

Endbericht Teilprojekt 08 - Cluster 02

Förderkennzeichen 033L020A. Gefördert durch











KuLaRuhr — Nachhaltige urbane Kulturlandschaft in der Metropole Ruhr

www.kularuhr.de

# Klimatisches Potential von Freiflächen in bebauten Bereichen (Siedlungen) -Bewertung der Energiebilanz von Freiflächen

Endbericht Teilprojekt 08 – Cluster02

Maria Hinz, Sabrina Martin, Stephan Weber

unter Mitarbeit der studentischen Hilfskräfte Laura Grunwald und Max Hoppe Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie

#### Endbericht Teilprojekt 08 – Cluster 02



## Inhaltsverzeichnis

Zus	ammenfa	assung	4		
I K	urzdarste	llung	5		
1	Aufgab	enstellung	5		
2	Vorauss	setzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7		
3	Planung	g und Ablauf des Vorhabens	8		
4	Wissens	schaftlich-technische Ausgangslage	9		
4	.1 Wis	ssenschaftlicher Stand	9		
4	.2 Tec	chnischer Stand	9		
5	Zusamr	nenarbeit mit anderen Stellen 1	0		
II E	lingehend	le Darstellung1	2		
1.	Erzielte	Ergebnisse: Zielsetzung und Motivation 1	2		
2	Theoret	ischer Hintergrund 1	4		
2	.1 Atn	nosphärische Grenzschicht und Energiebilanz der Oberfläche 1	4		
	2.1.1	Die urbane Grenzschicht – Das Stadtklima1	5		
	2.1.2	Die stadtklimatische Situation Bottrops (InnovationCity-Gebiet)1	6		
	2.1.3	Regionale Klimaänderungen in Nordrhein-Westfalen1	7		
	2.1.4	Lokale Klimaanpassung: Klimafunktionen städtischer Freiflächen	3		
3	Materia	l und Methoden	3		
3 1	.1 Star ) 33	ndortfindung von geeigneten Freiflächen als Untersuchungsflächen (Arbeitspake	et		
	3.1.1	Untersuchungsgebiet	4		
3	3.2 Freiflächenstandorte – Messaufbau und Messprinzipien				
	3.2.1	Energiebilanzmessungen4	4		
	3.2.2	Bodenwassergehalt an den Energiebilanzstationen4	5		
	3.2.3	Temperatur- und Feuchtemessungen4	6		
	3.2.4	Mobile Messungen - Temperaturmessfahrt4	7		
3 S	.3 Mil zenarien	kroklimatische Modellierung mit ENVI-met – Modelleigenschaften un definition4	d 9		
	3.3.1	Szenariendefinition in ENVI-met	0		
4	Ergebni	isse – Klimamessungen und mikroklimatische Modellierung5	4		



4.	.1 Ergebnisse der Vergleichsmessung (Arbeitspaket 2)				
	4.1.1 Standort und Aufbau der Vergleichsmessung				
	4.1.2 Ergebnisse der Parallelmessung				
4. U	2 E ntersu	rgebnisse der Energiebilanz- sowie der mikroklimatischen Messungen an den chungsstandorten (Arbeitspaket 3: Messzeitraum und Datenanalyse)			
	4.2.1	Klimatische Übersicht und Repräsentanz des Messzeitraumes 57			
	4.2.2 Eddy	Untersuchung des Oberfläche-Atmosphäre-Austausches von Energie und CO <sub>2</sub> – Kovarianz Messungen			
	4.2.3 Freifl	Untersuchung der mikroklimatischen Bedingungen an den ächenstandorten			
4.	3 N	Iodellierung mit ENVI-met (Arbeitspaket 4)    91			
	4.3.1	Validierung der Lufttemperatur			
	4.3.2 Ergebnisse der mikroklimatischen Modellierung mit ENVI-met				
4.	4.4 Bewertung mikroklimatischer Zielkonflikte (Arbeitspaket 5) 101				
5	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 107				
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit				
7	Voraussichtlicher Nutzen und Verwendbarkeit der Ergebnisse				
8	Bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen				
9	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses				
10	Literatur				



## Zusammenfassung

Das Teilprojekt 08 "Klimatisches Potential von Freiflächen in bebauten Bereichen (Siedlungen) - Bewertung der Energiebilanz von Freiflächen" beschäftigt sich mit der Untersuchung des mikroklimatischen Potentials und der Klimafunktion von städtischen Freiflächen vor dem Hintergrund der gezielten Umwidmung dieser Flächen in Richtung einer energetischen Nutzung von urbaner Biomasse. Das Konzept der Nutzung urbaner Biomasse von städtischen Freiflächen vereint die Strategien des expliziten Anbaus nachwachsender Biomasse sowie der Nutzung der anfallenden Biomasse aus Pflegearbeiten. Das Teilprojekt untersucht mögliche Zielkonflikte urbaner Biomassenutzung mit der klimatischen Ausgleichsfunktion der Freiflächenstandorte. Die Klimafunktionen städtischer Freiflächen (Verdunstungskühlung, Minderung von Temperaturextremen, Belüftung, CO<sub>2</sub>-Aufnahme) spielen eine besondere Rolle in kommunalen planerischen Anpassungsstrategien an Auswirkungen des regionalen Klimawandels und sind daher von besonderer Bedeutung.

Zur Untersuchung der Klimafunktion von städtischen Freiflächen wurden Energiebilanzuntersuchungen, d.h. Messungen der Austauschflüsse von Energie und Masse (Wärme, CO<sub>2</sub>) zwischen bodennaher Luftschicht und Erdboden, an zwei Freiflächenstandorten im Stadtgebiet von Bottrop über einen Zeitraum von zwölf Monaten durchgeführt. An weiteren fünf Standorten innerhalb des Stadtteils BOT-Eigen wurden Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit Ergebnisse konnten Eingangsdaten gemessen. Die als für das Mikroklimamodell dreidimensionale ENVI-met genutzt werden, mit dem die mikroklimatischen Auswirkungen urbaner Biomassenutzung auf drei Freiflächenstandorten berechnet wurden. Als Biomassestrategien wurden die Szenarien der krautigen Biomasse aus Anbau, der holzigen Biomasse aus Pflege sowie der holzigen Biomasse aus Anbau mit dem jeweiligen Status quo der Freifläche verglichen.

Zunächst konnten durch die Messungen an den verschiedenen Freiflächenstandorten positive Klimafunktionen nachgewiesen werden: die Freiflächenstandorte tragen – eine ausreichende Wasserversorgung des Bodens vorausgesetzt – zur Verdunstungskühlung bei und haben eine reduzierende Wirkung auf die lokalen Lufttemperaturen. In windschwachen und unbewölkten Strahlungsnächten können sich zwischen dem Bottroper Umland und einem versiegelten Stadtstandort (BOT Eigen-Markt) Temperaturunterschiede von max. 6,5 K einstellen, am Tag kann der Unterschied rund 2,5 K betragen. An Freiflächenstandorten kann während der Sommermonate über den Prozess der Photosynthese Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in der Größenordnung von 1,3 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> aus der Atmosphäre aufgenommen werden. Jedoch ist auch dieser Effekt stark von der Wasserversorgung des Bodens abhängig.

Die mikroklimatische Modellierung der Biomassestrategien ermöglicht die Untersuchung der mikroklimatischen Auswirkungen der Flächenumwidmung an den Freiflächenstandorten. Insgesamt ergeben sich sowohl positive, als auch negative Auswirkungen der urbanen Biomassenutzung auf das Mikroklima an den Standorten. Die Zielkonflikte zwischen Biomassenutzung und mikroklimatischen Auswirkungen werden über einen einfachen Bewertungsansatz klassifiziert.



## I Kurzdarstellung

## 1 Aufgabenstellung

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekt "Nachhaltige urbane Kulturlandschaft in der Metropole Ruhr (KuLaRuhr)" untersucht verschiedene Aspekte und Prozesse der nachhaltigen Landschaftsentwicklung in der Metropole Ruhr. Gegliedert in vier Untersuchungscluster (Großflächige Projekte, Fallbeispiele, Bewertung, Support) werden auf verschiedenen räumlichen Maßstabsebenen potentielle Auswirkungen der Umwidmung und Nachnutzung von Flächen innerhalb des Ruhrgebietes behandelt.

Für das Verbundprojekt wurden zu Beginn zwei Betrachtungsräume im Bereich des Emscher Landschaftsparks (ELP) herausgearbeitet. Der erste Betrachtungsraum umfasst das stärker urban geprägte westliche Ruhrgebiet mit den Städten Essen, Gladbeck und Bottrop. Im östlichen Ruhrgebiet mit vorwiegend forst- und landwirtschaftlich geprägter Kulturlandschaft ist der zweite Betrachtungsraum angesiedelt (Abbildung 1).



Abbildung 1: Die im Verbundvorhaben KuLaRuhr ausgewählten Betrachtungsräume.

Das Teilprojekt 08 "Klimatisches Potential von Freiflächen in bebauten Bereichen (Siedlungen) - Bewertung der Energiebilanz von Freiflächen" (nachfolgend TP08) untersucht klimatische Eigenschaften und Potentiale städtischer Freiflächen und bewertet, inwieweit sich verschiedene Maßnahmen der Nutzung dieser Flächen als Standorte für urbane Biomassenutzung und -anbau mikroklimatisch auswirken (vgl. Abbildung 2).

Das Konzept der Nutzung urbaner Biomasse von städtischen Freiflächen vereint die Strategien des expliziten Anbaus nachwachsender Biomasse sowie der Nutzung der anfallenden Biomasse aus Pflegearbeiten (Sieber, 2011). Bei der Nutzung von anfallender Biomasse aus Pflegearbeit kann es sich um Grünschnitt oder Mischlaub handeln (Abbildung 2



links), bei Biomasse aus Anbau sind Arten denkbar, die sowohl vom Raumbedarf als auch ästhetisch auf innerstädtischen Freiflächen genutzt werden können, wie kurzwachsende Gehölze, Gräser oder Wildkräutermischungen (Abbildung 2 rechts). Die Nutzung von urbaner Biomasse vereint beide Strategien synergistisch auf vorhandenen Freiflächen und führt diese somit einer multifunktionalen Nutzung zu. In Kooperation mit der TU Darmstadt (Teilprojekt 1.1: "Optimierung der Energieeffizienz von Siedlungen") wurden realistische Biomassestrategien entworfen, d.h. Pflanzenarten und Anbaugeometrien ausgewählt, und diese planerisch auf die ausgewählten Freiflächen übertragen (vgl. Kap I.5).



Abbildung 2: Die Nutzung urbaner Biomasse auf städtischen Freiflächen (Mitte) vereint die Nutzung anfallender Biomasse aus Pflege (links) sowie den gezielten Anbau (rechts, Abbildung erstellt durch Sandra Sieber, Teilprojekt 1.1, TU Darmstadt).

In Abstimmung mit Teilprojekt 1.1 sowie nach Abwägung verschiedener Standortkriterien insbesondere für klimatische Messungen bzw. die Eddy-Kovarianz Methodik (vgl. Kap. 0) wurde das "InnovationCity Ruhr"-Gebiet der Stadt Bottrop als Untersuchungsraum für Teilprojekt 08 ausgewählt. Die Bewertung der Ergebnisse klimatischer Messungen und Modellierung in Teilprojekt 08 versucht mögliche mikroklimatische Zielkonflikte (trade-offs) bei der energetischen Nutzung der Standorte zur Biomasseerzeugung zu berücksichtigen (Abbildung 3).



Abbildung 3: Untersuchungskonzept in Teilprojekt 08, KuLaRuhr.

Die Bearbeitung erfolgte in Kooperation mit dem Querschnittsthema "Biomassestrategie" bzw. dem TP1.1 und wurde unter den folgenden Arbeitspaketen (AP) und Fragestellungen angegangen:

- Standortfindung von geeigneten Freiflächen als Untersuchungsflächen im Bereich des Emscher Landschaftsparks (ELP) (AP1).
- Messung der klimatischen Eigenschaften (Strahlungs- und Wärmebilanz, CO<sub>2</sub>-Dynamik) an einem Referenzstandort sowie an einem Freiflächenstandort im Untersuchungsgebiet (AP2 und AP3).



- Modellierung der mikroklimatischen Auswirkungen verschiedener Szenarien urbanen Biomasseanbaus mit dem Stadtklimamodell ENVI-met (Vergleich mit Messdaten, Simulation von Flächenumwidmungsmaßnahmen bzw. Biomassestrategien, AP4).
- Klimatische Bewertung ausgewählter Freiflächen mit Hilfe kombinierter Klimamessungen und -modellierungen (AP5).

Die Ergebnisse sollen die energetische Optimierung von Siedlungsbereichen unterstützen. Die Resultate aus Messung und Modellierung der Klimaeigenschaften können als Eingangsdaten und Bewertungsrahmen in die Entwürfe und Optimierungsmaßnahmen von Landschaftsplaner und Architekten Eingang finden (TP1.1, Maßnahme "Optimierung der Energieeffizienz von Siedlungen").

# 2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Rahmen des Projektes KuLaRuhr untersuchen die verschiedenen interdisziplinär ausgerichteten Teilprojekte des Verbundvorhabens die Entwicklung und Optimierung multifunktionaler Nutzungsmöglichkeiten von Flächen im Bereich des ELP zur Stärkung und Entwicklung einer post-industriellen Kulturlandschaft im Ruhrgebiet. Das Teilprojekt 08 beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit dem klimatischen Potential von Freiflächen sowie der gezielten Umwidmung dieser Flächen in Richtung einer energetischen Nutzung (Biomasse) ohne den Verlust bzw. vor dem Hintergrund einer Stärkung ihrer klimatischen Ausgleichsfunktion.

Die klimaökologischen Ausgleichfunktionen von Freiflächen (Verdunstungskühlung, Beschattung, Minderung von Temperaturextremen, Ventilation, CO<sub>2</sub>-Aufnahme) spielen eine besondere Rolle in der kommunalen bzw. lokalen Anpassungsstrategie an Auswirkungen des regionalen Klimawandels. Das Teilprojekt leistet somit einen Beitrag zur Anpassung der Regionalplanung an Klimaänderungen und gliedert sich in die Klimaschutzstrategie der Bundesregierung ein.

In Zusammenarbeit mit TP1.1 trägt das Vorhaben damit zu folgendem Schwerpunkt der Ausschreibung "Nachhaltiges Landmanagement" bei: Anpassung der Landnutzung und Infrastruktureinrichtungen und den damit verbundenen Dienstleistungen für eine nachhaltige Dämpfung von Extremereignissen (Dürre, Hitze, Hochwasser, Stürme).

Die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- die Notwendigkeit der Anpassung urbaner Räume an den Klimawandel (vgl. TP1.1),
- Optimierung der energetischen Nutzung von Freiflächen,
- Optimierung der Landnutzungsfunktionen zur lokalen Klimaanpassung, z.B. nachhaltige Dämpfung von Extremereignissen (insbesondere lokale Lufttemperatur),



• Bewertung der mikroklimatischen Zielkonflikte der Nutzungsfunktionen.

## 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der im Projektantrag geplante Arbeitsablauf des Teilprojekt 08 sowie der tatsächliche Arbeitsverlauf sind zusammengefasst in Abbildung 4 dargestellt.

Im Gegensatz zu im Projektantrag avisierten Projektbeginn konnte das Vorhaben KuLaRuhr nach erfolgter Bewilligung erst im Mai 2011 beginnen. Die Arbeit an Arbeitspaket 1 wurde unmittelbar nach Projektstart begonnen. Die Abstimmung der Untersuchungsräume bzw. der konkreten Messstandorte erfolgte in Absprache mit dem KuLaRuhr-Gesamtkonsortium (Betrachtungsräume, BOT-Eigen) sowie TP1.1 (BOT-Eigen, Messstandorte). Das Arbeitspaket 2 (Vergleichsmessungen) wurde im Sommer/Herbst 2011 auf einem Grünlandstandort in Braunschweig durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.



Abbildung 4: Übersicht des in Teilprojekt 08 geplanten (orange) und tatsächlichen Arbeitsverlaufs (grün). Der grau markierte Bereich kennzeichnet die Phase der kostenneutralen Verlängerung des Verbundvorhabens KuLaRuhr von Mai bis Oktober 2014.

Zur Untersuchung der Unterschiede in der Oberflächenenergiebilanz zwischen einem Umland (RURA) und einem siedlungsnahen Freiflächenstandort (SIED) wurden zwei Eddy-Kovarianz Messkomplexe Mitte Dezember 2011 in BOT-Eigen installiert (Arbeitspaket 3). Zusätzlich wurden Lufttemperaturmessungen an insgesamt fünf Freiflächenstandorten innerhalb des Untersuchungsgebietes durchgeführt. Aus infrastrukturellen Einschränkungen (freie Anströmbarkeit, Zugang zu Flächen und Standortgenehmigungen) konnten die Eddy-Kovarianz-Messungen innerhalb des Siedlungsbereiches nur an einem Standort vorgenommen werden. Im August 2012 kam es durch Vandalismus und Diebstahl zur Beschädigung der Messinfrastruktur sowie Datenausfällen an der Station SIED. Ein Teil der Messperipherie (v.a. Stromversorgung) musste kurzfristig ersetzt werden. Die Messungen wurden an beiden Standorten bis zum März 2013 fortgeführt, um einen ausreichend repräsentativen Datensatz zu erhalten. Die Durchführung von Arbeitspaket 3 entspricht damit ebenfalls dem im Projektantrag veranschlagten Zeitfenster.

Die mikroklimatischen Eigenschaften der Freiflächenstandorte in Bottrop werden unter dem Aspekt der Flächenumwidmung mit dem dreidimensionalen Stadtklimamodell ENVI-met simuliert. Dabei wird die Version 3.99.99.6 verwendet und ein atmosphärisches "Modellforcing" eingesetzt, dass an die im Untersuchungsgebiet gemessenen Daten angepasst



werden kann. Durch die Nutzung des sog. "forcing" wird sichergestellt, dass die maximale Amplitude der Tagesschwankung der Temperatur (aus Messdaten) erreicht werden kann. Leider kam es bei der avisierten Implementierung der "forcing"-Option zu Verzögerungen seitens des Modellentwicklers. Die Modellierung der mikroklimatischen Zielkonflikte konnten deshalb erst mit mehrmonatiger Verzögerung begonnen werden. Durch die Beschränkung auf Simulationen an drei Standorten mit jeweils drei Biomassestrategien (+ Referenzsimulation bzw. Status quo) konnten die Simulationsrechnungen dennoch bis zum Projektabschluss realisiert und ausgewertet werden.

## 4 Wissenschaftlich-technische Ausgangslage

In Teilprojekt 08 liegt mit dem Abschluss der Messungen/Modellierungen sowie der Bewertung mikroklimatischer Zielkonflikte eine verbesserte Kenntnis zur klimatischen Funktion und Wertigkeit von Freiflächen in bebauten Bereichen vor dem Hintergrund urbaner Biomassenutzung vor. Diese Erkenntnisse können der Stadt- und Regionalplanung von Hilfe sein, Flächenumwidmungen und Flächenbewirtschaftung (Biomasse) vor dem Hintergrund des (regionalen) Klimawandels gezielt durchzuführen. Das Vorhaben kann damit zu einer Erhöhung des wirtschaftlichen Wertschöpfungspotentials der Flächen führen.

## 4.1 Wissenschaftlicher Stand

Die klimatischen Ausgleichsfunktionen städtischer Freiflächen sind in der Literatur an verschiedenen Stellen beschrieben (s. Antrag zum Forschungsvorhaben bzw. Kap. 2.1.4 der eingehenden Darstellung des vorliegenden Berichts). Prinzipiell lassen sich die Ausgleichsfunktionen in folgende Bereiche gliedern:

- Minderung von Oberflächen- und Lufttemperatur
- Erhöhung der Verdunstung (Evapotranspiration) bzw. der Verdunstungskühlung
- Erhöhung der Ventilation und Belüftung für angrenzende Bereiche
- Positive Wirkung aus human-biometeorologischen Bedingungen
- Potential zur CO<sub>2</sub>-Aufnahme
- Pufferung von lokalklimatischen Extrembedingungen

## 4.2 Technischer Stand

Zur Untersuchung der Energiebilanz der Freiflächenstandorte wurde die in der wissenschaftlichen Literatur anerkannte Eddy-Kovarianz Methode eingesetzt, die bereits in früheren Arbeiten der ausführenden Arbeitsgruppe verwendet wurde (Weber und Kuttler, 2005, Weber et al., 2006, Weber und Kordowski, 2010, Weber et al., 2013). Die Methode beruht auf der zeitlich hoch aufgelösten direkten Messung des turbulenten Anteils des Windes und weiterer gewünschter Parameter (z.B. Wärme, Wasserdampf, Kohlendioxid) zur Bestimmung des turbulenten Transports bzw. des turbulenten Austauschflusses zwischen



Erdoberfläche und Atmosphäre (Baldocchi, 2014). Zur Datenauswertung konnte auf das Softwaretool EddyPro (http://www.licor.com/env/products/eddy\_covariance/software.html) zurückgegriffen werden, welches der wissenschaftlichen Community seit dem Jahr 2011 durch die Firma LI-COR zur freien Anwendung zur Verfügung gestellt wird. Die klimatische Modellierung der Freiflächenstandorte konnte mit dem an der Johannes Gutenberg Universität Mainz entwickelten und ebenfalls frei verfügbaren dreidimensionalen Mikroklimamodell ENVI-met (http://envi-met.com/) durchgeführt werden. Die Modellergebnisse wurden zur Aufstellung einer Bewertungsklassifizierung der mikroklimatischen Effekte und Zielkonflikte der Freiflächen vor den Hintergrund verschiedener urbaner Biomassestrategien genutzt. Um die Ergebnisgrößen der verschiedenen Klimaparameter und mikroklimatischen Zielkonflikte zu bündeln und zu kondensieren wurde zur Bewertung ein Klassifizierungsystem entwickelt, welches zum einfachen Transfer in die Stadt- und Regionalplanung in einer dreigeteilten Bewertungsmatrix mündet. Die Bewertung wird in Kap. 4.4 eingehend vorgestellt. Die integrative Bewertung der klimatischen Eigenschaften von Freiflächen in Siedlungsbereichen ist vom methodischen Ansatz auf vergleichbare Flächen an anderen Standorten übertragbar.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für das vorliegende Teilprojekt war im Rahmen von KuLaRuhr die Zusammenarbeit mit TP1.1 vorgesehen. Zudem standen die Stadt Bottrop sowie der Regionalverband Ruhr als Partner für die Bereitstellung räumlicher Daten bzw. Geodaten zur Verfügung.

Die Zusammenarbeit mit TP1.1 konnte wie vorgesehen umgesetzt werden. Im ersten Schritt erfolgte die gemeinsame Festlegung auf einen Untersuchungsraum sowie auf konkrete Messstandorte. Ein wichtiger Aspekt lag in der Entwicklung von Strategien und räumlichen Planungsentwürfen für urbane Biomassestrategien auf städtischen Freiflächen (vgl. Abbildung 5 als Beispiel für Planungsentwürfe). In gemeinsamen Arbeitssitzungen wurden Entwürfe - u.a. vor dem Hintergrund der Transfermöglichkeiten bzw. der Implementierung in das Mikroklimamodell - diskutiert und abschließend von TP1.1 final zur Verfügung gestellt. Der Modelloutput des Mikroklimamodells ENVI-met wiederum konnte TP1.1 zur Bewertung energetisch optimierter Siedlungsstrukturen zur Verfügung gestellt werden. Durch das verspätete Update der Version des Mikroklimamodells mit integrierter Möglichkeit atmosphärischen "forcings" konnte jedoch nur ein eingeschränkter Teil des ursprünglich geplanten Modelloutputs fristgerecht an TP1.1 geliefert werden.

Endbericht Teilprojekt 08 – Cluster 02





Abbildung 5: Planungsentwürfe für die städtische Freifläche Sydowstraße in BOT-Eigen als Potentialdarstellung zur Nutzung urbaner Biomasse (Quelle: TP1.1, KuLaRuhr, Sandra Sieber, TU Darmstadt).

Die Stadt Bottrop (assoziierter Partner in KuLaRuhr) war im Rahmen der Standortfindung potentieller Flächen für klimatologische Messungen bei der Identifikation der Eigentumsverhältnisse sowie der Lokalisation der Eigentümer unterstützend tätig.



## II Eingehende Darstellung

## 1. Erzielte Ergebnisse: Zielsetzung und Motivation

In Deutschland leben derzeit rund 74 % der Bevölkerung in Städten, global wird von der UN für die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts eine Zunahme des Urbanisierungsgrades auf rund 70 % prognostiziert (UN-Habitat). Das Klima von Städten ist im Vergleich zum Klima des nicht bebauten Umlandes in vielfältiger Weise modifiziert (vgl. Kap. 2.1.1). Dies ist durch die verschiedenen Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre bzw. der bodennahen Luftschicht und der heterogenen städtischen Erdoberfläche begründet. Zu den besonderen Ausprägungen des Stadtklimas führen u.a. die hohe Oberflächenversiegelung, der geringere Durchgrünungsgrad, die modifizierte Energiebilanz der Oberfläche sowie anthropogene Emissionen von Wärme und Luftbeimengungen (Oke, 1987, Kuttler, 2013).

Die ausprägte Komplexität und Heterogenität der städtischen Oberfläche äußert sich in einer Vielzahl von städtischen Mikroklimaten, die einer hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität unterlegen sind (vgl. Kap. 2.1.1). Die innerhalb des Stadtgebietes im Vergleich zum Umland der Stadt überwärmten Bereiche, die sogenannten urbanen Wärmeinseln, sind in der Regel eng an die Bebauungsdichte und -struktur gekoppelt, können aber durch topographische Effekte sowie klimaaktive Flächennutzungen (z.B. unversiegelte und vegetationsbestandene Flächen) modifiziert sein. Die Ausprägungen der unterschiedlichen urbanen Mikroklimate verdienen im Rahmen des voranschreitenden Klimawandels besondere Beachtung, da die Zunahme der Mitteltemperatur, die Häufung von Temperaturextremen und Hitzewellen sowie ein zeitlich verändertes Niederschlagsregime weitere Verschärfungen der lokalklimatischen Bedingungen nach sich ziehen wird (vgl. Kap. 2.1.3).

Unter dem Gesichtspunkt lokaler Klimaanpassungsmaßnahmen sowie einer nachhaltigen (ressourcenschonenden) Stadt- und Siedlungsentwicklung sollten Städte möglichst,

- energetisch optimiert sein, d.h. ressourcenschonend funktionieren,
- klimawandelangepasst, und
- an Temperaturextreme angepasst sein und den Einwohnern eine Vielfalt von angenehmen Mikroklimaten und positiven Klimafunktionen zur Verfügung stellen.

Ein thermisch behagliches bzw. human-biometeorologisch ausgeglichenes Lokalklima kann durch sinnvolle Planungsstrategien unterstützt werden. In diesem Zusammenhang können städtische Freiflächen eine wichtige Rolle spielen. In der vorliegenden Studie werden unbebaute, häufig unversiegelte und vegetationsbestandene Flächen als Freiflächen definiert, die sowohl außerhalb, als auch innerhalb von Siedlungsgebieten lokalisiert sein können. Freiflächen sollten eine gewisse Mindestgröße aufweisen (z.B. breiter als zweispurige Straße), um lokalklimatische Klimafunktionen ausüben zu können.



Die Schaffung und Wahrung v.a. vegetationsbestandener Flächen mit klimaökologisch günstigen Bedingungen (Klimafunktionen), wie Evaporations- bzw. Transpirationskühlung (Verdunstungskühlung), Durchlüftung, Frisch- und Kaltluftversorgung kann zu einem thermisch behaglichen Lokalklima beitragen und eine wichtige Funktion als urbane Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel ausüben. Die besondere klimatische Gunst von Freiflächen liegt vor allem in der oftmals zentralen Lage innerhalb dicht bebauter Siedlungsbereiche begründet. Sind für entsprechende Freiflächen unterschiedliche Nutzungsoder Nachnutzungsstrategien geplant (z.B. Freihaltung, Umwidmung, Biomasseanbau), ist die Bewertung der potentiellen mikroklimatischen Modifikation von Bedeutung.

Das Konzept der Nutzung urbaner Biomasse von städtischen Freiflächen vereint die Strategien des expliziten Anbaus nachwachsender Biomasse sowie der Nutzung der anfallenden Biomasse aus Pflegearbeiten (Sieber, 2011). Bei der Nutzung von anfallender Biomasse aus Pflegearbeit kann es sich um Grünschnitt oder Mischlaub handeln, bei Biomasse aus Anbau sind Arten denkbar, die sowohl vom Raumbedarf als auch ästhetisch auf innerstädtischen Freiflächen genutzt werden können, wie kurzwachsende Gehölze, Gräser oder Wildkräutermischungen (vgl. Abbildung 5). Die Nutzung urbaner Biomasse vereint beide Strategien synergistisch auf vorhandenen Freiflächen und führt diese somit einer multifunktionalen Nutzung zu.

Das Teilprojekt 08 des Verbundvorhabens KuLaRuhr untersucht klimatische Eigenschaften und Potentiale städtischer Freiflächen und bewertet, inwieweit sich verschiedene Maßnahmen der Nutzung dieser Flächen als Standorte für urbane Biomassenutzung und -anbau mikroklimatisch auswirken. Die Bewertung der Ergebnisse klimatischer Messungen und Modellierung in Teilprojekt 08 versucht mögliche mikroklimatische Zielkonflikte (trade-offs) bei der energetischen Nutzung der Standorte zur Biomasseerzeugung zu berücksichtigen. Dazu werden drei ausgewählte Freiflächen unter verschiedenen Biomassestrategien untersucht. Die Auswirkungen der urbanen Biomassenutzung auf mikroklimatische Parameter der Modellstudien wird einer abschließenden Bewertung unterzogen (Abbildung 6).



Abbildung 6: Modellkonzept zur mikroklimatischen Bewertung in Teilprojekt 8, KuLaRuhr



## 2 Theoretischer Hintergrund

### 2.1 Atmosphärische Grenzschicht und Energiebilanz der Oberfläche

Als atmosphärische Grenzschicht werden die untersten 1 bis 2 km der Troposphäre definiert. Die Untersuchung der Grenzschicht ist von besonderem Interesse, da sie den Lebensraum des Menschen u.a. durch Transport und Verdünnung von Luftschadstoffen, Transport von Wärme und Feuchtigkeit sowie andere wichtige meteorologische Vorgänge direkt beeinflusst (Weber, 2004). Der Austausch von Energie und Masse (Wärme, Feuchte, Gase) zwischen der Erdoberfläche und der bodennahen Atmosphäre erfolgt in der Bodenschicht (ca. die untersten 10 % der Grenzschicht) nahezu ausschließlich über turbulenten Transport, wobei zwischen thermisch und mechanisch generierter Turbulenz unterschieden wird (Emeis, 2000).

