

Deutscher Wetterdienst

# **Analyse der thermischen Wirkung von Dachbegrünung mittels Stadtklimamodellierung**

**Endbericht zum Projekt ADAM**

**Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter  
der Fördernummer Az 34690/01**

von

Margarita Skoryi<sup>1</sup>, Saskia Buchholz<sup>1</sup>, Olaf Büscher<sup>2</sup>, Fiona Wolff<sup>3</sup>, Gunter  
Mann<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Deutscher Wetterdienst

<sup>2</sup> EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH

<sup>3</sup> Bundesverband Gebäudegrün e. V.

Offenbach, Juli 2022

10/01		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>		 Deutsche Bundesstiftung Umwelt	
AZ	<b>34690/01</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>210.661 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Analyse der thermischen Wirkung von Dachbegrünung mittels Stadtklimamodellierung</b>			
<b>Stichworte</b>		Dachbegrünung, Stadtklima, Klimaanpassung, Biodiversität, energieeffizientes Bauen, Regenwasser			
Laufzeit		Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>25 Monate</b>		<b>01.04.2020</b>	<b>01.05.2022</b>	<b>1</b>	
Zwischenberichte		keine			
<b>Bewilligungs-empfänger</b>		Bundesverband GebäudeGrün e. V. Präsident: Dr. Gunter Mann		Tel 0681 - 9880570 Fax 0681 - 9880572 Projektleitung: Dr. Saskia Buchholz (DWD) Bearbeiter: siehe Bewilligungs-empfänger und Kooperations-partner	
<b>Kooperations-partner</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bundesverband GebäudeGrün e. V. (Dr. Gunter Mann, Fiona Wolff)</li> <li>- Deutscher Wetterdienst (Margarita Skoryi, Dr. Saskia Buchholz)</li> <li>- EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH (Dr. Andreas Mütterthies, Olaf Büscher)</li> <li>- Stadt Essen (Jürgen Höke und Andreas Müller vom Amt für Stadtplanung und Bauordnung, Mandy Courtney und Timo Westermann vom Umweltamt, Christian Lindner und Jan Schäfer vom Amt für Geoinformation, Vermessung und Kataster)</li> </ul>			
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
<p>Der aktuelle Bericht des Weltklimarates lässt für den weiteren Verlauf dieses Jahrhunderts eine deutliche Klimaerwärmung und eine Zunahme in der Häufigkeit, Andauer und Intensität von extremen Wetterereignissen in Europa und Deutschland erwarten. Besonders vulnerabel gegenüber Wetterextremen sind Städte. Starkregenereignisse mit Hochwasser können städtische Infrastrukturen zerstören und langanhaltende sommerliche Hitzeperioden beeinträchtigen die Gesundheit der Stadtbevölkerung. Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel helfen, die durch extreme Wetterereignisse verursachten Schäden für die Bevölkerung und Infrastruktur in der Stadt zu reduzieren.</p>					

Die Begrünung von Dachflächen ist eine häufig genannte und bereits praktizierte Maßnahme zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Flächendeckende Dachbegrünung kann die thermische Belastung in Städten reduzieren und bei Starkregenereignissen Niederschläge zurückhalten und somit zur Verbesserung der Abflusssituation in Städten beitragen.

Im Projekt „Analyse der thermischen Wirkung von Dachbegrünung mittels Stadtklimamodellierung“ (ADAM) wurde am Beispiel der Stadt Essen untersucht, inwieweit Gründächer zur Kühlung eines Stadtquartiers beziehungsweise der ganzen Stadt beitragen können. Hierfür wurden die Gründachdaten in das Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) eingespeist und verschiedene Computersimulationen zum Gründach realisiert und miteinander verglichen.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Die Arbeiten im Projekt gliederten sich in zwei Arbeitspakete. Im Mittelpunkt des Arbeitspaketes 1 stand die Verarbeitung der Befliegungs- und Geodaten zur Inventarisierung von vorhandenen Gründachflächen und potentiell begrünbaren Dachflächen. Dies wurde mittels eines automatisierten fernerkundlichen Verfahrens durch die Firma EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH umgesetzt. Sowohl die Inventarisierung als auch die Potentialanalyse wurden mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung (Einzelgebäude) erzeugt, um den Einsatz beider Datensätze in verschiedenen Stadtklimamodellen zu ermöglichen. Für das im Projekt genutzte Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) wurden die Gründachinformationen aggregiert, um auf die räumliche Auflösung der Modellgitterzellen zu kommen. Beide Datensätze liefern für jedes Einzelgebäude Informationen zur begrüneten Dachfläche. Die Intensitätsstärke der Dachbegrünung zur Einordnung der Gründachtypen extensiv und intensiv wurde für die Inventarisierung von Dachbegrünung anhand von Schwellwerten der berechneten NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Signale abgeleitet. Der Bundesverband GebäudeGrün e.V. (BuGG) lieferte weitere bau- und vegetationstechnische Kenndaten für die verschiedenen Gründachtypen.

Die Arbeiten im Arbeitspaket 2 beinhalteten die Nutzbarmachung der Gründachdatensätze und -parameter für das Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 sowie die Modellrechnungen für die Stadt Essen. Im Rahmen einer Fallstudie wurden Stadtklimasimulationen mit beiden Gründachdatensätzen für einen typischen windschwachen Strahlungstag im Sommer durchgeführt. Das Stadtklima wurde anhand des Tagesganges der bodennahen Lufttemperatur und der Gefühlten Temperatur untersucht. Für die Berechnung der Gefühlten Temperatur wurde das beim DWD entwickelte Klima-Michel Modell verwendet. Um die Kühlwirkung der Dachbegrünung zu ermitteln, wurde ein Modelllauf ohne Dachbegrünung (Referenz) durchgeführt, mit dem alle weiteren Modellläufe verglichen wurden.

Die thermische Wirkung der Dachbegrünung wurde anhand der bodennahen Lufttemperatur und verschiedener meteorologischer Größen auf dem Gründach untersucht. Neben den Simulationen für die Stadt Essen wurden auch idealisierte Stadtklimasimulationen mit steigender Gründachfläche und weiteren Dachbegrünungsarten durchgeführt.

Ferner wurde eine länger andauernde Hitzeperiode von 4 Tagen simuliert, um die Wirkung eines Gründaches bei länger anhaltendem Wassermangel oder bei ausreichender Wasserzufuhr (Retentions Gründach) zu quantifizieren. Daraus kann sich beispielsweise das Konzept der „Schwammstadt“ entwickeln, dass in der Stadtplanung immer häufiger Berücksichtigung findet. Die Kernidee dieses Konzeptes ist es, anfallende Niederschläge in der Stadt an vielen verschiedenen Orten aufzunehmen und wie ein Schwamm zu speichern, anstatt diese zu kanalisieren und abzuleiten.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Basierend auf den Befliegungsdaten von 2018 haben in Essen 11.267 von insgesamt 260.552 Gebäuden - das entspricht einem prozentualen Anteil von 4,3 % - eine begrünte Dachfläche beziehungsweise eine begrünte Dachteilfläche. Insgesamt sind 44,9 ha der Dachfläche begrünt. Bezogen auf die Fläche aller Dächer entspricht das einem Anteil von 1,9 %. Im Vergleich zu Städten wie Dresden oder Nürnberg mit fast gleicher Einwohnerzahl befindet sich die Menge an begrünter Dachfläche auf einem ähnlichen Niveau. Der Stadtteil Westviertel hat mit 7,6 % den höchsten Anteil von Dachbegrünung an der Gesamtdachfläche, gefolgt von Rüttenscheid (3,4 %), Kettwig, (3,3 %), Heidhausen und Stadtkern mit jeweils 3,2 %. Die Stadtteile Bergeborbeck und Schonnebeck haben mit 0,6 % den geringsten Gründachanteil. Im Potentialkataster kommen zu den vorhanden 11.267 Gebäuden mit begrünter Dachfläche oder begrünter Dachteilfläche weitere 132.210 Gebäude hinzu. Insgesamt könnten so 98,3 ha der Dachfläche von Essen begrünt werden. Bezogen auf die Fläche aller Dächer entspricht das einem Anteil von 4,1 % und damit einer Verdopplung. Der Stadtteil Westviertel könnte mit 10,4 % Dachbegrünung den höchsten Anteil bezogen auf die Gesamtdachfläche im Stadtgebiet erreichen, gefolgt vom Stadtkern (7,5 %), Kettwig, (6,4 %) und Überraehr-Insel (5,8 %).

Aus den Modellergebnissen konnte abgeleitet werden, in welchen Stadtquartieren eine hohe Wärmebelastung und ein Anpassungsbedarf an Hitze besteht. Um 17 Uhr sind die identifizierten überwärmten Gebiete mittels der Lufttemperatur und Gefühlten Temperatur fast deckungsgleich. Dabei werden für die Fallstudie bei der Lufttemperatur bzw. Gefühlten Temperatur die höchsten mittleren Werte von 30 °C bzw. 33,8 °C im Stadtkern erreicht. Weitere überwärmte Stadtteile sind Südviertel, Westviertel, Holsterhausen, Südostviertel und Frohnhausen. Generell zeigt sich der Zusammenhang zwischen der Dichte der Bebauung und dem Grad der Versiegelung mit der Ausprägung der Überwärmung. Betrachtet man die Bevölkerungsanteile in den Stadtteilen, so sind die fünf Stadtteile mit den höchsten Lufttemperaturen Lebensraum für insgesamt etwa 10 % der Essener Stadtbevölkerung, wobei in Frohnhausen mit 32.395 und in Holsterhausen mit 26.013 die meisten Einwohner leben. Ca. 10 % der Menschen über 65 Jahren, die zu der durch Hitzestress besonders gefährdeten Bevölkerung gehören, wohnen in den durch die hohen Lufttemperaturen belasteten Gebieten. Bei den fünf höchst belasteten Stadtteilen durch die Gefühlte Temperatur steigert sich der Prozentsatz auf ca. 16 % der Einwohner.

Die Modellergebnisse zeigen, dass die in Essen vorhanden Gründächer und selbst die Begrünung aller potentiell möglichen Dachflächen noch nicht ausreicht, um ein ganzes Stadtquartier oder die Stadt signifikant zu kühlen. Die modellierten Abkühlungswerte sind für die Fallstudie relativ gering und erreichen Maximalwerte von -0,4 Kelvin. An einigen Orten mit sehr hohem Flächenanteil der Dachbegrünung konnte jedoch gezeigt werden, dass schon heute diese Orte lokal von der kühlenden Wirkung der Dachbegrünung (-0,7 Kelvin) profitieren. Die Szenarien mit der weiteren Steigerung der Gründachflächen (Szenarien mit 25 %, 50 %, 75 % und 100 % Dachbegrünungsanteil) lassen eine signifikante Kühlleistung im Straßenraum erkennen, die auch im gesamten Stadtquartier wirkt. Bei 100 % Dachbegrünung kann so die bodennahe Lufttemperatur im Stadtkern um durchschnittlich -0,8 Kelvin gesenkt werden. Gründächer als alleinige Anpassungsmaßnahme sind in ihrer derzeitigen flächendeckenden Ausgestaltung noch nicht ausreichend und müssen mit weiteren Anpassungsmaßnahmen kombiniert werden, um die Klimaerwärmung kompensieren zu können und den thermischen Status quo in der Stadt Essen zu erhalten. Die Begrünungsart spielt für die bodennahe Lufttemperatur bei flächendeckender



Anwendung eine eher untergeordnete Rolle. Sie hat aber einen großen Einfluss auf die Dachtemperaturen und somit auf die Isolierung der Dachgeschosse sowie den Wärme- und Kälteenergiebedarf der Häuser. Intensive Dachbegrünung mit größerer Substrattiefe und hoher Vegetation senkt die Dachtemperatur am Tag stärker als extensive Dachbegrünung. Auch die Temperaturschwankungen über den Tag sind bei intensiv begrünten Dächern geringer als bei extensiv begrünten Dächern. Die mächtigere Substratschicht der intensiven Dachbegrünung ermöglicht ebenso einen höheren Wasserrückhalt bei Starkregenereignissen. Die positive und ausgleichende thermische Wirkung von bewässerten oder wassergesättigten Gründächern auf das Dach zeigt sich insbesondere während langanhaltender Hitze- und Trockenphasen.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das Projekt und die Ergebnisse wurden insgesamt in drei kurzen Beiträgen in der Zeitschrift GebäudeGrün (1/2020, 3/2020 und 2/2022) vorgestellt. Projektbegleitend hat der Deutsche Wetterdienst eine Projektwebseite erstellt. Ein Beitrag wurde für den DBU Jahresbericht 2021 angefertigt. Die Projektergebnisse wurden auf drei nationalen Fachkonferenzen (METTOOLS XI, DACH 2022 und Forschungskonferenz „Klimaresiliente Schwammstadt: Naturbasierte Konzepte und Maßnahmen als Baustein urbaner Transformation“ des Umweltbundesamtes) vorgestellt. Während der Projektlaufzeit wurden durch die weltweit bedingte Corona Pandemiesituation viele Veranstaltungen und Konferenzen abgesagt auf denen die Projektergebnisse hätten präsentiert werden sollen. Es ist vorgesehen auch nach Projektende die Ergebnisse weiter zu kommunizieren (z. B. durch die Teilnahme an einem internationalen Workshop mit dem Titel „beating the heat“ in Bern). Zusammen mit allen Projektpartnern wurde eine halbtägige virtuelle Abschlussveranstaltung mit ca. 85 Teilnehmern durchgeführt.

### **Fazit**

Die Nutzbarmachung von Gründachdaten für die Stadtklimamodellierung ist eine wichtige Grundlage, um das Potential von Gründachflächen zur Minderung der städtischen Lufttemperatur zu ermitteln. Mithilfe der Computermodellierung können gezielt Stadtquartiere identifiziert werden, die eine hohe Wärmebelastung und somit einen erhöhten Anpassungsbedarf an Hitze haben. Die nun simulierbare Wirkung der Dachbegrünung einer ganzen Stadt zeigt das Potential dieser Anpassungsmaßnahme für die Stadtplanung auf. Die Projektergebnisse unterstützen vor allem die kommunalen Fachbehörden bei der Entwicklung geeigneter Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel und somit auch eine frühzeitige Planung von Vorsorgemaßnahmen gegen zukünftige Extremwetterereignisse. Die Ergebnisse können Grundlage für eine mögliche Erarbeitung von Förderprogrammen zur Gründachentwicklung sein.

## Inhaltverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	13
Zusammenfassung.....	14
Summary.....	16
1. Einleitung.....	18
2. Zielsetzung.....	22
3. Daten und Methoden.....	23
3.1 Vorgehensweise und Arbeitspakete.....	23
3.2 Untersuchungsgebiet Stadt Essen.....	24
3.3 Erstellung des Gründachkatasters und Gründachpotential-katasters.....	26
3.3.1 Bestandsanalyse.....	26
3.3.2 Potentialanalyse.....	27
3.3.3 Einsatzgebiet des Verfahrens.....	27
3.3.4 Verwendete Daten und Verarbeitung.....	28
3.3.5 Ergebnisse der Inventar- und Potentialanalyse.....	32
3.4 Stadtklimamodellierung mit MUKLIMO_3.....	33
3.4.1 MUKLIMO_3 Eingangsdaten.....	34
3.4.2 MUKLIMO_3 Eingangsdaten zur Dachbegrünung.....	37
3.4.3 Berücksichtigung der neuen Dachbegrünungsdatensätze in MUKLIMO_3.....	41
3.4.4 Berechnung der Wärmebelastung mit dem Klima-Michel Modell.....	42
3.4.5 Meteorologische Randbedingungen.....	44
3.4.6 Szenarienauswahl.....	45
3.4.7 Idealisierte Stadtklimasimulationen.....	46
4. Ergebnisse und Diskussion.....	47
4.1 Ergebnisanalyse des Gründach- und Potentialkatasters.....	47

4.2	Simulationsergebnisse für den Referenzlauf .....	49
4.3	Ergebnisse der Simulationen mit dem Gründachkataster und Potentialkataster .....	57
4.4	Ergebnisse der Simulationen mit erhöhtem Gründachanteil .....	63
4.5	Ergebnisse der Dachbegrünungsarten .....	70
4.6	Ergebnisse der Simulationen mit Bewässerung.....	77
5.	Fazit .....	80
	Literaturverzeichnis .....	82
	Anhang.....	87

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Strahlung- und Wärmeströme auf einem konventionellen und auf einem begrünten Dach (Quelle: DWD).....	19
Abb. 2	Topografische Karte des MUKLIMO_3 Modellgebietes für Essen (Quelle: BKG WMS Digitale Topographische Karte 1:250.000). Die Stadtgrenze ist als lila Linie dargestellt (Quelle: BKG).....	25
Abb. 3	Aufnahmezeitpunkte der digitalen Orthophotos (Eingangsdaten) welche zur Bestimmung der Gründächer verwendet wurden (Quellen: BKG und Open Geodata NRW).....	29
Abb. 4	Schematischer Ablauf der Aufbereitung. Die verschiedenen Eingangsdaten werden auf das gewünschte MUKLIMO_3 Rechengitter und Format transformiert (Abbildung erweitert nach HKF18, Quelle: Copernicus CLMS). ....	35
Abb. 5	MUKLIMO_3 Eingangsdaten: Geländehöhe (links) und Landnutzung (rechts) Die lila bzw. schwarze Linie kennzeichnet das Stadtgebiet Essen (Quellen: BKG und Copernicus CLMS). ....	36
Abb. 6	MUKLIMO_3 Eingangsdaten: Gebäudegrundflächenanteil (links, oben), mittlere Gebäudehöhe (rechts, oben), Wandflächenindex (links, unten) und Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden (rechts, unten). Die schwarze Linie kennzeichnet das Stadtgebiet Essen (Quellen: BKG und Copernicus CLMS).....	37
Abb. 7	Flächenanteil der Dachbegrünung am Gesamtdach für das Gründachkataster (links) und das Gründachpotentialkataster (rechts). Die schwarze Linie kennzeichnet das Stadtgebiet Essen (Quellen: BKG und Open Geodata NRW).....	38
Abb. 8	Einteilung in extensive und intensive Dachbegrünung für das Gründachkataster (links) und das Gründachpotentialkataster (rechts). Die schwarze Linie kennzeichnet das Stadtgebiet Essen (Quellen: BKG und Open Geodata NRW).....	39
Abb. 9	Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur.....	43
Abb. 10	Schematische Darstellung einer idealisierten Stadt.....	46
Abb. 11	Anteil der Dachbegrünung an der Gesamtdachfläche (in Prozent) für die einzelnen Essener Stadtteile für das Gründachkataster (links) und das Gründachpotentialkataster (rechts). Im Mittel über das Stadtgebiet ist etwas mehr als eine Verdopplung der Gründachfläche möglich (Quelle: Stadt Essen). ....	48
Abb. 12	Modellierte bodennahe Lufttemperatur in 5m über Grund um 17 Uhr MESZ des Referenzlaufs (Quelle: Stadt Essen).....	49
Abb. 13	Modellierte Gefühlte Temperatur in 2m über Grund um 17 Uhr MESZ des Referenzlaufs (Quelle: Stadt Essen).....	51

Abb. 14	Modellierte bodennahe Lufttemperatur (links) und Gefühlte Temperatur (rechts) um 21 Uhr MESZ des Referenzlaufs (Quelle: Stadt Essen).....	52
Abb. 15	Modellierte bodennahe Lufttemperatur (links) und Gefühlte Temperatur (rechts) um 1 Uhr MESZ des Referenzlaufs (Quelle: Stadt Essen).....	53
Abb. 16	Modellierte bodennahe Lufttemperatur (links) und Gefühlte Temperatur (rechts) um 5 Uhr MESZ des Referenzlaufs (Quelle: Stadt Essen).....	54
Abb. 17	Lage der um 17 Uhr MESZ stärksten überwärmten Essener Stadtteile in der Referenzsimulation ohne Dachbegrünung (Quelle: Stadt Essen).....	56
Abb. 18	Abkühlungswirkung um 13 Uhr MESZ in 5 m Höhe, welche durch das Gründachkataster erreicht wird (Quelle: Stadt Essen).....	58
Abb. 19	Abkühlungswirkung um 13 Uhr MESZ in 5 m Höhe, welche durch das Potentialkataster erreicht wird (Quelle: Stadt Essen).....	59
Abb. 20	Zoom in den Essener Innenstadtbereich: Abkühlungswirkung bezogen auf die Lufttemperatur in 5 m Höhe (oben) und die Gefühlte Temperatur in 2 m Höhe (unten) um 13 Uhr MESZ, welche durch das Gründachkataster erreicht werden kann (Quellen: Stadt Essen und Open Street Map).....	61
Abb. 21	Änderung des fühlbaren Wärmestroms im Vergleich zum Referenzlauf: Gründachkataster (links) und Gründachpotentialkataster (rechts) (Quelle: Stadt Essen).....	62
Abb. 22	Abkühlungswirkung um 13 Uhr MESZ, welche durch eine Erhöhung der Dachbegrünung um 25 %, 50 %, 75 % und 100 % im Essener Stadtgebiet erreicht werden kann (Quelle: Stadt Essen).....	64
Abb. 23	Abkühlungswirkung durch Dachbegrünung um 13 Uhr MESZ bei 100% Dachbegrünung im Stadtteil Kettwig und deren Wirkung in Gitterzellen ohne Gebäude mit Dachbegrünung (Quellen: Stadt Essen und Open Street Map).....	65
Abb. 24	Änderung des fühlbaren Wärmestroms um 13 Uhr MESZ, welche durch eine Erhöhung der Dachbegrünung um 25%, 50%, 75% und 100% im Essener Stadtgebiet erreicht werden kann (Quelle: Stadt Essen).....	67
Abb. 25	Tagesgang des fühlbaren Wärmestroms von den Dächern gemittelt über alle Dächer im Essener Stadtgebiet für die verschiedenen Szenarien.....	68
Abb. 26	Änderung der Maximumtemperatur in Kelvin (bezogen auf die bodennahe Lufttemperatur der untersten Modellgitterzelle) für neun verschiedene Bebauungstypen (lu11 bis lu19) mit zunehmendem Anteil an Dachbegrünung (30 %, 60 % und 100 %) im Vergleich zu einem Referenzlauf ohne Dachbegrünung.....	69
Abb. 27	Der Einfluss der Dachbegrünungsart (extensiv und Intensiv) auf die Abkühlungswirkung um 13 Uhr MESZ im Stadtteil Kettwig, oben die Kühlwirkung	

überblendet mit dem Begrünungstyp und unten die Kühlwirkung in 5m Höhe (Quellen: Stadt Essen und Open Street Map).....	71
Abb. 28 Tagesgang des fühlbaren und latenten Wärmestroms für extensiv und intensiv begrünte Dächer.....	72
Abb. 29 Tagesgang der bodennahen Lufttemperatur für vier verschiedene Gründacharten im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet. ....	73
Abb. 30 Tagesgang des fühlbaren Wärmestroms der Gründächer für vier verschiedene Gründacharten im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet. ....	74
Abb. 31 Tagesgang des latenten Wärmestroms der Gründächer für vier verschiedene Gründacharten im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet. ....	75
Abb. 32 Tagesgang der Temperatur im Bestand der Gründachvegetation für vier verschiedene Gründacharten im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet.....	76
Abb. 33 Tagesgang des latenten Wärmestroms für ein bewässertes und ein unbewässertes Gründach über vier Tage im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet.....	78
Abb. 34 Tagesgang des fühlbaren Wärmestromes für ein bewässertes und ein unbewässertes Gründach über vier Tage im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet.....	78
Abb. 35 Tagesgang der Temperatur im Bestand der Gründachvegetation für ein bewässertes und ein unbewässertes Gründach über vier Tage im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet. ....	79
Abb. A1 Hot Spot Analyse der Lufttemperatur (links) und der Gefühlten Temperatur (rechts) der Referenzsimulation für die Zeitpunkte 13 Uhr, 17 Uhr, 21 Uhr, 1 Uhr und 5 Uhr MESZ (von oben nach unten) (Quelle: Stadt Essen). ....	96

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Auswahl der digitalen Orthophotos nach Datum .....	32
Tab. 2	Zuordnung verschiedener Eigenschaften zu den Typen der Dachbegrünung in der Gründachtabelle "GRTAB" .....	40
Tab. 3	Zusammenhang zwischen Gefühlter Temperatur, thermischem Empfinden und thermophysiologischer Beanspruchung (VDI08) .....	44
Tab. 4	Für die MUKLIMO_3 Simulation verwendete mittlere Werte der Lufttemperatur und relativen Feuchte aus der Vertikalsondierung mittels Radiosonde in Essen-Brederney .....	44
Tab. 5	Startwerte für die MUKLIMO_3 Simulation.....	45
Tab. 6	Gerechnete MUKLIMO_3 Szenarien und Referenzlauf für die Stadt Essen.....	45
Tab. 7	Die 5 stärksten überwärmten Stadtviertel von Essen im Referenzlauf ohne Dachbegrünung bezogen auf die Lufttemperatur in 5 m über Grund um 17 Uhr MESZ. ....	55
Tab. 8	Die 5 stärksten überwärmten Stadtviertel von Essen im Referenzlauf ohne Dachbegrünung bezogen auf die Gefühlte Temperatur in 2 m über Grund um 17 Uhr MESZ.....	55
Tab. 9	Mittlere Abkühlung der Lufttemperatur in Kelvin in den 5 überwärmten Stadtteilen von Essen (Tabelle 7) bezogen auf die bodennahe Lufttemperatur um 17 Uhr MESZ. ....	65
Tab. A1	MUKLIMO_3 Modellparameter für Landbedeckungsklassen mit Bebauung (hierbei ist ID die Klassennummer, N die Anzahl der Gitterzellen mit dieser Landbedeckung, $g_b$ der Gebäudegrundflächenanteil, $h_b$ die mittlere Gebäudehöhe in m, $w_b$ der Wandflächenindex und $v$ der Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden).....	87
Tab. A2	MUKLIMO_3 Modellparameter für Landbedeckungsklassen mit Bebauung für die idealisierten Stadt Simulationen (hierbei ist ID die Abkürzung der Landnutzungs-kategorie, $g_b$ der Gebäudegrundflächenanteil, $h_b$ die mittlere Gebäudehöhe in m, $w_b$ der Wandflächenindex und $v$ der Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden).....	88
Tab. A3	Ergebnisse des Gründachkatasters bezogen auf die Essener Stadtteile .....	89
Tab. A4	Ergebnisse des Gründachpotentialkatasters bezogen auf die Essener Stadtteile ..	92

Tab. A5 Ranking der modellierten Lufttemperatur der Referenzsimulation zwischen 10 Uhr MESZ und 9 Uhr MESZ sortiert nach 17 Uhr MESZ und Stadtteil, beginnend mit dem wärmsten Stadtteil.....	97
Tab. A6 Ranking der modellierten Gefühlten Temperatur der Referenzsimulation zwischen 10 Uhr MESZ und 9 Uhr MESZ sortiert nach 17 Uhr MESZ und Stadtteil, beginnend mit dem wärmsten Stadtteil.....	98
Tab. A7 Zusammenstellung der Öffentlichkeitsarbeit im Projekt ADAM.....	99



## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
AP	Arbeitspaket
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BuGG	Bundesverband GebäudeGrün e. V.
CLMS	Copernicus Land Monitoring Service
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DOP	Digitales Orthophoto bzw. Orthofoto
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFTAS	EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH
GRANT	Abkürzung für die MUKLIMO_3 Eingangsdaten die den Flächenanteil der Gründächer am Gesamtdach beschreiben
GRC	Abkürzung für die MUKLIMO_3 Eingangsdaten die die Gründachart (extensiv oder intensiv) beschreiben
GRTAB	Abkürzung für die MUKLIMO_3 Eingangstabelle weiterer Gründachdaten
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (deutsch Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
K	Kelvin, Einheit für Temperaturdifferenzen
LoD1	Level of Detail 1 (Block- oder Klötzchenmodell zur Beschreibung von 3-dimensionalen Gebäudedaten)
LAI	Leaf Area Index
MUKLIMO_3	3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NHN	Normalhöhennull
NRW	Nordrhein-Westfalen
PALM-4U	Parallelized Large-eddy simulation Model for urban applications
PP	Prozessierungspaket
PV	Photovoltaik
WAI	Wandflächenindex
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

## Zusammenfassung

Ein wichtiges stadtplanerisches Ziel ist die Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Um die richtigen Entscheidungen auf den Weg zu bringen, benötigen kommunale Fachbehörden, Planungsbüros und Personen mit politischen Ämtern Informationen zu den Auswirkungen des Klimawandels in der Region bzw. Stadt und zur Wirksamkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen. Eine vielversprechende und teils erprobte Maßnahme zur Minderung der Klimafolgen durch sommerliche Hitze und Starkregen ist die Begrünung von Dächern. Im Projekt „Analyse der thermischen Wirkung von DAchbegrünung mittels StadtklimaModellierung“ (ADAM) wurde am Beispiel der Stadt Essen untersucht inwieweit Gründächer zur Kühlung einer ganzen Stadt beitragen können. Das Kooperationsprojekt zwischen dem Deutschen Wetterdienst (DWD), dem Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG), der EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH und der Stadt Essen wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (Fördernummer Az 34690/01).

Mittels eines automatisierten fernerkundlichen Verfahrens wurden vorhandene Gründachflächen und potentiell begrünbare Dächer erfasst. Beide Datensätze liefern für jedes Einzelgebäude Informationen zur begrünten Dachfläche und umfassen auch Informationen zur Art der Dachbegrünung (extensiv oder intensiv). Für die Nutzung im Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) wurden die Vektordaten durch Transformation in ein Raster auf das Modellgebiet der Stadt Essen gebracht. Der BuGG unterstützte bei der Beschaffung von physikalischen Kenndaten für das Substrat und die Vegetation der verschiedenen Gründächer. Anschließend wurden mit MUKLIMO\_3 Computersimulationen der Lufttemperatur- und Windverhältnisse, der solaren und thermischen Strahlung und weiterer Parameter für einen heißen Sommertag im Juli mit windschwacher und wolkenfreier Hochdruckwetterlage durchgeführt. Um die Kühlwirkung der Dachbegrünung zu ermitteln, wurde ein Modelllauf ohne Dachbegrünung (Referenz) durchgeführt mit dem alle weiteren Modellläufe verglichen wurden. Neben den Modellläufen mit den Datensätzen zur vorhandenen und potentiell möglichen Dachbegrünung wurden noch weitere Anpassungsszenarien mit steigender Gründachfläche, weiteren Dachbegrünungsarten und bewässerten und nicht bewässerten Dächern simuliert.

Die Modellergebnisse zeigen, dass die in Essen vorhanden Gründächer und selbst die Begrünung aller potentiell möglichen Dachflächen noch nicht ausreicht um ein ganzes Stadtquartier oder die Stadt signifikant zu kühlen. An einigen Orten mit sehr hohem Flächenanteil der Dachbegrünung konnte jedoch gezeigt werden, dass schon heute diese Orte lokal von der kühlenden Wirkung der Dachbegrünung profitieren. Die Szenarien mit der

weiteren Steigerung der Gründachflächen lassen eine signifikante Kühlleistung im Straßenraum erkennen, die auch über im gesamten Stadtquartier wirkt. Gründächer als alleinige Anpassungsmaßnahme sind in ihrer derzeitigen flächendeckenden Ausgestaltung noch nicht ausreichend und müssen mit weiteren Anpassungsmaßnahmen kombiniert werden, um die Klimaerwärmung kompensieren zu können und den thermischen Status Quo in der Stadt zu erhalten. Die Begrünungsart spielt für die bodennahe Lufttemperatur bei flächendeckender Anwendung eine eher untergeordnete Rolle. Sie hat aber einen großen Einfluss auf die Dachtemperaturen und somit auf die Isolierung der Dachgeschosse sowie den Wärme- und Kälteenergiebedarf. Intensive Dachbegrünung mit größerer Substrattiefe und hoher Vegetation senkt die Dachtemperatur am Tag stärker als extensive Dachbegrünung. Auch die Temperaturschwankungen über den Tag sind bei intensiv begrünten Dächern geringer als bei extensiv begrünten Dächern. Die mächtigere Substratschicht der intensiven Dachbegrünung ermöglicht ebenso einen höheren Wasserrückhalt bei Starkregenereignissen. Die positive und ausgleichende thermische Wirkung von bewässerten oder wassergesättigten Gründächern auf das Dach zeigt sich insbesondere während langanhaltender Hitze- und Trockenphasen.

## Summary

One of the most important goals of urban planning is the adaptation to the impacts of climate change. In order to make the right decisions, municipal authorities, planning offices and politicians need information on the impacts of climate change in a region or city and on the effectiveness of climate adaptation measures. Green roofs are a promising and partly tested adaptation measure to reduce the impacts of summertime heat and heavy rain. In the project "Analysis of the thermal impacts of green roofs using urban climate modeling" (ADAM), the city of Essen was used as an example to investigate the extent to which green roofs can contribute to the cooling of an entire city. The cooperation project between German Meteorological Service (DWD), the German Association of Building Greening (BuGG), the EFTAS Remote Sensing Technology Transfer GmbH and the city of Essen was funded by the German Federal Environmental Foundation (funding number Az 34690/01).

Existing green roofs and potential green roofs were detected using an automated remote sensing procedure. Both datasets provide information on the green roof fraction for each individual building and include information on the green roof type (extensive or intensive). For use in the urban climate model MUKLIMO\_3, the vector datasets were transformed into a raster covering the model area of the city Essen and the surroundings. The BuGG provided support in obtaining physical parameters for the substrate and the vegetation of various green roofs. MUKLIMO\_3 was used to carry out computer simulations of the air temperature and wind conditions, the solar and thermal radiation and other parameters for a hot summer day in July with cloudless and calm weather conditions. In order to determine the cooling effect of green roofs, a model run was carried out without green roofs (reference) with which all other model runs were compared. In addition to the model runs with the data sets for existing and potentially possible green roofs in Essen, other adaptation scenarios with increasing green roof fractions, other types of green roofs and irrigated and non-irrigated green roofs were simulated.

The model results show that the existing green roofs in Essen and even the greening of all potentially possible roof areas are not sufficient to significantly cool an entire urban district or the city. However, in some places with a very large proportion of the roof area covered by vegetation, it can be shown that these places are already benefiting locally from the cooling effect of green roofs. The scenarios with a further increase in green roof fraction reveal a significant cooling capacity at street level, which also has an effect on the entire urban quarter. Green roofs as the sole adaptation measure are not yet sufficient in their current implementation with regard to their area and must be combined with other adaptation

measures in order to be able to compensate for global warming and to maintain the thermal status quo in the city. The type of greening in the case of area-wide application plays a rather subordinate role for the street level air temperature. However, it has a major impact on the roof temperatures and thus on the insulation of the attics as well as the heating and cooling energy requirements. Intensive green roofs with higher substrate depth and plant size lower the roof temperature during the day more than extensive green roofs. The daily temperature amplitude is also lower on intensively greened roofs than on extensively greened roofs. Additionally, the thicker substrate layer of the intensive green roof enables a higher water retention during heavy rain events. The positive and balancing thermal effect of an irrigated or water-saturated green roof is particularly evident during prolonged heat and dry periods.

## 1. Einleitung

Angesichts der weltweit steigenden urbanen Bevölkerung und der zunehmenden Klimaerwärmung ist die Anpassung an die Folgen des Klimawandels eines der wichtigsten Handlungsfelder für die Stadtplanung. Wie der 6. Bericht des Weltklimarates verdeutlicht, erwarten die Wissenschaftler für den weiteren Verlauf dieses Jahrhunderts eine weiterhin deutliche Klimaerwärmung und ein Anstieg in der Häufigkeit, Andauer und Intensität von extremen Wetterereignissen in Europa und Deutschland. Sie gefährden die städtische Infrastruktur und die Versorgungssysteme besonders in Form von Starkregenereignissen mit Hochwasser und langanhaltenden sommerlichen Hitzeperioden (IPC21). Aufgrund der höheren Absorption und multipler Reflexion von solarer und thermischer Strahlung durch städtebauliche Strukturen führt vor allem eine zunehmende Bebauungsdichte zu einer Intensivierung der sog. städtischen Wärmeinsel (Urban Heat Island UHI) (NCL15). Sie stellt den Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland dar und verdeutlicht die zusätzlich erhöhte thermophysiologische Belastung der Stadtbevölkerung, die sich in einer erhöhten Morbidität und Mortalität ausdrückt. Daher besteht die Notwendigkeit die Auswirkungen des Klimawandels schon heute in der Stadtentwicklung zu berücksichtigen und geeignete Maßnahmen umzusetzen (Ber16, BBK10).

Die Ausweitung von städtischen Grünflächen ist eine Maßnahme zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (NCL15). In einem urbanen Lebensraum, in dem immer weniger Platz für Grünflächen vorhanden ist, bieten Dachflächen ein weiteres Flächenpotential (Ber16). Die mikroklimatische Wirkung von Dachbegrünung beruht vor allem darauf, dass sie die Energiebilanzgleichung der Dächer beeinflusst. Die auftreffende solare Strahlung wird bei einem herkömmlichen Dach größtenteils absorbiert und im Tagesverlauf als fühlbare Wärme abgegeben, sodass sich die Lufttemperatur der unmittelbaren Umgebung dadurch erhöhen kann (LBO14, WS22). Bei einem begrünten Dach hingegen wird ein Teil der solaren Einstrahlung durch Evapotranspiration in latente Wärme umgesetzt (Abbildung 1), was eine Reduktion der fühlbaren Wärme und der Oberflächentemperatur zur Folge hat und somit zu einer weniger starken Erwärmung der Umgebungstemperatur führt (Ber16, ATS11, WS22).



Dach- und Fassadenbegrünung haben einen positiven Einfluss sowohl auf die physische als auch auf die psychische Gesundheit: Patienten medizinischer Einrichtungen genesen schneller mit Blick auf Grünflächen (Ulr84). Darüber hinaus reduziert Vegetation Stress und fördert Aufmerksamkeit (LWS15).

## **5. Förderung der Biodiversität**

Gebäudebegrünungen fördern die urbane Artenvielfalt, indem sie Habitat und Nahrung für eine Vielzahl an Tier- und Pflanzenarten bieten. Insbesondere flugfähige Tiere, wie Insekten und Vögel, profitieren von den begrünten Flächen. Gebäudebegrünungen dienen somit als Ersatzbiotope, die versiegelte und bebaute Bodenflächen teilweise ersetzen können. Durch mehrere solcher Biotope in Städten, kann ein Netzwerk aus Biotopen entstehen, das wiederum die Gesamtartenvielfalt in und zwischen den Einzelbiotopen steigert.

## **6. Verbesserung der Luftqualität**

Gebäudebegrünungen verbessern die städtische Luftqualität durch Filterung und Feinstaubbindung an Blattoberflächen und durch Sauerstoffanreicherung mittels Photosynthese.

## **7. Lärminderung**

Bereits extensiv begrünte Dächer mit einer dünnen Substratschicht können eine Lärminderung in darunterliegenden Innenräumen bewirken. Der Lärm im umgebenden urbanen Raum wird sowohl durch Dachbegrünungen als auch Fassadenbegrünungen um bis zu ca. 10 dB reduziert (MTS21).

## **8. Energieeinsparung, Dämmung, Kühlung und Verschattung**

Im Winter führen extensive Gründächer zu Energieeinsparung von maximal 8 % auf bereits isolierten Dächern, intensive Gründächer von maximal 10 %. Im Sommer können Gründächer jedoch bis zu 84 % Energie einsparen. Je dicker die Substratschicht, desto größer ist die Dämmleistung (ZS13). Insbesondere bei Bestandsgebäuden mit schlechter Dämmleistung können Gebäudebegrünungen zu einer starken Energieeinsparung und somit indirekten Senkung von CO<sub>2</sub> Emissionen beitragen.

