Kilometer betragen. In die Kaltluftmasse eines Kaltlufteinzugsgebiets hineinragende Emissionsquellen, wie landwirtschaftliche und gewerbliche Betriebe, Kfz-Verkehr und

⁴⁸ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2003, S. 18f

⁴⁹ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2003, S. 18f

Hausbrand aber auch Deponien und Kompostierungsanlagen, haben folglich einen wesentlichen Einfluss auf die lufthygienische Situation der abfließenden Kaltluft.⁵⁰

2.3.3 Wirkung von Kaltluft auf einen Standort

Ob die Kaltluft einen positiven oder negativen Effekt auf den Wirkungsraum ausübt, hängt von dessen aktueller Situation, die tages- oder jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen sein kann, und den lufthygienischen und klimatologischen Erfordernissen ab. Der Zufluss sauberer Kaltluft kann einen Wirkungsraum durch den Abtransport bzw. die Verdünnung vorhandener Abluft lufthygienisch entlasten. Außerdem kann die Abkühlung einen thermischen Ausgleich bei Hitzestress bewirken. Umgekehrt kann der Zufluss von Kaltluft auch unerwünscht sein, wenn er Emissionen mitführt oder die verstärkte Abkühlung zu Kältestress für Menschen und Kulturpflanzen führt. Wie die Kaltluft zu bewerten ist, hängt somit von dem Zustand der Kaltluft und von den Eigenschaften des Wirkungsraumes ab.⁵¹

2.4 Bedeutung des Stadtklimas für den Menschen

2.4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Raum ist ein begrenztes Gut, dessen Nutzung prinzipiell auf Interessengegensätze stößt. Die zentralen Aufgaben der Raumordnung sind dem entsprechend die Abstimmung der unterschiedlichen Anforderungen an den Raum sowie die vorsorgliche Sicherung einzelner Raumnutzungen und Raumfunktionen. Unter der Leitvorstellung einer nachhaltigen Raumentwicklung will die Raumordnung die wirtschaftlichen und sozialen Anforderungen an den Raum mit seinen ökologischen Funktionen in Einklang bringen.⁵²

Bezüglich des Interessenkonflikts der Flächennutzung für die Siedlungsentwicklung und der Sicherung bzw. Entwicklung von Freiräumen „in ihrer Bedeutung für funktionsfähige Böden, für den Wasserhaushalt, die Tier- und Pflanzenwelt, sowie das Klima“⁵³ stellt das Raumordnungsgesetz (ROG) die Freiräume nicht unter einem absoluten Schutz, sondern

⁵⁰ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2003, S. 37f

⁵¹ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2003, S. 49f

⁵² Vgl.: STÜER 2001, Raumordnungsgesetz § 1

⁵³ STÜER 2001, Raumordnungsgesetz § 2 Abs. 3

bestimmt, dass „wirtschaftliche und soziale Nutzungen des Freiraumes [...] unter Beachtung seiner ökologischen Funktionen“⁵⁴ zu gewährleisten sind. Die Siedlungsentwicklung, mit ihren Zielen der Verbesserung der Standortbedingungen für die Wirtschaft, der Versorgung der Bevölkerung mit Wohnraum und der infrastrukturellen Entwicklung, soll sich allerdings zur Sicherung der Freiräume auf ein System leistungsfähiger zentraler Orte ausrichten und konzentrieren. Darüber hinaus weist das ROG ausdrücklich darauf hin Umweltbelastungen abzubauen und die Reinhaltung der Luft sicherzustellen.⁵⁵

Während das ROG die Raumnutzung als Rahmengesetz recht allgemein regelt, wird das Baugesetzbuch (BauGB) konkreter. Es bezeichnet zum Beispiel das Wohl der Allgemeinheit als ein Planungsziel. Hierzu sollen die Bauleitpläne „die allgemeinen Anforderungen an gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse und die Sicherheit der Wohn- und Arbeitsbevölkerung“⁵⁶ beachten. Außerdem müssen Einflüsse eines Vorhabens auf die Schutzgüter „Menschen, Tiere und Pflanzen, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft, Kulturgüter und sonstige Sachgüter“⁵⁷ ermittelt und in den Entscheidungsprozessen berücksichtigt werden.

Die Möglichkeiten der Planung und Abwägung haben allerdings Grenzen, denn „auch die beste Planung kann nicht verhindern, dass aus einem natürlichen Klima nach einer Bebauung ein Siedlungsklima entsteht.“⁵⁸

2.4.2 Human-biometeorologischer Wirkungskomplex

Das Klima hat über seine Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, und Windgeschwindigkeit sowie lang- und kurzweiliger Strahlung einen gesundheitlich relevanten Einfluss auf den Wärmehaushalt des Menschen. Dieser wurde in epidemiologischen Morbiditäts- und Mortalitätsstudien in Baden-Württemberg vor allem während sommerlicher Hitzeperioden

⁵⁴ STÜER 2001, Raumordnungsgesetz § 2 Abs. 3

⁵⁵ Vgl.: STÜER 2001, Raumordnungsgesetz § 2

⁵⁶ STÜER 2001, Baugesetzbuch § 1

⁵⁷ STÜER 2001, Baugesetzbuch § 1a Abs. 2

⁵⁸ FEZER 1995, S. 128

nachgewiesen.⁵⁹ Unter diesem Gesichtspunkt beschreiben die genannten Einflussgrößen die human-biometeorologische Situation eines Standortes.⁶⁰

Der Mensch kann die Kerntemperatur seines Körpers sowohl bei schwankenden thermischen Umgebungsbedingungen als auch bei unterschiedlicher eigener Wärmeproduktion innerhalb eines geringen Spektrums konstant halten. Hierzu laufen autonome chemische und physikalische Regulationsmechanismen ab. Befindet er sich in einer thermisch unbehaglichen Situation, so kann der Mensch die Regulierung seiner Körpertemperatur außerdem durch angepasstes Verhalten unterstützen.⁶¹ Die schädliche Wirkung von thermischem Stress liegt unter anderem an der engen Vernetzung der menschlichen Thermo- und Kreislaufregulation.⁶² Allerdings empfinden verschiedene Personen die gleichen Klimabedingungen als unterschiedlich komfortabel und auch das individuelle Behaglichkeitsempfinden kann sich von Tag zu Tag ändern.⁶³ Eine allgemeingültige Aussage über das thermische Wohlbefinden kann folglich nur als Mittelwert für eine große Menge von Menschen gemacht werden.

Zur Bewertung des human-bioklimatischen Wirkungskomplexes wurden verschiedene Modelle entwickelt. An dieser Stelle sollen die Bewertungsindizes „Predicted Mean Vote“ PMV sowie „Physiological Equivalent Temperature“ PET vorgestellt werden. Laut den Erfahrungen dieser Untersuchungen stellt sich für einen ruhig in einem Innenraum sitzenden Menschen, der eine übliche Innenraumbekleidung trägt, eine optimale thermische Behaglichkeit bei folgenden klimatischen Parametern ein:

- Die mittlere Strahlungstemperatur entspricht der Lufttemperatur,
- die Windgeschwindigkeit beträgt 0,1 m/s und
- der Wasserdampfdruck liegt bei 12 hPa.⁶⁴

Der PMV stellt das thermische Behaglichkeitsempfinden auf einer psycho-physischen Skala dar. Zu seiner Bestimmung wurden die Wärmebilanzen für 1300 Personen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wärmeisolation der Kleidung und der Körperaktivität berechnet. Außerdem wurden die Wärmehaushalte der Personen in einer Klimakammer

⁵⁹ Vgl.: JENDRITZKY 1997, S. 49

⁶⁰ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 1996, S. 3

⁶¹ Vgl.: JENDRITZKY 1990, S. 10

⁶² Vgl.: http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Medizin/Leistungen/Bioklimatische_Bewertung.htm

⁶³ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 1996, S. 3f

⁶⁴ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 1996, S. 9

durch Veränderungen der Parameter Lufttemperatur, Wasserdampfdruck, Windgeschwindigkeit bzw. mittlere Strahlungstemperatur in eine unausgeglichene Bilanz gebracht. Das jeweilige subjektive Behaglichkeitsempfinden wurde dabei registriert und als empirischer Faktor in die Berechnung des PMV integriert. Die Skala des PMV, wie sie in Tabelle 5 dargestellt ist, stellt dem entsprechend die durchschnittliche thermische Belastungsempfindung einer größeren Bevölkerungsgruppe dar.⁶⁵

Tab. 5: Bewertungsindizes PMV und PET bei gleicher thermophysiologicaler Belastung (nach VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 1996)

PMV	PET in °C	thermisches Empfinden	thermophysiologicalische Belastungsstufe
3,5	41	sehr heiß	extreme Wärmebelastung
		heiß	starke Wärmebelastung
2,5	35	warm	mäßige Wärmebelastung
		leicht warm	schwache Wärmebelastung
1,5	29	behaglich	keine thermische Belastung
		leicht kühl	schwache Kältebelastung
0,5	23	kühl	mäßige Kältebelastung
		kalt	starke Kältebelastung
-0,5	18	sehr kalt	extreme Kältebelastung
-1,5	13		
-2,5	8		
-3,5	4		

Der in Tabelle 5 ebenfalls aufgelistete Bewertungsindex PET ist aus dem Münchener Energie-Bilanz Modell für Individuen (MEMI) abgeleitet.⁶⁶ Im Gegensatz zum Predicted Mean Vote ermöglicht die diesem Index zugrunde liegende Modellrechnung die jeweiligen Beiträge der meteorologischen Parameter auf das Behaglichkeitsempfinden genau zu quantifizieren. So lässt sich auch der Einfluss lokaler Kaltluft auf die Bewohner eines überwärmten Wirkungsraumes analysieren.

Unter den Voraussetzungen einer wolkenlosen Strahlungsnacht, in der die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung in der human-biometeorologisch relevanten Höhe von 1,1

⁶⁵ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 1996, S. 7

⁶⁶ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2003, S. 39f

m über dem Boden näherungsweise gleich der Lufttemperatur ist, resultiert aus folgenden Änderungen der meteorologischen Parameter eine Verringerung der PET um 1,0 K:

- Lufttemperatur: Abkühlung um 0,9 K
- Windgeschwindigkeit: Zunahme um 0,9 m/s (im Bereich unter 1,0 m/s) bzw.
Zunahme um 1,3 m/s (im Bereich 1,0 m/s bis 3,0 m/s)
- Wasserdampfdruck: Abnahme um 2,8 hPa⁶⁷

Bezüglich der Frage nach der human-biometeorologischen Wirkung von Kaltluft sind die einzelnen Parameter unterschiedlich zu bewerten. Dem Wasserdampfdruck kommt kaum eine Bedeutung zu, da eine Amplitude von rund 3 hPa bereits den durchschnittlichen Änderungsbetrag eines sommerlichen Tagesgangs darstellt.⁶⁸ Und auch die Windgeschwindigkeit leistet in den angenommenen Strahlungs Nächten nur einen kleinen Beitrag. Dies liegt daran, dass sich stabile Kaltluftschichten überhaupt erst bei schwachem oder nicht vorhandenem Gradientwind bilden. Mit kaltlufttypischen Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 bis 3 Metern pro Sekunde verringern sie die PET um maximal drei Kelvin.⁶⁹ Der größte Einfluss auf die PET resultiert aus dem Temperaturunterschied zwischen warmer Stadtluft und zufließender Kaltluft. Bereits ab einer Differenz von 2,7 Kelvin übersteigt die Wirkung der Lufttemperatur den maximalen Beitrag der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft. Solche Unterschiede können in Deutschland schon bei Siedlungen mit zehntausend Einwohnern auftreten und, je nach Größe der Stadt, auf bis zu 12 Kelvin ansteigen.⁷⁰

⁶⁷ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2003, S. 39f

⁶⁸ Vgl.: KRAUS 2000, S. 98 und: SCHÖNWIESE 2000, S. 331

⁶⁹ Vgl.: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2003, S. 33f

⁷⁰ Vgl.: SCHÖNWIESE 2000, S. 330

3 Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit umfasst die inneren Stadtteile Münsters und das sie umgebende Umland bis zu den Außenstadtteilen.

3.1 Geographische Lage und klimatische Exposition

Münster liegt auf 52° nördlicher Breite im Nordwesten der Bundesrepublik Deutschland und damit im Feuchtklima der kühlgemäßigten Mittelbreiten. Der für diesen Bereich typische ständige Wechsel von kurzen Schlechtwetterabschnitten und mehrtägigen Schönwetterperioden prägt auch das Wetter in Münster.⁷¹ Wegen der geringen Entfernung zur Nordseeküste treffen die atlantischen Tiefdrucksysteme meist kaum abgeschwächt auf die Stadt. Doch auch subtropische Luftmassen stoßen aus Südwesten bis nach Münster vor. Münster weist dem entsprechend ein hohes Maß an Luftbewegung und nur selten Windstille auf.⁷² Niederschläge fallen im ganzen Jahr. Bei einer mittleren Jahresniederschlagssumme von 743 mm regnet es im Februar am wenigsten, während von Juni bis August die meisten Niederschläge verzeichnet werden. Die Sonne scheint in Münster durchschnittlich 1526 Stunden im Jahr. Mit jeweils knapp 200 Sonnenstunden steuern die Monate Mai bis August schon über 50 Prozent zur Jahresbilanz bei.⁷³ Im Mittel beschert das atlantisch geprägte Klima der Stadt kühle Sommer und milde Winter.

3.2 Topographie

Das Relief des 302 km² großen Stadtgebiets von Münster ist, wie Abbildung 5 zeigt, nur schwach ausgeprägt. Die größte Erhebung erreicht mit 97 m ü.NN der Mühlenberg in den Vorbergshügeln bei Nienberge. Dort ragt der Altenberger Höhenzug noch auf einer Länge von rund zwei Kilometern in das Stadtgebiet hinein. Das Minimum von 43 m ü.NN findet sich im nordöstlichen Stadtgebiet in der Talaue der Ems. Unter Berücksichtigung der Vorbergshügel weist das Stadtgebiet eine maximale Höhendifferenz von 54 Metern auf. Ohne

⁷¹ Vgl.: LAUER 1993, S. 164

⁷² Vgl.: STADT MÜNSTER 1992, S. 14

⁷³ Vgl.: MILDENBERGER 2003

die nur kleinräumig auftretenden Hügel reduziert sich der Unterschied auf rund 30 Meter zwischen dem so genannten Roxeler Riedel und der Emsaue.⁷⁴

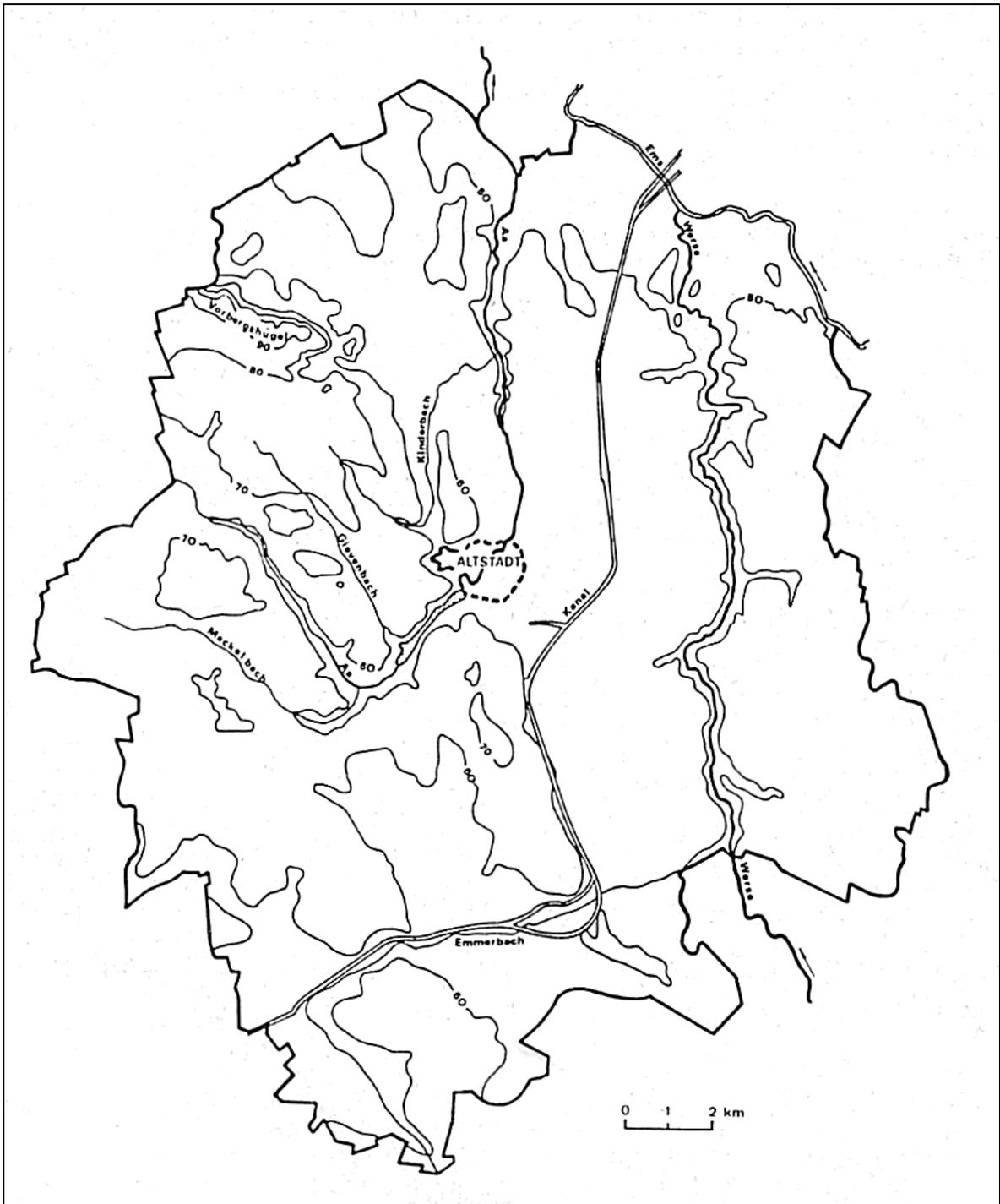


Abb. 5: Relief des Stadtgebiets Münster und wichtigste Wasserläufe (aus STADT MÜNSTER 1992)