Die turbulenten Austauschprozesse in der atmosphärischen Grenzschicht werden signifikant durch den Untergrund und die vorherrschende Flächennutzung beeinflusst. Nicht nur haben unterschiedliche Bodentypen, Bodenfarben oder Vegetationsformen spezifische Auswirkungen auf z.B. Erwärmung und Verdunstung, sondern auch unterschiedliche Oberflächenbedeckungen und Anordnungen von Objekten an der Erdoberfläche Auswirkungen auf die Strömungsdynamik und das Windfeld. Somit können sich verschiedene Eigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht in Abhängigkeit der Flächennutzung (z.B. urban oder rural) ausbilden.

Zur Untersuchung des Energieaustausches zwischen Atmosphäre und Oberfläche lassen sich die Austauschprozesse in Form einer Bilanzgleichung formulieren. Die zur Verfügung stehende Netto-Energie, ausgedrückt als Strahlungsbilanz  $Q^*$  in W m<sup>-2</sup>, lässt sich schreiben als

$$Q^* = K \downarrow -K \uparrow +L \downarrow -L \uparrow$$

Gleichung 1

mit  $K \downarrow$  der Globalstrahlung in W m<sup>-2</sup>,  $K \uparrow$  der kurzwelligen Reflexion (Albedo) in W m<sup>-2</sup>,  $L \downarrow$  der langwelligen atmosphärischen Gegenstrahlung in W m<sup>-2</sup> und  $L \uparrow$  der langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche in W m<sup>-2</sup>.

Die Umwandlungsprozesse von Energie an der Oberfläche können als Energiebilanzgleichung in allgemeiner Form geschrieben werden als:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G + \Delta Q_S$$

Gleichung 2

mit  $Q^*$  der Strahlungsbilanz,  $Q_H$  der turbulenten sensiblen Wärmeflussdichte,  $Q_E$  der turbulenten latenten Wärmeflussdichte,  $Q_G$  der Bodenwärmeflussdichte,  $\Delta Q_S$  der



Wärmespeicherung in den obersten Bodenschichten. Alle Energieflussdichten besitzen die Einheit W $m^{-2}$ .

Mit Hilfe der Energiebilanzgleichung können Charakteristika verschiedener Unterlagen bemessen und analysiert werden. So ist z.B.  $Q_E$  stark von der Energie- und Wasserverfügbarkeit am Standort der Messungen abhängig, während  $Q_G$  sensibel auf die thermischen Eigenschaften des Bodens reagiert. Auch lassen sich durch die Bildung des sogenannten Flussverhältnisses, also dem Verhältnis einer Bilanzkomponente und der Strahlungsbilanz, z.B.  $Q_H/Q^*$ , die Anteile der jeweiligen Komponente an der Energieumsetzung aufschlüsseln (Weber, 2004).

## 2.1.1 Die urbane Grenzschicht – Das Stadtklima

Eines der bekanntesten und wichtigsten stadtklimatischen Phänomene ist die Überwärmung bebauter Bereiche im Vergleich zum nicht bebauten Umland der Städte, die sog. Wärmeinsel (engl. urban heat island, UHI). Die Wärmeinsel bzw. die Wärminselintensität wird normalerweise durch den Vergleich einer städtischen Klimastation mit einer Vergleichsstation im nicht bebauten Umland erhoben. Die UHI erfährt ihre stärkste Ausprägung, also ihren maximalen Stadt-Umlandtemperaturunterschied, in der Regel unter sommerlichen Hochdruckwetterlagen mit hoher Einstrahlung und niedriger Windgeschwindigkeit. Die Wärmeinsel ist insbesondere ein nächtliches Phänomen (Parlow, 2003). Mit dem Einsetzen der nächtlichen Ausstrahlungsperiode gehen die Temperaturen im Umland rasch zurück, während sich die Stadt aufgrund der thermischen Eigenschaften der Baumaterialien durch einen gewissen Temperaturhalteeffekt auszeichnet. Die Temperaturen im Umland sinken demnach stärker als in der Stadt und liegen während des gesamten Nachtverlaufes unter den Lufttemperaturen im Stadtbereich. Die Intensität der UHI, also die Stärke des Temperaturunterschiedes zwischen Stadt und Umland ( $\Delta T_{u-r}$ ), ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Neben den thermischen Eigenschaften der eingesetzten Baumaterialien besitzt vor allem die Straßenschluchtgeometrie, ausgedrückt durch das Verhältnis von Bebauungshöhe zu Straßenbreite, einen Einfluss auf die Ausprägung der Wärmeinselintensität (Oke, 1988). Das Verhältnis von Höhe-zu-Breite der Straßenschlucht bestimmt den Himmelssichtfaktor (engl. Sky-view-factor) der im Tagesverlauf nicht nur den Einfall kurzwelliger Sonnenstrahlung beeinflusst, sondern auch den nächtlichen Haushalt der langwelligen Wärmeabgabe aus der Baumasse steuert. Je geringer der Himmelssichtfaktor von Straßenschluchten ist, desto höher ist der Anteil der langwelligen Wärmeflüsse, der von den Hauswänden innerhalb der Straßenschlucht "eingefangen" wird.

Die räumliche Ausdehnung der UHI ist entsprechend der Bebauungsstruktur vielfältig. Meist zeigen sich die dicht bebauten Zentren der Innenstädte als maximale Wärmeinseln, neben denen aber noch weitere Bereiche mit hohen Lufttemperaturanomalien zum Umland, sogenannte Wärmedome, existieren können (Hupfer und Kuttler, 2005). Die räumliche Ausdehnung der Wärmeinsel kann durch lokale Gegebenheiten, wie z.B. einen erhöhten Vegetationsanteil, in die Stadt einfallende Grünzüge oder durch Kaltluftschneisen modifiziert sein (Weber und Kuttler, 2003). Aus der Sicht klimatischer Stadtplanung sind von daher



Freiflächen mit hohem Vegetationsanteil bzw. die Verminderung des versiegelten Flächenanteils wünschenswert und im Planungsprozess von besonderem Interesse, da sie ein geeignetes Mittel darstellen die städtische bzw. nächtliche Überwärmung der Stadtzentren zu verringern und somit für eine Verbesserung des menschlichen Wohlbefindens sorgen (Adams und Smith, 2014, vgl. Kap. 2.1.4).

Die wesentlichen Ausprägungen der stadtklimatischen Situation im Untersuchungsraum Bottrop werden im Folgenden kurz skizziert.

## 2.1.2 Die stadtklimatische Situation Bottrops (InnovationCity-Gebiet)

Das Stadtgebiet von Bottrop lässt sich in drei Bereiche mit unterschiedlichen lokalklimatischen Verhältnissen gliedern. Der Norden des Stadtgebiets ist durch land- und forstwirtschaftliche Flächen, die ein hohes klimatisches Ausgleichspotenzial aufweisen, geprägt. Im südlichen Stadtbereich ist eine zum Teil sehr starke stadtklimatisch überprägte Verdichtung festzustellen. Der südöstliche Bereich des Stadtgebiets weist große Freiflächen gepaart mit weniger dicht bebauten Wohn- und Gewerbegebieten auf. Im Pilotgebiet des InnovationCity-Projekts liegt demnach ein erhöhter Versiegelungsgrad vor.

Die stadtklimatische Situation im InnovationCity-Gebiet Bottrop lässt sich folgendermaßen charakterisieren (Snowdon und Bürger, 2006): In den stärker verdichteten Zonen des Gebiets können während der Tages- und Nachtstunden thermische Belastungssituationen auftreten. Die Kernzone der städtischen Wärmeinsel bildet dabei der am stärksten versiegelte Bereich der Innenstadt. Im Sommer konnten Temperaturunterschiede von bis zu 7 K im Vergleich zu einem umliegenden Freiland- und Waldgebiet gemessen werden (Snowdon und Bürger, 2006). Im Vergleich zu einer Bezugsfläche mit einer mittleren bis niedrigen Bebauungsdichte ließ sich ein positiver Temperaturunterschied von über 2,5 K (sehr stark überwärmte Bereiche, vgl. Abbildung 7) für die Kernzone der Wärmeinsel feststellen und für die umgebenden Bereiche der Kernzone Temperaturunterschiede von +1,5 - 2,5 K (stark überwärmte Bereiche). Die auftretende Wärmeinsel breitet sich über diese Kernzone in den umgebenden Bereich mit dichter Wohnbebauung, die eine hohe Versiegelung und nur geringe Vegetationsflächen aufweist, aus. Im Norden und Süden wird die Wärmeinsel durch Parkanlagen eingegrenzt. Sekundäre Wärmeinseln, die Temperaturunterschiede von +1,5 -2,5 K aufwiesen, finden sich zudem in den dicht bebauten Bereichen der Stadtteile Eigen (Eigen-Markt), Batenbrock und Boy, sowie im Gewerbegebiet Kruppwald im Stadtteil Welheimer Mark.





Abbildung 7: Nächtliche Verteilung der bodennahen Lufttemperatur im Stadtgebiet Bottrops (aus: Snowdon und Bürger, 2006, modifiziert)

Der Untersuchungsraum BOT-Eigen ist größtenteils durch ein "Stadtrandklima" geprägt, welches durch eher lockere Siedlungsstrukturen gekennzeichnet ist, die von einzelnen Grünund Freiflächen durchzogen sind. Es dominieren vor allem Zechensiedlungen mit Reihenhäusern. Grün- und Freiflächen sind im Planungsraum Eigen eher von geringer Größe und durch ihre isolierte Lage haben die positiven klimatischen Effekte meist nur eine geringe Reichweite. Im dichter bebauten Bereich des Planungsraums (Eigen-Markt) tritt zudem auch ein bioklimatisch stärker belastetes "Stadtklima" auf. Das Klimatop weist jedoch nur eine geringe Größe auf. Der Kirschemmsbach, der den Planungsraum von Nord nach Süd durchzieht, stellt eine Kaltluftschneise dar, durch die kalte Luftmassen in Richtung der Stadtrandbebauung gelangen können (ARGE IC Ruhr, 2014).

Die klimatischen Ausprägungen einer Stadt sind vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels von besonderer Bedeutung. Die prognostizierte Zunahme der Lufttemperatur sowie der Häufigkeit von Hitzewellen kann die stadtklimatische Situation verschärfen. Um die Auswirkungen dieser Effekte (z.B. Wärmestress) auf die Bewohner der Stadt möglichst gering zu halten und effektive Anpassungsstrategien zu entwickeln, sind planerische Maßnahmen von großer Bedeutung. Die Kenntnisse zum Klimawandel in der Region Bottrop bzw. in Nordrhein-Westfalen werden daher im Folgenden kurz umrissen.

## 2.1.3 Regionale Klimaänderungen in Nordrhein-Westfalen

## Das Klima in Nordrhein-Westfalen (1979 – 2008)

In Nordrhein-Westfalen liegt, bedingt durch die ausgeprägte Struktur des Reliefs, eine Zweiteilung der klimatischen Bedingungen vor: im Bereich der Westfälischen Bucht und am



Niederrhein ist es warm mit mäßigem Niederschlag, in den Mittelgebirgen (Weserbergland, Sauer- und Siegerland und Eifel) ist es hingegen deutlich kühler und regenreicher. Die mittlere Jahrestemperatur von Nordrhein-Westfalen (NRW) liegt für den Betrachtungszeitraum von 1979 – 2008 bei 9,5 °C. Die Lufttemperatur ist stark von der Geländehöhe abhängig, so sind entlang des Rheintals die höchsten Jahresmitteltemperaturen (bis zu 11,2 °C) festzustellen, während die Temperatur in den Mittelgebirgen im Mittel um etwa 0,7 K pro 100 m Höhenzunahme abnimmt (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, 2010).

Im Mittel beträgt der jährliche Niederschlag in Nordrhein-Westfalen 920 mm (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, 2010). Auch hier hat die Höhenlage großen Einfluss und die Niederschläge nehmen in allen Gebieten mit der Höhe des Geländes zu. Aufgrund der Prägung durch Wetterlagen aus West bis Südwest sind mehr Niederschläge an den (Süd-) Westhängen der Gebirge zu verzeichnen.

## Die Entwicklung des Klimas in Nordrhein-Westfalen im vergangenen Jahrhundert (1901 – 2008)

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts bis in die 40er Jahre trat es eine schwache Erhöhung der Lufttemperaturen in Nordrhein-Westfalen auf. Bis zum Anfang der 80er Jahre lag dann ein weitgehend neutraler Trend vor, doch seit Beginn der 1980er zeigt sich ein deutlich stärkerer Anstieg der Lufttemperatur als zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Im Zeitraum von 1901 bis 2008 lässt sich ein hochsignifikanter Anstieg der mittleren Jahrestemperatur in NRW um 1,1 K (von 8,4 auf 9,5 °C) feststellen. Der Erwärmungstrend für den Zeitraum 1901 bis 2008 liegt im Mittel bei einer Erwärmung von 0,1 K pro Dekade. Legt man nur den Zeitraum der letzten 30 Jahre (1979 bis 2009) zugrunde, ist dieser jedoch rund fünf Mal so hoch. (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, 2010)

Die Jahresniederschlagssumme für Nordrhein-Westfalen beträgt für den Zeitraum von 1901 bis 2008 im Mittel 861 mm. Von Beginn des 20. Jahrhunderts bis heute ist ein Aufwärtstrend der mittleren jährlichen Niederschlagsmengen von 806 auf 916 mm (Stand 2008) zu verzeichnen. Dies entspricht einer Zunahme des Niederschlags von etwa 10 mm pro Dekade und einer Gesamterhöhung des Jahresniederschlagsmittels um 13 %. Dieser Trend lässt sich für alle Jahreszeiten feststellen, wobei für den Winter und Frühling mit einer Zunahme von 19 % gegenüber dem 108-jährigen Mittel ein stärkerer Trend als im Sommer und Herbst mit 3 bzw. 11 % Zunahme zu erkennen ist (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, 2010)

## Zu erwartende Folgen des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen

Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) führte das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK) eine Klimaprojektion für die 30-jährige Periode von 2031 – 2060 im Vergleich zum Bezugszeitraum 1961 – 1990 durch (Kropp et al., 2009). Alle Analysen wurden auf Basis des A1B Emissionsszenarios durchgeführt, bei dem von einem



weltweiten Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts maximalen und dann rückläufigen Weltbevölkerung, einer schnellen Einführung neuer und effizienter Technologien und einer ausgewogenen Nutzung aller Energiequellen ausgegangen wird (Nakicenovic und Swart, 2000). Die Berechnungen wurden größtenteils mit dem dynamischen Modell CCLM (COSMO-Modell in Climate Mode) durchgeführt, welche durch Berechnungen eines statistischen Regionalisierungsmodells (STAR, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung) unterstützt wurden.

Die Klimaprojektionen zeigen deutliche Signale für einen zukünftigen Anstieg der Lufttemperaturen in Nordrhein-Westfalen, so kommt es im Schnitt voraussichtlich zu einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 1,9 K (Kropp, et al., 2009; Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2009). Die stärkste Temperaturzunahme ist dabei in den Sommermonaten (bis zu 3 K) zu erwarten.

Für die Jahresniederschlagssummen in NRW zeigen die Klimaprojektionen eine Erhöhung um voraussichtlich 5 % (Kropp et al., 2009; Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2009). Zudem kommt es zu einer deutlichen Verschiebung der Niederschläge in die Wintermonate (Zunahme von 10 – 20 %). In den Sommermonaten nehmen die Niederschläge im Jahresmittel hingegen um bis zu 20 % ab. Insgesamt ist von einem Rückgang der Schneetage auszugehen und die Winterniederschläge werden vermehrt als Regen und weniger als Schnee fallen. Bei der Niederschlagsveränderung wird es voraussichtlich zu einer ungleichmäßigen Verteilung im Land kommen, so werden in den gebirgigen Regionen (Sauerland, Weserbergland) verstärkte Zunahmen auftreten, während für die Niederrheinische Bucht eher leichte Niederschlagsrückgänge anzunehmen sind.

In ganz NRW wird es durch die steigenden Temperaturen zu einer mittleren bis sehr hohen Zunahme der Anfälligkeit gegenüber Hitze kommen, besonders betroffen davon sind dicht bebaute Ballungszentren und Großstädte im Ruhrgebiet. Insgesamt ist von einer Zunahme der Wetterextreme, wie Hitzewellen, Starkniederschläge oder Gewitter, auszugehen (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2009). Längerfristig wird es voraussichtlich zu einem Rückgang von Eis- und Frosttagen und zu einer Zunahme von Sommertagen und heißen Tagen kommen. Für die Dekade 2051 – 2060 zeigen die Projektionen für das Ruhrgebiet einen Anstieg der Sommertage ( $T_{max} \ge 25$  °C) um das Dreifache, bezogen auf heiße Tage ( $T_{max} \ge 30$  °C) sogar um das Fünffache im Vergleich zum aktuellen Klima (MUNLV, 2011). Durch die vermehrten Niederschläge in den Wintermonaten sind in dieser Jahreszeit auch vermehrt Niederschlagsextreme anzunehmen. Doch auch in den Sommermonaten wird die Zunahme vereinzelter Starkniederschlagsereignisse steigen.

Eine einfache und nachvollziehbare Darstellung lokaler Klimawandelauswirkungen ist über die Häufigkeitsanalyse der Anzahl klimatologischer Ereignistage möglich. Die Ereignistage werden durch das Überschreiten verschiedener Schwellenwerte der Lufttemperatur definiert, z.B. kann ein Tag der eine Lufttemperatur von 30 °C überschreitet als "Heißer Tag'



klassifiziert werden. Zur Untersuchung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Region Bottrop wurden der Testreferenzjahr-Datensatz (TRY) des Deutschen Wetterdienstes herangezogen (DWD, 2014). Bei den TRY handelt es sich um einheitliche, repräsentative Jahresdatensätze verschiedener meteorologischer Parameter, die auf Basis stündlicher Mess- und Beobachtungsdaten des Zeitraums 1988 bis 2007 erstellt wurden und in der Vergangenheit häufig in der thermischen Gebäudesimulation zum Einsatz kamen. Zur Verfügung stehen die TRY für ein heutiges Klima (TRY 2010, Referenzbezugsjahr 2010) sowie ein zukünftiges Klima (TRY 2035, Referenzbezugsjahr 2035). Für beide Zeiträume ist zudem ein "extremer" Datensatz verfügbar, d.h. ein Jahr in dem meteorologische Situationen über dem mittleren Zustand vorgelegen haben, die einen Ausblick auf möglicherweise häufigere Auftretenswahrscheinlichkeiten von extremen meteorologischen Situationen ermöglichen sollen. Zur Auswertung wurde in dieser Studie der Klimabezirk "Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland" mit der Repräsentanzstation Essen verwendet.

Tabelle 1: Auswertung von Lufttemperatur sowie der Anzahl klimatologischer Ereignistage für verschiedene Betrachtungsräume des Testreferenzjahrdatensatzes für den Klimabezirk "Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland" mit der Repräsentanzstation Essen (TRY: Testreferenzjahr für den betrachtungszeitpunkt 2010 bzw. 2035, TRY<sub>ext</sub> bezeichnet ein Testreferenzjahr mit besonders deutlicher Ausprägung der klimatischen Parameter, z.B. wärmer als das langjährige Mittel).

Szenario	<i>T<sub>mittel</sub></i> (°C)	<i>T<sub>max</sub></i> (°C)	<i>T<sub>min</sub></i> (°C)	<b>Sommertag</b> <i>T<sub>max</sub></i> ≥ 25 °C	Heißer Tag T <sub>max</sub> ≥ 30 °C	<b>Trop. Nacht</b> <i>T<sub>min</sub></i> ≥ 20 °C	<b>Grillpartytag</b> <i>T</i> <sub>21h</sub> ≥ 20 °C
TRY 2010	10,4	31,4	-8,9	25	4	2	24
TRY 2010 <sub>ext</sub>	10,8	34,3	-8,9	42	10	3	48
TRY 2035	11,6	34,2	-6,2	37	8	4	41
TRY 2035 <sub>ext</sub>	12,3	36,1	-6,2	60	15	7	61

Die Übersicht in Tabelle 1 verdeutlicht die Zunahme der mittleren und maximalen Temperaturen für den Bezugszeitraum 2035 bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Minimumtemperaturen, d.h. eine Zunahme der Erwärmung bzw. eine Erhöhung der Lufttemperaturen im Untersuchungsraum ist auf Basis der regionalen Klimaszenarien zu belegen. Gleichzeitig steigt die Anzahl der klimatologischen Ereignistage mitunter deutlich an. Die Anzahl der heißen Tage verdoppelt sich im Vergleich der Bezugszeiträume 2010 und 2035, ebenso die Anzahl der tropischen Nächte. Für ein extremes Jahr 2035 (TRY 2035<sub>ext</sub>) muss sogar von einer knappen Vervierfachung der Anzahl heißer Tage (Faktor 3,75) sowie der tropischen Nächte (Faktor 3,5) im Vergleich zum Bezugsjahr 2010 (TRY2010) ausgegangen werden.

Bei einer Betrachtung des Jahresverlaufes wird sichtbar, dass sich die Zunahme von Wärmestress und höheren Lufttemperaturen v.a. im Sommerhalbjahr (Monate Juni-September) bemerkbar machen wird, während der Winter von einem Rückgang der Situationen mit Kältestress gekennzeichnet ist, sich also auch im Winterhalbjahr die Erwärmungstendenzen manifestieren (Abbildung 8). Für das Ruhrgebiet zeigt der Vergleich



der Lufttemperaturdaten an der Repräsentanzstation Essen ( $\Delta T_L$ ) die Zunahme der höheren Temperaturklassen während der Sommermonate für den Testreferenzjahrdatensatz 2035. Die Temperaturklasse > 25 °C ist von einer Häufigkeitszunahme von 4 % für den Monat August charakterisiert.

Deutlicher treten die Unterschiede bei der Betrachtung der human-biometeorologischen Ausprägung zu Tage. Kälte-und Wärmestress lassen sich in Abbildung 8 durch die Verwendung des human-biometeorologischen Index UTCI (Universal thermal climate index) verdeutlichen. Der UTCI definiert für jede Kombination von Lufttemperatur, Wind, mittlerer Strahlungstemperatur und Wasserdampfdruck die Lufttemperatur, bei der die dynamische Reizantwort des Organismus (physiologische Belastung), derjenigen unter den aktuell betrachteten Bedingungen gleicht. Die Referenzumgebung wurde mit einer relativen Feuchte von RH = 50 % (bis zu einem maximalen Wasserdampfdruck von e = 20 hPa), Windstille und mittlere Strahlungstemperatur sind gleich der Lufttemperatur definiert. Diese dynamischen Reaktionen sind multidimensional (Kerntemperatur, Schweißrate, physiologischen Hautfeuchte etc. zu unterschiedlichen Expositionszeiten). Als eindimensionale Darstellung wurde deshalb der UTCI als Belastungsindex über eine Hauptkomponenten-Analyse berechnet. Der thermische Stress kann damit über eine 10-stufige Skala von "extremer Hitzestress" bis "extremer Kältestress" bewertet werden (Definition nach Jendritzky et al., 2010, Bröde et al., 2012). Bei der Betrachtung der Repräsentanzstation Essen lässt sich für den human-biometeorologischen Index UTCI sowohl die Abnahme der Situationen mit Kältebelastung während der Wintermonate, als auch die deutliche Zunahme moderater bis starker Wärmebelastungsperioden (> +26 °C) während der Sommermonate ablesen (Abbildung 8). Für den Monat August resultiert eine Zunahme von knapp 8 % der moderaten und starken Wärmebelastung für zukünftige Bedingungen.





Abbildung 8: Monatliche Häufigkeitsverteilung von Lufttemperaturklassen der Testreferenzjahre 2010 (momentanes Klima) und 2035 (zukünftiges Klima) für die Repräsentanzstation Essen. (B) Monatliche Häufigkeitsverteilung für die human-bioklimatische Größe UTCI für die Testreferenzjahre 2010 und 2035. Die Abbildungen am rechten Bildrand skizzieren die prozentualen Verschiebungen in den Häufigkeitsklassen von Lufttemperatur und UTCI zwischen den Bezugsjahren 2010 und 2035. Der UTCI wurde mit der Software Bioklima V2.6 berechnet (Błażejczyk, K., Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences).

In dicht bebauten Innenstädten, in denen bereits heute eine Überwärmung bodennaher Luftmassen im Vergleich zum nicht bebauten Umland (städtische Wärmeinsel) auftritt, kann die Zunahme thermischer Belastungsepisoden mit besonderen Belastungen für die Gesundheit und das menschliche Wohlbefinden einhergehen. Zur effektiven Anpassung an die negativen Auswirkungen des Klimawandels in Städten sind daher verschiedene Ansätze nötig: neben Mitigationsstrategien (z.B. Vermeidung von Treibhausgasemissionen) sind auch lokale bzw. stadtplanerische Anpassungsmaßnahmen an Klimawandelfolgen, wie die Erhöhung des Grünund Freiflächenanteils, die Entsiegelung von Flächen und die Freihaltung von Kaltluftschneisen gefragt.



## 2.1.4 Lokale Klimaanpassung: Klimafunktionen städtischer Freiflächen

Freiflächen in bebauten Bereichen besitzen im Hinblick auf klimatische Eigenschaften oftmals wichtige Funktionen als Ausgleichsflächen zu den vornehmlich versiegelten und überwärmten versiegelten Bereichen.

Innerstädtische Freiflächen können ein wichtiges Potential zur Belüftung und Kühlung der Städte bereitstellen (z.B. Eliasson und Upmanis, 2000, Thorsson und Eliasson, 2003). Aufgrund der dichten Bausubstanz der heutigen Städte ist bauliches Eingreifen allenfalls noch bei geplanten großflächigen Stadterweiterungen möglich. Deshalb muss kleinräumig dafür gesorgt werden, dass klimaökologische Gunsträume wie Parks und Freiflächen freigehalten und nicht mit Strömungshindernissen verbaut werden (Weber, 2004). Freiflächen sind aufgrund veränderter thermischer und physikalischer Eigenschaften im Vergleich zu versiegelter Fläche durch modifizierte Strahlungs- und Wärmebilanzkomponenten, höhere Abkühlungsraten und Bildung nächtlicher Kaltluft gekennzeichnet. Signifikante Unterschiede stellen sich auch bei Betrachtung der Tagesamplitude der Oberflächenstrahlungstemperatur ein, die über versiegelter Oberfläche, z.B. Asphalt, hohe Maxima erreichen kann (Anandakumar, 1999).

## Die mirkoklimatische Wirkung von Freiflächen

Die Verminderung der lokalen Luft- bzw. Oberflächentemperatur im Bereich vegetationsbestandener Oberflächen ist vor allem auf den thermodynamischen Effekt der Verdunstungskühlung (Evapotranspirationskühlung) zurückzuführen (Pfoser et al., 2014). Die Verdunstung von Wasser benötigt mit rund 2,45 MJ pro kg Wasser (bei 20 °C Lufttemperatur) eine beträchtliche Menge an Energie. Diese Energie steht nachfolgend nicht zur weiteren Erwärmung der Luft zur Verfügung. Bei der energetischen Betrachtung des Stadtklimas spielt dieser Prozess insofern eine wichtige Rolle, da vegetationsbestandene und ausreichend wasserversorgte Oberflächen einen signifikanten Anteil der durch die Sonne eingestrahlten Energie in den sogenannten Verdunstungswärmefluss (latenter Wärmefluss) umsetzen, so dass der Anteil zur direkten Erwärmung der Luft (sensibler Wärmefluss) vermindert wird. Das ist einer der wesentlichen Gründe, warum sich vegetationsbestandene Freiflächen im Tagesverlauf weniger stark aufheizen, als versiegelte städtische Oberflächen (Abbildung 9). Während der nächtlichen Ausstrahlungsperiode sorgen v.a. die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften unversiegelter Freiflächen (geringere Wärmekapazitätsdichte) für eine stärkere Abkühlung im Vergleich zu versiegelten, städtischen Flächen.





Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung der Verteilung verschiedener Freiflächen (oben) und deren Oberflächenstrahlungstemperaturen während der Abendstunden (Mitte) und der Morgenstunden (unten) einer Thermalbefliegung im Stadtgebiet Osnabrücks am 05./06.08.1997 (Datenquelle: Stadt Osnabrück, Amt für Umwelt bzw. Lükenga et. al. 1997).

Im Rahmen einer Untersuchung in Basel konnten Christen und Vogt (2004) belegen, dass an einem Freilandstandort mit überwiegendem Grünlandanteil rund 80 % der durch Sonneneinstrahlung zur Verfügung stehenden Energie an der Erdoberfläche in Verdunstung ungesetzt werden konnte, während an den drei Stadtstandorten mit Grünflächenanteil von 0 % bis 30 % weniger als 20 % der Energie in Verdunstung umgesetzt wurde. Der weitaus größere Teil stand an diesen Standorten folglich als sensible Wärme zur direkten Erwärmung der bodennahen Luftschicht zur Verfügung.

Grundsätzlich kann von einer abnehmenden Verdunstungskühlung der Vegetation mit sinkender Bodenfeuchtigkeit ausgegangen werden. Dies verdeutlichen exemplarisch die am



24.07.2013 um 15 Uhr gemessenen Oberflächenstrahlungstemperaturen in Braunschweig (siehe Abbildung 10). Der begrünte Mittelstreifen einer vierspurigen Hauptstraße war nach einer mehrtätigen Hitzeperiode und 13 Tagen ohne Niederschlag zu diesem Zeitpunkt ausgetrocknet und wies eine mittlere Oberflächentemperatur von 48,2 °C (a) auf, während der nebenliegende Straßenbelag (nicht abgebildet) mit 49,7 °C nur geringfügig wärmer war. Die Oberflächentemperatur der Vegetation war somit deutlich höher als die zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Lufttemperaturen und stellte eine Wärmequelle dar. Eine in einem nahegelegenen Park gelegene unbewässerte Rasenfläche (b) wies im besonnten Teil eine mittlere Temperatur von 40,3 °C auf, während der beschattete Teil eine Temperatur von 36 °C aufwies (Lufttemperatur ca. 30 °C). Als deutliche Wärmesenke kann die im selben Park gelegene bewässerte und beschattete Rasenfläche (c) genannt werden, die eine mittlere Temperatur von 25,8 °C aufwies und zu einer entsprechenden Verbesserung des lokalen Mikroklimas beitrug (vgl. Hasse et al., 2013).