## **9. Photovoltaik (PV) und Gebäudebegrünung**

Bei fachlich korrekter Ausführung ist Gebäudebegrünung mit Photovoltaik hervorragend kombinierbar. Hierbei kann die Verdunstungskühlung der Pflanzen das Aufheizen der PV-Module verringern und so eine Steigerung des Energieertrags bewirken. Darüber hinaus entstehen unter den Photovoltaikmodulen auch neue Lebensraum- Nischen für Tiere (NCG16).



Der Fokus dieses Berichtes liegt auf dem Kühlungspotential von Dachbegrünung, welches bereits in vielfältigen Studien anhand von Messungen, sowie mikro- und mesoskaligen Modellsimulationen bestätigt wurde (Ber16). Die mikroklimatischen Effekte wurden am Beispiel der Stadt Essen im Projekt „Analyse der thermischen Wirkung von Dachbegrünung mittels Stadtklimamodellierung“ (ADAM) gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU Fördernummer Az 34690/01) untersucht. Dabei gingen der Deutschen Wetterdienst (DWD) in Kooperation mit dem Bundesverband GebäudeGrün (BuGG), der EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH (EFTAS), dem Umweltamt, dem Amt für Geoinformation, Vermessung und Kataster sowie dem Amt für Stadtplanung und Bauordnung der Stadt Essen zwei Jahre lang dieser Analyse nach.

## 2. Zielsetzung

Das von der DBU finanzierte Projekt „Fernerkundliche Identifizierung von Vegetationsflächen auf Dächern zur Entwicklung des für die Bereiche des Stadtklimas, der Stadtentwässerung und des Artenschutzes aktivierbaren Flächenpotentials in den Städten“ (Az 30299) gab den Anstoß für ein Nachfolgeprojekt bei dem die erzeugten Gründach(potential)datensätze mit einer gesamtstädtischen Abdeckung für die computerbasierte Stadtklimamodellierung verwertbar gemacht werden. Mit dem Fokus an die Anpassung an die Folgen des Klimawandels ermöglichen die numerischen Modellrechnungen die klimatischen Effekte von Dachbegrünung wissenschaftlich und bezogen auf die Stadtplanung zu untersuchen und auch Aussagen auf gesamtstädtischer Ebene zu treffen.

Zielgruppen des Vorhabens sind:

- Kommunale Fachbehörden (z. B. Bauamt, Stadtplanungsamt, Umweltamt, Grünflächenamt, Naturschutzbehörden, Geoinformation) und Stadträte
- Bundes- und Landesbehörden (z. B. Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie, Umweltbundesamt, Umweltbehörden der Länder)
- Planungsbüros, Architekten und ausführende Dachbegrünungsunternehmen
- Umweltorganisationen und politische Parteien

Die Projektergebnisse bieten eine fachliche Unterstützung vor allem der kommunalen Fachbehörden für Ihre Anpassungskonzepte an die Folgen des Klimawandels. Sie helfen Entscheidungen über geeignete Anpassungsmaßnahmen für verschiedene Klimawandelfolgen zu treffen und frühzeitig Vorsorgemaßnahmen gegen zukünftige Extremwetterereignisse zu planen und umzusetzen. Die hochaufgelösten und flächendeckenden Modellergebnisse geben eine Übersicht in welchen Stadtteilen und -quartieren ein besonders hoher Anpassungsbedarf besteht und inwiefern sich Dachbegrünung als Maßnahme auf die gesamte Stadt und im Fokus auf die wärmebelasteten Gebiete auswirkt. Anhand verschiedener modellierter Szenarien wird zum einen gezeigt, in welchen Maße sich Dachbegrünung in seinem aktuellen Zustand bereits auf das lokale Stadtklima auswirkt und welche Potentiale im Rahmen der Quartiersentwicklung noch ausgeschöpft werden können. Die Ergebnisse geben eine Einschätzung ob alleinige Gründachmaßnahmen ausreichend sind oder in Kombination mit anderen Maßnahmen umgesetzt werden sollten. Zusätzliche idealisierte Fallstudien zum Flächenanteil der Dachbegrünung, zur Dachbegrünungsart und zu bewässerten Gründächern geben weitere Anhaltspunkte, welche maximalen Wirkungen unter optimalen großflächigen Umsetzungen möglich wären.

## **3. Daten und Methoden**

### **3.1 Vorgehensweise und Arbeitspakete**

Die Arbeiten im Projekt gliederten sich in zwei Arbeitspakete. Im Mittelpunkt des Arbeitspaketes 1 (AP1) stand die Verarbeitung der Befliegungs- und Geodaten zur Inventarisierung und Potentialanalyse von Dachbegrünung durch die Firma EFTAS. Sowohl die Inventarisierung als auch die Potentialanalyse wurden mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung (Einzelgebäude) erzeugt um den Einsatz beider Datensätze in verschiedenen Stadtklimamodellen zu ermöglichen. Für das im Projekt genutzte Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 (3-dimensionales mikroskaliges urbanes Klimamodell) wurden die Gründachinformationen aggregiert um auf die räumliche Auflösung der Modellgitterzellen zu kommen. Die Intensitätsstärke der Dachbegrünung zur Einordnung der Gründachtypen extensiv und intensiv wurde für die Inventarisierung von Dachbegrünung anhand von Schwellwerten der berechneten NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Signale abgeleitet. Der BuGG lieferte weitere bau- und vegetationstechnische Kenndaten für die verschiedenen Gründachtypen.

Die Arbeiten im Arbeitspaket 2 (AP2) beinhalteten die Nutzbarmachung der zwei Gründachdatensätze und -parameter für das Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 sowie die Modellrechnungen für die Stadt Essen. Im Rahmen einer Fallstudie wurden Stadtklimasimulationen mit beiden Gründachdatensätzen für einen typischen windschwachen Strahlungstag im Sommer durchgeführt. Das Stadtklima wurde anhand des Tagesganges der bodennahen Lufttemperatur und der Gefühlten Temperatur untersucht. Für die Berechnung der Gefühlten Temperatur wurde das beim DWD entwickelte Klima-Michel-Modell verwendet. Die thermische Wirkung der Dachbegrünung wurde anhand der Lufttemperatur und verschiedener meteorologischer Größen auf dem Gründach untersucht. Neben den Simulationen für die Stadt Essen wurden auch idealisierte Stadtklimasimulationen mit verschiedenen Gründachtypen durchgeführt. Ferner wurde ebenso eine länger andauernde Hitzeperiode von 4 Tagen simuliert um die Wirkung eines Gründaches bei länger anhaltendem Wassermangel oder bei ausreichender Wasserzufuhr (Retentions Gründach) zu quantifizieren. Charakteristisch für Retentionsgründächer ist der Rückhalt von Regenwasser. Der durch den Rückhalt gedrosselte und zeitverzögerte Ablauf entlastet die Kanalisation und Vorfluter. Retentionsgründächer können wesentlich zum Überflutungsschutz eines Objektes beitragen und entsprechend als Maßnahme nach DIN 1986-100 berücksichtigt werden. Sie lassen sich als extensive oder intensive Begrünungen ausführen. Die heute üblicherweise als „Retentionsgründächer“ bezeichneten Dachbegrünungen haben folgendes Funktionsprinzip:

In der Dränschicht unter dem Substrat wird ein temporärer und/oder dauerhafter Wasserspeicher geschaffen, über dem zusätzlich eine extensive oder intensive Dachbegrünung eingebaut wird. Die Dachbegrünungen erhalten zusätzlichen Retentionsraum. Das zwischengespeicherte Niederschlagswasser steht den Pflanzen je nach Dränplatte auf dem Dach zur Verfügung oder wird zeitversetzt abgeleitet. Mit dem Retentionsgründach lässt sich die maximale Abflussspende über ein Anstaulement (sogenannte Drossel) einstellen und gedrosselt über mehrere Stunden bis hin zu Tagen ableiten. So können Starkniederschläge im Retentionsraum zurückgehalten und gedrosselt abgegeben werden (ABB22).

Daraus kann sich beispielsweise das Konzept der „Schwammstadt“ entwickeln, dass in der Stadtplanung immer häufiger Berücksichtigung findet. Die Kernidee dieses Konzeptes ist es, anfallende Niederschläge in der Stadt an vielen verschiedenen Orten aufzunehmen und wie ein Schwamm zu speichern, anstatt diese zu kanalisieren und abzuleiten.

## **3.2 Untersuchungsgebiet Stadt Essen**

Um alle für das Stadtklima wichtigen topografischen Erhebungen und Kaltlufteinzugsgebiete zu erfassen, wurde ein auf Essen zugeschnittenes 38 km x 38 km großes Modellgebiet (Abbildung 2) für die Simulation mit MUKLIMO\_3 ausgewählt. Das Modellgebiet umfasst zentral gelegen die Stadt Essen und weitere Teile umliegender Städte und Kreise wie zum Beispiel Bochum, Herne, Gelsenkirchen, Bottrop, Oberhausen und Mülheim an der Ruhr. Das Modellgebiet und alle Eingangsdaten beziehen sich auf das Koordinatensystem ETRS89 UTM32N (EPSG code = 25832). Die Koordinaten der Südwestecke (linke, untere Ecke) des Modellgebietes sind  $xllcorner = 346000$  und  $yllcorner = 5681900$ . Für die Stadtklimaanalyse von Essen wurden alle Modellrechnung mit einer konstanten (äquidistanten) Gitterweite von 100 m durchgeführt.



Abb. 2 Topografische Karte des MUKLIMO\_3 Modellgebietes für Essen (Quelle: BKG WMS Digitale Topographische Karte 1:250.000). Die Stadtgrenze ist als lila Linie dargestellt (Quelle: BKG).

In vertikaler Richtung hat das orthogonale Modellgitter ausgehend von der niedrigsten Geländehöhe im Modellgebiet von ca. 12 m über dem Meeresspiegel (Normalhöhennull NHN) bis zu 312 m über NHN eine Gitterweite von 10 m. Zwischen 312 m über NHN und der Obergrenze des 3-dimensionalen Modells in ca. 730 m über NHN nimmt die vertikale Gitterweite schrittweise von 10 m auf 50 m zu. Darüber erhöht sich die vertikale Gitterweite bis auf 100 m, sodass das 1-dimensionale Vorschaltmodell von MUKLIMO\_3 bis in ca. 2120 m über NHN reicht (Sie16).

### 3.3 Erstellung des Gründachkatasters und Gründachpotentialkatasters

Die gemeinsam vom Deutschen Dachgärtner Verband e.V. (DDV) und Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelten Software zur fernerkundlichen Inventarisierung und Potentialanalyse von Dachbegrünung (AZE15, AZE16, ZEA15) wurde genutzt um ein Gründachkataster und Gründachpotentialkataster für das MUKLIMO\_3 Modellgebiet der Stadt Essen zu erstellen.

#### 3.3.1 Bestandsanalyse

Die Analyse von bestehenden Gründächern basiert auf der Berechnung des NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Vegetationsindizes aus den Luftbildaufnahmen für alle Polygone der Katasterdaten der Gebäudeumrisse. Der NDVI beruht auf der Tatsache, dass gesunde Vegetation im roten Bereich des sichtbaren Spektralbereichs relativ wenig und im darauffolgenden nahen Infrarot-Bereich relativ viel Strahlung reflektiert. Je vitaler (grüner) die Pflanze, desto größer ist der Anstieg des Reflexionsgrades in diesem Spektralbereich. Andere Oberflächenmaterialien, wie Boden, Fels oder auch tote Vegetation, zeigen keinen solchen kennzeichnenden Unterschied des Reflexionsgrades beider Bereiche.

Die berechneten NDVI-Werte werden nach zuvor definierten qualitativen und quantitativen Parametern ausgewertet. Bei der qualitativen Analyse werden anhand von Schwellenwerten für ein schwaches, mittleres und starkes NDVI-Signal drei Vegetationsklassen gebildet. Die Klassen schwach und mittel beschreiben verschiedene Intensitätsstärken von Dachbegrünung, ein starkes Vegetationssignal wird mit Baum- oder Strauchvegetation gleichgesetzt. Die so ermittelten Vegetationsklassen werden dann je Katasterpolygon quantitativ ausgewertet.

Die Software definiert als Standardeinstellung folgende quantitative Schwellenwerte:

- ***Schwellenwert der minimalen Dachfläche, die vegetationsbedeckt sein muss***

Die Mindestgröße von 10 m<sup>2</sup> für die identifizierte Vegetationsfläche pro Dach soll davor schützen, sehr kleinflächige Begrünungen (Blumenkästen und Töpfe, punktuelle Spontanbegrünungen) irrtümlicherweise als Gründächer zu klassifizieren.

- ***Schwellenwert des Mindestanteils der Dachfläche, der vegetationsbedeckt sein muss***

Auch dieser Wert wird dazu verwendet, ein quantitatives Kriterium für die Erfassung der Gründachflächen zu setzen. Für große und kleine Dächer sind unterschiedliche Mindestanteile definiert. In der Standardeinstellung liegt der Wert für größere Dächer

(> 100 m<sup>2</sup>) bei 10 % und für kleinere Dächer (< 100 m<sup>2</sup>) bei 20 % Vegetationsbedeckung.

Dachflächen, welche die Schwellenwerte für die minimale vegetationsbedeckte Fläche und den minimalen prozentualen Grünanteil überschreiten, werden vom Programm als Gründächer klassifiziert. Weitere Informationen über die verwendete Analyseverfahren sind im Benutzerhandbuch zur verwendeten Software zu finden (ZEA15).

### **3.3.2 Potentialanalyse**

In der Potentialanalyse werden nicht begrünte Dachflächen auf ihre nachträgliche Begrünbarkeit hin untersucht. Wichtigstes Kriterium ist hierbei die Dachform bzw. die Dachneigung mit dem Fokus der Identifizierung von Flachdächern, da der technische und finanzielle Aufwand der Begrünung von Flachdächern im Gegensatz zu Schräg- und Steildächern deutlich geringer ist. Zudem indiziert die Software Dächer, die aufgrund ihrer Spektralsignatur einen Kiesbelag aufweisen könnten, da ein Kiesbelag den Rückschluss auf eine geeignete Statik des Daches erlaubt.

Zur Erfassung der Spektralsignatur werden die vier Farbwerte verschiedener Kiesreferenzflächen manuell erfasst und aus Minimal- und Maximalwerten Schwellenwertspannen definiert. Alle Pixel, die innerhalb der Schwellenwertspannen liegen, werden als Kiespixel ausgewiesen und führen in der Summation pro Polygon ggf. zu einer Kiesdachausweisung. Es ist zu beachten, dass spektrale Kenngrößen des Kiesbelages in den Luftbildern z. B. sehr stark vom Feuchtigkeitszustand der Kiesschicht während des Aufnahmezeitpunktes beeinflusst werden können und auch sehr stark von dem gewählten Stretching der Farbwerte in der Vorverarbeitung der Befliegungsdaten abhängen (ZEA15).

### **3.3.3 Einsatzgebiet des Verfahrens**

Die fernerkundliche Methodik der Bestimmung von Gründächern richtet sich vor allem an kommunale Fachbehörden, die sich mit kommunalen Klimawandelanpassungsstrategien befassen. Daten zu begrünten und potentiell begrünbaren Dachflächen können eine wichtige Grundlage darstellen, um das für die Bereiche des Stadtklimas, der Stadtentwässerung und des Artenschutzes aktivierbare und bereits genutzte Flächenpotential auf den Dachflächen quantitativ zu erfassen, zu lokalisieren, zu monitoren und gezielt weiter zu entwickeln. Die genannte fernerkundliche Methode bietet die Möglichkeit, einen solchen Datensatz mit einem ressourcensparenden hohen Automatisierungsgrad und einem entsprechend geringen manuellen Aufwand zu erstellen.

Folgende Fehlerquellen können auftreten:

- Überschirmungen der Dachflächen durch Bäume und Sträucher
- Verkippungseffekte bei Luftbildaufnahmen (Bei einer nicht senkrechten Betrachtung von oben könne Gebäude nach außen verzerrt dargestellt werden, sodass die Dachflächen nicht lagegetreu abgebildet werden)
- Dachneigung
- PV-Anlagen

Grundsätzlich ist die Qualität der Eingangsdaten von wesentlicher Bedeutung, wie

- Synchronität der Luftbild- und Katasterdaten
- Homogenität der Katasterdaten hinsichtlich der Dachform und -neigung
- Homogenität der Luftbilder hinsichtlich Aufnahmezeitpunkt und atmosphärischer Parameter
- Sonnenstand bei der Luftbildaufnahme (Verschattungen)

Mit den gegebenen Einstellungsparametern können Schwächen in den Eingangsdaten bis zu einem gewissen Grad abgefangen werden. Jedoch ist die Festlegung der Schwellenwerte immer ein Balanceakt. Daher wird empfohlen die Klassifizierung der Gründach- und Potentialflächen in einem nachgelagerten Screening nochmals visuell zu überprüfen.

### **3.3.4 Verwendete Daten und Verarbeitung**

Basierend auf den für Nordrhein-Westfalen (NRW) flächendeckend vorliegenden digitalen Orthophotos und Dachflächendaten aus dem 3D-GM LoD2 City (3D-Gebäudemodell) sowie den Hausumring-Daten aus dem ALKIS-Liegenschaftskataster werden nach der in AZE15 und AZE16 beschriebenen fernerkundlichen Methode, unter Berücksichtigung des dort genannten Handbuchs und Programms zum Verfahren nach ZEA15, die existierenden Gründächer und Kiesdächer mit Hilfe von NDVI-Schwellenwerten für das MUKLIMO\_3 Modellgebiet Essen identifiziert.

Die Eingangsdaten selbst stammen von opengeodata.nrw und liegen in folgender Form vor:

- 1560 digitale Orthophotos (1x1 km, 10 cm Auflösung, JPEG2000, 10-fache Kompression) als Einzelkacheln mit 6 Aufnahmezeitpunkten (Abbildung 3)
- Datensatz hu\_nw\_EPSG4647\_Shape.zip mit den Hausumring-Polygonen für ganz NRW
- 3D-GM LoD2 City (3D-Gebäudemodell) pro Kreis/Stadt

Die Luftbildbefliegungen in NRW werden immer partiell im Dreijahresturnus und dabei im Wechsel zwischen außerhalb und innerhalb der Vegetationsperiode durchgeführt. Es



existierten zum Datum der Projektbearbeitung 49 verschiedenen Aufnahmezeitpunkte der digitalen Orthofotos (DOPs) für NRW.

In Anbetracht des gegebenen Projektraumens wurden drei unterschiedlich priorisierte Bearbeitungsteile (im Projekt Prozessierungspakete kurz PPs genannt) festgelegt (Abbildung 2) und mit individuell angepassten Softwareparametern (insbesondere hinsichtlich der drei Schwellenwerte für die NDVI-Klassifizierung zur Vegetationsunterscheidung) analysiert. Dabei wurden die vorher zusammengeführten Eingangsdaten entsprechend der PPs nach aufgeteilt.

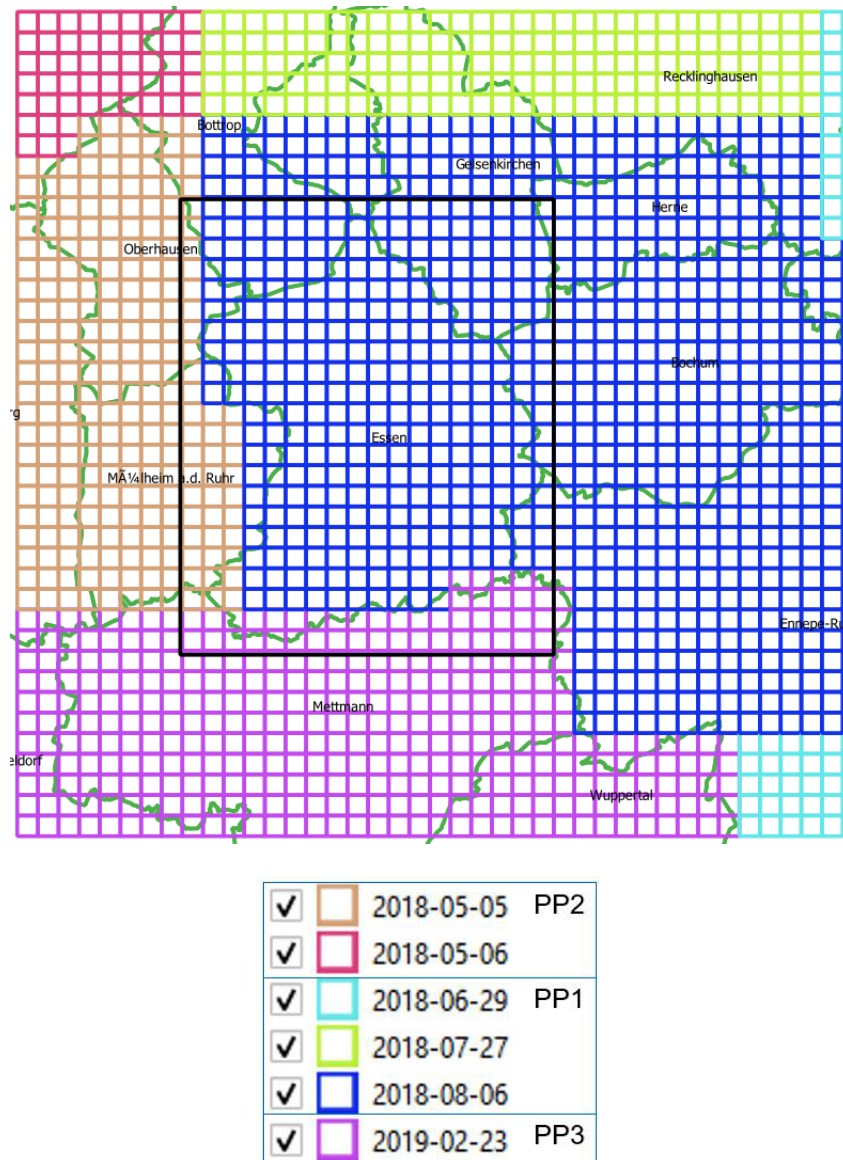


Abb. 3 Aufnahmezeitpunkte der digitalen Orthophotos (Eingangsdaten) welche zur Bestimmung der Gründächer verwendet wurden (Quellen: BKG und Open Geodata NRW).

Der Großteil des Modellgebietes wurde abgedeckt durch DOPs mit dem Aufnahmezeitpunkt 6.8.2018. Daher wurden die spektralen Schwellenwerte für diese Abdeckung als erste Priorität festgelegt. Die Parametrisierung und Schwellenwertdefinition für die PPs erfolgten anhand

einer Stichprobe aus 54 Referenzpolygonen, welche die verschiedenen Dachausprägungen abbildeten. Für die Justierung der Schwellenwerte wurde die Software solange iterativ mit leicht veränderten Werten zur Analyse der Stichprobe eingesetzt, bis die Ergebnisse der visuellen Einschätzung möglichst optimal entsprachen. Zu den Schwellenwerten, die besonders genau an die Qualität der Eingangsdaten angepasst werden, gehören die NDVI-Schwellenwerte für ein niedriges, mittleres und starkes Vegetationssignal. Zustand und Vitalität der Vegetation können stark von der Jahreszeit der Luftbildaufnahmen und den Wetterbedingungen (Niederschlag, Trockenheit) im Vorfeld der Aufnahmen beeinflusst werden. Die Schwellenwerte müssen in der Regel gerade dann individuell angepasst werden, wenn die Vegetationsaufnahme zu einem frühen Zeitpunkt der Vegetationsperiode oder nach einer für die Vegetation ungünstigen längeren Wetterperiode erfolgte. Durch die flexibel veränderbaren Schwellenwerte der Einstellungsparameter lassen sich sehr unterschiedliche Fragestellungen beantworten. Die Festlegung des niedrigen NDVI-Schwellenwertes für die Vegetationserkennung im Luftbild gehört dabei zu den wichtigsten Einstellungen. Sollen z. B. auf jeden Fall alle Gründächer in der Stadt erkannt werden (inkl. Dachflächen mit schütterem Bewuchs und geringer Vitalität) und nimmt man dafür in Kauf, bei einer nachgelagerten visuellen Überprüfung viele Spontanbegrünungen und Falschzuweisungen wieder entfernen zu müssen, kann der Schwellenwert sehr niedrig angesetzt werden. Wird bei der Auswertung hingegen Wert daraufgelegt, nur wirkliche Gründächer (flächige, vitale Vegetationsbedeckung) zu erfassen, kann der untere NDVI-Schwellenwert höher angesetzt werden. Dabei besteht aber die Gefahr, dass einige schlecht bewachsene Gründächer durch das Raster fallen. In ähnlicher Weise kann auch die Fixierung der Schwellenwerte für die Mindestfläche und den Mindestanteil diskutiert werden. Aufgrund der großflächigen städteübergreifenden Anwendung der Methode wurde keine visuelle Überprüfung der Dächer vorgenommen. Daher wurden die Schwellenwerte so eingestellt, dass ein möglichst gutes Gesamtergebnis erzielt wird.

Aufgrund der Vergleichbarkeit der Vegetationsentwicklung und insbesondere des Belaubungszustands wurden für das PP1 mit den ermittelten Schwellwerteinstellungen auch die Aufnahmezeitpunkte 27.7.2018 und 29.6.2018 analysiert.

Ursprünglich sollten die DOPs der Aufnahmezeitpunkte 5.5.2018 und 6.5.2018 des PP2 ebenfalls mit den Schwellwerteinstellungen von PP1 analysiert werden. Die ersten Ergebnisse führten aber zu dem Schluss, die Einstellungen für eine höhere Qualität zu adaptieren.

Mit dem Aufnahmezeitpunkt 23.2.2019 liegen DOPs für das PP3 außerhalb der Vegetationsperiode vor. Zur Analyse wurden Schwellwerte genutzt, die innerhalb eines anderen Projekts für eine ähnliche Periode nach oben erläuterten Prinzip ermittelt wurden.

Für die Erstellung der PP1-Stichprobe wurden 54 Polygone mit verschiedenen Dachoberflächen manuell aus einem Aufnahmezeitpunktgebiet räumlich verteilt ausgewählt. Kiesdächer wurden dabei auf Grundlage des „vor-Ort-Wissens“ der Stadt Essen bestimmt.

Die Polygone wurden zunächst mit den Standardeinstellungen der Schwellenwerte analysiert und die Ergebnisse pro Dach auf die ausgegebenen Vegetationsanteile bewertet. Ausgehend von der Bewertung wurden die Schwellenwerte angepasst und die Ergebnisse erneut pro Dach begutachtet. Diese Anpassungsschleife wurde solange durchlaufen, bis weitere Iterationen keine Verbesserung der Gesamtergebnisse erzielten. Wie oben bereits aus dem Handbuch zitiert, bedingt die Schwellenwertfindung unter Umständen Kompromisse, da eine optimale Einstellung für ein Dach, für ein anderes Dach ggf. eine sehr schlechte Einstellung darstellt. Daher wurde auch der Ansatz gewählt, die Stichprobe auf einen möglichst homogenen DOP-Bestand zu beziehen und die Polygonanzahl so zu wählen, dass deren detaillierte Bewertung effizient ist.

Im Rahmen der Bereitstellung der Stichprobenanalysen wurde auf folgende Herausforderungen bei der Findung des optimalen Schwellenwerts hingewiesen, bzw. es wurden folgende Situationen angesprochen:

- „Graue Dächer“ werden fälschlicherweise als Kiesdächer ausgegeben
- Durch Aufnahmezeitpunkte mit tiefem Sonnenstand (insbesondere im Frühjahr) gibt es sehr viele Überschattungen von Dachflächen, die zu einem NDVI-Signal innerhalb der Schwellenwertgrenzen und somit zur falschen Ausweisung von Grünflächenanteilen / Gründächern führen können.
- Die Unterscheidung zwischen einem Dach mit schütterer Spontanbegrünung, einem alten Dach mit diversen Moosfeldern oder einem geplanten, aber (ggf. noch) nicht gut funktionierendem Gründach ist schwierig.
- Herausfordernd ist die Einstellung des Schwellenwertes für die Gehölzklasse, um einerseits möglichst gut die Baumkronen-Überschirmungen außen vor zu lassen, andererseits nicht die ganz intensiven Begrünungs-Anteile mit in die Gehölzklasse fallen zu lassen. Hier gibt es einen nicht zu vermeidenden Überschneidungsbereich insbesondere bei Dächern mit dichtem Rankenbewuchs (z. B. Efeu).

Im weiteren Bearbeitungsverlauf wurden unter Absprache weitere Optimierungen getroffen. Da die Ergebnisse für PP2 mit den Schwellwerteinstellungen von PP1 nicht überzeugend waren, wurde als erstes entschieden, die Einstellungen für PP2 individuell anzupassen. Ebenfalls wurde entschieden, für jedes PP die GIS-Selektion und Ausweisung von Dächern durchzuführen, die aufgrund von Beschattung fälschlicherweise als Gründach eingestuft wurden.

Zusätzlich wurden, um die Ergebnisse möglichst gut in den Arbeiten des DWD einsetzen zu können, die Hausumring-Daten des AOI mit den Analyseinformationen angereichert. Die HU-Polygone, für die Teildachflächen mit Gründachanteil bzw. Potentialanteil erfasst wurden, erhielten eine entsprechende Kennung. So sind auch Statistiken möglich, die nicht nur die analysierten Teildachflächen beinhalten, sondern auch solche, die sich auf den Gesamtbestand der Dachflächen beziehen.

Die finale Lieferung der Firma EFTAS bestand aus separaten Ergebnis-Shapefiles der jeweiligen PPs, welche jeweils alle von der Software ermittelten Attribute enthielt. Zusätzlich wurden Attribute erzeugt, die pro Polygon angeben, welche Aufnahmezeitpunkte die jeweils zu Grunde liegenden DOPs haben und mit welchen Schwellwerten die Analyse durchgeführt wurde (Tabelle 1).

Tab. 1 Auswahl der digitalen Orthophotos nach Datum

Attribut	Erklärung
DOP_DATUM1	Datum des DOPs auf dem das Polygon liegt
DOP_DATUM2	Datum des zweiten DOPs auf dem das Polygon liegt, falls es auf zwei unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten liegt
Datum_SW	Datum des Aufnahmezeitpunktes der DOPs auf dessen Grundlage die Schwellwerte eingestellt wurden

### 3.3.5 Ergebnisse der Inventar- und Potentialanalyse

Es zeigten sich pro DOP-Aufnahmezeitpunkt durchaus unterschiedliche Ergebnisqualitäten. In der Regel wurden deutlich mehr Gründächer ausgewiesen, als es der Realität bzw. dem Bestand entspricht.

Der maßgebliche Indikator für die Gründachbewertung ist der NDVI-Wert. Der NDVI wird aus dem Quotienten von Differenz und Summe der Strahldichten des nahen Infrarots und des roten Spektralbereiches berechnet ( $[NIR-Rot] / [NIR+Rot]$ ). Aus dieser Ratio-Bildung ergeben sich einige Zusammenhänge, die in der Anwendung auf heterogene DOP-Bestände bei diesem Ansatz zu unterschiedlichen Ergebnisqualitäten führten.

Der stärkste Einfluss auf die Ergebnisvariabilität ist die Phänologie. Jahreszeitliche und umwelt-spezifische Einflüsse auf die Vegetationsvitalität drücken sich unmittelbar im NDVI aus.

Ein anschauliches Beispiel ist der signifikant sinkende NDVI-Wert bei Vertrocknung von krautiger Vegetation (CHD07). So mussten die Schwellwerte für die extensive Vegetationsklasse gerade bei den Aufnahmezeitpunkten außerhalb der Vegetationsperiode

sehr niedrig angesetzt werden, um überhaupt eine Indikation zu erhalten und war dann sehr anfällig für NDVI Streuungen durch die spektralen Reflexionen offener Oberflächenanteile bzw. in der Kombination aus Bodenbedeckungsgrad, Substrat und Vegetationsart und -vitalität (CHD07), denn dieser Index wird generell auch von Bodeneigenschaften und den atmosphärischen Bedingungen beeinflusst (KCK20). Eine weitere Fehlerquelle in diesem Zusammenhang ist die Tatsache, dass auch die NDVI-Werte von Schatten von Gebäuden oder höherer Vegetation im niedrigen Bereich liegen (CHD07).

Auch bei hohen NDVI-Werten gestaltet eine heterogene DOP-Datenbasis die Differenzierung etwa zwischen dichten Beständen an annueller Vegetation und Gehölzen schwierig. Der NDVI steigt in dichten Beständen stark an, stagniert aber ab einem bestimmten Anteil an grüner Blattoberfläche, d. h. sättigt in diesem Bereich und Unterschiede in der Vitalität und Intensität zwischen etwa einer dichten Baumkrone, einem dichten Efeubewuchs oder einem sehr dichten Gräserbestand können dann kaum mehr festgestellt werden.

Vor diesem Hintergrund wurden nach der Analyse die einzelnen PP-Ergebnisse mittels individuell angepasster GIS-Operationen für Schattendächer verbessert.

Um in den Lieferungen pro Polygon nachvollziehen zu können, ob eine Umcodierung stattgefunden hat, wurden verschiedenen Codes für das Attribut [gruendach] vergeben. Statt der binären Unterscheidung 0 für „Kein Gründach“ und 1 für „Gründach“ ist der Wert 3 für Dächer hinzugekommen, die aufgrund einer Schattensituation als Gründach eingestuft wurden.

### **3.4 Stadtklimamodellierung mit MUKLIMO\_3**

Das DWD Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 wurde speziell zur Untersuchung stadtklimatologischer und geländeklimatologischer Fragestellungen entwickelt (SZ86, Sie90, Sie95, Sie12, Sie16). Basierend auf den Prinzipien der Massenerhaltung, Energieerhaltung und Impulserhaltung berechnet MUKLIMO\_3 auf einem 3-dimensionalen Rechengitter den Tagesgang des Windes, der Lufttemperatur und -feuchtigkeit, der solaren und thermischen Strahlung, der Temperatur und des Feuchtegehalts im Erdboden sowie vieler weiterer relevanter Parameter.

Die räumliche Auflösung des Modells liegt typischerweise zwischen wenigen Metern und wenigen hundert Metern. Die Rechengitterweiten können im Modellgebiet horizontal und vertikal variiert werden, wobei typischerweise in Bodennähe und in dem im Untersuchungsmittelpunkt stehenden Teil des Modellgebiets die höchste Auflösung gewählt wird. Die für die Simulationen benötigten Anfangs- und Randwerte für das dreidimensionale Modellgebiet werden durch eine zusätzlich ablaufende 1-dimensionale MUKLIMO\_3 Simulation mit ländlicher Landnutzung bestimmt. Simulationen mit MUKLIMO\_3 werden meist

für Zeiträume zwischen mehreren Stunden und wenigen Tagen durchgeführt. Da die Modellphysik von MUKLIMO\_3 keine Niederschlagsbildung enthält, kann das Modell nur für niederschlagsfreie Situationen eingesetzt werden. Neben den meteorologischen Eingangsgrößen benötigt das Modell für jede Gitterzelle die Geländehöhe und Informationen zur Art der Landbedeckung und deren physikalischen Eigenschaften. Diese werden teilweise in Form einer Parametertabelle (Landnutzungstabelle), teilweise in Form von Rasterdaten (Abbildung 5) zur Verfügung gestellt.

Die Berechnung der Lufttemperatur in bebauten Gebieten berücksichtigt zusätzlich zu den im Umland relevanten Prozessen die Reflexion und Absorption von Strahlung durch die Gebäudeoberflächen (SF12) sowie die Speicherung von Wärme in den Gebäuden. Es werden jedoch nicht die einzelnen Gebäude aufgelöst, sondern die Bebauung wird in Form eines porösen Mediums repräsentiert. Die Beschreibung des Wärme- und Feuchtehaushalts des Bodens erfolgt nach der Methode von SFZ83. Das Vegetationsmodell basiert auf einem erweiterten Ansatz nach SSZ92. Gesteuert wird das Programm durch eine sogenannte Standardeingabedatei, die im Weiteren als „Namelist“ bezeichnet wird. Sie ist die Eingabedatei des Modells und beinhaltet alle vorgebbaren Spezifikationen. Weitere Details zum Modell MUKLIMO\_3 finden sich in Sie16, FKR11 und Nop17.

### **3.4.1 MUKLIMO\_3 Eingangsdaten**

Für die Darstellung der Landbedeckungen im Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 werden sowohl deren Art, als auch verschiedene Parameter zur Beschreibung der städtisch, bebauten Eigenschaften auf dem Modellgitter benötigt. Im Copernicus-Vorhaben „GMES Urban Atlas für die Stadtklimamodellierung“ (kurz GUAMO) hat der DWD eine Software entwickelt, die basierend auf Produkten des Copernicus Land Monitoring Services (CLMS) und des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) teilautomatisiert die Eingangsdaten für das Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 erzeugt (HKF18, Abbildung 4).

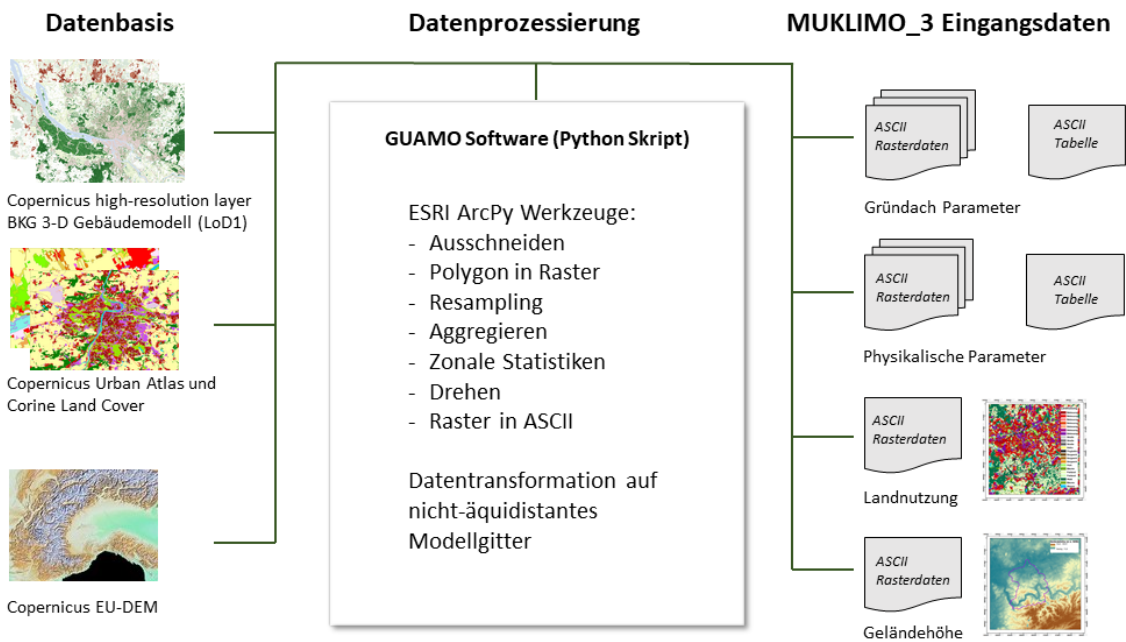


Abb. 4 Schematischer Ablauf der Aufbereitung. Die verschiedenen Eingangsdaten werden auf das gewünschte MUKLIMO\_3 Rechengitter und Format transformiert (Abbildung erweitert nach HKF18, Quelle: Copernicus CLMS).