⁷⁴ Vgl.: STADT MÜNSTER 1992, S. 10f

Bei dem im westlichen Stadtgebiet befindlichen Roxeler Riedel handelt es sich um eine zwischen 60 und 70 Meter über NN befindliche Fläche, die von drei parallel zueinander von Nordwest nach Südost verlaufenden muldenförmigen Bachtälern zerschnitten wird. Die Täler münden wiederum in eine von Südwesten nach Nordosten auf das Stadtzentrum weisende Niederung. In dieser verbinden sich der im Süden fließende Meckelbach und die in der Mitte strömende Aa und münden ebenso wie der nördlich fließende Gievenbach in den die Niederung zu großen Teilen ausfüllenden Aasee. Der Spiegel des Aasees liegt bei 53,8 m ü.NN. Der Kinderbach durchfließt ein viertes weiter nordöstlich liegendes Tal des Roxeler Riedels. Auch diese Senke verläuft von Nordwest nach Südost. Doch im Unterschied zu den drei anderen genannten Gewässern biegt der Kinderbach noch vor Erreichen des Geestrückens nach Norden um, umfließt die Barriere und mündet rund 4,5 km weiter nördlich in die Aa.⁷⁵

Die Osthälfte des Stadtgebietes wird von einer Niederung eingenommen. Sie senkt sich von Höhen um 55mNN im Süden auf rund 45 m ü.NN im Norden ab. Entwässert wird die Niederung von der stark mäandrierenden Werse. Bereits bei ihrem Eintritt in das südöstliche Stadtgebiet nimmt die Werse den Emmerbach auf, der das ebenfalls recht ebene südliche Stadtgebiet durchzieht. Auf ihrem weiteren Verlauf nach Norden fließen der Werse von Westen und Osten noch weitere Wasserrinnen und Nebenbäche zu. Kurz vor der nördlichen Grenze des Stadtgebietes mündet sie in die Ems.⁷⁶ Ein weiteres Reliefelement im südlichen und östlichen Stadtgebiet ist der mehrere Meter hohe und nur durch einige Straßenunterquerungen unterbrochene Eisenbahndamm der Güterumgehungsstrecke.

3.3 Stadtstruktur

Im Stadtgebiet lassen sich als bebaute Areale ein Innenstadtbereich und ein Ring mehrerer Randzentren erkennen. Letztere sind zum Teil durch mehr oder weniger breite Grünstreifen vom Innenstadtbereich getrennt. Bei manchen Stadtteilen wie Gievenbeck, Mecklenbeck oder Gremmendorf lässt sich aber auch schon ein Zusammenwachsen mit dem inneren Stadtbereich erkennen.⁷⁷

⁷⁵ Vgl.: STADT MÜNSTER 1992, S. 11

⁷⁶ Vgl.: STADT MÜNSTER 1992, S. 11

⁷⁷ Vgl.: STADT MÜNSTER 2001, S. 29 und S. 35

Münster weist innerhalb des von der Promenade eingeschlossenen Bereichs eine sehr dichte Bebauung mit mehrstöckigen Gebäuden auf. Daran schließt bis zum Ringstraßensystem eine dicht bebaute Wohnzone mit Block- und Zeilenrandbebauung an. Lockere Einzel- und Reihenhausbebauung prägt schließlich den übrigen Innenstadtbereich. Eine Gebäudehöhe von vier bis fünf Geschossen wird im Stadtgebiet nur selten übertroffen. Lediglich bei Großbauten wie Kirchen, Verwaltungsgebäuden, Kliniken und einigen Wohnhochhäusern ist das der Fall. Da die Industrie in Münster nur einen kleinen Teil der Wirtschaft ausmacht, ist der Bestand an Industriegebieten in der Stadt verhältnismäßig klein.⁷⁸

Entsprechend der Bebauungsstruktur stellen sich auch die Versiegelungsgrade der Bodenoberfläche dar. Die höchsten Werte mit über 80 Prozent finden sich im Bereich des Stadthafens und der Halle Münsterland. Mit 70 bis 80 Prozent kaum weniger versiegelt sind die Verlade- und Rangierflächen südlich des Bahnhofs und die südlich der Umgehungsstraße an den Kanal angrenzenden Gewerbegebiete. Auch die anderen Gewerbegebiete in Münster zeigen vergleichbare Versiegelungen, haben aber eine geringere Flächenausdehnung. Versiegelungsgrade von 70 Prozent werden außerdem im Stadtbereich innerhalb der Promenade angetroffen. Ansonsten ist die Innenstadt bis zum Ringstraßensystem überwiegend zu 50 bis 60 Prozent und außerhalb des Rings sowie in den Vororten zu 30 bis 40 Prozent versiegelt.⁷⁹

3.4 Witterungsverlauf im Untersuchungszeitraum

Die Witterungsverhältnisse während des Messzeitraumes von Juli bis September zeigten für ganz Deutschland einen außergewöhnlich heißen, trockenen und sonnenscheinreichen Sommer. Die Monate Juni und August waren im Gebietsmittel die wärmsten seit dem Beginn der Aufzeichnung der Gebietsmittelreihe im Jahr 1901.⁸⁰ Diese Differenzen spiegelten sich auch an der Station Münster-Osnabrück (Flughafen) des Deutschen Wetterdienstes wieder. So wichen die gemittelte Lufttemperatur im Juni um 3,4 Kelvin⁸¹ und im August

⁷⁸ Vgl.: STADT MÜNSTER 1992, S. 12f

⁷⁹ Vgl.: STADT MÜNSTER 1998, S. 7 und Karte 2

⁸⁰ Vgl.: http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/spezial/temp/Rekordsommer_2003.pdf

⁸¹ Vgl.: DEUTSCHER WETTERDIENST 2003a und:
http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/monitoring/abfrage_klimakarten.htm

sogar um 3,8 Kelvin⁸² vom ihrem langjährigen Mittelwert ab. Und auch der Juli war überdurchschnittlich warm.⁸³ So überstieg in Deutschland die mittlere Tagestemperatur der drei Sommermonate Juni, Juli und August mit 19,6 °C den Referenzwert der internationalen klimatologischen Referenzperiode von 1961 bis 1990 um 3,4 Kelvin. Verglichen mit den Mittelwerten der bisher heißesten Sommer wurden deren Werte nicht nur geringfügig, sondern um weitere ein bis zwei Kelvin überstiegen.⁸⁴

Der September war ebenfalls zu warm, zeigte innerhalb Deutschlands allerdings ein etwas uneinheitlicheres Bild der Temperaturabweichungen. An der Station Münster-Osnabrück (Flughafen) ermittelte der Deutsche Wetterdienst eine positive Abweichung von einem Kelvin gegenüber dem Referenzwert.⁸⁵



Abb. 6: Bodennaher Luftdruck und Tageshöchsttemperaturen in Europa am 07.08.2003
(aus www.euronews.net)

Ursache für die extreme Witterung war das gehäufte Auftreten blockierender Hochs, die auch als Omega-Lagen bezeichnet werden.⁸⁶ Solche Druckgebilde entstehen in der Regel aus dem Keil eines Subtropenhochs, der nach Mitteleuropa vordringt und sich dort zu einem eigenständigen, warmen Hoch entwickelt. Ein warmes Hoch, wie es Abbildung 6 zeigt, ist quasistationär. Das heißt, es blockiert die von Westen heranziehenden Tiefausläu-

⁸² Vgl.: DEUTSCHER WETTERDIENST 2003c und:
http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/monitoring/abfrage_klimakarten.htm

⁸³ Vgl.: DEUTSCHER WETTERDIENST 2003b und:
http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/monitoring/abfrage_klimakarten.htm

⁸⁴ Vgl.: http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/spezial/temp/Rekordsommer_2003.pdf

⁸⁵ Vgl.: DEUTSCHER WETTERDIENST 2003d und:
http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/monitoring/abfrage_klimakarten.htm

⁸⁶ Vgl.: http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/spezial/temp/Rekordsommer_2003.pdf

fer und zwingt sie nach Norden oder Süden auszuweichen. Da ein blockierendes Hoch sich nur langsam verlagert, tritt in seinem Bereich eine meist vier bis zehntägige Schönwetterperiode auf.⁸⁷

Die anhaltenden Hochdruckwetterlagen bescherten Deutschland neben den extremen Temperaturen auch eine überdurchschnittliche Sonnenscheindauer und ein gravierendes Niederschlagsdefizit. Statistisch betrachtet war der Sommer 2003 der sonnenscheinreichste seit über 50 Jahren und gehört zu den fünf trockensten Sommern seit 1901.⁸⁸

Angesichts der meteorologischen Extreme des Sommers 2003 hat der Deutsche Wetterdienst (DWD) auch die durchschnittliche Wiederkehrzeit eines solchen Sommers berechnet. Unter der Annahme einer statistischen Normalverteilung der Sommermitteltemperaturen und einem Erwärmungstrend von 0,9 Kelvin während der letzten 100 Jahre beträgt die statistische Wiederkehrzeit über 1000 Jahre.⁸⁹

⁸⁷ Vgl.: MALBERG, 2002 ,S. 155f

⁸⁸ Vgl.: http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/spezial/temp/Rekordsommer_2003.pdf

⁸⁹ Vgl.: http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/spezial/temp/Rekordsommer_2003.pdf

4 Datenerfassung

4.1 Messstrecken

Das Untersuchungsgebiet dieser Diplomarbeit umfasst eine Fläche von ca. 80 Quadratkilometern im zentralen Stadtgebiet von Münster. Da das Gebiet möglichst repräsentativ erfasst und die Befahrung einer Messstrecke zeitnah zum täglichen Temperaturmaximum und Temperaturminimum erfolgen sollte, wurden fünf Messrouten mit einer Streckenlänge von 26,7 bis 30,4 Kilometern über das Untersuchungsgebiet gelegt. Die einzelnen Messkampagnen ließen sich in dann in weniger als 2,5 Stunden durchführen.

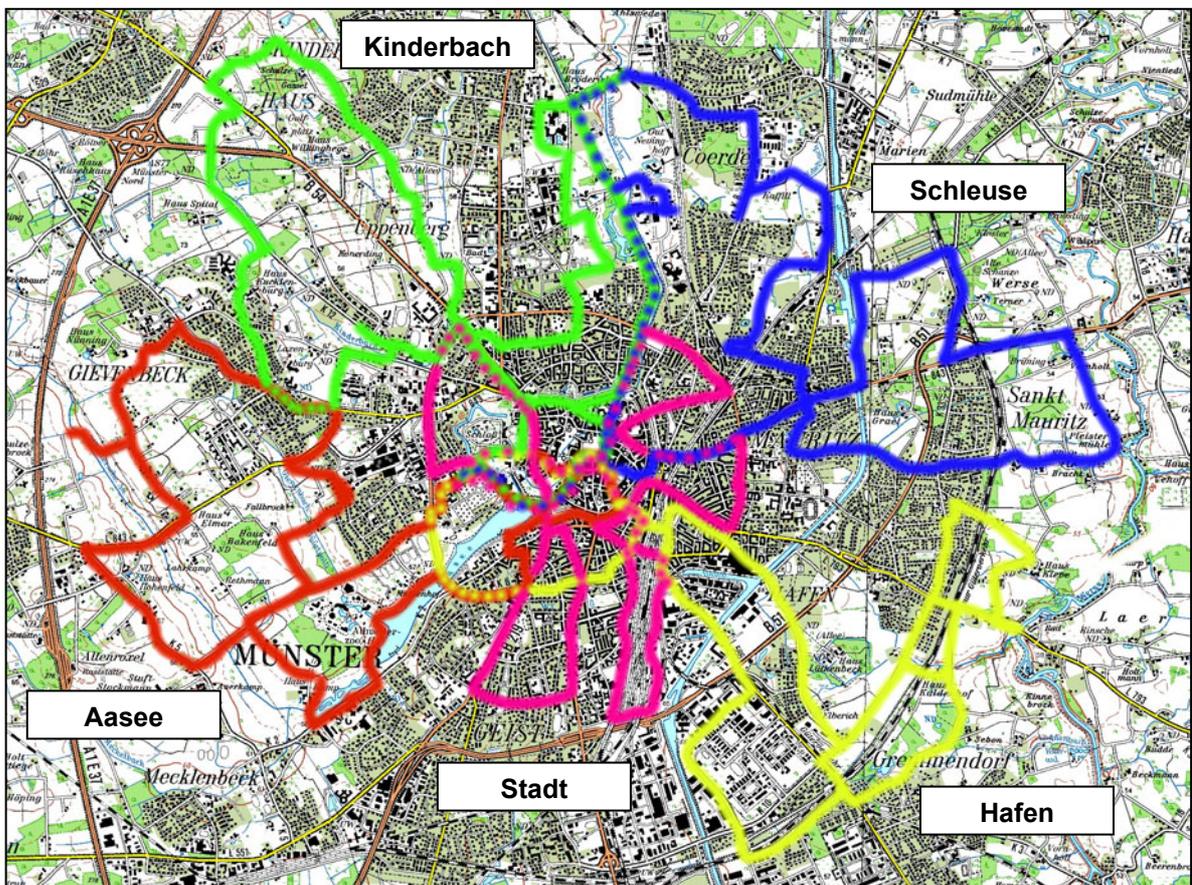


Abb. 7: Verlauf der fünf Messstrecken im Untersuchungsgebiet

Die in Abbildung 7 dargestellten Touren wurden in wesentlichen Zügen durch die vergleichende Auswertung der Karten „Klimafunktionsräume“, „Grünsystem – Freiraumkonzept“ und „Bodenversiegelung“ aus dem Umweltbericht 1998 der Stadt Münster entwickelt. Alle Routen überqueren den Domplatz und zum Teil auch weitere Straßenzüge als gemeinsamen Referenzpunkt für den Vergleich aller Temperaturunterschiede. Um ein möglichst ausgeprägtes Temperaturprofil zu erfassen, verliefen die Messstrecken in ständigem Wechsel durch städtische und durch unbebaute Areale. Außerdem wurde in einzelnen Strecken-

verlaufen Knotenpunkte eingefügt, die im Laufe einer Messung zu verschiedenen Zeiten befahren wurden. Dies ermöglichte eine Kontrolle der im Rahmen der späteren Datenaufbereitung durchgeführten Temperaturinterpolation von einem Zeitraum auf einen Zeitpunkt. Neben der thematischen Eignung mussten sich die Strecken natürlich für eine Befahrung mit dem Fahrrad plus Anhänger und 2,3 Meter hohen Mast eignen. Während der Messkampagne wurden die Messrouten insgesamt 40-mal befahren und dabei 1127 Kilometer zurückgelegt.

4.2 Messtechnik

Zur Erfassung der meteorologischen Parameter ist der in Abbildung 8 dargestellte Fahrradanhänger mit verschiedenen Messgeräten ausgestattet. Diese sind im Einzelnen:

- Ein Ultraschall-Anemometer zur Registrierung der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der akustischen Temperatur in 2,2 Metern Höhe,
- ein Pt100-Thermometer zur Messung der Temperatur in zwei Metern Höhe,
- ein kapazitiver Feuchtesensor zur Erfassung der relativen Luftfeuchtigkeit in zwei Metern Höhe und
- ein Barometer zur Messung des Luftdrucks.



Abb. 8: Fahrradanhänger mit Messgeräten

Außerdem ist der Anhänger mit einem GPS-Empfänger, einem elektronischen Kompass und einem Datalogger ausgestattet. Eine 12-Volt-Batterie dient allen Geräten als Stromversorgung.

Um eine für die Untersuchung angemessene Datendichte zu erhalten wurde ein Messtakt von 0,33 Hz gewählt. Während der Messfahrten wurde somit alle drei Sekunden die GPS-Position bestimmt und zusammen mit den Mittelwerten der in den drei Sekunden erfassten Einzelmessungen der anderen Messgeräte in dem Datalogger gespeichert. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von rund zwölf Kilometern pro Stunde bedeutet dies die Repräsentation der Mittelwerte für einen etwa zehn Meter langen Streckenabschnitt zwischen zwei GPS-Punkten.

4.3 Methoden zur Datenermittlung und Datenaufbereitung

Das Phänomen der städtischen Überwärmung und die Entstehung und der Abfluss von Kaltluft sind an windarme Strahlungswetterlagen gebunden. Dem entsprechend wurden alle Messfahrten nur während solcher Wetterlagen durchgeführt. Für die Erfassung der nächtlichen Temperaturanomalien und Windverhältnisse hätte eine ausschließlich nächtliche Befahrung der Messstrecken ausgereicht. Da jedoch auch das Abkühlungsverhalten der Stadt und des Umlands von Interesse war, wurden ebenso tagsüber Messungen durchgeführt. Für den Vergleich der zu verschiedenen Zeitpunkten an verschiedenen Orten gemessenen Lufttemperaturen wurden die Messwerte auf den Zeitpunkt des mittäglichen Temperaturmaximums und des morgendlichen Temperaturminimums interpoliert. Die ermittelten Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen spiegeln hingegen den zum jeweiligen Messzeitpunkt aktuellen Zustand der Luftbewegung.

