

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

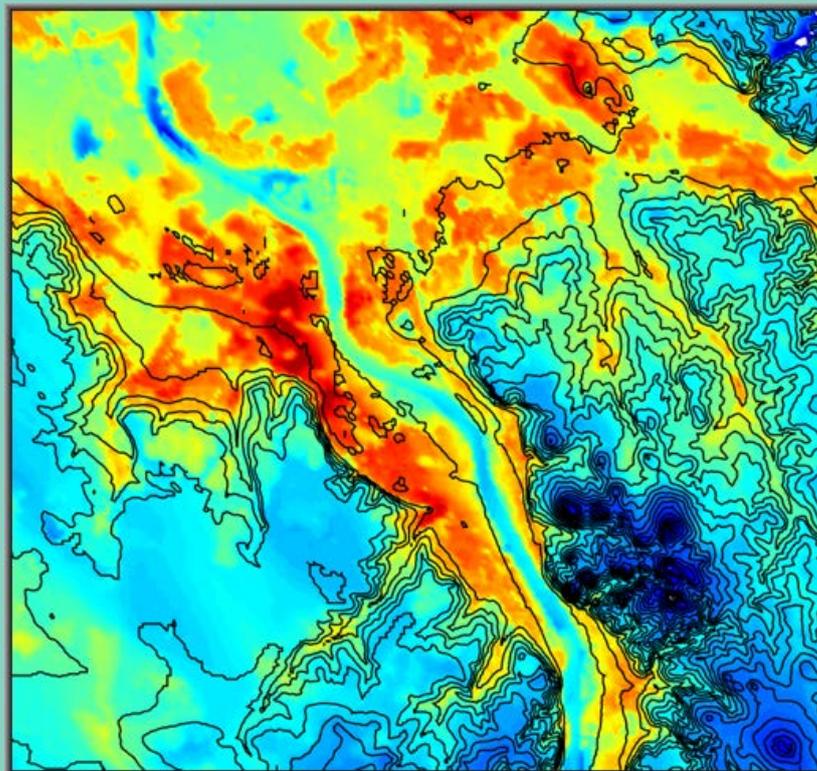
255

# Messungen und Computersimulationen für eine klimaangepasste Stadtplanung

## Klimawirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen in der Stadt Bonn

von

Ortrun Roll, Guido Halbig und Saskia Buchholz





**255**

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

# Messungen und Computersimulationen für eine klimaangepasste Stadtplanung

Klimawirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen  
in der Stadt Bonn

von

Ortrun Roll, Guido Halbig und Saskia Buchholz

Zitationsvorschlag:

Roll, O., Halbig, G. und Buchholz, S., 2021: Messungen und Computersimulationen für eine klimaangepasste Stadtplanung. Klimawirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen in der Stadt Bonn. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 255, 106 Seiten. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.

Diese Arbeit ist im Rahmen einer Kooperation mit dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV) und dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV), der Stadt Bonn und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) entstanden.



Titelabbildung:

Simulierte Temperaturverteilung in der Stadt Bonn und Umgebung an einem Tag im Juli zur Mittagszeit. Deutlich zu erkennen ist der Wärmeinseleffekt im dicht bebauten Innenstadtbereich (dunkelrote Farben) sowie kühlere Luft im Umland und über dem Rhein (blaue Farben). Für Details siehe Abbildung 31 in diesem Bericht.

---

ISSN: 2194-5969 (Online)

ISBN: 978-3-88148-535-7 (Online)

---

Nutzungsbedingungen: Dieses Dokument wird unter den Bedingungen der Creative Commons-Lizenz "Namensnennung - Nicht-kommerziell - Keine Bearbeitung" (CC BY-NC-ND 3.0 DE) zur Verfügung gestellt.



Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden. Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Die in den DWD-Berichten veröffentlichten Texte werden allein von ihren jeweiligen Autor/innen verantwortet; die darin zum Ausdruck gebrachte Meinung entspricht nicht notwendig der Meinung des Herausgebers (Deutscher Wetterdienst).

---

**Fachliche Durchsicht:** Dr. Meinolf Koßmann

**Schriftleitung:** Dipl.-Met. Magdalena Bertelmann

**Herausgeber und Verlag:**

Deutscher Wetterdienst  
Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes  
Am DFS-Campus 4  
63225 Langen  
selbstverlag@dwd.de  
www.dwd.de/selbstverlag

**Korrespondenzadresse:**

Deutscher Wetterdienst  
Ortrun Roll  
Regionales Klimabüro Essen  
Wallneyer Straße 10  
45133 Essen  
Ortrun.Roll@dwd.de

**Autor/innen:**

Ortrun Roll,  
Guido Halbig,  
Dr. Saskia Buchholz  
(Deutscher Wetterdienst)

## Zusammenfassung

Bei der Diskussion um den Klimawandel gewinnt in urbanen Gebieten – neben dem Klimaschutz – das Thema der Anpassung an den Klimawandel immer mehr an Bedeutung. Mit dem „Informationsportal Klimaanpassung in Städten“ (INKAS 2020) hat der Deutsche Wetterdienst einen elektronischen Experimentierkasten entwickelt, um auf einfache Weise verschiedene Anpassungsmaßnahmen an die Klimaerwärmung in Städten miteinander vergleichen zu können. Mit dem Projekt „Klimaangepasste Stadtplanung in Bonn und Nordrhein-Westfalen“ wird INKAS um wesentliche Aspekte erweitert.

In der vorliegenden Arbeit werden die klimatischen Gegebenheiten, insbesondere die Wärmebelastung, der Stadt Bonn als Beispielstadt für Nordrhein-Westfalen untersucht. Bonn ist eine Großstadt, die klimatisch überwiegend durch milde Winter und schwül-warme Sommer geprägt ist. Im südlichen Teil der Köln-Bonner Bucht, sowie im Bad Godesberger Rheintaltrichter gibt es bei entsprechenden austauscharmen, sommerlichen Wetterlagen eine Vielzahl besiedelter Gebiete, die unter mäßiger Wärmebelastung, beziehungsweise im Stadtzentrum von Bonn und Bad Godesberg zum Teil auch unter starker Wärmebelastung leiden.

Mittels des mikroskaligen urbanen Klimamodells MUKLIMO\_3 wird die klimatische Situation in der Region Bonn simuliert und für ausgewählte dicht bebaute Areale in der Innenstadt sowie etwas lockerer bebaute Gebiete außerhalb des Zentrums genauer untersucht. Die Modellrechnungen zeigen eine gute qualitative Übereinstimmung mit den an temporären Messstationen in der Stadt gewonnenen meteorologischen Parametern (wie Lufttemperatur und relative Luftfeuchte). Ebenso können die Ergebnisse einer vor dem Sonnenuntergang vorgenommenen Profifahrt die Modellgüte belegen.

Der typische Tagesgang der Lufttemperatur an Strahlungstagen bzw. -nächten mit seinen deutlich kühleren Nächten in den vom Zentrum entfernt gelegenen Bereichen kann mit MUKLIMO\_3 gut erfasst und mit den Ergebnissen des Projektes „Klimawandelgerechte Metropole Köln“ (LANUV 2013) in Einklang gebracht werden.

Im vorliegenden Bericht wird der Frage nachgegangen, wie sich Klimaanpassungsmaßnahmen (z. B. Dachbegrünung) auf die verschiedenen ausgewählten städtischen Areale thermisch auswirken. Eine mit dem Modell simulierte Änderung der Dachalbedo vom Referenzwert 20 % bis zu einem anzunehmenden Höchstwert von 80 % und eine Änderung der Dachbegrünung von einer Referenz von 0 % bis zu 100 % aller Dachflächen zeigen eine fast identische Auswirkung auf das Temperaturverhalten im 2 m-Niveau. Wenn bei diesen Maßnahmen bis 50 % der Dächer begrünt werden und die Dachalbedo zwischen 20 % und 50 % liegt, ergeben sich nur sehr geringe thermische Verbesserungen im 2 m-Niveau von wenigen Zehntel- bis zu maximal einem halben Kelvin. Wenn aber nahezu die kompletten Dachflächen in den einzelnen Untersuchungsbereichen begrünt werden, kann im günstigsten Fall eine Abkühlung von bis zu einem Kelvin erfolgen. Insgesamt ist nur eine geringe thermische Verbesserung für das 2 m-Niveau (Aufenthaltsbereich der Fußgänger) möglich, was zu erwarten ist, weil die Maßnahme im Dachniveau (ab ca. 10 m Höhe) erfolgt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich diese Maßnahme sehr günstig auf das Innere der Häuser auswirkt und

dort die Temperatur um einige Kelvin gesenkt werden kann gegenüber anderen Häusern.

Im Fußgängerniveau wirken sich andere Klimaanpassungsmaßnahmen, wie die Entsiegelung von Flächen, stärker aus. Vor allem im Laufe des Nachmittags wird in fast allen untersuchten Bereichen eine über die Fläche gemittelte Abkühlung von mindestens einem halben Kelvin erzielt. Die Wirkung erfolgt allerdings nur in unmittelbarer Nähe zu der Maßnahme und hat fast keinen Einfluss auf die weitere Umgebung.

In Bonn besteht, wie fast in allen Großstädten, die Notwendigkeit zusätzlichen Wohnraum zu erschließen (beispielsweise durch Aufstockung oder Nachverdichtung). Nun stellt sich die Frage, welchen Einfluss solche Eingriffe auf das Stadtklima haben und ob man mit einer Kombination von geeigneten Klimaanpassungsmaßnahmen einer zu erwartenden Aufheizung entgegensteuern kann. Die Modellrechnungen zeigen, dass eine geringe Aufstockung (eine Etage) bzw. geringe Nachverdichtung in der Fläche (3 %) sich tagsüber in der Regel durch die Kombination mit zwei Klimaanpassungsmaßnahmen (z. B. Entsiegelung und Dachbegrünung) weitgehend kompensieren lassen. Bei einer Maßnahme mit geringer Aufstockung oder Nachverdichtung und gleichzeitiger Entsiegelung von mindestens 10 % der nicht bebauten Fläche und einer Dachbegrünung von mindestens 20 % aller Dachflächen kann tagsüber teilweise die Temperatur bis zu einem Kelvin gegenüber dem Referenz-Zustand reduziert werden.

Eine Nachverdichtung von mehr als 10 % ist in der Innenstadt aufgrund der bestehenden hohen Bebauungsdichte unrealistisch. In den Außenbezirken kann sie nicht mehr durch die gewählten Klimaanpassungsmaßnahmen kompensiert werden: Gebietsweise würde sich die Temperatur bei der betrachteten sommerlichen Wetterlage um ein Kelvin erhöhen.

Es zeigt sich, dass die potentiell negativen Auswirkungen von Planungsvorhaben (Nachverdichtung und Aufstockung) auf das lokale Klima (wie Temperaturerhöhungen) durch Kombinationen aus Anpassungsmaßnahmen zum Teil kompensiert werden können. Ob dies im Einzelfall gelingen kann, hängt vom Umfang der Planungsmaßnahme und dem Potential der möglichen Anpassungsmaßnahmen ab: Stehen zum Beispiel genügend Flächen für Entsiegelungen und genügend Dachflächen für eine Begrünung zur Verfügung?