Zur Ableitung der von MUKLIMO\_3 benötigten klassenbasierten Landbedeckung beziehungsweise Landnutzung wurde der Copernicus Urban Atlas 2012 verwendet. In Gebieten wo keine Abdeckung durch den Urban Atlas gegeben ist, wurde auf die Copernicus Corine Land Cover (CLC) Daten 2012 zurückgegriffen. Die Abbildung 5 zeigt die MUKLIMO\_3 Eingaberaster der Geländehöhe in der Einheit Meter über Normalhöhennull (NHN) und die räumliche Verteilung der Landnutzungsklassen für das Modellgebiet Essen.



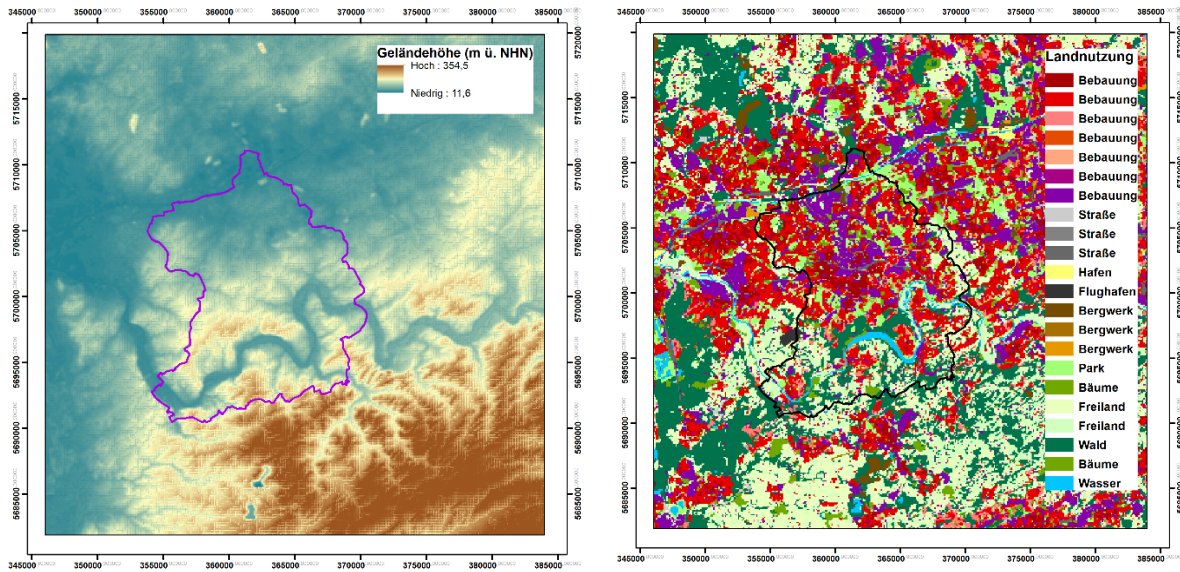
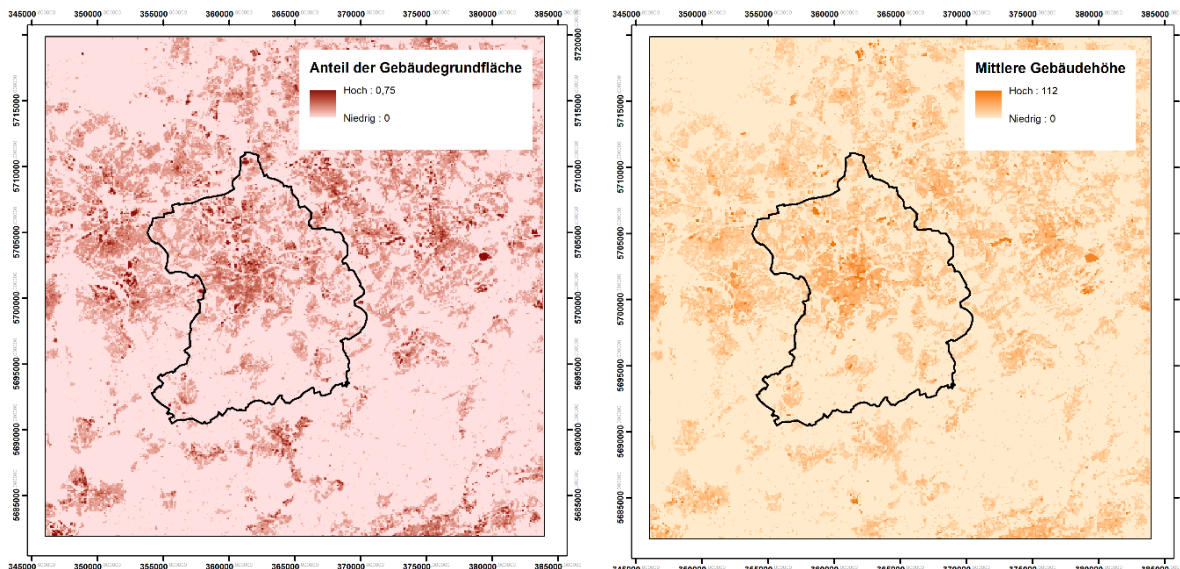


Abb. 5 MUKLIMO\_3 Eingangsdaten: Geländehöhe (links) und Landnutzung (rechts) Die lila bzw. schwarze Linie kennzeichnet das Stadtgebiet Essen (Quellen: BKG und Copernicus CLMS).

Einige von MUKLIMO\_3 benötigte, physikalische Parameter der Landnutzung liegen als Mittelwerte je Landnutzungs-kategorie vor. Andere Parameter können räumlich detaillierter in Form von Rasterdaten für jede Gitterzelle des Modellgebietes vorgegeben werden, zum Beispiel der Grundflächenanteil der Gebäude, die mittlere Gebäudehöhe und die Gebäudeform basierend auf dem Wandflächenindex (WAI), der das Verhältnis der Wandflächen zur Grundfläche des Gebäudes beschreibt (Abbildung 6). Alle drei Parameter werden aus dem 3D-Gebäudemodells LoD1 des BKG bestimmt.





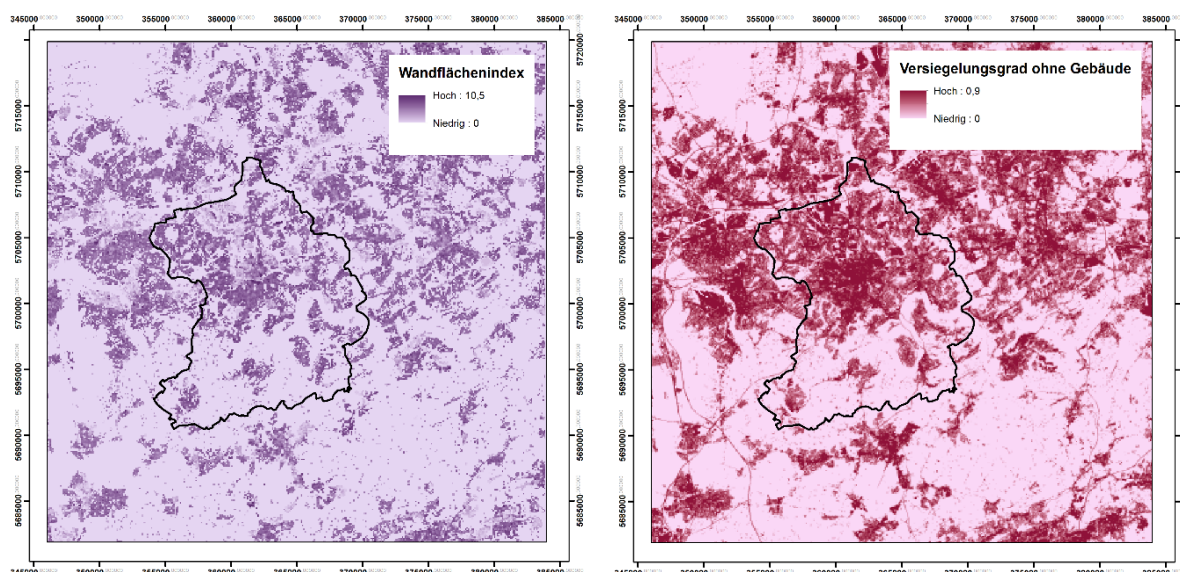


Abb. 6 MUKLIMO\_3 Eingangsdaten: Gebäudegrundflächenanteil (links, oben), mittlere Gebäudehöhe (rechts, oben), Wandflächenindex (links, unten) und Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden (rechts, unten). Die schwarze Linie kennzeichnet das Stadtgebiet Essen (Quellen: BKG und Copernicus CLMS).

Der Versiegelungsanteil zwischen den Gebäuden und der Baumbestandsanteil werden auf Basis der Copernicus High Resolution Layer „Imperviousness“ (Versiegelungsgrad) und „Forests“ (Wald) abgeleitet.

Für die Landnutzungsklassen mit Bebauungsanteil enthält die Tab. A1 im Anhang eine Auflistung der über das Gesamtmodellgebiet gemittelten Parameter des Gebäudegrundflächenanteils, der Gebäudehöhe, des Versiegelungsgrads des Flächenanteils zwischen den Gebäuden und des Wandflächenindex. Die räumliche Verteilung der Gebäudeparameter belegt, dass im Innenstadtbereich sowie in den Gewerbegebieten die Bebauungsdichte und der Versiegelungsgrad ohne Gebäude besonders hoch ist (Abbildung 6).

### 3.4.2 MUKLIMO\_3 Eingangsdaten zur Dachbegrünung

Für die Erstellung der zusätzlichen Eingangsdaten der Dachbegrünung wurden im Vorfeld die PP1-, PP2- und PP3-Shapefiles aus dem AP1 zu einem Shapefile aggregiert. Dieses beinhaltet alle Polygone mit bereits begrünten oder potentiell begrünbaren Dächern und entspricht dem Potentialkataster. Im nächsten Schritt wird aus diesem Datensatz nur der Teil mit den bereits begrünten Dächern extrahiert (Ist-Bestand), was mithilfe des Attributes „GruenDach = 1“ geschieht. Dies entspricht dem Gründachkataster. Ziel war es, die neuen Datensätze in ein für MUKLIMO\_3 lesbares Format zu bringen. Nach der Identifikation der Variablen, die in den Dachbegrünungsroutinen von MUKLIMO\_3 verwendet werden und die

in den Katastern als Attribute vorhanden sind, wurde aus dem Gründachkataster und dem Potentialkataster jeweils zwei neue Raster erstellt:

- ein Raster mit dem Anteil der Dachbegrünungsfläche an der Gesamtdachfläche pro Rasterzelle (GRANT)
- ein Raster mit der Dachbegrünungsart (GRC)

### ***Erstellung des Rasters mit dem Anteil der begrünten Dachflächen GRANT***

Der erste Schritt besteht darin die beiden Kataster mit einem 100 m x 100 m Gitternetz zu verschneiden. Nach der Neuberechnung der zerschnittenen Polygoneitelflächen wurde deren tatsächliche begrünte oder potentiell begrünbare Dachfläche ermittelt. Im nächsten Schritt erfolgte eine Aufsummierung dieser Dachbegrünungsflächen je Rasterzelle, sodass ein Raster mit den Gesamtflächen des Dachgrüns vorhanden ist. Diese Werte wurden in Relation zur Gesamtdachfläche mithilfe des Gebäudegrundflächenrasters gebracht, sodass sich der Anteil der begrünten Dachflächen mit einem Wertebereich von 0 bis 1 ergibt (Abbildung 7).

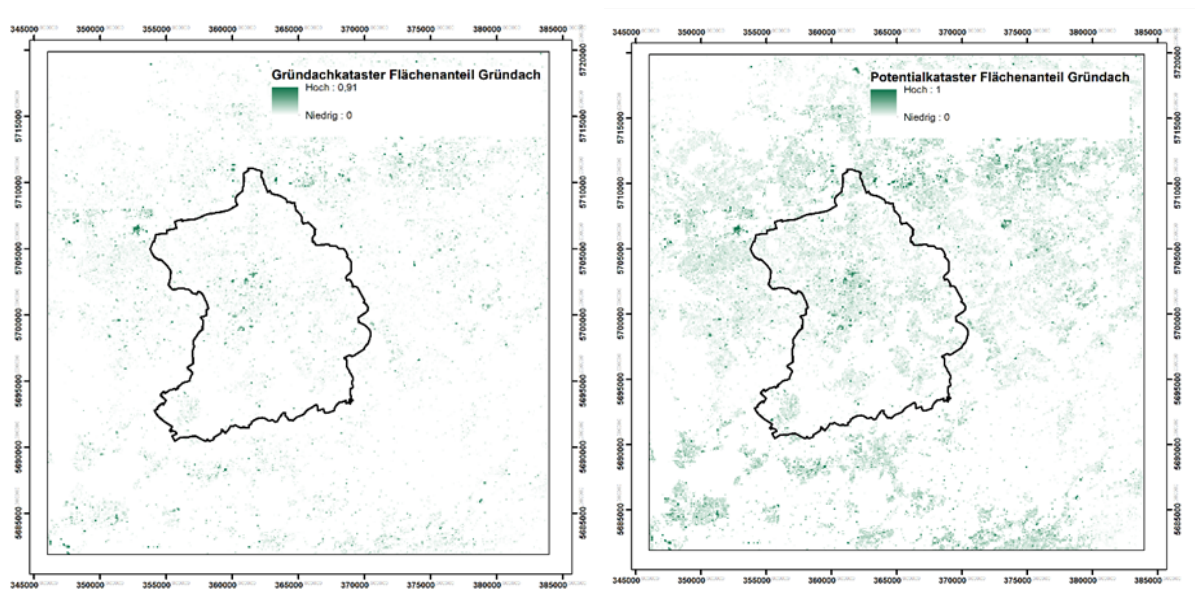


Abb. 7 Flächenanteil der Dachbegrünung am Gesamtdach für das Gründachkataster (links) und das Gründachpotentialkataster (rechts). Die schwarze Linie kennzeichnet das Stadtgebiet Essen (Quellen: BKG und Open Geodata NRW).

### ***Ableitung des Rasters mit der Art der Dachbegrünung GRC***

Beide Kataster werden zunächst nach der Begrünungsform, also extensiv und intensiv sortiert. Dafür ist im Gründachkataster das Attribut „IntGDach“ = 1 und im Potentialkataster das Attribut „PotGruen“ = 2 entscheidend für eine Zuweisung als Intensivgründach. Die Polygone mit extensiver und intensiver Begrünung werden separat mit dem äquidistanten Raster verschnitten. Es werden die jeweiligen Flächen je Rasterzelle berechnet und dem GRC-Raster

die Begrünungsform zugeordnet, deren Fläche überwiegt. Für GRC ergeben sich Werte von 0, 1 oder 2, wobei 0 keine Dachbegrünung, 1 Extensiv- und 2 Intensivbegrünung entspricht (Abbildung 8). Eine zusätzliche Einordnung in einfach intensiv begrünte Dächer ist anhand des Eingangsdatensatzes des AP1 nicht möglich.

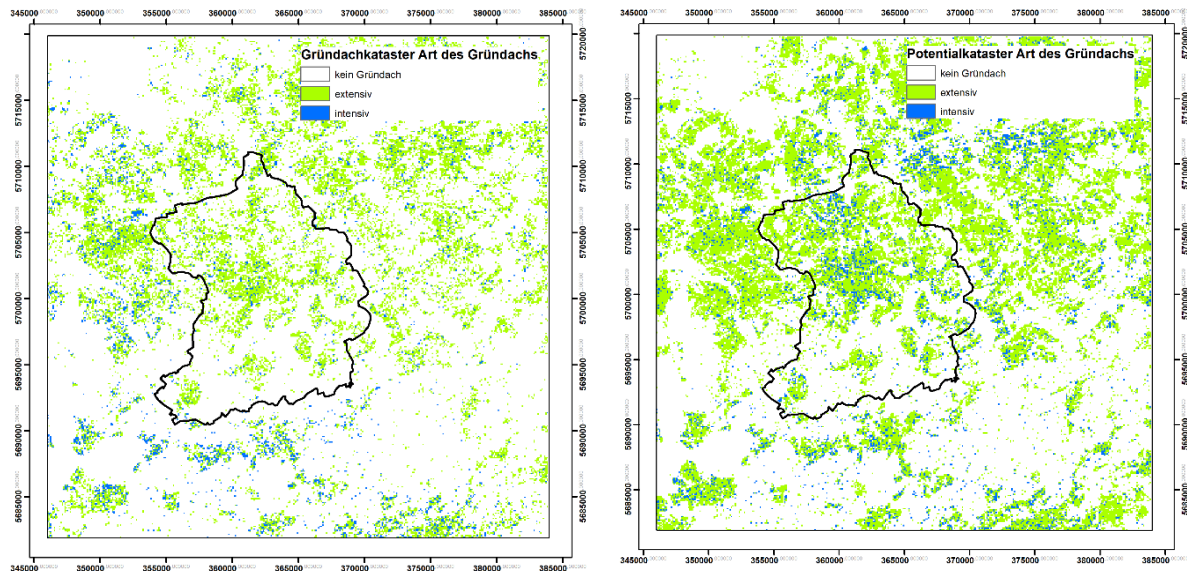


Abb. 8 Einteilung in extensive und intensive Dachbegrünung für das Gründachkataster (links) und das Gründachpotentialkataster (rechts). Die schwarze Linie kennzeichnet das Stadtgebiet Essen (Quellen: BKG und Open Geodata NRW).

Die Erstellung dieser beiden Raster wurde bereits in die GUAMO-Software integriert und benötigt zur Prä-Prozessierung nur die Aufspaltung des Gesamt-PPs in ein Gründach- und Potentialkataster.

### **Parametertabelle GRTAB**

Neben den beiden neuen Rastern findet die Zuweisung der Werte weiterer dachbegrünungsrelevanter Eigenschaften über eine sogenannte Look-Up-Tabelle statt, die im Folgenden als GRTAB bezeichnet wird. Sie wurde in Absprache mit dem BuGG befüllt bzw. anhand von Literaturdaten zusammengestellt. Folgende von MUKLIMO\_3 benötigte Variablen wurden ausgewählt:

- Code-Nummer der Gründachart (Typ)
- Tiefe des Gründachsubstrates durch die Anzahl der Bodenschichten in MUKLIMO\_3 (grd)
- Substratart angelehnt an den Bodenarten der USDA-Klassifizierung (gris)
- Minimaler Stomatawiderstand der Begrünungsart in [s/m] (rsmin)
- Blattflächenindex (englisch leaf area index LAI) (dlai)

- Durchschnittliche Höhe der Vegetation in [m] (dhc)
- Albedo der Vegetation (avg)
- Wärmeleitfähigkeit des Gründachsubstrates in [W/(mK)] (alsd)
- Wärmediffusivität des Gründachsubstrates in [m<sup>2</sup>/s] (aksd)
- Dichte des Gründachsubstrates in [kg/m<sup>3</sup>] (rhog)
- Option eines Retentionslayers (irrig)
  - 1 = Wert wird aus der namelist übernommen
  - 0 = kein Retentionslayer
  - 1 = Retentionslayer zu Simulationsbeginn wassergesättigt
  - 2 = Retentionslayer immer wassergesättigt

Eine Zusammenfassung der GRTAB bietet Tabelle 2 wobei die Klassen 1-3 einer extensiven und 4-5 einer intensiven Begrünung entsprechen. Das GRC-Raster sollte somit im Nachhinein angepasst werden je nachdem welche Extensiv- und Intensivform in der Modellrechnung verwendet werden soll. Für die Modellrechnungen mit dem Gründach und dem Gründachpotentialkataster wurden die Gitterzellen mit einer extensiven Begrünung dem Typ 2 und die mit einer intensiven Begrünung dem Typ 5 zugeordnet.

Tab. 2 Zuordnung verschiedener Eigenschaften zu den Typen der Dachbegrünung in der Gründachtabelle "GRTAB".

Typ	Art	grd	gris	rsmin	dlai	dhc	avg	alsd	aksd	rhog	irrig
1	Sedum-Moos	4 (4 cm)	1*	500	1.00	0.10	0.20	0.30	2.7e-7	780	0
2	Sedum-Moos-Kräuter	5 (8 cm)	1*	300	1.50	0.15	0.20	0.30	2.7e-7	1000	0
3	Kräuter-Gräser-Sedum	6 (15 cm)	1*	150	2.50	0.25	0.18	0.30	2.7e-7	1000	0
4	Rasen	7 (25 cm)	1*	80	5.00	0.25	0.18	0.30	2.7e-7	1000	0
5	Lavendelheide, Stauden	9 (45 cm)	1*	150	7.00	1.00	0.25	0.30	2.7e-7	1000	0

\* entspricht der Bodenart Sand

Die Daten in Tabelle 2 basieren auf den Angaben von FLL18 (grd), DLB13 (rsmin), DKD14 (rsmin, dhc), LMM10 (avg), ZTS13 (avg), ZTS14 (avg), Sie16 (alsd), VPT17 (aksd, rhog). Leichte Modifizierungen wurden noch vorgenommen nach dem Abgleich mit den Land Surface

Parametern des PALM-4U Stadtklimamodells (MGR18) und nach Rücksprache mit dem BUGG.

Um ein möglichst realistisches Abbild von Dachbegrünung in MUKLIMO\_3 zu erzeugen, beinhaltet die Tabelle zum einen vegetationspezifische Daten, die die Bewuchsintensität, den minimalen Stomatawiderstand und die Albedo beschreiben. Vor allem der minimale LAI ist eine Schlüsselkomponente für die Transpirationseigenschaft des jeweiligen Bewuchses (KSZ13). Ein höherer Wert bedeutet hierbei eine herabgesetzte Transpirationsleistung der Pflanze und somit eine bessere Anpassung an trockene Bedingungen. Zum anderen bilden die substratspezifischen Eigenschaften hinsichtlich der Thermik und der Hydraulik einen weiteren Block der Tabelle. Angesichts mangelnder Daten zu den hydraulischen Eigenschaften wurden dafür Annäherungen mittels einer Zuweisung aller Dachsubstrate zur Bodenart Sand getroffen. In Realität hingegen sind die Dachsubstrate eher als Skelettboden mit einer gröberen Korngrößenverteilung zu klassifizieren.

### **3.4.3 Berücksichtigung der neuen Dachbegrünungsdatensätze in MUKLIMO\_3**

Die Modellierung von Dachbegrünung in MUKLIMO\_3 ist ein Zusammenspiel dreier Komponenten: dem Vegetationsmodell, dem Bodenmodell und dem nicht begrünten Dach (Sie16). In der ursprünglichen MUKLIMO\_3 Modellversion konnten Dachbegrünungseigenschaften und Anteile über die Namelist oder in der Tabelle der Landnutzungsklassen (LUTAB) vorgegeben werden. Über die Namelist konnten die Anzahl der Substratschichten, die Bodenart, die Wuchshöhe, der LAI und der Bedeckungsgrad durch die Vegetation festgelegt werden. Pflanzenbezogene Eigenschaften wie z. B. die Blattalbedo und minimaler Stomatawiderstand wurden aus dem Vegetationsmodell und hydraulische und thermische Eigenschaften des Substrates aus dem Bodenmodell übernommen. Diese gelten dann einheitlich für das gesamte Modellgebiet. Außerdem wird die Bodenfeuchte an der Erdoberfläche und des Substrates auf dem Dach einheitlich initialisiert. Eine heterogene Verteilung verschiedener Dachbegrünungsarten im Stadtgebiet ist mit diesen Einstellungen nicht möglich. Ebenfalls ist die räumliche Verteilung des hier landnutzungsspezifischen Gründachflächenanteils limitiert (Sie16).

Im Rahmen des Projektes wurde das MUKLIMO\_3 Modell so angepasst, dass die Daten aus den neu erzeugten Rasterdaten GRANT und GRC, sowie die Parameterdatei GRTAB gelesen werden. Damit das Modell weiterhin funktioniert, wenn diese Raster-Dateien nicht vorhanden sind, findet eine anfängliche Abfrage statt bei der bei einem Nicht-Vorhandensein der Rasterdaten auf die Gründacheinstellung der Namelist und der Landnutzungstabelle zurückgegriffen wird.

Zu den bereits im Modell vorhandenen Parametern wurde nun mithilfe des Parameters „irrig“ (Tabelle 2) die Möglichkeit zur Berücksichtigung eines Retentionsgründachs hinzugefügt. Dabei besteht die Wahl der zusätzlichen Retentionsschicht nur zu Modellbeginn (irrig=1) oder im gesamten Simulationszeitraum (irrig=2) wassergesättigt zu setzen. Mit irrig=0 ist kein Retentionslayer vorhanden. Bei der Initialisierung des 3D-Modells wird über eine Abfrage geregelt ob die zusätzliche Schicht der Dachbegrünung hinzugefügt wird, das bedeutet, dass bei irrig=1 oder 2 eine zusätzliche unterste Substratschicht vorhanden ist. Aufgrund von fehlender hydraulischer und thermischer Informationen von Retentionslayern und deren Implementierung im Modellcode wurde auf diesen vereinfachten Ansatz zurückgegriffen. Die Substratfeuchte betreffend wurde die Feuchtestufe 6 für die Retentionslayer ausgewählt, was einer Wassersättigung gleichkommt. Die Feuchtestufe 1 hingegen entspricht dem Wassergehalt des Bodens bzw. des Substrates, welches dem permanenten Welkepunkt entspricht.

Infolge der variablen Substrattiefen war es notwendig das Bodenmodell für das Dachsubstrat umzustrukturieren sowie die Formate der Variablen anzupassen. Ebenso wurde in MUKLIMO\_3 eine ganze Reihe zusätzlicher Ausgabegrößen auf dem Dach eingebaut, die für die Untersuchung der Wirksamkeit der Dachbegrünung von Interesse sind.

#### **3.4.4 Berechnung der Wärmebelastung mit dem Klima-Michel Modell**

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



## Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur

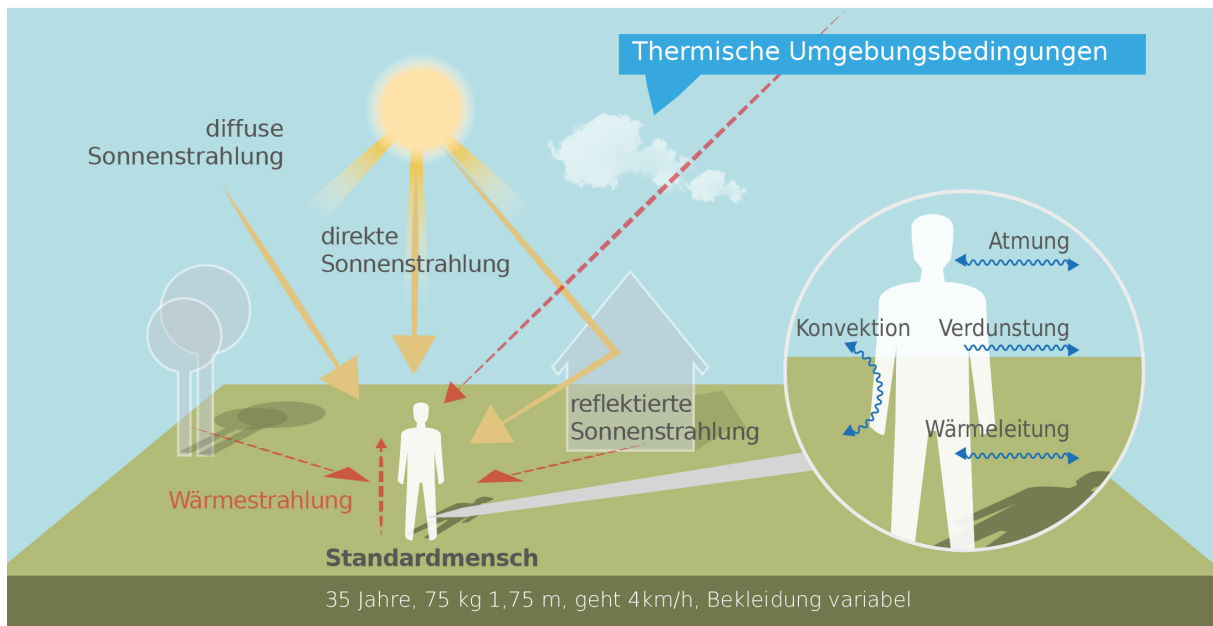


Abb. 9 Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur

Es ist belegt, dass hohe Gefühlte Temperaturen also „Wärmebelastung“ starken Stress bedeuten (Tabelle 3). Kühlere Bedingungen (aber nicht zu kalte) dagegen fordern den Organismus im Sinne eines Reizes, der die Regulationsfähigkeit des Organismus trainiert. Diese physiologische Anpassung wird durch geeignete Verhaltensweisen unterstützt, womit sich Kältereize häufig auf ein „gesundes“ Maß verringern lassen, während bei Wärmebelastung die Anpassungsmöglichkeiten eher begrenzt sind.

Aufbauend auf den MUKLIMO\_3 Simulationen wird eine biometeorologische Bewertung bezüglich der thermischen Komponente des Bioklimas durchgeführt. Diese basiert auf einer thermophysiologisch relevanten Analyse der MUKLIMO\_3 Modellergebnisse mit dem Klima-Michel-Modell (VDI08). Es verknüpft alle für den menschlichen Wärmehaushalt relevanten Größen (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Strahlung) und liefert eine Aussage über das durchschnittliche subjektive Empfinden des Menschen (Gefühlte Temperatur, Abbildung 9). Der Name „Michel“ weist auf den Durchschnittsmenschen hin (hier: männlich, 35 Jahre, 1,75 m groß, 75 kg schwer). Die Gefühlte Temperatur kann einem bestimmten Wärmeempfinden bzw. einer thermophysiologischen Belastung zugeordnet werden (Tabelle 3).

Tab. 3 Zusammenhang zwischen Gefühlter Temperatur, thermischem Empfinden und thermophysiologicaler Beanspruchung (VDI08)

Gefühlte Temperatur (°C)	Thermisches Empfinden	Thermophysiologicale Beanspruchung
unter -39	sehr kalt	extremer Kältestress
-39 bis -26	kalt	starker Kältestress
-26 bis -13	kühl	mäßiger Kältestress
-13 bis 0	leicht kühl	schwacher Kältestress
0 bis 20	behaglich	Komfort möglich
20 bis 26	leicht warm	schwache Wärmebelastung
26 bis 32	warm	mäßige Wärmebelastung
32 bis 38	heiß	starke Wärmebelastung
über 38	sehr heiß	extreme Wärmebelastung

### 3.4.5 Meteorologische Randbedingungen

Mithilfe der Namelist können die Einstellungen eines typischen windschwachen Strahlungstages im Sommer dem Modell vorgegeben werden. Vor allem die atmosphärischen Temperatur- und Feuchteprofile sowie die Umgebungstemperaturen werden hier definiert. Für die Stadtklimasimulationen von Essen basieren die Werte der Lufttemperatur und -feuchte auf den Messungen der Tage 23.7.2019, 24.7.2018 und 30.7.2018 an der DWD Wetterstation Essen-Bredeneu. Die für den Modellstart um 9 Uhr MESZ vorgegebene Werte sind in Tabelle 4 angegeben. Als Quelle dienten hierbei die frei zugänglichen Daten des Climate Data Centers des DWDs.

Tab. 4 Für die MUKLIMO\_3 Simulation verwendete mittlere Werte der Lufttemperatur und relativen Feuchte aus der Vertikalsondierung mittels Radiosonde in Essen-Bredeneu.

Höhe in [m]	Lufttemperatur in [°C]	Relative Luftfeuchte in [%]
100	25,0	51,0
500	19,0	59,0
1000	15,0	70,0

Neben den atmosphärischen Daten (z. B. Lufttemperatur, Feuchte und Wind), liefert die Wetterstation Essen-Bredeneu ebenfalls Daten der Bodentemperatur, die in Tabelle 5 mit den Temperaturen für Wasser und Innenraum genommen wurden.



Tab. 5 Startwerte für die MUKLIMO\_3 Simulation.

<b>Wind in 100 m Höhe</b>	1 m/s aus 210°
<b>Bodentemperatur</b>	20,5°C
<b>Wassertemperatur</b>	23°C
<b>Innenraumtemperatur</b>	24°C

Die Wasser- und Innenraumtemperatur werden während der gesamten Modellrechnung konstant gehalten (Sie16). Die Einschätzung der Wassertemperatur erfolgte anhand der Daten des HYGON-Portals (HYdroloGische Rohdaten ONLINE) des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen kurz LANUV. Der Bedeckungsgrad ist konstant 1/8 für den gesamten Modelllauf.

### 3.4.6 Szenarienauswahl

Ziel dieses Projektes ist es, die mikroklimatische Wirksamkeit von Dachbegrünung auf gesamtstädtischer Ebene bzw. Quartiersebene zu überprüfen. Der Fokus liegt darauf zu vergleichen, inwiefern sich die Dachbegrünung in ihrem jetzigen Zustand bzw. ihrem Potentialzustand auswirkt, sowie den Einfluss einer Bewässerung und einer reinen Intensivbegrünung zu ermitteln. Dafür ist es vor allem notwendig eine Referenz zu schaffen, also eine Modellrechnung ohne Dachbegrünung als Vergleichsgrundlage durchzuführen und deren Ergebnis mit denen verschiedener Szenarien zu vergleichen. In Tabelle 6 sind alle gerechneten Szenarien und der Referenzlauf aufgelistet.

Tab. 6 Gerechnete MUKLIMO\_3 Szenarien und Referenzlauf für die Stadt Essen.

<b>Nr.</b>	<b>Abkürzung im Text</b>	<b>Modelllauf</b>
<b>1</b>	Referenz, Ref	Referenzlauf ohne Dachbegrünung
<b>2</b>	Ist	Dachbegrünung im Gründachkataster
<b>3</b>	Pot	Dachbegrünung im Potentialkataster
<b>6</b>	Pot25	Potentialkataster mit grant = 25
<b>7</b>	Pot50	Potentialkataster mit grant = 50
<b>9</b>	Pot75	Potentialkataster mit grant = 75
<b>10</b>	Pot100	Potentialkataster mit grant = 100

Entsprechend der Beschreibung der Modellläufe wurden die Eingangsdaten für jedes Szenario angepasst. In den ersten vier Szenarien musste lediglich die Namelist geändert werden. Die restlichen Läufe benötigen dagegen eine Anpassung des GRANT und/oder der GRC-Datei.

### 3.4.7 Idealisierte Stadtklimasimulationen

Um die Wirkung unterschiedlicher Dachbegrünungstypen sowie bewässerter und unbewässerter Gründächer auf die bodennahe Lufttemperatur zu untersuchen, wurden zusätzlich Sensitivitätsstudien sogenannter idealisierter Städte durchgeführt. Die Sensitivitätsstudien idealisierter Städte sparen durch das kleinere Modellgebiet und die homogene Bebauung zum einen Computerrechenzeit, zum anderen lässt sich die Wirkung einzelner Komponenten der Dachbegrünung systematisch für unterschiedliche städtische Bebauungstypen untersuchen. Die Modellrechnungen wurden ebenfalls mit dem MUKLIMO\_3 Modell durchgeführt. Die idealisierte und quadratische Stadt (Abbildung 10) hat der Einfachheit halber jeweils einen einheitlichen Bebauungstyp basierend auf neun für Deutschland charakteristischen Bebauungstypen mit typischen Werten für den Grundflächenanteil der Gebäude, der versiegelten und unversiegelten Fläche zwischen den Gebäuden sowie der mittleren Gebäudehöhe und der Gebäudeform.

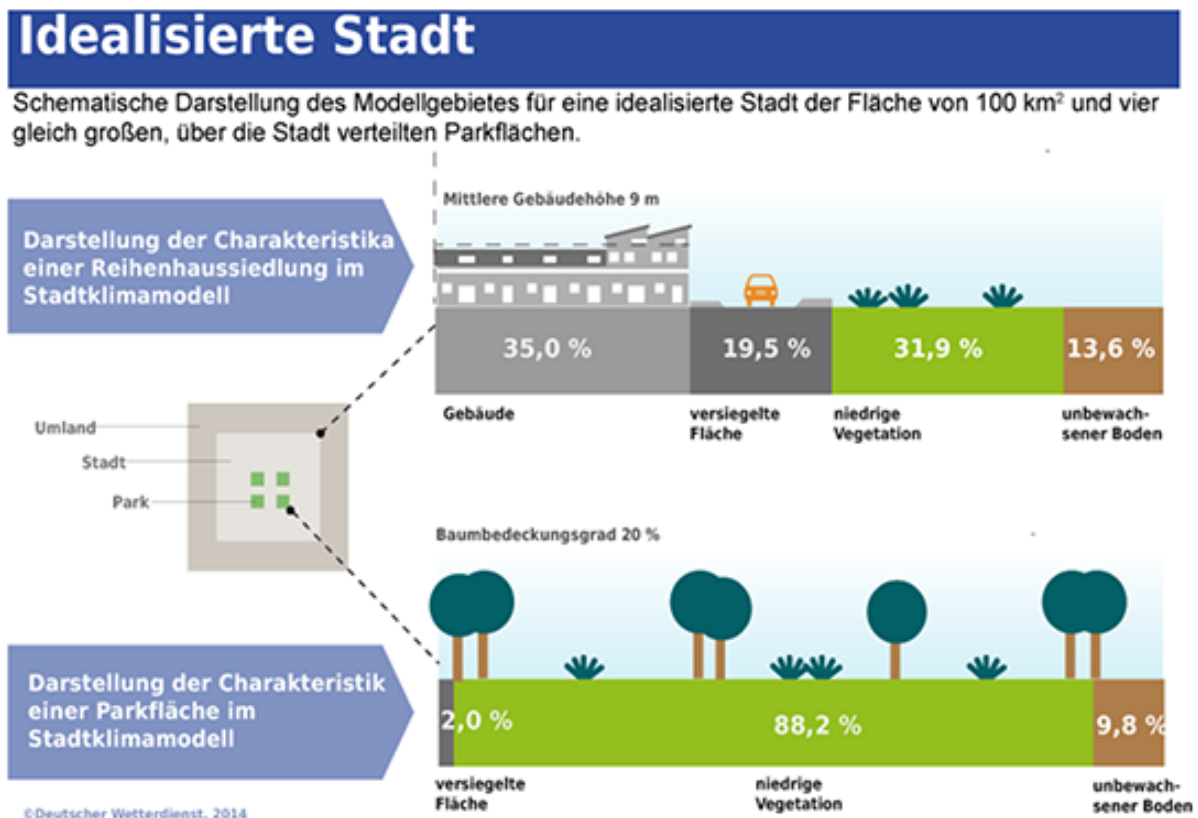


Abb. 10 Schematische Darstellung einer idealisierten Stadt

Die vereinfachte räumliche Darstellung der Stadtstruktur wird gewählt, um Änderungen des städtischen Klimas aufgrund von Dachbegrünung oder einer Änderung einzelner Parameter der Dachbegrünung, gezielt untersuchen zu können. Trotz der vereinfachten räumlichen Darstellung bleiben die für das Stadtklima wichtigen charakteristischen Eigenschaften der städtischen Bebauung erhalten. Die Modellrechnungen der idealisierten Stadt wurden für eine Stadtfläche von 25 km<sup>2</sup> mit einem horizontalen Gitterabstand von 100 m simuliert. Alle Modellsimulationen wurden mit einem einheitlichen Gelände (konstante Geländehöhe) für einen Standort mit der geographischen Breite von 50,66 °N gerechnet. Ebenso wie die Essener Modellrechnungen wird ein typischer Sommertag im Juli simuliert.