Abbildung 10: Oberflächenstrahlungstemperaturen einer unbewässerten Rasenfläche (a), einer unbewässerten, teilweise verschatteten Rasenfläche (b) und einer bewässerten, verschatteten Rasenfläche (c) in Braunschweig (aus Hasse et al., 2013).

Vegetationsbestandene Freiflächen können aufgrund photosynthetischer Aktivität des Bestandes terrestrische Senken für atmosphärisches Kohlendioxid darstellen. Entscheidend ist in dieser Hinsicht die Frage, ob die Flächen über das Sommerhalbjahr mehr CO<sub>2</sub> binden, als sie während des Winterhalbjahres über Pflanzen- und Bodenatmung (sog. Respiration) wieder an die Atmosphäre abgeben. Als beispielhafte Ergebnisse für die potentielle Senkenfunktion von Freiflächenstandorten lassen sich Befunde von Grasland- bzw. Rasenstandorten ableiten (z. B. Townsend-Small und Czimczik, 2010, Zirkle et al., 2011, Winston et al., 2013, Ng et al., 2014). In der Jahresbilanz zeigen viele der untersuchten Standorte Senkenpotential für atmosphärisches CO<sub>2</sub>.

Zusammenfassend können Freiflächen somit wichtige klimameliorierende Eigenschaften auf das lokale Umfeld ausüben. Sie sind zur Dämpfung des Stadtklimaeffektes bzw. zur



Verminderung der städtischen Überwärmung von bedeutsamem stadtplanerischen Interesse (Baumüller et al., 1998). Zu Freiflächen, die wichtige Klimafunktionen innerhalb bebauter Bereiche einnehmen können, zählen u.a. Parkanlagen, Grünflächen, Brachflächen, Gleisanlagen oder Flussläufe (Mayer et al., 1994, Spronken-Smith et al., 2000, Eliasson und Upmanis, 2000, Kuttler, 1998, Weber, 2004, Adams und Smith, 2014, Kong et al., 2014). Die in der wissenschaftlichen Literatur untersuchten und veröffentlichten Eigenschaften mikroklimatischer Potentiale verschiedener Freiflächentypen werden im Folgenden steckbriefartig zusammengefasst. Dabei muss beachtet werden, dass sich in der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur nicht für jeden einzelnen Freiflächentypus belastbare Effekte und Kennzahlen auffinden lassen – in ihrer mikroklimatischen Wirkung vergleichbare Freiflächentypen sind in der Zusammenstellung daher zu insgesamt sechs Steckbriefen (Stadtwald, Grünflächen/Wiesen/Weiden, Straßenbegleitgrün, Stadtbrachen, Bahnanlagen, Wasserflächen) zusammengefasst.

Zusammenfassend lassen sich folgende klimatische Funktionen innerstädtischer Freiflächen charakterisieren:

- Minderung von Oberflächen- und Lufttemperatur
- Erhöhung der Verdunstung (Evapotranspiration) bzw. der Verdunstungskühlung
- Potential zur Aufnahme von CO<sub>2</sub> (über Photosynthese)
- Erhöhung der Ventilation und Belüftung für angrenzende Bereiche
- Positive Wirkung aus human-biometeorologische Bedingungen
- Pufferung von lokalklimatischen Extrembedingungen.



## Freiflächentyp: Innerstädtische Waldflächen, Stadtwald



Flächenanteil am Stadtgebiet Bottrop: 19 %

Flächenanteil am InnovationCity-Gebiet: 4 %

#### Ausgestaltung

Als Stadtwald werden innerstädtische Waldflächen bezeichnet, die häufig in Kombination mit Freizeiteinrichtungen als Naherholungsgebiet genutzt werden. In Abhängigkeit von Flächengröße, Baumartenzusammensetzung, Bestandsdichte und Alter können sie einen teils erheblichen Einfluss auf das Stadtklima ausüben<sup>1</sup>.

#### Mikroklimatische Eigenschaften

Innerstädtische Waldflächen haben eine große klimatische Bedeutung als kühlende Flächen innerhalb der städtischen Wärmeinsel. Innerstädtische Waldflächen können durch zwei wesentliche Effekte zu einer Temperaturreduktion beitragen: Schattenwurf und Transpiration. Vor allem große Laubbäume sorgen im Sommer mit ihrer dichten Krone für Abschattung und somit für eine verringerte Strahlungstemperatur und niedrigere Temperatur der Bodenoberfläche (Abschattungseffekt einzelner Bäume auf die Oberflächentemperatur kann bis zu 19 °C bei Mittagseinstrahlung betragen<sup>2</sup>). Für die Lufttemperatur ergeben sich durchschnittliche Reduktionen von ca. 1,5 °C bis maximal 5,3 °C<sup>3</sup>. Insbesondere in Hitzeperioden sind thermische sowie bioklimatische Faktoren nicht nur deutlich niedriger als in versiegelten Gebieten, sondern auch niedriger als über anderen Grün- und Freiflächen. Allerdings ist sowohl der Schattenwurf als auch die Abkühlung durch Transpiration von der absoluten Größe der bewaldeten Flächen und von Bestandsdichte und Baumart abhängig<sup>4</sup>. Für Nadelbäume gilt, dass die abkühlenden Effekte im Sommer deutlich niedriger sind als die der Laubbäume.

Im Winter sind die Effekte der blattabwerfenden Laubbäume abgeschwächt. So kommt es aber auch zu einer Verringerung des Kältestress, da die Sonnenstrahlung den Boden erreichen und diesen aufwärmen kann. Nadelbäume verursachen während des Winters durch die weiterhin existierende Verschattung eher Kältestress.

#### Beispiele für mikroklimatische Eigenschaften

Beispiele für Wirkeigenschaften	Wirkgrößen	Mikroklimatische Wirkung
Laubbäume	Lufttemperatur	durchschnittliche Reduktionen von ca. 1,5 °C bis maximal 5,3 °C $^3$
	mittlere Strahlungstem- peratur	Reduktionen von 13 bis 20 °C im Winter und bis maxi- mal 44 °C im Sommer durch Verschattung <sup>5</sup>

#### Literatur

Pfoser, N., Henrich, J., Jenner, N., Schreiner, J., Kanashiro, C., Heusinger, J., Weber, S., Hegger, M., Dettmar, J., 2014. Gebäude Begrünung Energie - Potenziale und Wechselwirkungen, Forschungsge-sellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL); Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn, p. 305. 1)

Arrson, D., Stringer, P., Ennos, A.R., 2012. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. Urban Forestry & Urban Greening 11, 245-255 Horbert, M. (2000): Klimatologische Aspekte der Stadt und Landschaftsplanung, TU Berlin; Huang, L. et al. (2008): A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate i cover and urban heat island of Nanjing, China, In: Building and Environment, 43(1), pp.7–17 2) 3) icroclimate in four types of ground

Leuzinger, S., Vogt, R., Körner, C., 2010. Tree surface temperature in an urban environment. Agricultural and Forest Meteorology 150, 56-62.

5) Cohen, P., Potchter, O., Matzarakis, A., 2012. Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. Building and Environment 51, 285-295. Bildquellen:

Bild 1: stadt-zuerich.ch

Bild 2: frankfurt.de Bild 3: commons.wikimedia.org

Bild 4: stadtentwicklung.berlin.de

Abbildung 11: Steckbriefe zur mikroklimatischen Wirkung städtischer Freiflächen nach Angaben aus der wissenschaftlichen Literatur. Die Abbildung wird auf den folgenden Seiten fortgesetzt.



## Freiflächentyp: Grünflächen, Wiesen und Weiden







Flächenanteil am Stadtgebiet Bottrop: 12 %

Flächenanteil am InnovationCity-Gebiet: 9 %

#### Ausgestaltung

Grünflächen können baumlose Rasenflächen in Parks und Gärten, sowie in kleinem Maße auch in Innenstädten sein. Städtische Wiesen und Weiden sind artenreicher und weisen durch i.d.R. extensive Nutzung (z.B. Beweidung oder Mahd) ein höheres Wachstum als Rasenflächen auf.

#### Mikroklimatische Eigenschaften

Das Mikroklima über Rasenflächen ist im Vergleich zu vegetationsfreien Flächen v.a. Durch geringere Lufttemperaturen gekennzeichnet. Dies geht mit zwei Effekten einher: Durch höhere Verdunstungseffekte (Evapotranspiration) wird der Luft Energie entzogen und somit sowohl die Oberfläche als auch die bodennahe Luftschicht weniger stark aufgeheizt<sup>1</sup>. Dazu bedarf es allerdings einer ausreichenden Wasserversorgung, die im Sommer teils künstlich aufrechterhalten werden muss. Bei Wiesen und Weidenstandorten ist künstliche Bewässerung meistens nicht vorgesehen. Eine Rasenfläche ist zudem von einer geringfügig höheren Albedo als unversiegelte Flächen charakterisiert. Dadurch wird die Oberflächentemperatur ebenfalls reduziert. Da Grünflächen ohne Baumbestand jedoch stärker der Sonneneinstrahlung exponiert sind, weisen sie ein vergleichsweise ungünstigeres Mikroklima als beispielsweise baumbestandene Flächen auf<sup>1,3</sup>.

Die hier beschriebenen Effekte gelten im Wesentlichen auch für die Freiflächentypen Kleingarten, Friedhof, Spielund Sportplätze sowie Brachflächen. Da nicht für alle Freiflächentypen wissenschaftliche Untersuchungen in der referierten Literatur auffindbar sind, werden die entsprechenden Freiflächentypen in diesem Steckbrief zusammengefasst.

#### Beispiele für mikroklimatische Eigenschaften

Beispiele für Wirkeigenschaften	Wirkgrößen	Mikroklimatische Wirkung	
Evapotranspiration	Lufttemperatur	Abkühlung um durchschnittlich 2 °C bis maximal 4 °C	
	Mittlere Strahlungstem-	Abkühlung um 14 °C gegenüber versiegelten Flächen <sup>3</sup> ,	
	peratur	aber bis zu 30 °C höher als im Stadtwald (Wiesen und	
	205	Weiden) <sup>1</sup>	
A	PET (Physiologische	7 - 10 °C kühler als über versiegelten Flächen, aber 10 -	
	Äquivalenztemperatur,	15 °C wärmer als unter Baumschatten <sup>1,3</sup>	
	bioklimatischer Index)		

#### Literatur

Cohen, P., Potchter, O., Matzarakis, A., 2012. Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. Building and Environment 51, 285-295.
 Spronken-Smith, R.A., Oke, T.R., 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. International Journal of Remote Sensing 19, 2085-2104.

Spronken-Smith, R.A., Oke, T.R., 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. International Journal of Remote Sensing 19, 2085-2104. Ketterer, C. , Matzarakis, A. (2014): Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. Landscape and Urban Planning, 122, 78-88.

a) Retrefet, C., Watzarakis, A. (2014): Human-biometeorological assessment of near stress reduction by replanning measures in stuttgart, Germany. Landscope and Orban Planning, 122, 78-88 Bildquellen: Bild 1:360-prad-Panorama.de

Bild 1: 360-grad-Panorama.de Bild 2 & 3: maps.google.de



## Freiflächentyp: Straßenbegleitgrün/Straßenrandbegrünung







Flächenanteil am Stadtgebiet Bottrop: 3 %

Flächenanteil am InnovationCity-Gebiet: 6 %

#### Ausgestaltung

Straßenbegleitende Begrünung kann durch Bepflanzung des Straßenmittelstreifens sowie der Straßenrandstreifen mit Bäumen, Rasenflächen oder Sträuchern erfolgen.

#### Mikroklimatische Eigenschaften

Große Laubbäume sorgen im Sommer mit ihrer dichten Krone für Abschattung und somit für eine verringerte Strahlungstemperatur und niedrigere Temperatur der Bodenoberfläche. Als Objekte mit Barrierewirkung verursachen sie niedrigere Windgeschwindigkeiten und vermindern das Absinken atmosphärischer Schadstoffe in oberflächennahe Luftschichten (Deposition). Allerdings werden die durch Straßenverkehr emittierten Schadstoffe aus denselben Gründen schlechter abtransportiert. Die Auswirkungen von Niederschlagsereignissen werden durch Interzeption abgeschwächt. Im Winter sind die Effekte der laublosen Bäume schwächer. So kommt es aber auch zu einer Verringerung des Kältestress, da die Sonnenstrahlung den Boden erreichen und diesen aufwärmen kann. Hecken und Sträucher haben ähnliche Wirkeigenschaften wie Bäume, aufgrund ihrer geringeren Höhe insgesamt jedoch eine schwächere Wirkung als Laubbäume.

Durch Rasenflächen werden die klimatischen Effekte von Straßenbäumen aufgewertet. Sofern die Wasserversorgung ausreicht, werden die unversiegelte Oberfläche sowie die bodennahe Luftschicht durch Verdunstungseffekte (Evapotranspiration) gekühlt. Durch Infiltration wird der Oberflächenabfluss bei Starkregenereignissen reduziert.

Beispiele für Wirkeigenschaften	Wirkgrößen	Mikroklimatische Wirkung
Laubbäume	Oberflächentemperatur	ca12 °C <sup>1</sup> durch Verschattung
	mittlere Strahlungstem-	ca20 °C <sup>2</sup>
	peratur	durch Verschattung
	lokale Lufttemperatur	ca2 °C <sup>3</sup>
	Windgeschwindigkeit	-50% <sup>4</sup>
	Niederschlag	Interzeption
Rasenflächen	Oberflächentemperatur	-14 °C <sup>1</sup> durch Evapotranspiration

#### Beispiele für mikroklimatische Eigenschaften

#### Literatur

- Armson, D., Stringer, P., Ennos, a. R. (2012): The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. Urban Forestry & Urban Greening, 11(3), pp. 245–255.
  Gulyás, Á., Unger, J., Matzarakis, A. (2006): Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. *Building and Environment*, 41(12), pp. 1713-1722.; Mayer, H., Kuppe, S., Holst, J., Imbery, F., Matzarakis, A. (2009): Human thermal comfort below the canopy of street trees on a typical Central European summer day. Meteorological Institute, Albert-Ludwigs-University, Freiburg; Robitu, M., Musy, M., Inard, C., Groleau, D. (2006): Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, *80*(4), pp. 435-447.
  Gulyás, Á., Unger, J., Matzarakis, A. (2006): Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. Building and Environment, and Environment, J., Matzarakis, A. (2006): Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. Building and Environment, and Environment, Building and Environment, Building and Environment, and Environment.
- 3) Gulyås, Å., Unger, J., Matzarakis, A. (2006): Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. Building and Environment, 41(12), pp. 1713-1722.; Georgi, J. N., Dimitriou, D. (2010): The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities: Case study of Chania, Greece. Building and Environment, 45(6), pp. 1401-1414; Kjelgren, R., Montague, T. (1998): Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. Atmospheric Environment, 32(1), pp. 35-41; Armson, D., Stringer, P., Ennos, a. R. (2012): The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. Urban Forestry & Urban Greening, 11(3), pp. 245-255; Mayer, H., Kuppe, S., Holst, J., Imbery, F., Matzarakis, A. (2009): Human thermal comfort below the canopy of street trees on a typical Central European summer day. Meteorological Institute, Albert-Ludwigs-University, Freiburg.; Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A. (1991): Heat island and oasis effects of vegetative canopies: micro-meteorological field-measurements. Theoretical and Applied Climatology, 44(2), pp. 123-138.; Shashua-Bar, L., Potchter, O., Bitan, A., Boltansky, D., Yaakov, Y. (2010): Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. International Journal of climatology, 30(1), pp. 44-57.

4) Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A. (1991): Heat island and oasis effects of vegetative canopies: micro-meteorological field-measurements. Theoretical and Applied Climatology, 44(2), pp. 123-138. Bildquellen:

Bild 1,2: Pföser, N., Jenner, N., Henrich, J., Heusinger, J., Weber, S. (2014). Gebäude Begrünung Energie - Potenziale und Wechselwirkungen. Forschungsgesellschaft Landschaftsbau Landschaftsentwicklung e.V. (FLL); im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): 305 S., Bild 3: maps.google.de



## Freiflächentyp: Stadtbrachen







Flächenanteil am Stadtgebiet Bottrop: 3 %

Flächenanteil am InnovationCity-Gebiet: 2 %

#### Ausgestaltung

Stadtbrachen sind vom Menschen künstlich geschaffene Flächen, die nicht mehr genutzt werden. Dazu gehören stillgelegte Industrieflächen, Eisenbahngelände oder Bauruinen. Da die Flächen sich selbst überlassen werden, kommt es häufig zu einer natürlichen Sukzession. In vielen Fällen stellen Brachen einen Lebensraum für seltene oder bedrohte Tier- und Pflanzenarten dar<sup>1</sup>.

#### Mikroklimatische Eigenschaften

Die vorherrschenden klimatischen Bedingungen einer Brachfläche sind stark durch den vorliegenden Vegetationsanteil und die Bodenverhältnisse abhängig, deshalb kann es bei verschiedenen Brachflächen zu einer hohen klimatischen Vielfalt kommen. Flächen mit lockeren Vegetationsstrukturen kühlen gegenüber versiegelten Flächen nachts stärker aus, können aber besonders bei einem geringen Bedeckungsgrad des Bodens tagsüber hohe Temperaturen erreichen, wodurch eine große Amplitude der Tagesgänge möglich ist<sup>2</sup>. Lineare Brachflächen wie alte Bahntrassen können eine entscheidende Rolle als Belüftungsbahnen einnehmen, da sie sehr gute Kaltluftlieferanten sind<sup>1,2,3</sup>.

#### Beispiele für mikroklimatische Eigenschaften

Beispiele für Wirkeigenschaften	Wirkgrößen	Mikroklimatische Wirkung
Evapotranspiration	Lufttemperatur	Abkühlung von 1,4 °C (junge Brachfläche mit Pionier- vegetation) bis zu 1,7 °C (alte Brachfläche mit dichtem Gehölz und hoher Krautschicht) möglich <sup>4</sup>
Vegetationsfrei	Verdunstung	94 mm weniger Verdunstung über einer unbewachse- nen Fläche gegenüber einer Rasenfläche <sup>5</sup>

#### Literatur

Pauleit, S. (2013): Stadtbrachen als Chance: Perspektive für mehr Grün in den Städten. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.

Horbert, M. (2000): Klimatologische Aspekte der Stadt und Landschaftsplanung. TU Berlin. 2)

Weber, S., Kuttler, W., 2003. Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und -qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 63, 381-386. 3) 4)

Mathey, J.; Rößler, S.; Banse, J.; Lehmann, I. (2014): How can urban brownfields contribute to climate adaptation and human well-being in cities? In: Korn, H. et al. [Eds.]: Proceedings of the European Conference "Climate Change and Nature Conservation in Europe - an ecological, policy and economic perspective", Bonn: Bundesamt für Naturschutz, (BfN-Skripten; 367), pp. 114-115. Zhang, Y. K., Schilling, K. E. (2006): Effects of land cover on water table, soil moisture, evapotranspiration, and groundwater recharge: a field observation and analysis. *Journal of Hydrology*, 319(1), pp. 5)

328-338. Bildquellen:

Bild 1: zzz-bremen.de

Bild 2: tagschmetterlinge.de

Bild 3: maps.google.de



## Freiflächentyp: Bahnanlagen







#### Flächenanteil am Stadtgebiet Bottrop: 1 %

Flächenanteil am InnovationCity-Gebiet: 2 %

#### Ausgestaltung

Zu den Bahnanlagen zählen alle Schienenverkehrsflächen und Gleisanlagen und sonstige Flächen des Schienenverkehrs.

#### Mikroklimatische Eigenschaften

Die klimatische Situation von Bahnanlagen weist große Tag- und Nachtunterschiede bei der Strahlungs- und Lufttemperatur auf. Tagsüber erwärmen sich die Schotterflächen unter den Eisenbahnschienen aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit stark und können dadurch auch höhere Temperaturen als Siedlungsbereiche erreichen. Durch die zwischen dem Schotter eingeschlossenen Luftmassen kann die Wärme allerdings nur schlecht weitergeleitet und gespeichert werden, sodass es nachts zu einer raschen Abkühlung kommt. Gleisanlagen zeigen nachts eine stärkere Abkühlung als versiegelte Siedlungsbereiche auf<sup>1,2</sup>. Aufgrund ihrer geringen Rauigkeit weisen Bahnanlagen zudem ein Potential als stadtklimarelevante Luftleitbahnen auf<sup>3</sup>.

#### Beispiele für mikroklimatische Eigenschaften

Beispiele für Wirkeigenschaften	Wirkgrößen	Mikroklimatische Wirkung
Schotterfläche	Oberflächenstrah- lungstemperatur	Tagsüber 14 bis 16 °C wärmer als angrenzende Gras- oberfläche, nachts 3 bis 4 °C kühler als Siedlungsfläche <sup>1</sup>

#### Literatur

Weber, S. (2004): Energiebilanz und Kaltluftdynamik einer urbanen Luftleitbahn. Essener Ökologische Schriften, Bd. 21, 203 S., Westarp-Wissenschaften, Hohenwarsleben. Baumüller, J., Hoffmann, U. und U. Reuter (2008): Stadtklima Stuttgart 21 – Grundlagen für die Planung. Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie. Online verfügbar unter: http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima\_s21\_vorwort [zuletzt aufgerufen: 27.08.2014]. Horbert, M. (2000): Klimatologische Aspekte der Stadt und Landschaftsplanung. TU Berlin. ellen: 1) 2)

Bildauellen:

Bild 1: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin (Hrsg.) (2010): Flächennutzung und Stadtstruktur – Dokumentation der Kartiereinheiten und Aktualisierung des Datenbestandes. Online verfügbar: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/download/Nutzungen\_Stadtstruktur\_2010.pdf [zuletzt aufgerufen 27.08.2014]. http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/un Bild 2: bahnbilder.de

Bild 3: Weber, S. (2004): Energiebilanz und Kaltluftdynamik einer urbanen Luftleitbahn. Essener Ökologische Schriften, Bd. 21, 203 S., Westarp-Wissenschaften, Hohenwarsleben



## Freiflächentyp: Wasserflächen



Flächenanteil am Stadtgebiet Bottrop: 2 %

Flächenanteil am InnovationCity-Gebiet: 2 %

#### Ausgestaltung

Innerstädtische Wasserflächen können neben Flussläufen oder natürlichen Seen, künstlich angelegte Teiche oder Kanäle in Parks oder renaturierten Gruben (Baggerseen) sein.

#### **Mikroklimatische Eigenschaften**

Wasser ist aufgrund seiner spezifischen Wärmekapazität ein Medium mit trägen thermischen Eigenschaften, das sich der Umgebungstemperatur nur langsam anpasst. Des Weiteren wird Energie zu Teilen in Form latenter Wärme (Verdunstung) abgegeben. Wasserflächen haben daher tagsüber, insbesondere im Frühjahr und Sommer, kühlende Auswirkungen auf das Lokalklima. Im Herbst und Winter hingegen wird Wärmeenergie gespeichert und nur langsam an die Umgebung abgegeben. Dadurch können sowohl Hitzestress als auch Kältestress abgedämpft werden. Das Ausmaß der mikroklimatischen Wirkung variiert je nach Gewässertyp und -größe. Aufgrund der relativ geringen Albedo von Wasseroberflächen ist auch die Strahlungstemperatur niedriger als gegenüber bebauten Flächen<sup>4</sup>. Wenn die Temperaturunterschiede zwischen den Wasserflächen und der Umgebung groß genug sind, kann es zur Entstehung von Ausgleichswinden kommen<sup>1</sup>.

#### Beispiele für mikroklimatische Eigenschaften

Wirkgrößen	Mikroklimatische Wirkung
Lufttemperatur	1 °C bis 3 °C kühler als umgebender Park bzw. Stadt <sup>1,2,3</sup>
Luftfeuchtigkeit	Erhöhung der Luftfeuchte <sup>1</sup>
Oberflächentemperatur	Kühler als Umgebung <sup>4</sup>
Mittlere Strahlungstem- peratur	7 °C kühler als versiegelte Flächen <sup>4</sup>
Windgeschwindigkeit	Erhöhung der Windgeschwindigkeit bei windstillen Wetterlagen <sup>1</sup>
	Wirkgrößen Lufttemperatur Luftfeuchtigkeit Oberflächentemperatur Mittlere Strahlungstem- peratur Windgeschwindigkeit

#### Literatur

Coutts, A.M., Tapper, N.J., Beringer, J., Loughnan, M., Demuzere, M. (2013): Watering our cities: The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. Progress in Physical Geograph. Li, C., Yu, C.W (2014): Mitigation of urban heat development by cool island effect of green space and water body. Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air 1)

2) Conditioning (pp. 551-561). Springer Berlin Heidelberg.

Huang, L. J. J., Zhao, D., Zhu, J. (2008): A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. Building and Environment, 43(1), pp. 7–17. Taleghani, M., Tenpierik, M., van den Dobbelsteen, A., Sailor, D. J. (2014): Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the 3)

4) Netherlands. Solar Energy, 103, pp. 108-124.

Bildquellen: Bild 1: de.wikipedia.org Bild 2: earth.google.de

Bild 3: kularuhr.de



## 3 Material und Methoden

## 3.1 Standortfindung von geeigneten Freiflächen als Untersuchungsflächen (Arbeitspaket 1)

Im Verbundprojekt KuLaRuhr haben sich zu Beginn nach gemeinsamer Absprache der beteiligten Teilprojekte zwei Betrachtungsräume herauskristallisiert (Abbildung 1). Der erste Betrachtungsraum befindet sich im westlichen Ruhrgebiet mit den Städten Essen, Gladbeck und Bottrop. Im östlichen Ruhrgebiet, mit vorwiegend forst- und landwirtschaftlich geprägter Kulturlandschaft, ist der zweite Betrachtungsraum angesiedelt.

In Abstimmung mit Teilprojekt 1.1 "Optimierung der Energieeffizienz von Siedlungen" (TU Darmstadt) und nach Abwägung verschiedener Standortkriterien, insbesondere für Eddy-Kovarianz Messungen, wurde das InnovationCity-Gebiet der Stadt Bottrop als Untersuchungsraum für Teilprojekt 08 und Teilprojekt 1.1 ausgewählt (Abbildung 12). Der Untersuchungsraum befindet sich im westlichen Ruhrgebiet, welches durch eine heterogene Flächennutzung aus v.a. Industrie- und Siedlungsgebieten, Freiflächen und landwirtschaftlichen Nutzflächen charakterisiert ist. Somit besteht die Möglichkeit vielfältige Freiflächennutzungen mikroklimatisch zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Durch die landwirtschaftliche Nutzung im Norden des Betrachtungsraumes konnte zudem in der Nähe zu den urbanen Klimamessungen der Standort für die rurale Referenzstation installiert werden.

Um repräsentative Messstandorte für die Untersuchungen zu lokalisieren (vgl. Arbeitspaket 1), wurde zunächst ein Kriterienkatalog erarbeitet. Für diesen konnte die Flächennutzungskartierung der Stadt Bottrop bzw. des Regionalverbandes Ruhr und die darin kartierten Freiflächentypen herangezogen werden. Zudem wurde in Kooperation mit Teilprojekt 1.1 auf die dort definierte Klassifikation der energetischen Stadtraumtypen zurückgegriffen.

Aus der Flächennutzungskartierung konnten elf verschiedene Freiflächentypen herausgearbeitet werden, die durch unterschiedliche mikroklimatische und räumliche Eigenschaften gekennzeichnet sind (vgl. Abbildung 12, Freiflächensteckbriefe). Die in Teilprojekt 1.1 angewendeten energetischen Stadtraumtypen gehen sehr viel stärker auf die Gebäudestruktur innerhalb der städtischen Flächennutzungstypen ein. So werden bspw. Kriterien wie Gebäudehöhe und -dichte, Himmelssicht (engl. sky-view-factor), Gebäudealter und Gebäudenutzung herangezogen. In TP 08 sind die energetischen Stadtraumtypen lediglich zur Charakterisierung der umliegenden Gebäudestruktur, nicht jedoch zur Definition der eigentlichen Freiflächenart, herangezogen worden.





Abbildung 12: Darstellung der Freiflächen und Freiflächenverteilung im Stadtgebiet Bottrop bzw. im InnovationCity-Gebiet.

Zur Lokalisation der konkreten Messstandorte wurden Luftbilder und topographisches Kartenmaterial (Nordrhein-Westfalen, Topografische Karte 1:25000 Blatt 4307, 2011) analysiert. Es wurde darauf geachtet, dass die verschiedenen Anforderungen an Klima- bzw. Eddy-Kovarianzmessungen (homogener Untergrund, freie Anströmbarkeit) erfüllt sind. Später wurden die Standortmöglichkeiten, welche sich durch Luftbildanalyse und Kartensichtung ergaben, vor Ort geprüft, um den aktuellen Zustand und die Erreichbarkeit der Flächen zu begutachten. Die schließlich ausgewählten Freiflächenstandorte lagen im Bereich des Stadtteils BOT-Eigen, der rurale Vergleichsstandort im Stadtteil BOT-Kirchhellen. Die Beschreibung der einzelnen Standorte erfolgt in Kap.3.2.

## 3.1.1 Untersuchungsgebiet

Bottrop wird naturräumlich dem Emscherland zugeordnet. Nach der letzten Eiszeit entstanden hier der wasserstauenden Bodenschichten und dem wegen geringen Gefälle Überschwemmungsgebiete und feuchte Bruchwälder. Infolge der Erschließungen im Rahmen des Steinkohlebergbaus wandelte sich das Bild in der Region zu der heutigen mit Industriegebieten, Altindustriestandorten und städtischen Siedlungen geprägten Landschaft. Im nördlichen Teil des Emscherlandes (nördlich der BAB 2) findet man jedoch auch heute noch verstärkt land- und forstwirtschaftliche Nutzung vor (Regionalverband Ruhr, 2008). Die Untersuchungen und Messungen fanden allerdings hauptsächlich im dichter besiedelten Stadtgebiet südlich der Bundesautobahn 2 statt.