4.3.1 Lufttemperatur

Die Ermittlung der Lufttemperatur bzw. ihrer Unterschiede erfolgte in mehreren Schritten.

Zuerst wurden die Lufttemperatur und die akustische Temperatur sowie die relative Luftfeuchtigkeit während der Fahrradtouren gemessen. Zur Erfassung des Temperaturmaximums wurde jede Messstrecke zwischen 13:00 und 15:30 Uhr MET befahren und zur Messung der Minimumtemperaturen die gleiche Route in den 2,5 Stunden um den Sonnenaufgang des nächsten Morgen erneut zurückgelegt. Auf diese Weise wurden pro Tour etwa 2500 bis 3000 mit GPS-Koordinaten versehene Messwerte der genannten Parameter gesammelt.

Wegen einer festgestellten zeitlich verzögerten Reaktion des Pt100-Thermometers auf Temperaturänderungen wurde die Lufttemperatur schließlich aus der ebenfalls erfassten akustischen Temperatur berechnet. Genauere Erläuterungen gibt Kapitel 4.3.1.1.

Als dritter Schritt wurden die jeweils in einem Zeitraum von bis zu 2,5 Stunden aufgenommenen Messwerte auf die theoretisch angenommenen Zeitpunkte des Temperaturmaximums (15 Uhr MET) bzw. des Temperaturminimums zur Zeit des Sonnenaufgangs interpoliert.⁹⁰ Hierzu wurden die an der Wetterstation auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie während des jeweiligen Messzeitraums beobachteten Temperaturänderungen zugrunde gelegt und daraus die Änderungswerte für jeden einzelnen Messwert der Radtouren ermittelt. Die Berechnung wird im Kapitel 4.3.1.2 ausführlich vorgestellt.

Zur Ermittlung der Abkühlungsraten wurden nun von den interpolierten Maximumtemperaturen einer Tagfahrt die berechneten Minimumtemperaturen der entsprechenden Nachtfahrt positionsgenau abgezogen. Die verrechneten GPS-Koordinaten durften dabei um maximal $0,00018^\circ$ geographischer Breite und $0,0003^\circ$ geographischer Längen voneinander abweichen, was auf der gegebenen geographischen Breite von $51,93^\circ$ bis $52,00^\circ$ eine Toleranz von rund 20×20 Metern darstellt.

Der letzte Schritt der Datenaufbereitung bestand aus der Bestimmung der relativen nächtlichen Temperaturunterschiede und Abkühlungsraten in Bezug zum Domplatz. Diese Maßnahme ermöglichte nun einen direkten Vergleich und eine Verschneidung der an verschiedenen Tagen entlang unterschiedlicher Routen ermittelten Daten.

4.3.1.1 Berechnung der Lufttemperatur aus der akustischen Temperatur

Bei einer Analyse der mit dem Pt100-Thermometer gemessenen Lufttemperatur zeigte sich an der Kanalstraße, im Bereich zwischen der Maximilianstraße und dem Wienburgpark, also auf einer Strecke, die einen plötzlichen Wechsel von einem sehr dicht bebauten städtischen Areal zum weitgehend unbebauten Umland darstellt, dass die erfassten Messwerte diesen Übergang zeitlich verzögert widerspiegelten. Erkennbar wurde dies durch die gegenläufige Befahrung dieses Streckenabschnitts. Während bei der Fahrt stadtauswärts der dicht bebaute Bereich von den Messwerten als gleichmäßig heiß und die Abkühlung auf den ersten etwa 200 Metern nach Überquerung des Cheruskerrings dargestellt wurde, zeig-

⁹⁰ Vgl.: SCHÖNWIESE 2003, S. 127f

te sich bei umgekehrter Fahrtrichtung der Bereich außerhalb des Ring als gleichmäßig kühl und die Erwärmung erfolgte innerhalb des städtischen Areals. Diese Gegenüberstellung legte die Vermutung nahe, dass die mit dem Pt100-Thermometer durchgeführte Messung der Lufttemperatur einen systematischen Fehler enthält, nämlich ein zeitlich verzögertes Reagieren des Messgeräts auf Temperaturänderungen. Der in Abbildung 9 dargestellte Vergleich der von dem Pt100-Thermometer gemessenen Lufttemperaturen mit den parallel erfassten akustischen Temperaturen belegt schließlich diese Annahme, denn die Kurve der Lufttemperatur zeigt ihre Peaks stets zeitlich versetzt zum Verlauf der akustischen Temperatur an und wirkt wie geglättet.

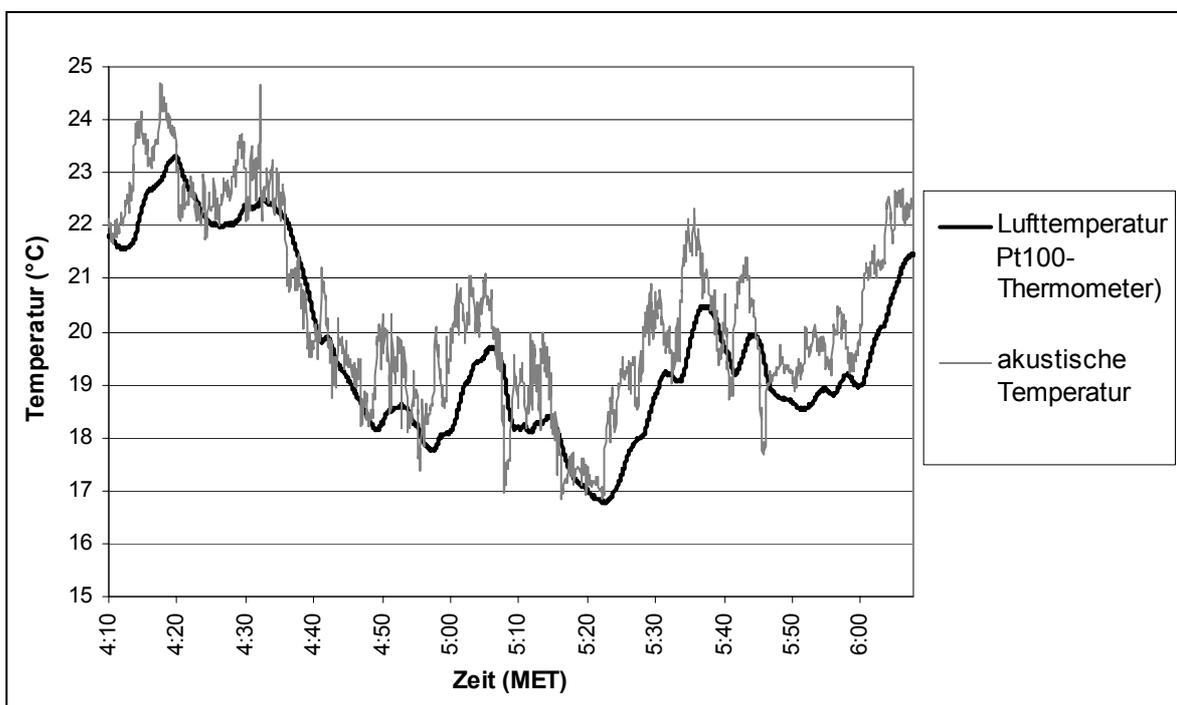


Abb. 9: Gemessene Lufttemperatur und akustische Temperatur am Morgen des 08.08.2003

Ein Grund für das im Vergleich zur akustischen Temperatur trägere Reagieren des Pt100-Thermometers könnte dessen Unterbringung in einer Wetterhütte sein, da diese über ihre eigene Erwärmung und Abkühlung die in ihrem Inneren gemessene Lufttemperatur beeinflusst.

Da das Ultraschall-Anemometer über die gemessene akustische Temperatur Unterschiede in der Lufttemperatur viel präziser feststellte als das Pt100-Thermometer, sollte die Lufttemperatur aus der akustischen Temperatur, die mit hinreichender Genauigkeit gleich der

virtuellen Temperatur gesetzt werden kann⁹¹, berechnet werden. Als kombiniertes Temperatur-Feuchte-Maß ist die virtuelle Temperatur allerdings über den temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck direkt von der aktuellen Lufttemperatur abhängig,⁹² die ja nicht mit der für diese Arbeit notwendigen Genauigkeit gemessen werden konnte. Da allerdings der für die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit eingesetzte kapazitive Feuchtesensor ebenfalls in der Wetterhütte untergebracht war, bezogen sich alle erfassten Feuchtwerte auf den Sättigungsdampfdruck der vom Pt100-Thermometer gemessenen Lufttemperatur. Der Wasserdampfdruck ließ sich somit korrekt bestimmen und folglich auch die Lufttemperatur aus der virtuellen Temperatur. Die Formel für die Berechnung lautet:

$$(10) \quad T = T_v / (1 + 0,61s)$$

mit:

T Lufttemperatur [K]

T_v virtuelle Temperatur [K]

s Spezifische Feuchte

Die spezifische Feuchte s gibt dabei nach folgender Gleichung an, wie viel Kilogramm Wasserdampf in einem Kilogramm feuchter Luft enthalten sind:

$$(11) \quad s = 0,622 e/p$$

mit:

e Wasserdampfdruck [hPa]

p Luftdruck [hPa]

Und der Wasserdampfdruck e ist schließlich das Produkt aus der relativen Luftfeuchtigkeit rF und dem temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck E(T):

$$(12) \quad e = rF/E(T)$$

mit:

rF relative Luftfeuchtigkeit [%]

E(T) Sättigungsdampfdruck (bei gegebener Lufttemperatur) [hPa]

Abbildung 10 stellt die gemessene akustische Temperatur und die daraus berechnete Lufttemperatur dar.

⁹¹ Vgl.: FOKEN 2003, S. 190

⁹² Vgl.: KRAUS 2000, S. 77ff

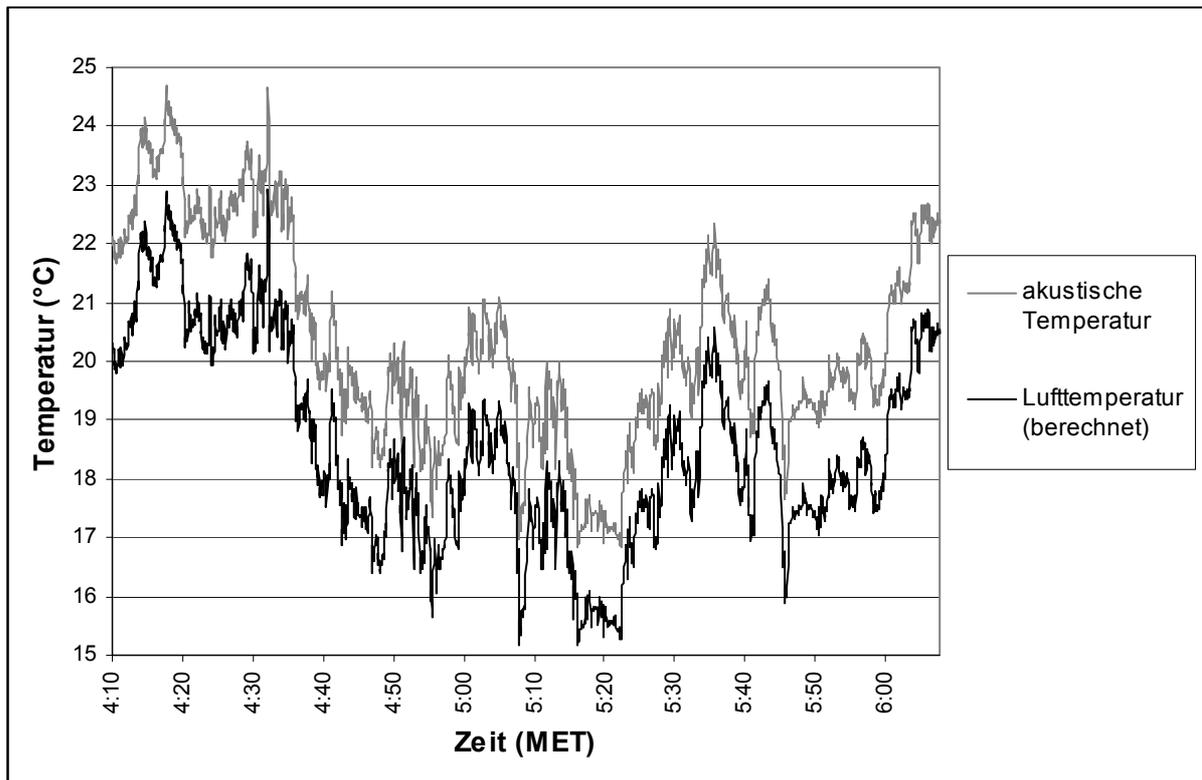


Abb. 10: Gemessene akustische Temperatur und daraus berechnete Lufttemperatur am Morgen des 08.08.2003

Welchen Einfluss die träge Reaktion des Pt100-Thermometers auf die Messergebnisse hat veranschaulichen die Karten 5c und 6c im Anhang. Während die mit dem Pt100-Thermometer gemessenen Lufttemperaturen in Karte 5c eine relativ kühle innerstädtische Kanalstraße darstellen, zeigen die mit dem auf thermische Unterschiede schneller reagierenden Ultraschall-Anemometer gemessenen Lufttemperaturen in Karte 6c einen deutlichen Temperatursprung an der Kreuzung der Kanalstraße mit dem Cheruskering und eine gleichmäßig heiße innerstädtische Kanalstraße an. Die Messungen wurden zwar an unterschiedlichen Tagen durchgeführt, lassen aber dennoch diesen Vergleich zu, denn die am 12.08.2003 mit dem Pt100-Thermometer erfassten Lufttemperaturen zeigen an der innerstädtischen Kanalstraße ein weitgehend gleiches thermisches Profil wie am 15.07.2003. Das in die Wetterhütte eingebettete Pt100-Thermometer ist folglich als alleiniges Instrument zur Erfassung der Lufttemperatur auf Messfahrten nicht geeignet.

4.3.1.2 Interpolation der Temperaturmessungen von einem Zeitraum auf einen Zeitpunkt

Da die zu verschiedenen Zeitpunkten an verschiedenen Positionen ermittelten Lufttemperaturen nicht direkt miteinander verglichen werden können müssen für eine Analyse alle Werte auf einen sinnvollen Zeitpunkt bezogen und interpoliert werden. Als Zeitpunkt für das angenommene Temperaturmaximum wurde 15:00 Uhr (MET) gewählt, als Zeitpunkt für das Temperaturminimum der Zeitpunkt des Sonnenaufgangs in Münster.⁹³ Die Referenz für die Interpolation der mobil erfassten Werte der Lufttemperatur stellte der zeitgleich an der festen Wetterstation auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie erfasste Temperaturverlauf dar.

Aus den im Zehn-Minuten-Takt ermittelten Temperaturdaten der Wetterstation lässt sich mit dem Programm CurveExpert 1.3 auf der Basis der Zahlenreihe für die laufende Nummerierung der Temperaturwerte die Formel Polynoms zehnter Ordnung mit sehr hohem Korrelationskoeffizienten zu den Daten der Feststation finden. Neben der nun gegebenen Möglichkeit, die Temperaturen für beliebig viele Zwischenschritte zu ermitteln, zeichnet sich diese mathematische Beschreibung durch die Glättung statistischer Ausreißer aus dem vorgegebenen Datensatz aus. In die Reihe der ganzen Zahlen, die als Grundlage für die Berechnung des Polynoms im Zehn-Minuten-Takt dient, müssen zur Erreichung des Drei-Sekunden-Taktes schließlich noch 199 äquidistante Zwischenschritte eingefügt werden. Die neue Reihe der Dezimalzahlen kann nun mit ihren jeweiligen Referenztemperaturen jedem Temperaturwert der Messfahrten zugeordnet werden. Als Beispiel soll die Interpolation der am Morgen des 08.08.2003 gemessenen Temperaturwerte auf den Zeitpunkt des Sonnenaufgangs um 5: 47 Uhr (MET) erläutert werden:

Die Messfahrt fand von 4:10 bis 6:07 Uhr (MET) statt. Der für diese Werte vergleichbare Abkühlungstrend wurde an der Feststation für den Messzeitraum, sowie einer Stunde vor Beginn und nach Ende der Fahrt ermittelt. Hierzu wurden die Temperaturdaten der Station samt der laufenden Nummerierung in das Programm CurveExpert 1.3 eingegeben. Das Programm ermittelte nun auf der Basis der Nummerierung ein Polynom zehnfacher Ordnung mit einem hohen Korrelationskoeffizienten von in diesem Fall $r = 0,9933$ zu den angegebenen Temperaturwerten. Wie Abbildung 11 zeigt, glättet die Kurve des Polynoms

⁹³ <http://lexikon.astronomie.info/java/astrojava.html>

kurzfristige Temperaturschwankungen. Einzelne Ausreißer im Temperaturverlauf der Referenzstation gehen somit kaum in die Interpolation ein.