Für die Sensitivitätsstudien wurden folgende drei Anpassungsmaßnahmen im Bereich Gründach (Szenarien) gerechnet:

- Anteil der begrünten Dachfläche (Referenzlauf keine Dachbegrünung und Erhöhung des Anteils der Gründachfläche von 0 % bis 100 % in 10 % Schritten)
- Art des Gründachs (extensiv und intensiv)
- Bewässertes und unbewässertes semi-intensives Gründach

## **4. Ergebnisse und Diskussion**

### **4.1 Ergebnisanalyse des Gründach- und Potentialkatasters**

Für ein besseres Verständnis der mikroklimatischen Wirksamkeit von Dachbegrünung im Essener Stadtgebiet ist es wichtig deren Flächenverteilung im Vorfeld zu untersuchen. Basierend auf den Befliegungsdaten haben in Essen 11.267 von insgesamt 260.552 Gebäuden – das entspricht einem prozentualen Anteil von 4,3 % - eine begrünte Dachfläche beziehungsweise eine begrünte Dachteilfläche. Insgesamt sind 44,9 ha der Dachfläche begrünt, bezogen auf die Fläche aller Dächer entspricht das einem Anteil von 1,9 % (Abbildung 11). Im Vergleich zu Städten wie Dresden oder Nürnberg mit fast gleicher Einwohnerzahl befindet sich die Menge an begrünter Dachfläche auf einem ähnlichen Niveau. Deutlich höhere Gesamtdachbegrünungsflächen sind vor allem in den Großstädten wie München mit ca. 319 ha oder Berlin mit 297 ha anzutreffen (MGW21).

Der Stadtteil Westviertel (Abbildung 11) hat mit 7,6 % den höchsten Anteil von Dachbegrünung an der Gesamtdachfläche, gefolgt von Rüttenscheid (3,4 %), Kettwig, (3,3 %), Heidhausen und Stadtkern mit jeweils 3,2 %. Die Stadtteile Bergeborbeck und Schonnebeck haben mit 0,6 % den geringsten Gründachanteil. Der Anteil intensiver Dachbegrünung am Gründach liegt im Mittel über alle Stadtteile bei 9,0 %. Das Umweltamt der Stadt Essen hat die begrünten

Dächer anhand einer Stichprobe für den Stadtkern überprüft. Die Kontrolle ergab, dass sich unter den 121 als begrünt detektierten Dächern im Stadtkern, 75 unbegrünte Dächer befanden, was einem Fehlerquotienten von ca. 62 % entspricht. Die häufigste Ursache der Fehleinschätzung war vor allem die Überdeckung durch Bäume oder begrünte Balkone sowie Dachterrassen. Viele der nicht korrekt detektierten begrünten Dächer bleiben als Potentialfläche für das Potentialkataster erhalten.

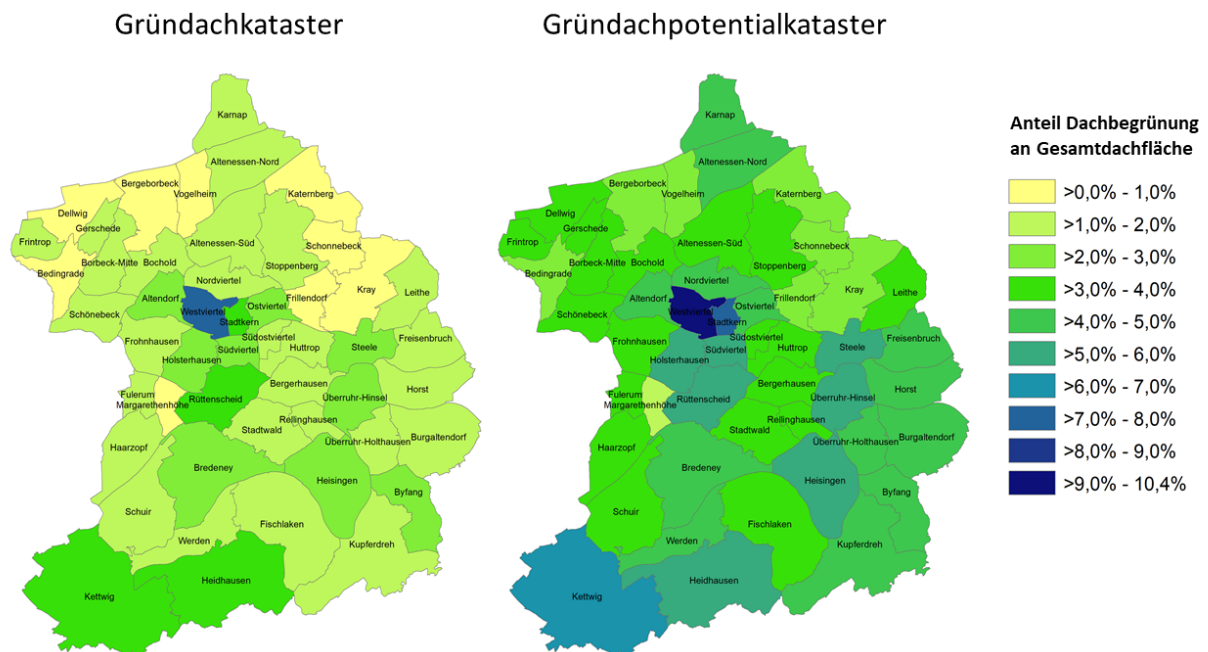


Abb. 11 Anteil der Dachbegrünung an der Gesamtdachfläche (in Prozent) für die einzelnen Essener Stadtteile für das Gründachkataster (links) und das Gründachpotentialkataster (rechts). Im Mittel über das Stadtgebiet ist etwas mehr als eine Verdopplung der Gründachfläche möglich (Quelle: Stadt Essen).

Im Potentialkataster kommen zu den vorhanden 11.267 Gebäuden mit begrünter Dachfläche oder begrünter Dachteilfläche weitere 132.210 Gebäude hinzu. Insgesamt könnten so 98,3 ha der Dachfläche von Essen begrünt werden. Bezogen auf die Fläche aller Dächer entspricht das einem Anteil von 4,1 % und damit einer Verdopplung. Der Anteil intensiver Dachbegrünung am Gründach liegt für das Gründachpotentialkataster im Mittel über alle Stadtteile bei 6,4 %. Der Stadtteil Westviertel könnte mit 10,4 % Dachbegrünung den höchsten Anteil bezogen auf die Gesamtdachfläche im Stadtgebiet erreichen, gefolgt vom Stadtkern (7,5 %), Kettwig, (6,4 %) und Übrerruhr-Insel (5,8 %). Die Stadtteile Margarethenhöhe (1,8 %), Bergeborbeck (2,1 %), Frillendorf und Vogelheim haben mit je 2,2 % die niedrigsten Potentiale für Gründachanteile (Abbildung 11).

## 4.2 Simulationsergebnisse für den Referenzlauf

Um eine Aussage über die mikroklimatische Wirkung von Dachbegrünung treffen zu können, ist es notwendig einen Referenzlauf ohne Dachbegrünung zu definieren, der als Vergleichslauf dient. Anhand der Temperaturverteilung aus dem Referenzlauf können Stadtteile und -quartiere identifiziert werden, deren Einwohner eine hohe Wärmebelastung erfahren und wo somit der größte Handlungsbedarf für Klimaanpassungen besteht. Abbildung 12 zeigt die Temperaturverteilung zu Zeiten des Temperaturmaximums um 17 Uhr.

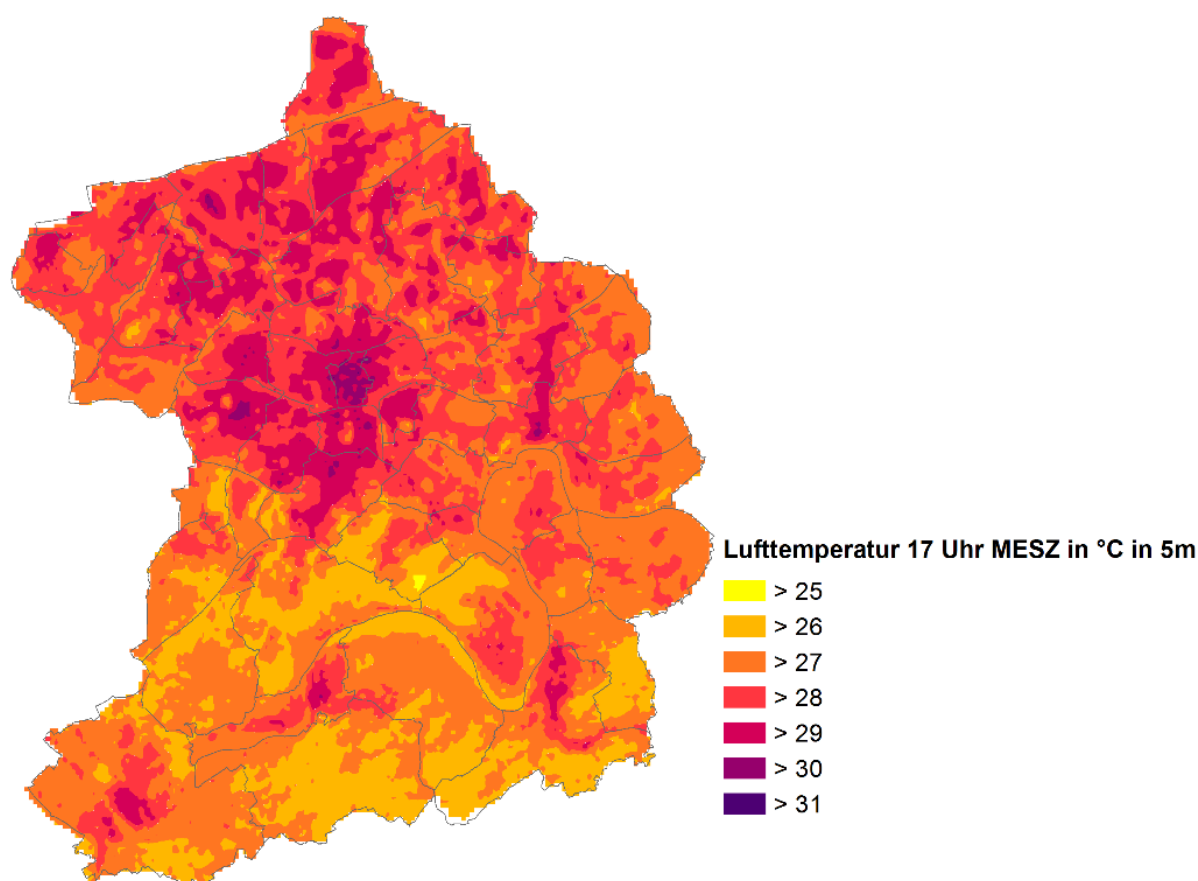


Abb. 12 Modellierter bodennahe Lufttemperatur in 5m über Grund um 17 Uhr MESZ des Referenzlaufs (Quelle: Stadt Essen).

Das Stadtzentrum sticht als am stärksten überwärmt im Essener Stadtgebiet heraus. Die weitgehend un bebauten Flächen im südlichen Stadtgebiet und der Baldeneysee gehören zu den kühleren Stadtquartieren. Mit einer Temperatur von 25,8°C und höher wird im ganzen Essener Stadtgebiet ein Sommertag und vor allem in Innenstadtnähe ein heißer Tag mit Temperaturen von  $\geq 30$  °C erreicht. In der Innenstadt treten maximale Temperaturen von 31,3 °C auf. Betrachtet man die räumliche Verteilung der Lufttemperatur, so ist auffällig, dass sie sehr gut den Versiegelungsgrad ohne Gebäude und die Gebäudegrundfläche widerspiegelt

(Abbildung 6). Urbane Bebauungsstrukturen zeichnen sich stadtklimatisch vor allem dadurch aus, dass sie mehr solare Strahlung absorbieren und speichern und diese insbesondere in den Abendstunden an ihre Umgebung in Form von fühlbarer Wärme abgeben (AK16). Insgesamt tritt örtlich begrenzt ein Heißer Tag in 15 der 50 Stadtteile auf (Altendorf, Bergeborbeck, Borbeck-Mitte, Frohnhausen, Holsterhausen, Kray, Nordviertel, Ostviertel, Rütterscheid, Stadtkern, Stadtkern, Steele, Südviertel, Werden, Westviertel).

Betrachtet man die Gefühlte Temperatur als Maß für die Wärmebelastung des Menschen so heben sich weitere Stadtteile hervor (Abbildung 13). Dabei entsprechen die vorkommenden Werte einer mäßigen bzw. ab  $\geq 32$  °C einer starken thermophysiologischen Belastung (Tabelle 3). Vor allem der Stadtkern ist stark belastet. Bei der Gefühlten Lufttemperatur kristallisiert sich der Baldeneysee als noch markanter als weniger wärmebelastetes Gebiet heraus. Gleichermaßen fallen die Wassergewinnungsflächen im Bereich Essen-Horst und Essen-Überruhr auf. Hier spielt neben dem Kühleffekt des Wassers auch die höhere Windgeschwindigkeit eine Rolle, die zu einer Reduktion der Gefühlten Temperatur führt. Zusammenfassend lässt sich für die Gefühlte Temperatur sagen, dass es zwar großflächige Hotspots gibt, aber im Vergleich zur Lufttemperatur eine größere horizontale Variabilität der Gefühlten Temperatur vorliegt. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass sich die Gefühlte Temperatur wie in Kapitel 3.4.4 beschrieben aus vielen meteorologischen Parametern zusammensetzt, die in die Berechnung mit einfließen.

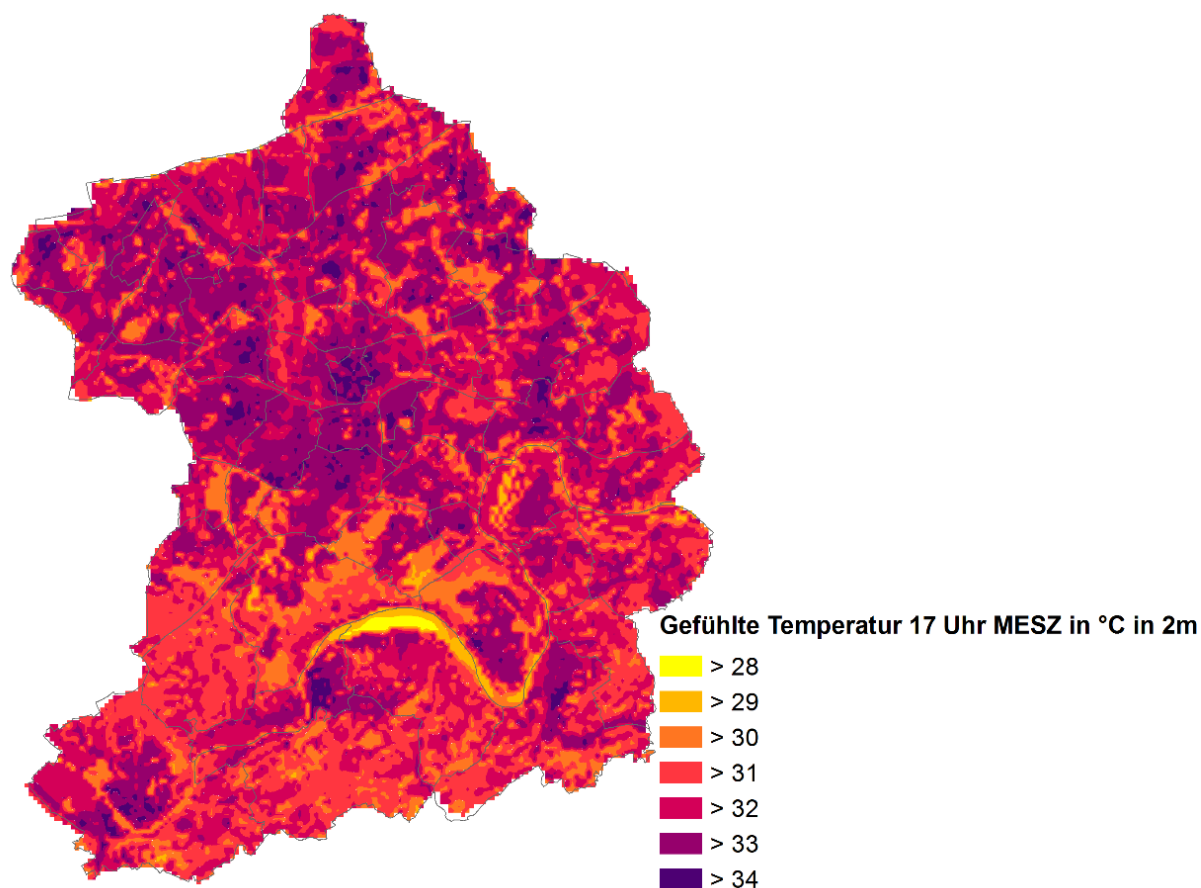


Abb. 13 Modellerte Gefühlte Temperatur in 2m über Grund um 17 Uhr MESZ des Referenzlaufs (Quelle: Stadt Essen).

Über die Maximalwerte der Temperatur hinaus gilt der Fokus auch dem Tagesgang der Temperatur bzw. der Wärmebelastung. Betrachtet man die Situation zu einem späteren Zeitpunkt um 21 Uhr MESZ gegen Sonnenuntergang, so spiegelt sich ein ähnliches Bild wider mit der Ausnahme, dass der Baldeneysee im Süden nicht mehr als kühlere Gegend zu erkennen ist (Abbildung 14). Die im Modell konstant gehaltene Wassertemperatur von 23 °C behindert eine weitere Abkühlung in der direkten Umgebung des Sees. Hinsichtlich der Lufttemperatur verteilen sich die Hotspots ähnlich zum Zeitpunkt 17 Uhr MESZ, wobei sich der Stadtkern sowie die Viertel Altendorf, Frohnhausen, Südviertel und Teile Rüttenscheids durch eine höhere Temperatur hervorheben. Dasselbe gilt für die Gefühlte Temperatur zu dieser Uhrzeit, jedoch tritt weiterhin eine höhere räumliche Variabilität im Vergleich zur Lufttemperatur auf. Bei einer genaueren Betrachtung der Gefühlten Temperatur lassen sich im südlicheren Bereich des Stadtgebietes zudem besonders Acker- und Weideflächen als weniger wärmebelastet erkennen.



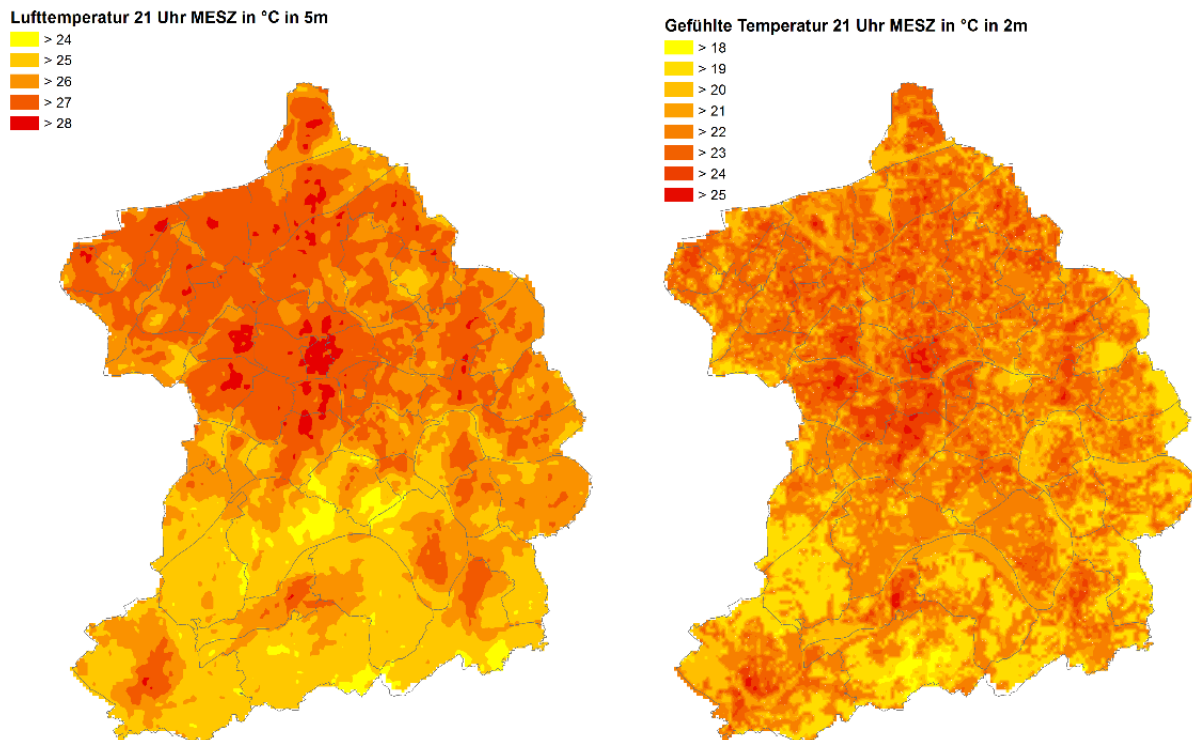


Abb. 14 Modellierte bodennahe Lufttemperatur (links) und Gefühlte Temperatur (rechts) um 21 Uhr MESZ des Referenzlaufs (Quelle: Stadt Essen).

Zum Anbruch der Nacht um 1 Uhr MESZ (Abbildung 15) ändert sich bei der Lufttemperatur außer der generellen Abkühlung des gesamten Modellgebiets wenig an der räumlichen Verteilung. Offensichtlich ist, dass in manchen innenstadtnahen Gebieten weiterhin Temperaturen über 25 °C erreicht werden. Diese überwärmten Quartiere weisen höhere Werte der Gefühlten Temperatur auf, jedoch sind die Werte nur maximal als schwach wärmebelastend bzw. bei unter 20 °C als bereits als „behaglich“ einzustufen. Für die Nacht sind das aber dennoch recht hohe Werte. Die Spannweite zwischen maximalen und minimalen Werten ist bei beiden Größen höher als zu den anderen beiden Stunden. Die beschriebenen Profilmessfahrten von KMD15 zur Mitternachtszeit in der Stadt Essen kommen zu ähnlichen Ergebnissen.



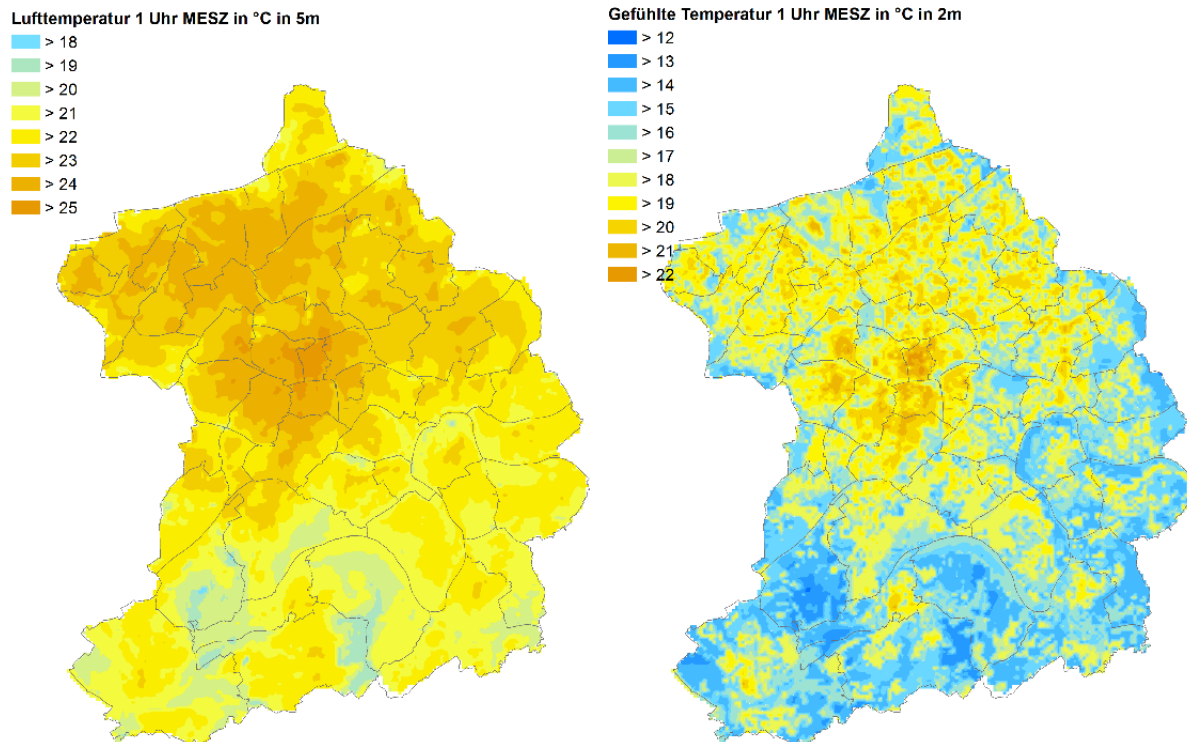


Abb. 15 Modellierte bodennahe Lufttemperatur (links) und Gefühlte Temperatur (rechts) um 1 Uhr MESZ des Referenzlaufs (Quelle: Stadt Essen).

Kurz vor Sonnenaufgang um 5 Uhr MESZ und damit ungefähr zur Zeit der Minimumtemperatur (Abbildung 16) sinkt in weiten Teilen des nördlichen Stadtgebietes die Lufttemperatur nicht unter 20 °C. Man spricht in diesem Fall auch von einer Tropennacht. Anhand der Gefühlten Temperatur ist ersichtlich das für die Gesamtstadt keine Wärmebelastung gegeben ist, da sich die Werte in einem behaglichen Bereich befinden. Dennoch ist auch bei der Gefühlten Temperatur eine Überwärmung des Stadtkerns erkennbar. Trotz der Einstufung als behaglich, kann nachtsüber die Wärmebelastung in den Innenräumen noch zu hoch für einen erholsamen Schlaf sein.

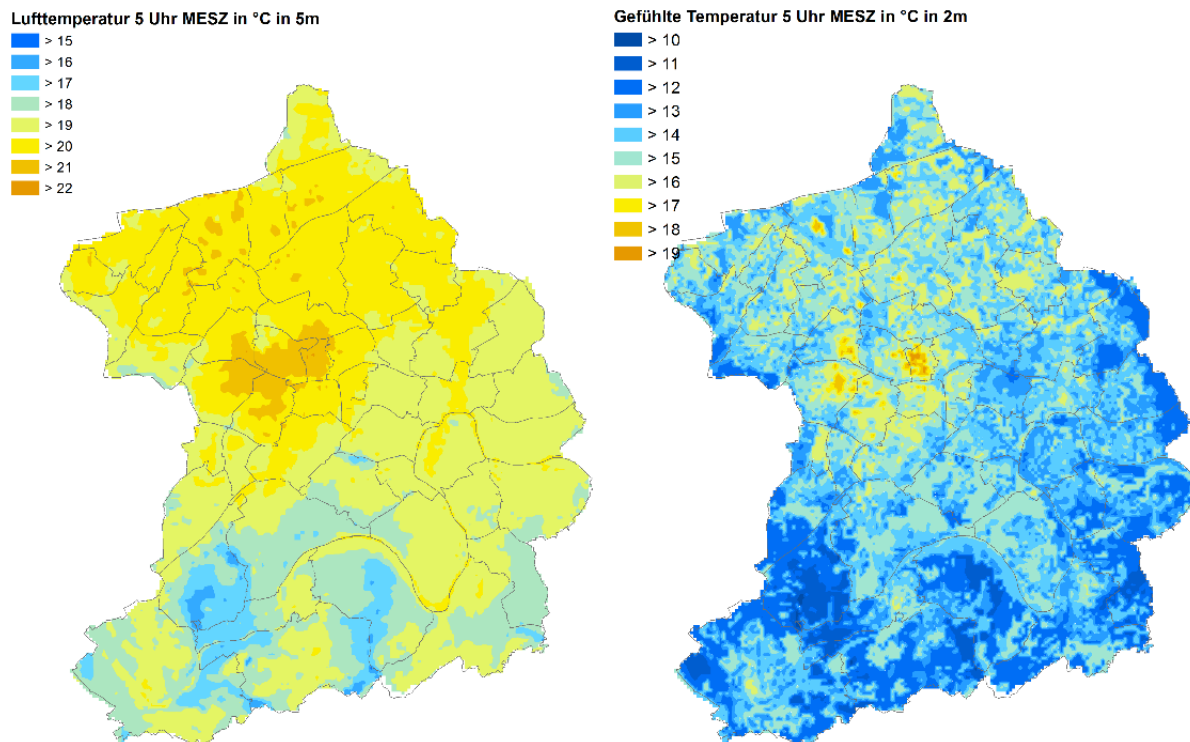


Abb. 16 Modellierte bodennahe Lufttemperatur (links) und Gefühlte Temperatur (rechts) um 5 Uhr MESZ des Referenzlaufs (Quelle: Stadt Essen).

Die Auswertung des Referenzlaufes zeigt, wie erwartet, eine starke Abhängigkeit der Lufttemperatur und thermischen Belastung von den städtischen Bauungsstrukturen. Genauere Aussagen zu den überwärmten Stadtquartieren ergibt eine Hotspotanalyse der ausgewählten Stunden im Anhang dieses Berichtes (Anhang Abbildung A1). Generell zeigt die Visualisierung der Gefühlten Temperatur eine hohe räumliche Variabilität, sodass feinere Unterschiede in der Wärmebelastung differenzierbar sind. Besonders Freiflächen mit schon einem geringen Baumbestand, die zu einem angenehmeren Mikroklima beitragen, sind tagsüber mittels der Gefühlten Temperatur gut erkenntlich. Als Beispiel hierfür gilt der Krupp-Park, der sich im Westviertel befindet und den Stadtkern zum Stadtteil Altendorf trennt.

Im nächsten Schritt werden die Lufttemperatur und die Gefühlten Temperatur um 17 Uhr MESZ pro Stadtteil gemittelt. Daraus ergeben sich die in Tabellen 7 und 8 aufgeführten fünf am stärksten überwärmten Gebiete. Die Abbildung 17 zeigt zudem die Lage der betroffenen Stadtquartiere.

Tab. 7 Die 5 stärksten überwärmten Stadtviertel von Essen im Referenzlauf ohne Dachbegrünung bezogen auf die Lufttemperatur in 5 m über Grund um 17 Uhr MESZ.

Stadtteil / Lufttemperatur	Versiegelung	Gebäudegrundfläche	IST Gründachflächenanteil	POT Gründachflächenanteil
1. Stadtkern 30,0°C	0,87	0,40	3,2 %	7,5 %
2. Südviertel 29,2°C	0,75	0,27	2,6 %	5,4 %
3. Westviertel 29,0°C	0,77	0,21	7,6 %	10,4 %
4. Holsterhausen 28,9°C	0,73	0,25	2,9 %	5,1 %
5. Südostviertel 28,9°C	0,68	0,24	1,8 %	3,7 %

Tab. 8 Die 5 stärksten überwärmten Stadtviertel von Essen im Referenzlauf ohne Dachbegrünung bezogen auf die Gefühlte Temperatur in 2 m über Grund um 17 Uhr MESZ.

Stadtteil / Gefühlte Temperatur	Versiegelung	Gebäudegrundfläche	IST Gründachflächenanteil	POT Gründachflächenanteil
1. Stadtkern 33,8°C	0,87	0,40	3,2 %	7,5 %
2. Südviertel 33,4°C	0,75	0,27	2,6 %	5,4 %
3. Holsterhausen 33,3°C	0,73	0,25	2,9 %	5,1 %
4. Südostviertel 33,2°C	0,68	0,24	1,8 %	3,7 %
5. Frohnhausen 33,2°C	0,64	0,19	1,4 %	3,6 %

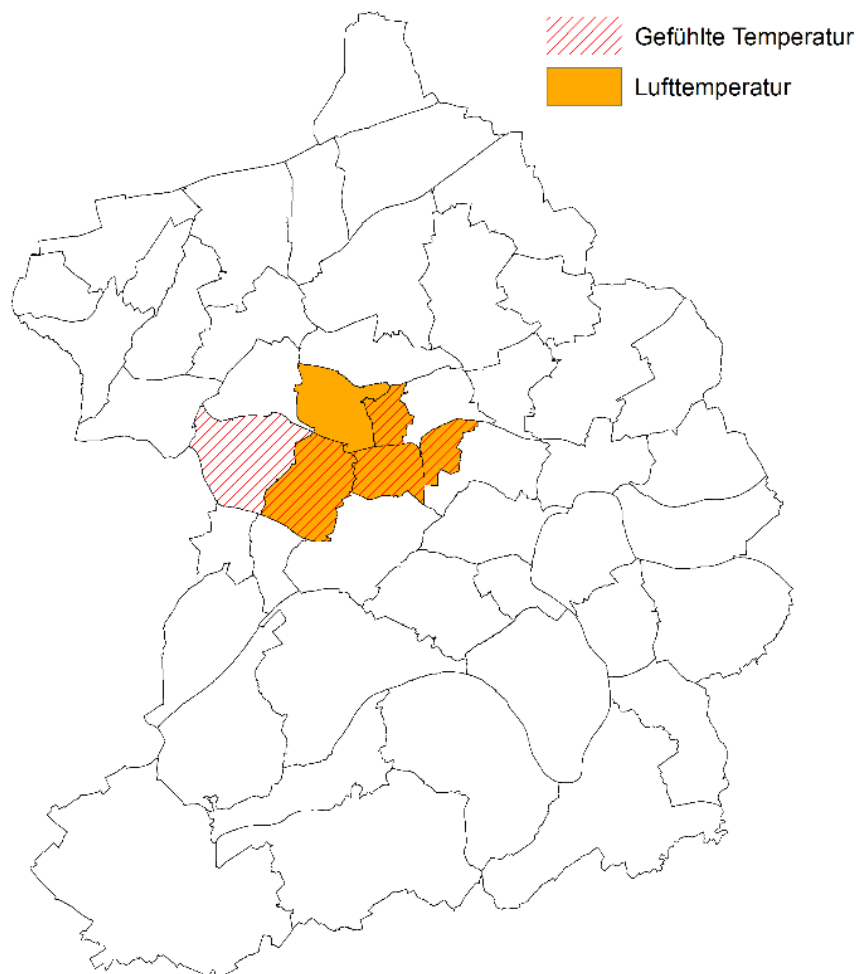


Abb. 17 Lage der um 17 Uhr MESZ stärksten überwärmten Essener Stadtteile in der Referenzsimulation ohne Dachbegrünung (Quelle: Stadt Essen).

Um 17 Uhr MESZ sind die am stärksten überwärmten Gebiete bezüglich der Lufttemperatur und mit der Gefühlten Temperatur fast deckungsgleich (Abbildung 17). Dabei werden bei der Lufttemperatur bzw. Gefühlten Temperatur die höchsten mittlere Werte von 30 °C bzw. 33,8 °C im Stadtkern erreicht. Generell wird hier erneut der Zusammenhang zwischen der Dichte der Bebauung und dem Grad der Versiegelung mit der Ausprägung der Überwärmung nachgewiesen. Um eine erste Einschätzung des möglichen stadtklimatischen Einflusses von Dachbegrünung sowohl im Ist- als auch im Pot-Zustand zu treffen, sind den Temperaturwerten die Gründachflächenanteile an der Gesamtdachfläche gegenübergestellt. Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt, fallen die Gründachanteile in Essen im Vergleich zu Gründachinventaranalysen anderer Städte relativ gering aus. Daher lässt sich im Vorfeld vermuten, dass die potentiellen mikroklimatischen Effekte für Essen geringer ausfallen als in anderen Städten.

Betrachtet man die Bevölkerungsanteile in den Stadtteilen, so geben alle fünf Stadtteile mit den höchsten Lufttemperaturen einen Lebensraum für insgesamt etwa 10 % der gesamten

Stadtbevölkerung, wobei vor allem in Frohnhausen mit 32.395 und in Holsterhausen mit 26.013 die meisten Einwohner leben (Quelle: Stadt Essen). Ca. 7 % der Menschen über 65 Jahren, also 2 % der Gesamtbevölkerung Essens, die zu der durch Hitzestress besonders gefährdeten Bevölkerungsschicht gehören, wohnen ebenfalls in den durch die hohen Lufttemperaturen belasteten Gebieten. Bei den fünf erhöht belasteten Stadtteilen durch die Gefühlte Temperatur steigert sich der Prozentsatz auf ca. 11 % der Einwohner über 65 Jahren, also etwa 2,4 % der Gesamtbevölkerung (Quelle: Stadt Essen).

Die durchschnittlichen Lufttemperaturen und Gefühlte Temperaturen aller Stadtteile je Stunde sind im Anhang in den Tabellen A5 und A6 aufgelistet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass vor allem die südöstlich gelegenen innenstadtnahen Stadtteile im Verlaufe eines typischen Sommertages eine Hitzebelastung erfahren. Während die Durchschnittswerte (Tabelle 7, Tabelle 8, Abbildung 17) aufzeigen in welchen Stadtteilen ein hoher Handlungsbedarf zur Anpassung an die Überwärmung besteht, zeigt die räumliche Verteilung von Essen (Abbildungen 12 bis 16) detaillierter in welchen Bereichen der Stadtteile es genau zu einer Überhitzung kommt.

### **4.3 Ergebnisse der Simulationen mit dem Gründachkataster und Potentialkataster**

Der nächste Schritt nach der Identifizierung der thermischen Verhältnisse in der Stadt Essen im Referenzzustand ist die Untersuchung, welche Differenzen sich zwischen den Modellläufen mit Ist- und Potentialkataster der Gründächer zum Referenzzustand ergeben. Neben der zentralen Fragestellung welchen Effekt die bereits vorhandene und die potentiell umsetzbare Dachbegrünung auf das lokale Stadtklima hat, rückt die Bewertung in den Fokus ob diese alleinige Maßnahme ausreichend ist. Die Abbildungen 18 und 19 visualisieren für beide Szenarien die Kühlwirkung der Dachbegrünung für das gesamte Stadtgebiet auf die bodennahe Lufttemperatur. Dabei wurde 13 Uhr MESZ als Zeitpunkt gewählt, da zu diesem Zeitpunkt die Temperaturreduktion am deutlichsten ausgeprägt ist. Auf den ersten Blick zeigen die Grafiken, dass wie erwartet, die Kühlwirkung im Potentialkataster etwas größer ist als im Gründachkataster (Abbildung 19). Jedoch sind die modellierten Abkühlungswerte relativ gering und erreichen nur Maximalwerte von -0,4 Kelvin (K) im Westviertel und in Kettwig und -0,7 K in Kettwig. Bei einer genaueren Betrachtung der Verteilung der Dachbegrünungsanteile in beiden Szenarien (Abbildung 7) im Vergleich zu den Abbildungen 19 und 20 lässt sich feststellen, dass nicht in jeder Zelle mit Dachbegrünung auch eine Kühlwirkung vorhanden ist.