Um der Frage nachzugehen, ob die gewählten Anpassungsmaßnahmen auch in anderen Stadtquartieren in Nordrhein-Westfalen gleiche oder ähnliche Effekte auf die Lufttemperatur zeigen, wurden idealisierte Stadtklimasimulationen durchgeführt. Der Ergebnisvergleich belegt, dass die Wirksamkeit der getesteten Anpassungsmaßnahmen (Albedo der Dachfläche, Dachbegrünung und Entsiegelung zwischen Gebäuden) von idealisierten Stadtquartieren auf reale Stadtquartiere übertragen werden kann.

## Summary

In the discussion about climate change in urban areas – in addition to climate protection – the topic of adaptation to climate change is becoming increasingly important. With INKAS (2020), the German Meteorological Service has developed an online experiment kit in order to be able to easily compare various adaptation measures in cities. With the project “Climate-Adapted Urban Planning in Bonn and North Rhine-Westphalia”, INKAS is being expanded to include new essential aspects.

In the project “Climate-Adapted Urban Planning in Bonn and North Rhine-Westphalia” subproject 1, the climatic conditions, in particular the heat load in the city of Bonn, are examined as an example city for North Rhine-Westphalia. The climate of Bonn is predominantly characterized by mild winters and humid, warm summers. In the southern part of the Cologne-Bonn Bay (Köln-Bonner Bucht), as well as in Bad Godesberg's Rhine Valley funnel, there are a large number of populated areas that suffer from thermal stress. Especially in the city center of Bonn and Bad Godesberg there are low-exchange.

Using the microscale urban climate model MUKLIMO\_3, the climatic situation in the Bonn region is simulated. Densely built-up areas in the city center and slightly more sparsely built-up suburban areas are selected for further investigation. Parameters measured at temporary measuring stations (such as air temperature and relative air humidity) agree qualitatively well with the model simulations. The measurements of a profile run before sunset can also prove the model quality.

The typical diurnal cycle of the air temperature on sunny days together with significantly cooler nights in the suburban areas correspond to the results of the project “Climate Change adapted Metropolis Cologne, Klimawandelgerechte Metropole Köln” (LANUV 2013).

In this report, the question to what extent climate adaptation measures (such as green roofs) secure beneficial thermal effects on the various selected areas is investigated. A change in the roof albedo simulated with the model from a reference value of 20 % to an assumed maximum value of 80 %, by using light-coloured roof tiles or other materials, and a change in the green roof fraction from a reference value of 0 % to 100 % show an almost identical effect on the temperature behaviour at the 2 m level. If there are less than 50 % green roofs and roof albedo ranges between 20 % and 50 %, there are only very slight thermal improvements at the 2 m level ranging from a few tenths to a maximum of half a Kelvin. If nearly all the roofs in the individual investigation areas are changed to green roofs or light-coloured roofs, a cooling effect up to one Kelvin can occur in the investigation areas around midday, especially in the thermally heavily impacted inner city areas. Overall, there is only a slight thermal improvement possible for the 2 m level (pedestrian area), which can be expected because the measure takes place at roof level (at approx. 10 m height or above). However, it must be taken into account that this measure has a very beneficial effect on the building interior. The room temperature can be reduced by a few Kelvin compared to standard houses.

At pedestrian level, other climate adaptation measures that are carried out in close proximity (such as the unsealing of surfaces) have a much stronger effect. In the course of the afternoon in particular, a cooling of at least half a Kelvin is achieved in almost all areas examined. However, the effect only takes place directly on site and has almost no influence on the wider area.

In Bonn, as in almost all large cities, there is a need to develop additional living space (for example by adding storeys or densifying). The question now arises as to what influence such interventions can have on the urban climate and whether a combination of suitable climate adaptation measures can counteract the expected increase in temperature. The model calculations show that a small increase (one floor) or low densification (3 %) can usually be compensated for during the day by combining two climate adaptation measures. With an additional unsealing of at least 10 % and a roof greening of at least 20 %, during the day the temperature can even be partially reduced to one Kelvin compared to the reference state.

Greater densification of over 10 % was also simulated even if it is unrealistic in the city center. In the outskirts, the additional thermal load due to densification of over 10 % can no longer be compensated by any climate adaptation measures. In some areas, the temperature could increase by one Kelvin.

To investigate the question whether the selected adaptation measures achieve similar air temperature effects in other city quarters across North Rhine-Westphalia, idealized city climate simulations were made. Overall, the comparison of results demonstrates that the effectiveness of the tested adaptation measures (roof albedo, green roof and unsealing of surfaces between buildings) can be transferred from idealized city quarters to real cases.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Untersuchungsgebiet und Untersuchungsmethoden</b>	<b>12</b>
3.1	Naturräumliche und klimatische Beschreibung	12
3.2	Untersuchungsgebiet	13
3.3	Verwendung des Stadtklimamodells MUKLIMO_3	14
<b>4</b>	<b>Temporäres Sondermessnetz in Bonn</b>	<b>20</b>
4.1	Auswahl der Messgebiete	20
4.2	Stationäre und temporäre Messstandorte	21
4.3	Profilmessfahrten	27
4.4	Auswertung und Interpretation der Messergebnisse	30
4.4.1	Einordnung des Septembers 2016 im Vergleich zum Klimamittel	30
4.4.2	Vergleich des Tagesganges der Temperatur	33
4.4.3	Vergleich des Tagesganges der gefühlten Temperatur	38
4.4.4	Auswertung der Profilmessfahrten	41
<b>5</b>	<b>Simulation von Anpassungsmaßnahmen mit MUKLIMO_3</b>	<b>47</b>
5.1	Auswahl der städtebaulichen Anpassungsmaßnahmen	47
5.2	Typische Wetterlage in Bonn als Antrieb für die Modellrechnungen	50
5.3	Untersuchungsgebiete für die Modellrechnungen	53
5.4	MUKLIMO_3-Modellsimulation für den Ist-Zustand (Referenzlauf)	59
5.5	MUKLIMO_3-Modellsimulationen für einzelne Klimaanpassungsmaßnahmen	68
5.6	MUKLIMO_3-Modellsimulationen für Maßnahmenkombinationen	80
5.6.1	Situation am Tag für Maßnahmenkombinationen	81
5.6.2	Situation in der Nacht für Maßnahmenkombinationen	84
5.7	Zusammenfassung der Modellergebnisse für Bonn	86
5.8	Vergleich der Modellergebnisse für die Stadt Bonn mit Ergebnissen idealisierter Stadtquartiere in NRW	88
5.8.1	Vergleich der Bebauungstypen	89
5.8.2	Vergleich der Anpassungsmaßnahmen	90
5.8.3	Ergebnisvergleich für die Dachbegrünung und die Dachalbedo	94
5.8.4	Das Tool Hitzeangepasste Quartiersentwicklung in Nordrhein-Westfalen	97
	<b>Danksagung</b>	<b>98</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>99</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>101</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>106</b>



## 1 Einleitung

Das Klima in Deutschland verändert sich. Dies zeigen die Klimadaten seit 1881. Der Deutsche Wetterdienst beobachtet in Deutschland an vielen Orten das Wetter. „Die Beobachtungswerte variieren von Tag zu Tag und von Jahr zu Jahr. Neben diesen Variationen können durch die Aufzeichnungen der Messsysteme des Deutschen Wetterdienstes auch langfristige Änderungen erkannt werden. So ist es in Deutschland in den letzten 139 Jahren etwa 1,6 Grad wärmer geworden. Damit verbunden nahm die Zahl der kalten und sehr kalten Tage ab und die der warmen und sehr warmen Tage zu.“ (DWD 2020). Für die Analyse der Auswirkungen des Temperaturanstiegs auf das globale und regionale Klima werden mathematisch-physikalische Klimamodelle verwendet. Zur Beschreibung möglicher Entwicklungen des Klimas werden Szenarien künftiger Emissionen von Treibhausgasen zugrunde gelegt. „Die im aktuellen Weltklimabericht benutzten sogenannten RCP-Szenarien unterscheiden sich deutlich von früheren Szenarien. Insbesondere werden massive Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels bis hin zu negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts berücksichtigt. Abhängig vom Emissionsszenario zeigen die Modellensembles einen mittleren globalen Temperaturanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um 1,7 bis 4,4 °C, verglichen mit der Zeit von 1850 bis 1900. Über den Kontinenten wird sich die Atmosphäre stärker erwärmen als über den Ozeanen.“ (BRASSEUR et al. 2017). Insbesondere das Szenario „weiter wie bisher“ (RCP 8.5) hätte weltweit gravierende Auswirkungen auf Menschen, Natur und Umwelt zur Folge.

Neben der Zunahme der globalen mittleren Lufttemperatur lassen beobachtete und zu erwartende Änderungen atmosphärischer und ozeanischer Strömungsmuster eine Zunahme von Wetterextremen erwarten. So können Wechselwirkungen zwischen arktischen Telekonnektionen und entfernten regionalen Rückkopplungsprozessen zu länger anhaltenden trocken-heißen Wetterextremen in mittleren Breiten führen. (COUMOU et al. 2018). Diese Tatsache in Verbindung mit der statistisch signifikanten Zunahme der mittleren globalen Temperatur in den letzten Jahrzehnten, führt auch zur Zunahme der Tage mit sehr hohen Temperaturen (heiße Tage mit einer Maximumtemperatur  $\geq 30$  °C) und einer damit verbundenen Hitzebelastung. In Städten macht sich der sogenannte städtische Wärmeinseleffekt bemerkbar. Eine Stadt unterscheidet sich vom ländlichen Umfeld durch sehr dichte Bebauung, versiegelte Flächen (z. B. asphaltierte Straßen und Plätze) und weniger Begrünung. Zusätzlich trägt der anthropogene Wärmestrom, verursacht durch z. B. Klimaanlage und Heizungen, zur Erhöhung der Temperatur bei. Die Lufttemperaturdifferenz zwischen der wärmeren Stadt und dem kühleren Umland kann in größeren Städten in Deutschland 10 Kelvin und mehr betragen (siehe LANUV 2013 und FENNER et al. 2014). Die Bedeutung des Stadtklimas erschließt sich auch daraus, dass etwa 60 Prozent der Einwohner Deutschlands in mittelgroßen und großen Städten ab 20.000 Einwohnern leben (BMUB 2015).

Das Projekt „Ein Informationssystem für klimaangepasste Stadtplanung in NRW, auf Basis einer Vorstudie an der Beispielstadt Bonn“ ist ein Kooperationsprojekt zwischen dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV), vertreten durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV), dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und der

Stadt Bonn. Das Projekt basiert auf der Verwaltungsvereinbarung vom 17.07.2013 zwischen dem LANUV und dem DWD.