Das Untersuchungsgebiet des TP08 ist im InnovationCity-Gebiet der Stadt Bottrop und dessen nordwestlicher Umgebung lokalisiert. Bottrop liegt nördlich der Emscher (51° 34' 24" N, 6° 55' 20" O) und ist administrativ mit rund 117.000 Einwohnern und einer Fläche von ca. 100 km<sup>2</sup> als Großstadt im nördlichen Ruhrgebiet zu charakterisieren



(Regionalverband Ruhr, 2008). Reliefunterschiede sind im Untersuchungsgebiet nur relativ gering ausgeprägt. Das Stadtgebiet Bottrops liegt auf einer Höhe zwischen 40 und 50 m ü NN, wobei größere Erhöhungen im Süden des Stadtgebietes auftreten, zu denen die Halden Beckstraße (Tetraeder) und Vonderort zählen. Beide Bereiche liegen jedoch soweit südlich im Stadtgebiet, dass sie den Untersuchungsraum nicht wesentlich beeinflussen. Das Kerngebiet der Untersuchungen in TP08 befand sich im Stadtteil BOT-Eigen. Im Norden Bottrops wurde ein Messstandort zur Untersuchung der Energiebilanz der Erdoberfläche auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche (Umlandstandort RURA) installiert. Aufgrund der in diesem Bereich auftretenden wasserstauenden Bodenschichten handelt es sich um einen Standort mit hohen Bodenwassergehalten (Regionalverband Ruhr, 2008, vgl. Kap. 3.2.2). Der zweite Energiebilanzstandort (SIED) sowie Messungen zur Untersuchung des Mikroklimas verschiedener städtischer Freiflächen wurden im Bereich des Stadtteils BOT-Eigen installiert, in dessen Siedlungsgebiet viele typische Bergbausiedlungen das Erscheinungsbild prägen.

## 3.2 Freiflächenstandorte – Messaufbau und Messprinzipien

Zur Untersuchung des turbulenten Austausches von Energie und Masse zwischen Oberfläche und bodennaher Atmosphäre wurden an den Standorten SIED und RURA zwei Energiebilanzstationen installiert. An weiteren fünf Standorten wurden Messungen von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit vorgenommen, um die mikroklimatischen Eigenschaften der Freiflächenstandorte zu charakterisieren (Abbildung 13). Die klimatischen Messungen erfolgten über eine Zeitperiode von Dezember 2011 bis März 2013. Aufgrund schlechter Witterungsbedingungen traten im Winter 2011/2012 vermehrt Perioden mit Messausfällen der photovoltaikversorgten Energiebilanzstation zu Tage. Der für KuLaRuhr zugrundliegende Untersuchungszeitraum wurde deshalb auf die Jahresperiode vom 01. März 2012 bis 28. Februar 2013 festgelegt. Die detaillierte Beschreibung der Messstandorte sowie der Umgebungscharakteristika sind im Folgenden steckbriefartig aufgelistet.

#### Endbericht Teilprojekt 08 – Cluster 02





Abbildung 13: Übersicht der Messstandorte in Bottrop (TP08, KuLaRuhr).


# Messstandort: Bottrop-Eigen Markt (EIGM)





Kartengrundlage: Landesvermessungsamt NRW

Messgeräte

Temperatur- und Feuchtesensor HOBO der Firma Onset

#### Beschreibung der Freifläche

Bei dem Standort BOT-Eigen Markt handelt es sich um eine versiegelte innerstädtische Freifläche(Markt- und Parkplatzfläche) welche von lockerer Mehrfamilienhausbebauung umgeben ist.

#### Weitere Eckpunkte

Energetische Stadtraumtypen (TP 1.1)	EST 1
Flächennutzung Bottrop (RVR)	Parkplatzfläche
Klimatope nach Klimaanalyse BOT	Stadtklima
Temperatur(verteilung) nach Klimaanalyse BOT	+1,5 bis 2,5 K
Versiegelungsgrad (50 m Radius um Station)	93 %

Messhöhe

3,00 m



Messhöhe

3,00 m

# Messstandort: Bottrop Sydowstraße (SYDO)



Kartengrundlage: Landesvermessungsamt NRW

Messgeräte

Temperatur- und Feuchtesensor HOBO der Firma Onset

#### Beschreibung der Freifläche

Bei der Freifläche an der Sydowstraße handelt es sich um eine relativ große Verkehrsinsel mit Rasenbewuchs und lockerer Baumbepflanzung. Um die Grünfläche herum befindet sich eine lockere Wohngebäudebesiedlung. Die Häuser sind vor allem durch dunkle Fassaden gekennzeichnet und unsaniert. Zudem weisen die Gebäude teils sehr große Gärten auf. Im Nordwesten der Siedlung fließt der Kirchhemmsbach, welcher eine positive Wirkung auf das Stadtklima zeigen könnte.

#### Weitere Eckpunkte

EST 1
Grünflächen
Stadtrandklima
-0,5 bis +0,5 K
46 %

Seite 38/114



# Messstandort: Bottrop Trappenstraße (TRAP)



Kartengrundlage: Landesvermessungsamt NRW

Messgeräte

Temperatur- und Feuchtesensor HOBO der Firma Onset

### Beschreibung der Freifläche

Der Messstandort Trappenstraße ist durch Rasen und lockeren Baumbewuchs gekennzeichnet. Im Südosten wird die Freifläche durch mehrstöckige Wohngebäude begrenzt. Im Nordosten befinden sich locker gebaute Mehrfamiliengebäude.

#### Weitere Eckpunkte

Energetische Stadtraumtypen (TP 1.1)	EST 1
Flächennutzung Bottrop (RVR)	Grünfläche
Klimatope nach Klimaanalyse BOT	Stadtrandklima
Temperatur(verteilung) nach Klimaanalyse BOT	-0,5 bis +0,5 K
Versiegelungsgrad (50 m Radius um Station)	51 %

3,00 m

Messhöhe



# Messstandort: Bottrop Buchenstraße (BUCH)



Kartengrundlage: Landesvermessungsamt NRW

Messgeräte

Temperatur- und Feuchtesensor HOBO der Firma Onset

#### Beschreibung der Freifläche

Bei dem Standort Buchenstraße handelt es sich um eine Lokalität innerhalb freistehender Wohnbebauung (vornehmlich Ein- und Zweifamilienhäuser). Der Standort ist nicht direkt durch eine Freifläche gekennzeichnet, da auch mikroklimatische Charakteristika bebauter Siedlungsbereiche mit höherem Versiegelungsgrad betrachtet werden konnten. Die Messung erfolgt an einer Straßenkreuzung welche nicht direkt von freistehender Wohnbebauung umgeben ist.

#### Weitere Eckpunkte

Energetische Stadtraumtypen (TP 1.1) Flächennutzung Bottrop (RVR) Klimatope nach Klimaanalyse BOT Temperatur(verteilung) nach Klimaanalyse BOT Versiegelungsgrad (50 m Radius um Station) Grenze EST 1 Wohn- und Erschließungsstraße Stadtrandklima +0,5 bis 1,5 K 85 %

Messhöhe

3,00 m



# Messstandort: Bottrop Scharnhölzstraße (SCHA)



Kartengrundlage: Landesvermessungsamt NRW

Messgeräte

Temperatur- und Feuchtesensor HOBO der Firma Onset

Beschreibung der Freifläche

Bei dem Messstandort Scharnhölzstraße handelt es sich um eine innerhalb der Bebauung liegende Freifläche, die als Pferdekoppel bzw. –weide bzw. als Rasenfreilandfläche genutzt wird. Die Freifläche hat eine Größe von rund 7000 m<sup>2</sup>. Die Grünfläche ist von Gärten und lockerer freistehender Bebauung umgeben.

#### Weitere Eckpunkte

Energetische Stadtraumtypen (TP 1.1) Flächennutzung Bottrop (RVR) Klimatope nach Klimaanalyse BOT Temperatur(verteilung) nach Klimaanalyse BOT Versiegelungsgrad (50 m Radius um Station) Einzelelement Freiraum Kleingarten, Freifläche Parkklima +0,5 bis 2,5 K 44 % Messhöhe

3,00 m



# Messstandort: Bottrop EC-Station Stadtrand (SIED)





Kartengrundlage: Landesvermessungsamt NRW

Messgeräte

Infrarotgasanalysator (EC150) 3D-Ultraschallanemometer (CSAT3; Azimuth 223°) Temperaturgeber (HMP155) Strahlungsgeber (NR01) Bodenwärmestrom (HFP01SC) Mittlere Bodentemperatur (TCAV) Bodenwassergehalt (TDR-Sonde; CS616)

Messhöhe 2,50 m 2,50 m 2,80 m 2,50 m -0,08 m -0,02 und -0,06 m -0,08 m

Beschreibung der Freifläche

Der Energiebilanz-Messstandort innerhalb des Siedlungsbereiches befindet sich am Stadtrand von Bottrop bzw. am Siedlungsrand von BOT-Eigen. Die Grünfläche ist nur von wenigen Gebäuden umgeben. Zudem befinden sich in der Umgebung einige Hecken- und Baumstrukturen.

#### Weitere Eckpunkte

Energetische Stadtraumtypen (TP 1.1) Flächennutzung Bottrop (RVR) Klimatope nach Klimaanalyse BOT Temperatur(verteilung) nach Klimaanalyse BOT Versiegelungsgrad (50 m Radius um Station)

Einzelelement Freiraum Wiesen und Weiden Freilandklima -0,5 bis +0,5 K 2 %



# Messstandort: Bottrop EC-Station Umland (RURA)



Kartengrundlage: Landesvermessungsamt NRW

#### Messgeräte

Infrarotgasanalysator (EC150) 3D-Ultraschallanemometer (CSAT3; Azimuth 223°) Temperaturgeber (HMP155) Strahlungsgeber (NR01) Bodenwärmestrom (HFP01SC) #1 und #2 Mittlere Bodentemperatur (TCAV) Bodentemperatur (TP 107) #1, #2 und #3 Bodenwassergehalt (TDR-Sonde; CS616) Messhöhe 2,50 m 2,50 m 2,80 m 2,50 m -0,08 m -0,02 und -0,06 m -0,05, -0,10 und -0,20 m -0,08 m

### Beschreibung der Freifläche

Die Vergleichsstation im Umland befand sich nördlich von Bottrop in Kirchhellen. Gemessen wurde auf einer Grünfläche welche circa 3mal im Jahr zu Silagezwecken gemäht wurde. Es handelt sich um einen relativ feuchten Standort mit hoher Bodenfeuchte und wird mit einem Entwässerungssystem, bestehend aus Abflussgräben, trocken gehalten.

#### Weitere Eckpunkte

Energetische Stadtraumtypen (TP 1.1) Flächennutzung Bottrop (RVR) Klimatope nach Klimaanalyse BOT Temperatur(verteilung) nach Klimaanalyse BOT Versiegelungsgrad (50 m Radius um Station) Einzelelement Freiraum Wiesen und Weiden Freilandklima < -1,5 K 0,3 %



## 3.2.1 Energiebilanzmessungen

An den Energiebilanzstationen RURA und SIED wurden die unterschiedlichen Glieder der Energie- und Strahlungsbilanz der Erdoberfläche nach Gleichung 1 bestimmt. Die Energiebilanz der Erdoberfläche wird mit Hilfe der Eddy-Kovarianz-Methode (EKM) gemessen. Die EKM ist ein direktes Messverfahren zur experimentellen Bestimmung des turbulenten Energie-, Wasser-, und Stoffaustausches zwischen der Landoberfläche und der bodennahen Atmosphäre (Foken, 2006). Zur Bestimmung des Austausches wird die Flussdichte einer Quantität bestimmt, also die Menge an Energie, Wasser oder die eines Luftinhaltstoffes, die durch eine horizontale Fläche pro Zeiteinheit transportiert wird (Burba, 2013). Es wird angenommen, dass die vertikalen Austauschflüsse durch räumlich begrenzte turbulente Wirbel (engl. eddies) gesteuert werden. Für die Anwendung der Eddy-Kovarianz-Methode sind Messungen der Fluktuation der vertikalen Windgeschwindigkeit sowie der zu untersuchenden Austauschgröße erforderlich. Schnell ansprechende Sensoren für die Erfassung des dreidimensionalen Windvektors, der Lufttemperatur (mittels eines 3D-Ultraschallanemometers), der -feuchte und der Spurengaskonzentration (mittels eines Infrarotgasanalysators) sind demnach Voraussetzung. Der Bodenwärmestrom kann mit Bodenwärmestromplatten quantifiziert werden.



Abbildung 14: Typischer Aufbau einer Energiebilanz- bzw. Eddy-Kovarianz-Station.

Die Kovarianz aus der vertikalen Windkomponente und der zu erfassenden Größe stellt den turbulenten Austausch einer Größe, also die turbulente Flussdichte, dar. Gemäß der gängigen



Vorzeichenkonvention sind positive Flüsse als Energieabfuhr von der Erboberfläche und negative Flüsse als Energiezufuhr definiert.

Die EKM beruht auf einer Reihe grundlegender Annahmen. So wird davon ausgegangen, dass sich die Turbulenzelemente während des Transports entlang des Sensors nicht verändern und somit als "eingefrorene" Strukturen betrachtet werden können (Stull, 1994). Innerhalb des Mittelungsintervalls von 30 Minuten sollten stationäre Bedingungen vorherrschen. Außerdem sollte die Unterlage möglichst homogen sein (Stull, 1994; Foken, 2006; Burba, 2013).

Die Datenprozessierung der hochaufgelösten (10 Hz) Eddy-Kovarianz Messdaten erfolgte mit der Software EddyPro Version 4.1.0 der Firma LI-COR Inc. Im Rahmen eines in der Software integrierten, automatisierten Rohdatenscreenings wurden die verschiedenen Messgrößen mittels der Maximum-Kovarianz-Methode zeitlich synchronisiert und verschiedene Ausreißer und Dropout-Tests (kurze Messperioden, die sich um einen statistisch relevanten Wert vom Mittelwert der gesamten Messperioden unterschieden) durchgeführt (vgl. LI-COR Inc., 2013). Messspitzen außerhalb eines Plausibilitätsbereichs von 3,5 sigma ( $\sigma$ , Standardabweichungen) für die Horizontalwindkomponenten u und v, sowie für CO2- und H2O-Flussdichten bzw. 5  $\sigma$ für die Vertikalwindkomponente w wurden entfernt und durch eine lineare Interpolation der benachbarten Messungen ersetzt. Darüber hinaus wurden absolute, physikalisch bzw. messtechnisch bedingte Unter- und Obergrenzen von 200 bis 600 µmol mol-1 für das CO2-Mischungsverhältnis, 0 bis 40 mmol mol<sup>-1</sup> für H<sub>2</sub>O, -20 bis +50 °C für die Temperatur,  $\pm 30 \text{ m s}^{-1}$  für *u* und *v*, sowie  $\pm 5 \text{ m s}^{-1}$  für w eingehalten. Die Daten wurden 30 min blockgemittelt. Es wurde zudem eine doppelte Koordinatenrotation zur Sicherstellung einer verschwindenden mittleren Vertikalwindkomponente durchgeführt (vgl. Foken, 2006). Dichte-, Feuchte und Temperaturfluktuationen wurden in EddyPro nach Webb et al. (1980) korrigiert. Zusätzlich wurden Spektralkorrekturen für den kurz- und langwelligen Bereich nach Moncrieff et al. (2005) und Moncrieff et al. (1997) von der Software durchgeführt.

Unter der Annahme, dass die gemessene kurzwellige Einstrahlung an den zwei Eddy-Kovarianz-Stationen im Mittel ungefähr gleich sein sollte, wurden die Messdaten dieser Größe an der Umlandstation an die der Siedlungsstation angepasst. Eine mittlere Differenz von 8 % wurde somit korrigiert. Eine zusätzliche Korrektur der kurzwelligen Einstrahlung erwies sich als notwendig, da der mittlere Tagesgang dieser Größe im Umland in den Nachmittagsstunden (15:00 – 20:00 Uhr) einen auffälligen Verlauf hatte. Eine mögliche Ursache für diese Störung lässt sich durch den Schattenwurf des im nördlichen Sektor der Messstation positionierten Strommasts erklären.

# 3.2.2 Bodenwassergehalt an den Energiebilanzstationen

Untersuchungen zur Charakterisierung der Bodenbeschaffenheit an den Energiebilanzstandorten RURA und SIED konnten zeigen, dass die Böden sehr unterschiedliche Charakteristika in Bezug auf den Porenraum und dem damit verbundenen Bodenwassergehalt aufweisen. Für den Boden am Standort SIED konnte im Labor eine Lagerungsdichte von 1,26 g cm<sup>-3</sup> nachgewiesen werden. Dies ist typisch für lehmige und



tonige Böden (Scheffer und Schachtschabel, 2010). Im Gegensatz dazu weist der Boden am Umlandstandort RURA ein wesentlich höheres Porenvolumen mit einer Lagerungsdichte von 0,68 g cm<sup>-3</sup> auf. Der Wert ist typisch für moorige Böden. Das zeigt sich in den mittleren monatlichen Bodenwassergehalten (Abbildung 15) sowie in der generellen Charakteristik des Standortes (häufige Perioden mit Staunässe, Abflussgräben zur Entwässerung). Somit kann der Boden sehr viel mehr Wasser speichern und der Standort RURA als feuchterer Standort im Vergleich zum Messpunkt SIED definiert werden. Für die Umsetzung der Netto-Energie in turbulente Flüsse latenter und sensibler Wärme ist der unterschiedliche Bodenwassergehalt der Standorte von Bedeutung. Bei der späteren Betrachtung der Energiebilanz der Oberfläche wird darauf eingegangen.



Abbildung 15: Mittlere monatliche Bodenwassergehalte an den Energiebilanzstationen SIED und RURA im Zeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013.

## 3.2.3 Temperatur- und Feuchtemessungen

Um die räumliche Variabilität des Mikroklimas und dessen Abhängigkeit von der Flächennutzung zu erfassen, wurden an verschiedenen Strandorten im Stadtgebiet Bottrops Messungen der Lufttemperatur sowie der relativen Luftfeuchtigkeit vorgenommen. Um ein breites Spektrum der Flächennutzungen abzudecken, wurden Messpunkte an Standorten mit unterschiedlichen Freiflächentypen (siehe Freiflächensteckbriefe) und Versiegelungsgraden ausgewählt. Die Messhöhe betrug 3 m über Grund, auch um Beschädigungen der Messeinrichtung durch Vandalismus zu vermeiden.

Zur Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit wurden elektronische Temperatur- und Feuchtesensoren mit integriertem Datenlogger der Firma Onset (HOBO Pro v2; Part No.: U23-002) verwendet und mit einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten



betrieben. Um die Vergleichbarkeit der Messdaten zu gewährleisten, wurde im Vorfeld eine Parallelmessung der eingesetzten Sensoren durchgeführt (siehe Kapitel 4.1).

Zum Vergleich der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerte der HOBOs mit den Daten der Eddy-Kovarianz Stationen wurden halbstündliche Mittelwerte gebildet. Zusätzlich wurde die gemessene relative Luftfeuchtigkeit RH (%) in den Dampfdruck e (hPa) umgerechnet (Gleichungen 3, 4).

$$E = 6,1hPa * 10^{\frac{7,5T_a}{237,2+T_a}}$$

Gleichung 3

$$e = \frac{RH * E}{100}$$

Gleichung 4

## 3.2.4 Mobile Messungen - Temperaturmessfahrt

Zur räumlichen nächtlichen Untersuchung der Lufttemperaturverteilung im Untersuchungsgebiet wurde einer Strahlungsnacht eine Lufttemperaturmessfahrt im Stadtgebiet durchgeführt (siehe Abbildung 16). Mit Hilfe einer Temperaturmessfahrt kann eine höher aufgelöste Temperaturverteilung in einem größeren Gebiet der Stadt aufgezeigt werden. Messfahrten sollten generell bei autochthonen bzw. Strahlungswetterlagen durchgeführt werden, da sich Einflüsse der Oberflächenausgestaltung auf mikroklimatische Unterschiede besonders hervorheben und räumliche Variabilität der bodennahen Lufttemperatur zu diesen Situationen am stärksten ausprägt ist. Zur Untersuchung des nächtlichen Abkühlungsverhaltens werden häufig zwei Messfahrten während einer Nacht vorgenommen. Eine Messfahrt sollte durch einen begrenzten Zeitumfang gekennzeichnet sein (nicht länger als circa 2 h), da die gemessenen Temperaturwerte um eine Temperaturdifferenz, bedingt durch die nächtliche Abkühlung, korrigiert werden müssen.

Im Rahmen der Messfahrt wurde die Lufttemperatur (Messwertgeber der Firma Theodor Friedrichs) in einer Höhe von 2 m ü. Gr. sekündlich gespeichert, die Messdaten wurden zur späteren Analyse mittels GPS-Daten-Erfassung geokodiert. Die Daten der Messfahrt wurden zunächst temperaturkorrigiert, um die während der Messfahrt vorliegende Abkühlung auf einen einheitlichen Zeitpunkt zu korrigieren. Dazu wurde die Temperatur der Station SIED, welche zugleich Anfangs- und Endpunkt der Messfahrt darstellte, zum entsprechenden Anfangs- und Endzeitpunkt ( $T_{Anfang}$  und  $T_{Ende}$ ) erfasst. Aus diesen Daten wird ein linearer Korrekturfaktor KF (K s<sup>-1</sup>) gebildet (siehe Gleichung 5).

$$KF = \frac{T_{Anfang} - T_{Ende}}{t_{Messfahrt}}$$



Die korrigierten Daten der Messfahrt wurden anschließend mit Hilfe des Geoinformationsprogrammes ArcMap ausgewertet. Dazu wurden zunächst jedem GPS-Punkt entsprechende Temperaturwerte zugeordnet um eine räumliche Verteilung der Temperatur innerhalb des Untersuchungsgebietes zu erhalten. Für die flächenhafte Darstellung wurde eine Interpolation dieser Daten mit Hilfe des "Inverse-Distance-Weighting" durchgeführt.



Abbildung 16: Route der nächtlichen Temperaturmessfahrt in Bottrop.



# 3.3 Mikroklimatische Modellierung mit ENVI-met – Modelleigenschaften und Szenariendefinition

Um die mikroklimatischen Eigenschaften von Freiflächen spezifizieren zu können und das Verhalten vor dem Hintergrund der Flächenumwidmung hin zu Biomasseproduktion untersuchen zu können, wurden zusätzlich zu den Messungen Modellrechnungen vorgenommen. Dazu wurde das Klimamodell ENVI-met in der Version 3.99.99.6 verwendet (Bruse, 2014).

ENVI-met ist ein prognostisches dreidimensionales Klimamodell (Huttner, 2012). Da es eine zeitliche Auflösung von  $\leq 10$  s und eine räumliche Auflösung von 0,5 bis 10 m hat, ist es besonders für mikroskalige Modellierung geeignet. ENVI-met ist aus verschiedenen Untermodellen aufgebaut: atmosphärisches Modell, Bodenmodell, Vegetationsmodell und Gebäudemodell. Die in ENVI-met berechneten Wechselwirkungen und Modellgrößen sind in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: Wechselwirkungen und Modellgrößen, welche von ENVI-met berechnet werden (Bruse, 2014).

In der vorliegenden Modellversion kann mit der Option eines "Modellforcing" (sog. simple forcing) gearbeitet werden. Mit dieser Option können meteorologische Größen am Einströmrand des Modelles z.B. aus einem Messdatensatz eingelesen werden (Huttner, 2012). Dadurch kann gewährleistet werden, dass sich im Modellgebiet realistische Tagesamplituden der Lufttemperatur einstellen. Die Simulationsergebnisse mit "forcing" können demnach besser zur Bewertung des Mikroklimas nach Flächenumwidmung und Vergleichbarkeit mit dem Status quo herangezogen werden.



## 3.3.1 Szenariendefinition in ENVI-met

Das Mikroklimamodell ENVI-met berechnet auf einem dreidimensionalen Gitter mit jedem Rechenschritt in einer Zeitauflösung von  $\leq 10$  s eine Vielzahl atmosphärischer Variablen. Die Rechenzeit für verschiedene Modellläufe ist daher relativ hoch. Für die in KuLaRuhr aufgesetzten Modellgebiete ist für die Simulation der mikroklimatischen Größen über den Tagesverlauf (48 h Simulationszeit) eine Rechenzeit von rund 10 Tagen einzuplanen. Im vorliegenden Fall wurde daher eine repräsentative Auswahl von Standorten getroffen, für die der mikroklimatische Status quo sowie drei Biomasseszenarien gerechnet wurden (vgl. Abbildung 6).

Die Wahl fiel zum einen auf den Standort EIGM, da der Standort aufgrund seiner hohen Versiegelungsrate ein großes Potential zur klimafreundlichen Umwidmung bietet und hier die größten mikroklimatischen Veränderungen zu erwarten sind. Zusätzlich wurde der Standort SCHA ausgewählt. Hierbei handelt es sich um einen klassischen städtischen Freiflächenstandort mit einer geringen Versiegelungsrate. Zudem bietet der große begrünte Innenbereich innerhalb des umgebenden Bebauungsriegels viel Spielraum zur Flächenumwidmung. Als dritter Standort für die Simulation wurde SYDO ausgewählt. Diese Fläche wurde in Absprache mit TP 1.1 ausgesucht. Die Siedlung Sydowstraße wurde von TP 1.1 ausführlich betrachtet und somit konnte auch die TU Darmstadt die Modellergebnisse in ihre Untersuchungen mit einfließen lassen.

Zunächst wurde von allen Standorten der Status quo modelliert, um die Plausibilität der Modellergebnisse zu prüfen und das Ausgangs- und Vergleichsszenario für die spätere Bewertung mikroklimatischer Auswirkungen zu erhalten. Die Modellgebiete weisen eine Ausdehnung von 300 mal 300 m, mit einer horizontalen Auflösung von 2 m pro Gitterzelle auf. Die Rahmen- und Startparameter der ENVI-met Modellierung sind aus Tabelle 2 ersichtlich. Der Status quo wurde in drei Szenarien hinsichtlich verschiedener urbaner Biomassestrategien umgewandelt.

- Biomassestrategie Krautige Biomasse Anbau (KBA): Im Szenario KBA wurde der Anbau krautiger Biomasse sowie die Anlage kleinerer künstlich angelegter Seen implementiert. Krautige Biomasse wurde in Anlehnung an *Miscanthus* (Stielblütengras) mit einer Wuchshöhe von durchschnittlich 2 m gleichmäßig über das Modellgebiet verteilt. Zusätzlich wurden künstlich angelegte Seen mit einer Flächengröße von rund 150 - 250 m<sup>2</sup> im Szenario eingearbeitet.
- Biomassestrategie Holzige Biomasse Anbau (HBA): Das Szenario HBA wurde als urbane Biomassenutzungsstrategie in Anlehnung an den Biomasseanbau auf Kurzumtriebsplantagen implementiert. Dazu wurden, wie für Kurzumtriebsplantagen üblich, schnellwachsende Pappeln (Balsampappel) mit einem Reihenabstand von 2 m (Durchlassbreite für Erntefahrzeuge) im Modellgebiet verteilt. Für die Wuchshöhe der Pappeln wurde im Modellgebiet 6 m angenommen.



 Biomassestrategie - Holzige Biomasse Anbau (HBP): Das Szenario der Biomassenutzung holziger Biomasse aus Pflege wurde als dritte Biomassestrategie implementiert. Dazu wurden verschiedene - hauptsächlich heimische - Laubbaumarten (Feldahorn, Gemeine Esche Blutbuche, Goldulme, Feldulme, Hainbuche, Sandbirke und Platane) regelmäßig über das Modellgebiet verteilt. Die Laubbäume wurden mit Wuchshöhen zwischen 5 und 30 m und Kronendurchmesser von 5 bis 20 m versehen.

Tabelle 2: Übersicht der Rahmen- und Startparameter der ENVI-met Modellierung in KuLaRuhr zur Untersuchung mikroklimatischer Effekte urbaner Biomassestrategien

Parameter	Größe
Lage	
Geographische Lage	51° 31.2' N, 6° 55.2' O
Modeligroise	
Anzahl der Gitterzellen (x, y, z)	150, 150, 30
Große der Gitterzellen (x, y, z)	2 m, 2 m, 2 m
Größe des Modellgebiets (x, y, z)	300 m, 300 m, 59 m
Nesting grids (x, y, z)	5, 5, 5
Modellrotation gegen Nord	0°
Meteorologische Randbedingungen	
Gesamtsimulationszeit	48 h
Start der Simulation an Tag	25. Juli 2012
Startzeitpunkt der Simulation (h/min/s)	07:00:00
Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund	$1.4 \text{ m s}^{-1}$
Windrichtung	90°
Rauigkeitslänge, z0	0.01
Sonnenexposition	Default: 1.0
Bewölkungsgrad	Default: keine Bewölkung
Pedennerometer	
Bodenparameter	Labrahadan
Douenan	
Starttemperatur Oberschicht (0-20 cm)	290 N 205 K
Starttemperatur Millelschicht (20-50 cm)	290 K
Stantemperatur Tierenschicht (>50 cm)	294 N
Bodenfeuchte Oberschicht (0-20 cm)	30 % 40 %
Bodenfeuchte Millelschicht (20-50 cm)	40 %
Bodemedchie Herenschicht (>50 cm)	50 %
Gebäudeparameter	
Innenraumtemperatur	Default: 293 K
Wärmedurchgangskoeffizient Wände	Default: 1,94 $W_{m}^{-2} K^{-1}$
Wärmedurchgangskoeffizient Dächer	Default: 6 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
Albedo Wände	0,2
Albedo Dächer	0,3

Nachfolgend sind für die Untersuchungsstandorte SYDO, EIGM und SCHA Darstellung der einzelnen Modellgebiete im Status quo sowie unter den verschiedenen Biomassenutzungen aufgezeigt, die einen visuellen Eindruck der Übertragung der Biomassestrategien in die "Modelllandschaften" verdeutlichen sollen (Abbildung 18 - Abbildung 20). Aufgrund der geometrischen Rahmenbedingungen des Mikroklimamodells ist eine abstrakte bzw. vereinfachte Übertragung von Biomasseart und -anbaugeometrie nötig.



Endbericht Teilprojekt 08 – Cluster 02



Abbildung 18: Darstellung der in ENVI-met implementierten Biomasseszenarien im Modellgebiet Sydowstraße SYDO (LAD: Leaf Area Density – Quadratmeter Blattfläche pro Kubikmeter).



Abbildung 19: Darstellung der in ENVI-met implementierten Biomasseszenarien im Modellgebiet Eigen Markt EIGM (LAD: Leaf Area Density – Quadratmeter Blattfläche pro Kubikmeter).





Abbildung 20: Darstellung der in ENVI-met implementierten Biomasseszenarien im Modellgebiet Scharnhölzstraße SCHA (LAD: Leaf Area Density – Quadratmeter Blattfläche pro Kubikmeter).



# 4 Ergebnisse – Klimamessungen und mikroklimatische Modellierung

# 4.1 Ergebnisse der Vergleichsmessung (Arbeitspaket 2)

Um die Vergleichbarkeit der Messungen beider Eddy-Kovarianz-Stationen und der Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsgeber (HOBO) zu gewährleisten, wurde vor Beginn der Messkampagne in Bottrop zunächst eine Vergleichsmessung aller im Projekt eingesetzten Sensoren durchgeführt.