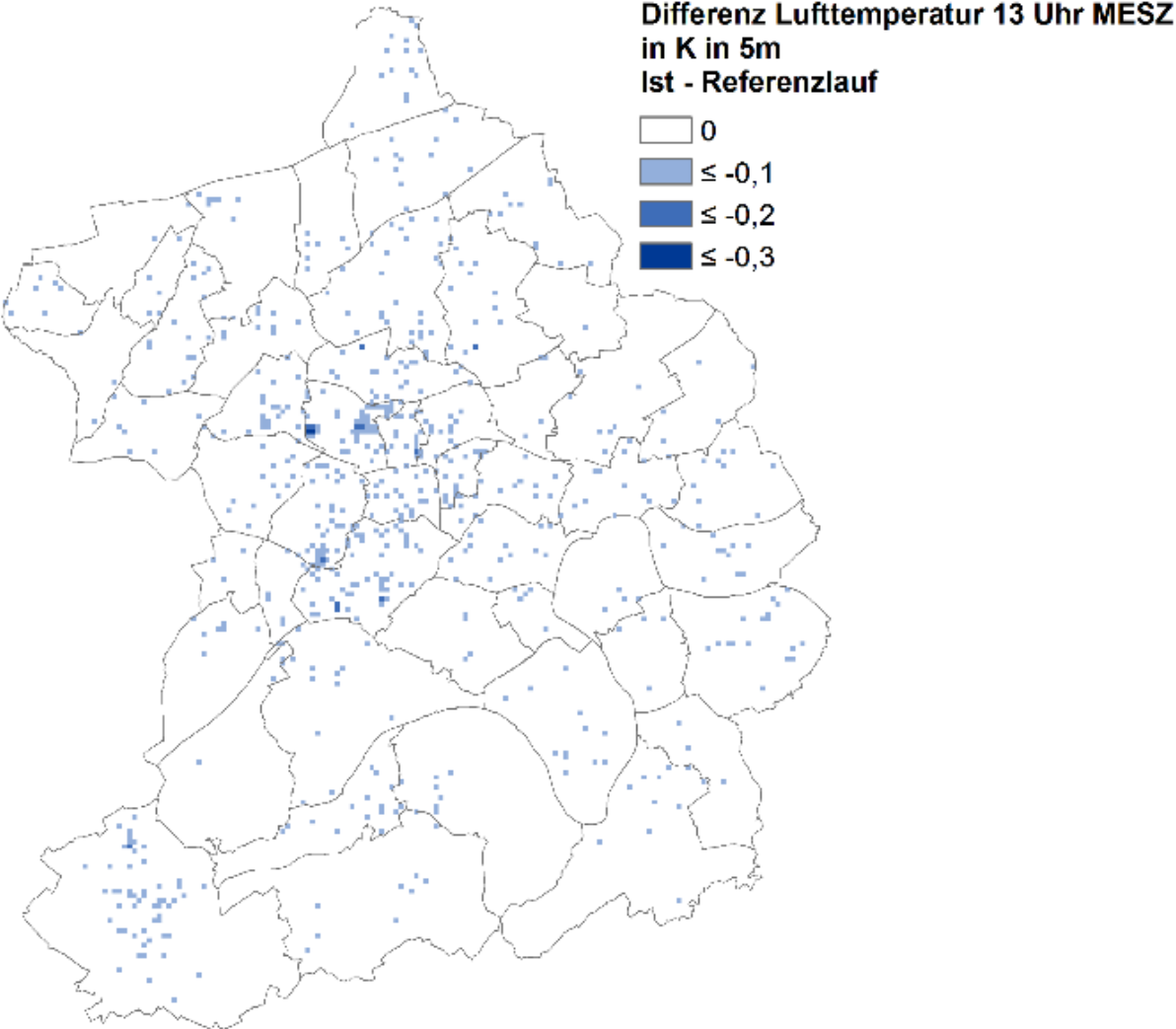


Abb. 18 Abkühlungswirkung um 13 Uhr MESZ in 5 m Höhe, welche durch das Gründachkataster erreicht wird (Quelle: Stadt Essen).

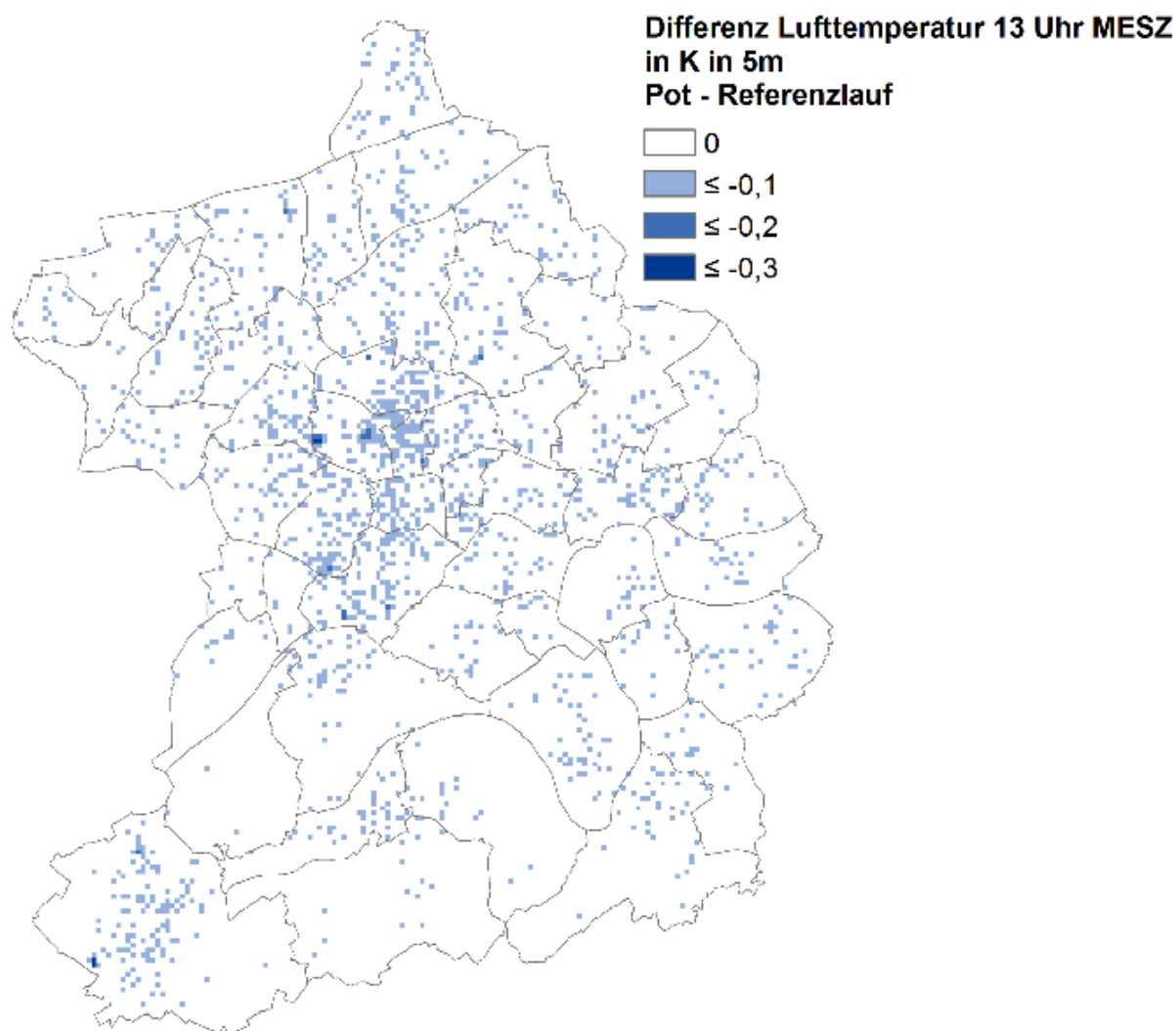


Abb. 19 Abkühlungswirkung um 13 Uhr MESZ in 5 m Höhe, welche durch das Potentialkataster erreicht wird (Quelle: Stadt Essen).

Abbildung 20 verdeutlicht erneut die horizontale Verteilung der Kühlwirkung im Potentialkataster vor allem in den hitzebelasteten innerstädtischen Stadtteilen. Nahe dem westlichen Rande der Karte wird lokal eine Kühlwirkung von -0,4 K erreicht. Es handelt sich dabei um ein Einkaufszentrum mit einer großflächigen extensiven Dachbegrünung, welches den größten mikroklimatischen Einfluss ausübt. Entscheidend für diesen starken Effekt ist die relativ geringe mittlere Gebäudehöhe in dieser Modellgitterzelle. Mit einer Durchschnittshöhe von ca. 8,9 m befindet sich das Dach in der untersten vertikalen Modellgitterzelle, sodass Dachbegrünungseffekte sich direkt auf diese unterste Zelle und damit auf die bodennahe Lufttemperatur auswirken. Im Umkehrschluss bewirkt die Dachbegrünung in den umgebenden Zellen eine etwas niedrigere Temperaturreduktion, was zum einen mit einer höheren durchschnittlichen Gebäudehöhe, einer geringeren Gebäudegrundfläche und damit Dachfläche, sowie einem geringeren Gründachanteil zusammenhängt. Bei der Untersuchung

der Wirksamkeit von Gründächern auf das Mikroklima in Hong Kong mittels des Modells ENVI-met bestätigt NCW12 eine starke Abhängigkeit der Kühlungsintensität von der Gebäudehöhe. Unter Betrachtung von Tabelle 7 lässt sich für den Stadtkern und den Westviertel ein ähnliches Verhältnis zwischen begrünter Dachfläche zu Stadtteilfläche bestimmen. Mit rund 18 m mittlerer Gebäudehöhe im Stadtkern und etwa 9,7 m im Westviertel liegt ein wesentlicher Unterschied vor, sodass sich aufgrund der geringeren vertikalen Entfernung der Dachbegrünung zu Straßenniveau größere Kühlungseffekte im Westviertel potentiell feststellen lassen. Das Südviertel und Holsterhausen sollten anhand ihres Gebäude- und Gründachanteils (Tabelle 7) miteinander vergleichbare Auswirkungen zeigen, was durch die Abbildung 20 (oben) grob bestätigt werden kann. Die Kühlwirkung im Südostviertel sollte demnach am niedrigsten aller fünf Stadtteile sein, was ebenfalls in der Grafik sichtbar ist. Insgesamt handelt es sich bei fast allen Differenzen sowohl der Lufttemperatur als auch der Gefühlten Temperatur nur um einen marginalen Einfluss auf das Mikroklima. Zudem lässt sich in vielen Gitterzellen aufgrund des niedrigen Gründachanteils kein Kühleffekt feststellen. Es tritt jedoch auch in Ausnahmefällen die umgekehrte Situation ein, dass in Gitterzellen mit einem hohen Gebäude- und Gründachanteil ein gitterzellenübergreifender Effekt detektiert wird.





Abb. 20 Zoom in den Essener Innenstadtbereich: Abkühlungswirkung bezogen auf die Lufttemperatur in 5 m Höhe (oben) und die Gefühlte Temperatur in 2 m Höhe (unten) um 13 Uhr MESZ, welche durch das Gründachkataster erreicht werden kann (Quellen: Stadt Essen und Open Street Map).

Es stellt sich die Frage ob weitere Effekte von Dachbegrünung zum Beispiel direkt auf Dachniveau nachgewiesen werden können. In Abbildung 21 sind die Differenzenplots des fühlbaren Wärmestromes der Dächer dargestellt, in die sowohl der begrünte und nicht begrünte Teil des Daches je nach Flächenvorkommen miteinfließt.

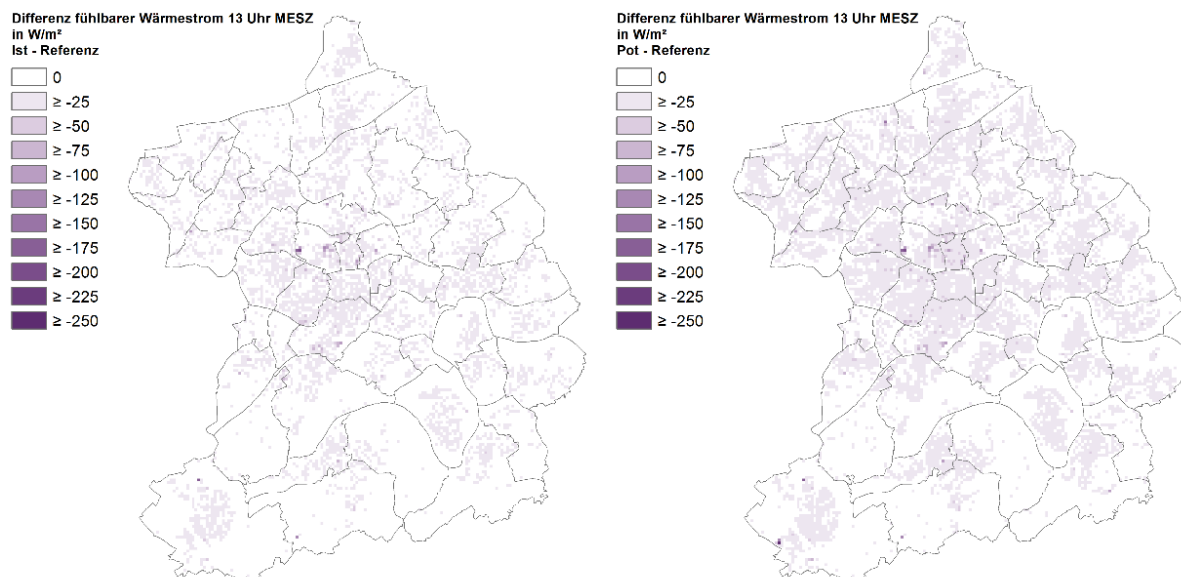


Abb. 21 Änderung des fühlbaren Wärmestroms im Vergleich zum Referenzlauf: Gründachkataster (links) und Gründachpotentialkataster (rechts) (Quelle: Stadt Essen).

Anders als bei der Reduktion der bodennahen Lufttemperatur wird der fühlbare Wärmestrom nur dort reduziert wo sich auch begrünte Bebauung befindet. Der Maximalwert mit  $-189 W/m^2$  liegt in denselben Modellgitterzellen in denen sich das großflächig begrünte Einkaufszentrum befindet. Im Mittel werden geringe Reduktionen von ca.  $-2 W/m^2$  und  $-5 W/m^2$  im Ist- und Potentialkataster erreicht

Zusammenfassend ist die thermische Wirkung der bisherigen und potentiell umsetzbaren Dachbegrünung als Anpassung an die Folgen des Klimas als nicht ausreichend einzustufen. Der Effekt auf die bodennahe Lufttemperatur ist größtenteils sehr gering und im Bereich von unter  $-0,1 K$  mit hohen Unsicherheiten behaftet. Dennoch ist es beachtlich für die horizontale Auflösung des Modellgebietes und den geringen Anteilen von begrünten Dachflächen einen Einfluss feststellen zu können. Durch die horizontale Auflösung von  $100 m$  können eventuell lokal begrenzte Wirkungen von Dachbegrünung in der großen Gitterzelle nicht ermittelt werden bzw. fallen dann für die ganze Gitterzelle in den Unsicherheitsbereich. Ber16 äußert dieselbe Kritik insbesondere bei mesoskaligen Modellierungen. Hinsichtlich des hohen Fehlerquotienten bei der Detektion der begrünten Dächer (vergleiche Kapitel 4.1) sind die Ergebnisse vom Ist-Szenario mit Vorsicht zu interpretieren.

In gleicher Weise wie bei der bodennahen Lufttemperatur ist der Einfluss auf den fühlbaren Wärmestrom der begrünten Dächern von Ist- und Potentialkataster nur geringfügig, sodass es in beiden Fällen zu keinem maßgeblichen mikroklimatischen Vorteil auf Quartiersebene führt. Jedoch kann ein lokal reduzierter fühlbarer Wärmestrom des Daches bereits einen Mehrwert für die Bewohner des Hauses durch eine geringere Wärmebelastung des Innenraumes bilden (SEG12).

Dieses Kapitel verdeutlicht für die Stadt Essen, dass Dachbegrünungsmaßnahmen mit weiteren Maßnahmen zur Anpassung an die thermischen Folgen des Klimawandels kombiniert werden müssen.

#### **4.4 Ergebnisse der Simulationen mit erhöhtem Gründachanteil**

Angesichts der sehr geringen Kühlwirkung im Ist- und Potentialzustand wurden vier weitere Modellläufe mit einem nochmals gesteigerten Gründachflächenanteil durchgeführt. Wie für das Gründachkataster und das Potentialkataster wurden Abbildungen der Differenzen der Lufttemperatur (Abbildung 22) für die Szenarien mit 25 %, 50 % 75 % und 100 % Dachbegrünungsanteil basierend auf den begrünten Gitterzellen des Potentialkatasters erstellt. Die Szenarien werden im Folgenden auch pot25, pot50, pot75 und pot100 genannt. Ziel dieser Modellrechnungen ist es, zu untersuchen inwiefern sich die Kühlwirkung bis zu einer fast vollständigen Abdeckung der Dächer durch Dachbegrünung verstärken kann bzw. auch abzuschätzen ab welchen Gründachanteilen ein wesentlicher mikroklimatischer Effekt erzielt werden kann

Im ersten Szenario pot25 wird eine maximale Abkühlung von -0,4 K nicht überschritten (Tabelle 9). Bei der kontinuierlichen Steigerung des Gründachanteils ist eine allmähliche Zunahme des bodennahen Kühleffektes bis zur maximalen Abkühlung in pot100 mit -1,8 K sichtbar (Tabelle 9). Insgesamt zeigt die visuelle Analyse der Abbildung 22 großräumige Temperaturreduktionen in allen Szenarien, die vor allem mit dem Versiegelungsgrad und mit dem Bebauungsgrad korrelieren. Durch die Erhöhung des latenten Wärmestromes durch Dachbegrünung wird vor allem dort die Energiebilanz verändert, wo aufgrund von versiegelten und bebauten Flächen wenig solare Strahlung in latente Wärme, sondern größtenteils in fühlbare Wärme im Referenzzustand umgewandelt wird.

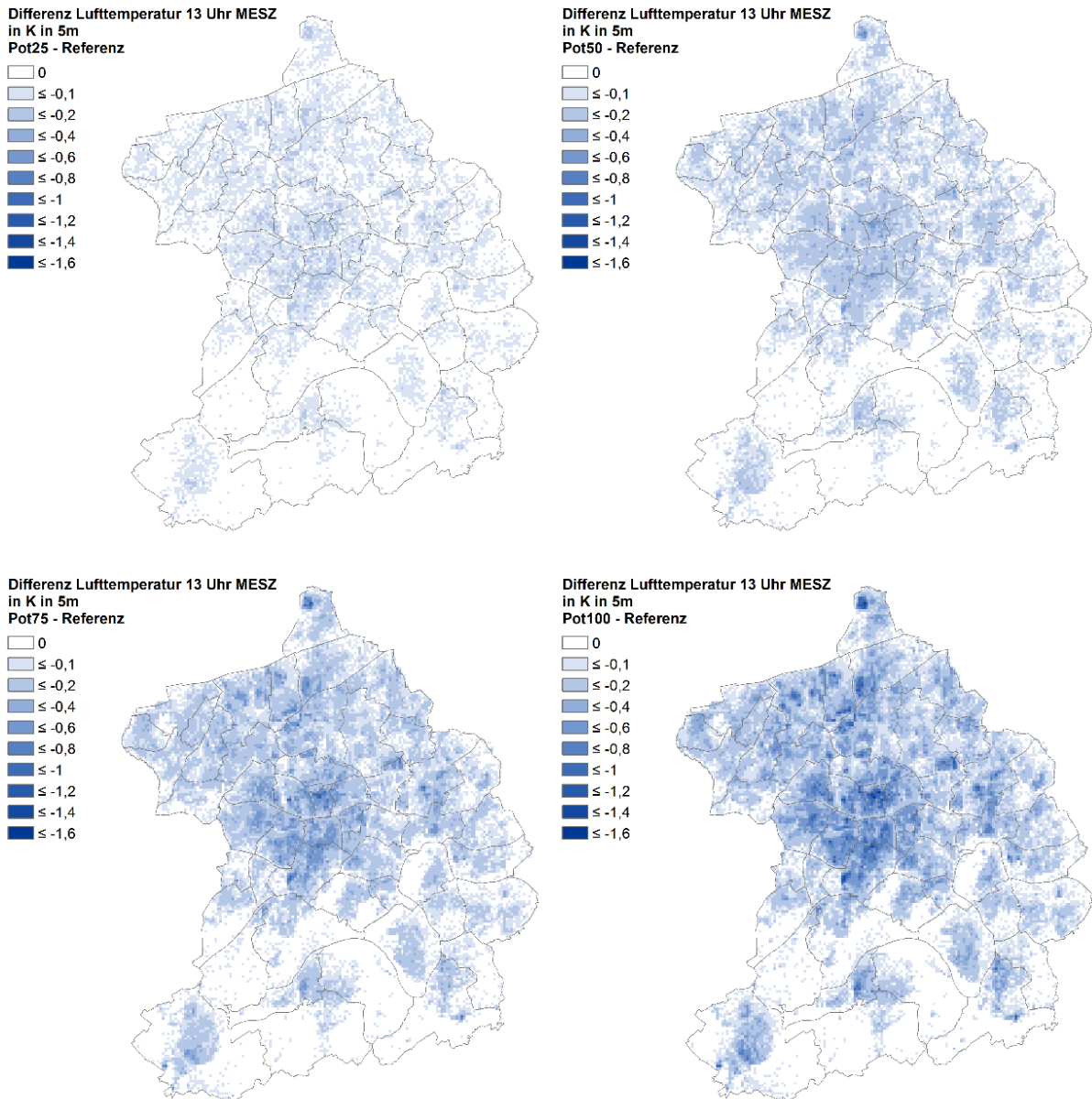


Abb. 22 Abkühlungswirkung um 13 Uhr MESZ, welche durch eine Erhöhung der Dachbegrünung um 25 %, 50 %, 75 % und 100 % im Essener Stadtgebiet erreicht werden kann (Quelle: Stadt Essen).

In Gitterzellen mit einem hohen Vegetationsanteil bewirkt die Zunahme von Dachgrün und somit des latenten Wärmestromes eine geringere Temperaturreduktion. Würde sich der Kühleffekt gleichmäßig auf die jeweiligen Stadtteile verteilen, so ergäben sich für die fünf überwärmten Stadtteile die folgenden Werte in Tabelle 9.

Durchschnittliche Abkühlungen auf Straßenniveau von bis zu -0,8 K bei pot100 sind für den gesamten Stadtkern beachtlich. Die in Kapitel 4.3 präsentierte relative Verteilung der Stärke der Kühlwirkung kann in Tabelle 9 mit Ausnahme des Westviertel größtenteils wiedergegeben werden. Die niedrigeren Werte im Falle des Westviertels hängen vor allem damit zusammen,



dass der Krupp-Park als relativ große Grünanlage die durchschnittliche Kühlwirkung in diesem Stadtteil verringert.

Tab. 9 Mittlere Abkühlung der Lufttemperatur in Kelvin in den 5 überwärmten Stadtteilen von Essen (Tabelle 7) bezogen auf die bodennahe Lufttemperatur um 17 Uhr MESZ.

Stadtteile / Anteil Dachbegrünung	25 %	50 %	75 %	100 %
Stadtkern	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8
Südviertel	-0,2	-0,3	-0,5	-0,7
Holsterhausen	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6
Südostviertel	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5
Westviertel	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5
<b>maximale Abkühlung</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,8</b>	<b>-1,3</b>	<b>-1,8</b>

Der übergreifende Kühleffekt auch in Gitterzellen ohne Dachbegrünung wird in Abbildung 23 anhand des Stadtteils Kettwig im südwestlichen Zipfel des Essener Stadtgebietes visualisiert.

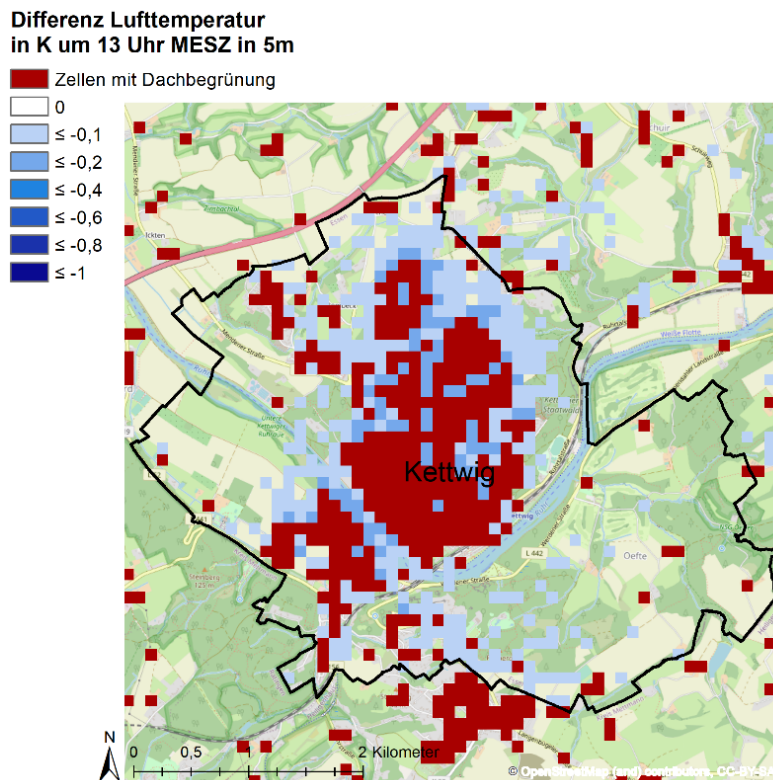


Abb. 23 Abkühlungswirkung durch Dachbegrünung um 13 Uhr MESZ bei 100% Dachbegrünung im Stadtteil Kettwig und deren Wirkung in Gitterzellen ohne Gebäude mit Dachbegrünung (Quellen: Stadt Essen und Open Street Map).

Um die Temperaturreduktion außerhalb der Zellen mit Dachbegrünung darzustellen wurde die Zellen mit Dachbegrünung rot eingefärbt. Generell ist der Stadtteil Kettwig von einem unversiegelten Umland in Form von Wald,- Acker- und Grasflächen umgeben, sodass sich die bebauten Flächen in Distanz zu denen der nächstgelegenen Stadtteile befinden. Außerhalb der Zellen mit Dachbegrünung kann eine Kühlung von bis zu  $-0,2$  K verzeichnet werden. Dies untermauert die Behauptungen von NCL15, dass eine flächendeckende Abdeckung durch Dachgrün zu einem nachbarschaftsweiten Abkühlungseffekt beitragen kann. Dieser lokale Transporteffekt kühlerer Luft in angrenzende Gebäudeblocks ist für die Stadtplanung von enormer Bedeutung.

Im Vergleich zum Ist- und Potentialkataster tragen die Szenarien mit einem erhöhten Gründachanteil zu einer deutlich niedrigeren Wärmebelastung der Bevölkerung bei und können das Wohlbefinden vor allem in den hitzebelasteten Stadtteilen steigern. Vergleichbare Modellrechnungen wurden von BKM02 durchgeführt. Mithilfe von Simulationen eines Sommertages mit einer 50 % Bedeckung der Dächer durch Gras und einer Auflösung von 1 km der Stadt Toronto wurden Abkühlungswerte um ca.  $0,5$  K in 5 m erreicht, was in etwa den Abkühlungswerten in grant50 entspricht. Ähnliche Untersuchungen des thermischen Einflusses einer 50 % Bedeckung von Dachbegrünung von ausgewählten Gebieten in Toronto von KMB03 ergaben eine vernachlässigbare Temperaturreduktion von unter  $0,1$  K auf 40 m Höhe bei einer horizontalen Modellauflösung von 1 km.

Ebenso wie die intensivere Absenkung der Lufttemperatur wird mit der Steigerung des Anteils der Dachbegrünung eine graduell stärkere Abnahme des fühlbaren Wärmestromes der Dächer festgestellt. Dabei umfasst diese Ausgabe sowohl alle begrünten und nicht begrünten Dachflächen. Die maximale Reduktion tritt bei grant100 mit  $-369$  W/m<sup>2</sup> auf (Abbildung 24).

HSW18 vergleichen den fühlbaren Wärmestrom verschiedener begrünter und nicht begrünter Dächer für eine Auswahl verschiedener Städte mittels Modellrechnungen. Stellt man die dortigen Ergebnisse des „black roof“ der des nicht bewässerten Extensivgründachs gegenüber und vergleicht es mit der Differenzabbildung des grant100 Szenarios, also in beiden Fällen einen direkten Vergleich der Wirkung von reinen begrünten zu nicht begrünten Dächern, so werden für den dort untersuchten Standort Berlin geringere Absenkungen des fühlbaren Wärmestromes von  $-137$  W/m<sup>2</sup> festgestellt, was deutlich unter dem hier ermittelten Maximum von  $-369$  W/m<sup>2</sup> (Abbildung 24), aber im Bereich der mittleren Absenkung der fühlbaren Wärmestromes von ca.  $-102$  W/m<sup>2</sup> um 13 Uhr MESZ liegt (HSW18). Die Abweichung ist vor allem durch die Nutzung verschiedener Modelle und unterschiedlicher Einstellung der Gründacheigenschaften erklärbar. Zudem kommt es zu Abweichungen bei den für die Simulationen gewählten Wetterbedingungen.

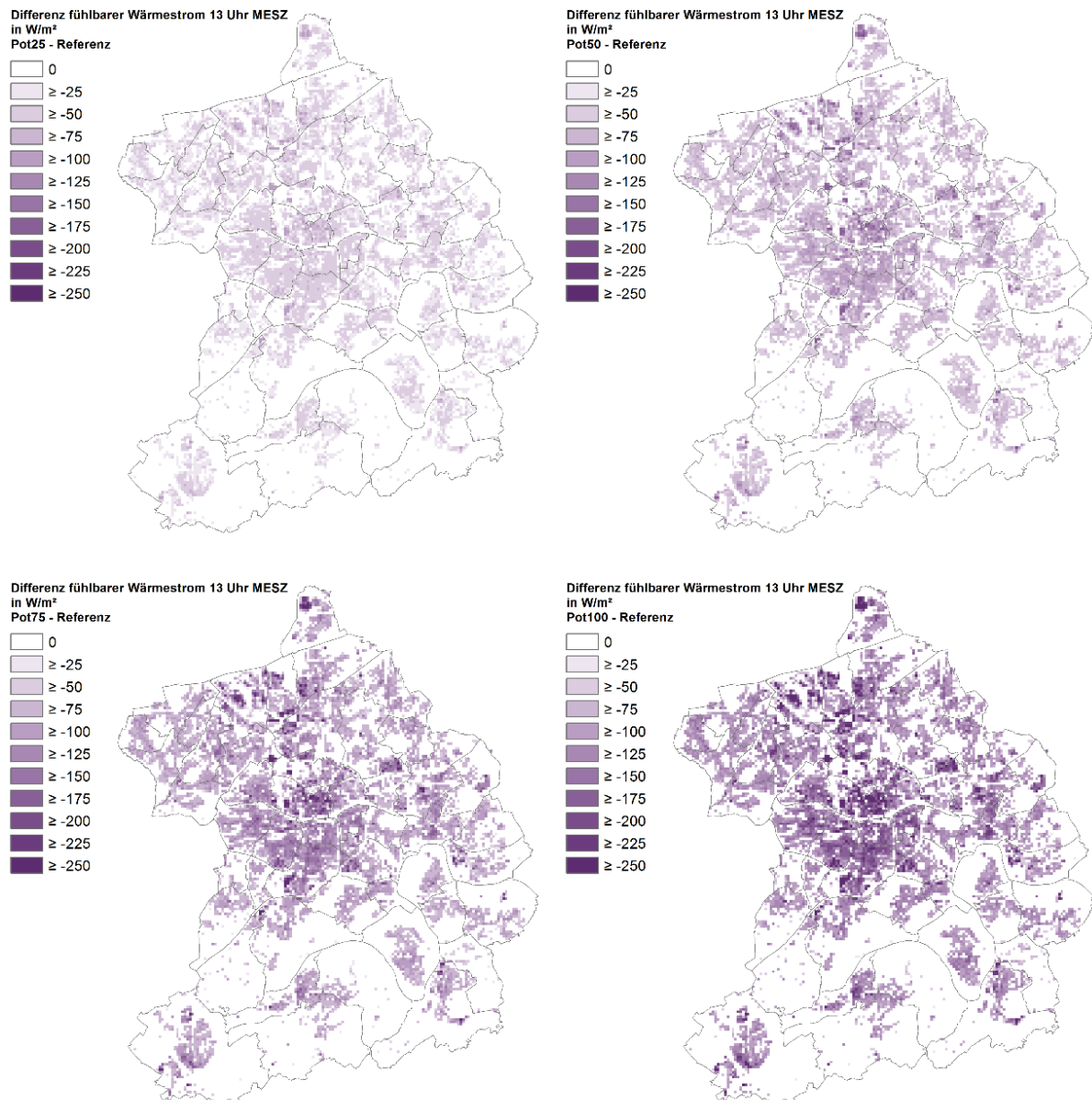


Abb. 24 Änderung des fühlbaren Wärmestroms um 13 Uhr MESZ, welche durch eine Erhöhung der Dachbegrünung um 25%, 50%, 75% und 100% im Essener Stadtgebiet erreicht werden kann (Quelle: Stadt Essen).

Im Folgenden wird in Abbildung 25 zusammengefasst was eine Zunahme der Dachbegrünung für den durchschnittlichen fühlbaren Wärmestrom aller Dächer im gesamten Stadtgebiet bedeutet.

### durchschnittlicher fühlbarer Wärmestrom der Dächer im Essener Stadtgebiet

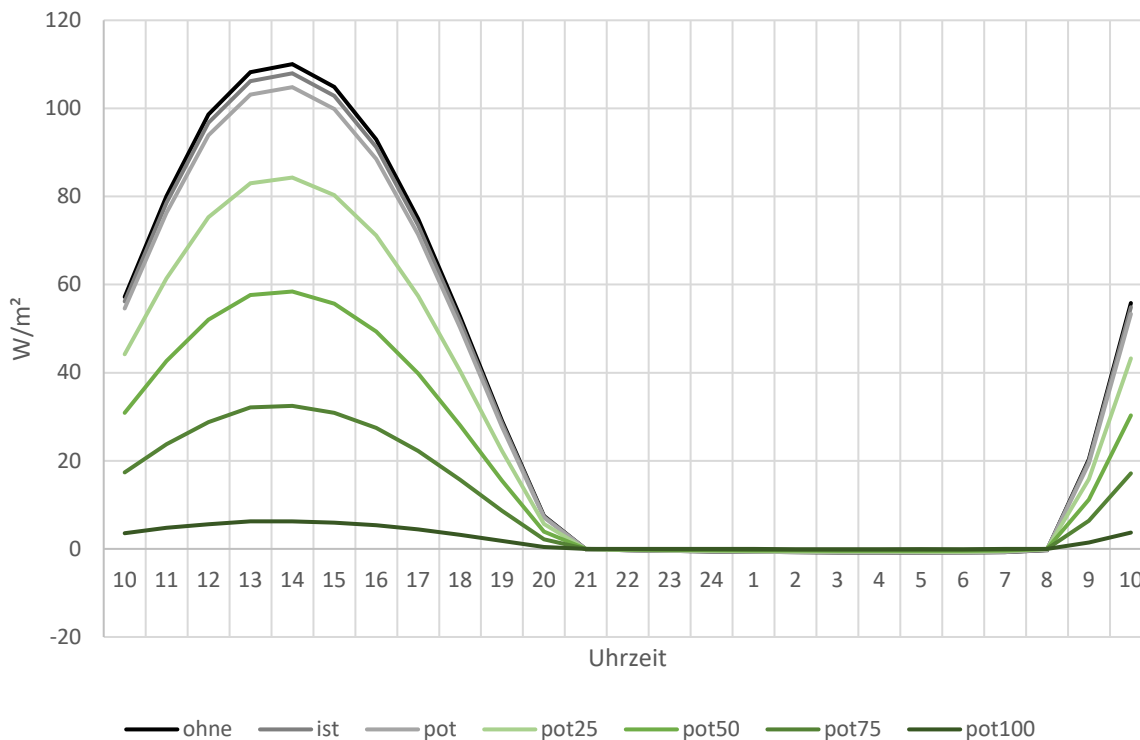


Abb. 25 Tagesgang des fühlbaren Wärmestroms von den Dächern gemittelt über alle Dächer im Essener Stadtgebiet für die verschiedenen Szenarien.

In den Morgenstunden wächst der fühlbare Wärmestrom in allen Szenarien bis zum Maximum um 14 Uhr an und sinkt wieder bis zum Sonnenuntergang. In den Nachtstunden befindet sich der fühlbare Wärmestrom für alle Szenarien mehr oder weniger auf demselben Niveau. Die kontinuierliche Reduktion des fühlbaren Wärmestroms am Tag mit der Zunahme der Gründachflächen ist in Abbildung 25 dargestellt. LBO14 bestätigen mit ihren Modellrechnungen mit zunehmenden Gründachflächen diesen Sachverhalt. Es werden dort Abnahmen des fühlbaren Wärmestroms von maximal ca.  $-30 \text{ W/m}^2$  für eine 50 % Bedeckung der Dächer durch extensive Begrünung am frühen Nachmittag aufgewiesen. Im grant50-Szenario geht die Reduktion auf bis zu  $-52 \text{ W/m}^2$  herunter. Diese Unterschiede kommen aufgrund verschiedener Modelle und Gründachparametrisierung zustande (LBO14). Der Literaturvergleich zeigt zudem, dass der im Modell MUKLIMO\_3 berechnete Einfluss von Dachbegrünung auf die Reduktion des fühlbaren Wärmestromes sich im Bereich der Erwartungen befindet. Da die Kühlwirkung vor allem auf dieser Senkung des fühlbaren Wärmestromes und der damit einhergehenden Reduktion der Oberflächentemperaturen der Dächer beruht, kann im Umkehrschluss zu Abbildung 25 gefolgert werden, dass sich die



Dachbegrünung nachts thermisch wenig bis vernachlässigbar auf ihre direkte Umgebung auswirkt.

### **Ergebnisse der idealisierten Stadt Simulationen zum steigenden Gründachanteil**

Die Abhängigkeit der bodennahen Kühlwirkung durch Dachbegrünung vom Bebauungstyp als auch von der Gründachfläche für idealisierte Städte (vergleiche mit Kapitel 3.4.5) ist in Abbildung 26 dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmenden Dachbegrünungsflächen über alle Bebauungstypen hinweg eine höhere Temperatursenkung erzielt werden kann. Dabei ist das Ausmaß der Kühlwirkung stark von den Bebauungstypen abhängig, die in Tabelle A2 im Anhang detailliert beschrieben sind.