In der bisherigen Praxis der Stadtentwicklung werden zur klimatologischen Beurteilung von Maßnahmen wie Neubau oder Nachverdichtung häufig Stadtklimamodelle eingesetzt. Mit Modellen wie MUKLIMO\_3 (siehe Kapitel 4.3), ENVI-met (JING und LIANG 2021) oder dem neu entwickelten Modell PALM-4U (SCHERER et al. 2019, HALBIG et al. 2019) lassen sich detaillierte Variantenberechnungen durchführen, um möglichst klimaoptimierte Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Diese Modellrechnungen sind jedoch aufwändig und werden in der kommunalen Praxis häufig nur von großen Städten und oft erst am Ende eines Planungsprozesses eingesetzt. Häufig wird daher der Wunsch speziell von Städten und Kommunen mit geringerem Klima-Know-How und begrenzten personellen und finanziellen Ressourcen geäußert, schon zu Beginn eines Vorhabens die Möglichkeit zu haben, auf einfache Weise verschiedene Anpassungsmaßnahmen, inklusive der Kombination verschiedener Maßnahmen, auf ihre Klimawirksamkeit zu testen. Dieser Wunsch wurde aufgegriffen mit dem Ziel, ein anwenderfreundliches webbasiertes Anpassungstool für Kommunen (Stadtplaner) zu entwickeln und online zur Verfügung zu stellen. Mit Hilfe des Tools kann interaktiv die Wirkung verschiedener Anpassungsmaßnahmen auf die Temperatur in einem frei wählbaren Stadtquartier in Nordrhein-Westfalen geprüft und verglichen werden. So kann unter den jeweiligen Gegebenheiten die effektivste Anpassungsmaßnahme abgeleitet werden. Im Fokus steht die Anpassung an sommerliche Hitzeepisoden durch städtebauliche Maßnahmen, wie beispielsweise die Erhöhung des Grünflächenanteils, der Dachbegrünung oder Veränderungen der Materialeigenschaften (Albedo).

Das mikroskalige Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 wird genutzt um Sensitivitätsstudien verschiedener Anpassungsmaßnahmen am Beispiel ausgewählter Stadtquartiere in Bonn durchzuführen. Da die Stadt Bonn zu den wärmsten Regionen Nordrhein-Westfalens zählt und es dort vor allem in der Innenstadt zu sommerlicher Hitzebelastung kommen kann, eignet sich Bonn gut als „Beispielstadt“ für die Untersuchung von Klimaanpassungsmaßnahmen.

Die Anwendung des mikroskaligen urbanen Stadtklimamodells MUKLIMO\_3 soll Aufschluss darüber geben, welche Stadtteile in der Stadt Bonn in besonderem Maße von Wärmebelastung betroffen sind und einer Detailuntersuchung unterzogen werden sollten.

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse der Messungen an ausgesuchten Standorten in der Stadt Bonn und der Computersimulationen zu Anpassungsmaßnahmen für ausgewählte Bereiche im Stadtgebiet im Hinblick auf die Wärmebelastung, zusammen. Die entsprechenden Ergebnisse fanden Eingang in das zum Projektende entwickelte, vom LANUV koordinierte, anwenderfreundliche, webbasierte Tool für Kommunen und Stadtplaner. Dieses Tool steht „online“ zur Verfügung (LANUV 2020) und wird im Bericht in Kapitel 5.8.5 kurz vorgestellt.

## 2 Zielsetzung

Das Ziel des Projektes war es, ausgewählte Klimaanpassungsmaßnahmen an die sommerliche Hitzebelastung auf ihre quantitative Klimawirksamkeit zu untersuchen.

Folgende drei Klimaanpassungsmaßnahmen wurden ausgewählt:

Änderung der Bebauungseigenschaften, wie

- Sukzessive Entsiegelung der vorhandenen unbebauten Flächen und somit Erhöhung des Grünflächenanteils

und Änderung der Oberflächeneigenschaften, wie

- Erhöhung des Anteils der Dachbegrünung oder
- Verwendung anderer Oberflächenmaterialien hinsichtlich Farbe und Struktur (z. B. hellere Dachziegel, um somit das Reflexionsvermögen für die Sonneneinstrahlung zu erhöhen).

Das mikroskalige Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 wurde genutzt, um Sensitivitätsstudien der erwähnten Anpassungsmaßnahmen am Beispiel ausgewählter Stadtquartiere der Stadt Bonn durchzuführen.

Die oben genannten Anpassungsmaßnahmen wurden in vorliegender Studie sowohl als Einzelmaßnahmen, als auch als Kombinationsmaßnahmen in Verbindung mit einer realistisch notwendigen Nachverdichtung, d.h. Erhöhung des Gebäudeanteils, sowie einer eventuell erforderlichen oder gewünschten Aufstockung, simuliert. Damit konnte gezeigt werden, ob und in wieweit Anpassungsmaßnahmen den negativen klimatischen Auswirkungen einer immer dichteren Bebauung entgegenwirken können.

Hierzu wurden innerhalb der Stadt Bonn und der Umgebung unterschiedliche „Plangebiete“ (Stadtquartiere) ausgewählt, die hinsichtlich ihrer Landnutzung (z. B. geschlossene Bebauung, offene Bauweise, Reihenhauscharakter etc.) möglichst homogen sind, sich aber bezüglich der vorherrschenden Bebauungsstruktur unterscheiden. So war es möglich die unterschiedliche Wirkung von Klimaanpassungsmaßnahmen für verschiedene Bebauungs- bzw. Landnutzungscharakteristika der Untersuchungsareale zu untersuchen.

Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsstudien wurden mit den Ergebnissen idealisierter Stadtquartiere verglichen (siehe Kapitel 5.8). Es konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse für die idealisierten Quartiere gut mit den realen Gegebenheiten übereinstimmen und für das webbasierte Anpassungstool „hitzeangepasste Quartiersentwicklung“ angewendet werden können.

## 3 Untersuchungsgebiet und Untersuchungsmethoden

### 3.1 Naturräumliche und klimatische Beschreibung

Bonn ist eine Großstadt mit 327.258 Einwohnern (Stand Dezember 2018) in Nordrhein-Westfalen. Das vorherrschende Makroklima ist, durch die geographische Nähe zum Atlantik und zur Nordsee, maritim geprägt mit einem überwiegend milden Verlauf der Winter und mäßig warmen Sommern. Innerhalb von Nordrhein-Westfalen gehört Bonn durch die Lage im südöstlichen Teil der niederrheinischen Bucht, am südlichen Ende der Köln-Bonner Rheinebene zu den wärmsten Regionen. Dort nehmen die rheinbegleitenden Niederterrassenebenen eine Breite von etwa 12 km ein, während weiter südlich, bei Bad Godesberg, das Rheintal, der sogenannte Bad Godesberger Rheintaltrichter, sich nur auf eine Breite von 3 km beläuft.

Im engeren Teil des Rheintals wird dieses an der Westseite vom Steilhang der über 100 m höheren Kottenforstterrasse begrenzt, auf der östlichen Talseite reicht das Siebengebirge mit seinen markanten Vulkankuppen, die 250 bis 460 m ü. NHN (Meter über Normalhöhennull) erreichen, dicht an das Königswinter Ufer heran (siehe Untersuchungsgebiet Abbildung 1).

Das Mikroklima wird vor allem im innerstädtischen Bereich durch Gebäude, Straßen und Plätze etc. beeinflusst, so dass es in der Innenstadt meist wärmer, schwachwindiger und trockener als im angrenzenden Freiland ist.

Zur Charakterisierung von unterschiedlichen Wettersituationen werden häufig sogenannte Großwetterlagen verwendet. Im langjährigen Zeitraum (1960–1990) dominierten folgende Großwettertypen im Großraum Bonn (OTTE et al. 1990):

Zonal West	26,5 %
Gemischt Hoch Mitteleuropa	15,3 %
Meridional Nord	15,5 %
Meridional Süd	10,2 %

Während der temporären Messphase im September 2016 war der Großwettertyp „Meridional Süd“, anders als bei der langjährigen Statistik, mit 50 % mit größter Häufigkeit vertreten. Auch den Großwettertyp „Gemischt Hoch Mitteleuropa“ gab es mit 33 % verhältnismäßig oft. Die Dominanz dieser beiden Wettertypen lässt auf eine stabile warme Wetterepisode im Spätsommer, bzw. im meteorologischen frühen Herbst, schließen, die für diese Jahreszeit nicht ungewöhnlich ist. Nach derzeitigem Kenntnisstand der Klimaforschung scheinen solch stabile Wettersituationen, die auf Intensivierung von quasistationären atmosphärischen Wellen zurückzuführen sind, zunehmend häufiger vorzukommen (siehe COUMOU et al. 2018). Auch RIEDIGER und GRATZKI (2014) kamen bei Betrachtung der Ensemble-Daten des Regionalen Klimamodells (RCM) zu dem Ergebnis, dass im zukünftigen Klima (2070–2099) einige Wettermuster, die für heiße Tage typisch sind, doppelt so häufig vorkommen werden wie im Zeitraum

1971-2000. Gleichzeitig werde die Zahl sehr heißer Tage mit einer mittleren Tages-temperatur von mehr als 25 °C zunehmen.

Im Sommer stehen die erwähnten stabilen Wetterlagen in der Regel mit windschwachem Strahlungswetter in Verbindung, also Tagen mit wenig Bewölkung, viel Sonne und wenig Wind. Unter solchen Bedingungen machen sich die stadtklimatischen Charakteristika unterschiedlicher Standorte bemerkbar. Auch die Nähe des Rheins kann den Wind im Raum Bonn beeinflussen (siehe Kapitel 4.4 Auswertung und Interpretation der Messergebnisse).

### **3.2 Untersuchungsgebiet**

Das Untersuchungsgebiet für die Stadtklimamodellierung wurde bezüglich Lage und Größe so gewählt, dass unterschiedliche thermische Auswirkungen in Bonn an wind-schwachen Strahlungstagen bzw. -nächten, ermittelt werden können. Wie stark heizen sich beispielsweise dicht bebaute Areale in der Innenstadt im Vergleich zu einer locker bebauten Reihenhaussiedlung mit größerem Anteil von begrünten Flächen auf und wie stark wirken Klimaanpassungsmaßnahmen bei gleichen Einstrahlungs- und Windverhältnissen?

Um mit dem erwähnten Stadtklimamodell realistische trockene Wettersituationen zu einer bestimmten Jahreszeit simulieren zu können, muss das zu untersuchende Areal eine Mindestgröße aufweisen. In Absprache mit der Stadt Bonn sollte die komplette Stadt Bonn im Untersuchungsgebiet enthalten sein. Thermische Unterschiede innerhalb eines Areals können nur dann vom Modell hinreichend genau erfasst werden, wenn die orographischen Einflüsse aus der Umgebung berücksichtigt werden. Schließlich wurde das abgebildete Gebiet mit einer Breite von 26 km und einer Länge von 24 km gewählt (Abbildung 1).

Das Gebiet erstreckt sich von der Köln-Bonner Rheinebene im Norden (dort liegt die niedrigste orographische Höhe mit 42 m ü. NHN) bis zum Bad Godesberger Rheintaltrichter im Süden. Auf der rechten Rheinseite befindet sich das Siebengebirge mit der höchsten Erhebung des Untersuchungsgebietes von 444 m ü. NHN. Die Höhenangaben sind jeweils über die 100 m x 100 m horizontalen Gitterzellen gemittelt.

Auf der gegenüberliegenden, linksrheinischen Seite befinden sich mehrere Bachtäler, wie das Tal des Mehlemer Baches und des Godesberger Baches. Auf Grund der unterschiedlichen orographischen Gegebenheiten ist das Modell in der Lage, kleinräumige Klimaprozesse (wie den Hitzestau am Tage in den Tälern sowie die nächtliche Kaltluftzufuhr) zu simulieren.