## 4.1.1 Standort und Aufbau der Vergleichsmessung

Die Parallelmessung wurde im Nordwesten Braunschweigs auf dem Gelände des Deutschen Wetterdienstes durchgeführt (52° 17' 35,96'' N, 10° 26' 44,08'' O, 77 m NN). Bei der Testfläche handelte es sich um einen Rasenstandort mit rund 10 cm hohem Grasbewuchs, welcher überwiegend von landwirtschaftlich genutzten Flächen umgeben war (Mais, Grünland, Viehhaltung).

Der Messzeitraum für die Vergleichsmessung der Eddy-Kovarianz-Stationen betrug zwei Monate (21.09. bis 29.11.2011) bzw.1 ½ Monate (27.10. bis 07.12.2011) für die Temperaturund Feuchtemessungen (HOBOs). Beim Aufbau der Stationen wurden die Sensoren beider Stationen in identischen Messhöhen/-tiefen und Ausrichtungen angebracht (Abbildung 21, Tabelle 3). Die HOBOs wurden in einer Höhe von 1 m ü. Gr. installiert.



Abbildung 21: Aufbau der Eddy-Kovarianz-Stationen (links) und der HOBOs (rechts) während der Parallelmessung.



Größe/Sensor	Station 1	Station 2
Infrarotgasanalysator	2,10 m	2,10
Ausrichtung Ultraschallanemometer	271°	271°
Temperatur- und Feuchtegeber	2,20 m	2,20 m
Strahlungsgeber	2,10 m	2,10 m
Heatflux-Plate #1	-0,08 m	-0,08 m
Heatflux-Plate #2	n/a	-0,08 m
mittlere Bodentemperatur	2x -0,02 m 2x -0,06 m	2x -0,02 m 2x -0,06 m
Bodenthermometer 107 #1	n/a	-0,02 m
Bodenthermometer 107 #2	n/a	-0,05 m
Bodenthermometer 107 #3	n/a	-0,15 m
Bodenwassergehaltsmessung	n/a	-0,1 m

Tabelle 3: Messaufbau und -höhen der Vergleichsmessung

## 4.1.2 Ergebnisse der Parallelmessung

Um die Messwerte der Eddy-Kovarianz-Stationen sowie der Temperatur- und Feuchtesensoren miteinander zu vergleichen, wurden verschiedene statistische Maßzahlen herangezogen (lineare Korrelation zwischen den benachbarten Messsensoren der Eddy-Kovarianz-Stationen, statistische Abweichung der Messwerte). Zusätzlich wurde eine Vergleichbarkeitsstudie zwischen den Temperatur- und Feuchtedaten der HOBOs sowie der Lufttemperatur/Feuchtegeber der Eddy-Kovarianz-Stationen durchgeführt. Dabei wurden nur Messwerte unter neutralen Schichtungsbedingungen und ausreichender atmosphärischer Durchmischung betrachtet, um die Vergleichbarkeit aufgrund der räumlichen Entfernung zwischen Eddy-Kovarianz Standort und HOBO–Messstandort (ca. 0,25 km) zu gewährleisten.

Bei den aufgezeichneten Messgrößen ergaben sich die in Tabelle 4 dargestellten Korrelationskoeffizienten, mittleren quadratischen Abweichungen (MQA) und prozentualen Abweichungen (MPA) (Gleichung 6). Zur besseren Vergleichbarkeit werden zusätzlich Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben.

$$MQA = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_1 - x_2)^2} \quad MPA = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_1 - x_2)}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_1} * 100$$

Gleichung 6



	Sigiolonomoc	soungen			00001011011			
	Korrela- tionsko- effizient	mi quadi Abwe	ttlere ratische eichung	mittlere Abweich -ung (%)	Mitte	elwert	Stand weic	ardab- hung
Windgeschwin- digkeit	0,99	0,14	m/s	-3,5%	2,08	m/s	1,28	m/s
Windrichtung	0,97	18,47	o	2,6%	181,40	o	8,21	0
Kohlenstoffdi- oxidgehalt	0,93	19,95	mg/m³	-0,9%	779,50	mg/m³	48,63	mg/m³
Wasserdampf- gehalt	0,90	1,02	g/m³	5,5%	5,93	g/m³	2,22	g/m³
Lufttemperatur	1,00	0,05	°C	0,1%	7,59	°C	5,00	°C
relative Luftfeuchte	1,00	0,19	%	0,0%	84,12	%	12,17	%
eingehende kurzwellige Strahlung	0,99	11,81	W/m²	8,7%	59,23	W/m²	108,56	W/m²
ausgehende kurzwellige Strahlung	1,00	3,84	W/m²	-10,8%	-15,85	W/m²	28,03	W/m²
eingehende langwellige Strahlung	0,98	8,15	W/m²	-1,2%	292,42	W/m²	44,06	W/m²
ausgehende langwellige Strahlung	0,99	1,74	W/m²	0,2%	-346,55	W/m²	28,68	W/m²
mittlere Bodentem- peratur	0,99	0,22	°C	-0,4%	7,85	°C	4,68	°C
Bodenwärme- strom (1)	0,98	6,26	W/m²	-13,8%	-8,63	W/m²	19,85	W/m²
Bodenwärme- strom (2)	0,97	6,05	W/m²	9,1%	-8,63	W/m²	19,85	W/m²
volumetrischer Bodenwasser- gehalt	0,99	0,01	Vol%	2,9%	0,03	Vol%	0,12	Vol%
Q <sub>H</sub>	0,99	3,97	W/m²	11,8%	-0,27	W/m²	35,38	W/m²
Q <sub>F</sub>	1.00	8.12	W/m²	-1.8%	26.97	W/m²	30.93	W/m²

Tabelle 4: Korrelationskoeffizienten, mittlere Abweichungen, Mittelwert und Standardabweichung der Messgrößen der Vergleichsmessungen der Eddy-Kovarianz Messstationen.

Bei der Vergleichsmessung der HOBOs ergab sich für den Vergleich der Messgeräte mit der Referenz (HOBO1) ein Korrelationskoeffizient von 0,99 (Tabelle 5). Ein vergleichbares Bild zeigt sich bei der Parallelmessung der HOBOs mit den Lufttemperatur- und Feuchtigkeitsgebern der Eddy-Kovarianz-Stationen (Tabelle 6).



Tabelle 5: Korrelationskoeffizienten und mittlere quadratische Abweichung der Vergleichsmessung de	r
HOBOs	

	Korrelationkoeffizient	mittlere quadratische Abweichung
HOBO 2	0,99	0,10 °C
HOBO 3	0,99	0,09 °C
HOBO 4	0,99	0,08 °C
HOBO 5	0,99	0,12 °C

Tabelle 6: Korrelationskoeffizienten und mittlere Quadratische Abweichung der Lufttemperatur- und Luftfeuchtigskeitegeber der Eddy-Kovarianz-Stationen mit dem Referenz HOBO1.

	Korrelationkoeffizient	mittlere quadratische Abweichung
Station 1	0,99	0,24 °C
Station 2	0,99	0,24 °C

Insgesamt lässt sich eine gute Vergleichbarkeit der Messsensoren beider Eddy-Kovarianz-Stationen sowie der HOBOs während der Vergleichsmessung konstatieren. Korrekturfunktionen aufgrund systematischer Geräteunterschiede müssen somit nicht angelegt werden. Jedoch wurde standortbedingt eine Korrektur der Strahlungsbilanz nötig (siehe Kapitel 3.2.1).

# 4.2 Ergebnisse der Energiebilanz- sowie der mikroklimatischen Messungen an den Untersuchungsstandorten (Arbeitspaket 3: Messzeitraum und Datenanalyse)

# 4.2.1 Klimatische Übersicht und Repräsentanz des Messzeitraumes

Um einen ersten groben Überblick über die klimatischen Verhältnisse im Messzeitraum zu erhalten, werden zunächst einige klimatische Größen im Jahresverlauf und Jahresmittel während der Periode März 2012 bis Februar 2013 betrachtet.





Abbildung 22: Jahresverlauf der Lufttemperatur auf Basis von Tagesmittelwerten der Station RURA von Mrz. 2012 bis Feb. 2013.

Der Jahresgang der Lufttemperatur zeigt, dass im August mit 26,7 °C das absolute Maximum der Lufttemperatur während des Jahresverlaufes erreicht wurde, im Winter (Dezember) mit -4,5 °C der niedrigste Tagesmittelwert gemessen wurde (Abbildung 22). Bereits im Mai trat eine Periode relativ hoher Lufttemperaturen um ca. 20 °C im Tagesmittel auf. Der Jahresverlauf der Temperatur zeigte prinzipiell keine besonderen Auffälligkeiten.

Mit einer Jahresniederschlagssumme von 845 mm liegt der Messzeitraum im Bereich der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsumme von rund 800 bis 900 mm. Die Jahresverteilung der Niederschläge zeigt eine trockenere Periode während der Herbstmonate (Sep. bis Nov. 2012, Abbildung 23).



Abbildung 23: Niederschlagsverteilung basierend auf Tagessummen des Niederschlages im zeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013.



In der nachfolgenden Windrose der ruralen Station kann verdeutlicht werden, dass im gesamten Messzeitraum zwei Hauptwindrichtungsmaxima aus Südwest und Nordost vorherrschten. Dies entspricht der typischen langjährigen Windrichtungsverteilung im Untersuchungsraum (vgl. Standort Essen, Klimaatlas NRW (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, 2014)).

Die in der KuLaRuhr-Untersuchungsperiode gemessenen meteorologischen Größen des Messstandortes RURA (Mrz. 2012 bis Feb. 2013) korrespondieren somit weitestgehend den (langjährigen) mittleren klimatischen Eigenschaften des Betrachtungsraumes Bottrop (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, 2014).



Abbildung 24: Windrichtungsverteilung der Station RURA im Zeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013

Zur Untersuchung der Repräsentativität des Messzeitraumes, d.h. zum Vergleich des Witterungsgeschehens im Messzeitraum mit dem langjährigen Witterungsgeschehen, wurde die KuLaRuhr-Untersuchungsperiode mit dem sogenannten Katalog der Großwetterlagen der Jahre 1881-2010 verglichen (Gerstengarbe & Werner, 2010, Abbildung 25). Prinzipiell kann mit diesem Vergleich untersucht werden, ob die Auftrittshäufigkeiten spezifischer Wetterlagen im Messzeitraum mit denen im langjährigen Mittel übereinstimmen. Dazu werden die Großwetterlagen nach der Definition von F. BAUR (Gerstengarbe & Werner, 2010) herangezogen. Diese werden zu Großwetterlageneinordnung für das KuLaRuhr-Messjahr wurde beim Deutschen Wetterdienst abgefragt. Die Auswertung zeigt, dass vermehrt die Wetterlagen Südwest und Nord aufgetreten sind. Unterrepräsentiert wird hingegen die Wetterlage Hoch Mitteleuropa.





## Abbildung 25: Verteilung der Großwetterlagen im Messzeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013.

## Klassifikation von Strahlungstagen

Zur Untersuchung stadtklimatischer Effekte, wie städtische Überwärmung bzw. Wärmeinselintensität, sind Strahlungstage von besonderer Relevanz, da während dieser durch Unterschiede der Erdoberfläche bedingte mikroklimatische Differenzen und Ausprägungen besonders hervortreten. Strahlungstage sind prinzipiell von geringer Windgeschwindigkeit und ungehinderter Ein- und Ausstrahlung (Wolkenfreiheit) gekennzeichnet.

Die Strahlungstage wurden im Messzeitraum anhand von Diffusionkategorien nach Pasquill-Polster bestimmt (Weber, 2004). Dazu wurde die atmosphärische Stabilität in sieben Stufen, von stark labil bis stark stabil, klassifiziert. Als Eingangsdaten werden hierzu die Halbstundenmittelwerte der Strahlungsbilanz und der Windgeschwindigkeit in 4 m ü. Gr. genutzt. Ein Tag wird dann als Strahlungstag eingestuft, wenn:

- 50 % der Tagstunden stark bis mäßig labile Schichtungsverhältnisse und
- 75 % der Nachstunden stark bis mäßig stabile Schichtungsverhältnisse

aufweisen.





Abbildung 26: Verteilung der Strahlungstage im Messzeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013

Die Verteilung der 21 Strahlungstage über das Untersuchungsjahr zeigt, dass sowohl im April, als auch vor allem im Juni, keine Strahlungstage auftraten (Abbildung 26). Insgesamt ist die Anzahl der Strahlungstage im Messzeitraum als eher gering zu bezeichnen. Mit 42 Strahlungstagen traten während der Messungen zur Analyse des Klimas der Stadt Bottrop rund doppelt so viele Strahlungstage während eines Jahres auf (Snowdon & Bürger, 2006). Die während der KuLaRuhr Untersuchungsperiode beobachteten Strahlungstage eignen sich mit einer Auftrittshäufigkeit von 21 Tagen dennoch zur repräsentativen Untersuchung lokalklimatischer Effekte im Untersuchungsgebiet.

# 4.2.2 Untersuchung des Oberfläche-Atmosphäre-Austausches von Energie und CO<sub>2</sub> – Eddy Kovarianz Messungen

In TP 08 wurden Eddy-Kovarianz Messungen zur Bestimmung der Energiebilanz zweier Freiflächenstandorte im Untersuchungsraum BOT-Eigen durchgeführt. Die Eddy-Kovarianz Messungen erlauben eine direkte Untersuchung des turbulenten Energieund Masseaustausches zwischen der Erdoberfläche und der bodennahen Luftschicht (vgl. Kap. 2.1 ). Somit lassen sich Aussagen zur Verdunstungsleistung an den Standorten treffen, die direkte Auswirkungen auf das resultierende Mikroklima besitzen. Die Anwendung der Eddy-Kovarianz Methodik zudem eine Analyse des CO<sub>2</sub>-Aufnahmepotentials erlaubt (Senkenfunktion der Freiflächenstandorte) der Standorte im Jahresgang.

## Datenqualität der gemessenen Daten

Zur Gewährleistung einer hohen Datenqualität der Eddy-Kovarianz-Daten sowie zur Überprüfung der grundlegenden Rahmenbedingungen für Turbulenzmessungen wurden verschiedene Qualitätskriterien an die Daten angelegt (vgl. Foken und Wichura, 1996).

In einem ersten Schritt der Datenqualitätskontrolle wurden Daten, die nicht den gängigen messtechnischen Qualitätsmerkmalen genügen, selektiert und verworfen. Dazu gehören u.a. unrealistische Messwertspitzen (Spikes), Rauschen, sowie kurze Messperioden, die sich um einen statistisch relevanten Wert vom Mittelwert der gesamten Messperioden unterschieden (Drop-outs). Außerdem wurden alle vorliegenden Daten entsprechend festgelegter



Qualitätsmerkmale (sogenannte Qualitätsflags nach Foken und Wichura, 1996 sowie Foken et al. 2004) bewertet (vgl. Kap. 3.2.1). Generell wurden nur solche Messdaten, die als geeignet für Grundlagenuntersuchungen und Dauermessungen eingestuft wurden, für die weitere Auswertung genutzt. Die Datenverfügbarkeit der Eddy-Kovarianz-Messstandorte betrug für die Flussdichten im Mittel 57,4 % für den Siedlungsstandort (SIED) und 61,2 % für den Umlandstandort (RURA, Tabelle 7).

Die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u^*$  ist ein Maß für den Grad der Turbulenz. Für Eddy-Kovarianz Messungen ist eine ausreichende Turbulenzentwicklung Grundvoraussetzung. Deshalb wurden entsprechend des sogenannten  $u^*$ -Kriteriums Werte < 0,08 m s<sup>-1</sup> verworfen (Goulden et al., 1996; Aubinet et al., 2012). Dieses Datenqualitätsmerkmal führte zu einer Datenreduktion von 9,4 % (SIED) bzw. 12,0 % (RURA, Tabelle 7) und ist somit hinter den oben beschriebenen messtechnischen Qualitätsmerkmalen (Spikes, Dropouts, Rauschen) das am stärksten greifende Qualitätsmerkmal. Die hochaufgelösten Eddy-Kovarianz Rohdaten wurden zur Berechnung halbstündlicher Kovarianzen benötigt. Für die Berechnung der Halbstundenwerte wurde eine Grenze der Datenverfügbarkeit von 90 % pro 30 min Zeitintervall festgelegt, um eine statistisch ausreichende Datenmenge für die Auswertung zu gewährleisten. Bei der Bewertung der Datenverfügbarkeit ist zu beachten, dass mehrere Kriterien auf dasselbe Zeitintervall zutreffen können. Die während der KuLaRuhr Untersuchungsperiode erreichte Datenverfügbarkeit entspricht damit weitestgehend anderen Studien mit einjähriger Eddy-Kovarianz Untersuchungsperiode.

	SI	ED	RU	RA	
(%)	Q <sub>H</sub>	$Q_E$	Q <sub>H</sub>	Q <sub>E</sub>	
Qualitätsmerkmale (Eddy Pro)	26,6	26,6	21,4	21,4	
Qualityflags (Foken & Wichura)	6,1	8,8	6	9	
u*-Kriterium	9,4	9,4	12	12	
90 % Sonic	0,8	0,8	0,6	0,6	
90 % IRGA	3,8	3,8	2,3	2,3	
Gesamt	41,8	43,5	37,8	39,8	
Gesamtverfügbarkeit	58,2	56,5	62,2	60,2	

Tabelle 7: Übersicht über die prozentuale Datenverfügbarkeit für den Gesamtdatensatz sowie für einzelne Qualitätskriterien.

Eine hohe Datenverfügbarkeit und -qualität ist für die Messungen während der Tagstunden in den Sommermonaten zu verzeichnen. Für diese Zeiträume sind die Rahmenbedingungen zur Anwendung der Eddy-Kovarianz-Methode bestmöglich erfüllt (vgl. Kapitel 0). Exemplarisch ist dieses Ergebnis für den fühlbaren Wärmefluss in Abbildung 27 dargestellt. Ähnliche Strukturen ergaben sich für die latente Wärmeflussdichte. Größere Lücken in der Datenverfügbarkeit traten v.a. während der Nachstunden auf, da zu dieser Zeit Tauabsatz möglich ist. Der Infrarotsensor zur Bestimmung der molaren Dichten von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O verfügt über offene Messstrecken. Taubildung an Sender oder Empfänger vermindert die





Intensität des optischen Messsignals. Zum anderen ist nachts die Turbulenz meist nur sehr schwach ausgebildet, so dass das  $u^*$ -Kriterium regelmäßig nicht erfüllt ist.

Abbildung 27: Datenverfügbarkeit von  $Q_H$  in % für die zwei Eddy-Kovarianz Standorte SIED (oben) und RURA (unten). Für den Monat Januar waren größere Datenausfälle zu verzeichnen (Stromversorgung der Eddy-Kovarianz-Stationen), die insgesamt zu einer sehr geringen Datenverfügbarkeit führten.

Die gemessenen Flussdichten werden durch die Eigenschaften des Untergrundes der windzugewandten Seite (Luv) des Messstandortes bestimmt (Gash 1986, Foken 2006). Der Footprint einer gemessenen Flussdichte beschreibt diesen wirksamen Einflussbereich und gibt Auskunft über die horizontale Fläche, die durch die Messungen repräsentiert wird. Die Windrichtungshäufigkeitsverteilung erlaubt es, Hauptanströmsektoren der Messstandorte zu identifizieren (Abbildung 28). Diese Sektoren tragen den größten Teil zu den Eddy-Kovarianz-Messungen bei. Eine Footprint-Analyse für diese Bereiche ist deshalb von besonderem Interesse. Gemäß der berechneten maximalen Footprint-Entfernungen für die Hauptanströmsektoren der beiden Eddy-Kovarianz-Standorte kann der WNW-Anströmsektor an Standort SIED als komplett ungestört gekennzeichnet werden (Abbildung 29). Die Messungen der beiden anderen Sektoren dieses Standortes wurden durch nahe gelegene Bebauung geringfügig beeinflusst. Diese Störquellen müssen bei der weiteren Datenanalyse berücksichtigt werden. Die Hauptanströmsektoren von RURA waren nahezu ungestört.





Abbildung 28: Windhäufigkeitsverteilungen für die Standorte SIED (links) und RURA (rechts) für den betrachteten Messzeitraum Mrz. 2012 – Feb. 2013.



Abbildung 29: Footprint Bereiche der zwei Eddy-Kovarianz Standorte. Die Farben repräsentieren die Footprint Bereiche unterschiedlicher Hauptanströmsektoren (blau: Nordost, gelb: Südwest, grün: Westnordwest). Bildquelle: Google Earth.

Die Überprüfung sogenannter integraler Turbulenzcharakteristika erlaubt eine Analyse möglicher Strömungsbeeinflussungen im Umfeld von Turbulenzmessstandorten. Die normierte Standardabweichung der vertikalen Windkomponente sollte bei neutraler Atmosphärenschichtung den Wert  $\sigma_w/u^* = 1,25$  annehmen (Foken, 2006). In Abhängigkeit der Windrichtung lassen sich somit mögliche, v.a. durch Hindernisse verursachte, Störungen in der Anströmung des Messstandortes bestimmen (Abbildung 30). Die Messungen an SIED wurden durch Bebbauung in 35 m Entfernung (bei 220°) nur geringfügig gestört. Bei RURA wird der Einfluss eines Strommastes deutlich, der sich nördlich der Station (ca. 350°) befand, sowie der Messmast der EC-Anlage bei 43° Nordost. Eine weitere Informationsquelle für die Datengüte ist die mittlere vertikale Windgeschwindigkeit. Diese sollte 0,15 m s<sup>-1</sup> (Betrag) nicht überschreiten, da höhere Werte auf starke topografische Einflüsse oder eine fehlerhafte Ausrichtung des Sensors hindeuten (Foken und Wichura, 1996). Für die analysierten Daten der Stationen wurde dieser Grenzwert nicht erreicht.





Abbildung 30: Normierte Standardabweichung der vertikalen Windkomponente bei neutraler Schichtung in Abhängigkeit von der Windrichtung für SIED (links) und RURA (rechts).

## Energiebilanzschließung

Die Energiebilanzschließung untersucht die Übereinstimmung zwischen dem potentiellen Energiegewinn  $(Q^* - Q_G)$ , mit dem Energieverlust  $(Q_H + Q_E)$  an der Erdoberfläche. Unterschiedliche Untersuchungen haben bereits zeigen können, dass regelmäßig Schließungslücken bei experimentellen Studien auftreten (Wilson et al., 2002; Foken 2008). Der Wert des Residuums kann eine Größenordnung von bis zu 37 % der zur Verfügung stehenden Energie annehmen (Foken 2008). In der Literatur werden verschiedene messtechnische und messmethodische Ursachen für die Schließungslücke der Energiebilanzgleichung diskutiert, z.B. Messfehler in einzelnen Termen der Bilanz, unterschiedliche Quellbereiche der turbulenten Flussdichten im Vergleich zur molekularen Bodenwärmeflussdichte sowie mesoskalige Einflüsse im Umfeld des Messstandortes. Eine Übersicht zur Problematik der nicht geschlossenen Energiebilanz findet sich beispielsweise bei Foken (2008).

Für die beiden Energiebilanzstandorte resultierten Schließungslücken der Energiebilanz von rund 8 % (SIED) bzw. 4 % (RURA, Abbildung 31). Die Messungen zeigen somit an beiden Standorten eine relativ geringe Schließungslücke der Energiebilanz an der Oberfläche. Im Tagesgang ist das Residuum der Energiebilanz ( $Re = Q^* - Q_G - Q_H - Q_E$ ) während der Vormittagsstunden am niedrigsten. Am späten Nachmittag, beim Übergang von konvektiver zu stabiler atmosphärischer Schichtung, ist das Residuum am größten.





Abbildung 31: Die Energiebilanzschließung für die Standorte SIED (links) und RURA (rechts) während des KuLaRuhr-Untersuchungszeitraums.

## Strahlungs- und Energiebilanz an der Erdoberfläche

Die Netto-Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche (Gleichung 1, Kap. 2.1) ergibt sich aus der Globalstrahlung, der kurzwelligen Reflexion, der langwelligen Ausstrahlung und der langwelligen atmosphärischen Gegenstrahlung. Die einzelnen Glieder der Strahlungsbilanz an SIED und RURA zeigen im mittleren Tagesgang nur sehr geringe Unterschiede. Die kurzwellige reflektierte Strahlung an RURA war während der Tagstunden im Mittel durch um 8,2 W m<sup>-2</sup> höhere Strahlungsflussdichten als  $K\uparrow$  an SIED charakterisiert. Dieses Ergebnis deutet auf eine geringfügig höhere Albedo am Standort RURA hin. Es wurde somit an SIED im Vergleich zu RURA ein höherer Betrag an Strahlung an der Erdoberfläche absorbiert.



Abbildung 32: Mittlerer Tagesgang der Strahlungsbilanz für SIED (links) und RURA (rechts). Die farblich schraffierten Bereiche kennzeichnen die Standardabweichungen.



Für die weitere Analyse der Energiebilanz wurden die Tag- und Nachtstunden getrennt voneinander untersucht. Die Nachtstunden wurden entsprechend des Sonnenstandes definiert, d.h. die Nacht beginnt mit dem Eintreten der Dämmerung und endet zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs. An beiden Energiebilanzstandorten ist der latente Wärmefluss während der Tagstunden die dominierende Größe in der Energiebilanz (Abbildung 33, Tabelle 8).



Abbildung 33: Mittlerer Tagesgang der Energiebilanz für SIED (links) und RURA (rechts). Die farblich schraffierten Bereiche kennzeichnen die Standardabweichungen. Zur besseren Lesbarkeit wurde der Bodenwärmefluss QG entgegen der üblichen Vorzeichenkonvention dargestellt.

Im Vergleich der beiden Standorte ist  $Q_E$  am Standort RURA im Mittel um 4 W m<sup>-2</sup> höher, als an SIED (während der Tagstunden). Bezogen auf die normierte Darstellung als Flussverhältnis ( $Q_E/Q^*$ ) entspricht das einem Unterschied von rund 12 % und deutet auf eine höhere Evapotranspirationsrate an RURA hin (Abbildung 34). Bei der Betrachtung der sensiblen Wärmeflussdichte  $Q_H$  beträgt der Unterschied 7,4 W m<sup>-2</sup> bzw. 2 %, wobei die höheren Werte wurden am Standort SIED gemessen wurden. Die Bodenwärmeflussdichte  $Q_G$ ist im Mittel für den gesamten Betrachtungszeitraum am Standort SIED um 8,5 W m<sup>-2</sup> höher als an RURA. Insgesamt herrschte am Umlandstandort RURA während der Tagstunden demnach ein geringeres Potential zur direkten Erwärmung der Luft über fühlbare Wärme vor. Zudem wird mehr Energie in latente Wärme umgesetzt.

#### Endbericht Teilprojekt 08 – Cluster 02



Tabelle 8: Übersicht über die Mittelwerte und die normierten Werte von  $Q_H$ ,  $Q_E$  und  $Q_G$  (Flussverhältnisse) für den gesamten Messzeitraum sowie für die Strahlungstage während der Tagund Nachtstunden. Die Nachtstunden wurden entsprechend des Sonnenstandes definiert. Die Nächte beginnen mit dem Eintreten der Dämmerung und enden zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs.

		SIED	RURA	SIED	RURA	SIED	RURA	SIED	RURA
		Gesa	Gesamter Betrachtungszeitraum			Strahlungstage			
		Mittelwerte in W m-2 Normiert mit Q* in %			Mittelwerte	rt mit Q*			
	Q*	130,7	106,7			214,7	185,2		
	$\boldsymbol{Q}_{H}$	27,4	20	22,6	20,7	41,8	35,6	21,6	20,4
Tag	$Q_E$	80,9	84,9	53,3	65	120,3	132,5	52,5	63,8
	$\boldsymbol{Q}_{G}$	21,9	13,4	15,8	13,7	43,6	33,5	16,6	14,7
	Re	0,6	-14,9	8,3	0,3	9	-16,4	7,3	-3,1
	Q*	-20,2	-29,8			-29,9	-36,2		
Ļ	$\boldsymbol{Q}_{H}$	-17,5	-19,7			-11,5	-13,9		
lach	$Q_E$	10,7	9,1			5,5	2,1		
2	$\boldsymbol{Q}_{G}$	-13,8	-9			-26,9	-12,5		
	Re	0,4	-10,3			3	-11,8		



Abbildung 34: Normierter, mittlerer Tagesgang der Energiebilanzterme (Flussverhältnis) für SIED (links) und RURA (rechts). Die Ergebnisse sind dargestellt für den gesamten Messzeitraum (Jahr) und die Strahlungstage (ST).

Während der Nachstunden fallen die mittleren absoluten Beträge der Flussdichten von  $Q_H$  an RURA höher aus, als an SIED. Die Flussdichten  $Q_E$  und  $Q_G$  hingegen sind durch niedrigere Werte im Vergleich zu SIED charakterisiert. Am Standort SIED wurde dementsprechend



mehr Energie in Form von Wärme an den Erdboden abgegeben und gespeichert. Somit war der Effekt der nächtlichen Abkühlung dort auch geringer.

An Strahlungstagen sind die Unterschiede zwischen den Wärmeflussdichten während der Tagstunden im Vergleich zum kompletten Messzeitraum deutlich ausgeprägter. Der mittlere latente Wärmefluss vergrößert sich um rund 30 % gegenüber dem kompletten Messzeitraum. Ebenso vergrößert sich die prozentuale Differenz zwischen  $Q_E$  an RURA und SIED um rund 5 Prozentpunkte (RURA > SIED, Tabelle 8). Die Verdunstung und damit auch der kühlende Effekt sind somit am Umlandstandort während strahlungsreichen Tagen ausgeprägter als im Vergleich zum ganzjährigen Mittel.

## Saisonale Betrachtung

Bei der saisonalen Betrachtung der mittleren Tagesgänge der Energiebilanzterme sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Die turbulenten Wärmeflüsse sind während der Sommermonate durch die höchsten Werte und Amplituden gekennzeichnet während in den Wintermonaten die geringsten Flussdichten auftreten. Der Vergleich der Stationen zeigt, dass  $Q_E$  am Standort RURA v.a. während der Mittagstunden im Frühjahr und Sommer (MAM, JJA) deutlich gegenüber der Vergleichsstation SIED erhöht ist. Der im Mittel höhere Wassergehalt an RURA fördert die Verdunstungskühlung durch erhöhte Umsetzung der Energie in den latenten Wärmefluss (Abbildung 35). Im Umkehrschluss ist der gleiche Zeitraum an SIED durch höhere Energieumsetzung in sensible Wärme  $Q_H$  gekennzeichnet.