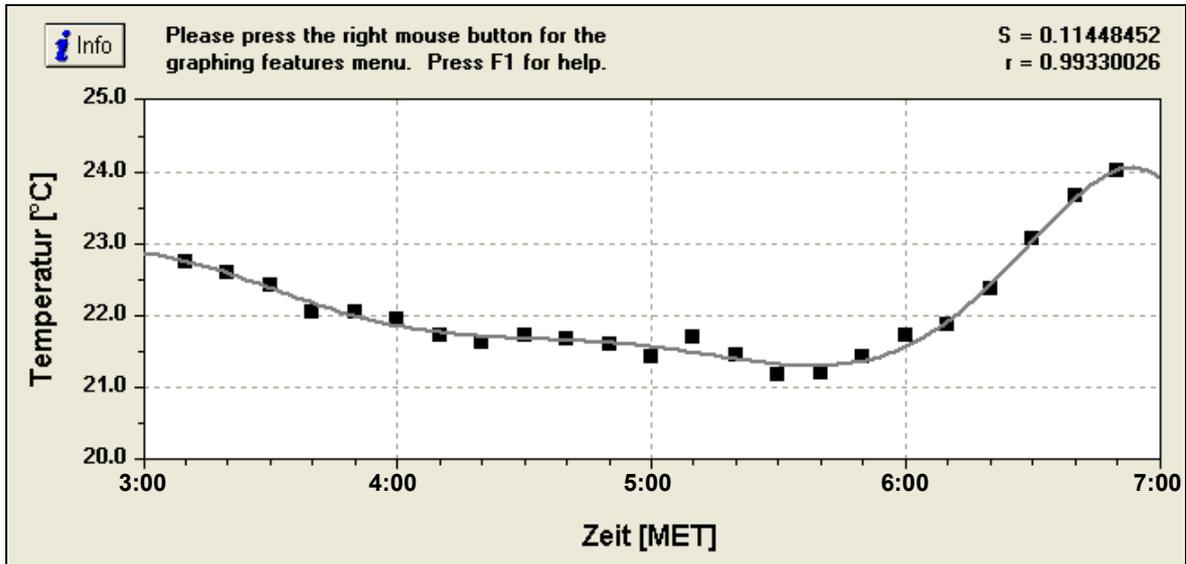


Abb. 11: Geglätteter Temperaturverlauf an der Wetterstation auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie am Morgen des 08.08.2003

Die Überprüfung der Interpolations-Methode wird in Abbildung 12 veranschaulicht. Die für die Erzeugung des Referenzpolynoms zugrunde liegenden Temperaturwerte vom Morgen des 08.08.2003 wurden in diesem Fall selbst mit dem erzeugten Polynom auf den Zeitpunkt 4:50 Uhr interpoliert.

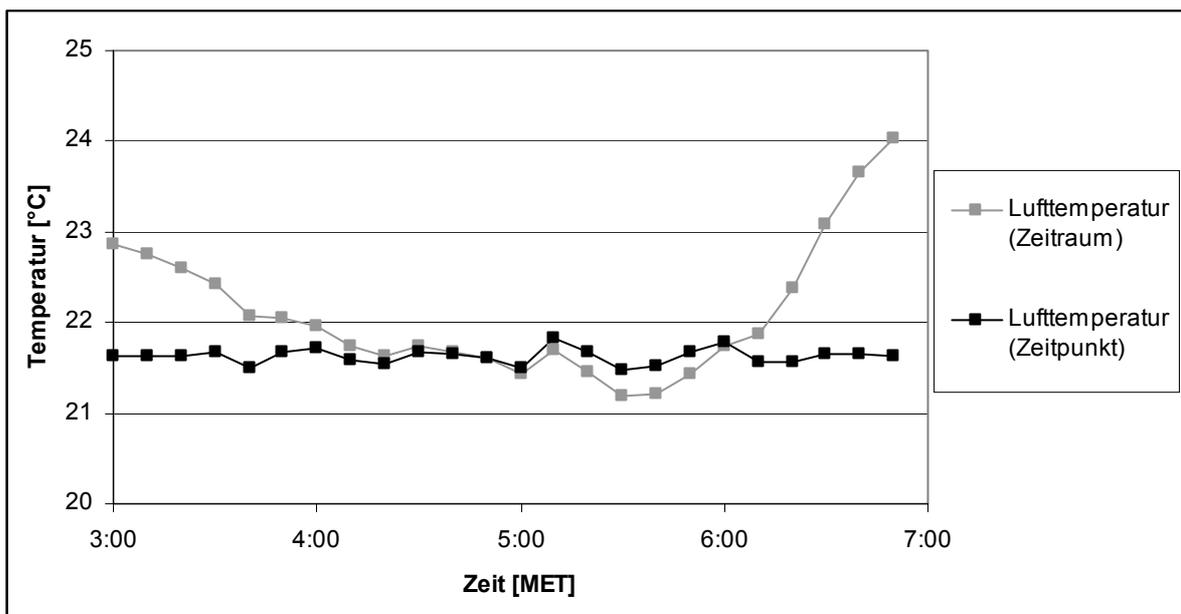


Abb. 12: An der Wetterstation auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie gemessene Lufttemperaturen am Morgen des 08.08.2003 und Interpolation dieser auf den Zeitpunkt 5:50 Uhr (MET)

Die Grafik zeigt, dass die Schwankungsbreite der Lufttemperatur von über 2,5 Kelvin aus der ursprünglich vier Stunden währenden Aufzeichnung nach der Interpolation auf den Zeitpunkt 4:50 Uhr (MET) nur noch eine maximale Abweichung von 0,24 Kelvin aufweist. 19 der 23 berechneten Werte zeigen sogar eine Abweichung von weniger als 0,1 Kelvin.

Welche Änderungen sich durch die Anwendung der Interpolation mit einem Referenzpolynom für den Verlauf einer Temperaturkurve in einem konkreten Fall ergeben, stellt Abbildung 13 dar. Die ursprünglich gemessenen Temperaturen vom Morgen des 08.08.2003 wurden hier auf den Zeitpunkt 5:47 Uhr (MET) interpoliert. Es ist erkennbar, dass die Messwerte mit zunehmender zeitlicher Distanz zum Referenzzeitpunkt um immer größere Beträge auf eine niedrigere Temperatur interpoliert wurden. Nur im Bereich zwischen 5:30 und 5:47 Uhr (MET) ist eine Erhöhung der ursprünglichen Temperaturen zu erkennen. Dies hängt mit dem für diese Arbeit theoretisch festgesetzten Zeitpunkt der niedrigsten Temperatur bei Sonnenaufgang, am 08. August ist dies stets um 5:47 Uhr (MET), und dem etwa 17 Minuten früheren Eintritt des realen Temperaturminimums an diesem Morgen zusammen.

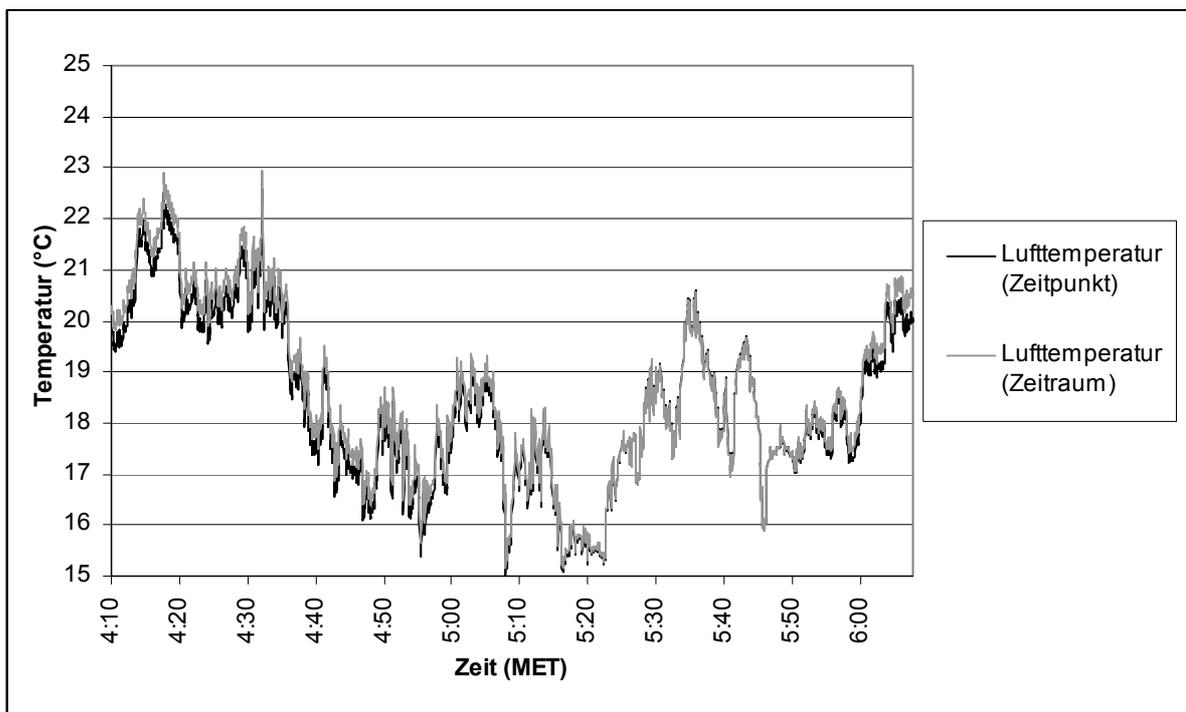


Abb. 13: Berechnete Lufttemperatur der Messfahrt am Morgen des 08.08.2003 und Interpolation dieser auf den Zeitpunkt des Sonnenaufgangs um 5:47 Uhr (MET)

Die Methode geht davon aus, dass der an der festen Station ermittelte und geglättete Temperaturverlauf für den gesamten Untersuchungsraum repräsentativ ist. Abweichungen im

Temperaturverlauf an anderen Orten können so nicht festgestellt werden. Einen Hinweis auf die Qualität der Interpolation liefern allerdings die in sämtliche Messstrecken eingefügten Knotenpunkte. Hier wird die Lufttemperatur im Rahmen einer Messfahrt zu verschiedenen Zeitpunkten erfasst und im Idealfall erzeugt die Interpolation dort aus allen Eingangstemperaturen eine gemeinsame Ausgangstemperatur.

4.3.2 Berechnung der Winde

Die Erfassung des Winds geschieht mit dem Ultraschall-Anemometer während der Fahrten. Das Gerät misst hierzu die Geschwindigkeit und Richtung der an den Sensoren vorbeiströmenden Luft. Wie alle anderen Messwerte werde auch diese Daten als drei-Sekunden-Mittelwerte ausgegeben und einer GPS-Position zugeordnet. Da sich in den Messwerten auch die Fahrtgeschwindigkeit und –richtung widerspiegelt, müssen diese nachträglich eliminiert werden. Hierzu werden aus der gemessenen Windgeschwindigkeit und –richtung die x- und y-Windkomponenten berechnet. Aus den beiden GPS-Positionen lassen sich Vektoren entsprechend der Fortbewegung des Anhängers ermitteln. Die Berechnung der echten Windgeschwindigkeit und –richtung soll am Beispiel des in Tabelle 6 aufgelisteten Auszugs aus dem Datensatz vom 08.08.2003 vorgestellt werden:

Tab. 6: Auszug aus dem Datensatz vom Morgen des 08.08.2003

Zeit [MET]	Geographische Länge [°]	Geographische Breite [°]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Windrichtung [°]
04:22:00	7,62634	51,95607	2,84	357,8
04:22:03	7,62616	51,95612	2,98	2,6

Die Ermittlung der Komponente x_A für die Änderung der Längenposition des Messanhängers ($\lambda_2 - \lambda_1$) ist von der geographischen Breite φ , auf der dies geschieht abhängig:

$$(13) \quad x_A = (\lambda_2 - \lambda_1) \cdot 2\pi R \cdot \cos \varphi \cdot 10^3$$

mit

x_A x-Komponente der Anhängerbewegung [m]

λ geographische Länge [°]

φ geographische Breite [°]

R Erdradius

Unter der vereinfachenden Annahme einer kugelförmigen Erde mit einem Radius R von 6370 Kilometern entspricht die Änderung der Längenposition ($\lambda_2 - \lambda_1$) von minus 0,00018 Grad auf der geographischen Breite φ von 51,95612 Grad gemäß Formel (13) einer Komponente x_A von minus 12,10 Metern. Für die Bestimmung der entsprechenden Komponente y_A gilt dann folgendes Verhältnis:

$$(14) \quad y_A = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot 111,177 \text{ km/}^\circ \cdot 10^3$$

mit

y_A y-Vektor der Anhängerbewegung [m]

Bei einem Abstand zweier Breitenkreise von 111,117 Kilometern entspricht die Änderung der Breitenposition ($\varphi_2 - \varphi_1$) des Messanhängers um 0,00005 Grad einer Komponente y_A von 5,37 Metern.⁹⁴

Bezogen auf den Zeitraum einer Sekunde verändert sich die Anhängerposition um minus 4,03 Meter auf der x-Achse und 1,79 Meter auf der y-Achse, was einer Fahrgeschwindigkeit von 4,41 Meter pro Sekunde (15,9 km/h) und einer Fahrtrichtung von 293,9 Grad entspricht.

Das Ultraschall-Anemometer hat für den Zeitraum von 4:22:00 bis 4:22:03 Uhr (MET) eine Windgeschwindigkeit von 2,98 Metern pro Sekunde bei einer Windrichtung von 2,6 Grad festgestellt. Die Richtungsangabe ist allerdings relativ und bezieht sich auf die Nordrichtung des Messgerätes. Da dieses nicht wirklich nach Norden, sondern entsprechend der ermittelten Fahrtrichtung nach 293,9 Grad wies, kam der erfasste Luftzug aus 296,5 Grad. Aus der gemessenen Windgeschwindigkeit v_g und der eingeordneten Windrichtung α lassen sich die x- und y-Komponenten folgendermaßen ermitteln:

$$(15) \quad x_g = \sin \alpha \cdot v_g$$

$$(16) \quad y_g = \cos \alpha \cdot v_g$$

mit

x_g x-Komponente des gemessenen Windes [m]

y_g y-Komponente des gemessenen Windes [m]

α_g gemessene Windrichtung, eingeordnet [°]

v_g gemessene Windgeschwindigkeit [m/s]

⁹⁴ Vgl.: WILHELMY 1996, S. 45

Die x-Komponente des gemessenen Windes ist folglich -2,67 Meter lang und die y-Komponente 1,33 Meter.

Da die gemessene Windrichtung beschreibt, woher der Wind weht und die Fahrtrichtung bei gleicher Richtungsangabe die genau gegensätzliche Bewegungsrichtung des Anhängers dokumentiert, müssen die x- und y-Komponenten der Fahrt mit minus eins multipliziert werden um den Fahrtwind zu beschreiben. Aus der Addition der jeweils ermittelten Komponenten ergeben sich nun die Komponenten des echten Windes. Die x-Komponente ist somit 1,36 Meter und die y-Komponente minus 0,46 Meter lang. Wie Abbildung 14 zeigt, weht der echte Wind im beschriebenen Fall mit einer Geschwindigkeit von 1,44 Metern pro Sekunde aus 108,6 Grad.

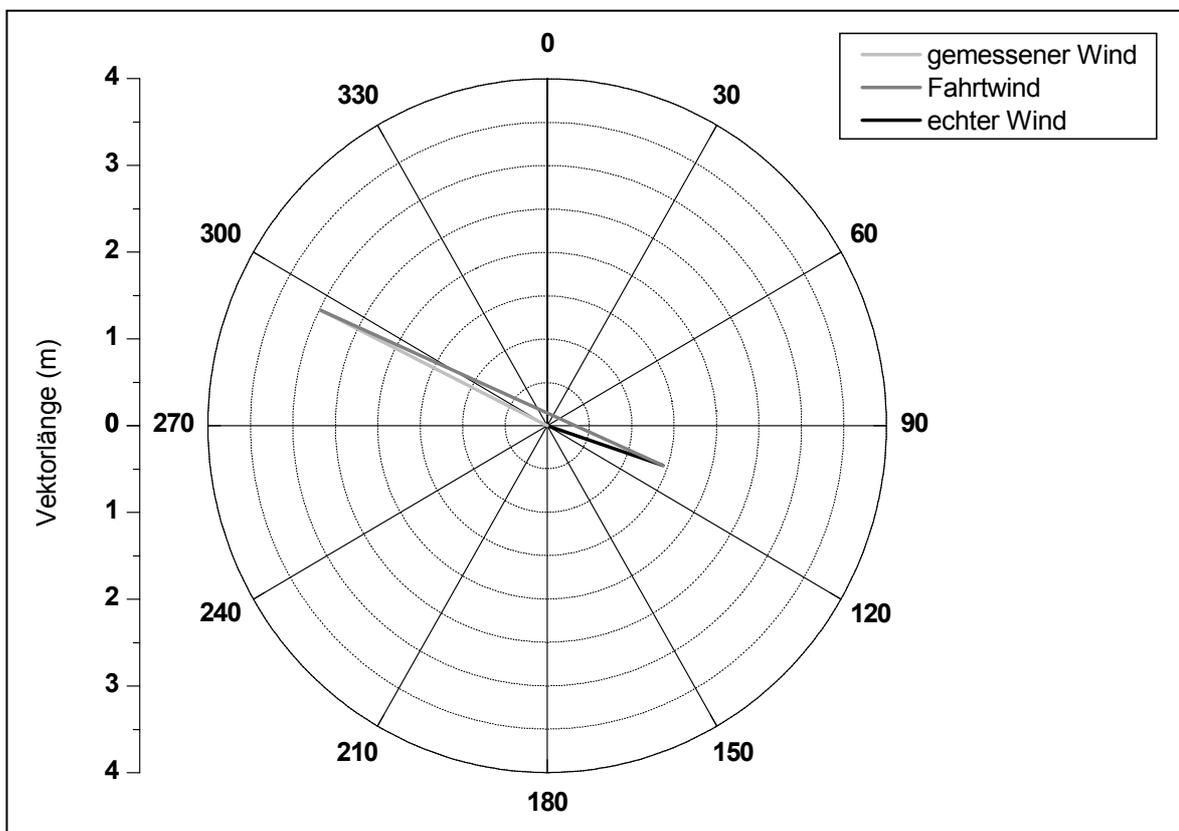


Abb. 14: Vektordarstellung der Windberechnung

Das Messen der Windgeschwindigkeit und -richtung während der Fahrt ist mit Ungenauigkeiten behaftet. Sie stammen in erster Linie von Erschütterungen des gefederten Anhängers während der Fahrt auf dem rauen und zum Teil unebenen Untergrund und führen zu deutlichen Schwankungen des in 2,3 Metern Höhe befindlichen Messgerätes. In der Summe gleichen sich die Pendelbewegungen aber wieder aus und haben keinen erkennbaren Einfluss auf die Qualität der vorliegenden Daten.