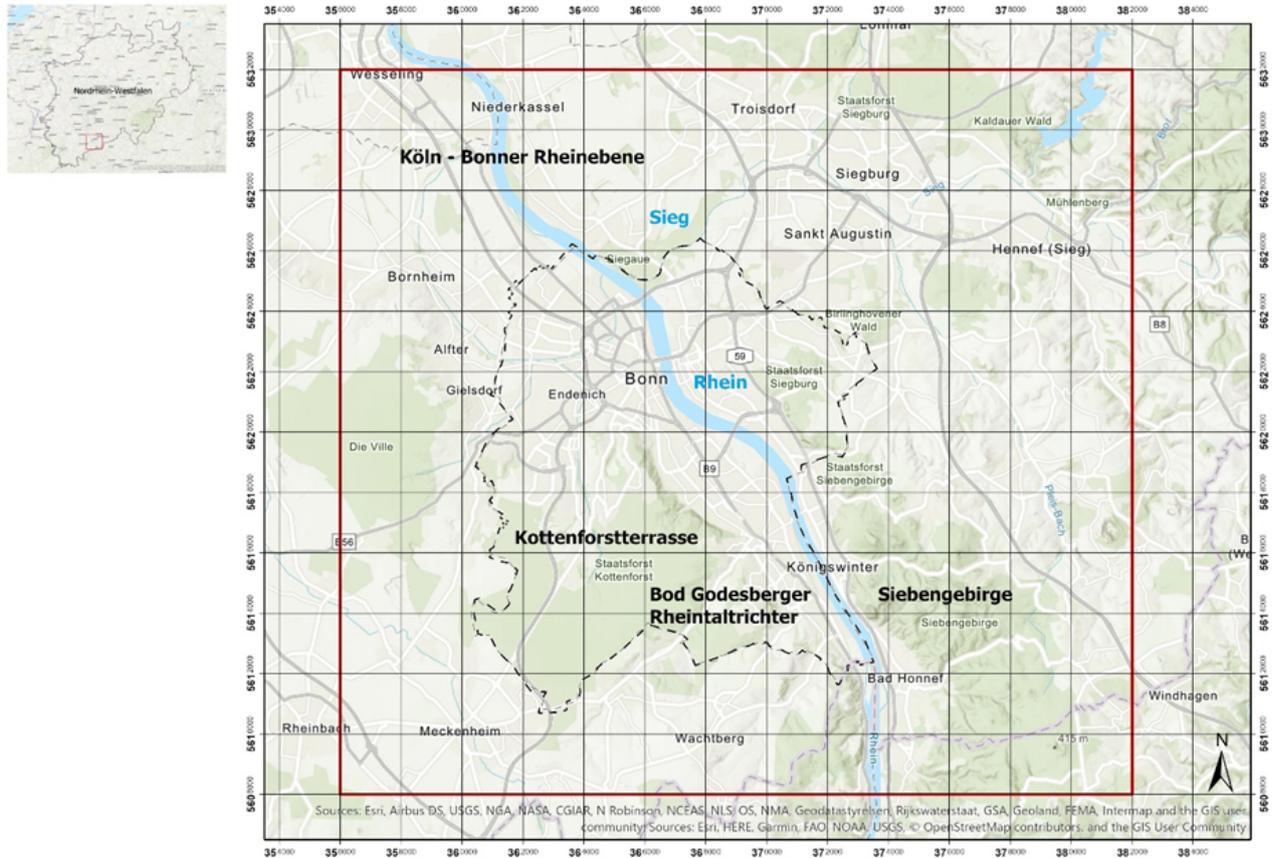


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsgebietes in NRW (kleines Bild links) und topographische Kartendarstellung des Untersuchungsgebietes 26 km x 24 km mit dem eingezeichneten Umriss der Stadt Bonn.

### 3.3 Verwendung des Stadtklimamodells MUKLIMO\_3

Das Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 des Deutschen Wetterdienstes wurde für die Untersuchung stadtklimatologischer Fragestellungen entwickelt (SIEVERS und ZDUNKOWSKI 1986; SIEVERS 2012; FRÜH et al. 2011b; SIEVERS 2016). Die grundlegenden Gleichungen der Massenerhaltung, Energieerhaltung und Impulserhaltung dienen als Basis, auf Grund derer auf einem 3-dimensionalen Rechengitter der Tagesgang des Windes, die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, die solare und thermische Strahlung und weitere Parameter berechnet werden. Auf Grund der Größe des Modellgitterausschnitts und der damit verbunden hohen Rechenzeit war es sinnvoll eine horizontale Auflösung von 100 m x 100 m zu wählen. Für das 3-dimensionale Modell wurde das vertikale Modellgitter in 34 Schichten eingeteilt, wobei die unteren Schichten eine Distanz von 10 m aufweisen. Es ergibt sich eine Gesamtmodellhöhe von 2150 m. Die Gebäude können im Modell nicht aufgelöst werden, sondern werden als poröses Medium betrachtet. Diese Methodik beruht auf einer Parametrisierung der Gebäudeeffekte unter der Annahme, dass sich Luftströmungen zwischen Gebäuden und Strömungen eines Gases oder einer Flüssigkeit in einem porösen Medium (GROSS 1989) ähnlich verhalten. Im Modell wird daher mit einem prozentualen Anteil der Ge-

bäude an der Gitterzelle gerechnet. Straßen werden durch den Prozentsatz des Versiegelungsgrades ohne Gebäude erfasst. Somit lassen sich Wechselwirkungen zwischen städtischer Bebauung, Vegetation und Atmosphäre relativ gut simulieren.

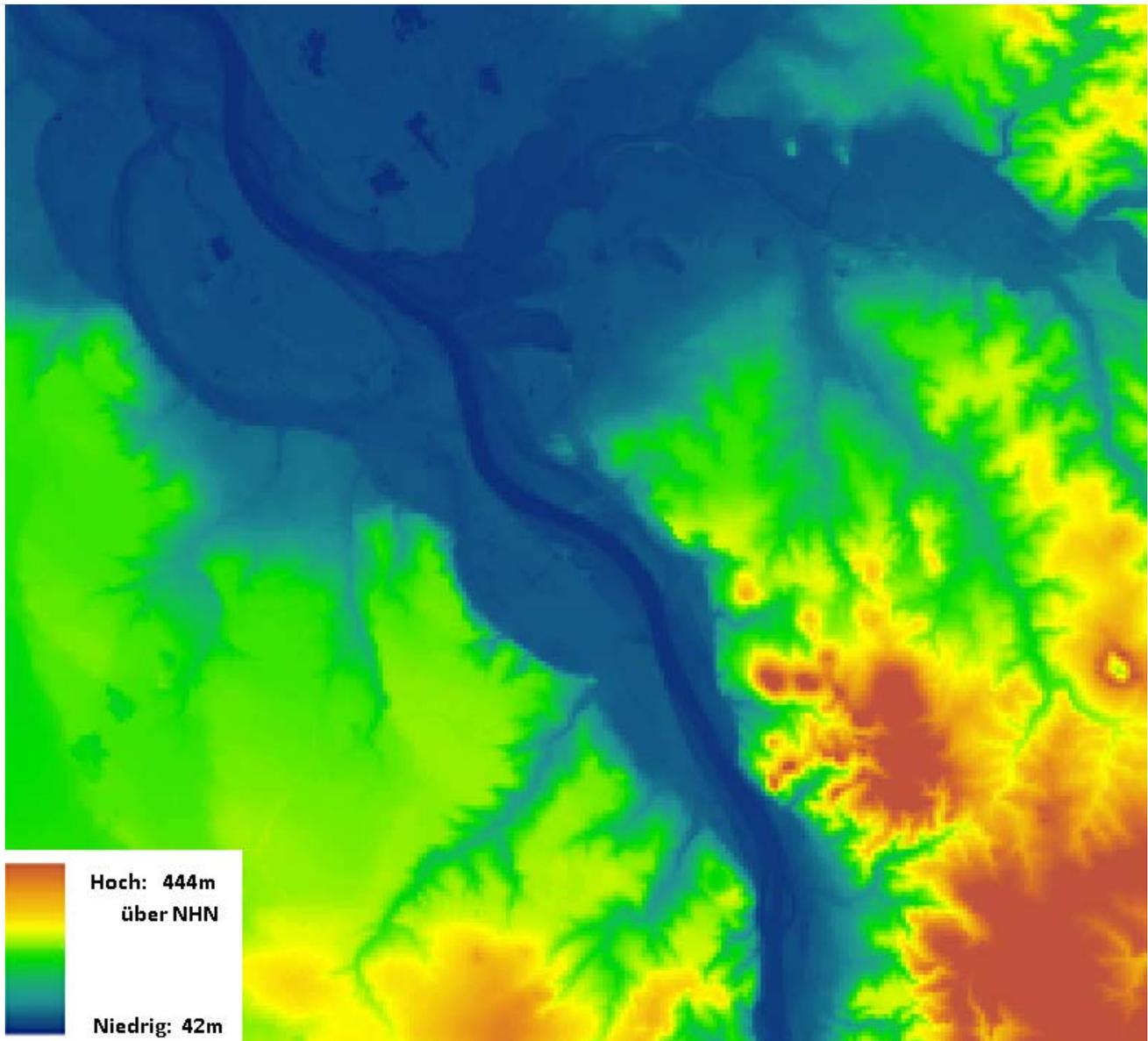
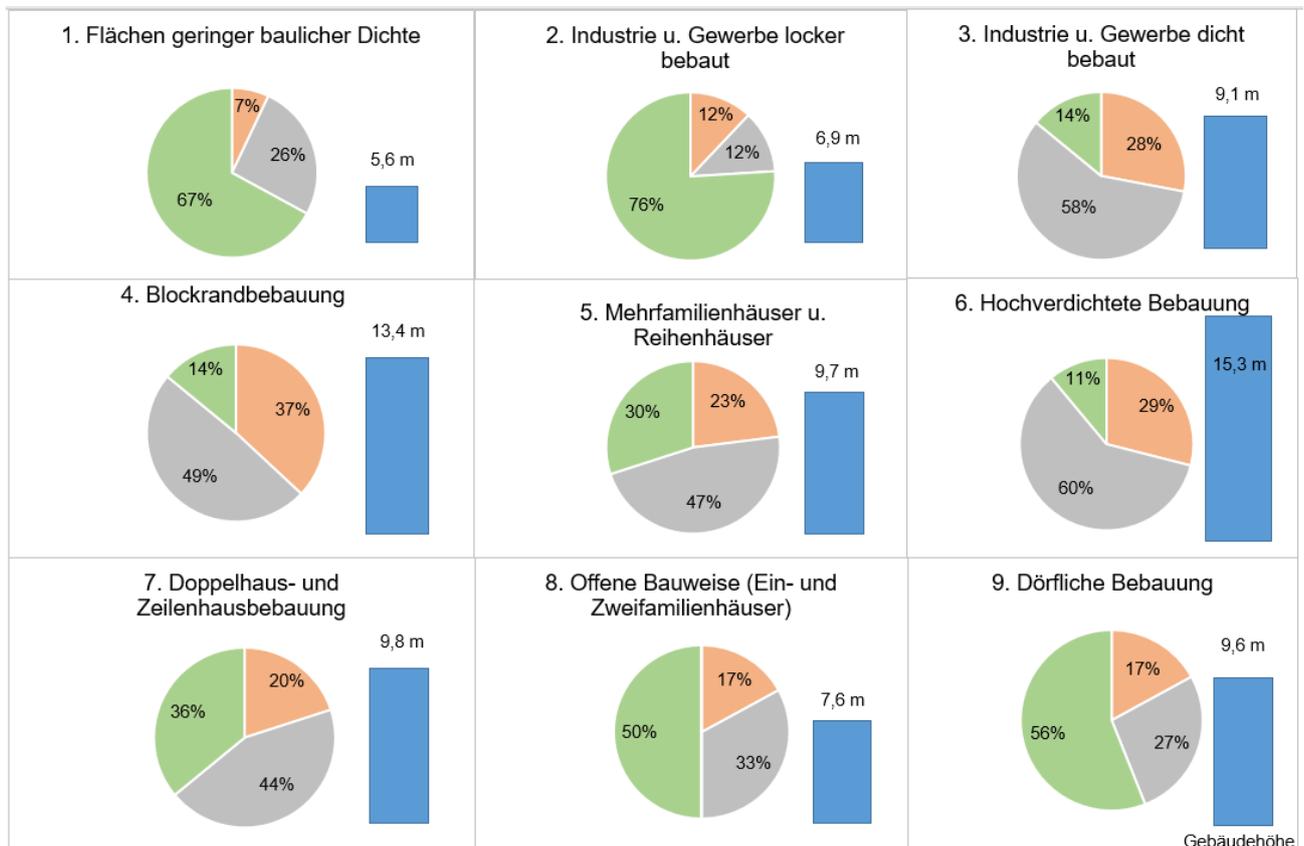


Abbildung 2: Geländehöhendarstellung des Untersuchungsgebiets (Geländehöhen in Metern, siehe Legende).