Abbildung 35: Mittlere Tagesgänge der Energiebilanzterme für die zwei Eddy-Kovarianz-Standorte unterteilt dargestellt für die Jahreszeiten Frühling (MAM), Sommer (JJA), Herbst (SON), Winter (DJF).

## Verdunstungsleistung der Standorte

Die Verdunstungsleistung eines Standorts quantifiziert die verdunstete Wassermenge während eines bestimmten Zeitraums. Über der Landesfläche Deutschlands werden bspw. pro Jahr durchschnittlich 463 mm verdunstet (Foken, 2006). Die Verdunstung, die sogenannte Evapotranspiration, gliedert sich in die abiotische Verdunstung (Evaporation) von festen Oberflächen, sowie in die stomatäre Verdunstungsaktivität der Vegetation (Transpiration). Die Evaporation ist der Anteil der Verdunstung, der hauptsächlich von der Wasserverfügbarkeit, der Energiezufuhr, dem atmosphärischen Sättigungsdefizit und der Intensität des turbulenten Austausches abhängig ist. Bei der Transpiration wird die Verdunstung von pflanzenphysiologischen Faktoren über die Stomata der Pflanzen gesteuert,



die jedoch ebenfalls sensitiv auf die Wasserverfügbarkeit am jeweiligen Standort reagiert. Die durch Eddy-Kovarianz-Messungen bestimmte Verdunstungsleistung spiegelt in der Regel die Evapotranspiration wieder, also die Summe aus Evaporation und Transpiration (Foken, 2006).



Abbildung 36: Links: Kumulativer Niederschlag und kumulative Verdunstung an den Eddy-Kovarianz-Standorten für den gesamten Messzeitraum (in mm d<sup>-1</sup>). Rechts: Verhältnis zwischen dem skalierten Bodenwassergehalt und der Lufttemperaturamplitude der einzelnen Tage während der Sommermonate (JJA) für SIED (oben) und RURA (unten). Angegeben sind außerdem das Bestimmtheitsmaß (R<sup>2</sup>) sowie die Regressionsgeraden.

An RURA wurde während des Betrachtungszeitraums mit 390,6 mm a<sup>-1</sup> insgesamt rund 4,5 % mehr Wasser verdunstet als an SIED mit 373,7 mm a<sup>-1</sup> (Abbildung 36). Es ist zu beachten, dass dieser Berechnung kein lückenloser Datensatz zugrunde liegt, jedoch für beide Datensätze die gleiche Datenverfügbarkeit bzw. Zeitperiode betrachtet wurde. Für die 21 Strahlungstage des Messzeitraumes konnte mit einer Verdunstungsleistung von 48,7 mm bzw. 2,3 mm d<sup>-1</sup> eine rund 10 % höhere Verdunstungsleistung an RURA beobachtet werden, als an SIED (44,3 mm bzw. 2,1 mm d<sup>-1</sup>). Der Standort RURA erfuhr demnach einen höheren potentiellen Kühlungseffekt durch Verdunstungskühlung als SIED. Diese Annahme kann durch den Zusammenhang zwischen der aktuellen Wasserverfügbarkeit am Standort (skalierter Bodenwassergehalt) während eines Untersuchungstages und der Lufttemperaturamplitude des entsprechenden Untersuchungstages überprüft werden, d.h. mit zunehmenden Bodenwassergehalt sollte sich eine abnehmende Temperaturamplitude einstellen, da Spitzen der Lufttemperatur durch zunehmende Verdunstungskühlung gepuffert werden können (Abbildung 36). Die Tagesmittelwerte des Bodenwassergehalts wurden dazu mit dem Maximalwert im Betrachtungszeitraum skaliert und gegen die gemessene Amplitude der Lufttemperatur aufgetragen. Es zeigt sich, dass ein höherer Bodenwassergehalt an RURA



in der Tat zu einer niedrigeren Lufttemperatur führt bzw. ein negativer statistischer Zusammenhang zwischen Bodenwassergehalt und Lufttemperaturamplitude an den Standorten resultiert. Ein ähnlicher Zusammenhang wurde kürzlich von Wiesner et al. (2014) für verschiedene Standorte in Hamburg berichtet. Dort konnte gezeigt werden, dass 11 bis 17 % der Variation der Lufttemperaturamplitude mit dem Bodenwassergehalt erklärt werden können. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich für die Standorte SIED und RURA mit 15 bzw. 13 %. Die Steigungen der linearen Regressionsgeraden von SIED und RURA sind mit -15,7 bzw. -19,2 etwas höher als Vergleichsstudie, welche zwischen -5,0 und -14,1 lagen. Ein höherer Absolutwert der Steigung deutet auf einen schnelleren Anstieg der Temperaturamplitude mit abnehmendem Bodenwassergehalt hin. Dieses Ergebnis verdeutlicht die positive Wirkung von Freiflächen mit hoher Wasserverfügbarkeit.

## CO2-Dynamik und Austausch an den Standorten

Freiflächenstandorte können, wenn sie durch einen ausreichend wasserversorgten Vegetationsbesatz geprägt sind, eine wichtige Klimafunktion als Senke für atmosphärisches  $CO_2$  einnehmen. Freiflächenstandorte können  $CO_2$  dann binden, wenn in der Bilanz mehr  $CO_2$  über Photosyntheseaktivität aufgenommen wird (= negativer  $CO_2$ -Fluss nach Vorzeichenkonvention, d.h. zum Bestand gerichtet), als der Standort durch Respiration aus Boden und Pflanze an die Atmosphäre abgibt (= positiver  $CO_2$ -Fluss). Zur Untersuchung der möglichen Senkenfunktion der Standorte im Untersuchungsraum Bottrop wird der  $CO_2$ -Austausch an beiden Standorten im Folgenden näher beleuchtet.

Bei der Überprüfung der Datenqualität der  $CO_2$ -Flussdichten wurden Messungen minderer Qualität entsprechend gängiger Qualitätsmerkmale identifiziert und verworfen. Die Qualitätskriterien wurden analog zu den turbulenten Wärmeflussdichten verwendet. Für SIED ergab sich eine Datenverfügbarkeit von 53,3 %, für RURA von 58,3 %.

Die CO<sub>2</sub>-Flussdichten der beiden Standorte zeigen einen typischen Verlauf des Respirationsmaximums während der Nachtstunden sowie der CO<sub>2</sub>-Aufnahme während der Tagstunden (Abbildung 37). In den Sommermonaten (JJA) ist durch den Biomassezuwachs eine höhere Dynamik im Tagesgang zu erkennen. Nachts wurden CO<sub>2</sub>-Austauschraten um 9  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> erreicht und am Tage Maximalwerte von ca. -13  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Die tageszeitliche Dynamik der gemessenen CO<sub>2</sub>-Flussdichten an den Rasenstandorten RURA und SIED ist prinzipiell vergleichbar mit anderen Beobachtungen in der wissenschaftlichen Literatur. Während einer Mai-Messkampagne in der Niederlande wurden maximale, nächtliche CO<sub>2</sub>-Austauschraten von 11,4  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> und für die Tagstunden Maximalwerte von ca. -27,3  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; am Tage: -14,8  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) konnten während sommerlicher Bedingungen über einer Grasfläche in Oklahoma, USA gemessen werden (Meyers, 2001).




Abbildung 37: Mittlere Tagesgänge der gemessenen CO2 Flussdichten für den kompletten Betrachtungszeitraum (Jahr), die Frühlings- (MAM), die Sommer (JJA), die Herbst (SON) und Winterperiode (DJF). SIED - durchgezogene Linien, RURA – gestrichelte Linie.

Beide Standorte stellten während der Frühlings- und Sommermonate eine Kohlenstoff-Senke dar, können also atmosphärisches CO<sub>2</sub> aufnehmen (Tabelle 9). Am Umlandstandort wurde in der ersten Jahreshälfte jedoch im Mittel mehr Kohlenstoff vom Bestand aufgenommen. In der zweiten Jahreshälfte wurde im Mittel an beiden Standorten mehr CO<sub>2</sub> an die Atmosphäre abgegeben, als aufgenommen. Dieser Verlauf ist durch geringere photosynthetische Aktivität (Strahlung, Biomasse) im Herbst und Winter zu erklären. Die wichtige Klimafunktion der Freifläche als CO<sub>2</sub>-Senke kommt also besonders während der Sommer- und Frühjahrsmonate zum Tragen. Eine Gesamtbilanz (Nettoökosystemaustausch) konnte für die Standorte nicht berechnet werden, da kein lückenloser Datensatz der CO<sub>2</sub>-Flüsse vorlag.

Tabelle 9: Summen der Kohlenstoffauf- und abnahmen an den Eddy-Kovarianz Stationen während der unterschiedlichen Jahreszeiten. Die Tagessummen wurden aus den mittleren Tagesgängen der einzelnen Jahreszeiten ermittelt. Diese Werte wurden genutzt um eine grobe Hochrechnungen für die Jahreszeiten durchzuführen. Hinweis: bei der Angabe der saisonalen Werte handelt es sich nicht um eine Bilanz des Nettoökosystemaustausches, da hierfür ein lückenloser Datensatz vorliegen muss. Die Daten wurden auf Basis mittlerer Tageswerte extrapoliert.

		-			
		Frühling	Sommer	Herbst	Winter
SIED	$ma C m^{-2} d^{-1}$	-1366	-520	599	1513
RURA	ng c ni u	-1394	-1013	1408	400
SIED	$ka \cap m^{-2} Saicon^{-1}$	-0,13	-0,05	0,05	0,14
RURA	kg C III Saison	-0,13	-0,09	0,13	0,04

Der mittlere Jahresgang des  $CO_2$  Flusses (auf Basis von Tagesmittelwerten, Abbildung 38) des Standorts RURA weist einige Auffälligkeiten auf, die für die Kohlenstoffbilanz berücksichtigt werden sollten. So erfolgte Ende Mai und Mitte Juli ein Rasenschnitt der Grünfläche. Ende August, zeigte sich der Graslandstandort in einem degradierten Zustand, d.h. der Bestand offenbarte ein bräunliches und vertrocknetes Erscheinungsbild so dass keine



vollständige Photosyntheseleistung stattfinden konnte. Diese Periode äußert sich, zu Zeiten in denen C-Aufnahmen der Freifläche erwartet worden wären, als Quelle für Kohlenstoff. Das zeigt zum einen, dass die C-Bilanz der Umlandstation ohne diese Modifikationen höhere Werte hätte annehmen können und zum anderen, dass Modifikation des Bestandes eine deutliche Auswirkung auf die C-Bilanz haben können.



Abbildung 38: Mittlerer Jahresgang des CO2 Flusses (auf Basis von Tagesmittelwerten) der zwei EK-Messstandorte.

#### Anwendung eines einfachen Assimilations- und Respirationsmodells

Mit Hilfe eines einfachen Modellansatzes können die CO<sub>2</sub>-Flussdichten der Standorte in die Beiträge durch des Respirations- sowie Assimilationsflusses ( $F_R$ ,  $F_A$ ) partitioniert werden. Bei der Assimilation von Kohlenstoff zum Aufbau von Biomasse ist die pflanzliche Photosynthese der wichtigste Mechanismus. Der Prozess der Assimilation stellt demnach die Kohlenstoff-Aufnahme dar. Über den Prozess der Respiration wird Kohlenstoff an die Atmosphäre abgegeben (Bossel, 1990).

Die Modellierung der Respirations- und Assimilationsflüsse auf Basis der CO<sub>2</sub>-Flussmessungen, der kurzwelligen Einstrahlung sowie der Bodentemperatur ( $T_{soil}$ ) erfolgte nach dem Ansatz von Zeeman et al. (2010). Demnach berechnet sich der Respirationsfluss

$$F_R = F_{R,ref} \exp\left[E_0\left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{soil} - T_0}\right)\right]$$

Gleichung 7

aus der gemessenen Bodentemperatur, der Respiration  $F_{R,ref}$  bei der Referenztemperatur  $T_{ref}$  = 283,15 K, der Temperatur zwischen  $T_{soil}$  und 0 K:  $T_0$  = 227,13 K, und dem Fitting-Parameter



für die Aktivierungsenergie  $E_0 = 308,56$  K.  $F_{R,ref}$  wurde aus nächtlichen Messungen des CO<sub>2</sub>-Flusses bestimmt.

Für den Assimilationsfluss

$$F_A = \alpha \frac{PPFD}{1 - \frac{PPFD}{2000} + PPFD} \frac{\alpha}{F_{A,opt}}$$

**Gleichung 8** 

wird die photosynthetische Photonen-Flussdichte (*PPFD*), berechnet aus der kurzwelligen Einstrahlung, sowie der CO<sub>2</sub>-Fluss pro Photonfluss ( $\alpha$ , aus Messungen bestimmt) benötigt. Der Assimilationsfluss bei optimalen Einstrahlungsbedingungen ( $F_{A,opt}$ ) wurde messtechnisch erfasst. Bedingung war ein wolkenfreier Himmel sowie ein gut ausgebildeter Vegetationsbestand.

Da  $F_R$  und  $F_A$  nicht direkt gemessen werden können, besteht keine Möglichkeit die Modellgüte zu verifizieren. Es konnte jedoch die Summe der beiden berechneten Flüsse mit dem gemessenen CO<sub>2</sub>-Fluss verglichen werden (Abbildung 39). Für SIED sind die Unterschiede zwischen Modell und Messung minimal. Nur während der Abendstunden kommt es zu größeren Abweichungen. Für RURA sind die Abweichungen im Tagesgang gering und nahezu konstant. In der hier vorliegenden Untersuchung unterscheidet sich v.a. der modellierte Assimilationsfluss der beiden Stationen, an SIED wurden ca. 16 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> als Tagesmaximum erreicht, an RURA ca. 20 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Es bestätigt sich demnach auch durch die Modellanwendung eine höhere Aufnahme von Kohlenstoff durch den Bestand am Standort RURA.



Abbildung 39: Mittlere Tagesgang des CO<sub>2</sub>-, Assimilations- und Respirationsflusses für SIED (links) und RURA (rechts) für die Sommermonate (JJA).



#### Vergleich von Perioden mit hohen und niedrigen Bodenwassergehalten

Wie bereits dargestellt (Kapitel 3.2.2), unterschieden sich die EK-Messstandorte hinsichtlich ihres Bodenwassergehaltes, da RURA durch einen im Mittel höheren Bodenwassergehalt charakterisiert war als SIED. Die Betrachtung von Perioden mit niedrigen Bodenwassergehalten (trocken) und hohen Bodenwassergehalten (feucht) soll Auskunft darüber geben, inwieweit der CO<sub>2</sub>-Fluss sowie der Assimilationsfluss an den Standorten durch die Bodenfeuchtigkeit beeinflusst wurden. Während Zeitperioden mit geringen Bodenwassergehalten versucht die Vegetation über (partiellen) Stomataschluss ein Optimum herzustellen, zwischen dem Bestreben weiterhin Kohlenstoff zu assimilieren, aber gleichzeitig den Verlust von Wasser durch Transpiration einzuschränken (Kurc und Small, 2007). Die unterschiedlichen Bedingungen des Bodenwassergehaltes an den Standorten können demnach zu variablen Zuständen in der CO<sub>2</sub>-Austauschdynamik bzw. im CO<sub>2</sub>-Aufnahmepotential führen. Die Klimafunktion der CO<sub>2</sub>-Aufnahme ist somit also auch in Abhängigkeit von dem Bodenwassergehalt variabel. Für die Einteilung der trockenen und feuchten Perioden wurden die 25%-Perzentile bzw. 75%-Perzentile des Bodenwassergehalts jeder Station herangezogen. Feuchte Perioden hatten demnach einen Bodenwassergehalt größer des 75%-Perzentils, trockene Perioden sind durch einen Bodenwassergehalt unterhalb des 25%-Perzentils definiert.

Der mittlere Tagesgang des  $CO_2$ -Flusses zeigt während der trockenen Periode für die Tagstunden die niedrigsten Absolutwerte am Standort RURA, gefolgt von den trockenen Perioden an SIED (Abbildung 40). Die höchsten Austauschflüsse wurden bei RURA während der feuchten Perioden gemessen.



Abbildung 40: Mittlerer Tagesgang des CO<sub>2</sub>- und Assimilationsflusses für die Perioden trocken und feucht während der Sommermonate (JJA) an den Stationen SIED (links) und RURA (rechts). Die Datengrundlage betrug 68 % (653 von 963) für SIED-trocken, 66 % (659 von 1011) für SIED-feucht, 73 % (626 von 853) für RURA-trocken und 77 % (534 von 693) für RURA-feucht.



Auf den CO<sub>2</sub>-Fluss hat also der Bodenwassergehalt den größten Einfluss gefolgt von weiteren Standortbedingungen. Auf den Assimilationsfluss hat ebenfalls die Wasserverfügbarkeit des Standortes den größten Einfluss. Insgesamt wurde am Standort RURA während der feuchten Periode die größte Menge an Kohlenstoff assimiliert.

### Fazit: Messungen der Oberflächenenergiebilanz

Die Untersuchungen zur Energiebilanz der Freiflächenstandorte RURA und SIED über den Zeitraum eines Jahres haben gezeigt, dass am Umlandstandort RURA während der Tagstunden prinzipiell weniger Energie in fühlbare Wärme umgesetzt wurde, als am Vergleichsstandort SIED. Entsprechend war ein größerer Anteil der Energie als latenter Wärmefluss zu verzeichnen.

Für beide Standorte konnte der Effekt der Verdunstungskühlung (durch den latenten Wärmefluss) auf die Größenordnung der Lufttemperaturamplitude gezeigt werden. Durch die höheren Bodenwassergehalte an RURA trat die Klimafunktion der lokalen Lufttemperaturreduktion deutlicher zu Tage.

Beide Standorte haben des Potential  $CO_2$  aus der Atmosphäre aufzunehmen. Dem Standort RURA kann ein größeres Potential als Kohlenstoff-Senke im Vergleich zum Standort SIED bescheinigt werden. Es kann jedoch gezeigt werden, dass Eingriffe in den Grünbestand (Mahd, Degradation des Grünlandes) sichtbare Auswirkungen auf die C-Bilanz haben. Die Gegenüberstellung von trockenen und feuchten Perioden konnten verdeutlichen, dass der Bodenwassergehalt einen signifikanten Einfluss auf Netto  $CO_2$ -Fluss und Assimilationsfluss hat. Ein höherer Bodenwassergehalt führte zu einer höheren  $CO_2$ -Aufnahme an beiden Standorten, insgesamt zu einem höheren  $CO_2$ -Aufnahmepotential an RURA.

## 4.2.3 Untersuchung der mikroklimatischen Bedingungen an den Freiflächenstandorten

#### Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessung

Zur Untersuchung der mikroklimatischen Eigenschaften und Klimafunktionen der Freiflächenstandorte im Untersuchungsgebiet BOT-Eigen, wurden während der Untersuchungsperiode Messungen der Lufttemperatur sowie der relativen Luftfeuchtigkeit an sieben verschiedenen Freiflächenstandorten durchgeführt (vgl. Kapitel 3.2).

### Temperaturvariabilität innerhalb des Untersuchungsgebietes

Eine statistische Übersicht der während des Untersuchungszeitraumes an sieben Freiflächenstandorten gemessenen Lufttemperaturen zeigt, dass die Station Bottrop Eigen Markt (EIGM) mit einem Median von 13,4 °C die höchste mittlere Lufttemperatur innerhalb der Untersuchungsperiode aufweist (Abbildung 41). Die geringste Lufttemperatur tritt - wie zu erwarten - an der ruralen Messstation (RURA) mit einem Median von 12,2 °C auf. Auch die mittlere Temperatur der Station SIED weist mit einem Median von 12,4 °C eine geringere Lufttemperatur auf, als die übrigen Freiflächenstandorte innerhalb des Stadtteils BOT-Eigen.

#### Endbericht Teilprojekt 08 – Cluster 02





Abbildung 41: Boxplot der Lufttemperatur im Messzeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013 an den Freiflächenstandorten im Untersuchungsgebiet BOT-Eigen (Box: Bereich zwischen 25- und 75-Perzentil (Interquartilsbereich) mit Angabe für Median; Whisker: 1,5facher Interquartilsbereich).



Abbildung 42:Mittlerer Tagesgang der Lufttemperaturen an den Freiflächenstandorten im Zeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013.



Auch im mittleren Tagesgang der Lufttemperatur zeigt sich, dass RURA und SIED die geringsten Temperaturen aufweisen, sowohl nachts als auch zur Mittagszeit (Abbildung 42). An dieser Stelle macht sich der Effekt der Verdunstungskühlung sowie eine effektive nächtliche Auskühlung der Freiflächenstandorte mit dem geringsten Versiegelungsgrad bemerkbar (vgl. Steckbriefe Messstandorte, Abbildung 13). Lediglich vormittags zeigt SIED eine etwas schnellere Erwärmungsrate als einige der stärker versiegelten Messpunkte. Am Messstandort mit der höchsten Versiegelungsrate (EIGM) traten die höchsten Lufttemperaturen im Tagesverlauf auf.

Eine einfache Zusammenfassung der Auswirkungen lokaler Mikroklimate auf den verschiedenen Freiflächen ist über eine Häufigkeitsanalyse der Anzahl klimatologischer Ereignistage möglich (Tabelle 10). Insgesamt zeigt sich, dass die Anzahl der Ereignistage mit hohen mittleren und maximalen Lufttemperaturwerten am Standort EIGM am höchsten, im Umland (RURA) am niedrigsten ist. Die Vervierfachung der Anzahl heißer Tage im Vergleich der Standorte EIGM und RURA zeigt, dass v.a. mittägliche Spitzenwerte der Lufttemperatur über der nahezu vollständig versiegelten Innenstadtfläche auftreten können. Die Anzahl von Sommertagen ist im Vergleich zwischen EIGM und RURA um den Faktor 1,6 erhöht. Die nächtliche Periode zeigt sich am Standort EIGM ebenfalls in einer erhöhten Anzahl thermischer Belastungssituationen (z.B. tropische Nacht).

Standort	<i>T<sub>mittel</sub></i> [°C]	<b>Т<sub>тах</sub></b> [°С]	<i>T<sub>min</sub></i> [°C]	<b>Sommertag</b> <i>T<sub>max</sub></i> ≥ 25 °C	Heißer Tag T <sub>max</sub> ≥ 30 °C	<b>Trop. Nacht</b> <i>T<sub>min</sub></i> ≥ 20 °C	<b>Grillpartytag</b> <i>T</i> <sub>21h</sub> ≥ 20 °C
BUCH	11,6	37,2	-6,7	43	10	1	37
SYDO	12,7	38,3	-4,3	45	11	1	39
SCHA	11,5	36,7	-7,2	35	5	1	36
EIGM	12,1	37,7	-6,2	44	12	2	45
TRAP	11,6	37,8	-7,2	43	9	1	40
SIED	11,7	37,1	-8,3	30	5	1	26
RURA	11,6	36,2	-9,3	28	3	0	23
∆(EIGM - RURA)				16	9	2	22

Tabelle 10: Temperaturkennwerte der Freiflächenstandorte, Anzahl klimatologischer Ereignistage sowie die Differenz der Ereignistage zwischen EIGM und RURA im Messzeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013.

Zur Analyse der räumlichen Verteilung von Temperaturmaxima und –minima während der Nachtstunden wurden die Lufttemperaturdaten nach ihrer Rangfolge aufgetragen (Abbildung 43 und Abbildung 44). Es zeigt sich, dass die nächtlichen Temperaturmaxima im Messzeitraum mit 82 % hauptsächlich am Standort Eigen-Markt auftreten. Somit weist EIGM die deutlichste Überwärmung auf (siehe Abbildung 42). Im Gegensatz dazu liegt am Standort RURA mit 52 % die höchste Auftrittshäufigkeit nächtlicher Temperaturminima vor (Abbildung 44). Prinzipiell lässt sich daraus ableiten, dass EIGM als ein Stadtstandort mit



hoher Versieglung und größtem UHI-Effekt charakterisiert werden kann, während RURA als klassische Umlandstation die größte Häufigkeit der Temperaturminima aufweist.



Abbildung 43: Darstellung der Rangfolge des absoluten nächtlichen Lufttemperaturmaximums pro Messnacht an den Freiflächenstandorten im Messzeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013. Die drei Stationen mit den höchsten prozentualen Auftrittshäufigkeiten des absoluten Temperaturmaximums sind angegeben.



Abbildung 44: Darstellung der Rangfolge des absoluten nächtlichen Lufttemperaturminimums pro Messnacht an den Freiflächenstandorten im Messzeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013. Die drei Stationen mit den höchsten prozentualen Auftrittshäufigkeiten des absoluten Temperaturminimums sind angegeben.



Um die Überwärmungseffekte im Jahresverlauf wurde zu analysieren, ein Thermoisosoplethendiagramm der Differenz der Lufttemperatur zwischen der Station EIGM und RURA erstellt (Abbildung 45). Das Diagramm verdeutlicht, dass während der Mittagszeit eine mittlere Überwärmung des Stadtstandortes in der Größenordnung von 2,5 K vorherrscht. Die UHI ist jedoch v.a. ein nächtliches Phänomen während der Sommermonate (Kuttler, 2013). Im Untersuchungsjahr liegt während der Sommermonate im Mittel eine nächtliche Überwärmung von bis zu 2,6 K vor. Eine Ausnahme stellt hierbei der Juni dar, ein Zeitraum in dem keine autochthonen Wetterlagen (Strahlungstage) aufgetreten sind, während derer Überwärmungseffekte durch unterschiedliche Ausgestaltung der Oberfläche besonders ausgeprägt sein können (siehe Abbildung 26). Während des Sommers (August) können maximale nächtliche UHI-Intensitäten von bis zu 6,5 K auftreten.



Abbildung 45: Mittlere halbstündliche Lufttemperaturdifferenz zwischen den Stationen EIGM und RURA im Jahresverlauf: Isoplethendiagramm  $\Delta T_{(EIGM-RURA).}$ 

Zur Untersuchung des Erwärmungsverhaltens der Freiflächenstandorte am Tag sowie des Abkühlungsverhaltens in der Nacht, wurden die halbstündlichen Temperaturdifferenzen der einzelnen Messpunkte betrachtet (siehe Abbildung 46). RURA und SIED erwärmen sich nach Sonnenaufgang wesentlich schneller als die übrigen städtischen Messstandorte. Die Ursache ist in der prinzipiell höheren Wärmekapazitätsdichte der meisten künstlichen Oberflächenund Baumaterialien innerhalb städtischer Bereiche zu suchen. Bei gleichem Energieangebot zeigen sich daher im Umland - bei geringeren Wärmekapazitätsdichten natürlicher Oberflächen und Substrate - schnellere Erwärmungsraten (Oke, 2009). Nachts zeigt der städtische Standort EIGM die geringsten Abkühlungsraten. Dafür ist das Umland, aufgrund der geringeren Wärmspeicherung im Untergrund, von den höchsten Abkühlungsraten charakterisiert. Insgesamt sind die weniger stark versiegelten Freiflächenstandorte in der Lage, während der Nacht deutlich effektiver auskühlen, als die stärker versiegelten Standorte (vgl. Abbildung 42). Diese Freiflächenstandorte können damit wichtige Klimafunktionen als Bereiche lokaler Kaltluftbildung einnehmen und potentiell eine Fernwirkung in die naheliegende Umgebung ausüben. Zur Bewertung dieser Effekte wären jedoch spezifische Erkenntnisse über die nächtliche Kaltluftausbreitung im Umfeld dieser Standorte notwendig.





Abbildung 46: Erwärmungs- und Abkühlungsraten der Lufttemperatur ( $\Delta T/\Delta t$ ) an den einzelnen Freiflächenstandorten während des Messzeitraums Mrz. 2012 bis Feb. 2013.

#### Temperaturverhalten während Strahlungstagen

Während Strahlungstagen ergibt sich für die bisher beschriebene Charakterisierung der einzelnen Standorte keine wesentliche Änderung, die Unterschiede sind jedoch deutlicher ausdifferenziert. Die höchsten Lufttemperaturen werden während des Tages mit einem Median von 19,5 °C am Standort EIGM beobachtet (Abbildung 47). Somit treten auch an Strahlungstagen die größten Überwärmungseffekte (tags und nachts) am städtischen Standort mit dem höchsten Versiegelungsgrad auf (Abbildung 48).





Abbildung 47: Boxplot der Lufttemperatur an Strahlungstagen im Messzeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013 (Box: Bereich zwischen 25- und 75-Perzentil (Interquartilsbereich) mit Angabe für Median; Whisker: 1,5facher Interquartilsbereich).



Abbildung 48: Mittlerer Tagesgang der Lufttemperatur an Strahlungstagen im Messzeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013.



Für das nächtliche Abkühlungsverhalten soll im Folgenden untersucht werden, inwieweit ein Zusammenhang zwischen dem Versiegelungsgrad des Freiflächenstandortes und der Intensität der nächtlichen Abkühlung besteht (Abbildung 49). Aus der Gegenüberstellung des Versigelungsgrades mit dem mittleren bzw. dem maximalen Abkühlungsbetrag über die Nachtperiode wird deutlich, dass das nächtliche Abkühlungsverhalten nicht linear mit dem Versieglungsgrad korreliert. So zeigte zum Beispiel der Standort SCHA mit 8,1 K ein relativ geringes mittleres Abkühlungsvermögen. Eine wesentliche Ursache lässt sich in der Bebauungsstruktur des Standortes vermuten. Die Freifläche SCHA wird von einer geschlossenen Bebauungsstruktur umgeben, die zu einem geringen Luftaustausch und zur Verminderung des Himmelssichtfaktors führt. Aus der umliegenden Baumasse kann zudem während des Tages gespeicherte Wärme über langwellige Ausstrahlung abgegeben werden. Insgesamt ist SCHA demzufolge durch eingeschränkte nächtliche Auskühlung charakterisiert. Im Gegensatz dazu zeigte der von lockerer Wohnbebauung geprägte Standort SYDO mit 9,3 K im Mittel einen höheren Abkühlungsbetrag. Zusätzlich kann der in der Nähe gelegene Kirschhemmsbach eine positive mikroklimatische Wirkung entfalten, da er aufgrund seiner topographischen Ausgestaltung eine potentielle nächtliche Kaltluftleitbahn darstellt. In der Klimanalyse der Stadt BOT wurde die potentielle Kaltluftleitbahnfunktion des Flussverlaufes bereits angedeutet (Snowdon & Bürger, 2006).