Große Probleme bereiten allerdings die immer wieder auftretenden Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung mit dem GPS-Empfänger. In diesen Fällen kann die zur Berechnung des echten Windes notwendige Anhängerbewegung nicht exakt ermittelt und folglich auch der echte Wind nicht korrekt berechnet werden. Abbildung 15 veranschaulicht einen solchen Fall. Dargestellt sind die wie oben beschrieben berechneten Windgeschwindigkeiten und Richtungen auf der Messstrecke „Kinderbach“ vom Morgen des 15.09.2003.

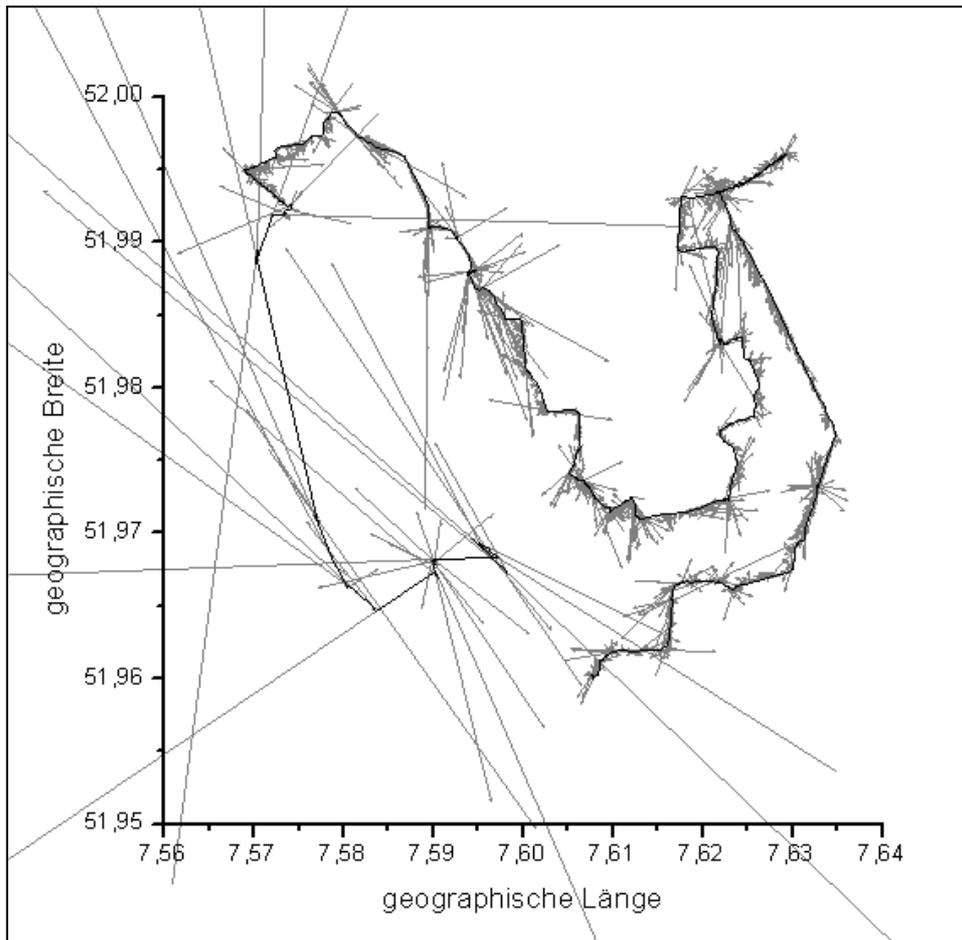


Abb. 15: Einfluss von GPS-Ungenauigkeiten auf die Berechnung des echten Windes

5 Ergebnisse

Nur ein Teil der im Rahmen der 40 Einzelfahrten gesammelten Datensätze kann für die Analyse genutzt werden. Verantwortlich sind hierfür vor allem Ungenauigkeiten und Ausfälle beim Empfang der GPS-Koordinaten, aber auch der Ausfall anderer Messgeräte sowie nicht optimale Witterungseigenschaften. Während ein Datensatz ohne GPS-Koordinaten keine positionsbezogene Analyse der gemessenen Parameter ermöglicht, verhindern die nicht exakt erfassten GPS-Daten die Berechnung der echten Luftbewegung. Dem gegenüber ist eine Analyse der Temperatur- und Feuchtedaten auch bei geringfügigen Abweichungen in der Positionsbestimmung von einigen Metern noch möglich. Tabelle 7 im Anhang gibt eine Übersicht über die Qualität und Nutzbarkeit der 40 Datensätze.

Zur Berechnung der flächenbezogenen Abkühlungsraten eignen sich 22 der 40 Fahrten und entsprechend elf für den Vergleich der Nachttemperaturen. Für den Wegfall bzw. die Nichtberücksichtigung der anderen Datensätze sind Ausfälle des GPS-Empfängers und des Pt100-Thermometers sowie zu hohe Windgeschwindigkeiten verantwortlich.

Die nutzbaren Datensätze wurden während verschiedener Schönwetterperioden im Juli, August und September 2003 aufgenommen und wurden dem entsprechend zu drei Temperaturkarten synthetisiert. Die im Juli auf den Messstrecken „Aasee“ und „Kinderbach“ erhobenen Daten beschreiben allerdings nur den nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets mit der zusätzlichen Einschränkung, dass die akustische Temperatur bei diesen Messungen noch nicht erfasst wurde. Sämtliche geeigneten Temperaturdaten des Monats August wurden während des Hochs „Michaela“ aufgenommen, beinhalten die Berechnung der Lufttemperatur aus der akustischen Temperatur und beschreiben das Untersuchungsgebiet flächendeckend. Im September erfolgten die zur Auswertung nutzbaren Fahrten auf den Strecken „Kinderbach“, „Schleuse“ und „Hafen“.

Die Verschneidung der einzelnen Karten erfolgte über eine Mittelwertbildung zwischen benachbarten GPS-Punkten. Der zulässige Abstand wurde hierzu sowohl bei den Längenkoordinaten, als auch bei den Breitenkoordinaten auf maximal 20 Meter festgelegt. In der Folge der Verschneidung wurden allerdings die Temperaturprofile der einzelnen Messungen leicht geglättet und einzelne Daten gingen verloren, da sie wegen zu großer Abstände zwischen den GPS-Punkten nicht zur Mittelwertbildung herangezogen werden konnten.

Neun der 20 Nachtfahrten eignen sich für die Analyse der berechneten echten Luftbewegung. In drei Nächten fiel der Empfang der GPS-Daten vollständig aus und bei drei weiteren Touren waren die Koordinatenangaben für die Windberechnung zu ungenau. Darüber

hinaus benetzten am nebeligen Morgen des 10.08.2003 Wassertropfen die Sensoren des Ultraschall-Anemometers und führten zu verfälschten Messungen. Während der drei Nachtfahrten vom 16.07., 21.07. und 22.08.2003 wurden wiederum relativ hohe Windgeschwindigkeiten von durchschnittlich 0,75 bis 1,20 Metern pro Sekunde festgestellt, wobei die städtische Wärmeinsel in diesen Fällen kaum ausgeprägt war. Diese ist jedoch Voraussetzung für thermisch induzierte Luftbewegungen wie dem Flurwind⁹⁵ und dementsprechend wurden die Datensätze ebenfalls nicht zur Analyse der Schwachwindsituation herangezogen. Die Ergebnisse der Nachtfahrt vom 05.09.2003 blieben unberücksichtigt, weil der Empfang von GPS-Koordinaten nach kurzer Fahrstrecke ausfiel.

Eine gute Eignung für die Analyse der Schwachwindsituation während einer ausgeprägten städtischen Wärmeinsel bieten die jeweils doppelten Befahrungen der Messrouten „Aasee“ (11.07. und 08.08.03), „Hafen“ (09.08. und 06.09.03), „Kinderbach“ (15.07. und 12.08.03) sowie „Schleuse“ (05.08. und 16.09.03). Die zusätzliche Einbindung der Messfahrt entlang der Route „Stadt“ vom 04.08.2003 in die Analyse erfolgte trotz der relativ hohen festgestellten Windgeschwindigkeit von durchschnittlich 0,85 Metern pro Sekunde, da das städtische Windfeld in Strahlungsnächten typischerweise höhere durchschnittliche Windgeschwindigkeiten als das des Umlands aufweist.⁹⁶

5.1 Luftbewegungen und Temperaturunterschiede der nächtlichen Messfahrten

5.1.1 Messstrecke „Aasee“

Auf der Messfahrt entlang der Route „Aasee“ werden am 11.07.2003 Luftbewegungen mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 0,4 Metern pro Sekunde festgestellt. Während im offenen Freiland, wie am Dingbänger Weg, dem Ramertsweg und an Teilen der Sentruper Straße ein gleichmäßiger Ostwind weht, ist die Innenstadt an diesem Morgen vielerorts von turbulenten Luftbewegungen geprägt. Wie Karte 1d veranschaulicht, folgt der Wind an der Windhorststraße allerdings dem Straßenverlauf in Richtung historischer Altstadt und am Kanonengraben weht ein schwacher Luftzug in südliche Richtungen. Auffällig ist auch der auf die Innenstadt ausgerichtete Wind an der Torminbrücke über dem Aasee.

⁹⁵ Vgl.: KIESE 1996, S. 50

⁹⁶ Vgl.: KUTTLER 1998, S. 149

Im Stadtteil Gievenbeck bewegt sich die Luft an der Roxeler Straße nach Osten auf die Stadt zu, an der Von-Esmarch-Straße hingegen nach Norden und am westlichen Ende des Siedlungsgebiets nach Nordwesten.

Im unbebauten Freiland weht der Wind vorwiegend nach Westen, allerdings nicht überall. So streuen die Windvektoren an der Roxeler Straße um nördliche Richtungen und an der Sentruper Straße weisen sie im Aatal parallel zur Längsachse des Tals nach Südosten. Während die stark abgekühlte Luft im Aatal an der Sentruper Straße noch entlang des natürlichen Gefälles zum Zufluss der Aa in den Aasee bei Haus Kump fließt zeigen die Windvektoren an der parallel zum südlichen Aasee verlaufenden Mecklenbecker Straße in südliche bis südöstliche Richtungen. An dieser Stelle bewegt sich die kalte Luft entgegen dem natürlichen Gefälle in das Siedlungsgebiet hinein.

Am 08.08.2003 weht die Kaltluft am südlichen Aasee erneut in das Geistviertel. Laut Karte 2d allerdings mit deutlich höherer Geschwindigkeit. Und auch am mittleren Teil des Aasees und der Torminbrücke sowie im Aatal an der Sentruper Straße bewegt sich die Luft in Richtung der Südstadt. An dem Weg um Haus Kump und dem anschließenden parallel zum Aatal führenden Reiner-Klimke-Weg zeigen die Windvektoren nach Süden bis Westen, und damit genau entgegengesetzt zu denen am Aasee südlich des Zoos. Da das Gelände in diesem Bereich einen Hügel hat und die Vektoren vorwiegend in die Richtung des stärksten natürlichen Gefälles zeigen, beschreiben die Windvektoren hier den gravitativen Abfluss abgekühlter Luft in tiefere Geländebereiche.

Am Dingbänger Weg, am Ramertsweg und im offenen Freiland am Gievenbach zeigt sich in Karte 2d wieder ein Westwind. Die Luftbewegung zerstört laut Karte 2c aber weder im Tal der Aa, noch in der Senke des Gievenbachs die dortigen Kaltluftseen. In Gievenbeck bewegt sich die relativ kalte Luft am parallel zum Gievenbach verlaufenden Rüschausweg nach Osten entlang dem natürlichen Gefälle dieses Weges auf das deutlich wärmere Stadtteilzentrum am der Von-Esmarch-Straße zu. Östlich des lokalen Wärmezentrums dreht der Wind allerdings seine Richtung und weht wie auch am 11.07.2003 an diesem Abschnitt der Von-Esmarch-Straße nach Norden und an der Roxeler Straße wiederum nach Süden. In der Innenstadt zeigen sich erneut turbulente Luftbewegungen. Bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 0,44 Metern pro Sekunde treten hier Böen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 2,6 Metern pro Sekunde auf. Karte 2c verdeutlicht außerdem den Temperaturunterschied von etwa zwei Kelvin zwischen dem Grüngürtel an der Promenade und dem hoch verdichteten Prinzipalmarkt. Für den punktuellen Temperatursprung am Kolde-

Ring scheint ein vorbeifahrendes Kraftfahrzeug verantwortlich gewesen zu sein, denn an derselben Position weist Karte 2d eine deutliche Windböe aus.

5.1.2 Messstrecke „Hafen“

Die Windmessung auf der Strecke „Hafen“ am 09.08.2003 zeigt bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 0,54 Metern pro Sekunde eine turbulente Innenstadatmosphäre mit ständig wechselnden Windrichtungen, deren Windböen bis zu 3,7 Meter pro Sekunde schnell sind. An der Aegidiistraße und an der Windhorsttrasse folgt der Luftzug allerdings dem Straßenverlauf in Richtung des wärmeren Domplatzes. An der Kreuzung der Windhorststraße mit der Promenade verdeutlicht Karte 3c mit dem dortigen Temperaturabfall den lokalklimatischen Einfluss solcher Grünelemente in der Stadt.

Darüber hinaus fallen Windböen am Albersloher Weg auf. Diese wehen überwiegend nach Nordwesten auf das wärmere Stadtgebiet zu. Im daran anschließenden Streckenabschnitt an der Loddenheide, der im Vergleich zur Innenstadt rund drei Kelvin kälter als diese ist, bewegt sich die Luft am Anfang immer noch turbulent, weiter südlich weisen die Windvektoren in nordwestliche bis nordöstliche Richtungen.

An der Schillerstraße weht der Wind gleichmäßig nach Westen. Die Verlängerungen der Schillerstraße in das Umland, der Lütkenbecker Weg und der Lindberghweg, sind sowohl von systematisch wechselnden Windrichtungen, als auch von deutlich schwankenden Lufttemperaturen geprägt. So zeigen die Windvektoren an der Überquerung des Lütkenbecker Wegs über den Dortmund-Ems-Kanal ebenso wie an der Kanalbrücke des Albersloher Wegs einen dem Verlauf des Kanals folgenden Luftstrom nach Nordosten an. Nur wenige Dekameter weiter stadtauswärts weht auf dem Lütkenbecker Weg ein abgekühltes Luftpaket nach Südwesten, während sich die warme Luft an der Brücke über die Umgehungsstraße nach Norden bewegt. An dieser Stelle veranschaulicht der Anstieg der Lufttemperatur den lokalklimatischen Einfluss einer einzelnen großen Straße.

Karte 3d zeigt im Stadtteil Mauritz sowohl an der Schmittingheide, als auch an der Mondstraße einen Südostwind an. Diese Luftbewegung setzt sich allerdings nicht auf die intensiv abgekühlte stadtauswärtige Seite des Bahndamms fort. Dem entsprechend ist es an der Mondstraße rund 4,5 Kelvin kälter als am nur 750 Meter entfernten Haus-Kleve-Weg. Der starke Temperaturgradient an der Unterquerung der Wolbecker Straße unter den Eisenbahndamm bestätigt zusätzlich die Barrierewirkung der Trasse.

Der südlich der Schmittingheide durch das ebenfalls recht stark abgekühlte Freiland führende Heumannsweg wurde etwa 20 Minuten später als die Schmittingheide befahren. Im Übergangsbereich der beiden Straßen zeigen die Windvektoren am Heumannsweg noch deutlich nach Südosten, der Luftzug schwächt sich in der Mitte des Heumannswegs allerdings ab, so dass der Westwind auf Karte 3d an dieser Stelle kaum mehr identifizierbar ist. Im südlichen Straßenabschnitt wird der Luftzug wieder kräftiger und weht nach Nordosten. Ein Vergleich der Lufttemperaturen in Karte 3c mit den Luftbewegungen in Karte 3d zeigt, dass der Bahndamm die westlich von ihm entstehende und entlang des natürlichen Gefälles auf ihn zufließende Kaltluft offensichtlich staut.

Auf der östlichen Seite des Bahndamms ist die Luft sowohl bei Haus Kleve als auch am Kaldenhofer Weg und im tief eingeschnittenen Tal des Lohhausbachs um bis zu sieben Kelvin kälter als im städtischen Wärmezentrum. Während sich die bodennahe Atmosphäre in diesen Bereichen kaum bewegt, weht an der Wolbecker Straße ein leichter Nordostwind. Am Haferlandweg und am Kaldenhofer Weg nördlich von Gremmendorf weisen die Windvektoren nach Westen und zeigen damit eine im Vergleich zum westlich des Bahndamms verlaufenden Heumannsweg fast gegensätzliche Luftbewegung an.

Am 06.09.2003 ist die Atmosphäre in der Innenstadt deutlich weniger turbulent als am 09.08.2003 und auch der maximale Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland fällt an diesem Morgen mit etwa vier Kelvin schwächer aus als ein Monat zuvor. An der Aegidiistraße und der Windhorststrasse folgt der Luftzug allerdings wieder dem Straßenverlauf in Richtung des wärmeren Domplatzes.