Für einen Modelllauf werden für jede Gitterzelle als Eingangsdaten die Höhe über NHN und Informationen zur Art der Landnutzung benötigt. Jeder der 260 x 240 Gitterzellen à 100 m Seitenlänge wird ein Höhenwert und ein Landnutzungswert zugewiesen. In Abbildung 2 ist die gemittelte Höhe in Metern für die graphische Darstellung pro Gitterzelle gezeigt. Sehr schön ist das dunkelblaue, tief gelegene Band des Rheins in der mittelblau getönten Kölner Bucht zu sehen, ebenso das Tal der Sieg, die auf der östlichen Rheinseite in den Rhein mündet. Als niedrigstes Höhenmittel wurden 42 m für eine Gitterzelle in der Kölner Bucht ermittelt (dunkelblaue Färbung). Die höchste

über die Gitterzelle gemittelte Erhebung liegt im Siebengebirge mit 444 m (rotbraune Färbung) (siehe Abbildung 2).

Das zweite benötigte Datenfeld beinhaltet pro Gitterzelle eine Kennziffer für die auf dieser Parzelle vorherrschende Landnutzung. Es wurden 20 Landnutzungsclassen, davon neun mit Bebauung, mit Hilfe der Klassifizierung des Leibniz Instituts für ökologische Raumentwicklung (IÖR 2017) in Verbindung mit der INKAS - Nutzungsklassifikation (Informationsportal Klimaanpassung in Städten) festgelegt. Die verwendeten neun Klassen mit Bebauung werden im Wesentlichen durch den Anteil der Gebäudegrundfläche, der mittleren Gebäudehöhe, der versiegelten Fläche und der unversiegelten Fläche unterschieden (siehe Abbildung 3).



■ Flächenanteil Gebäude    ■ versiegelt    ■ unversiegelt

Abbildung 3: Unterteilung der 9 Bebauungstypen bezüglich der Flächenaufteilung (siehe Legende) und Gebäudehöhe (blaue Rechtecke).

Pro 100 m x 100 m Gitterzelle wurde ein Mittel der Gebäudehöhe, sowie die prozentuale Verteilung der versiegelten und nicht versiegelten Fläche ermittelt und berechnet, welcher Landnutzungsclassen die Gitterzelle mit ihren Merkmalen zugeordnet werden kann. Weitere Merkmale, wie z. B. der Wandflächenindex (Verhältnis der Außenwandfläche von einem typischen Gebäude zu seiner Grundfläche) und die Bodenrauigkeit der nicht bebauten Flächen wurden berücksichtigt. Außerdem gibt es Unterscheidungskriterien, die vor allem für die 11 Landnutzungsclassen ohne Gebäudeanteil

wichtig sind, wie z. B. die Höhe der Bäume, die Höhe des Stammraums, der Bedeckungsgrad mit Bäumen, der Bedeckungsgrad mit niedriger Vegetation und die Blattflächendichte.

Von den 9 Landnutzungsklassen mit Gebäudeanteil haben folgende Typen einen hohen Anteil unversiegelter Fläche:

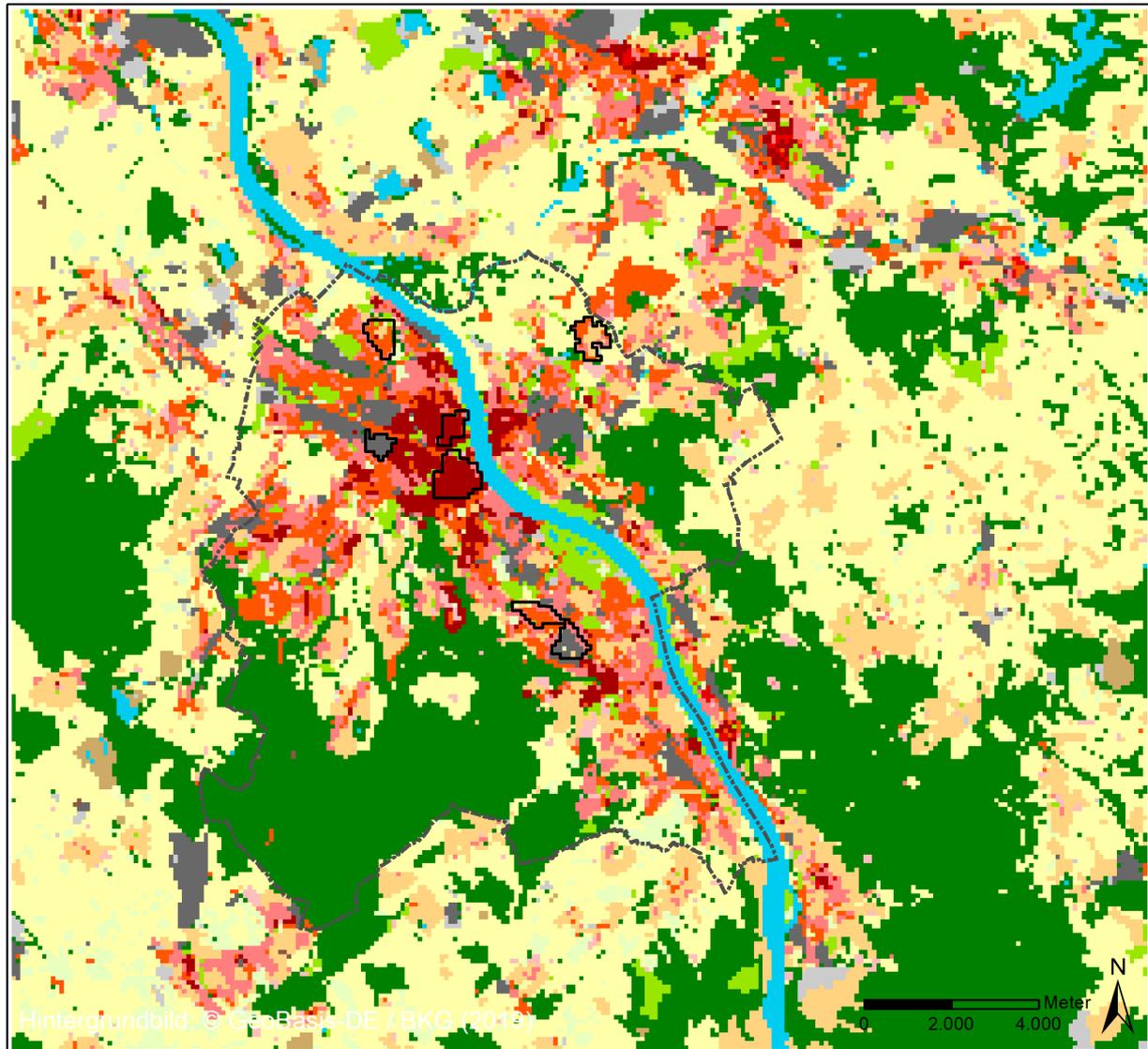
- Typ 1 „Flächen geringer baulicher Dichte“,
- Typ 2 „Industrie und Gewerbe locker bebaut“,
- Typ 8 „Offene Bauweise „Ein- und Zweifamilienhäuser“ und
- Typ 9 „Dörfliche Bebauung“

Bei den genannten Landnutzungsklassen ist mindestens die Hälfte der Fläche einer Gitterzelle unversiegelt und der Gebäudeanteil beträgt höchstens 17 % der Gitterzellenfläche (siehe Abbildung 3). Umgekehrt findet sich bei den folgenden Landnutzungsklassen ein hoher Versiegelungsgrad:

- Typ 3 „Industrie und Gewerbe dicht bebaut“,
- Typ 4 „Blockrandbebauung“ und
- Typ 6 „Hochverdichtete Bebauung“

mit einer Versiegelung von ca. der Hälfte der Fläche bis zu 60 %. Außerdem haben die genannten Landnutzungsklassen den höchsten Gebäudeanteil mit teilweise über ein Drittel der Fläche wie bei der Blockrandbebauung (siehe Abbildung 3).

Welcher Landnutzungsklasse jede der 260 x 240 Gitterzellen des Untersuchungsgebietes zugeordnet wurde, zeigt die graphische Darstellung des entsprechenden Datengitterfelds mit der Landnutzungsverteilung (Abbildung 4). Jeder Farbton in der graphischen Darstellung entspricht einer verschlüsselten Ziffer (siehe Legende unter Abbildung 4). Die Zuordnung der Landnutzungsklassen zu den jeweiligen verschlüsselten Ziffern wird im Modell mit einer sogenannten Landnutzungstabelle gesteuert.



### Landnutzung

 Abbaufäche/Heide	 landwirtschaftliche Fläche
 Blockrandbebauung (geschlossen)	 Mehrfamilien- und Reihenhäuser
 Dörfliche Bebauung	 Obst und Wein
 Doppelhaus- und Zeilenbebauung	 offene Bauweise (Ein- und Zweifamilienhäuser)
 Flächen geringer baul. Nutzung mit hohem Grünanteil	 unbebaut (Bebauung vorgesehen)
 hochverdichtete Bebauung	 vegetationslose Fläche
 Innerstädtische Grünflächen	 Verkehrsflächen
 Industrie und Gewerbe dicht bebaut und hoch versiegelt	 Wald
 Industrie und Gewerbe locker bebaut und gering versiegelt	 Wasser
	 Stadtgrenze Bonn
	 Plangebiete

Abbildung 4: Untersuchungsgebiet mit Landnutzungsverteilung, verwendete Landnutzungs-klassen (siehe Legende).

## **Vergleich des „Ist-Zustands“ mit einem hypothetischen Planungszustand nach Anwendung von Klimaanpassungsmaßnahmen**

Mit Hilfe des Stadtklimamodells MUKLIMO\_3 wird zunächst ein „Ist-Zustand“ simuliert, der basierend auf der derzeitigen Bebauungsstruktur Bonns in erster Linie die thermische Situation im Untersuchungsgebiet für eine gewählte Wetterlage im Sommer (hier: windschwacher, wolkenarmer Strahlungstag), wiedergeben soll.