Abbildung 49: Nächtliches Abkühlungsverhalten an Strahlungstagen in der Messperiode Mrz. 2012 bis Feb. 2013.

#### Räumliche Darstellung der nächtlichen Temperaturverteilung – Temperaturmessfahrt

Die Messfahrten im Bottroper Stadtgebiet fanden am 21.03.2012 um ca. 20 Uhr und 23 Uhr statt und wurden über einen Zeitraum von jeweils ca. 2 h durchgeführt.



Beide Messfahrten unterscheiden sich in Bezug auf die räumliche Temperaturverteilung nicht signifikant voneinander (siehe Abbildung 50). Daher wird in folgender Darstellung der Lufttemperaturverteilung zunächst nur auf die räumlich interpolierte Darstellung der ersten Messfahrt eingegangen (Abbildung 51).

Der verdichtete Innenstadtbereich Bottrops ist durch eine deutliche nächtliche Überwärmung (rund 2 K) im Vergleich zu eher locker bebauten oder randstädtisch gelegenen Bereichen gekennzeichnet. Aufgrund der Halde Rheinbaben und dem sich im Nordosten des Untersuchungsraumes anschließenden Industriegebiet mit aufgelockerter Bebauung, liegt ein Bereich mit geringeren Lufttemperaturen vor. Die Halde bietet auf Grund ihrer Oberflächenbeschaffenheit (große, offene Brach-/Grünfläche) ein höheres Abkühlungspotential, welches bis in die Bebauung des Industriegebietes hineinreichen kann. Kaltluftabflüsse vom Haldenkörper können für zusätzliche Reduktion der nächtlichen Lufttemperatur in diesem Bereich sorgen. Weitere durch geringere Lufttemperaturen gekennzeichnete Bereiche befinden sich entlang des Kirchhemmsbach (Verlauf durch BOT-Eigen von Nordost nach Südwest), sowie entlang der Rheinbabenstraße (Verlauf etwa vom Standort EIGM bis zu SCHA) und der sich östlich anschließenden Bahntrasse.

In Übereinstimmung mit dem bisherigen Bild des aus den stationären Messungen abgeleiteten nächtlichen Temperaturverhaltens der Freiflächenstandorte, zeigt die nächtliche Temperaturmessfahrt, dass die versiegelten Standorte EIGM und BUCH in überwärmten Bereichen BOT-Eigens lokalisiert sind, während die vegetationsbestandenen Standorte SIED, SYDO und TRAP durch effektivere nächtliche Abkühlung der bodennahen Luftschicht zu den kühleren Arealen im Untersuchungsraum gehören (Abbildung 51).

Um die nächtliche Abkühlung innerhalb der Stadt räumlich zu betrachten, wurde eine Differenzendarstellung der Interpolation beider Messfahrten (Messfahrt 1 – Messfahrt 2) erstellt (Abbildung 52). Im Stadtzentrum im Südwesten Bottrops liegen aufgrund der dichten Bebauungsstruktur nur geringe Abkühlungsbeträge vor. Eine stärkere Abkühlung tritt im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes auf, da dort eine hohe Anzahl freier, offener und begrünter Flächen vorkommt, die aufgrund ihrer thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazitätsdichte) ein hohes Abkühlungspotential besitzen.





Abbildung 50: Temperaturanomalien der Messfahrten 1 (links) und 2 (rechts) vom 21.03.2012. Die Temperaturanomalien sind auf den räumlichen Temperaturmittelwert der jeweiligen Messfahrt bezogen.



Endbericht Teilprojekt 08 – Cluster 02



Abbildung 51: Darstellung der räumlichen Temperaturanomalien innerhalb des Untersuchungsgebietes Bottrop für die nächtliche Lufttemperaturmessfahrt am 21.03.2012 um 20 Uhr. Die Temperaturanomalien sind auf den räumlichen Temperaturmittelwert der Messfahrt bezogen.



Endbericht Teilprojekt 08 – Cluster 02



Abbildung 52: Räumliche Verteilung des nächtlichen Abkühlungsbetrages während der Temperaturmessfahrtnacht am 21.03.2012.



#### Variabilität der Luftfeuchtigkeit innerhalb des Untersuchungsgebietes

Zur Untersuchung der räumlichen Variabilität der Luftfeuchtigkeit im Untersuchungsgebiet BOT-Eigen wurden die nächtlichen Minima und Maxima des Dampfdruckes (e) ihrer Rangfolge entsprechend aufgetragen. Es zeigt sich, dass innerhalb der Nachtstunden der Dampfdruck in der Stadt höher ist als im Umland (Abbildung 53). Die höchste prozentuale Auftrittshäufigkeit von  $e_{max}$  liegt mit 59 % am Standort BUCH vor, die höchste prozentuale Auftrittshäufigkeit von  $e_{min}$  mit 52 % an RURA. Somit tritt innerhalb Bottrops eine sogenannte Feuchteinsel (analog zur Wärmeinsel) auf. Das Phänomen wurde in der Literatur bereits unter dem Namen Urban Moisture Excess (UME) eingeführt (z.B. Kuttler et al. 2007). Die Ursachen für die erhöhte nächtliche Wasserdampfkonzentration im Siedlungsbereich liegen u.a. in der städtischen Überwärmung begründet, die zu erhöhter Verdunstung führen kann. Zusätzlich kommt es im Umland während der Abend- und Nachtstunden zu effektiveren Abkühlung mit möglichem Tauabsatz, wodurch der Atmosphäre Wasserdampf entzogen werden kann.



Abbildung 53: Maxima des nächtlichen Dampfdrucks im Messzeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013. Die Daten sind sortiert dargestellt.





Abbildung 54: Minima des nächtlichen Dampfdrucks im Messzeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013. Die Daten sind sortiert dargestellt.



Abbildung 55: Mittlerer Tagesgang des Dampfdrucks im Zeitraum Mrz. 2012 bis Feb. 2013.

Im mittleren Tagesgang des Dampfdruckes ist während der Tagstunden ein positiver Zusammenhang zwischen höheren Dampfdrücken aufgrund erhöhter Verdunstung und dem



Begrünungsgrad der Freiflächenstandorte zu erkennen. Während der Nachstunden wird jedoch der zuvor beschriebene Effekt höherer städtischer Dampfdrücke deutlich.

### Fazit: Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessung

Die Untersuchungen der Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessungen über den Zeitraum eines Jahres haben gezeigt, dass versiegelte Freiflächen (EIGM und BUCH) sowohl tagsüber als auch während der Nachtstunden höhere Lufttemperaturen aufweisen als nahezu unversiegelte Freiflächenstandorte (RURA, SIED). Der versiegelte Standort EIGM ist durch Innenstadtstandortes die typischen Merkmale eines überwärmten (Wärmeinsel) gekennzeichnet. Die weniger versiegelten Freiflächenstandorte sind in der Lage während der Nacht deutlich rascher und effektiver abzukühlen als die stärker versiegelten Standorte. Diese Freiflächenstandorte können dann wichtige Klimafunktionen als lokale Kaltluftbildungsbereiche einnehmen. Die mikroklimatischen Charakteristika der der Freiflächenstandorte während der Nachtperiode wurden in räumlichen Temperaturverteilung der nächtlichen Messfahrt weitestgehend wiedergespiegelt.

Im nächtlichen Abkühlungsverhalten zeigen die mikroklimatischen Ausprägungen der einzelnen Freiflächen jedoch keinen einfachen linearen Zusammenhang mit dem Versiegelungsgrad der Standorte. Vielmehr wird deutlich, dass die mikroklimatischen Eigenschaften auch von anderen Standortbedingungen (Gebäudestruktur, Verminderung des Luftaustausches, Kaltluftleitbahnen u.a.) beeinflusst werden.

Die Messungen der Luftfeuchtigkeit geben das Bild des höheren Verdunstungspotentials unversiegelter Standorte wieder, d.h. an diesen Standorten treten höhere Dampfdrücke während der Tagstunden auf. In der Nacht zeigen sich Muster eines urbanen Feuchteüberschusses an den versiegelten Standorte, speziell in der Dampfdruckdifferenz zwischen EIGM und RURA.

### 4.3 Modellierung mit ENVI-met (Arbeitspaket 4)

Zur Untersuchung und Bewertung möglicher mikroklimatischer Zielkonflikte bei urbaner Biomassenutzung auf Freiflächenstandorten sollte für die mikroklimatische Modellierung ein Zeitraum verwendet werden, bei dem stadtklimatische Effekte typischerweise am stärksten ausgeprägt sind. Vor diesem Hintergrund wurden die für den Messzeitraum klassifizierten Strahlungstage (vgl. Kap. 4.2.1) genauer untersucht. Die Wahl eines Tages für die Modellbetrachtung fiel auf den 26.07.2012, ein Tag der durch hohen Strahlungsgenuss und unbewölkten Himmel charakterisiert war (siehe Abbildung 56). Die ENVI-met Simulation wurde für einen Zeitraum von 48 h gerechnet, um dem Modell eine gewisse "Einlaufzeit" einzuräumen. Die Modellergebnisse wurden somit für die Zeitperiode vom 25.07.2012 7:00 Uhr bis zum 27.07.2012 7:00 Uhr berechnet.

Endbericht Teilprojekt 08 - Cluster 02





Abbildung 56: Einfallende kurzwellige Strahlung (RURA) am 26.07.2012.

#### 4.3.1 Validierung der Lufttemperatur

Die ersten Modellläufe am Standort SYDO wurden zunächst zur Validierung der Simulationsergebnisse herangezogen, um zu überprüfen, wie gut die Übereinstimmung zwischen Messdaten und Modellergebnissen ist. In der ersten Simulation ohne Nutzung der "forcing"-Option musste festgestellt werden, dass die für einen entsprechenden Sommer- und Strahlungstag beobachtete Temperaturamplitude der Lufttemperatur vom Modell nicht wiedergegeben werden konnte. Aus diesem Grund wurde die Simulation mit der "forcing"-Option für Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit wiederholt (siehe Abbildung 57).



Abbildung 57: Vergleich der Messwerte und Modellwerte der Lufttemperatur am 26.07.2012 am Standort SYDO.



Es zeigte sich, dass die am Standort SYDO gemessen Werte der Lufttemperatur durch das Modell in guter Übereinstimmung wiedergegeben werden können. Nachts tritt beispielsweise eine Abweichungen von maximal 2,5 K zwischen Messung und Modell auf. Für die folgenden Modellsimulationen wurde ENVI-met deshalb ausschließlich in Kombination mit der "forcing"-Option verwendet.

## 4.3.2 Ergebnisse der mikroklimatischen Modellierung mit ENVI-met

Zur Analyse und Bewertung mikroklimatischer Effekte und Zielkonflikte urbaner Biomassenutzung auf den Freiflächenstandorten wurden verschiedene mikroklimatisch relevante Ergebnisgrößen aus ENVI-met genutzt, unter anderem die Lufttemperatur  $(T_a)$  und Luftfeuchtigkeit (spezifische Feuchte, SH) sowie Änderungen der Windgeschwindigkeit im Modellgebiet bezogen auf den Einströmrand des Modells (Wind speed change WSC). Zusätzlich wurde als human-bioklimatischer Faktor der UTCI verwendet (vgl. Kap. 2.1.3). ENVI-met liefert dazu für jede Stunde Ergebnisdateien mit Daten für jede Gitterzelle des Modellgebietes. Dadurch standen Modellparameter mit einer räumlichen Auflösung von 2 x 2 m für jedes Simulationsszenario zur Verfügung. Um die modellierungsbedingten Unsicherheiten am Einströmrand des Modellgebietes auszuschließen, wurde zur Ergebnisbewertung lediglich der mittlere Bereich des Simulationsszenarios betrachtet (jeweils 200 m in Ost-West- und Nord-Süd-Ausrichtung). Zur Auswertung mikroklimatischer Effekte unterschiedlicher Biomassestrategien wurden die Modellergebnisse in einer Höhe von 1,80 m ü. Gr. für mikroklimatisch relevante Zeitpunkte des Tagesganges analysiert, nämlich 14 Uhr für den Zeitpunkt der maximalen mittäglichen Erwärmung sowie 5 Uhr für das Ende der nächtlichen Ausstrahlungsperiode. Die Höhe von 1,80 m ü. Gr. wurde als humanbioklimatisch relevante Betrachtungsebene betrachtet bzw. als Höhe, die die Eigenschaften der bodennahen Luftmasse bestmöglich charakterisiert. Die mikroklimatische Modellierung wurde an drei Standorten (EIGM, SCHA, SYDO) für jeweils vier Szenarien (QUO, KBA, HBP, HBA) gerechnet (vgl. Kap. 3.3.1). Für jedes Szenario stehen mehrere mikroklimatische Ergebnisgrößen zur Verfügung, die im Folgenden zunächst nur exemplarisch vorgestellt werden können.

### Räumliche Auswertung der mikroklimatischen Ausprägungen urbaner Biomassestrategien

Die räumliche Darstellung der Lufttemperaturverteilung in den verschiedenen Biomassestrategien am Standort SYDO zeigt deutliche Unterschiede in der kleinräumigen Ausprägung zwischen den Szenarien (Abbildung 58). Die Szenarien mit holziger Biomassenutzung (HBP, HBA) sind während des Tages (14 Uhr) durch wesentlich niedrigere Temperaturen als das Ausgangsszenario (QUO) gekennzeichnet. Für den zentralen Bereich des Modellgebietes werden im Vergleich zum Status quo um bis zu 0,5 K geringere Lufttemperaturen berechnet. Hier spielt neben mittägliche dem Effekt der Verdunstungskühlung vor allem die zusätzliche Beschattung durch den Baumbestand eine wichtige Rolle. Bei der Modellierung mit krautiger Biomasse (KBA) sind hingegen nur geringfügige Änderungen der Lufttemperatur zu erkennen. Die mikroklimatischen Auswirkungen der Biomassestrategien auf die nächtliche Lufttemperaturverteilung sind



relativ gering, es zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien.

Relativ deutliche Änderungen der räumlichen Verteilung ergeben sich für das Feuchtemaß (spezifische Feuchte) am Beispiel des Standortes SCHA. Durch die Biomassenutzung ändert sich der Anteil der Biomasse und damit der potentiell verdunstungsaktiven Oberfläche deutlich. In den Szenarien äußert sich das in einer Erhöhung der spezifischen Feuchte von rund 10,4 g kg<sup>-1</sup> (QUO) auf bis zu 10,9 g kg<sup>-1</sup> (KBA) bzw. über 11,5 g kg<sup>-1</sup> im Szenario HBP (Abbildung 60). Die geringeren Werte der spezifischen Feuchte für das Szenario HBA zeigen, dass v.a. die Modellierung der relativen Feuchte sensitiv auf die Wahl des Modellhöhenintervalls reagiert und stark von der in der jeweiligen Betrachtungshöhe verfügbaren Biomassedichte (verdunstungsaktive Oberfläche) abhängt.

Bei der Nutzung urbaner Biomasse kann sich für die betrachteten Szenarien eine Verbesserung des Durchlüftungsverhaltens ergeben, wenn sich im Vergleich zum Status quo Änderungen in der Oberflächenrauigkeit einstellen. Am Beispiel des Standortes EIGM wird deutlich, dass im Ausgangszustand (QUO) Minderungen der Windgeschwindigkeit auf einer Fläche im nordwestlichen Bereich des Modellgebietes auftreten (Parkplatzfläche mit geschlossenem Baumbestand). Durch Umwidmung der Fläche mit niedrigstehender Biomasse (KBA) oder einzelnstehenden Bäumen (HBP) ergibt sich an dieser Stelle eine weitere Verminderung des Durchlüftungspotentials, welches ungefähr der Hälfte der Ausgangswindgeschwindigkeit entspricht. Die absoluten Windgeschwindigkeiten liegen in diesem Bereich des Modellgebietes bei rund 0,8 m s<sup>-1</sup> im Status quo und bei rund 0,5 m s<sup>-1</sup> im Szenario KBA.





Abbildung 58: Darstellung der modellierten Lufttemperaturverteilung in einer Höhe von 1,80 m ü. Gr. in den verschiedenen Simulationsszenarien für den Standort SYDO (26.07.2012, 14:00 Uhr).





Abbildung 59: Darstellung der modellierten Lufttemperaturverteilung in einer Höhe von 1,80 m ü. Gr. in den verschiedenen Simulationsszenarien für den Standort SYDO (26.07.2012, 5:00 Uhr).





Abbildung 60: Darstellung der modellierten räumlichen Verteilung der spezifischen Feuchte in einer Höhe von 1,80m ü. Gr. in den verschiedenen Simulationsszenarien für den Standort SCHA (26.07.2012, 14:00 Uhr)



Endbericht Teilprojekt 08 - Cluster 02



Abbildung 61: Darstellung des modellierten Wind Speed Change (WSC) in einer Höhe von 1,80 m ü. Gr. in den verschiedenen Simulationsszenarien für den Standort EIGM (26.07.2012, 14:00 Uhr). Die Windgeschwindigkeit am Einströmrand des Modells wird als Basiswert auf 100 % skaliert. Geringere Werte im Modellgebiet symbolisieren demnach eine Abschwächung der Windgeschwindigkeit.



Um eine zusammengefasste und integrierte Auswertung der Modellergebnisse zu erreichen, wurden für ausgewählte, in die mikroklimatische Bewertung einfließende Ergebnisgrößen, Darstellungen in Form vergleichender Häufigkeitsverteilungen vorgenommen. Die Auswertung der Häufigkeitsverteilung umfasst alle Gitterzellen des Modellgebietes und gibt Verschiebungen in der Auftrittshäufigkeit verschiedener Ausprägungen der mikroklimatischen Parameter wieder (vgl. Middel et al. 2014).

Lufttemperatur: Die Verteilung der Lufttemperatur in den Simulationsgebieten zeigt ein gruppiertes Auftrittsmuster. Die Standorte unterscheiden sich bereits im Ausgangszustand sehr deutlich voneinander, da bspw. an EIGM aufgrund des Versiegelungsgrades höhere während Strahlungstagen Lufttemperaturen auftreten, als SYDO. In den an Biomassestrategien zeigen sich z.T. deutliche Verschiebungen der Häufigkeitsverteilung entlang der Temperaturklassen. Das Szenario KBA zeigt nur geringe positive Veränderung, d.h. niedrigere Lufttemperaturen, im Vergleich zum Ausgangszustand, im Fall der Sydowstraße sogar eine negative Veränderung der Situation. Eine Verbesserung der mikroklimatischen Situation mit Bezug auf die lokale Lufttemperatur wird in beiden Szenarien mit holziger Biomassenutzung erreicht. Erneut spielt die Erhöhung der verdunstungsaktiven Oberfläche sowie Beschattungseffekte eine wesentliche Rolle.



Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur in 0,25 K Klassen für die unterschiedlichen Biomassestrategien an den Modellstandorten. Die Angabe der Häufigkeit bezieht sich auf das Auftreten der entsprechenden Temperaturwerte in den Gitterzellen des Modellgebietes.

UTCI: Beim human-biometeorologischen Parameter UTCI ist eine deutliche Zweiteilung der Modellergebnisse ersichtlich (Abbildung 63). Da der UTCI stark von der Ausprägung der Oberflächentemperatur abhängt, treten vermehrt UTCI-Werte von  $> 40^{\circ}$ C auf, welche vornehmlich Straßen und versiegelte Oberflächen repräsentieren. Die niedrigeren Werte kommen hauptsächlich in vegetationsbestandenen Bereiche vor.

Die Szenarien mit holziger Biomasse weisen deutlich niedrigere Werte für den UTCI auf, als der Status quo. Somit kann diesen Szenarien eine positive Veränderung der humanbiometeorologischen Situation bescheinigt werden. Im Gegensatz dazu kann im Szenario KBA nicht prinzipiell von einer Verbesserung der mikroklimatischen Situation ausgegangen



werden. Vor allem im Modellgebiet SYDO treten im Vergleich zu QUO höhere UTCI-Werte auf. Ein wesentlicher Grund hierfür liegt in der höheren Anzahl der im Status quo vorhandenen Bäume begründet, die nach Flächenumwidmung in KBA nicht mehr vorliegen. Das verringert v.a. das Beschattungspotential und kann in der Erhöhung des UTCI in KBA resultieren.



Abbildung 63: Häufigkeitsverteilung des UTCI in 0,5 °C Klassen für die unterschiedlichen Biomassestrategien an den Modellstandorten. Die Angabe der Häufigkeit bezieht sich auf das Auftreten der entsprechenden Temperaturwerte in den Gitterzellen des Modellgebietes.

Spezifische Feuchte:. In der Darstellung der räumlichen Verteilung der spezifischen Luftfeuchte ist zu erkennen, dass in den Modellszenarien mit krautiger Biomasse bzw. dem Ausgangsszenario die höchsten Häufigkeiten von Klassen geringer spezifischer Feuchte auftreten (Abbildung 64). Bei holziger Biomasse, vor allem HBP, ist eine Häufung von Klassen höherer Luftfeuchtigkeit evident. Die Ursache liegt erneut in der höheren Verfügbarkeit von Biomasse als transpirationsaktive Oberfläche (Abbildung 60). Im Fall des Modellgebietes SYDO führt das Szenario KBA im Vergleich zum QUO sogar zu einer geringen Verschlechterung. Da für das Szenario KBA Bäume aus dem Ursprungszustand (QUO) "entfernt" wurden, sinkt der Biomasseanateil und damit das Evapotranspirationspotential. Somit zeigt sich nur ein geringer positiver bzw. teilweise negativer Effekt bei dem Simulationsszenario KBA und eine deutliche Verbesserung bei HBA und HBP.



Abbildung 64: Häufigkeitsverteilung der spezifischen Feuchte in 0,1 g kg<sup>-1</sup> Klassen für die unterschiedlichen Biomassestrategien an den Modellstandorten. Die Angabe der Häufigkeit bezieht



sich auf das Auftreten der entsprechenden Luftfeuchtigkeitswerte in den Gitterzellen des Modellgebietes.

Windgeschwindigkeitsänderungen (WSC): Der Wind Speed Change (WSC) ist ein Maß für die Veränderung der Windgeschwindigkeit gegenüber der Einströmgeschwindigkeit am Modellrand (Abbildung 61). Je kleiner der Wert des WSC ist, desto stärker ist der Luftaustausch innerhalb des Modellgebietes unterbunden. Geringere Luftaustauschraten können beispielsweise zu Hitzestau bzw. thermischen Belastungssituationen führen. Beim WSC sind vornehmlich die Szenarien mit holziger Biomasse (HBP, HBA) durch Verringerungen der Ventilationseigenschaften (Verschiebung der Häufigkeiten zu kleineren WSC-Klassen) der Modellgebiete charakterisiert. An dieser Stelle macht sich die erhöhte Rauigkeit durch Biomasse bzw. Rauigkeitsobjekte (Bäume) bemerkbar.



Abbildung 65: Häufigkeitsverteilung des WSC in 5 % Klassen für die unterschiedlichen Biomassestrategien an den Modellstandorten. Die Angabe der Häufigkeit bezieht sich auf das Auftreten der entsprechenden Windgeschwindigkeitsänderungswerte in den Gitterzellen des Modellgebietes.

### 4.4 Bewertung mikroklimatischer Zielkonflikte (Arbeitspaket 5)

Zur zusammenfassenden Bewertung möglicher mikroklimatischer Zielkonflikte urbaner Biomassenutzung auf städtischen Freiflächenstandorten wird im Folgenden ein Bewertungsschema auf Basis der Ergebnisse der mikroklimatischen Modellierung vorgestellt. Als Bewertungsparameter wurden klimatische Parameter herangezogen, die Auskunft über die Klimafunktionen der Freiflächenstandorte vermitteln und mögliche mikroklimatische Zielkonflikte bei der Flächenumwidmung aufzeigen können. Die folgenden Parameter wurden zur Bewertung genutzt: Lufttemperatur, spez. Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeitsänderung, humanbiometeorologischer Bewertungsindex UTCI sowie die nächtliche Abkühlung (Lufttemperatur) der Standorte. Damit sind wichtige thermische und dynamische Parameter zur Einschätzung der Klimafunktion von Freiflächenstandorten abgedeckt. Zur Bewertung wurden die Modellergebnisse in 1,80 m ü. Gr. für mikroklimatisch relevante Zeitpunkte des Tagesganges ausgewählt (14 Uhr, 5 Uhr).Um klimatische Einflüsse der von Gebäuden bestandenen Gitterzellen auf die Bewertungsergebnisse auszuschließen, wurden Gebäudegitterzellen innerhalb der Modellgebiete nicht in die Bewertung einbezogen.



Zur Betrachtung der Biomassestrategien in den einzelnen Modellgebieten (SYDO, SCHA und EIGM) wurden Bewertungsparameter jedes Szenarios mit dem jeweiligen Status quo (QUO) verglichen. Die Bewertung sollte sowohl eine räumlich aufgelöste Betrachtungsebene per Perzentildefinition enthalten (Perzentil<sub>Vergleich</sub>), als auch mittlere Zustände vergleichen. Dazu wurde bei der räumlichen Verteilung zunächst das 90 %-Perzentil eines spezifischen Bewertungsparameters des QUO berechnet. Anschließend konnte für jedes Biomasseszenario (KBA, HBP, HBA) des entsprechenden Modellgebietes geprüft werden, wie groß die Häufigkeit der Gitterzellen über dem 90 %-Perzentil im Vergleich zu QUO ausfällt. Dieser Wert wird prozentual ausgedrückt. Für eine räumlich mittlere Auswertung (Mittelwert<sub>Vergleich</sub>) konnte für jeden Bewertungsparameter und jedes Modellszenario ein räumlicher Mittelwert für das gesamte Modellgebiet berechnet werden. Auch hier wurden die Biomassestrategien mit dem QUO verglichen. Als letzter Wert wurde zusätzlich das nächtliche (absolute) Lufttemperaturminimum für jedes Szenario ermittelt und mit dem des Status quo in Beziehung gesetzt. Die prozentualen Änderungen aller Parameter zum Status quo können in Tabelle 11 eingesehen werden. Mit der Ergebnismatrix kann bewertet werden, ob in den Modellgebieten durch Flächenumwidmung und urbane Biomassenutzung nachteilige oder positive Veränderungen der mikroklimatischen Ausprägungen resultieren.

Um die Bewertung mikroklimatischer Zielkonflikte als Entscheidungshilfe für einen breiten Kreis von Bearbeitern stadt- und landschaftsplanerischer Fragestellungen verfügbar zu machen, sollte eine möglichst nachvollziehbare Bewertungsmatrix entwickelt werden. Zur Bewertung der Änderung einzelner mikroklimatischer Parameter wurde deshalb ein dreiteiliges Farbschema definiert, dass nachteilige Veränderungen der mikroklimatischen Situation als positiv, moderat positiv oder negativ anzeigt (Abbildung 66). Anschließend lässt sich diese Bewertung in ein zusammenfassendes Kreisdiagramm für alle Modellszenarien kondensieren (Tabelle 11).



Abbildung 66: Klassifikation der mikroklimatischen Bewertungsmatrix. Die Farbgebung signalisiert positive oder negative Veränderungen der mikroklimatischen Größen zwischen einzelnen Biomassestrategien. Die prozentualen Veränderungen ergeben sich aus dem Vergleich des QUO mit dem jeweiligen Szenario.

Die Ergebnismatrix der mikroklimatischen Auswirkungen urbaner Biomassestrategien zeigt vergleichend für die Standorte SYDO, EIGM und SCHA, dass die Flächenumwidmungen in allen Szenarien mit positiven sowie mit negativen Veränderungen einzelner Mikroklimaparameter im Vergleich zum Status quo einhergehen. In den einzelnen Szenarien bewegen sich die Änderungen der mikroklimatischen Größen dabei jeweils in beide Richtungen (positiv, negativ), so dass sich typische Zielkonfliktsituationen ergeben.



Es ist herauszustellen, dass die vorliegende Bewertung ausschließlich auf der Analyse mikroklimatischer Aspekte beruht. Die "Wertigkeit" der implementierten Biomassestrategie hinsichtlich energetischer Ertragspotentiale oder ästhetischer Wirkung bleibt unberücksichtigt, da es keine Arbeitsaufgabe dieses Teilprojektes darstellte, sondern auf lokal- und mikroklimatische Aspekte fokussierte. Angaben zu den Ertragspotentialen urbaner Biomasse finden sich u.a. bei Sieber (2011), Schmidt und Sieber (2013) sowie in den Ergebnissen des Teilprojektes 01 (KulaRuhr).

Aus der Ergebnismatrix lässt sich ableiten, dass im Modellgebiet SYDO das Szenario KBA von einer negativen Veränderung des aktuellen Zustandes (QUO), vor allem für die Parameter UTCI, Lufttemperatur und spezifische Feuchte, geprägt ist (Tabelle 11). Die Ursache ist in der ursprünglich höheren Anzahl von Bäumen im Status quo Szenario begründet. Die krautige Biomasse ist demnach durch ein geringeres Verschattungspotential gekennzeichnet. Zudem berechnet das Modell ein geringeres Verdunstungspotential aufgrund niedriger Blättflächendichten im Szenario KBA. Auf der anderen Seite führt der verminderte Baumbesatz zu geringerer Oberflächenrauigkeit und besserem Luftaustausch, was sich in der Änderung der WSC-Verteilung positiv bemerkbar macht.

Die Szenarien HBP und HBA zeigen tendenziell eine positive Änderung der mikroklimatischen Parameter gegenüber QUO. Der höhere Baumbesatz führt bei diesen Szenarien zu stärkerer Beschattung und geringeren Luft- und Strahlungstemperaturen. Letztere stellen die dominierende Einflussgröße für thermische Belastungsgrößen des humanbiometeorologischen Wirkungskomplexes dar (Lee et al., 2014).

Die spezifische Feuchte als ein Stellvertretermaß für das Verdunstungspotential ist in beiden Szenarien aufgrund der höheren Blattflächendichte im Vergleich zu QUO sehr deutlich erhöht. Da die Blattflächendichte im Szenario HBA geringer ist als im Szenario HBP, liegt nur eine moderate Verbesserung der Situation der spezifischen Feuchteverteilung vor. Der Wind Speed Change ist in beiden holzigen Biomassestrategien durch eine negative Veränderung im Vergleich zu QUO charakterisiert. Hier spielt die höhere Oberflächenrauigkeit eine wichtige Rolle. Der Wert des nächtlichen Temperaturminimums liegt in allen Szenarien nur sehr geringfügig über dem Vergleichswert in QUO. Die mögliche Erhöhung der langwelligen Gegenstrahlung durch das Blätterdach (v.a. der Bäume in den Szenarien HBA und HBP) wirkt sich im Modell nicht deutlich negativ auf das Lokalklima aus.