Über dem Albersloher Weg und der Loddenheide fließt die Luft gleichmäßig nach Westen auf die Südstadt zu. Dem gegenüber zeigt sich an der weitgehend parallel dazu verlaufenden Strecke von der Schillerstraße über den Lütkenbecker Weg bis zum Lindberghweg wie schon am 09.08.2003 ein uneinheitliches Windfeld. Während die Vektoren an der Schillerstraße nach Norden bis Nordwesten weisen, herrscht am Lütkenbecker Weg und am Lindberghweg weitgehend Windstille. Nur an den Brücken des Lütkenbecker Wegs über den Dortmund-Ems-Kanal und die Umgehungsstraße ist in Karte 4d ein Luftzug in südwestliche Richtungen zu erkennen.

Am Heumannsweg fließt die abgekühlte Luft an diesem Morgen entgegen dem natürlichen Gefälle nach Westen bis Südwesten. Und auch auf der östlichen Seite des Bahndamms setzen sich diese Windrichtungen an vielen Stellen fort. In Gremmendorf weht allerdings

am den Bahndamm begleitenden Münnichweg und am dortigen Abschnitt des Albersloher Wegs ein Nordwind.

5.1.3 Messstrecke „Kinderbach“

Mit der Befahrung der Messstrecke „Kinderbach“ am 15.07.2003 wurde ein laut Karte 5d überwiegend nach Süden bis Westen wehendes Windfeld erfasst. Während der Wind am aufgeheizten Prinzipalmarkt häufig seine Richtung wechselt, weisen die Windvektoren an der Aegidiistraße und an der etwa 1,5 Stunden später befahrenen Promenade vor dem Schloss stadtauswärts nach Südwesten bis Westen.

Bei einer maximal aufgetretenen Windgeschwindigkeit von 2,5 Metern pro Sekunde beträgt das Mittel an diesem Morgen 0,48 Meter pro Sekunde. Auffällig sind die relativ starken Nord- und Nordostwinde an der Busso-Peus-Straße und der Von-Esmarch-Straße in Gievenbeck sowie nördlich des Stadtteils am Horstmarer Landweg und an der Steinfurter Straße. Die Luft im Siedlungsgebiet von Gievenbeck bewegt sich dem gegenüber deutlich langsamer und mit wechselnden Windrichtungen.

In den im Vergleich zur Innenstadt vier bis fünf Kelvin stärker abgekühlten Freilandbereichen an der Gasselstiege und an der Wienburgstraße bewegt sich die Luft an diesem Morgen ebenfalls kaum. Dem gegenüber beschreiben die Windvektoren an der Kanalstraße einen Zufluss von stark abgekühlter Luft aus dem nördlichen Aatal in Richtung der Stadt. Die in Karte 5c dargestellte Abkühlung an der innerstädtischen Kanalstraße ist allerdings kein Ergebnis eines Kaltluftzuflusses, sondern resultiert aus der in Kapitel 4.3.1.1 beschriebenen Trägheit der Temperaturmessung mit dem Pt100-Thermometer.

Am 12.08.2003 ist die Kanalstraße laut Karte 6c im Freilandbereich um vier bis fünf Kelvin kälter als ihr innerstädtischer Abschnitt. Die Erwärmung der Luft erfolgt dabei erst mit Eintritt der Messstrecke in das beidseitig bebaute Gebiet. Dort steigt die Lufttemperatur allerdings innerhalb von nur 750 Meter um vier Kelvin. Der Wind lässt sich an der Kanalstraße nicht genau analysieren, da dessen Berechnung auf diesem Streckenabschnitt durch ungenaue GPS-Koordinaten verfälscht wurde. Karte 6d weist dem entsprechend lange Windvektoren an der Kanalstraße aus. Laut dem Feldbuch können darüber hinaus einzelne stadteinwärts weisende Windböen aus dem Fahrtwind von direkt am Messanhänger vorbeigefahrenen Kraftfahrzeugen resultieren. An den übrigen Messstrecken bewegt sich die

Luft im Mittel mit 0,50 Metern pro Sekunde, wobei vereinzelte Böen mit einer Geschwindigkeit bis zu 3,0 Meter pro Sekunde auftreten.

Während der Wind im heißen Stadtzentrum seine Richtung häufig wechselt, weisen die Vektoren an der Kreuzung der Steinfurter Straße mit dem Ring bei beiden Befahrungen in östliche Richtungen. Hier stammt die Luft unter anderem aus dem westlichen Kinderbachtal. Wie die Windvektoren auf dem folgenden Teilstück der Messstrecke entlang des Orleans-Rings, des Horstmarer Landwegs und der Apfelstaedtstraße sowie der Busso-Peus-Straße anzeigen, folgt die abgekühlte Luft dort im wesentlichen dem natürlichen Gefälle des Kinderbachtals bis zur Kreuzung der Steinfurter Straße mit dem York-Ring. Die an diesem Morgen in der Talsenke beobachtete Bewegung von bodennahen Nebelfeldern bestätigt zusätzlich die Wirkung des Kinderbachtals als Kaltluftleitbahn.

In Gievenbeck, wo die Luft nur 0,5 bis 1,5 Kelvin kälter als auf dem Domplatz ist, kommt der Wind am Breilbusch und am Gescherweg aus Nordwesten und an der Von-Esmarch-Straße im Zentrum aus westlichen bis südwestlichen Richtungen. Die stark abgekühlte Luft am Horstmarer Landweg nördlich von Gievenbeck fließt dem gegenüber nach Nordosten.

Das relativ warme Freiland zwischen Nienberge und Kinderhaus zeigt ebenso wie das südlich von Kinderhaus stark abgekühlte Gelände an der Gasselstiege einen stadtauswärts gerichteten Luftzug.

Die Fahrt vom 15.09.2003 lieferte wegen eines anfänglichen Ausfalls des GPS-Empfangs nur für einen Teil der Messstrecke Ergebnisse. Da die Bestimmung der GPS-Koordinaten im anschließenden Streckenabschnitt aber immer noch von Ungenauigkeiten begleitet war, lassen sich die in Karte 7d dargestellten Windvektoren nicht eindeutig auswerten.

Für die Zuordnung der nächtlichen Lufttemperaturunterschiede waren die ermittelten Positionen allerdings noch genau genug. Laut Karte 7c stellt sich für die erfassten Bereiche ein ähnliches Bild der Temperaturunterschiede wie am 12.08.2003 dar, allerdings fallen die Temperaturunterschiede insgesamt schwächer aus als noch einen Monat zuvor.

5.1.4 Messstrecke „Schleuse“

Auf der Route „Schleuse“ werden am 05.08.2003 Luftbewegungen mit einer mittleren Geschwindigkeit von 0,60 Metern pro Sekunde festgestellt, die sowohl im Freiland, als auch innerhalb des Stadtzentrums vorwiegend aus nördlichen Richtungen wehen. Am innerstädtischen Abschnitt der Warendorfer Straße zeigen die Windvektoren Turbulenzen an, die

allerdings von direkt am Messanhänger vorbeifahrenden Kraftfahrzeugen ausgelöst wurden. Darüber hinaus fallen in Karte 8d an der außerstädtischen Kanalstraße sowie im Stadtteil Coerde überdurchschnittlich lange Windvektoren auf. Diese stellen allerdings keine Windböen dar, sondern resultieren aus der an diesem Morgen immer wiederkehrenden kurzfristigen Nichterfassung neuer GPS-Koordinaten.

Die Winddaten aus Karte 8d lassen sich nur bedingt mit den Temperaturinformationen aus Karte 8c vergleichen, denn letztere sind wegen eines Ausfalls des Pt100-Thermometers am 05.08.2003 einen Tag später erfasst worden. Bei dieser Messung waren die empfangenen GPS-Koordinaten hingegen kontinuierlich so ungenau, dass mit ihnen wiederum keine Winde berechnet werden konnten. Da das am 05.08.2003 erfasste Temperaturprofil jedoch eine große Übereinstimmung mit dem wenige Tage später am 11.08.2003 gemessenen Lufttemperaturen aufweist und es in diesem Zeitraum zu keiner Änderung der Wetterlage gekommen ist, wird davon ausgegangen, dass das in Karte 8c dargestellte Temperaturprofil im Wesentlichen auch für den 06.08.2003 gültig ist.

Die Luft ist an der innerstädtischen Warendorfer Straße am 05.08.2003 nahezu ebenso hoch erhitzt wie in der historischen Altstadt. Das Gewebegebiet am Nevinghoff und das Zentrum von Coerde stellen sich ebenfalls als relativ warme Gebiete dar. Und selbst das Freiland um den Stadtteil Sankt Mauritz sowie zwischen Coerde und der Innenstadt kühlt sich laut Karte 8c nur um 2,5 bis drei Kelvin unter die Lufttemperatur des Domplatzes ab. Intensiver abgekühlte Luftpakete finden sich nur vereinzelt und sehr kleinräumig, wie zum Beispiel an der Überquerung der Straße Zum Rieselfeld über die nördliche Aa.

Während die Luft an der Kanalstraße am 06.08.2003 dem Straßenverlauf in Richtung Stadt folgt, weht der Wind im gesamten Stadtteil Coerde aus westlichen Richtungen. In dem kleinen Freilandbereich am Hoppengarten ist in Karte 8d kaum eine Luftbewegung erkennlich. Östlich der Kanalschleuse kommt der Luftzug dann aus Norden und am parallel zum Dortmund-Ems-Kanal verlaufenden Wilhelmshavenufer bewegt sich die Luft schließlich nach Südwesten bis Westen auf die Stadt zu. Auf der Brücke der Warendorfer Straße über den Kanal weisen die Windvektoren allerdings wieder deutlich nach Süden. Der stärkere Nordwind hebt sich in auch an der der Kanalbrücke der Straße Zum Guten Hirten vom umgebenden schwächeren Windfeld ab.

Am 11.08.2003 sind die Windberechnungen wieder von ungenauen GPS-Koordinaten beeinflusst. Ungeachtet der vielen daraus resultierenden überlangen Windvektoren veranschaulicht Karte 9d die Existenz eines vorwiegend nach Westen wehenden Windfeldes.

Dies ist auch an der außerstädtischen Kanalstraße zu erkennen. Wie der Vergleich von Karte 9c mit Karte 6c veranschaulicht, ist die dort gemessene Lufttemperatur an diesem Morgen rund drei Kelvin wärmer als einen Tag später. An der innerstädtischen Kanalstraße dreht sich die Windrichtung ab der Stelle, wo die Straße von hohen Häuserzeilen begleitet ist, abrupt auf Süd. Und auch an dieser Stelle verdeutlichen die Karten 9c und 6c den abkühlenden Effekt der vom Stadtrand einströmenden Luftmassen.

An der Neubrückenstraße und der Aegidiistraße fließt die Luft ebenfalls den Straßenschluchten folgend nach Süden. Im offeneren Gelände an der Himmelreichallee weht der Wind dann wieder nach Südwesten bis Westen.

Die Luft an der Himmelreichallee ist an diesem Morgen genau so warm wie auf dem Domplatz, während sie drei Tage vorher, wie aus den Karten 2c und 2d entnommen werden kann, in Verbindung mit einem schwachen Westwind etwa zwei Kelvin kälter als dieser war. Und auch im Gebiet um die Kreuzung der Warendorfer Straße mit dem Schiffahrter Damm ist die Luft an diesem Tag rund ein halbes Kelvin kälter als am 06.08.2003, was auf die an diesem Morgen mit einem leichten Ostwind zugeführte Luft aus dem Umland zurückgeführt werden kann. Auffällig ist außerdem die intensiv abgekühlte Luft im direkt an das Gewerbegebiet Nevinghoff grenzenden nördlichen Aatal.

Die Messfahrt vom 16.09.2003 erfasste gleichmäßig schwache Luftbewegungen, die im Mittel 0,53 Meter pro Sekunde schnell sind und, wie Karte 10d veranschaulicht, in verschiedene Richtungen wehen. Das stark aufgeheizte Wärmezentrum beschränkt sich an diesem Morgen auf die historische Altstadt. Dem gegenüber ist die Luft an der innerstädtischen Warendorfer Straße bereits bis zu zwei Kelvin kälter. Laut Karte 10c treten am Stadtrand und innerhalb des Umlands nur geringe Temperaturschwankungen auf.

Während sich die Luft an der innerstädtischen Kanalstraße nach Süden auf das Stadtzentrum zu bewegt, kommt der Luftzug im Außenbereich der Straße aus Nordwesten bis Westen. Die dort vereinzelt auftretenden, nach Nordwesten wehenden Windböen wurden von den Anhänger überholenden Kraftfahrzeugen verursacht. Die Windvektoren im Gewerbegebiet am Nevinghoff weisen klar entlang des dort vorhandenen natürlichen Gefälles zum nördlichen Aatal. Dem gegenüber bewegt sich die Luft im Stadtteil Coerde sowohl an der Königsberger Straße, als auch an der Gartenstraße weitgehend gleichmäßig in westliche bis südwestliche Richtungen. Diese Windrichtung setzt sich im gesamten östlichen Stadtrand vom Schiffahrter Damm über den Hoppengarten und das den Kanal begleitende Wilhelmshavenufer bis Zum Guten Hirten fort. An der Pleistermühle im Freiland von Sankt Mauritz

fließt die abgekühlte Luft hingegen weitgehend dem natürlichen Gefälle folgend nach Südwesten.

5.1.5 Messstrecke „Stadt“

Das am Morgen des 04.08.2003 auf der Messstrecke „Stadt“ erfasste Windfeld ist ausgesprochen turbulent. In Karte 11d lassen sich aber dennoch an einigen Straßen vorwiegende Windrichtungen ermitteln. So fließt die Luft an der Steinfurter Straße dem Straßenverlauf folgend auf die Innenstadt zu und auch an der Kanalstraße und der Neubrückenstraße zeigen die Windvektoren vorwiegend in südwestliche Richtungen. Außerdem lassen sich noch an den beiden parallel zum südlichen Gleiskörper der Eisenbahn verlaufenden Messstrecken Luftbewegungen in südliche Richtungen identifizieren. Wie Karte 11c veranschaulicht, erstreckt sich das städtische Hitzezentrum an diesem Morgen von der historischen Altstadt über den Ludgerikreisel bis zum Inselbogen in der Südstadt und reicht von der Weseler Straße im Westen bis zum Industriegeweg an der Halle Münsterland. Auffällig ist die intensive Abkühlung am parallel zum Kinderbach führenden Orleans-Ring. Obwohl die Windvektoren an dieser Stelle keine eindeutigen Hinweise auf eine gerichtete Luftbewegung geben, lässt der große Temperaturunterschied von etwa vier Kelvin gegenüber dem Hitzezentrum nur auf einen Zufluss von Kaltluft aus dem westlichen Kinderbachtal schließen.

5.2 Abkühlungsbeträge

Zwischen den in Karte 12 im Anhang dargestellten relativen Abkühlungsbeträgen und der in Karte 13 aufgetragenen Wärmeinselintensität vom Juli 2003 zeigen sich überwiegend Unterschiede von bis zu 0,5 Kelvin, was veranschaulicht, dass die Differenzen der Abkühlungsbeträge im Wesentlichen die unterschiedlichen Nachttemperaturen widerspiegeln. Prinzipiell können Abweichungen von bis zu 0,5 Kelvin als Rundungseffekt aus der Einordnung der relativen Nachttemperaturen und relativen Abkühlungsbeträge in eine Skala mit 0,5 Kelvin Schritten resultieren. Größere Unterschiede liegen an der Variabilität der Tagestemperaturen. Diese wiesen laut den Karten 1a und 5a auf den entsprechenden Tagesfahrten am 05. und 14. Juli 2003 jeweils Schwankungsbreiten von etwa 1,5 Kelvin auf.

Im nordwestlichen Abschnitt der Gasselstiege fällt in Karte 12 auf, dass die relative Abkühlung dort etwa 1,0 Kelvin geringer ist als die für diesen Bereich in Karte 13 angegebene

nen Differenzen der Nachttemperaturen. Die Messstrecke ist in diesem Bereich von Bäumen umstanden und da ein Großteil der Solarstrahlung folglich im Kronendach in Wärme umgesetzt wird, erwärmt sich die darunter befindliche bodennahe Luft hier weniger als im offenen Gelände. Aus der niedrigeren Tagestemperatur resultiert nun die im Vergleich zur relativen Nachttemperatur geringere relative Abkühlung.

Die ermittelten Abkühlungsbeträge der Lufttemperatur eignen sich somit nicht so gut für die Analyse der nächtlichen Temperaturanomalien wie die alleinige Zugrundelegung der nächtlichen Lufttemperaturen. Dem entsprechend werden im Folgenden auch nur die Ergebnisse der verschiedenen geeigneten Nachtfahrten dargestellt und diskutiert. Die auf den Tagfahrten gemessenen Lufttemperaturen sind allerdings ebenso wie die in den Monaten August und September ermittelten Abkühlungsbeträge auf entsprechenden Karten im Anhang angefügt.