Für die ausgewählten Plangebiete (siehe Abbildung 29) mit von Gebiet zu Gebiet unterschiedlicher Landnutzung, aber innerhalb eines Gebietes mit überwiegend homogen genutzten Flächen, werden mit MUKLIMO\_3 sogenannte „Sollzustände“ oder „Planungszustände“ gerechnet: Dazu werden mögliche, virtuelle Veränderungen der bestehenden Bebauung in Form von Anpassungsmaßnahmen simuliert.

Beispielsweise wird die Dachbegrünung in 10 %-Schritten erhöht oder die Farbe der Dachziegel wird von dunkel auf heller geändert, wodurch geringere Energiemengen der hereinkommenden kurzwelligeren solaren Strahlung absorbiert werden und mehr reflektiert werden. Dies wird in der Dateneingangstabelle durch eine schrittweise Erhöhung der Dachalbedo, ebenso in 10 %-Schritten, bewirkt. Im Unterschied zu diesen beiden Maßnahmen, bei denen Änderungen im Dachniveau stattfinden, wurde noch eine weitere Maßnahme, nämlich die sukzessive Entsiegelung des Bodens hinzugenommen.

Differenzabbildungen bzw. Differenzfelder (Vergleich des simulierten „Ist-Zustands“ mit einem „Soll-Zustand“: „Soll“ minus „Ist“) geben Aufschluss darüber, wie klimawirksam Klimaanpassungsmaßnahmen sein können und ob die Maßnahmen nur dort greifen, wo sie durchgeführt wurden oder auch noch in der Umgebung.

Zum besseren Verständnis der unterschiedlichen klimatischen Situation in den einzelnen Untersuchungsarealen wird eine Detailbetrachtung, in erster Linie der Temperaturverteilung zu verschiedenen Tageszeiten, mit Hilfe der Graphiksoftware ArcGIS durchgeführt.

## 4 Temporäres Sondermessnetz in Bonn

### 4.1 Auswahl der Messgebiete

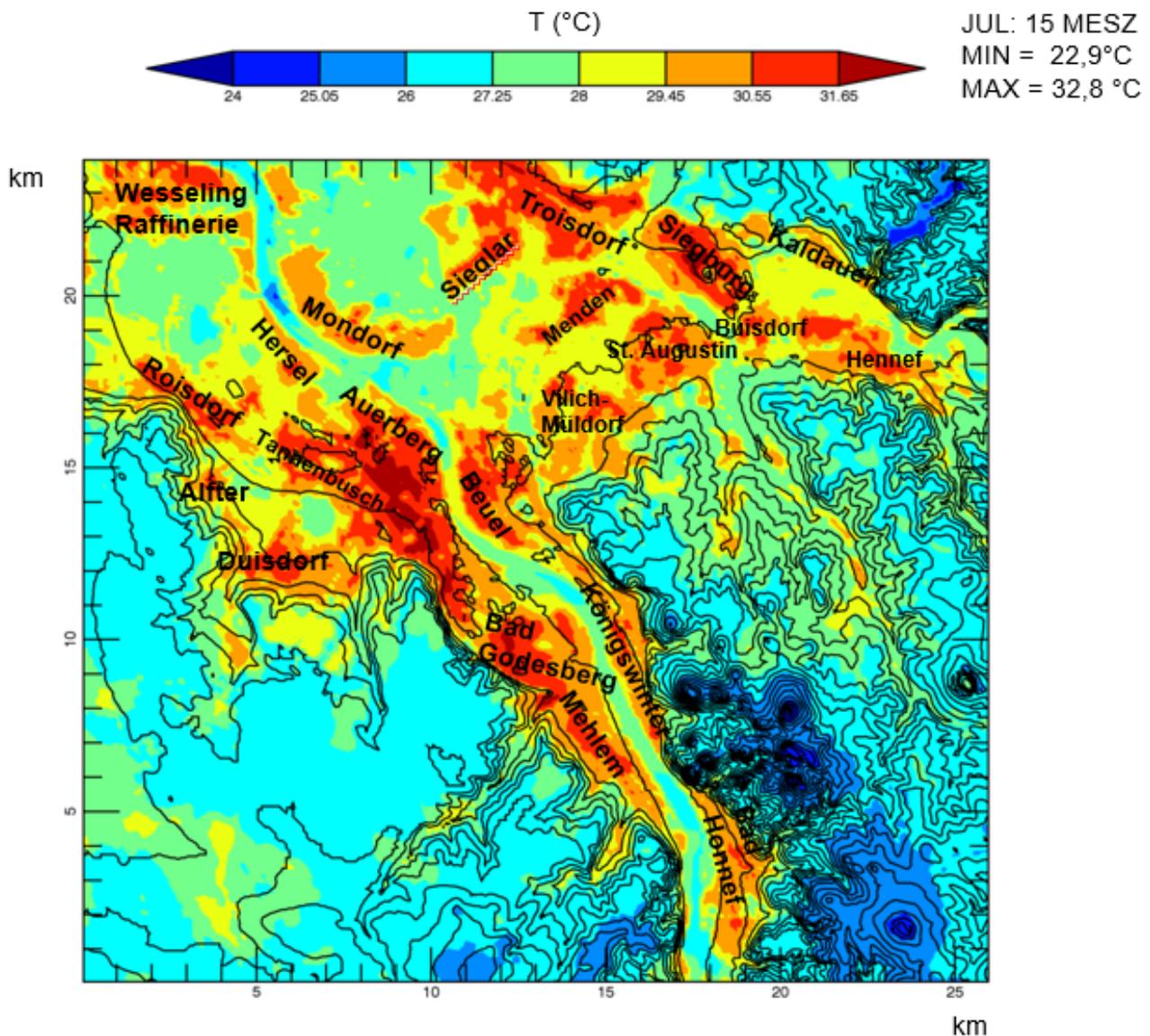


Abbildung 5: Von MUKLIMO\_3 berechnete Temperaturverteilung in 2 m Höhe über Grund für einen heißen Tag im Juli mit einer Anströmrichtung aus Südost.

Mit dem mikroskaligen urbanen Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 wurde die klimatische Situation für einen heißen Sommertag im Juli simuliert (siehe Abbildung 5). Anhand dieser Temperaturverteilung lassen sich recht gut die Regionen ausmachen, die sich bei sommerlichen austauscharmen Wetterlagen stärker aufheizen. Nach KUTTLER (2012) sind vor allem städtische Ballungsgebiete vom Temperaturanstieg in der unteren Atmosphäre besonders betroffen. Im Gegensatz zu der ländlichen Umgebung, sind sie durch eine hohe Bevölkerungsdichte, sowie durch einen hohen Anteil an versiegelten und rauen Flächen und durch Luftverschmutzung charakterisiert.

Bei der Auswahl der Gebiete, die detaillierter untersucht werden sollen, waren Gebiete mit unterschiedlichem Landnutzungscharakter von besonderem Interesse. Bei der Wirkung von Klimaanpassungsmaßnahmen kann somit getestet werden, welche Klimawirksamkeit beispielsweise locker bebaute Gebiete mit Einfamilienhausbebauung oder Reihenhäuser aufweisen und welche thermischen Veränderungen bei den gleichen Maßnahmen bei geschlossener Blockrandbebauung hervorgerufen werden.

Unter Berücksichtigung dieses Wissens wurde versucht, geeignete Messstandorte zu finden.

#### **4.2 Stationäre und temporäre Messstandorte**

Für das Projekt wurden vier temporäre Messstationen aufgestellt, an denen über einen Zeitraum von Ende August bis Anfang Oktober 2016, die Temperatur (in 2 m Höhe), die relative Feuchte (in 2 m Höhe) und an drei Stationen der Wind in 2 m Höhe und an einer Station (Karlstraße) Wind, Temperatur und relative Feuchte zusätzlich in 10 m Höhe sowie die Globalstrahlung (in 2 m Höhe) gemessen wurden.

Es wurde als günstig erachtet, für die temporären Messungen Standorte zu wählen, die als repräsentativ für ein Untersuchungsgebiet gelten. So gab es die Möglichkeit, zwei Messstationen in der Innenstadt (Wilhelmstraße und Königstraße), in der geschlossenen Blockrandbebauung in den jeweiligen Untersuchungsarealen, zu errichten. Außerdem wurden Messungen in einem Industriegebiet westlich der Innenstadt (Karlstraße) durchgeführt. Das Spektrum der bisher genannten Messstandorte wurde noch durch eine Station im Außenbereich der Stadt mit lockerer Bebauung (Nelly-Sachs-Weg) ergänzt.

Bei der Auswertung der Messergebnisse konnten zu Vergleichszwecken zusätzlich die Messungen der DWD-Stationen Köln-Wahn (Flughafen) (92 m ü. NHN) sowie der Station Bonn-Roleber (159 m ü. NHN) herangezogen werden. Die Lage der genannten Messstationen ist der Übersichtskarte (Abbildung 6) zu entnehmen.



Abbildung 6: Lage der kontinuierlich messenden (blau) und temporären (rot) Messtandorte.

Tabelle 1: Lage und Messausstattung der temporären Messtandorte.

Standort	Karlstraße	Königstraße	Nelly-Sachs-Weg	Wilhelmstraße
ETRS89 UTM32 Koordinaten	E 364598.315 N 5621930.871	E 3661132.825 N5621386.178	E 369469.076 N 624534.835	E 365837.600 N 5622510.805
Höhe über NHN [m]	59 m	56 m	60 m	59 m
Messung der Lufttemperatur	in 2 m und 10 m	in 2 m	in 2 m	in 2 m
Messung der Relativen Luft- feuchte	in 2 m und 10 m	in 2 m	in 2 m	in 2 m
Messung von Niederschlag	in 1 m	Keine Messung	in 1 m	in 1 m
Windmessung	in 2 m und 10 m	Keine Messung	in 2 m	in 2 m
Messung der Globalstrahlung	in 2 m	Keine Messung	in 2 m	in 2 m



### **Messtation Wilhelmstraße (Innenstadt):**

Diese temporäre Messtation wurde direkt in der Innenstadt (Wilhelmstraße) in einem begrünten Hinterhof aufgestellt (siehe Abbildung 8). In der Umgebung in einem Radius von 100 m um die Station (siehe Abbildung 7) dominiert geschlossene Blockrandbebauung, die bei Einstrahlung als Wärmespeicher wirkt. Die sehr hohen Häuser im Westsüdwesten der Station schatten diese ab den Nachmittagsstunden ab. Die dichte Bebauung wird nur gelegentlich von Hinterhofbegrünung unterbrochen.



Abbildung 8: Temporäre Messtation Wilhelmstraße, Messaufbau: Messhütte mit Temperatur- und Feuchtemessung, Niederschlagstopf (Pluvio Ott), GLOBE-Thermometer für die Messung der mittleren Strahlungstemperatur (schwarze Kugel).