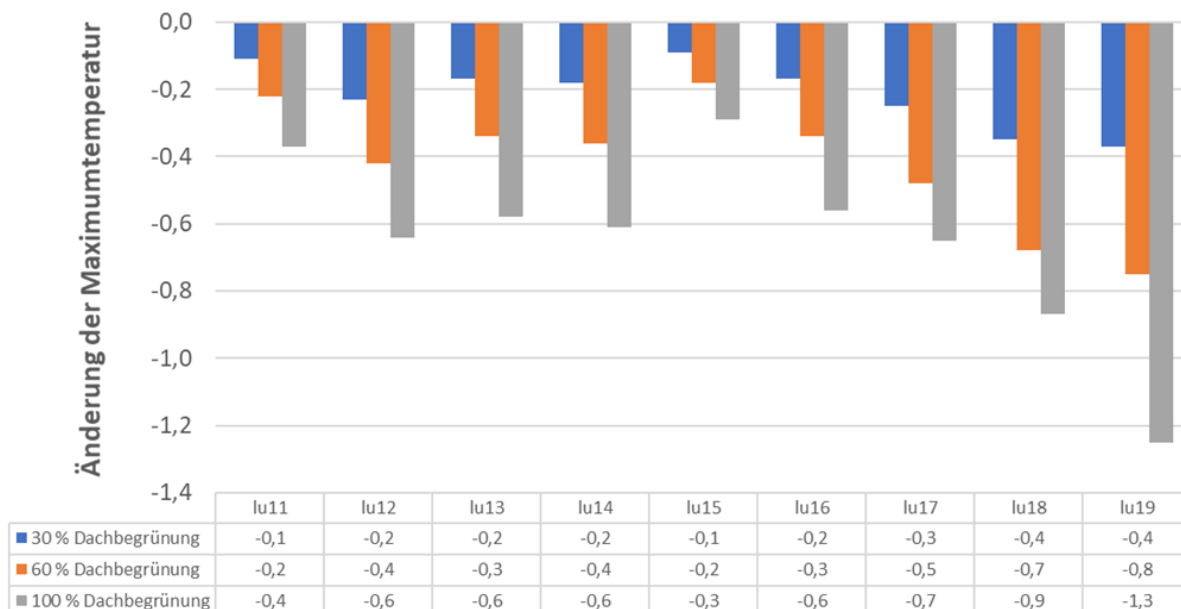


Abb. 26 Änderung der Maximumtemperatur in Kelvin (bezogen auf die bodennahe Lufttemperatur der untersten Modellgitterzelle) für neun verschiedene Bebauungstypen (lu11 bis lu19) mit zunehmendem Anteil an Dachbegrünung (30 %, 60 % und 100 %) im Vergleich zu einem Referenzlauf ohne Dachbegrünung.

Die geringsten Effekte werden bei der weniger dicht besiedelten Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung (lu11) sowie der Zeilenbebauung hoher Dichte und Hochhäuser (lu15) simuliert. Charakteristisch für diesen Bebauungstyp ist vor allem der geringere Gebäudeanteil an der Gesamtfläche der Gitterzelle im Vergleich zu den anderen Bebauungstypen. Somit steht auch weniger Dachfläche für eine Begrünung zur Verfügung. Hinzu kommt bei dem Bebauungstyp lu15 die relativ hohen Gebäudehöhen von 23 m für die Zeilenbebauung und 54 m für die Hochhäuser, die nur eine geringfügige Kühlwirkung von Dachbegrünung auf Straßenniveau ermöglichen (Tabelle A2). Stellt man die Reihenhaussiedlung (lu13) mit einer relativ geringen Gebäudehöhe der Blockbebauung (lu16)

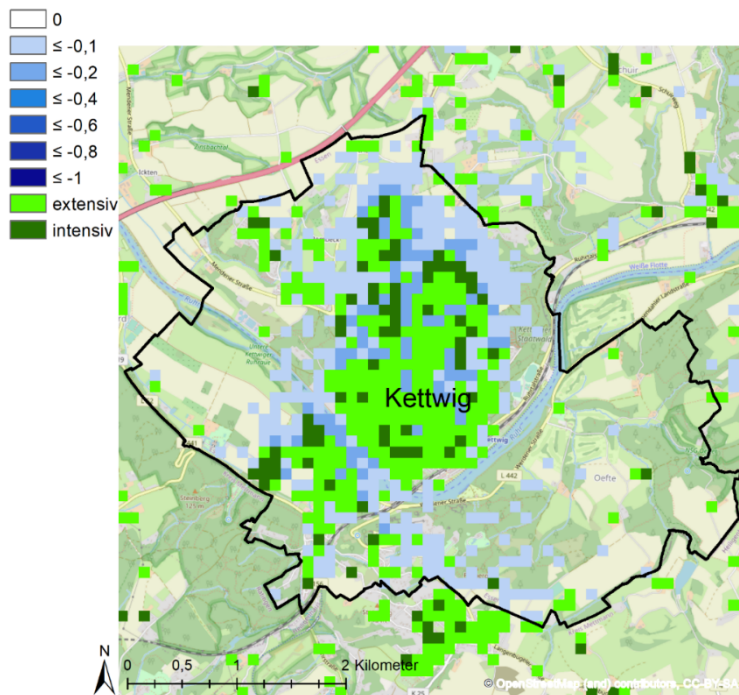
mit höheren Gebäuden, aber einem deutlich höheren Versiegelungsgrad gegenüber, werden ähnliche Abkühlungseffekte erreicht. Bei gleicher Dachbegrünungsfläche sieht man, dass sich sowohl lu13 als auch lu16 mikroklimatisch gesehen ähnlich auf das Straßenniveau auswirkt. Der Vergleich dieser beiden Bebauungstypen wird aufgrund des vorher erkannten Zusammenhangs zwischen Versiegelungsgrad und Kühlwirkung präsentiert (Abbildung 22). Der Einfluss der Gebäudehöhe wird erneut beim Vergleich zwischen der Citybebauung ab Mitte des 19. Jahrhunderts (lu17) und Industrie- und Lagergebäude (lu19) verdeutlicht. Beide Landnutzungen charakterisieren sich durch einen ähnlichen Bebauungsanteil und Versiegelungsgrad, jedoch kann aufgrund der niedrigeren Gebäudehöhe bei den Industriegebäuden und Lagerhallen bei vollständiger Gründachbedeckung etwa eine zweifach so starke Abkühlung (bis zu  $-1,3\text{ K}$ ) erzielt werden. Insgesamt betrachtet wird in der Bauungsklasse der Industrie- und Lagergebäude ebenfalls die größte Abkühlung modelliert. Dies könnte auch als Anreiz gesehen werden Industriegebiete mit Dachbegrünung zu versehen, da hier große Kühlwirkungen tagsüber zu erwarten sind von denen die dort arbeitende Bevölkerung und die technische Infrastruktur direkt profitieren kann.

Auch wenn die Szenarien mit einem erhöhten Gründachanteil weniger realistisch sind, führen sie zu dem Ergebnis, dass die Ausweitung der Gründachflächen im Rahmen der Quartiersentwicklung eine sinnvolle Maßnahme ist, um der Hitze im Quartier entgegenzuwirken. In der Bauplanung sollte die Ausweisung von begrünbaren Dächern in den Fokus treten, denn der stärkere und spürbare Kühleffekt ist erst bei hohen Gründachbedeckungen erreichbar. Die Temperaturreduktionen im Essener Stadtgebiet zeigen, dass ab einer 50 % Bedeckung der Dächer durch Dachbegrünung zu lokal wahrnehmbaren Effekten in Bodennähe kommen kann (Abbildung 22 und Tabelle 9). Daran anknüpfend ist es wichtig Gründächer priorisiert auf strategisch günstigen Dachflächen, zu installieren. Bauungen mit einer niedrigen Gebäudehöhe sind dabei zu bevorzugen (Abbildung 26). In den Essener Stadtteilen Stadtkerns und des Südviertels sind die durchschnittlichen Gebäudehöhen mit 18,1 m bzw. 16,1 m allerdings recht hoch. Dennoch zeigen die Modellrechnungen vor allem dort die höchste Kühlwirkung.

## **4.5 Ergebnisse der Dachbegrünungsarten**

Als nächster Punkt der Analyse wird die Wirksamkeit der intensiven Begrünung untersucht. Dafür wird erneut der Stadtteil Kettwig im pot100-Szenario zur Analyse in Abbildung 27 herangezogen.

Differenz Lufttemperatur  
in K um 13 Uhr MESZ in 5m



Differenz Lufttemperatur  
in K um 13 Uhr MESZ in 5m

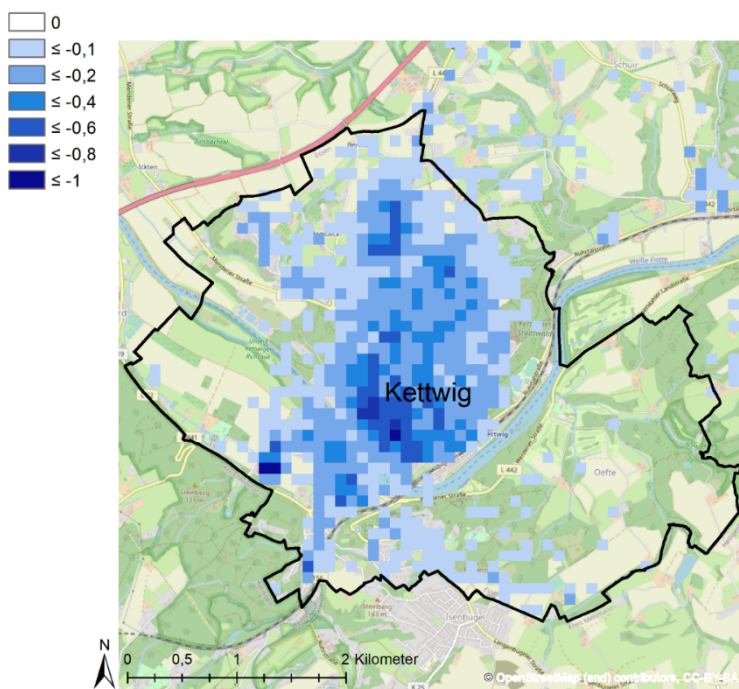


Abb. 27 Der Einfluss der Dachbegrünungsart (extensiv und Intensiv) auf die Abkühlungswirkung um 13 Uhr MESZ im Stadtteil Kettwig, oben die Kühlwirkung überblendet mit dem Begrünungstyp und unten die Kühlwirkung in 5m Höhe (Quellen: Stadt Essen und Open Street Map).

Neben den Temperaturreduktionen sind in der oberen Grafik die Gitterzellen mit extensiver Dachbegrünung hellgrün und die mit intensiver Dachbegrünung dunkelgrün eingefärbt. Die visuelle Einschätzung lässt keinen direkten Zusammenhang zwischen der Stärke der

Kühlwirkung und der Art der Dachbegrünung schließen, sondern gibt größtenteils den Versiegelungsgrad und den Gebäudegrundflächenanteil wider. Bei einer genaueren Betrachtung der Wärmeströme in Abbildung 28 ist jedoch ein Unterschied erkennbar.

Durchschnittlicher latenter und fühlbarer Wärmestrom der Dachbegrünung im Stadtteil Kettwig in Pot100

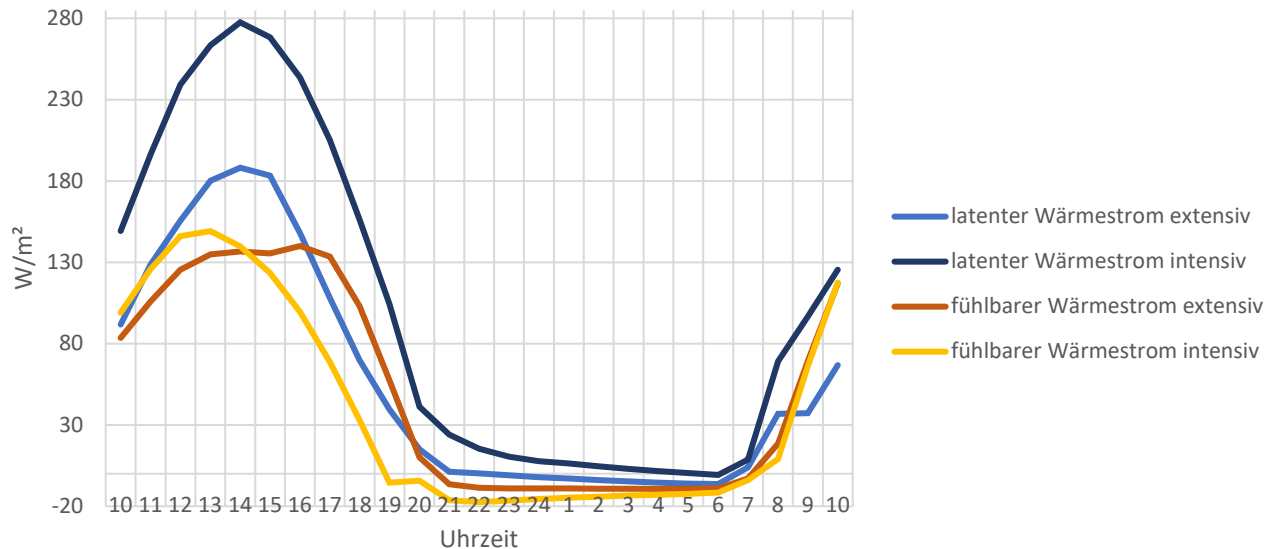


Abb. 28 Tagesgang des fühlbaren und latenten Wärmestroms für extensiv und intensiv begrünte Dächer.

Für beide Dachbegrünungsarten wird jeweils ein größerer latenter als fühlbarer Wärmestrom ermittelt. Dabei werden maximale Werte des latenten Wärmestromes um 14 Uhr MESZ von 277 W/m<sup>2</sup> für die intensive und 188 W/m<sup>2</sup> für die extensive Begrünung aufgezeigt. Dies hängt damit zusammen, dass aufgrund der höheren Bewuchsintensität des Intensivgründachs (LAI, Höhe, Stomatawiderstand) mehr Wasser über die Vegetation transpiert, was den höheren latenten Wärmestrom für die Intensivbegrünung zu Folge hat. Die extensive Begrünung hingegen charakterisiert sich vor allem mit einem höheren Stomatawiderstand, welcher typisch für eine trockenheitsangepasste Vegetation ist und zu den entscheidenden Transpirationsvariablen gehört (KSZ13). Die maximalen Werte des fühlbaren Wärmestromes beider Arten treten um 13 Uhr MESZ auf, wobei der der Intensivbegrünung mit 149 W/m<sup>2</sup> nur ca. 14 W/m<sup>2</sup> über den der Extensivbegrünung liegt. Bei Betrachtung des zeitlichen Integrals zeigt sich ein höherer fühlbarer Wärmestrom der Extensivbegrünung im Tagesverlauf. Insgesamt sind die fühlbaren Wärmeströme in Abbildung 28 höher als in Abbildung 25. Der Unterschied ist, dass Abbildung 28 den fühlbaren Wärmestrom von Substrat und Vegetation beinhaltet, während Abbildung 25 nur das Substrat berücksichtigt. Vergleicht man die Tagesmittelwerte des fühlbaren Wärmestroms vom Substrate der extensiven und intensiven

Begrünung, so ergeben sich die Durchschnittswerte von  $13 \text{ W/m}^2$  für die extensive und  $3 \text{ W/m}^2$  für die intensive Begrünung. Die gesamte Dachbegrünung hat einen höheren Tagesmittelwert von  $32 \text{ W/m}^2$ . Die Werte des fühlbaren Wärmestromes in Abbildung 28 repräsentieren somit größtenteils den Beitrag der Vegetation.

Auch in der Literatur zeigt sich, dass eine intensivere Begrünung einen größeren Einfluss auf das Mikroklima ausübt. So bestätigt NCL15, dass eine höhere Vegetation zu einer stärkeren Abkühlung der Oberflächentemperatur führt und NCW12 in den Hong Kong Simulationen, dass durch intensiverer Dachbegrünung in Form einer Baumbedeckung ein größerer Effekt als bei einer Grasbedeckung erreicht wird.

### **Ergebnisse der idealisierten Stadt Simulationen zur Gründachart**

Aufbauend auf den Erkenntnissen, die aus Abbildung 28 gezogen werden können, folgen die Untersuchungen verschiedener Dachbegrünungsarten bei der Simulation einer idealisierten Stadt mit dem Bebauungstyp einer Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. In diesen Fällen wird eine vollständige Bedeckung der Dächer durch Vegetation modelliert. Für die folgende Grafik wurden dafür die Werte der Gitterzelle im Zentrum der idealisierten Stadt ausgewählt und die Tagesprofile der bodennahen Lufttemperatur geplottet.

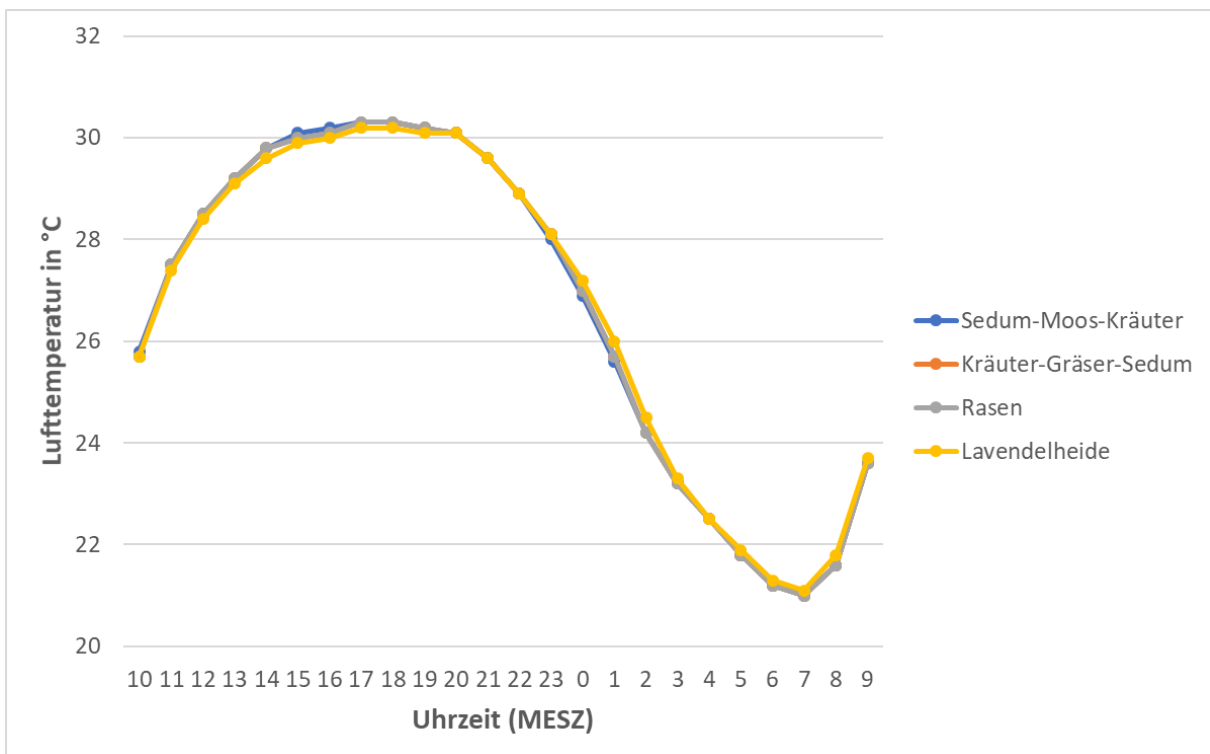


Abb. 29 Tagesgang der bodennahen Lufttemperatur für vier verschiedene Gründacharten im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet.

Die Abbildung 29 folgt der Fragestellung ob neben den bereits befundenen Unterschieden zwischen extensiver und intensiver Begrünung weitere Differenzierungen zwischen den Begrünungsarten nachgewiesen werden können. Die verwendeten Vegetationsbedeckungen mit Sedum-Moos-Kräuter (extensiv), Kräuter-Gräser-Sedum (extensiv), Rasen (intensiv) und Lavendelheide (intensiv) weisen nur geringfügige Unterschiede in der bodennahen Lufttemperatur auf. Diese Unterschiede liegen nicht im Bereich der Modellgenauigkeit.

Wie auch bei den Modellläufen mit der Stadt Essen wird zunächst der fühlbare Wärmestrom in Abbildung 30 betrachtet. Er umfasst hier die Substrat- und Vegetationskomponente des Gründachs. Gegensätzlich zu den Erwartungen spiegelt vor allem die intensive Begrünung hier hohe Werte wieder. Dies hat den Grund, dass aufgrund der höheren Vegetationsdichte in diesem Fall ein hoher fühlbarer Wärmestrom der Vegetation ausgeht. Beide Extensivformen (Sedum-Moos-Kräuter und Kräuter-Gräser-Sedum) verhalten sich hier relativ ähnlich. Die Rasenvegetation zeigt hier den geringsten fühlbaren Wärmestrom im Tagesverlauf mit einer max. Differenz von  $33 \text{ W/m}^2$  um 13 Uhr zur Intensivbegrünung.

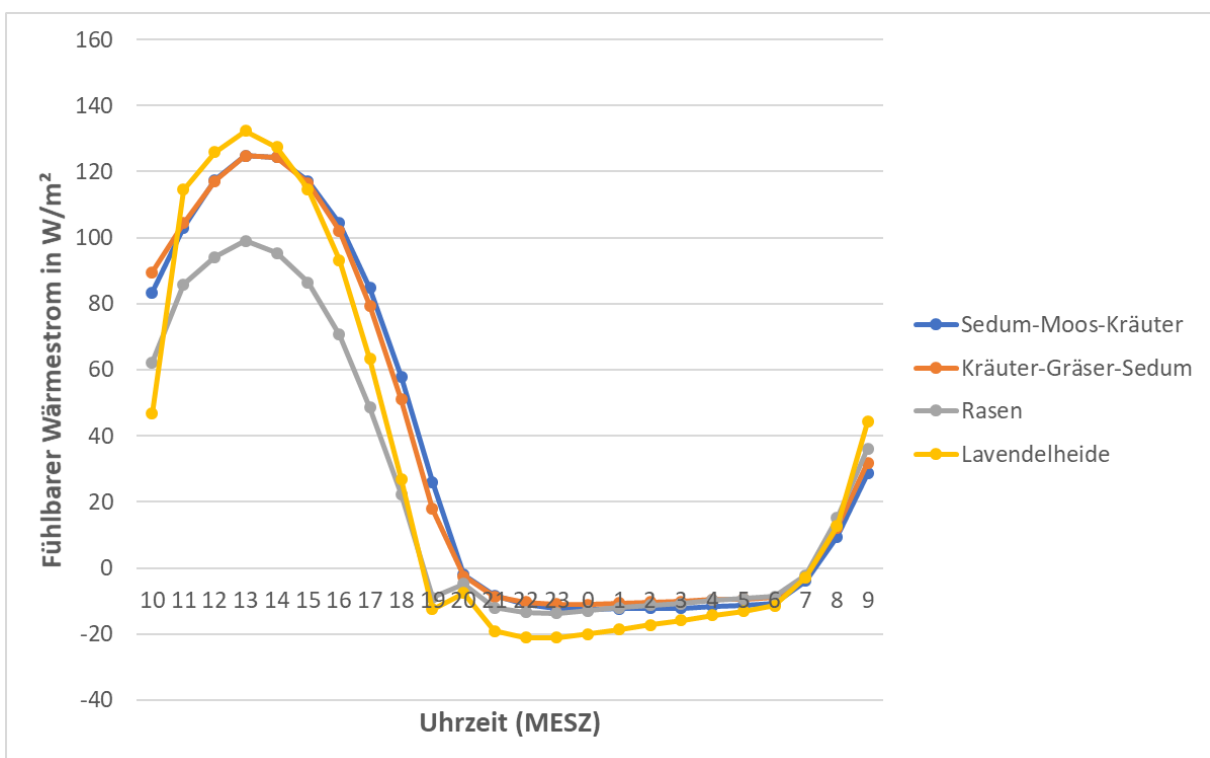


Abb. 30 Tagesgang des fühlbaren Wärmestroms der Gründächer für vier verschiedene Gründacharten im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet.

Die Darstellung des latenten Wärmestromes in Abbildung 30 zeigt der Rasen hingegen die Höchstwerte von  $394 \text{ W/m}^2$  um 14 Uhr auf. Ähnliche Werte werden von Messungen von TM07 auf dem mit Rasen bedeckten Dach der Kobe Universität im August präsentiert, jedoch fällt in

deren Simulation auch der fühlbare Wärmestrom deutlich höher als die der MUKLIMO\_3 Simulation aus, was auf die höhere Globalstrahlung zurückgeführt werden kann (TM07). Es folgen die latenten Wärmeströme der Kraut-Gras-Sedum-Bedeckung und der Staudenvegetation. Beide befinden sich mehr oder weniger auf dem gleichen Niveau. Den geringsten latenten Wärmestrom findet man in der Sedum-Moos-Kraut-Vegetation mit max. 275 W/m<sup>2</sup> ebenfalls um 14 Uhr MESZ. Rückblickend auf die Zusammenfassung der Eigenschaften der Gründacharten (Tabelle 2) ist in den Ergebnissen ein klarer Zusammenhang hier zwischen dem minimalen Stomatawiderstand und dem latenten Wärmestrom ersichtlich. Je höher der minimale Stomatawiderstand, desto geringer ist die Transpiration der Pflanzen und umgekehrt. Auffallend ist, dass die Lavendelheide-Staudenvegetation als intensive Begrünungsform tendenziell mehr transpirieren sollte. Jedoch fällt sie mit ähnlichen Werten wie die Kraut-Sedum-Moos-Vegetation auf, was darauf rückschließen lässt, dass die im Modell vorhandene Transpirationsberechnung stärker vom minimalen Stomatawiderstand als von der Bewuchsintensität abhängt.

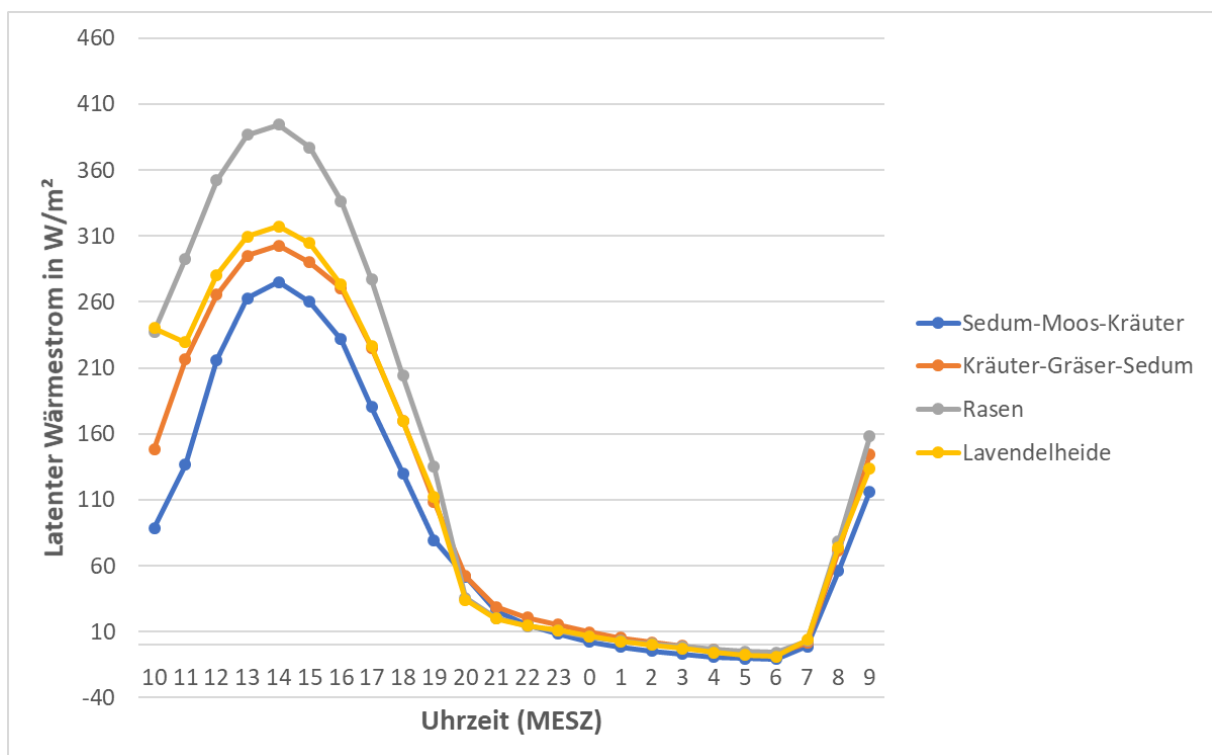


Abb. 31 Tagesgang des latenten Wärmestroms der Gründächer für vier verschiedene Gründacharten im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet.

Sowohl beim fühlbaren als auch beim latenten Wärmestrom wird nur ein geringfügiger Effekt der Dachbegrünung in den Nachtstunden verzeichnet. In Anbetracht der folgenden Abbildung 32, die den Tagesverlauf der Lufttemperatur im Gründachbestand wiedergibt, ist erkennbar, dass vor allem die intensiveren Begrünungsformen eine niedrigere Temperatur aufweisen.



Dabei beträgt der Maximalwert der Lavendelheide-Stauden-Vegetation 30,8 °C, wohingegen sich die Luft in der Sedum-Moos-Kraut-Vegetation bis zu 33,0 °C aufheizt. Zu Beginn der Nachtstunden ändert sich die Situation so, dass im Lavendelheidenbestand die höchsten Werte mit 17,8 °C vorhanden sind und sich die Sedum-Moos-Kraut-Vegetation auf 15,8 °C abkühlt. Die Werte der beiden anderen Begrünungsformen befinden sich dazwischen. Bei der Gegenüberstellung der Differenzwerte zwischen Temperaturmaximum und -minimum ergeben sich vergleichbare Werte mit der Studie von CGP19, in der anhand von Modellsimulationen mit verschiedenen Dachbegrünungsvegetationen die Differenzen der Oberflächentemperaturen unter dem Bestand im Sommer aufgezeigt werden. Der wesentliche Grund der verschiedenen Temperaturverläufe sind Verschattungseffekte, die sich durch die Zunahme der Vegetationsdichte intensivieren.

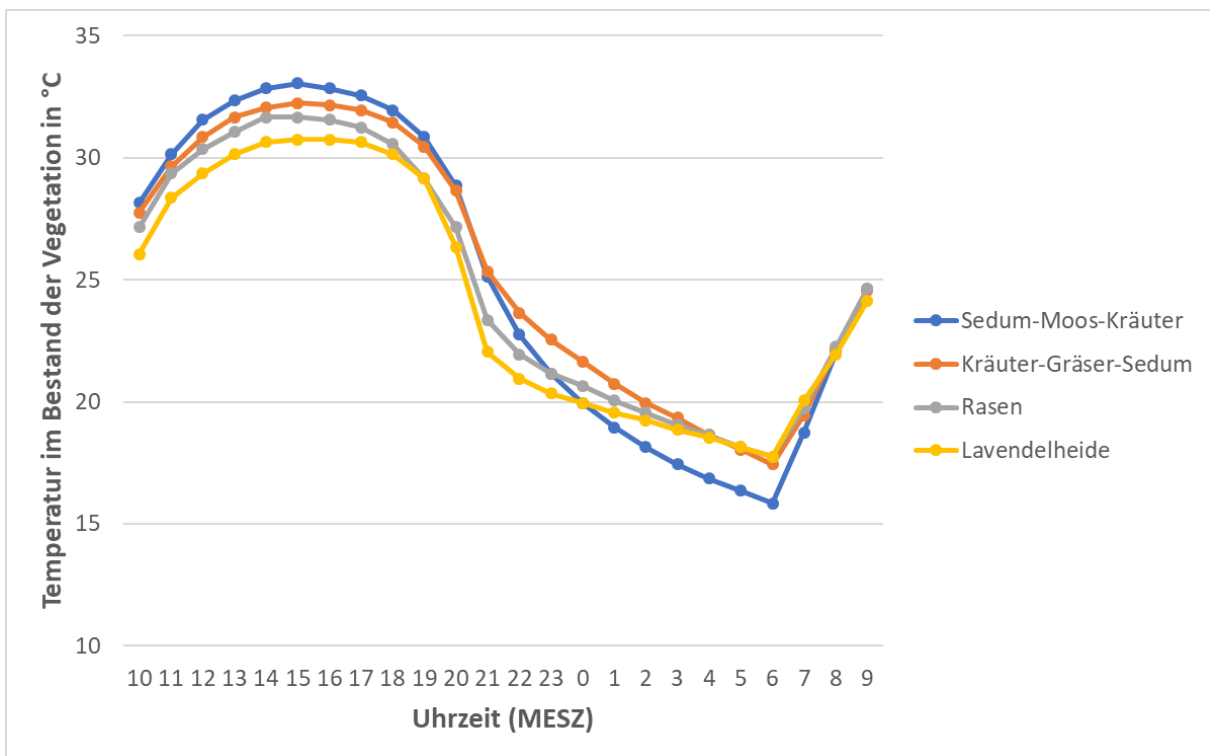


Abb. 32 Tagesgang der Temperatur im Bestand der Gründachvegetation für vier verschiedene Gründacharten im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet.

Im Kontrast zu den Ergebnissen des Projektes kommen MMP16 zur gegenteiligen Erkenntnis. Anhand von Untersuchungen verschiedener Pflanzenarten in Form von Gründachmodulen auf dem Dach der Universität Toronto zeigen die Messungen einen deutlicher ausgeprägten Kühleffekt bei Sedum-Arten als bei einer von Gras und Wildblumen dominierten Vegetationsbedeckung (MMP16).

Insgesamt betrachtet können die Klimawirkung verschiedener Dachbegrünungsarten anhand von Abbildungen 29 bis 32 unterschieden werden. Wie auch andere Studien beweisen, wirken



sich unterschiedliche Vegetationsformen unterschiedlich stark auf das Mikroklima aus. Je intensiver die Begrünungsform, desto mehr kühlenden Einfluss übt sie in der Theorie auf ihre Umgebung aus (ERW17).

## **4.6 Ergebnisse der Simulationen mit Bewässerung**

Im Folgenden wird der Einfluss von bewässerter Dachbegrünung auf das Stadtklima untersucht (siehe Einstellung irrig=2 in Kapitel 3.4.2). Dabei liegt der Fokus auf den Modellläufen der idealisierten Städte, die die resultierenden Auswirkungen einer viertägigen Hitzeepisode verdeutlichen.

### ***Ergebnisse der idealisierten Stadt Simulationen zu bewässerten und unbewässerten Gründächern***

Im folgenden Szenario der Bewässerung der Dachbegrünung wird diese Retentionsschicht genutzt um die Vegetation unterirdisch zu bewässern. Wohingegen das Substrat einer unbewässerten Dachbegrünung im Verlauf einer Hitzeepisode austrocknet, was zu einer Verringerung des latenten Wärmestromes und somit zu einer Erhöhung des fühlbaren Wärmestromes führt, bleibt der latente Wärmestrom bei einem Retentionsdach, das hier dem bewässerten Rasen entspricht, zu einem höheren Maße erhalten. In den Abbildungen 33 und 34 ist dieser Fall für eine 4-Tagessimulation der idealisierten Stadt visualisiert. Der unbewässerte Rasen, wird hier mit einer niedrigeren Substratfeuchte als bei dem Vergleich der Gründacharten simuliert, sodass der Höchstwert des latenten Wärmestromes am ersten Tag mit  $360 \text{ W/m}^2$  etwas geringer ist (Abbildung 33). Bis hin zum vierten Tag sinkt dieser Wert kontinuierlich auf bis zu  $85 \text{ W/m}^2$  als Tagesmaximum herunter. Dahingegen reduziert sich das Tagesmaximum des latenten Wärmestroms des Retentionsdaches im Laufe der simulierten Hitzeperiode nur geringfügig von ca.  $416 \text{ W/m}^2$  auf  $402 \text{ W/m}^2$ .

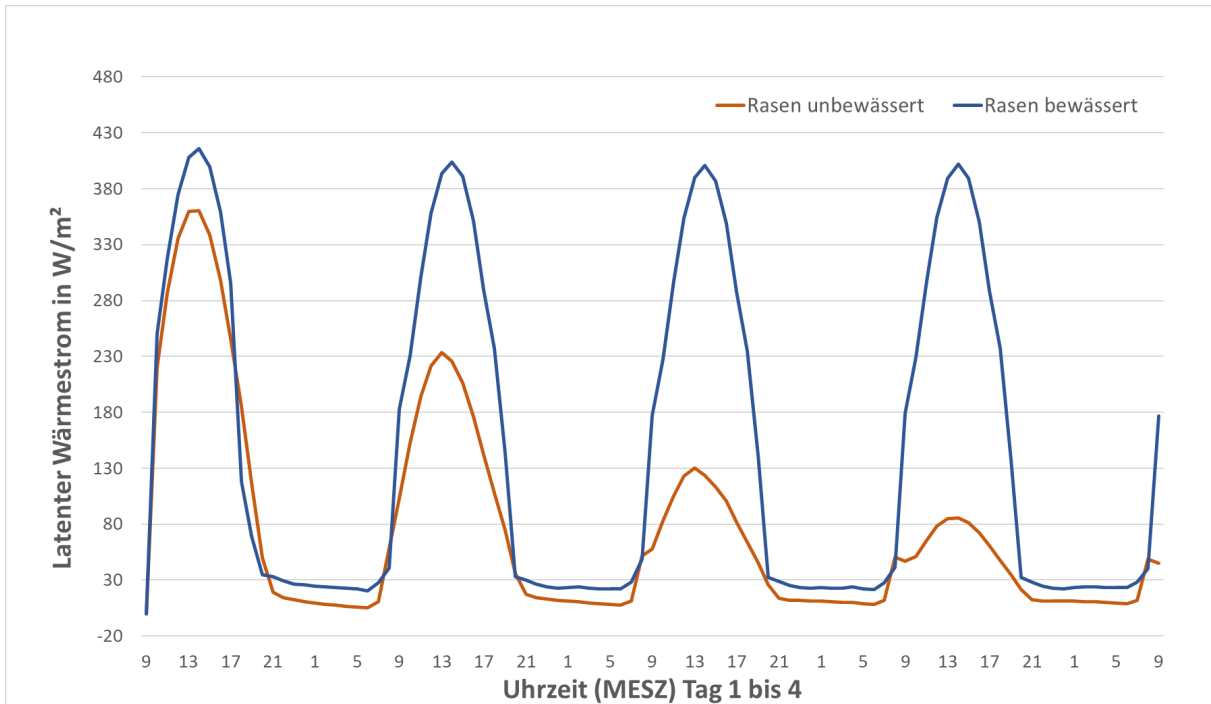


Abb. 33 Tagesgang des latenten Wärmestroms für ein bewässertes und ein unbewässertes Gründach über vier Tage im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet.

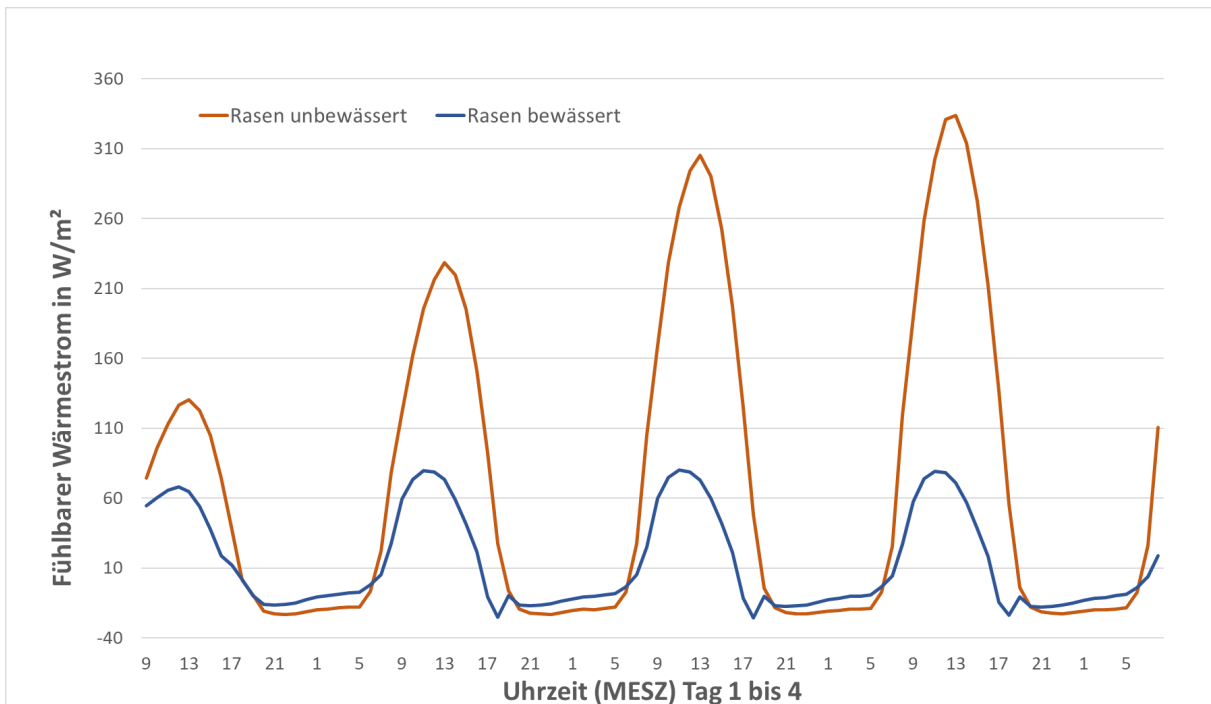


Abb. 34 Tagesgang des fühlbaren Wärmestromes für ein bewässertes und ein unbewässertes Gründach über vier Tage im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet.