5.3 Temperaturanomalien im Stadtgebiet

5.3.1 Juli 2003

Mit den beiden am 6. und 15. Juli 2003 frühmorgens durchgeführten Messfahrten entlang der Routen „Aasee“ und „Kinderbach“ wurde der nordwestliche Bereich des Untersuchungsgebiets erfasst. Karte 13 stellt die mit dem Pt100-Thermometer erfassten Nachttemperaturen als Differenzen zum Domplatz dar und veranschaulicht, dass die heißesten Areale des Stadtzentrums zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs bis zu 5,5 Kelvin wärmer als die kältesten Bereiche des Umlands sind. Die höchsten Lufttemperaturen zeigt die städtebaulich hoch verdichtete und zu 60 bis 80 Prozent versiegelte östliche Hälfte der historischen Altstadt. Rund ein Kelvin kühler ist die westliche Altstadt zwischen der Aegidiistraße und der Münzstraße, sowie der größte Teil aller sonstigen Messabschnitte innerhalb des Ringstraßensystems. An der Promenade zwischen dem Aegidiitor und der Hüfferstraße und der ebenfalls von innerstädtischen Grünflächen begleiteten Annetteallee ist die nächtliche Lufttemperatur ein weiteres Kelvin kälter.

Die auffällig stark abgekühlte Lufttemperatur an der innerstädtischen Kanalstraße resultiert, wie in Kapitel 4.3.1.1 beschrieben aus der trägen Reaktion des Pt100-Thermometers.

Ein markantes Areal befindet sich im Bereich von der Kreuzung der Steinfurter Straße mit dem York-Ring bis zum Freiland an der Gasselstiege. Die Kaltluft aus dem nördlichen

Kinderbachtal grenzt hier sehr eng an die aufgeheizte Stadtatmosphäre und erzeugt einen Temperaturunterschied von vier Kelvin innerhalb weniger hundert Meter.

Weitgehend gleich bleibt hingegen die nächtliche Lufttemperatur auf der sowohl durch Siedlungsgebiet, als auch am Siedlungsrand entlang führende Strecke vom Beginn des Horstmarer Landwegs über die Apffelstaedtstraße und die Busso-Peus-Straße bis zum nordwestlichen Siedlungsrand des Stadtteils Gievenbeck. Die Temperaturen liegen in diesem Bereich rund 1,5 bis 2,5 Kelvin unter der Referenztemperatur am Domplatz.

Das westliche Aatal stellt ein großflächiges Abkühlungsgebiet dar. Nachts sinkt die Lufttemperatur hier um vier, in den Bachtälern der Aa sogar um bis zu fünf Kelvin mehr ab als im Stadtzentrum. Auf der Strecke von Haus Kump über die Mecklenbecker Straße bis zum Kardinal-von-Galen-Ring steigt die nächtliche Lufttemperatur wiederum gleichmäßig um 2,5 Kelvin an.

5.3.2 August 2003

Während des Anfang August 2003 aufgetretenen und über eine Woche andauernden Hochs „Michaela“ wurde das gesamte Untersuchungsgebiet auf jeweils sechs täglichen und nächtlichen Messfahrten erfasst. Für die Ermittlung der Lufttemperatur kamen sowohl das Pt100-Thermometer, als auch das Ultraschall-Anemometer zum Einsatz.

Das städtischen Wärmezentrum erstreckt sich, wie Karte 15 veranschaulicht, von der historischen Altstadt über den Bahnhof und den Hafen bis weit in das Süd- und Geistviertel. Zwischen den heißesten Bereichen am Prinzipalmarkt und an der Hammer Straße und dem unbebauten Freiland zeigt sich ein maximaler Temperaturunterschied von 7,86 Kelvin. An das Wärmezentrum schließt ein etwa ein Kelvin kühlerer Bereich an, der im Westen und Norden der Innenstadt vom Ringstraßensystem begrenzt wird, im Osten entlang der Warendorfer Straße und im Südosten entlang des Albersloher Wegs bis etwa an den Dortmund-Ems-Kanal reicht. Außerhalb dieses Areal befinden sich die wärmsten Gebiete mit einer im Vergleich zum Zentrum etwa 1,5 Kelvin stärkeren nächtlichen Abkühlung in Gievenbeck an der Von-Esmarch-Straße und dem Gescherweg und in Coerde an der Königsberger Straße.

Das westlichen Aatal und das Freiland zwischen den Stadtteilen Gremmendorf und Mauritiz stellen ausgedehnte Kaltluftentstehungsgebiete dar. Während sich die Luft im Aatal weiträumig um rund vier Kelvin und in den Talsenken um bis zu sechs Kelvin stärker als

über dem Domplatz abkühlt, wird dieses Abkühlungspotenzial vom unbebauten Gebiet zwischen Mauritz und Gremmendorf noch übertroffen. Die Lufttemperatur sinkt hier nachts an vielen Stellen um fünf Kelvin, bei Haus Kleve sogar um 6,8 Kelvin unter die Referenztemperatur am Domplatz. Auffällig ist außerdem die dicht an das Stadtgebiet reichende relativ kalte Luft im Freiland östlich des Stadthafens.

Wesentlich kleinere, aber ebenfalls abkühlungsintensive Areale sind die unbebauten Gebiete nördlich von Gievenbeck und an der Gasselstiege bei Kinderhaus, sowie der Wienburgpark. Die Luft ist hier nachts bis zu fünf Kelvin kälter als auf dem Domplatz. Im unbebauten Umland zwischen Coerde und Mauritz bleibt die Luft vergleichsweise warm und sinkt nur rund 2,5 bis 3,5 Kelvin unter die Referenztemperatur.

Während die Kaltluftpakete an der Gasselstiege und im Freiland östlich des Stadthafens sowie am südlichen Aasee sehr nahe an die aufgeheizte Stadtatmosphäre grenzen, ist der thermische Übergang des westlichen Aatals zu den Stadtteilen Gievenbeck und Sentruper Höhe von einem weitgehend gleichmäßigen Anstieg der Lufttemperatur geprägt.

5.3.3 September 2003

Im September fanden die zur Auswertung geeigneten Nachtfahrten am 06.09.2003 auf der Messroute „Hafen“ sowie am 15. und 16. September 2003 entlang der Strecken „Kinderbach“ und „Schleuse“ statt. Zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs besteht zwischen der historischen Altstadt und dem unbebauten Umland ein maximaler Unterschied der Lufttemperatur von fünf Kelvin. Wie aus Karte 15 zu entnehmen ist, dehnt sich das städtische Hitzezentrum von der historische Altstadt über die Windhorststraße, den Bahnhofsvorplatz, die von hohen Häusern begleitete südliche Hälfte der Bremer Straße und den Beginn des Albersloher Wegs nach Südosten sowie im Norden und Nordwesten bis zur innenstadtnahen Kanalstraße und zur Grevener Straße aus. Die Luft an den übrigen Messstrecken innerhalb des Ringstraßensystems ist etwa ein Kelvin kühler. Rund zwei Kelvin kälter als im Stadtzentrum ist es im Stadtgebiet an der Kreuzung der Warendorfer Straße mit dem Schiffahrter Damm, außerdem am Albersloher Weg südöstlich des Dortmund-Ems-Kanals und an der Loddenheide, sowie in Coerde, dem Gewerbegebiet am Nevinghoff und im Freiland westlich von Kinderhaus.

Mit einer Temperaturdifferenz von etwa vier Kelvin gegenüber der Lufttemperatur am Domplatz ist die Luft im Wienburgpark am intensivsten abgekühlt. In den anderen außerstädtischen Bereichen, wie dem Freiland an der Gasselstiege, das unbebaute Gelände zwi-

schen Mauritz und Gremmendorf und an der Pleistermühle, kühlt sich die Luft ein halbes bis ein Kelvin weniger stark ab.

6 Diskussion

Wie aus dem Vergleich der Karten 13, 14 und 15 entnommen werden kann, prägte sich die Wärmeinsel der Stadt Münster am intensivsten im August während des Hochs „Michaela“ aus. In diesem Zeitraum betrug der maximale nächtliche Temperaturunterschied zwischen dem städtischen Wärmezentrum und den Kaltluftentstehungsgebieten des Umlands mehr als 7,5 Kelvin, während bei Strahlungswetterlagen im Juli eine Temperaturdifferenz von 5,5 Kelvin und im September nur fünf Kelvin festgestellt wurden. Die im Juli erfassten Temperaturdaten können allerdings nicht eindeutig mit den im August und September ermittelten verglichen werden, da sie ausschließlich mit dem Pt100-Thermometer aufgenommen wurden. Stellt man allerdings die berechneten Lufttemperaturen der Monate August und September den zeitgleich vom Pt100-Thermometer erfassten Lufttemperaturen gegenüber, so zeigt sich, dass die Thermometerdaten im August einen um ein Kelvin und im September einen um 0,5 Kelvin geringeren maximalen Temperaturunterschied widerspiegeln. Im Juli 2003 wird die maximale Wärmeinselintensität folglich etwa sechs bis 6,5 Kelvin betragen haben.

Während die im Vergleich zum Juli und August geringere Intensität der Wärmeinsel im September auf die verminderte solare Einstrahlung und die kürzere Tageslänge zurückzuführen ist, liefern diese Argumente keinen Grund für die im Verhältnis zum Juli stärkere Ausprägung der städtischen Wärmeinsel im August. Als Ursache kann hingegen der mit dem Hoch „Michaela“ einhergegangene Zustrom heißer subtropischer Luftmassen gesehen werden. Dieser führte zu Tageshöchsttemperaturen von 28 bis 33° Celsius, während im Juli 23 bis 27° Celsius gemessen wurden. Höhere Lufttemperaturen vergrößern den Temperaturgradienten zwischen den Oberflächen der städtischen bzw. natürlichen Materialien und den darunter befindlichen kälteren Bereichen und verstärken somit die Wärmeleitung in den Bau- bzw. Bodenkörper. Da der städtische Baukörper wegen seiner thermischen Stoffeigenschaften Wärme im Mittel besser leiten und speichern kann als der Bodenkörper des Freilands, ist die städtische Wärmeinsel bei höheren Tagestemperaturen folglich intensiver ausgeprägt als bei geringeren.

Das ermittelte Wärmezentrum erstreckt sich von der historischen Altstadt und dem Bahnhofsbereich weit nach Süden in das Süd- und Geistviertel. Es ist somit im Süden deutlich

größer als in der Klimafunktionskarte des von der Stadt Münster veröffentlichten Umweltberichts 1993 angegeben.⁹⁷

Während die im Juli 2003 ermittelte maximale städtische Überwärmung gegenüber dem Umland von rund sechs Kelvin dem von KIESE für Münster berechneten Wert entspricht, wird sein Ergebnis im August 2003 um mehr als 1,5 Kelvin übertroffen.⁹⁸ Für seine Untersuchung nutzt KIESE das in Kapitel 2.2.2.3 beschriebene und von OKE entwickelte Modell. Dabei geht er von einem steilen Anstieg der Lufttemperatur um vier Kelvin innerhalb eines 1000 Meter breiten Übergangsbereichs der Stadt zum Umland, dem so genannten „Cliff“, und einer Temperaturerhöhung von einem Kelvin pro 1000 Meter im Bereich des „Plateaus“ bis zum Wärmezentrum aus.⁹⁹

Die angenommene Temperaturerhöhung innerhalb des „Plateaus“ wird von den Ergebnissen sämtlicher Messfahrten bestätigt. Allerdings konnte der ebenfalls vorausgesetzte steile Temperaturanstieg im Bereich des „Cliffs“ nur im Juli und August festgestellt werden, und zwar nur dort, wo unbebautes Freiland unmittelbar an ein hoch verdichtetes Areal der Stadt grenzt. Dies ist zwischen der innerstädtischen Steinfurter Straße und dem Freiland an der Gasselstiege, am südlichen Rand des Wienburgparks, im östlichen Umfeld des Stadthafens der Fall. Einen geringeren Temperaturgradienten von rund zwei Kelvin pro 1000 Meter zeigen die Stadtteile Gievenbeck und Sentruper Höhe bei ihren Übergängen zum Freiland sowie das Gewerbegebiet zwischen dem Albersloher Weg und der Loddenheide. An den übrigen Stadträndern wie im Bereich zwischen Coerde und Sankt Mauritz beträgt der Temperaturgradient nur noch etwa ein Kelvin pro 1000 Meter. Der von OKE in seinem Modell und von KIESE bei seiner stadtklimatischen Untersuchung Münsters angenommene steile Anstieg der Lufttemperatur um vier Kelvin im Bereich des Stadtrands wird mit den vorliegenden Messergebnissen somit nicht bestätigt. Die dennoch festgestellte Übereinstimmung der gemessenen mit der berechneten maximalen Wärmeinselintensität resultiert aus der unterschiedlichen Einbeziehung der Umlandtemperaturen in die jeweilige Analyse. Während KIESE in seiner Modellrechnung von einer einheitlichen Freilandtemperatur ausgeht, beruht die gemessene maximale Wärmeinselintensität auf dem Vergleich der heißen Innenstadtatmosphäre mit der geringsten Lufttemperatur des Umlands.

⁹⁷ Vgl.: STADT MÜNSTER 1994, Klimafunktionskarte

⁹⁸ Vgl.: KIESE 1990, S. 65

⁹⁹ Vgl.: KIESE 1990, S. 65

Die in Karte 16 dargestellten Luftbewegungen sind die überlagerten Ergebnisse von je zwei Messfahrten entlang der Strecken „Aasee“, „Hafen“, „Kinderbach“ und „Schleuse“. Aufgrund der Zugehörigkeit der Von-Esmarch-Straße in Gievenbeck und der Kanalstraße zu zwei verschiedenen Messrouten spiegeln die dort aufgetragenen Windvektoren sogar die Ergebnisse von vier Befahrungen wider. Laut den mit sieben immobilen Messstationen durchgeführten Untersuchungen von GATTWINKEL ist das stadt eigene Windfeld in Münster labil und unterliegt großen Windrichtungsschwankungen.¹⁰⁰ Dieser Aussage entsprechend ist in Karte 16 an vielen Streckenabschnitten ein deutliches Streuen der Windrichtungen zu erkennen. Allerdings finden sich auch Bereiche mit gleichgerichteten Luftbewegungen. Diese liegen alle unmittelbar am Stadtrand und zeigen in den meisten Fällen einen auf das Wärmezentrum der Stadt gerichteten Luftstrom an. Besonders deutlich ist dies im Südosten der Stadt am Albersloher Weg und an der Schillerstraße, im Süden am südlichen Aasee, im Westen an der parallel zum Kinderbach verlaufenden Apffelstaedtstraße und dem Horstmarer Landweg, im Norden an der Kanalstraße sowie im Nordosten an der Warendorfer Straße und am Wilhelmshavenufer. Nur in Mauritz, an der Straße Zum Guten Hirten und am Pleistermühlenweg bewegt sich die Luft während beider Fahrten nach Süden und damit nicht auf die Stadt zu. Ein am Stadtrand von der Stadt weg wehender Wind wird nur am 12.8.2003 im Freiland an der Gasselstiege festgestellt.

Offensichtlich erzeugt die Stadt ein auf ihr Hitzezentrum gerichtetes Windfeld, wobei die Luftströmung nur wenig in das unbebaute Umland hinaus reicht. Zu dem gleichen Ergebnis ist auch KIESE bei seiner Klimaanalyse der Stadt Münster gekommen.¹⁰¹ Während er aus seinen Untersuchungen allerdings eine Reichweite dieses Windfelds von bis zu 1,2 Kilometern ableitet, spiegeln die Windvektoren in Karte 16 eine kürzere Ausdehnung von wenigen hundert Metern wieder. Die von GATTWINKEL festgestellten Windrichtungsschwankungen resultieren deshalb möglicherweise aus der relativ großen Entfernung der meisten Messstationen zum Stadtrand.

Mit dem in die Stadt wehenden Wind wird relativ kalte Luft aus dem Freiland in die wärmere Stadtatmosphäre eingebracht. Ein daraus resultierender Abkühlungseffekt ist allerdings nur an wenigen Stellen eindeutig quantifizierbar. Dies liegt vor allem daran, dass zwischen den wiederholten Befahrungen der meisten Messstrecken mehrere Wochen Zeit vergingen und folglich leicht veränderte Lufttemperaturen nicht nur aus eventuell zuge-

¹⁰⁰ Vgl.: GATTWINKEL 1997, S. 63

¹⁰¹ Vgl.: STADT MÜNSTER 1992, S. 108

flossener Kaltluft, sondern ebenso aus den jahreszeitlich bedingten Änderungen der Strahlungsbilanzen resultieren können.

Einen sinnvollen Vergleich ermöglichen allerdings die am 06.08., 11.08. und 12.08.2003 durchgeführten nächtlichen Messungen, denn ihre Ergebnisse zeigen sowohl an der innerstädtischen Kanalstraße, als auch im Kreuzungsbereich der Warendorfer Straße mit dem Schiffahrter Damm und an der Himmelreichallee eine durch bodennahe Luftströmungen induzierte Modifizierung des Temperaturprofils an. So führt der aus dem Umland in die Stadt wehende Wind an der Kanalstraße zu einer Abkühlung der Lufttemperatur um etwa zwei Kelvin und an der Warendorfer Straße um ein halbes Kelvin. An der Himmelreichallee bewirkt der Zufluss warmer Luft aus der Innenstadt hingegen eine Erhöhung der Lufttemperatur um zwei Kelvin.

Da die meisten Menschen eine Erhöhung der Lufttemperatur um 0,9 Kelvin als einen Anstieg um 1,0 Kelvin wahrnehmen, wird die an der Kanalstraße festgestellte Reduktion der Lufttemperatur um etwa ein bis zwei Kelvin, ungeachtet von Änderungen der ebenfalls auf die empfundene Temperatur wirkenden meteorologischen Parameter Windgeschwindigkeit und Wasserdampfdruck, als eine Abkühlung um 1,1 bis 2,2 Kelvin wahrgenommen. Die mittlere Windgeschwindigkeit von rund 0,5 Metern pro Sekunde führt zu einer Verstärkung der empfundenen Abkühlung um knapp 0,5 Kelvin. Bei innerstädtischen Lufttemperaturen von 20 bis 23° Celsius zur Zeit des Sonnenaufgangs und bis zu 7,86 Kelvin kälteren Umlandtemperaturen ist die thermische Entlastung durch die eingeflossene Luft aus dem Umland für die Stadtbewohner eher gering.