### **Messtation Königstraße (südliche Innenstadt):**

Die Messtation „Königstraße“ ist in der südlichen Innenstadt gelegen. Auch hier wurde der Bereich um die Station, genau wie bei der „Wilhelmstraße“ als „geschlossene Blockrandbebauung“ klassifiziert (siehe Abbildung 7). Bei genauer Betrachtung der Luftbilder fällt jedoch auf, dass zwar die Gebäude dicht aneinandergelassen sind (Blockbauweise), aber die Hinterhöfe häufiger begrünt sind, als im Zentrum der Innenstadt. Außerdem wurden gelegentlich Alleen angelegt, die zu einer Auflockerung der dichten Bebauung durch „Stadtgrün“ beitragen. Die Messtation selbst wurde in einem Hinterhof mit Rasenbausteinen als Untergrund aufgebaut. Im Richtungsbereich von Nordwest bis Nordost erstreckt sich über viele Meter eine unversiegelte Freifläche mit Bäumen, die zum Teil Schatten spenden. In nur wenigen Metern Entfernung südlich der Messtation befindet sich ein langgestreckter, hoher Häuserriegel mit Orientierung Nordost-Südwest, der ab dem frühen Nachmittag die Station abschattet.



Abbildung 9: Messtation an der Königstraße mit Messhütte für die Lufttemperatur und Luftfeuchte.

### Messtation Karlstraße (Industriegebiet):

Die Messtation „Karlstraße“ liegt westlich vom Hauptbahnhof in einem Industriegebiet mit hohem Versiegelungsgrad, aber weniger dichter Bebauung als in der Innenstadt. Um die Station herum befand sich zum damaligen Zeitpunkt (24.08.2016 bis 31.10.2016) eine große Freifläche, die mit Schotter bedeckt war, zwar nicht versiegelt, aber auch ohne Vegetation. Im Vergleich zur direkten Innenstadtlage ist hier kaum mit Abschattung zu rechnen. Außerdem zeichnet sich die Lage durch eine direktere Nähe zur Peripherie im Westen mit geringerem Besiedlungsgrad und mehr Begrünung aus.



Abbildung 10: Messtation an der Karlstraße (hier Stationsmast mit Windmesser in 10 m Höhe für zusätzliche Vergleiche zu den Messungen in 2 m Höhe).

### **Messtation Nelly-Sachs-Weg (locker besiedeltes Wohngebiet):**

Richtung Westen und Nordwesten von der Messtation erstreckt sich eine weiträumige Grünfläche. Richtung Osten und Süden schließt sich eine lockere Wohngebietsbebauung mit Ein- und Zweifamilienhäusern und Gärten an. Die Lage kann als locker besiedelte Stadtrandlage charakterisiert werden.



Abbildung 11: Lage der Messtation am Nelly-Sachs-Weg, Stationsmast mit Solarmodul, Datenlogger und Messsensoren für Temperatur und relative Feuchtigkeit in 2 m Höhe sowie Globe-Thermometer (schwarze Kugel) und Niederschlagstopf (Pluvio Ott) links vom Stationsmast.

### **4.3 Profilmessfahrten**

Einen guten Überblick über die Unterschiede der Temperaturverteilung im Untersuchungsgebiet liefern sogenannte Profilmessfahrten.

In städtischen und stadtnahen Bereichen kann, auf Grund kleinräumig stark wechselnder Flächennutzungstypen, die räumlich-zeitliche Verteilung der Lufttemperatur durch punktuelle, stationäre Messungen in der Regel nur unzureichend erfasst werden. Auch die kleinräumige Orographie kann zu einer Modifikation des Temperaturfeldes in einer Stadt führen (z. B. durch Kaltluftflüsse) und auch die Ausrichtung von Gebäuden und

Straßen zur Windrichtung können eine Rolle spielen. Außerdem ist es sinnvoll, Profilmessfahrten zu unterschiedlichen Tageszeiten durchzuführen, damit der variierende Sonnenstand in die Interpretation mit einbezogen werden kann.

Somit kann die Auswertung punktueller, stationärer Messungen mit zusätzlichen Informationen durch mobile Messfahrten ergänzt werden und es steht dann eine hohe Anzahl von Messpunkten im städtischen Bereich zur Verfügung. Durch die hohe Messwertdichte kann die räumliche Temperaturverteilung gut erfasst werden.

Die Profilmessfahrten in Bonn wurden mit einem Messfahrzeug der Mobilen Messeinheit (MME) des Deutschen Wetterdienstes durchgeführt. An einem Ausleger des Fahrzeugs in einer Höhe von ca. 1,9 m über Grund wurde mit einem Messfühler die Temperatur gemessen und mit einem Feuchtesensor die relative Feuchte ermittelt. Zwei weitere Temperaturmessfühler befanden sich in einer Höhe von 0,7 m über Grund. Die Messsignale wurden mit einer Abtastrate von einem Hertz aufgenommen und in einem Datalogger gespeichert. Mittels GPS konnten die Messwerte, während der gesamten Messfahrt, räumlich zugeordnet werden. Die maximale Fahrtgeschwindigkeit betrug 30 km/h, wodurch pro acht Meter Fahrtstrecke mindestens ein Datensatz vorliegt.

Für eine einheitliche, vergleichbare Datenaufnahme ist eine gleichmäßige Fahrtgeschwindigkeit am günstigsten. Deswegen werden Daten, die bei Wartezeiten und Staus aufgenommen werden, wieder eliminiert.

Neben der Erfassung der räumlichen Temperaturverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt, kann das Ergebnis der Profilmessfahrten auch als zusätzlicher Kontrollindikator für die räumlichen Temperaturunterschiede der Modelldaten genutzt werden.

Generell eignet sich zur Durchführung von Profilmessfahrten am besten eine austauscharme Wetterlage, bei der es wolkenarm und windschwach ( $< 2,5$  m/s) ist und nur eine geringe Durchmischung der bodennahen Luftschicht vorherrscht. Solche Bedingungen stellen sich in der Regel unter Hochdruckeinfluss ein (siehe Kapitel 6.2: Typische Wetterlage als Antrieb für die Modellrechnungen). Dieser sorgt im Sommer für sogenanntes Strahlungswetter mit hoher Sonneneinstrahlung bei Tag und starker Ausstrahlung bei Nacht. Infolgedessen können thermische Unterschiede innerhalb des Stadtgebietes besonders gut erfasst werden.

Bei solch einer geeigneten Wetterlage wurden in Bonn am 03.07.2018, 4 Fahrten zu je einer Stunde Fahrtdauer zwischen 15 UTC und 22:30 UTC durchgeführt. Hiervon war die Sonnenuntergangsfahrt von großem Interesse, weil sich mit Rückgang der Thermik die größten Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Streckenabschnitten einstellen. Diese thermische Variabilität wird in erster Linie durch das unterschiedliche Absorptions- und Reflexionsvermögen der verschiedenen Böden hervorgerufen.

Weitere Messfahrten wurden bei einer vergleichbaren austauscharmen Hochdruckwetterlage am 12.09.2018 von den frühen Morgenstunden bis in den Vormittag hinein unternommen (4 Fahrten zwischen 04 UTC und 11 UTC). Diesmal wurde, wegen der größeren Temperaturunterschiede entlang der Strecke am frühen Morgen, die Fahrt vor Sonnenaufgang zur Auswertung vorgenommen, also bevor eine größere Durchmischung der Luft stattfindet.

## Profilmessfahrtroute in Bonn

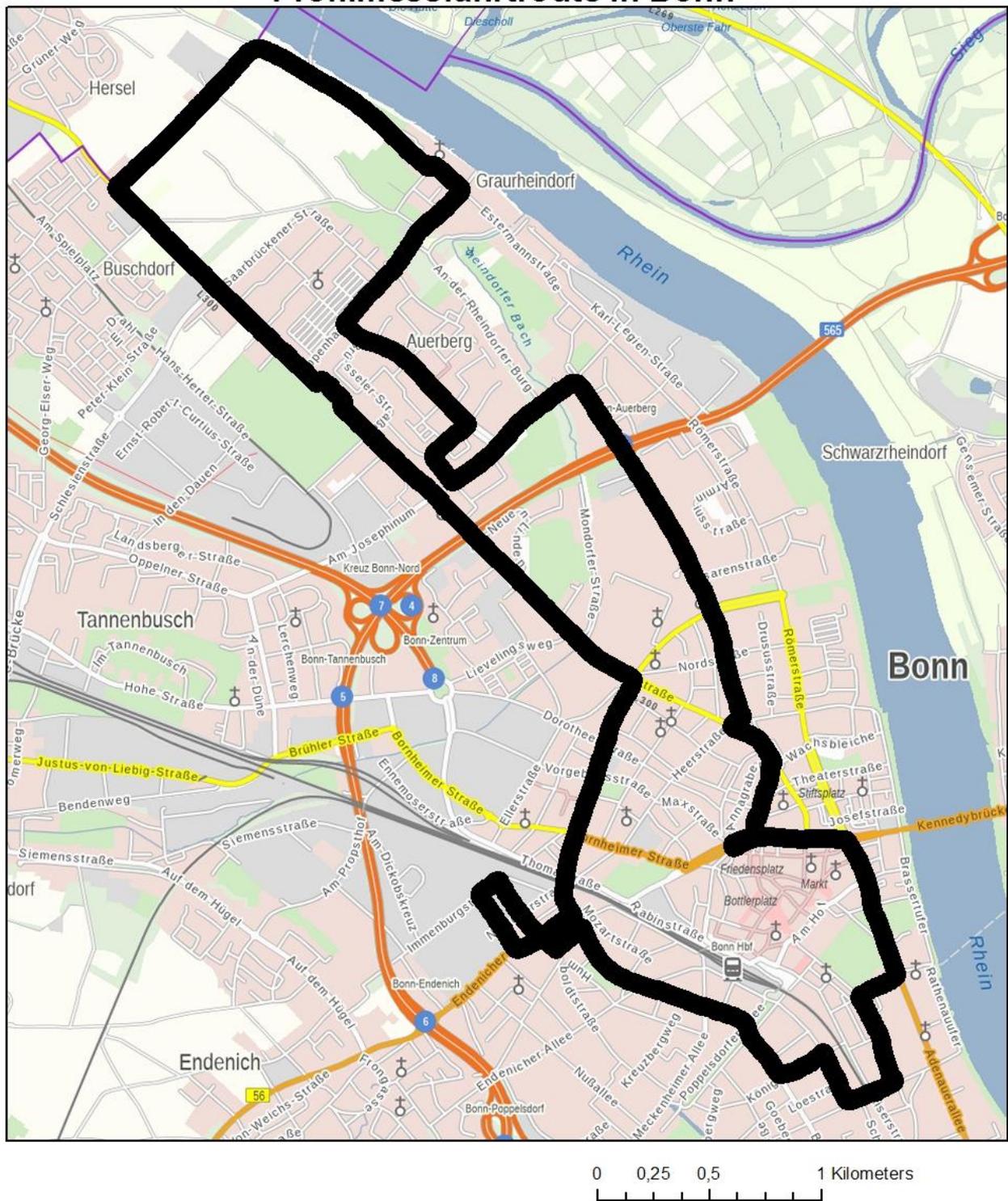


Abbildung 12: Route der ca. einstündigen Profilmessfahrten durch Bonn (dicke schwarze Linie).