Umgekehrt ist in Abbildung 34 eine Zunahme des Tagesmaximums des fühlbaren Wärmestromes des unbewässerten Rasens von 130 W/m² auf 333 W/m² bemerkbar. Zugleich

steigt der im Tagesverlauf maximale fühlbare Wärmestrom des Retentionsdaches ebenfalls leicht von  $68 \text{ W/m}^2$  auf  $79 \text{ W/m}^2$  an. Dabei entspricht die Differenz des maximalen fühlbaren Wärmestromes des Retentionsdaches vom ersten zum vierten Tag mehr oder weniger dem Rückgang des latenten Wärmestromes des Retentionsdaches von ersten zum vierten Simulationstag in Abbildung 33.

Der abschließende Punkt der Bewertung des Retentions Gründaches befasst sich mit der Lufttemperatur im Bestand in Abbildung 35. Im Vergleich zu den Wärmeströmen ist in den Tagesmaxima nur ein leichter Zuwachs von  $1,8 \text{ K}$  zu dem anfänglichen Höchstwert mit  $35 \text{ °C}$  im unbewässerten Szenario nachweisbar. Die minimalen Werte hingegen bleiben bei Werten um die  $13 \text{ °C}$  auf dem gleichen Level. Neben dem Temperaturzuwachs der unbewässerten Dachvegetation ist auffällig, dass die Temperaturamplitude im Tagesverlauf beim Retentionsdach deutlich gedämpfter ist. Bei gleicher Dachbegrünungsart führt der niedrigere fühlbare Wärmestrom zu einer kühleren Temperatur in der Vegetationsschicht, sodass sich diese Temperaturreduktion ebenfalls auf die unmittelbare Umgebung auswirken kann.

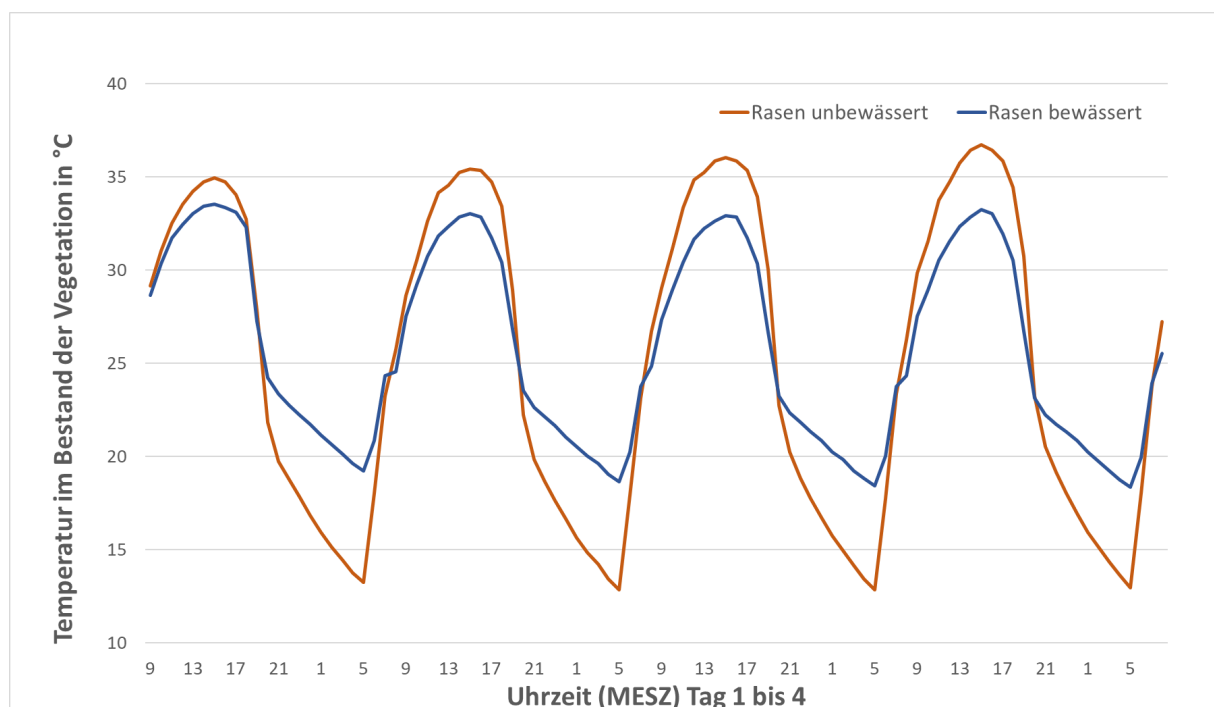


Abb. 35 Tagesgang der Temperatur im Bestand der Gründachvegetation für ein bewässertes und ein unbewässertes Gründach über vier Tage im Bebauungstyp Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte. Um die Wirkung darstellen zu können, wurde mit 100 % Dachbegrünung gerechnet.

Zusammengefasst lässt sich ein markanter Unterschied zwischen einem Dach mit unbewässertem und bewässertem Begrünung ausfindig machen. Der mikroklimatische Mehrwert liegt hier vor allem bei der Erhaltung des latenten Wärmestromes und somit der Aufrechterhaltung der Kühlleistung. Während der latente Wärmestrom des unbewässerten

Daches bei einer trockenen Hitzeepisode von dem Wassergehalt des Substrates abhängt, kann eine zusätzliche Wasserzufuhr dem entgegenwirken. So zeigt HSW18 anhand der Modellierung von Bewässerungsszenarien ebenfalls einen deutlichen Einfluss einer zusätzlichen Wasserzufuhr auf den fühlbaren Wärmestrom einer extensiven Dachbegrünung. Zudem verdeutlicht NOR2015 die Notwendigkeit Dachgrün zu wässern um eine effektive Kühlwirkung erzielen zu können. Bei den Simulationen der Stadt Toronto von BKM02 hat die Bewässerung von Dachbegrünung einen erheblichen Einfluss auf den Kühleffekt, sodass die Temperatur anstatt nur um 0,5 K auf 1 K oder auch bis zu 1,5 K reduziert werden kann.

## 5. Fazit

Dieser Bericht beschreibt die mit dem Computermodell MUKLIMO\_3 durchgeführten Stadtklimasimulationen und Ergebnisse von verschiedenen Gründachanpassungsmaßnahmen für die Stadt Essen. Die für die Stadtklimamodellierung notwendigen Eingangsdaten der Gründächer wurden mit einem automatisierten fernerkundlichen Verfahren erstellt. Die weitere Transformation der Gründachdaten auf das MUKLIMO\_3 Modellgitter wurde im Geodaten-Programm des GUAMO Projekts eingebaut und steht zukünftig allen Programmnutzern zur Verfügung. Ebenso wurde das Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 angepasst diese neuen Eingangsdatensätze und Gründachparameter zu lesen und zu berücksichtigen. Die Modellverbesserungen zur Simulation realer Dachbegrünung im Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 kann in zukünftigen Stadtklimaprojekten standardmäßig genutzt werden. Da die Entwicklung von Stadtklimamodellen in den nächsten Jahren die Simulation des Klimas ganzer Städte auf der Gebäudeskala mit einer Gitterweite von 1 m bis 10 m erlauben wird, können die neu gewonnen Erkenntnisse und Methoden auch in das aktuell in Entwicklung befindliche Stadtklimamodell PALM-4U (<http://www.uc2-program.org/>) fließen. Die höhere Auflösung des PALM-4U Modells ermöglicht auch eine genauere Quantifizierung der Kühlleistung einzelner Gründächer bzw. grüner Fassaden.

Bei der Literaturrecherche nach thermischen und hydraulischen Parametern zur Beschreibung des Gründachsubstartes hat sich gezeigt, dass es hier teilweise an Daten mangelt. Es wäre wünschenswert, wenn die Hersteller der Substrate und Dachbegrünungssysteme diese für die Modellierung wichtigen Kenngrößen wie die Saugspannungskurve des Substrates zukünftig liefern können.

Alle Eingangsdaten (z. B. Gründach- und Gründachpotentialdatensatz) und die Modellergebnisse wurden der Stadtverwaltung Essen in Form von Rasterdaten in einer Geodatenbank für die weiteren Arbeiten am Klimaanpassungskonzept bereitgestellt. Die

Projektergebnisse unterstützen die kommunalen Fachbehörden bei der Entwicklung geeigneter Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel und somit auch eine frühzeitige Planung von Vorsorgemaßnahmen gegen Hitze und zukünftige Extremwetterereignisse in Städten anzugehen.

Aus den Modellergebnissen konnte abgeleitet werden in welchen Stadtquartieren eine hohe Wärmebelastung und ein Anpassungsbedarf an Hitze besteht. Die Modellergebnisse zeigen, dass die in Essen vorhanden Gründächer (11.267 Gebäude entspricht ca. 44,9 ha) und selbst die Begrünung aller potentiell möglichen Dachflächen (132.210 Gebäuden entspricht ca. 98,3 ha) noch nicht ausreicht um ein ganzes Stadtquartier oder die Stadt signifikant zu kühlen. Bei der derzeitigen flächenhaften Ausgestaltung der Gründächer müssen diese mit weiteren Anpassungsmaßnahmen kombiniert werden, um die zusätzliche Hitze durch die Klimaerwärmung kompensieren zu können und das thermische Niveau von heute zu erhalten. An einigen Orten mit sehr hohem Flächenanteil der Dachbegrünung (wie Westviertel (7,6 %), Rüttenscheid (3,4 %) und Kettwig (3,3 %)) konnte jedoch gezeigt werden, dass schon heute diese Orte lokal von der kühlenden Wirkung der Dachbegrünung in einer Größenordnung von - 0,7 K profitieren können.

Die Szenarien mit der weiteren Steigerung der Gründachflächen lassen eine signifikante Kühlleistung im Straßenraum erkennen, die auch über im gesamten Stadtquartier wirkt. Die Begrünungsart spielt für die bodennahe Lufttemperatur bei flächendeckender Anwendung eine eher untergeordnete Rolle. Sie hat aber einen großen Einfluss auf die Dachtemperaturen und somit auf die Isolierung der Dachgeschosse sowie den Wärme- und Kälteenergiebedarf des Hauses. Intensive Dachbegrünung mit größerer Substrattiefe und hoher Vegetation senkt die Dachtemperatur am Tag stärker als eine extensive Dachbegrünung. Auch die Temperaturschwankungen über den Tag sind bei intensiv begrünten Dächern geringer als bei extensiv begrünten Dächern. Die mächtigere Substratschicht der intensiven Dachbegrünung ermöglicht ebenso einen höheren Wasserrückhalt bei Starkregenereignissen. Die positive und ausgleichende thermische Wirkung von bewässerten oder wassergesättigten Gründächern auf das Dach zeigt sich insbesondere während langanhaltender Hitze- und Trockenphasen. HW17 weisen jedoch darauf hin, dass eine Bewässerung der Dachvegetation nur in Frage kommen sollte, wenn sie nachhaltig ist und die Ressource Wasser nicht anderswo gebraucht wird.

## Literaturverzeichnis

- [AK16] AKBARI, H., D. KOLOKOTSA.: *Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research*. Energy and Buildings, Seiten 834-842, 133 2016.
- [AZE15] ANSEL, W., J. ZEIDLER, T. ESCH: *Fernerkundliche Identifizierung von Vegetationsflächen auf Dächern zur Entwicklung des für die Bereiche des Stadtklimas, der Stadtentwässerung und des Artenschutzes aktivierbaren Flächenpotenzials in den Städten*. Abschlussbericht des Entwicklungsprojektes gefördert unter dem Az 30299 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Nürtingen, 2015.
- [AZE16] ANSEL, W., J. ZEIDLER, T. ESCH, H. BORNHOLDT, A. SCHMID, H. WAHLE, B. REICHMANN, H. MÜLLER, B. EEISENBERG, F. LUDWIG, D. SCHÖNLE: *Kommunale Gründachstrategien. Inventarisierung, Potenzialanalyse, Praxisbeispiele*, Nürtingen, 2016.
- [ABB22] APPL, R., BAUNE, D., BELKE, C., BUDDENDICK, N., DILGER, J., GÖSSNER, D., HIRSCHLE, W., MANN, G., MOLLENHAUER, F., NIEWÖHNER, M. UND WESTERHOLT, D.: *BuGG-Fachinformation „Begrüntes Umkehrdach“*. [https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/BegrueintesUmkehrdach/BuGG-Fachinformation\\_Begrueintes\\_Umkehrdach\\_01-2022.pdf](https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/BegrueintesUmkehrdach/BuGG-Fachinformation_Begrueintes_Umkehrdach_01-2022.pdf), 1. Auflage, Berlin 2022.
- [ATS11] AYATA, T., P.C. TABARES-VELASCO, J. SREBRIC: *An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in a laboratory setup*. Building and environment, Seiten 1851-1861, 46(9) 2011.
- [BKM02] BASS, B., S. KRAYENHOFF, A. MARTILLI, R. STULL: *Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure*. Urban Heat Island Summit: Toronto, 2002.
- [Ber16] BERARDI, U.: *The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits*. Energy and buildings, 217-229, 121 2016.
- [BBK10] BOWLER, D. E., L. BUYUNG-ALI, T.M. KNIGHT, A.S. PULLIN: *Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence*. Landscape and urban planning, Seiten 147-155. 97(3) 2010.
- [BGK22] BUNDSCHUH, J. GÖSSNER, D. KÜSTERS, P., LINGEN, K., MANN, G., NIEBERT, T. REIM, M. Richter, M., SCHENK, D., & WOLFF, F. - BuGG Projektgruppe 12-2021: *BuGG-Positionspapier „Gebäudebegrünung als Klimafolgenanpassungsmaßnahme“*, 2022  
[https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/Positionspapier-GebGr-Klimafolgenanpassungsmaßnahme/BuGG Positionierungspapier U 20220126.pdf](https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/downloads/bugg-fachinfos/Positionspapier-GebGr-Klimafolgenanpassungsmaßnahme/BuGG_Positionierungspapier_U_20220126.pdf), zuletzt abgerufen am 22.02.2022
- [CGP19] CASCONI, S., A. GAGLIANO, T. POLI, G. SCIUTO: *Thermal performance assessment of extensive green roofs investigating realistic vegetation-substrate configurations*. Building Simulation. Tsinghua University Press. Seiten 379-393, 12(3) 2019.
- [CHD07] COENRADIE, B., L. HAAG, A. DAMM: *Hauptstudie „Entwicklung und Umsetzung eines hybriden Verfahrensansatzes zur Versiegelungskartierung in Berlin“ – Abschlussbericht*. Berlin. 2007.

- [DLB13] DE MUNCK, C. S., LEMONSU, A., BOUZOUIDJA, R., MASSON, V., & CLAVERIE, R.: *The GREENROOF module (v7. 3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB*. Geoscientific Model Development, Seiten 1941-1960 6(6) 2013.
- [DKD14] DECRUZ, A., KOKOGIANNAKIS, G., DARKWA, J., YUAN, K. & STRACHAN, P.: *Development of databases for facilitating green roof energy simulation assessments*. 2nd Asia conference of International Building Performance Simulation Association (ASim2014), Seiten 1-8, 2014. AISM.
- [ERW17] EKSI, M., D.B. ROWE, I.S. WICHMAN, J.A. ANDRESEN: *Effect of substrate depth, vegetation type, and season on green roof thermal properties*. *Energy and Buildings*, Seiten 174-187, 145 2017
- [FKR11] FRÜH, B., M. KOSSMANN, M. ROOS: *Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung*. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 68 Seiten, 237 2011. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201106095249>.
- [FLL18] Landschaftsbau, F. L. (Ed.): *Dachbegrünungsrichtlinien: Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen*. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau eV (FLL). 2018.
- [HKF18] HEENE, V, M. KOSSMANN, P. FUCHS: *Copernicus-Daten für Stadtklimasimulationen*, Kapitel 3.4 in Ehlert, I. und Schweitzer, C. (Hrsg.) *Copernicus für das Umweltmonitoring – Eine Einführung*. Seiten 38-42, 2018. [https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Tutorial\\_Copernicus\\_online.pdf](https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Tutorial_Copernicus_online.pdf)
- [HSW18] HEUSINGER, J., D.J. SAILOR, S. WEBER: *Modeling the reduction of urban excess heat by green roofs with respect to different irrigation scenarios*. *Building and Environment*, Seiten 174-183, 131 2018.
- [HW17] HEUSINGER, J., S. WEBER: *Surface energy balance of an extensive green roof as quantified by full year eddy-covariance measurements*. *Science of the Total Environment*, Seiten 220-230, 577 2017.
- [IPC21] IPCC, 2021: Summary for Policymakers. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Seiten 3–32, 2021.
- [KSZ13] KOLOKOTSA, D., M. SANTAMOURIS, S.C. ZEREFOS: *Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions*. *Solar Energy*, Seiten 118-130, 95 2013.
- [KMB03] KRAYENHOFF, E. S., A. MARTILLI, B. BASS, R. STULL: *Mesoscale simulation of urban heat mitigation strategies in Toronto, Canada*. Fifth International Conference on Urban Climate. Seiten 1-5, 2003.
- [KCK20] KUECHLY, H.U., A.G. COZACU, N.C. KODL, C., VALLENTIN: *Grundlagen der Fernerkundung*. Inforeihe SAPIENS: *Satellitendaten für Planung, Industrie, Energiewirtschaft und Naturschutz*, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. 2020. DOI: <https://doi.org/10.2312/sapiens.2020.001>
- [KMD15] KUTTLER, W., A. MIETHKE, D. DÜTEMEYER, A.-B. BARLAG: *Das Klima von Essen / The Climate of Essen*, Westarp Wiss. 2015.

- [LWS14] LEE, K. E., WILLIAMS, K. J., SARGENT, L. D., FARRELL, C., & WILLIAMS, N. S.: Living roof preference is influenced by plant characteristics and diversity. *Landscape and Urban Planning*. Seiten 152-159, 122 2014.
- [LWS15] LEE, K. E., WILLIAMS, K. J., SARGENT, L. D., WILLIAMS, N. S., & JOHNSON, K. A.: *40-second green roof views sustain attention: The role of micro-breaks in attention restoration*. *Journal of Environmental Psychology*. Seiten 182-189, 42 2015.
- [LBO14] LI, D., E. BOU-ZEID, M. OPPENHEIMER: *The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies*. *Environmental Research Letters*. 055002, 9(5) 2014.
- [LMM10] LUNDHOLM, J., MACIVOR, J. S., MACDOUGALL, Z., & RANALLI, M.: *Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions*. *PloS one*, e9677, 5(3) 2010.
- [MGR18] MARONGA, B., G. GROß, S. RAASCH, S. BANZHAF, R. FORKEL, W. HELDENS, F. KANANI-SÜHRING, A. MATZARAKIS, M. MAUDER, D. PAVLIK, J. PFAFFEROTT, S. SCHUBERT, G. SECKMEYER, H. SIEKER, K. TRUSILOVA: *Development of a new urban climate model based on the model PALM - Project overview, planned work, and first achievements*. *Met. Z.*, 28(2) 2018.
- [MMP16] MACIVOR, J. S., L. MARGOLIS, M. PEROTTO, J.A. DRAKE: *Air temperature cooling by extensive green roofs in Toronto Canada*. *Ecological Engineering*. Seiten 36-42, 95 2016.
- [MGW21] MANN, G., R. GOHLKE, F. WOLFF, M. BEUCHMÜLLER, S. HERFORT, S. LUCK, F. MOLLENHAUER, P. STRUSS, S. VAN MEEGEN, L. VÖTIG, T. WEIGEL: *BuGG-Marktreport Gebäudegrün 2021- Dach-, Fassaden- und Innenraumbegrünung- Deutschland, 2021*.
- [MTS21] MANSO, M., TEOTÓNIO, I., SILVA, C. M., & CRUZ, C. O.: *Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110111, 135 2021.
- [NCG16] NASH, C., CLOUGH, J., GEDGE, D., LINDSAY, R., NEWPORT, D., CIUPALA, M. A., & CONNOP, S.: *Initial insights on the biodiversity potential of biosolar roofs: a London Olympic Park green roof case study*. *Israel Journal of Ecology and Evolution*. Seiten 74-87, 62(1-2) 2016.
- [NCW12] NG, E., L. CHEN, Y. WANG, C. YUAN: *A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong*. *Building and Environment*. Seiten 256-271, 47 2012.
- [Nop17] NOPPEL, H.: *Modellbasierte Analyse des Stadtklimas als Grundlage für die Klimaanpassung am Beispiel von Wiesbaden und Mainz*. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 3 des Projekts KLIMPRAX Wiesbaden/Mainz - Stadtklima in der kommunalen Praxis. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 249, 105 Seiten, 2017. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201709282078>
- [NCL15] NORTON, B. A., A.M. COUTTS, S.J. LIVESLEY, R. J. HARRIS, A.M. HUNTER, N.S. WILLIAMS: *Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes*. *Landscape and urban planning*. Seiten 127-138, 134 2015.
- [SEG12] SAILOR, D. J., ELLEY, T. B., & GIBSON, M.: *Exploring the building energy impacts of green roof design decisions—a modeling study of buildings in four distinct climates*. *Journal of Building Physics*. Seiten 372-391, 35(4) 2012.



- [SSZ92] SIEBERT, J., U. SIEVERS, W. ZDUNKOWSKI: *A one-dimensional simulation of the interaction between land surface processes and the atmosphere*. Boundary-Layer Meteorology. Seiten 1-34, 59 1992.
- [SFZ83] SIEVERS, U., R. FORKEL, W. ZDUNKOWSKI: *Transport equations for heat and moisture in the soil and their application to boundary layer problems*. Beitr. Phys. Atmosph. Seiten 58-83, 56 1983.
- [Sie90] SIEVERS, U.: *Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten*. *Umweltmeteorologie*, Schriftenreihe Band 15: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf. Seiten 92-105, 1990.
- [Sie95] SIEVERS, U.: *Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen*. *Meteorologische Zeitschrift*, Seiten 3-15, N. F. 4 1995.
- [Sie12] SIEVERS U.: *Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO\_3 Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung*. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 142 Seiten, 240 1995. ISBN 978-3-88148-465-7, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-2014081319909> .
- [SF12] SIEVERS, U., B. FRÜH: *A practical approach to compute short-wave irradiance at the surface of sub-grid scale buildings*. *Meteorologische Zeitschrift*. Seiten 349-364, 21 2012.
- [Sie16] SIEVERS U.: *Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO\_3 Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen*. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 151 Seiten, 248 2016. ISBN 978-3-88148-490-9, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201606173510> .
- [SZ86] SIEVERS, U., W. ZDUNKOWSKI: *A microscale urban climate model*. Beitr. Phys. Atmosph. Seiten 13-40, 59 1986.
- [TM07] TAKEBAYASHI, H., M. MORIYAMA: *Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island*. *Building and environment*. Seiten 2971-2979, 42(8) 2007.
- [Ulr84] ULRICH, R.: *View through a window may influence recovery*. *Science*. Seiten 224-225, 224(4647) 1984.
- [VPT17] VERA, S., PINTO, C., TABARES-VELASCO, P. C., BUSTAMANTE, W., VICTORERO, F., GIRONÁS, J., & BONILLA, C. A.: *Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates*. *Energy and Buildings*, 312-321, 146 2017.
- [VDI08] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): *Umweltmeteorologie - Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung Teil 1: Klima*. VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2, Beuth-Verlag, Berlin. 2008.
- [WS22] Wang, X., Li, H., & Sodoudi, S.: *The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort*. *Building and Environment*, 109082, 217 2022.
- [ZEA15] ZEIDLER, J., T. ESCH, W. ANSEL: *Fernerkundliche Inventarisierung und Potenzialanalyse von Dachbegrünung - Benutzerhandbuch Software*. Oberpfaffenhoven. 2015.
- [ZTS13] ZHAO, M., TABARES-VELASCO, P. C., SREBRIC, J., & KOMARNENI, S.: *Comparison of green roof plants and substrates based on simulated green roof thermal performance with measured material properties*. In 13th Conference of

International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France. 2013.

- [ZTS14] ZHAO, M., TABARES-VELASCO, P. C., SREBRIC, J., KOMARNENI, S., & BERGHAGE, R.: *Effects of plant and substrate selection on thermal performance of green roofs during the summer*. Building and Environment, Seiten 199-211, 78 2014.
- [ZS13] ZIRKELBACH, D., & SCHAFACZEK, B.: *Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangsparemtern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten*. 2013.

### Internetquellen:

HYGON NRW (letzter Aufruf 10.06.22)

<https://www.hygon-hvd.nrw.de/LUA/hygon/pegel.php>

Palm4U Land Surface Parameter (letzter Aufruf 10.06.22)

[https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/app/land\\_surface\\_parameters#vegetation\\_type](https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/app/land_surface_parameters#vegetation_type)

Stadt Essen – Bevölkerungszahlen (letzter Aufruf 10.06.22)

<https://media.essen.de/media/wwwessende/aemter/12/Bevoelkerungszahlen.pdf>

## Anhang

Tab. A1 MUKLIMO\_3 Modellparameter für Landbedeckungsklassen mit Bebauung (hierbei ist ID die Klassennummer, N die Anzahl der Gitterzellen mit dieser Landbedeckung,  $g_b$  der Gebäudegrundflächenanteil,  $h_b$  die mittlere Gebäudehöhe in m,  $w_b$  der Wandflächenindex und  $v$  der Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden)

ID	N	Beschreibung	$g_b$ *	$h_b$	$w_b$	$v$ #
1	8238	Durchgehend städtische Prägung mit sehr dichter Bebauung (Urban Atlas 2012)	0,26	10,33	2,77	0,70
2	25434	Städtische Prägung mit dichter Bebauung (Urban Atlas 2012)	0,18	9,19	2,85	0,48
3	5396	Städtische Prägung mit mitteldichter Bebauung (Urban Atlas 2012)	0,12	8,68	2,84	0,27
4	728	Städtische Prägung mit mäßig dichter Bebauung (Urban Atlas 2012)	0,07	8,12	2,82	0,11
5	74	Städtische Prägung mit lockerer Bebauung (Urban Atlas 2012)	0,09	7,18	2,60	0,12
6	857	Vereinzelte Gebäude (Urban Atlas 2012)	0,06	7,39	2,50	0,02
7	17739	Industriell, gewerblich, öffentlich, militärisch und andere privat genutzte Gebäude (Urban Atlas 2012)	0,22	9,81	1,58	0,62
9	674	Straßen und zugehöriges Land (Urban Atlas 2012)	0,07	10,71	2,85	0,53
10	1246	Schienenwege und zugehöriges Land (Urban Atlas 2012) (Urban Atlas 2012)	0,04	8,00	2,32	0,56
11	170	Hafen (Urban Atlas 2012)	0,18	9,50	1,68	0,74
14	115	Baustellen (Urban Atlas 2012)	0,08	8,49	1,91	0,32
15	516	Landflächen ohne derzeitige Nutzung (Urban Atlas 2012)	0,04	7,60	2,05	0,25

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

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

Tab. A2 MUKLIMO\_3 Modellparameter für Landbedeckungsklassen mit Bebauung für die idealisierten Stadt Simulationen (hierbei ist ID die Abkürzung der Landnutzungs-klasse,  $g_b$  der Gebäudegrundflächenanteil,  $h_b$  die mittlere Gebäudehöhe in m,  $w_b$  der Wandflächenindex und  $v$  der Versiegelungsanteil der nicht bebauten Fläche zwischen den Gebäuden)

ID	Beschreibung	$g_b^*$	$h_b$	$w_b$	$v^{\#}$
lu11	Ein- und Mehrfamilienhaussiedlung geringer Dichte	0,20	9,00	2,88	0,30
lu12	Dorfkern und Einfamilienhaussiedlung hoher Dichte	0,50	9,00	2,23	0,80
lu13	Reihenhaussiedlung	0,35	9,00	1,73	0,30
lu14	Zeilenbebauung mittlerer Dichte	0,30	16,00	3,68	0,80
lu15	Zeilenbebauung hoher Dichte und Hochhäuser	0,12 (0,02)	23,00 (54,00 )	4,49 (10,5 3)	0,55
lu16	Blockbebauung	0,32	19,00	3,08	0,80
lu17	Citybebauung ab Mitte des 19. Jahrhunderts	0,55	19,00	2,14	0,90
lu18	Mittelalterliche Altstadt	0,68	16,00	1,62	0,95
lu19	Industrie- und Lagergebäude	0,52	12,00	0,90	0,95

Tab. A3 Ergebnisse des Gründachkatasters bezogen auf die Essener Stadtteile

<b>Stadtteile</b>	<b>Gesamtdachfläche im Stadtteil</b>	<b>Anzahl Gründächer</b>	<b>Summe Gründachfläche</b>	<b>Summe intensive Gründachfläche</b>	<b>Anteil Dachbegrünung an Gesamtdachfläche</b>	<b>Anteil intensiver Dachbegrünung an Gründach</b>
<b>Altendorf</b>	490383,4	254	10836,5	1031,6	2,2%	9,5%
<b>Altenessen-Nord</b>	679126,5	316	10015,1	999,0	1,5%	10,0%
<b>Altenessen-Süd</b>	1081384,2	405	17810,1	1445,7	1,6%	8,1%
<b>Bedingrade</b>	354931,4	114	2808,7	288,7	0,8%	10,3%
<b>Bergeborbeck</b>	922915,0	122	5189,3	737,7	0,6%	14,2%
<b>Bergerhausen</b>	513732,4	230	9673,1	594,2	1,9%	6,1%
<b>Bochold</b>	654761,8	293	9788,5	872,0	1,5%	8,9%
<b>Borbeck-Mitte</b>	496903,6	197	5840,0	612,9	1,2%	10,5%
<b>Bredeney</b>	572571,9	432	14098,6	1169,5	2,5%	8,3%
<b>Burgaltendorf</b>	418597,8	294	8465,0	502,5	2,0%	5,9%
<b>Byfang</b>	120649,6	114	2921,5	302,0	2,4%	10,3%
<b>Dellwig</b>	358292,9	150	3404,6	265,1	1,0%	7,8%
<b>Fischlaken</b>	217666,1	137	3646,5	283,6	1,7%	7,8%
<b>Freisenbruch</b>	370727,7	245	7020,2	699,4	1,9%	10,0%
<b>Frillendorf</b>	372591,9	108	3249,4	217,9	0,9%	6,7%
<b>Frintrop</b>	257323,8	124	3091,7	290,9	1,2%	9,4%
<b>Frohnhausen</b>	733666,6	299	10437,5	1309,2	1,4%	12,5%

<b>Stadtteile</b>	<b>Gesamtdachfläche im Stadtteil</b>	<b>Anzahl Gründächer</b>	<b>Summe Gründachfläche</b>	<b>Summe intensive Gründachfläche</b>	<b>Anteil Dachbegrünung an Gesamtdachfläche</b>	<b>Anteil intensiver Dachbegrünung an Gründach</b>
<b>Fulerum</b>	100422,7	57	1369,4	116,4	1,4%	8,5%
<b>Gerschede</b>	229825,2	91	2582,1	593,7	1,1%	23,0%
<b>Haarzopf</b>	315951,3	130	5763,9	247,5	1,8%	4,3%
<b>Heidhausen</b>	352842,6	226	11206,4	671,7	3,2%	6,0%
<b>Heisingen</b>	490790,2	504	11420,6	1079,2	2,3%	9,4%
<b>Holsterhausen</b>	799902,8	380	23056,9	2115,0	2,9%	9,2%
<b>Horst</b>	409137,3	204	6610,6	601,9	1,6%	9,1%
<b>Huttrop</b>	437186,5	223	8579,1	415,9	2,0%	4,8%
<b>Karnap</b>	473883,8	241	7081,1	825,5	1,5%	11,7%
<b>Katernberg</b>	647254,3	275	6473,6	590,1	1,0%	9,1%
<b>Kettwig</b>	907421,2	806	29596,9	3970,3	3,3%	13,4%
<b>Kray</b>	850316,6	245	7872,4	687,9	0,9%	8,7%
<b>Kupferdreh</b>	567689,9	358	9031,9	851,6	1,6%	9,4%
<b>Leithe</b>	288861,6	102	3486,9	248,2	1,2%	7,1%
<b>Margarethenhöhe</b>	176508,1	35	1654,8	28,3	0,9%	1,7%
<b>Nordviertel</b>	535253,8	140	9886,8	429,2	1,8%	4,3%
<b>Ostviertel</b>	315409,4	116	7834,8	668,0	2,5%	8,5%
<b>Rellinghausen</b>	183401,2	84	2543,5	284,1	1,4%	11,2%
<b>Rüttenscheid</b>	1063545,7	589	35952,2	2255,6	3,4%	6,3%

<b>Stadtteile</b>	<b>Gesamtdachfläche im Stadtteil</b>	<b>Anzahl Gründächer</b>	<b>Summe Gründachfläche</b>	<b>Summe intensive Gründachfläche</b>	<b>Anteil Dachbegrünung an Gesamtdachfläche</b>	<b>Anteil intensiver Dachbegrünung an Gründach</b>
Schönebeck	357079,6	203	6794,2	580,8	1,9%	8,5%
Schonnebeck	356184,2	94	2091,6	222,5	0,6%	10,6%
Schuir	176036,2	74	2964,8	170,0	1,7%	5,7%
Stadtkern	374963,8	108	11981,4	1507,5	3,2%	12,6%
Stadtwald	371918,9	197	5867,7	405,3	1,6%	6,9%
Steele	551416,8	405	11752,9	1188,4	2,1%	10,1%
Stoppenberg	629793,3	235	7010,0	428,6	1,1%	6,1%
Südostviertel	246220,7	122	4494,3	251,3	1,8%	5,6%
Südviertel	451579,8	214	11571,9	1723,9	2,6%	14,9%
Überruhr-Hinsel	242138,4	183	7081,9	394,4	2,9%	5,6%
Überruhr- Holthausen	247627,1	166	4978,7	571,6	2,0%	11,5%
Vogelheim	457162,2	141	4063,1	403,0	0,9%	9,9%
Werden	454298,6	296	8000,0	743,7	1,8%	9,3%
Westviertel	529727,4	189	40048,0	3253,1	7,6%	8,1%
<b>Summe / Mittelwert</b>	<b>23207977,8</b>	<b>11267</b>	<b>449001,1</b>	<b>40146,3</b>	<b>1,9%</b>	<b>9,0%</b>

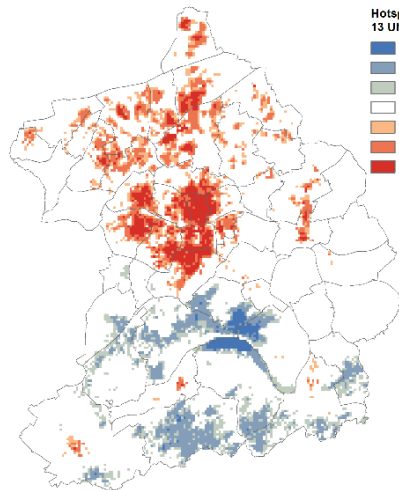
Tab. A4 Ergebnisse des Gründachpotentialkatasters bezogen auf die Essener Stadtteile

<b>Stadtteile</b>	<b>Gesamtdachfläche im Stadtteil</b>	<b>Anzahl potentieller Gründächer</b>	<b>Summe potentieller Gründachfläche</b>	<b>Summe intensive potentielle Gründachfläche</b>	<b>Anteil potentieller Dachbegrünung an Gesamtdachfläche</b>	<b>Anteil intensiver Dachbegrünung an Gründach</b>
<b>Altendorf</b>	490383,4	2363	24355,8	1876,4	5,0%	7,7%
<b>Altenessen-Nord</b>	679126,5	4522	29708,5	2455,4	4,4%	8,3%
<b>Altenessen-Süd</b>	1081384,2	5464	41817,4	2471,9	3,9%	5,9%
<b>Bedingrade</b>	354931,4	2753	8232,4	445,2	2,3%	5,4%
<b>Bergeborbeck</b>	922915,0	1790	19726,8	859,7	2,1%	4,4%
<b>Bergerhausen</b>	513732,4	3288	18655,1	1094,9	3,6%	5,9%
<b>Bochold</b>	654761,8	3155	24415,3	1752,0	3,7%	7,2%
<b>Borbeck-Mitte</b>	496903,6	3339	18301,3	1219,4	3,7%	6,7%
<b>Bredeney</b>	572571,9	4519	28286,7	1804,6	4,9%	6,4%
<b>Burgaltendorf</b>	418597,8	3768	19145,7	900,6	4,6%	4,7%
<b>Byfang</b>	120649,6	927	5241,4	438,3	4,3%	8,4%
<b>Dellwig</b>	358292,9	2576	11664,9	786,4	3,3%	6,7%
<b>Fischlaken</b>	217666,1	1862	8498,3	450,3	3,9%	5,3%
<b>Freisenbruch</b>	370727,7	2805	15625,5	1026,6	4,2%	6,6%
<b>Frillendorf</b>	372591,9	2095	8321,4	318,0	2,2%	3,8%
<b>Frintrop</b>	257323,8	1850	8643,2	480,3	3,4%	5,6%
<b>Frohnhausen</b>	733666,6	3703	26129,7	2152,5	3,6%	8,2%
<b>Fulerum</b>	100422,7	912	3621,6	203,4	3,6%	5,6%