Offensichtlich beschränkt sich die thermische Wirksamkeit der in die Stadt strömenden Luftmassen auf eine Reichweite von wenigen hundert Meter. Eine effektive Abkühlung der aufgeheizten Innenstadt kann somit nicht durch das von der städtischen Überwärmung induzierte Windfeld, sondern nur durch den advektiven Zustrom abgekühlter Luft aus dem Umland erfolgen.

Für die Versorgung der Stadt mit Kaltluft stehen im Südwesten und Südosten ausgedehnte, im Norden und Nordwesten deutlich kleinere Kaltluftentstehungsgebiete zur Verfügung. Während die Abkühlungspotenziale des westlichen Aatals, des westlichen Kinderbachtals und des unbebauten Areals an der Gasselstiege bereits seit vielen Jahren erkannt und entsprechend in die Karte „Klimafunktionsräume“ im Umweltbericht 1998 sowie im aktuellen

Umweltkataster¹⁰² der Stadt Münster eingetragen sind, wurden die abkühlungsintensiven Freilandbereiche zwischen Mauritz und Gremmendorf sowie bei Haus Kleve im Umweltbericht 1998 noch gar nicht, und im aktuellen Umweltkataster nur innerhalb eines schmalen Streifens westlich des Bahndamms als Kaltluftentstehungsgebiet ausgewiesen. Diese relativ späte und dazu kleinflächige Ausweisung überrascht, da bereits in der Infrarot-Thermalaufnahme des Stadtgebiets vom 03.03.1990 das hohe oberflächliche Abkühlungspotenzial der Freifläche südlich und östlich von Mauritz deutlich zu erkennen ist.¹⁰³

Der Bahndamm selbst wirkt als eine Barriere. Während er das thermisch induzierte Einströmen von Kaltluft aus dem östlichen Umland in den Stadtteil Mauritz verhindert, staut er im Freiland zwischen Mauritz und Gremmendorf die westlich von ihm entstehende und entlang des natürlichen Gefälles auf ihn zufließende Kaltluft zu einem Kaltluftsee.

Das Areal des heutigen Wienburgparks und das nördliche Aatal werden im Umweltbericht 1998 und im aktuellen Umweltkataster ebenfalls nicht als Kaltluftentstehungsgebiete dargestellt. Laut den Messergebnissen dieser Arbeit und der Infrarot-Thermalaufnahme vom 03.03.1990 ist das Abkühlungspotenzial dort allerdings größer als in den ausgewiesenen Kaltluftentstehungsgebieten an der Gasselstiege oder dem westlichen Kinderbachtal. Darüber hinaus wird dieser Bereich noch vom thermisch induzierten Windfeld der Stadt erfasst.

In der Klimafunktionskarte des von der Stadt Münster herausgegebenen Umweltberichts 1993 wird das gesamte westliche Kinderbachtal vom Umland bis zur Correnstrasse als Kaltluftleitbahn dargestellt. Dem gegenüber weist das aktuelle Umweltkataster eine auffällig kürzere, nur noch vom Umland bis zum Gievenbecker Sportpark reichende Leitbahn aus. Der Wechsel dieser Bewertung ist aus stadtklimatologischer Sicht nicht nachvollziehbar. Neben KIESE, der das gesamte westliche Kinderbachtal als Kaltluftleitbahn bewertet,¹⁰⁴ stellt auch GATTWINKEL im stadtnahen Teil des Kinderbachtals Kaltluftabflüsse fest.¹⁰⁵ Die Messergebnisse dieser Arbeit widersprechen ebenfalls der aktuellen Darstellung des Umweltkatasters und weisen insbesondere im stadtnahen Bereich des Kinderbachtals zwischen der Mendelstraße und dem Horstmarer Landweg die Funktion als Kaltluft-

¹⁰² Vgl.: <http://ukat.stadt-muenster.de/website/klima/viewer.htm>

¹⁰³ Vgl.: STADT MÜNSTER 1992, Karte 7.5

¹⁰⁴ Vgl.: KIESE 1992, Klimafunktionskarte

¹⁰⁵ Vgl.: Gattwinkel 1997, S. 64

leitbahn nach. Darüber hinaus belegen sie die Reichweite des Kaltluftstroms bis zur Kreuzung des Orleans-Rings mit der Steinfurter Straße.

7 Ausblick

Mit den Untersuchungen dieser Arbeit ist das thermische Profil des Stadtgebiets und des stadtnahen Umlands im Westen, Norden, Osten und Südosten von Münster erfasst worden. Offen geblieben ist hingegen die Ausprägung der Wärmeinsel am südlichen Stadtrand. Dieser Bereich sollte bei zukünftigen Untersuchungen vor allem wegen des weit nach Süden reichenden Hitzezentrums berücksichtigt werden.

Ein weiteres Ergebnis der Messungen ist die nur wenige hundert Meter in die Stadt reichende abkühlende Wirkung der aus dem Umland zugeflossenen kalten Luftmassen. Möglicherweise bewegt sich die Luft aber noch weiter in die Stadt hinein. Dies kann wegen der Erwärmung der Luftmassen allerdings nicht an ihrer Temperatur festgestellt werden. Da die Luft im Umland aufgrund der dortigen höheren Evapotranspiration in der Regel mehr Wasser als die Stadtluft enthält, ließe sich die Eindringtiefe von langsam zufließenden Luftmassen eventuell an Differenzen des Wasserdampfdrucks erkennen. Die für eine solche Analyse notwendigen Daten sind mit den Messfahrten dieser Arbeit erfasst, jedoch nicht aufgearbeitet worden.

Schließlich könnte die These, dass das thermisch induzierte städtische Windfeld nur wenige hundert Meter in das Umland der Stadt hinausreicht, mit Messungen überprüft werden. Hierzu würde sich ein kombinierter Einsatz von mobilen und stationären Messstationen anbieten. Geeignete Standorte für diesbezügliche Dauermessungen sind der Stadtrand am südlichen Aasee, die offene Anhöhe zwischen dem Mühlenhofmuseum und dem Naturkundemuseum am mittleren Aasee, der Albersloher Weg im Bereich zwischen dem Dortmund-Ems-Kanal und der Umgehungsstraße sowie das Wilhelmshavenufer und die Kanalstraße. Im westlichen oder nördlichen Kinderbachtal müssten stadtnahe Standorte gewählt werden, die eine Überlagerung der thermisch induzierten Luftströmungen mit gravitativen Kaltluftflüssen ausschließen. Um zu einer Aussage über die Reichweite des Flurwinds in das Umland zu gelangen wäre es dann sinnvoll, nicht nur einen Ring aus relativ stadtnahen Messstationen einzurichten, sondern jeder Station am Stadtrand eine zweite, etwa 500 Meter weiter außerhalb gelegene Station zuzuordnen. Sollte das thermisch induzierte Windfeld innerhalb dieser Entfernung eine Schwächung erfahren, würde sich dies an den Mess-

stationen des zweiten Rings durch stärkere Windrichtungsschwankungen bemerkbar machen.

Offen bleibt auch die Frage, warum die Kaltluftleitbahn „westliches Kinderbachtal“ im städtischen Umweltbericht 1993 noch vollständig, im aktuellen Umweltkataster der Stadt Münster hingegen entgegen wissenschaftlicher Erkenntnisse verkürzt dargestellt wird. Möglicherweise soll durch die zurückgenommene Ausweisung des stadtnahen Talbereichs der geplante Bau der Austermannstraße durch das Kinderbachtal politisch erleichtert werden. Während die Kaltluft derzeit noch entlang des Kinderbachtals bis zur Kreuzung des Tal des Orleans-Rings mit der Steinfurter Straße abfließen kann, würde ein das Tal durchquerender Straßendamm wie eine Barriere wirken und den Kaltluftabfluss deutlich einschränken.

8 Literatur

- BUSCH, PAUL (1990): Grundriss Allgemeine Geographie: Teil 1 Klimatologie. 2. Auflage. Schöningh. Paderborn
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2003a): WitterungsReport Daten. Juni 2003. DWD-Eigenverlag. Offenbach
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2003b): WitterungsReport Daten. Juli 2003. DWD-Eigenverlag. Offenbach
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2003c): WitterungsReport Daten. August 2003. DWD-Eigenverlag. Offenbach
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2003d): WitterungsReport Daten. September 2003. DWD-Eigenverlag. Offenbach
- FEZER, FRITZ (1995): Das Klima der Städte. 1. Auflage, Perthes, Gotha
- FOKEN, THOMAS (2003): Angewandte Meteorologie. Mikrometeorologische Methoden. Springer. Berlin, Heidelberg
- GATTWINKEL, MATTHIAS (1997): Stadtklimatologische Untersuchungen zu den Ursachen von Flurwinden am Beispiel der Stadt Münster. Diplomarbeit an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (unveröffentlicht)
- HÄCKEL, HANS (1999): Meteorologie. 4. Auflage. Ulmer. Stuttgart
- JENDRITZKY, GERD (1990): Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen. Fortgeschrittenes Klima-Michel-Modell. In: AKADEMIE FÜR RAUMFORSCHUNG UND LANDESPLANUNG (HRSG.): Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung 114. VSB-Verlagsservice. Braunschweig, 7-64
- JENDRITZKY, GERD ET AL. (1997): Die Mortalitätsstudie des Deutschen Wetterdienstes. In: DEUTSCHER WETTERDIENST (HRSG.): Annalen der Meteorologie. Band 33. DWD-Eigenverlag. Offenbach, 46-51

- KIESE, OLAF (1990): Stadtklimauntersuchung Münster. Die klimatische Funktion der Grünflächen und Grünelemente. Institut für Geographie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Münster
- KIESE, OLAF (1996): Luftaustauschprozesse im Ruhrgebiet. Ein Beitrag zur Klimatologie einer Region. In: HOLTMEIER, FRIEDRICH-KARL (HRSG.): Arbeiten aus dem Institut für Landschaftsökologie. Band 1. Münster, 47-74
- KRAUS, HELMUT (2000): Die Atmosphäre der Erde. Eine Einführung in die Meteorologie. Springer. Berlin
- KUTTLER, WILHELM (1998): Stadtklima. In: SUKOPP, HERBERT UND WITTIG, RÜDIGER: Stadtökologie. Ein Fachbuch für Studium und Praxis. 2. Auflage. Fischer. Stuttgart, 125-167
- KUTTLER, WILHELM (2000): Stadtklima. In: GUDERIAN, ROBERT (HRSG.): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Band 1B: Aerosol/Multiphasenchemie – Ausbreitung und Deposition von Spurenstoffen – Auswirkungen auf Strahlung und Klima. Springer. Berlin. Heidelberg, 420-470
- LAUER, WILHELM (1993): Klimatologie. 2. Auflage. Westermann. Braunschweig
- MALBERG, HORST (2002): Meteorologie und Klimatologie – Eine Einführung. 4. Auflage. Springer. Berlin
- MILDENBERGER, KATRIN (2003): Zusammenstellung auf einem Poster für die AG Klimatologie am Institut für Landschaftsökologie an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Münster (unveröffentlicht)
- OKE, TIMOTHY. R. (1992): Boundary layer climates. 2. Auflage. Methuen. London. New York
- SCHEFFER, FRITZ; SCHACHTSCHABEL, PAUL (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage. Enke. Stuttgart

- SCHÖNWIESE, CHRISTIAN-DIETRICH (2000): Treibhauseffekt und Klimaänderungen. In: GUDERIAN, ROBERT (HRSG.): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Band 1B: Aerosol/Multiphasenchemie – Ausbreitung und Deposition von Spurenstoffen – Auswirkungen auf Strahlung und Klima. Springer. Berlin. Heidelberg, 331-393
- SCHÖNWIESE, CHRISTIAN-DIETRICH (2003): Klimatologie. 2. Auflage. Ulmer. Stuttgart
- STADT MÜNSTER, AMT FÜR STADTENTWICKLUNG UND STATISTIK (2001): Wohnbaulandentwicklung. Rückblick, Ausblick. Einwohner, Bautätigkeit, Baulandentwicklung. Beiträge zur Stadtforschung, Stadtentwicklung, Stadtplanung. 1/2001. Münster
- STADT MÜNSTER, AMT FÜR GRÜNFLÄCHEN UND UMWELTSCHUTZ (2003): Energie und Klimainventur der Stadt Münster. Bilanzierung des Energieeinsatzes und der Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2000. Werkstattberichte zum Umweltschutz 5/2003. Münster
- STADT MÜNSTER, UMWELTAMT (1992): Stadtklima Münster. Entwicklung und Begründung eines klimarelevanten Planungskonzepts für das Stadtgebiet von Münster. Werkstattberichte zum Umweltschutz 1/1992. Münster
- STADT MÜNSTER, UMWELTAMT (1994): Umweltbericht 1993. Münster
- STADT MÜNSTER, UMWELTAMT (1999): Umweltbericht 1998. Münster
- STÜER, BERNHARD (2001): Planungsrecht. Band 5. Städtebaurecht 2001. Rasch. Osnabrück
- VAN EIMERN, JOSEF und HÄCKEL, HANS (1984): Wetter- und Klimakunde. Ein Lehrbuch der Agrarmeteorologie. 4. Auflage. Stuttgart
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (1996): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2 – Entwurf: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung – Teil I: Klima. Beuth. Berlin
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2003): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 5: Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft. Beuth. Berlin
- WILHELMY, HERBERT (1996): Kartographie in Stichworten. 6. Auflage. Hirt. Zug

ZMARSLY, EWALD ET AL. (2002): Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen. 2. Auflage. Ulmer. Stuttgart

<http://lexikon.astronomie.info/java/astrojava.html> (13.01.2004)

<http://ukat.stadt-muenster.de/website/klima/viewer.htm> (09.06.2004)

http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/monitoring/abfrage_klimakarten.htm
(26.02.2004)

http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/spezial/temp/Rekordsommer_2003.pdf
(15.12.2003)

<http://www.dwd.de/de/Zusatzmenues/Presse/Mitteilungen/PM20031002.pdf> (30.01.2004)

http://www.euronews.net/create_html.php?page=meteo&langue=en (07.08.2003)

<http://www.muenster.de/stadt/exwest/portrait.html> (10.02.2004)

http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/klimaschutz/daten_fakten_hintergruende/de/eckdaten/ (17.05.2003)

<http://www.statistik-berlin.de/aktuell/berlinzahlen/berlin-fbd.pdf> (17.05.2003)

<http://www.statistik-berlin.de/framesets/daba.htm> (17.05.2003)

<http://www.un.org/esa/population/publications/wup2001/wup2001dh.pdf> (25.02.2004)

http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Medizin/Leistungen/Bioklimatische_Bewertung.htm (10.06.2004)

Anhang

Tab. 7: Qualität und Verwendung der Messdaten

Datum	Tour	Datenqualität			Verwendet für Karte		
		GPS	Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	Temperatur	Tages-temperatur	Nacht-temperatur	Wind
10.07.03	Aasee	+		- ¹	x		
11.07.03	Aasee	+	0,40	- ¹		x	x
13.07.03	Hafen	-		- ¹			
14.07.03	Hafen	--	--	--			
14.07.03	Kinderbach	+		- ¹	x		
15.07.03	Kinderbach	+	0,48	- ¹		x	x
15.07.03	Hafen	+		- ¹			
16.07.03	Hafen	+	0,94	- ^{1,2}			
20.07.03	Aasee	+		+			
21.07.03	Aasee	+	0,75	- ²			
03.08.03	Stadt	+		+	x		
04.08.03	Stadt	+ / --	0,85 / --	+ / --		x	x
04.08.03	Schleuse	+		+			
05.08.03	Schleuse	+	0,60	-- ³			x
05.08.03	Schleuse	+		+	x		
06.08.03	Schleuse	-	-- ⁵	+		x	
07.08.03	Aasee	+		+	x		
08.08.03	Aasee	+	0,44	+		x	x
08.08.03	Hafen	+		+	x		
09.08.03	Hafen	+	0,54	+		x	x
09.08.03	Kinderbach	+ / --		+ / --			
10.08.03	Kinderbach	+	-- ⁴	-- ⁴			
10.08.03	Schleuse	+		+	x		

11.08.03	Schleuse	-	-- ⁵	+		x	
11.08.03	Kinderbach	+		+	x		
12.08.03	Kinderbach	+ / -	0,49 / --	+		x	x
21.08.03	Aasee	+		+			
22.08.03	Aasee	+	1,20	--			
04.09.03	Hafen	+		+			
05.09.03	Hafen	+ / --	0,73 / --	+ / --			
05.09.03	Hafen	+		+	x		
06.09.03	Hafen	+ / --	0,55 / --	+ / --		x	x
14.09.03	Kinderbach	+		+	x		
15.09.03	Kinderbach	-- / +	-- ⁵	-- / +		x	x
15.09.03	Schleuse	-- / +		+	x		
16.09.03	Schleuse	-- / +	-- / 0,53	-- / +		x	x
16.09.03	Aasee	+		+			
17.09.03	Aasee	--	--	--			
18.09.03	Stadt	-		+			
19.09.03	Stadt	--	--	--			

+ geeignet

- ungenau

-- ausgefallen / nicht verwendbar

¹ ungenau wegen fehlender Messung der akustischen Temperatur

² ungenau da zu windig

³ Pt100-Thermometer und Kapazitiver Feuchtesensor ausgefallen

⁴ Nebel: Fehlmessungen wegen Tropfenbildung an Sensoren des Ultraschall-Anemometers

⁵ laut Feldbuch windstill