		Ver	gleich zu Sydo (	Juo	Ver	gleich zu Eigm C	luo	Ver	gleich zu Scha	Juo
	Wert	KBA	НВР	HBA	KBA	НВР	HBA	KBA	НВР	HBA
43	Anteil Fläche über 90%-Perzentil der Ta des Status Quo	21,8%	%6'09-	-100,0%	-69,9%	-66,2%	-74,3%	-57,6%	-48,9%	-62,3%
i <b>l</b> Vergleic	Anteil Fläche über 90%-Perzentil des UTCI des Status Quo	142,6%	-50,2%	36,0%	-25,8%	-4,1%	-46,2%	-12,2%	-17,4%	-19,3%
tnszne	Anteil Fläche über 90%-Perzentil der SH des Status Quo	-100,0%	865,7%	287,5%	612,8%	815,2%	505,4%	477,3%	597,5%	418,2%
d	Anteil Fläche über 90%-Perzentil der WSC des Status Quo	173,3%	-83,5%	-81,6%	-86,3%	-79,1%	-91,3%	-51,9%	-58,0%	-61,8%
leich	Δ T <sub>mittel</sub>	0,4%	-1,1%	-1,6%	-0,8%	-1,3%	-2,0%	-0,8%	-1,3%	-1,6%
<sub>gn∍V</sub> 1:	Δ UTCI <sub>mittel</sub>	4,4%	-10,4%	-4,8%	-4,9%	-7,4%	-7,8%	4,6%	<i>%L'L</i> -	-7,0%
əwlət	Δ SH <sub>mittel</sub>	-1,0%	5,5%	0,6%	2,4%	5,4%	1,4%	1,6%	3,5%	1,0%
μŅ	Δ WSC <sub>mittel</sub>	9,5%	-15,9%	-15,4%	-22,1%	-16,2%	-22,6%	-15,6%	-20,1%	-19,3%
	abs. nächtl. Minimum von Ta	0,4%	1,9%	1,1%	-4,1%	-2,6%	0,3%	0,1%	0,4%	0,2%
		→	→	→	→	→	→	→	→	→
			0	8	6	6	2	6	6	6

Tabelle11:MikroklimatischeBewertungsmatrixderurbanenBiomassestrategienandenModellstandortenSYDO,EIGM undSCHA.



Der Untersuchungsstandort EIGM zeigte im Status quo aufgrund seines hohen Versiegelungsgrades das am stärksten beeinflusste Mikroklima (z.B. ausgeprägte nächtliche Wärmeinsel). Von daher führt die Flächenumwidmung in Richtung höheren Besatzes der Fläche mit Biomasse, in allen Biomasseszenarien gegenüber der Ausgangssituation, zu einer Verbesserung der mikroklimatischen Situation. Auch an diesem Standort wird deutlich, dass die Strategien mit holziger Biomasse (HBP, HBA) stärkere Veränderungen der mikroklimatischen Situation bewirken, als das Szenario krautige Biomasse (KBA). Die Ursachen liegen ebenfalls im vergrößerten Baumbesatz begründet, der in Verschattung und erhöhter Verdunstung resultiert.

Im Modellgebiet SCHA führen alle Biomassestrategien nur zu einer moderaten Veränderung der Gesamtsituation. Aufgrund der geschlossenen Gebäudestruktur stellen sich die Änderungen des Mikroklimas auf der Freifläche nicht im gesamten Modellgebiet ein, sondern hauptsächlich auf dem durch Flächenumwidmung charakterisierten Freiflächenanteil (Abbildung 60). Aufgrund der bereits im Ausgangszustand um den Freiflächenbereich geschlossenen Bebauungsstruktur an SCHA, führen die baumbestandenen Szenarien HBA und HBP zu einer geringeren relativen Änderung der Windgeschwindigkeit (WSC) im Vergleich zu den übrigen Modellgebieten.

Der letztgenannte Aspekt macht deutlich, dass die Bewertung mikroklimatischer Zielkonflikte an den Untersuchungsstandorten immer vor dem Hintergrund der spezifischen Ausgangssituation (QUO) betrachtet werden muss. Nicht an jedem Standort verändern sich die mikroklimatischen Auswirkungen der Flächenumwidmung bzw. der urbanen Biomassenutzung in dieselbe Richtung. Insgesamt zeigt sich aber auch, dass eine vergleichbare Differenzierung mikroklimatischer Änderungen zwischen den einzelnen Szenarien besteht. Kalkuliert man eine Rangfolge der Änderung mikroklimatischer Größen zwischen den einzelnen Szenarien an den Modellgebietsstandorten (ohne Gewichtung einzelner mikroklimatischer Größen), indem man die positiven Veränderung einer Größe mit dem Wert 1, die moderaten Änderungen mit dem Wert 0,5 sowie die mikroklimatischen Einschränkungen mit dem Wert -1 belegt, ergibt sich die in Abbildung 67 dargestellte Übersicht.

An allen Standorten gehen die baumbestandenen Szenarien mit dem in der Summe positivsten Effekt auf die mikroklimatische Situation einher. Wie bereits angedeutet, stellen die zunehmende Beschattung und der erhöhte Anteil verdunstunstungsaktiver Biomasse die Hauptgründe dar. Grimmond et al. (2010, 2011) konnten in ihrer Vergleichsstudie unterschiedlicher urbaner Energiebilanzparametrisierungen ebenfalls dokumentieren, dass v.a. die Beschreibung des verdunstungsaktiven Vegetationsanteils und die damit einhergehende Verdunstung (latente Wärmeflussdichte), eine sensitive und wichtige Größe in der städtischen Modellierung der Energiebilanz darstellt.

Die Unterschiede zwischen den Szenarien sind aber v.a. an EIGM und SCHA als gering zu bezeichnen. Lediglich am Standort SYDO ist eine stärkere Differenzierung zwischen den einzelnen Szenarien zu erkennen.





Abbildung 67: Vergleich der Änderung mikroklimatischer Größen zwischen den einzelnen Szenarien an den Modellgebietsstandorten. Die Punktvergabe für die einzelnen Szenarien ist im Text spezifiziert.

Die lokalen klimatischen Einschränkungen urbaner Biomassenutzung sind an den Standorten recht ausgewogen. Die baumbestandenen Szenarien führen übereinstimmend zu einer Verminderung des Durchlüftungspotentials sowie zu geringerer nächtlicher Abkühlung aufgrund erhöhter langwelliger Gegenstrahlung durch das Blätterdach (während der Sommermonate). Die negativen mikroklimatischen Änderungen sind zwischen den Biomassestrategien annähernd gleich verteilt, d.h. an den Standorten SYDO und SCHA zeigen sich keine, oder nur geringfügige Unterschiede. Lediglich der Standort SYDO ist von deutlicheren Einschränkungen im Szenario KBA gekennzeichnet, die v.a. mit dem in Kap. 4.3.2 beschriebenen Wechsel von QUO auf KBA verminderten Besatz verdunstungsaktiver Biomasse zu tun haben

Zur vollständigen Betrachtung und Bewertung von Zielkonflikten urbaner Biomassestrategien wären die mikroklimatischen Auswirkungen mit Aspekten des Energieertrages der Biomasse, den ästhetischen Auswirkungen und möglichen logistischen (Lärm und Emissionen durch Transport) und infrastrukturellen Effekten zu verschneiden. Zu den letztgenannten Sachverhalten wurde in KulaRuhr u.a. in den Teilprojekten 1 und 5 gearbeitet. Eine zusammenführende Bewertung der Ergebnisse war in dieser Phase des Projektes jedoch nicht vorgesehen.



# 5 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises werden für das Gesamtkonsortium der Universität Duisburg-Essen zusammengefasst.

# 6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im vorliegenden TP08 wurden zwei inhaltliche Schwerpunkte verfolgt:

- Die experimentelle Bestimmung der Klimafunktion von Freiflächen durch Messungen der Energiebilanz sowie (mikro)klimatischer Parameter, sowie die
- modellhafte Bestimmung der mikroklimatischen Auswirkungen urbaner Biomassestrategien.

Die experimentelle Bestimmung der Klimafunktionen mittels Messungen war nötig, um die lokalklimatischen Eigenschaften unterschiedlicher Freiflächenstandorte, zunächst im Status quo, zu quantifizieren. Der experimentelle Aufwand für derartige Messungen ist relativ hoch und kann, aufgrund beschränkter Ressourcen, nur an ausgewählten (repräsentativen) Standorten erfolgen. Dieser Aufwand ist zur Bestandsaufnahme der klimatischen Situation dennoch unabdingbar, um im weiteren Untersuchungsschritt die potentiellen klimatischen Auswirkungen der Biomassenutzung bewerten zu können. Die Messdaten spielen zudem eine wichtige Rolle in der Validierung von Modellergebnissen, wenngleich das bei mikroklimatischer Modellierung aufgrund der kleinräumigen horizontalen Auflösung der Modellergebnisse (hier 2 x 2 m) nur näherungsweise möglich ist.

Der besondere Ansatz der vorliegenden Arbeit besteht in der Betrachtung einer spezifischen Flächenumwidmung, nämlich der Nutzung urbaner Biomasse. In der Literatur existieren unterschiedliche Studien zu lokalklimatischen Auswirkungen von allgemeinen Flächenumwidmungen (Entsiegelung versiegelter Flächen, Erhöhung des städtischen Grünflächenanteils). Die spezifische Untersuchung verschiedener Biomassestrategien, die wie in TP08 vorgenommen - in Kooperation mit Landschaftsplanern aus TP1.1 als realistische Planungsszenarios abgestimmt wurden, ist ein neuartiger Ansatz zur Bewertung mikroklimatischer Zielkonflikte. Im Rahmen einer vollständigen Betrachtung möglicher Zielkonflikte urbaner Biomassenutzung wäre es erstrebenswert, die mikroklimatischen Aspekte um weitere Betrachtungsebenen zu erweitern, wie

- logistische und infrastrukturelle Rahmenbedingungen (z.B. Abtransport der Biomasse, Auswirkungen auf Luftqualität),
- ertragsspezifische Aspekte (welche mikroklimatischen Einschränkungen sind unter welchen möglichen Ertragssteigerungen hinnehmbar?),
- ästhetische Aspekte der Biomasse,
- Biodiversitätsaspekte, sowie



• weitere Nutzungskonflikte.

Zukünftig wäre eine vertiefte Betrachtung der Variabilität mikroklimatischer Modellergebnisse (bspw. zeitlich im Tagesgang, sowie räumlich an einer größeren Anzahl von Standorten) wünschenswert. Die vorliegende Modellarchitektur des Mikroklimamodells ENVI-met hat aufgrund der relativ langen Rechenzeiten gewisse Einschränkungen (vgl. Kap. 3.3), so dass in TP08 eine repräsentative Auswahl von Standorten adressiert werden musste.

## 7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwendbarkeit der Ergebnisse

In TP08 wurden Klimafunktionen verschiedener Freiflächenstandorte im Untersuchungsraum BOT-Eigen untersucht und quantifiziert. Anhand der experimentellen Untersuchungen konnten belastbare Aussagen zum Beitrag der Verdunstungskühlung zur Verminderung der Lufttemperatur während des Tages sowie zur Größenordnung der nächtlichen Abkühlung der verschiedenen Freiflächenstandorte im Nachtverlauf getroffen werden. Zudem wurde das Potential der Standorte als Senke für atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen analysiert. Die Wirkmechanismen und möglichen Einschränkungen (s. Bodenwasserhaushalt) der untersuchten Klimafunktionen der Standorte, sind prinzipiell auf andere Untersuchungsräume übertragbar. Eine steckbriefartige Zusammenfassung der Klimafunktionen städtischer Freiflächenstandorte auf Basis der veröffentlichten wissenschaftlichen Literatur gibt hierzu weitere Aufschlüsse (vgl. Kap. 2.1.4).

Die mikroklimatische Modellierung urbaner Biomassestrategie erlaubt eine kleinräumige Abschätzung der Änderungen mikroklimatischer Größen durch Flächenumwidmung an den Untersuchungsstandorten. Diese Ergebnisse lassen sich nicht unmittelbar aus Messungen klimatischer Größen ableiten. Deshalb ist die mikroklimatische Modellierung ein wichtiges Werkzeug in der Bewertung lokalklimatischer Effekte durch urbane Biomassenutzung. Die Implementierung der Biomassestrategie im Modell muss relativ abstrakt erfolgen, da momentan kein spezifischer Ansatz besteht, verschiedene Biomassearten explizit in einem Mikroklimamodell aufzulösen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Der Vorteil des hier gewählten Ansatzes besteht jedoch in einer kleinräumig expliziten Auflösung flächenhafter Änderungen mikroklimatischer Größen, von denen wesentliche Größen in die Bewertungsmatrix aufgenommen wurden. Die Bewertungsmatrix ermöglicht Planern eine exemplarische Abschätzung der Auswirkungen einzelner Biomassestrategien, die mit anderen Aspekten, wie einer potentiellen Biogasertragsanalyse oder logistischen Aspekten, abgewogen werden können.

Insgesamt zeigt sich, dass die mikroklimatische Bewertung eine Abwägungshilfe bieten kann, Planungsprozesse zu Strategien urbaner Biomassenutzung - ohne weitgehende Einschränkungen der Klimafunktionen einzelner Freiflächenstandorte - anzudenken. Aufgrund der expliziten räumlichen Auflösung der Modellierung an den einzelnen Standorten sind die Ergebnisse prinzipiell nicht ohne weiteres übertragbar, einzelne Muster mikroklimatischer Änderungen der Biomasseszenarien aber durchaus ableitbar.


## 8 Bekannt gewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit von KuLaRuhr sind keine Fortschritte oder Arbeiten bei anderen Stellen bekannt geworden, bei denen es sich um die spezifische Betrachtung mikroklimatischer Auswirkungen urbaner Biomassestrategien gehandelt hätte. In der vergangenen Jahren sind verschiedenen Studien zu klimatischen Auswirkungen unterschiedlicher (städtischer) Flächenumwidmungsstrategien veröffentlich worden, bei denen beispielsweise die Erhöhung des städtischen Grünflächenanteils (auch Gründächer und Fassadenbegrünung), die Effekte von Flächenentsiegelung oder die lokale Klimawirkung von Freiflächen fokussiert wurde. Neueres Wissen zum Einfluss verschiedener städtischer Begrünungskonzepte (Dach, Fassade) wurde sehr umfassend von Pfoser et al. (2014) zusammengetragen. Urbane Biomassestrategien spielen aber auch in dieser Veröffentlichung keine Rolle.

Der Stand der Forschung zu den Aspekten lokaler Klimaanpassung durch städtische Freiflächen wird u.a. in den Kapiteln 2.4.1, 4.3.2 sowie 4.4 der eingehenden Darstellung (Teil II) behandelt.

## 9 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die In TP08 erzielten Ergebnisse wurden im Projektverlauf regelmäßig auf Tagungen, im Rahmen der Internetpräsenz von KuLaRuhr sowie in Beiträgen für Fachzeitschriften vorgestellt:

Posterpräsentationen:

- Posterpräsentation TP 8. Klimatisches Potential von Freiflächen in Siedlungen Bewertung der Energiebilanz von Freiflächen, 1. KuLaRuhr Werkstatt "Nachhaltigkeit auf dem Prüfstand", Wissenschaftspark Gelsenkirchen, Gelsenkirchen, 01.02.2013
- Martin, S., Hinz (Schmidt), M., Weber, S. 2014. Comparison of the energy balance of a suburban and rural site to study the microclimatic properties of urban open spaces, 14th European Meteorological Society Annual Meeting, 10th European Conference on Applied Climatology, 06.-10.10.2014, Prag
- Martin, S., Hinz (Schmidt), M., Weber, S. 2014. Comparison of the energy balance of a suburban and rural site to study the microclimatic properties of urban open spaces, 7th Japanese German Meeting on Urban Climatology, 06.-08.10.2014, Hannover

Vorträge auf Konferenzen:

Hinz (Schmidt), M., Weber, S. 2014. Reinventing urban open spaces by different biomass strategies – Analysis of the microclimatic effects by measurements and modelling, 14th European Meteorological Society Annual Meeting, 10th European Conference on Applied Climatology, 06.-10.10.2014, Prag



Beiträge in Fachzeitschriften:

•

- Schmidt, M. und Sieber, S. 2013. Freiflächengestaltung und Klimadesign Bausteine der Energieeffizienz in Siedlungen. Stadt+Grün 10/2013, 44-48.
- Hinz, M., Martin, S., Sieber, S. Weber, S. (geplante Veröffentlichung). Reinventing urban open spaces by different biomass strategies Analysis of the microclimatic effects by measurements and microscale modelling

## **10 Literatur**

- Adams, M.P., Smith, P.L., 2014. A systematic approach to model the influence of the type and density of vegetation cover on urban heat using remote sensing. Landscape and Urban Planning 132, 47-54.
- Anandakumar, K., 1999. A study on the partition of net radiation into heat fluxes on a dry asphalt surface. Atmospheric Environment 33, 3911-3918.
- ARGE IC Ruhr (2014): Masterplan Klimagerechter Stadtumbau für die InnovationCity Ruhr Modellstadt Bottrop. Zugänglich unter: http://www.icruhr.de/index.php?id=413 [Zuletzt aufgerufen: 19.08.2014]
- Aubinet, M., Vesala, T., & Papale, D. (Eds.). (2012). Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. Springer. 438 pp., ISBN 978-94-007-2350-4
- Baldocchi, D., 2014. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere the state and future of the eddy covariance method. Global Change Biology, n/a-n/a.
- Baumüller, J., Hoffmann, U., Reuter, U., 1998. Städtebauliche Klimafibel Hinweise für die Bauleitplanung, Stuttgart, 271 pp.
- Bonan G. (2008). Ecological Climatology (2nd Edition), Cambridge University Press, 550 pp, ISBN 978-0-521-69319-6.
- Bossel, H. (1990). Energiehaushalt und Produktivität von Ökosystemen. Buchkapitel, Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-53047-3, pp. 42-54.
- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., Havenith, G., 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). Int J Biometeorol 56, 481-494.
- Bruse, M. (2014): The Hitchhiker's Guide to ENVI-met. Zugänglich unter: http://www.envimet.info/hg2e/doku.php?id=files:downloadv4 [Zuletzt aufgerufen: 18.09.2014]
- Burba, G. (2013). Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates. LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA, 331 pp.
- Christen, A., Vogt, R., 2004. Energy and radiation balance of a central European city. International Journal of Climatology 24, 1395-1421.
- De Bruin, H. A. R. & Holtslag, A. A. M. (1982). A simple parametrization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the penman-monteith concept., Journal of Applied Meteorology, 21, pp. 1610-1621.
- DWD, 2014. Handbuch: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Ein Gemeinsames Projekt im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) in Zusammenarbeit mit der Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH und dem Deutschen Wetterdienst (DWD), Offenbach, 75 pp.
- Eliasson, I., Upmanis, H., 2000. Nocturnal airflow from urban parks Implications for city ventilation. Theoretical and Applied Climatology 66, 95-107.
- Emeis, S., 2000. Meteorologie in Stichworten. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart, 199 pp.
- Foken, T. & Wichura, B. (1996). Tools for quality assessment of surface-based flux measurements., Agric. Forest Meteorol., 78(1–2), pp. 83-105, ISSN 0168-1923.
- Foken, T. (2006). Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, Springer, Berlin, Heidelberg, 289 pp.
- Foken, T. (2008). The energy balance closure problem: an overview. Ecol. Appl., 18(6), pp. 1351-1367



- Foken, T., Göckede, M., Mauder, M., Mahrt, L., Amiro, B., & Munger, W. (2004). Post-field data quality control, in X. Lee, W. Massman, B.E. Law (Eds.), Handbook of Micrometeorology, Kluwer, Dordrecht, pp. 181-208.
- Gash, J. H. C. (1986). A Note on Estimating the Effect of Limited Fetch on Micrometeorological Evaporation Measurements., Boundary-Layer Meteorol., 35, pp. 409–413.
- Gerstengarbe, F., & Werner, P. (2010). Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky, PIK Report No. 119. Potsdam: Potsdam Institut für Klimafolgenforschung.
- Göckede, M., Rebmann, C., & Foken T. (2004). A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites, Agric. Forest Meteorol., 127 (2004), pp. 175-188.
- Goulden, M. L., Munger, J. W., FAN, S. M., Daube, B. C., & Wofsy, S. C. (1996). Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. Global change biology, 2(3), pp. 169-182.
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model , Journal of applied meteorology, 38(7), pp. 922-940.
- Grimmond, C.S.B., Blackett, M., Best, M.J., Baik, J.J., Belcher, S.E., Beringer, J., Bohnenstengel, S.I., Calmet, I., Chen, F., Coutts, A., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M.L., Hamdi, R., Hendry, M., Kanda, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., Krayenhoff, E.S., Lee, S.H., Loridan, T., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Oleson, K., Ooka, R., Pigeon, G., Porson, A., Ryu, Y.H., Salamanca, F., Steeneveld, G.J., Tombrou, M., Voogt, J.A., Young, D.T., Zhang, N., 2011. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. International Journal of Climatology 31, 244-272.
- Grimmond, C.S.B., Blackett, M., Best, M.J., Barlow, J., Baik, J.J., Belcher, S.E., Bohnenstengel, S.I., Calmet, I., Chen, F., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M.L., Hamdi, R., Hendry, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., Krayenhoff, E.S., Lee, S.H., Loridan, T., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Oleson, K., Pigeon, G., Porson, A., Ryu, Y.H., Salamanca, F., Shashua-Bar, L., Steeneveld, G.J., Tombrou, M., Voogt, J., Young, D., Zhang, N., 2010. The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. Journal of Applied Meteorology and Climatology 49, 1268-1292.
- Hasse, J., Reinders, M., Siekmann, M., Siekmann, T., Vallee, D., Riegel, C., Trum, A., Witte, A., Weyrather, B., Weber, S., Martin, S., Heusinger, J., 2013. Städtebauliche Vorstudie "In wieweit lassen sich durch präventive bauliche Maßnahmen negativ wirkende Mikroklima positiv beeinflussen bzw. verbessern?", Vergabeverfahren: B 1.19 - 7016/12/VV:1 im Auftrag des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Aachen, 275 S.
- Hupfer, P., Kuttler, W., 2005. Witterung und Klima Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 554 pp.
- Huttner, S. (2012). Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVImet. Mainz: Dissertation
- Jacobs, A. F. G., Heusinkvelt, B. G., & Holtslag, A. A. M. (2003). Carbon dioxide and water vapour flux densities over grassland area in the Netherlands, Int J Climatol., 23, pp. 1663-1675.
- Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Weihs, P., Batchvarova, E., DeDear, R., 2010. Der Thermische Klimaindex UTCI. Klimastatusbericht 2009, Deutscher Wetterdienst, 96-101.
- Kong, F., Yin, H., James, P., Hutyra, L.R., He, H.S., 2014. Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. Landscape and Urban Planning 128, 35-47.
- Kropp, J., A. Holsten, T. Lissner, O. Roithmeier, F. Hattermann, S. Huang, J. Rock, F. Wechsung, A. Lüttger, S. Pompe, I. Kühn, L. Costa, M. Steinhäuser, C. Walther, M. Klaus, S. Ritchie, M. Metzger (2009): Klimawandel in Nordrhein- Westfalen Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV).



- Kurc, S.A., Small, E.E., 2007. Soil moisture variations and ecosystem-scale fluxes of water and carbon in semiarid grassland and shrubland. Water Resources Research 43, W06416.
- Kuttler, W., 1998. Stadtklima, in: Sukopp, H., Wittig, R. (Eds.), Stadtökologie. G. Fischer Verlag, Stuttgart, pp. 113-153.
- Kuttler, W., 2013. Klimatologie. Ferdinand Schöningh (UTB 3099), Stuttgart, 306 pp.
- Kuttler, W., Weber, S., Schonnefeld, J., Hesselschwerdt, A., 2007. Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. International Journal of Climatology 27, 2005-2015.
- LANUV [Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz] (2010): Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen Daten und Hintergründe. Fachbericht 27. 58 Seiten, Recklinghausen.
- LANUV [Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz] (2014): *Klimaatlas Nordrhein-Westfalen*. Zugänglich unter: http://www.klimaatlas.nrw.de/site/ [Zuletzt aufgerufen: 22.07.2014]
- Lee, H., Mayer, H., Schindler, D., 2014. Importance of 3-D radiant flux densities for outdoor human thermal comfort on clear-sky summer days in Freiburg, Southwest Germany. Meteorologische Zeitschrift 23, 315-330.
- LI-COR Inc. (2013). EddyPro (aufgerufen am 23.07.2014) URL: http://www.licor.com/env/products/eddy\_covariance/software.html.
- Lükenga, W., Wessels, K., Haarmann, C., Witte, M. (1997) Untersuchungen zum Temperaturfeld der Stadt Osnabrück auf der Basis von Temperatur-Meßfahrten im Winter 1996/97, Universität Osnabrück, 71 pp.
- Mayer, H., Beckröge, W., Matzarakis, A., 1994. Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-Report, 265-268.
- Meyers, T. P. (2001). A comparison of summertime water and CO2 fluxes over rangeland for well watered and drought conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 106, pp. 205-214.
- Middel, A., Häb, K., Brazel, A.J., Martin, C.A., Guhathakurta, S., 2014. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. Landscape and Urban Planning 122, 16-28.
- Moncrieff, J. B., Massheder, J. M., de Bruin, H., Elbers, J., Friborg, T., Heusinkveld, B., Kabat, P., Scott, S., Soegaard H. & Verhoef, A. (1997). A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide, Journal of Hydrology, 188, pp. 589-611.
- Moncrieff, J., Clement, R., Finnigan J. & Meyers, T. (2005). Handbook of Micrometeorology, Handbook of Micrometeorology. Herausgegeben von Lee, X., Massman, W. & Law, B., Band 29. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 7-31.
- MUNLV [Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen] (2009): Anpassung an den Klimawandel Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen. 168 Seiten, Düsseldorf.
- MUNLV [Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen] (2011). Handbuch Stadtklima Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Düsseldorf, 66 S.
- Murray, F. W. (1967). On the computation of saturation vapor pressure. J. Appl. Meteor., 6, pp. 203-204.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (2000). Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change on Emission Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, p. 570.
- Nordrhein-Westfalen, L. (2011). Topografische Karte 1:25000 Blatt 4307.
- Nordrhein-Westfalen, L. (2011). Topografische Karte 1:25000 Blatt 4407.
- Offerle, B., Grimmond, C. S. B. & Oke, T. R. (2003). Parametrization of Net All-Wave Radiation for Urban Areas. Journal of Applied Meteorology, 42(8), pp. 1157-1173.
- Oke, T.R. (1987). Boundary Layer Climates, 2nd Edition. Methuen, London., 435 pp., ISBN 0-415-04319-0



Oke, T.R., 1987. Boundary layer climates, 2nd Edition ed. Methuen, London, 435 pp.

- Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. Energy and Buildings 11, 103-113.
- Parlow, E., 2003. The urban heat budget derived from satellite data. Geographica Helvetica 58, 99-111.
- Pfoser, N., Henrich, J., Jenner, N., Schreiner, J., Kanashiro, C., Heusinger, J., Weber, S., Hegger, M., Dettmar, J., 2014. Gebäude Begrünung Energie - Potenziale und Wechselwirkungen, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL); Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), FLL-Schriftenreihe "Forschungsvorhaben, FV2014/01, Bonn, p. 305.
- Regionalverband Ruhr. (2008): *Regionalkunde Ruhrgebiet*. Zugänglich unter: http://www.ruhrgebiet-regionalkunde.de/ris\_index.php [Zuletzt aufgerufen: 22.07.2014]
- Schmidt, M., Sieber, S., 2013. Freiflächengestaltung und Klimadesign Bausteine der Energieeffizienz in Siedlungen. Stadt+Grün 10/2013, 44-48.
- Sieber, S., 2011. Urbane Biomasse -Methoden, Chancen, Hemmnisse. Stadt+Grün, 50 54.
- Snowdon, A. und M. Bürger (2006): Klimaanalyse der Stadt Bottrop. Bericht des Regionalverbands Ruhr, Fachbereich Geoinformation und Raumbeobachtung für die Stadt Bottrop, Stadtplanungsamt. Essen.
- Sozzi, R., Salcido, A., Flores, R. S., Georgiadis, T. (1999). Daytime net radiation parametrisation for Mexico City suburban areas, Atmospheric Research, 50, pp. 53-68.
- Spronken-Smith, R., Oke, T.R., Lowry, W.P., 2000. Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park. International Journal of Climatology 20, 1033-1047.
- Stull, R. B. (1988). An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, 666 pp.
- Tetens, O., (1930). Über einige meteorologische Begriffe. z. Geophys. 6, pp. 297-309.
- Thorsson, S., Eliasson, I., 2003. An intra-urban thermal breeze in Göteborg, Sweden. Theoretical and Applied Climatology 75, 93-104.
- Webb, E. K., Pearman, G. I. & Leuning, R. (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 106.447, pp. 85-100.
- Weber, S., 2004. Energiebilanz und Kaltluftdynamik einer urbanen Luftleitbahn. Westarp Wissenschaften, Hohenwarsleben, 203 pp.
- Weber, S., Kordowski, K., 2010. Comparison of atmospheric turbulence characteristics and turbulent fluxes from two urban sites in Essen, Germany. Theoretical and Applied Climatology 102, 61-74.
- Weber, S., Kordowski, K., Kuttler, W., 2013. Variability of particle number concentration and particle size dynamics in an urban street canyon under different meteorological conditions. Science of the Total Environment 449, 102-114.
- Weber, S., Kuttler, W., 2003. Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und -qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft 63, 381-386.
- Weber, S., Kuttler, W., 2005. Surface energy-balance characteristics of a heterogeneous urban ballast facet. Climate Research 28, 257-266.
- Weber, S., Kuttler, W., Weber, K., 2006. Flow characteristics and particle mass and number concentration variability within a busy urban street canyon. Atmospheric Environment 40, 7565-7578.
- Wiesner, S., Eschenbach, A., Ament, F., 2014. Urban air temperature anomalies and their relation to soil moisture observed in the city of Hamburg. Meteorologische Zeitschrift 23, 143-157.
- Wilson KB, Goldstein AH, Falge E et al. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. Agricultural and Forest Meteorology, 113, pp. 223–243.
- Zeeman, M. J., Hiller, R., Gilgen, A. K., Michna, P., Plüss, P., Buchmann, N., Eugster, W. (2010). Management and climate impacts on net CO2 fluxes and carbon budgets of three grasslands along an elevational gradient in Switzerland. Agricultural and Forest Meteorology, 150(4), pp. 519-530.