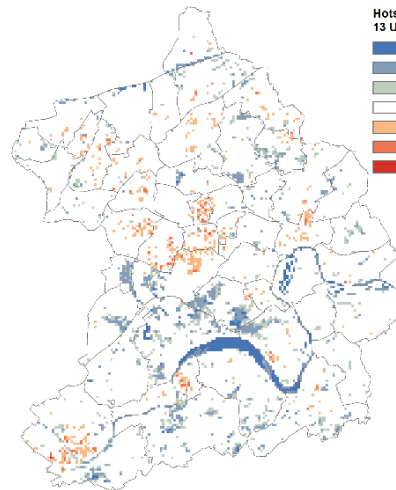
<b>Stadtteile</b>	<b>Gesamtdachfläche im Stadtteil</b>	<b>Anzahl potentieller Grühdächer</b>	<b>Summe potentieller Grühdachfläche</b>	<b>Summe intensive potentielle Grühdachfläche</b>	<b>Anteil potentieller Dachbegrünung an Gesamtdachfläche</b>	<b>Anteil intensiver Dachbegrünung an Gründach</b>
<b>Gerschede</b>	229825,2	2024	7096,8	813,0	3,1%	11,5%
<b>Haarzopf</b>	315951,3	3311	11232,3	378,7	3,6%	3,4%
<b>Heidhausen</b>	352842,6	2909	17971,9	1003,3	5,1%	5,6%
<b>Heisingen</b>	490790,2	4953	25131,0	1808,6	5,1%	7,2%
<b>Holsterhausen</b>	799902,8	3053	40421,6	2810,4	5,1%	7,0%
<b>Horst</b>	409137,3	2786	17051,2	1232,7	4,2%	7,2%
<b>Huttrop</b>	437186,5	2460	17640,6	973,2	4,0%	5,5%
<b>Karnap</b>	473883,8	2719	22224,9	1655,5	4,7%	7,4%
<b>Katernberg</b>	647254,3	4448	17564,3	1142,8	2,7%	6,5%
<b>Kettwig</b>	907421,2	7304	58119,4	6217,8	6,4%	10,7%
<b>Kray</b>	850316,6	4848	21530,5	1250,6	2,5%	5,8%
<b>Kupferdreh</b>	567689,9	4111	25915,6	2790,3	4,6%	10,8%
<b>Leithe</b>	288861,6	2145	9540,2	446,1	3,3%	4,7%
<b>Margarethenhöhe</b>	176508,1	598	3137,8	166,0	1,8%	5,3%
<b>Nordviertel</b>	535253,8	1724	23857,3	764,9	4,5%	3,2%
<b>Ostviertel</b>	315409,4	1418	15047,0	807,2	4,8%	5,4%
<b>Rellinghausen</b>	183401,2	1119	6869,2	401,6	3,7%	5,8%
<b>Rüttenscheid</b>	1063545,7	5404	55500,8	3302,6	5,2%	6,0%
<b>Schönebeck</b>	357079,6	3033	13780,1	902,7	3,9%	6,6%

<b>Stadtteile</b>	<b>Gesamtdachfläche im Stadtteil</b>	<b>Anzahl potentieller Grühdächer</b>	<b>Summe potentieller Grühdachfläche</b>	<b>Summe intensive potentielle Grühdachfläche</b>	<b>Anteil potentieller Dachbegrünung an Gesamtdachfläche</b>	<b>Anteil intensiver Dachbegrünung an Gründach</b>
<b>Schonnebeck</b>	356184,2	2753	8892,4	480,6	2,5%	5,4%
<b>Schuir</b>	176036,2	1089	6462,4	224,5	3,7%	3,5%
<b>Stadtkern</b>	374963,8	1993	28291,2	2761,8	7,5%	9,8%
<b>Stadtwald</b>	371918,9	3335	13574,7	795,7	3,6%	5,9%
<b>Steele</b>	551416,8	4361	29787,4	2203,0	5,4%	7,4%
<b>Stoppenberg</b>	629793,3	4559	22295,3	1040,9	3,5%	4,7%
<b>Südostviertel</b>	246220,7	1060	9159,4	599,9	3,7%	6,5%
<b>Südviertel</b>	451579,8	1905	24240,0	2148,7	5,4%	8,9%
<b>Überruhr-Hinsel</b>	242138,4	1858	13961,6	836,5	5,8%	6,0%
<b>Überruhr- Holthausen</b>	247627,1	2156	11416,4	778,3	4,6%	6,8%
<b>Vogelheim</b>	457162,2	1607	10128,6	516,4	2,2%	5,1%
<b>Werden</b>	454298,6	3390	19455,0	1157,6	4,3%	6,0%
<b>Westviertel</b>	529727,4	1353	54856,4	3558,4	10,4%	6,5%
<b>Summe / Mittelwert</b>	<b>23207977,8</b>	<b>143477,0</b>	<b>982544,6</b>	<b>66706,6</b>	<b>4,1%</b>	<b>6,4%</b>



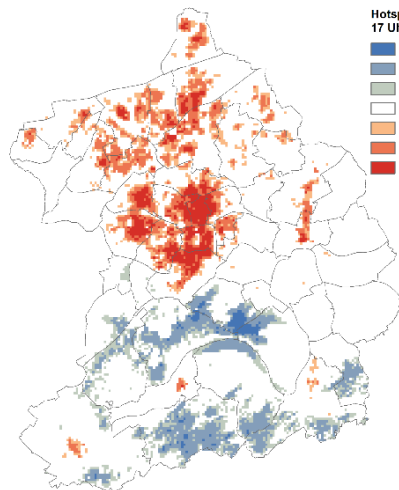
**Hotspots Lufttemperatur  
13 Uhr MESZ in 5m**

- Cold Spot - 99% Confidence
- Cold Spot - 95% Confidence
- Cold Spot - 90% Confidence
- Not Significant
- Hot Spot - 90% Confidence
- Hot Spot - 95% Confidence
- Hot Spot - 99% Confidence



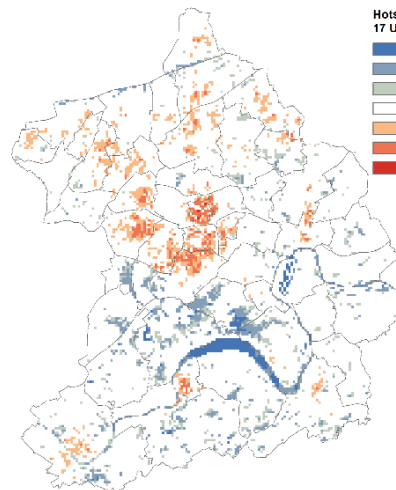
**Hotspots Gefühlte Temperatur  
13 Uhr MESZ in 2m**

- Cold Spot - 99% Confidence
- Cold Spot - 95% Confidence
- Cold Spot - 90% Confidence
- Not Significant
- Hot Spot - 90% Confidence
- Hot Spot - 95% Confidence
- Hot Spot - 99% Confidence



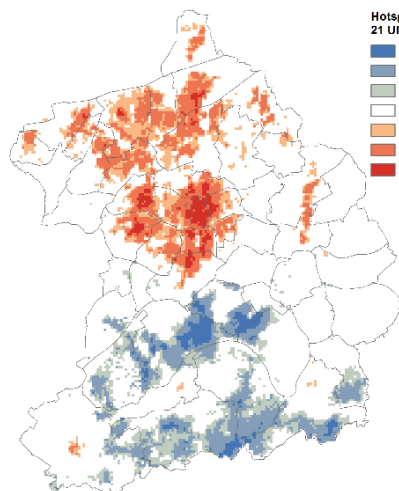
**Hotspots Lufttemperatur  
17 Uhr MESZ in 5m**

- Cold Spot - 99% Confidence
- Cold Spot - 95% Confidence
- Cold Spot - 90% Confidence
- Not Significant
- Hot Spot - 90% Confidence
- Hot Spot - 95% Confidence
- Hot Spot - 99% Confidence



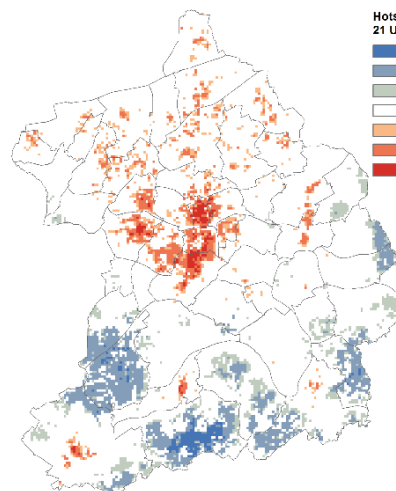
**Hotspots Gefühlte Temperatur  
17 Uhr MESZ in 2m**

- Cold Spot - 99% Confidence
- Cold Spot - 95% Confidence
- Cold Spot - 90% Confidence
- Not Significant
- Hot Spot - 90% Confidence
- Hot Spot - 95% Confidence
- Hot Spot - 99% Confidence



**Hotspots Lufttemperatur  
21 Uhr MESZ in 5m**

- Cold Spot - 99% Confidence
- Cold Spot - 95% Confidence
- Cold Spot - 90% Confidence
- Not Significant
- Hot Spot - 90% Confidence
- Hot Spot - 95% Confidence
- Hot Spot - 99% Confidence



**Hotspots Gefühlte Temperatur  
21 Uhr MESZ in 2m**

- Cold Spot - 99% Confidence
- Cold Spot - 95% Confidence
- Cold Spot - 90% Confidence
- Not Significant
- Hot Spot - 90% Confidence
- Hot Spot - 95% Confidence
- Hot Spot - 99% Confidence

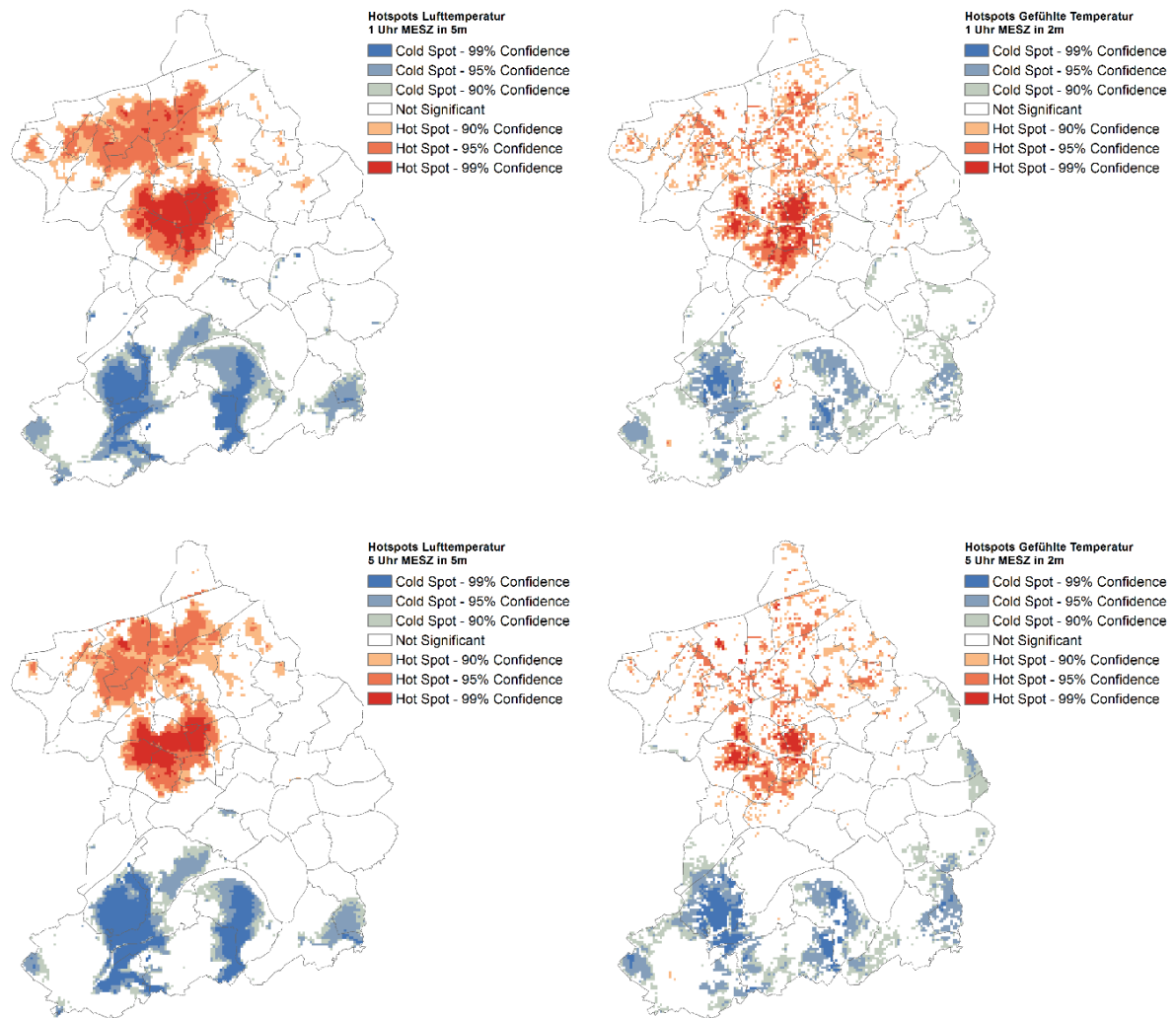


Abb. A1 Hot Spot Analyse der Lufttemperatur (links) und der Gefühlten Temperatur (rechts) der Referenzsimulation für die Zeitpunkte 13 Uhr, 17 Uhr, 21 Uhr, 1 Uhr und 5 Uhr MESZ (von oben nach unten) (Quelle: Stadt Essen).

Endbericht Projekt ADAM (DBU Fördernummer Az 34690/01)

Tab. A5 Ranking der modellierten Lufttemperatur der Referenzsimulation zwischen 10 Uhr MESZ und 9 Uhr MESZ sortiert nach 17 Uhr MESZ und Stadtteil, beginnend mit dem wärmsten Stadtteil.

STADTTEILE	Uhrzeit																							
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stadtkern	24,4	26,0	27,0	28,2	29,2	29,8	30,1	30,0	29,7	29,2	28,6	28,2	27,6	26,9	26,1	25,3	24,1	23,0	22,2	21,3	20,5	20,1	20,3	21,5
Westviertel	24,2	25,5	26,2	27,2	28,0	28,6	28,9	29,0	28,8	28,5	27,9	27,6	27,0	26,4	25,5	24,7	23,7	22,6	21,7	20,9	20,1	19,8	20,3	21,4
Bergeborbeck	24,1	25,4	26,1	26,9	27,7	28,3	28,7	28,8	28,7	28,4	27,9	27,5	26,8	26,0	25,0	24,1	23,0	22,2	21,5	20,8	20,1	19,7	20,0	21,1
Vogelheim	24,0	25,3	25,9	26,8	27,6	28,2	28,5	28,7	28,6	28,3	27,9	27,4	26,6	25,8	24,9	23,8	23,0	22,0	21,3	20,5	19,9	19,6	20,1	21,2
Nordviertel	24,2	25,5	26,1	27,0	27,8	28,3	28,7	28,8	28,7	28,4	27,9	27,4	26,6	25,8	25,0	24,0	22,9	22,1	21,3	20,6	19,9	19,6	20,3	21,4
Altenessen-Süd	24,0	25,4	26,0	26,9	27,6	28,2	28,6	28,7	28,6	28,3	27,8	27,4	26,6	25,8	24,9	24,0	22,9	22,1	21,3	20,6	19,9	19,6	20,2	21,4
Holsterhausen	23,9	25,3	26,1	27,2	28,0	28,6	28,9	28,9	28,8	28,4	27,8	27,4	26,6	25,8	25,0	24,1	23,3	22,4	21,6	20,8	20,0	19,5	19,9	21,1
Altendorf	24,0	25,3	26,0	27,0	27,8	28,4	28,7	28,8	28,7	28,4	27,9	27,5	26,7	25,9	25,0	23,9	23,0	22,2	21,4	20,6	19,8	19,5	20,0	21,1
Altenessen-Nord	23,8	25,1	25,7	26,6	27,4	27,9	28,3	28,5	28,4	28,2	27,7	27,0	26,0	25,1	24,0	23,4	22,5	21,7	21,1	20,4	19,8	19,5	20,1	21,2
Bochold	24,0	25,4	26,0	27,0	27,8	28,4	28,7	28,8	28,7	28,4	27,9	27,5	26,8	26,1	25,1	24,1	23,0	22,2	21,4	20,6	19,9	19,5	19,8	21,1
Kamap	23,8	25,2	25,8	26,7	27,4	28,0	28,3	28,5	28,4	28,2	27,7	26,9	25,7	24,5	23,4	22,5	21,7	20,9	20,5	19,9	19,5	19,5	20,2	21,3
Südviertel	24,0	25,5	26,3	27,5	28,4	29,0	29,3	29,2	29,0	28,6	28,1	27,8	27,1	26,2	25,4	24,5	23,3	22,2	21,5	20,6	19,9	19,4	19,8	21,1
Ostviertel	24,1	25,4	26,0	27,0	27,7	28,3	28,7	28,8	28,7	28,3	27,9	27,5	26,9	26,2	25,3	24,2	23,1	22,1	21,3	20,4	19,8	19,4	19,9	21,2
Katernberg	23,8	25,2	25,7	26,6	27,4	28,0	28,3	28,5	28,4	28,2	27,8	27,1	26,0	24,9	24,0	23,2	22,6	21,9	21,1	20,4	19,7	19,4	20,0	21,2
Gerschede	24,0	25,2	25,8	26,7	27,4	28,0	28,4	28,5	28,4	28,2	27,8	27,4	26,7	26,0	25,1	24,1	23,1	22,1	21,2	20,5	19,8	19,4	19,7	20,8
Stoppenberg	23,8	25,1	25,6	26,5	27,2	27,8	28,2	28,3	28,3	28,0	27,6	26,9	26,0	25,1	24,4	23,5	22,8	21,9	21,1	20,3	19,7	19,4	19,9	21,2
Dellwig	23,9	25,1	25,6	26,5	27,3	27,8	28,2	28,4	28,3	28,1	27,7	27,2	26,3	25,3	24,4	23,4	22,7	21,7	20,9	20,3	19,7	19,3	19,7	20,8
Frohnhausen	23,9	25,2	26,0	27,0	27,8	28,4	28,7	28,8	28,7	28,3	27,9	27,3	26,5	25,6	24,6	23,7	22,8	22,0	21,3	20,5	19,7	19,3	19,7	21,0
Schonnebeck	23,7	25,0	25,4	26,3	27,0	27,6	28,0	28,1	28,1	27,8	27,4	26,7	26,0	25,4	24,4	23,5	22,7	21,8	21,0	20,2	19,5	19,3	19,8	21,1
Borbeck-Mitte	23,8	25,1	25,7	26,6	27,4	27,9	28,3	28,4	28,3	28,1	27,6	27,2	26,5	25,8	24,9	24,0	23,0	22,1	21,2	20,5	19,7	19,3	19,5	20,7
Südostviertel	23,8	25,2	26,0	27,1	27,9	28,6	28,9	28,9	28,7	28,4	27,9	27,5	26,8	26,0	25,1	24,0	22,9	21,9	21,1	20,3	19,6	19,3	19,7	21,0
Frintrop	23,7	25,0	25,6	26,6	27,3	27,9	28,3	28,4	28,4	28,1	27,7	27,2	26,4	25,7	25,0	23,8	23,0	22,0	21,1	20,3	19,5	19,1	19,4	20,4
Steele	23,6	24,8	25,6	26,6	27,4	27,9	28,3	28,4	28,3	28,0	27,6	27,0	26,1	24,9	23,7	22,7	21,9	21,2	20,6	19,9	19,4	19,1	19,5	20,8
Kray	23,8	25,0	25,6	26,5	27,2	27,8	28,2	28,3	28,2	28,0	27,5	27,0	26,1	25,2	24,2	23,3	22,3	21,5	20,7	20,0	19,3	19,1	19,6	20,9
Übersuhr-Hinsel	23,5	24,5	25,1	26,0	26,7	27,3	27,7	27,8	27,8	27,7	27,3	26,3	25,0	23,8	22,9	22,1	21,4	20,9	20,3	19,8	19,3	19,1	19,6	20,9
Frintendorf	23,7	24,9	25,4	26,3	27,1	27,6	28,0	28,1	28,1	27,8	27,4	27,0	26,2	25,5	24,6	23,4	22,3	21,4	20,6	19,9	19,2	19,0	19,5	21,0
Rüttenscheid	23,7	24,9	25,7	26,8	27,6	28,2	28,5	28,6	28,4	28,1	27,6	26,9	26,0	25,1	24,3	23,4	22,4	21,5	20,8	19,9	19,3	19,0	19,6	20,9
Hutrop	23,6	24,8	25,4	26,4	27,1	27,7	28,1	28,2	28,1	27,8	27,4	27,0	26,1	25,3	24,2	23,0	22,0	21,1	20,4	19,7	19,1	18,9	19,4	20,8
Rellinghausen	23,4	24,7	25,2	26,1	26,9	27,4	27,8	27,9	27,8	27,6	27,2	26,3	25,3	24,3	23,2	22,2	21,4	20,7	20,0	19,5	18,9	18,8	19,7	21,1
Bergerhausen	23,6	24,7	25,3	26,2	27,0	27,5	27,9	28,0	27,9	27,7	27,2	26,6	25,6	24,7	23,6	22,6	21,7	20,9	20,2	19,6	19,0	18,8	19,4	20,9
Margarethenhöhe	23,4	24,5	24,9	25,8	26,5	27,1	27,5	27,6	27,6	27,4	27,0	26,3	25,4	24,5	23,6	22,9	22,2	21,4	20,6	19,9	19,1	18,8	19,4	20,6
Bedingrade	23,6	24,8	25,4	26,3	27,0	27,6	28,0	28,1	28,1	27,8	27,4	26,9	26,2	25,5	24,6	23,5	22,6	21,6	20,8	19,9	19,2	18,8	19,2	20,3
Leithe	23,5	24,6	25,1	26,0	26,7	27,3	27,6	27,8	27,8	27,6	27,2	26,7	25,7	25,0	24,0	22,9	22,1	21,2	20,3	19,6	19,0	18,7	19,4	20,7
Heisingen	23,1	24,3	24,8	25,7	26,4	26,9	27,3	27,5	27,5	27,3	26,9	26,1	25,0	23,9	22,9	22,0	21,3	20,6	19,9	19,4	18,9	18,7	19,3	20,7
Fulerum	23,4	24,4	24,7	25,6	26,3	26,9	27,2	27,4	27,4	27,3	26,8	26,2	25,3	24,5	23,6	22,8	22,1	21,4	20,6	19,9	19,1	18,7	19,3	20,5
Horst	23,4	24,6	25,2	26,0	26,7	27,3	27,7	27,8	27,8	27,6	27,2	26,5	25,4	24,2	23,1	22,3	21,5	20,8	20,1	19,5	19,0	18,7	19,3	20,8
Übersuhr-Holthausen	23,3	24,5	25,1	25,9	26,7	27,2	27,6	27,8	27,8	27,6	27,2	26,5	25,3	24,3	23,1	22,1	21,3	20,6	19,9	19,3	18,8	18,6	19,3	20,7
Schönebeck	23,6	24,7	25,2	26,1	26,8	27,4	27,7	27,9	27,8	27,6	27,2	26,6	25,7	24,8	23,8	22,9	22,0	21,1	20,4	19,6	18,9	18,6	19,1	20,3
Freisenbruch	23,4	24,5	25,1	26,0	26,7	27,3	27,7	27,8	27,8	27,6	27,2	26,7	25,5	24,4	23,3	22,4	21,6	20,8	20,1	19,4	18,8	18,6	19,2	20,6
Burgallendorf	23,4	24,5	24,9	25,8	26,5	27,0	27,4	27,6	27,6	27,4	27,0	26,4	25,2	24,1	23,0	22,1	21,4	20,6	19,9	19,3	18,7	18,5	19,3	20,9
Stadtwald	22,8	23,8	24,4	25,3	26,0	26,6	27,0	27,1	27,1	27,0	26,5	25,6	24,7	24,1	23,2	22,1	21,2	20,5	19,8	19,1	18,5	18,4	19,1	20,3
Kupferdreh	23,4	24,4	24,7	25,5	26,3	26,8	27,2	27,4	27,4	27,2	26,7	25,8	24,5	23,4	22,5	21,7	21,0	20,2	19,5	19,0	18,5	18,3	19,2	21,1
Haarzopf	23,2	24,2	24,7	25,5	26,2	26,8	27,2	27,4	27,4	27,1	26,7	26,0	24,8	23,9	23,2	22,4	21,7	20,9	20,1	19,4	18,6	18,2	18,9	20,2
Bredene	22,8	23,9	24,5	25,3	26,0	26,6	26,9	27,1	27,1	26,9	26,5	25,6	24,6	23,7	22,8	21,9	20,9	20,2	19,6	18,8	18,2	18,1	18,9	20,0
Byfang	23,0	24,1	24,5	25,3	26,0	26,6	27,0	27,2	27,2	27,0	26,6	25,8	24,6	23,4	22,5	21,5	20,7	19,9	19,2	18,7	18,2	18,0	18,8	20,5
Fischlaken	23,3	24,2	24,5	25,3	25,9	26,5	26,9	27,1	27,2	27,1	26,7	25,7	24,3	23,1	21,9	21,1	20,4	19,7	19,1	18,5	18,1	17,9	19,0	20,8
Werden	23,5	24,7	25,3	26,2	26,9	27,5	27,9	28,0	28,0	27,8	27,3	26,3	24,9	23,5	22,4	21,5	20,5	19,8	19,2	18,6	18,1	17,9	18,8	20,4
Kettwig	23,3	24,4	24,9	25,7	26,4	27,0	27,4	27,5	27,5	27,4	26,9	26,0	24,8	23,7	22,6	21,7	20,9	20,2	19,5	18,8	18,1	17,9	18,8	20,1
Heidhausen	23,0	24,0	24,3	25,1	25,8	26,4	26,8	27,0	27,0	26,8	26,4	25,5	24,4	23,4	22,5	21,6	20,9	20,2	19,4	18,6	18,0	17,9	19,0	20,6
Schuir	23,0	24,0	24,5	25,3	26,0	26,5	26,9	27,1	27,1	26,9	26,5	25,6	24,3	23,3	22,1	21,1	20,2	19,4	18,7	18,0	17,4	17,2	18,5	19,9

Endbericht Projekt ADAM (DBU Fördernummer Az 34690/01)

Tab. A6 Ranking der modellierten Gefühlten Temperatur der Referenzsimulation zwischen 10 Uhr MESZ und 9 Uhr MESZ sortiert nach 17 Uhr MESZ und Stadtteil, beginnend mit dem wärmsten Stadtteil.

STADTTEILE	Uhrzeit																							
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stadtkern	29,0	31,3	32,8	33,4	33,8	34,2	34,2	33,8	32,8	30,7	27,6	24,5	23,4	22,0	22,6	21,2	20,1	19,1	18,2	17,2	16,6	18,9	22,6	26,2
Südviertel	28,9	31,1	32,6	33,0	33,3	33,7	33,8	33,3	32,2	30,0	26,7	23,3	21,8	20,1	20,9	19,2	18,3	17,4	16,7	15,8	15,3	17,7	22,1	25,5
Holsterhausen	28,9	31,1	32,5	32,9	33,2	33,5	33,6	33,2	32,1	29,9	26,7	23,2	21,7	19,9	20,8	18,8	17,9	17,1	16,4	15,6	15,0	17,2	21,6	25,2
Frohnhausen	28,8	30,9	32,4	32,8	33,2	33,6	33,6	33,2	32,2	30,1	26,9	23,7	22,3	20,9	21,6	19,8	18,7	17,3	16,4	15,7	15,3	17,3	21,5	25,5
Südostviertel	29,1	31,1	32,4	32,8	33,1	33,4	33,5	33,1	32,0	29,8	26,5	23,0	21,6	19,8	20,8	18,8	17,7	16,7	16,0	15,4	14,8	16,9	21,2	25,2
Bochold	29,0	31,0	32,4	32,8	33,0	33,4	33,5	33,1	32,0	29,9	26,7	23,2	21,8	20,0	20,9	18,9	18,0	17,2	16,3	15,6	15,0	17,2	21,7	25,4
Altendorf	29,3	31,2	32,4	32,7	33,0	33,3	33,4	32,9	31,8	29,7	26,4	22,8	21,5	19,8	20,7	18,8	18,0	16,8	15,9	15,3	14,7	16,9	21,5	25,3
Gerschede	28,9	30,9	32,3	32,7	32,9	33,2	33,3	32,9	31,7	29,6	26,3	22,7	21,4	19,2	20,4	18,0	17,0	16,2	15,4	14,9	14,5	16,5	20,8	24,9
Steele	28,7	30,7	32,1	32,6	32,9	33,2	33,3	32,9	31,8	29,7	26,5	23,1	21,5	19,9	20,6	18,8	17,8	16,9	16,1	15,3	15,0	17,4	21,7	25,3
Rütterscheid	29,0	31,1	32,4	32,5	32,7	33,0	33,0	32,6	31,5	29,3	25,9	22,1	19,9	17,5	18,5	16,5	15,6	14,9	14,3	13,8	13,5	16,0	21,6	25,1
Werden	29,1	31,0	32,1	32,5	32,8	33,1	33,2	32,8	31,7	29,6	26,3	22,6	21,0	19,0	19,9	18,1	17,3	16,6	15,7	15,1	14,7	16,9	21,6	25,6
Katernberg	29,0	30,9	32,1	32,5	32,8	33,2	33,2	32,8	31,8	29,7	26,5	23,0	21,6	19,9	20,7	19,1	17,9	17,1	16,3	15,5	15,1	17,5	22,3	26,1
Altenessen-Süd	29,0	30,9	32,0	32,4	32,7	33,1	33,1	32,7	31,7	29,6	26,4	23,0	21,6	20,0	20,9	19,1	18,2	17,1	16,1	15,5	15,0	17,0	21,2	24,9
Borbeck-Mitte	29,2	31,0	32,2	32,4	32,6	32,9	33,0	32,6	31,5	29,4	26,2	22,7	20,7	18,6	19,6	17,6	16,6	15,9	15,3	14,8	14,5	17,0	22,2	26,2
Reilinghausen	28,8	30,8	32,0	32,4	32,8	33,1	33,2	32,8	31,7	29,6	26,3	22,8	21,3	19,6	20,4	18,6	17,7	16,7	15,8	15,1	14,6	16,7	20,9	24,5
Frintrop	28,7	30,7	32,0	32,4	32,7	33,0	33,0	32,6	31,5	29,2	25,8	22,1	20,6	18,6	19,8	17,3	16,2	15,5	14,8	14,3	13,9	16,1	20,6	25,1
Hutrop	28,7	30,6	32,0	32,4	32,7	33,0	33,1	32,6	31,5	29,3	25,9	22,1	20,6	18,8	19,7	17,9	16,8	15,9	15,2	14,5	14,0	16,0	20,3	24,1
Bedingrade	28,8	30,7	31,9	32,3	32,6	32,9	33,0	32,6	31,5	29,3	26,0	22,3	20,7	18,8	19,7	17,9	16,8	16,0	15,2	14,6	14,2	16,2	20,6	24,7
Kray	29,1	30,9	32,0	32,3	32,6	33,0	33,0	32,6	31,5	29,4	26,1	22,4	20,8	18,7	19,6	17,8	17,2	16,3	15,5	14,9	14,4	16,6	21,3	25,0
Dellwig	28,8	30,6	31,9	32,3	32,5	32,8	32,9	32,5	31,3	29,2	25,9	22,3	20,9	18,8	19,9	17,6	16,5	15,8	15,2	14,7	14,4	16,6	21,3	25,5
Bergerhausen	28,9	30,7	32,0	32,3	32,6	33,0	33,0	32,7	31,6	29,4	26,0	22,3	20,8	19,0	19,9	18,0	17,3	16,2	15,7	15,1	14,6	17,3	22,1	25,7
Vogelheim	28,8	30,6	31,9	32,3	32,5	32,8	32,9	32,4	31,3	29,1	25,8	22,0	20,2	18,3	19,3	17,5	16,4	15,6	15,0	14,4	13,9	15,9	20,3	24,1
Schönebeck	28,7	30,6	31,9	32,2	32,6	33,0	33,1	32,8	31,7	29,6	26,4	22,9	21,6	20,1	20,8	18,8	17,5	16,6	15,8	15,1	14,7	16,7	21,4	25,5
Ostviertel	28,5	30,5	31,9	32,2	32,6	33,0	33,1	32,8	31,7	29,6	26,2	22,7	21,4	19,9	20,6	19,1	18,1	16,9	16,2	15,5	15,0	17,3	22,1	25,7
Westviertel	28,8	30,7	31,9	32,2	32,6	33,0	33,0	32,7	31,6	29,5	26,3	22,7	21,3	19,6	20,5	18,6	17,5	16,6	15,9	15,2	14,8	17,3	22,2	25,9
Nordviertel	28,8	30,7	31,9	32,2	32,4	32,7	32,8	32,4	31,2	29,0	25,5	21,5	19,7	17,4	18,5	16,5	15,7	15,1	14,5	14,0	13,7	15,9	20,5	24,8
Horst	28,5	30,5	32,0	32,2	32,4	32,7	32,8	32,4	31,2	29,0	25,5	21,5	19,6	17,3	18,5	16,3	15,5	14,9	14,2	13,8	13,5	15,8	20,5	24,5
Überruhr-Holtthause	29,0	30,8	31,8	32,2	32,4	32,8	32,8	32,5	31,4	29,4	26,4	22,8	21,3	19,6	20,5	18,9	17,8	17,0	16,1	15,4	14,9	17,1	21,6	25,4
Schonnebeck	28,8	30,7	31,8	32,2	32,5	32,9	32,9	32,6	31,5	29,5	26,3	22,7	21,0	19,1	20,0	18,5	17,5	16,7	16,0	15,3	15,0	17,4	22,1	25,9
Altenessen-Nord	29,0	30,8	31,9	32,2	32,5	32,8	32,9	32,5	31,4	29,4	26,1	22,4	20,5	18,3	19,3	17,5	16,5	15,8	15,4	14,9	14,7	17,6	22,5	26,1
Kamap	28,9	30,7	31,8	32,1	32,4	32,8	32,9	32,5	31,4	29,4	26,2	22,7	21,2	19,6	20,3	18,6	17,8	16,9	16,0	15,3	14,9	16,9	21,6	25,5
Stoppenberg	28,8	30,6	31,8	32,1	32,5	32,9	33,0	32,6	31,5	29,4	26,1	22,5	21,1	19,3	20,2	18,3	17,3	16,5	15,8	15,2	14,7	17,0	21,2	24,8
Bergeborbeck	28,5	30,4	31,8	32,1	32,4	32,7	32,7	32,3	31,1	28,9	25,4	21,5	19,6	17,6	18,6	16,5	15,8	15,0	14,4	13,9	13,5	15,6	20,0	24,2
Freisenbruch	28,9	30,8	31,9	32,1	32,3	32,6	32,6	32,2	31,0	28,9	25,5	21,6	19,4	17,2	18,3	16,2	15,4	14,8	14,3	13,8	13,3	15,6	20,4	24,0
Kettwig	28,9	30,6	32,0	32,1	32,2	32,6	32,6	32,2	31,0	28,8	25,3	21,2	19,3	17,1	18,0	16,3	15,5	14,8	14,2	13,7	13,4	15,8	20,6	25,0
Burgallendorf	28,7	30,5	31,8	32,1	32,4	32,8	32,9	32,4	31,3	29,2	25,9	22,3	20,9	19,1	20,2	17,9	16,8	15,9	15,2	14,6	14,2	16,2	20,7	25,0
Frillendorf	28,7	30,6	31,8	32,0	32,1	32,5	32,5	32,1	31,0	28,8	25,4	21,5	19,2	17,2	17,9	16,4	15,7	15,1	14,5	14,1	13,8	16,2	20,9	25,0
Überruhr-Hinsel	28,5	30,3	31,6	32,0	32,3	32,6	32,6	32,2	31,0	28,8	25,3	21,2	19,3	17,5	18,4	16,5	15,8	15,0	14,3	13,7	13,3	15,5	20,0	24,2
Leithe	28,6	30,7	31,9	32,0	32,1	32,5	32,5	32,0	30,7	28,4	24,9	20,6	18,4	16,5	17,3	15,5	14,8	14,1	13,5	13,1	12,8	15,0	19,7	24,3
Byfang	29,1	30,8	31,8	32,0	32,1	32,5	32,6	32,1	31,0	28,8	25,4	21,4	19,3	17,1	18,1	16,2	15,5	14,8	14,2	13,8	13,4	15,6	20,5	25,3
Kupferdreh	28,5	30,4	31,6	31,9	32,1	32,5	32,5	32,1	31,0	29,0	25,7	22,1	20,5	18,6	19,5	17,8	17,0	16,1	15,5	14,9	14,6	16,6	21,1	24,5
Margarethenhöhe	28,6	30,7	31,7	31,9	32,0	32,3	32,4	32,0	30,9	28,8	25,8	22,0	20,4	18,3	19,3	17,3	16,4	15,6	15,1	14,7	14,4	16,6	21,2	25,2
Heisingen	28,5	30,4	31,7	31,9	32,0	32,3	32,3	31,8	30,5	28,2	24,6	20,3	17,9	15,9	16,9	15,1	14,3	13,6	13,1	12,6	12,2	14,9	20,4	24,0
Schuir	28,3	30,2	31,6	31,8	32,0	32,4	32,4	32,0	30,8	28,6	25,1	21,0	19,0	17,3	18,0	16,5	15,7	15,0	14,4	13,9	13,4	15,5	20,0	23,9
Haarzopf	28,4	30,2	31,4	31,7	31,9	32,2	32,2	31,8	30,7	28,7	25,4	21,6	19,9	18,1	19,0	17,4	16,6	15,8	15,2	14,6	14,2	16,3	20,6	24,3
Fulerum	28,5	30,4	31,5	31,7	31,9	32,2	32,3	31,8	30,5	28,3	24,9	20,6	18,5	16,6	17,5	15,9	15,1	14,6	13,9	13,3	13,0	15,5	20,7	24,8
Heidhausen	28,1	29,9	31,2	31,5	31,7	32,0	32,1	31,7	30,6	28,6	25,2	21,9	20,3	18,6	19,3	17,4	16,3	15,7	15,2	14,6	14,3	16,3	21,0	24,3
Bredene	28,7	30,9	31,3	31,5	31,5	31,9	32,0	31,6	30,5	28,4	25,2	21,2	18,9	16,5	17,7	15,7	15,0	14,5	13,9	13,5	13,2	15,6	21,2	25,7
Fischlaken	27,9	29,8	31,1	31,5	31,7	32,0	32,1	31,7	30,7	28,7	25,8	22,1	20,4	18,8	19,7	17,8	16,6	15,9	15,3	14,8	14,4	16,5	21,1	24,8
Stadtwald																								

Tab. A7 Zusammenstellung der Öffentlichkeitsarbeit im Projekt ADAM

Was	Wo	Datum
Pressemitteilung	DBU Internetseite <u>DBU - Welche Gründächer sorgen für das beste Stadtklima?   Startseite</u>	5.12.2019
Jahresbericht 2021	DBU Jahresbericht	Feb 2022
Artikel	Zeitschrift Gebäudegrün (1/2020)	Jan 2020
Artikel	Zeitschrift Gebäudegrün (3/2020)	Mär 2020
Artikel	Zeitschrift Gebäudegrün (2/2022)	Mär 2022
Projektwebseite	<u>DWD Internetauftritt</u>	Jun 2020
Bericht	DBU Abschlussbericht	Jul 2022
Vortrag	METTOOLS XI, virtuell	21.-23.09.2021
Poster	DACH 2022, Leipzig	21.-25.03.2022
Poster	Forschungskonferenz Klimaresiliente Schwammstadt: Naturbasierte Konzepte und Maßnahmen als Baustein urbaner Transformation, Dessau	20.06.2022*
Poster	Beating the heat Workshop, Bern	16.09.2022*
Abschlussveranstaltung	Online mit ca. 85 Teilnehmenden	29.04.2022
Projekttreffen	Coronabedingter Ausfall der Präsenztreffen, alle Besprechung fanden virtuell statt	verschiedene Termine

\* Weitere Veröffentlichung und Verbreitung der Projektergebnisse auch im Nachgang des Projektes