Die Messroute wurde so gewählt, dass sie bei geringem Verkehrsaufkommen (am frühen Morgen und am späten Abend) innerhalb einer Stunde gut durchfahrbar ist. Außerdem sollten zumindest einige der Untersuchungsgebiete für die Modellsimulation (siehe Kapitel 6.3) stellenweise tangiert oder gekreuzt werden. Dies war für die Ge-

biete „Auerberg“, „Innenstadt Nord“, „Innenstadt Süd“ und „Karlstraße“ der Fall. Außerdem führte die Messroute in der Nähe der temporären Messstationen „Wilhelmstraße“, „Königstraße“ und „Karlstraße“ vorbei (siehe Abbildung 24).

Die Auswertung der Profilmessfahrten erfolgt in Kapitel 4.4.4.

#### **4.4 Auswertung und Interpretation der Messergebnisse**

Die Daten der temporären Messstationen, die an klimatologisch oder städtebaulich interessanten Standorten vom 24.08.2016 bis 31.10.2016 aufgenommen wurden, werden in diesem Kapitel ausgewertet. Die Monatsmittel und Zeitreihen von Temperatur, Strahlung und relativer Feuchte von September 2016 werden mit dem langjährigen Mittel über einen 30-jährigen Zeitraum (1981 bis 2010) verglichen. Außerdem werden, nach einer innerhalb des Deutschen Wetterdienstes entwickelten Methode, Episoden von windschwachen Strahlungsnächten und den dazugehörigen Tagen ermittelt. Die verwendeten Kriterien für windschwache Strahlungsnächte sind eine Höchstgeschwindigkeit des Windes von 2,7 m/s in 10 m über Grund bei gleichzeitig geringer Bewölkung (Bedeckungsgrad höchstens 4 Achtel) während mehrerer Nachtstunden. Die Auswertung dieser Episoden trägt zum besseren Verständnis der unterschiedlichen Situation bei wärmebelastenden Wetterlagen bei.

Anschließend werden die Tagesgänge der Temperatur und relativen Feuchtigkeit von diesen Episoden mit hoher Einstrahlung an den temporären Messstationen mit den von MUKLIMO\_3 berechneten Tagesgängen für eine sommerliche Strahlungswetterlage verglichen. Dabei wird für die jeweiligen Untersuchungsareale ein über alle Gitterpunkte gemittelter Tagesgang gebildet um eine möglichst repräsentative Datenbasis zur Beurteilung der Modellgüte zu erhalten.

Anhand der Messwerte der temporären Stationen (siehe Kapitel 4.4.3) wird die Wärmebelastung auf Basis der gefühlten Temperatur berechnet. Diese Größe beruht auf einem Wärmehaushaltsmodell des Menschen, dem sogenannten Klima-Michel-Modell (für den DWD entwickelt und fortgeschrieben von JENDRITZKY (1990), sowie in den Folgejahren weiter aktualisiert (STAIGER et al. 2012)). Sie ermöglicht eine gesundheitsrelevante Bewertung der thermischen Belastung in der Stadt.

##### **4.4.1 Einordnung des Septembers 2016 im Vergleich zum Klimamittel**

Im September 2016 sorgte Hochdruckeinfluss dafür, dass der erste klimatologische Herbstmonat im Jahr 2016 einer der wärmsten, trockensten und sonnigsten September seit Beginn der Aufzeichnungen war. Deswegen eignet sich dieser Monat, obwohl er dem meteorologischen Herbst angehört, zur Untersuchung des städtischen Wärmeineffekts. Der gemittelte Tagesgang der Temperatur des Septembers 2016 lag deutlich über dem über mehrere Jahre gemittelten Tagesgang für den Monat September der Jahre 2001 bis 2016, sowohl für die Messstation Bonn-Röhlberg (siehe Abbildung 13), als auch für die Station Flughafen Köln-Bonn (siehe Abbildung 14). Dabei gab es im September 2016 nicht nur absolut höhere Temperaturwerte, sondern an beiden Messstationen auch eine stärker ausgeprägte Temperaturamplitude im Vergleich zum

langjährigen Temperaturmonatsmittel. So betrug die Temperaturdifferenz zwischen diesen beiden Kurven am Nachmittag, zwischen 12:00 UTC und 16:00 UTC, mehr als 4 K. Am Morgen, zur Zeit des Temperaturminimums lag dieser Unterschied bei ca. 2 K.

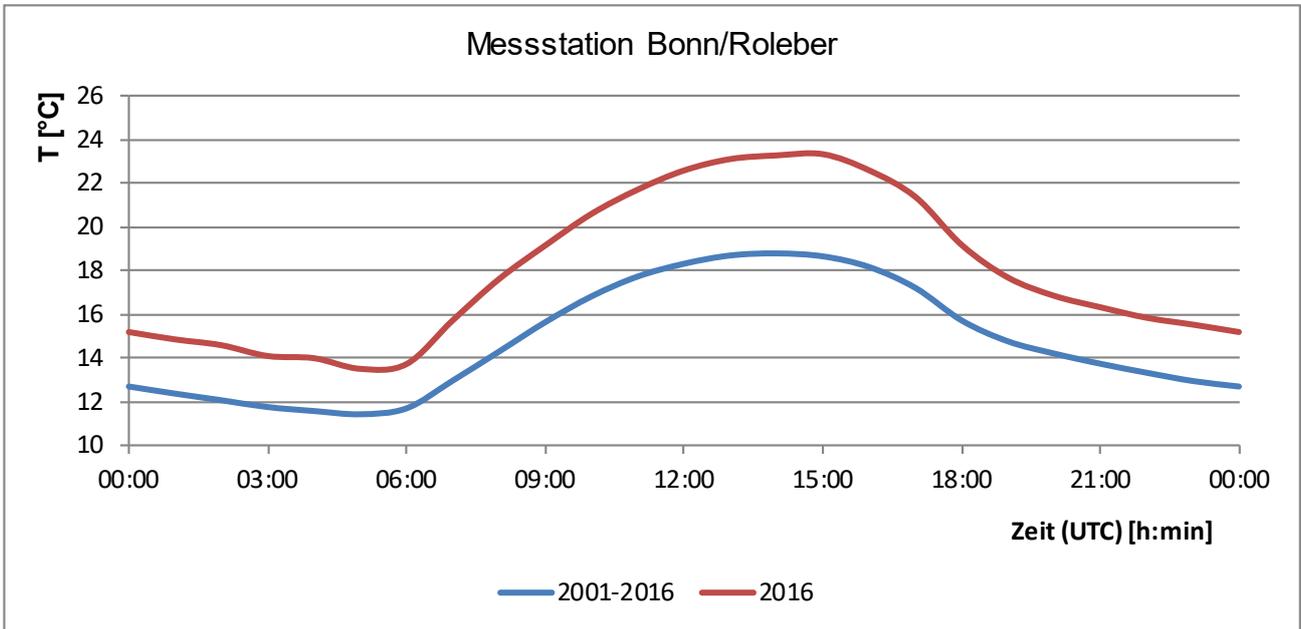


Abbildung 13: Temperaturtagesgang September 2016 in 2 m über Grund (rote Linie) im Vergleich zum Durchschnittsseptember (2001-2016, blaue Linie) für die Station Bonn-Roleber.

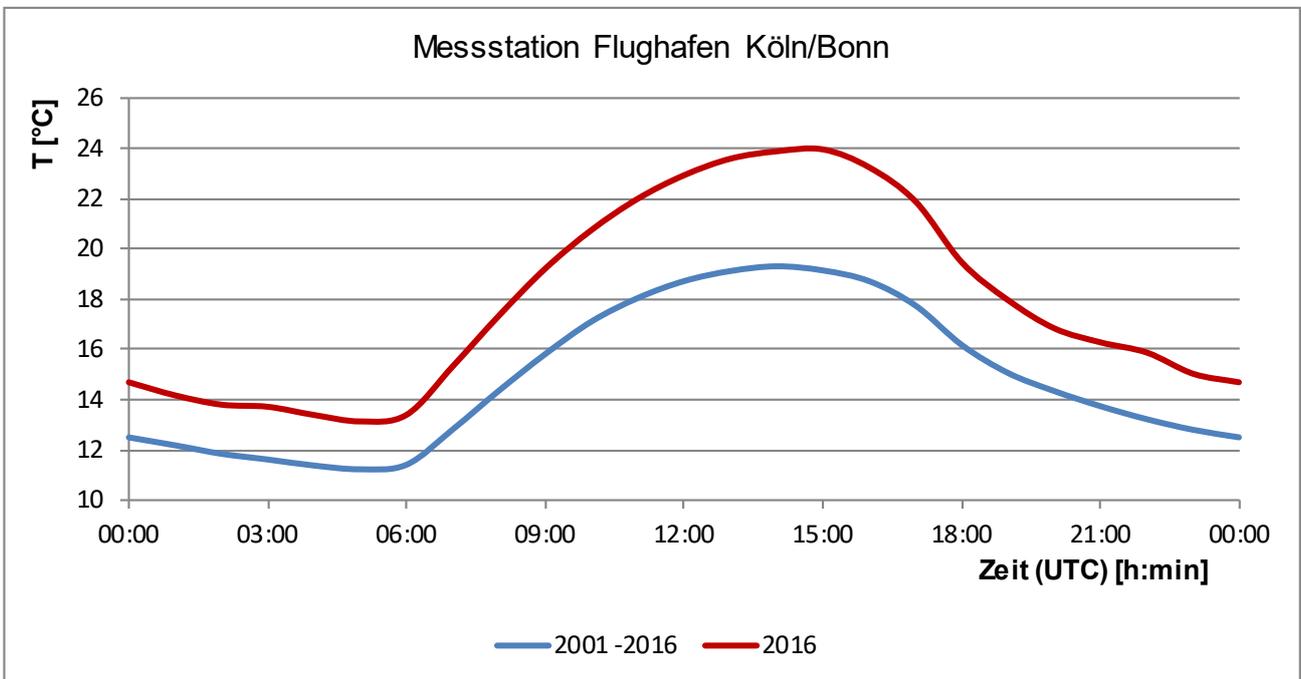


Abbildung 14: Temperaturtagesgang September 2016 in 2 m über Grund (rote Linie) im Vergleich zum Durchschnittsseptember (2001-2016, blaue Linie) für die Station Flughafen Köln-Bonn.

Betrachtet man die Niederschläge im September 2016 in der Stadt Bonn im Vergleich zum langjährigen Monatsmittel aller September (rund 70 mm Niederschlag für die Septembermonate im Zeitraum 1981-2010), fiel der September 2016 deutlich zu trocken aus. Die gemessenen Niederschläge an den temporären und stationären Stationen in Bonn lagen im Schnitt bei nur rund 23 % des „normalen“ Monatsniederschlags, und zwar je nach Station zwischen 13,6 mm und 19,0 mm.

Je nach Wetterlage fallen Niederschläge örtlich recht unterschiedlich aus. Auf Grund der geringen gemessenen Niederschlagsmengen und des kurzen Messzeitraums sind Unterschiede zwischen Niederschlagsmessungen an den jeweiligen Stationen wenig aussagekräftig und werden in dieser Untersuchung nicht weiter analysiert.

Die Sonne hat im Westen Deutschlands fast flächendeckend 200 bis 220 Stunden geschienen, das bedeutet vielfach rund ein Drittel bis 50 % mehr als im vieljährigen Monatsdurchschnitt. Damit gehört der September 2016 zu den drei sonnenreichsten Septembermonaten seit 1951.

Der Messzeitraum (September 2016) gestaltete sich, auf Grund der Dominanz von Hochdruckeinfluss, überwiegend schwachwindig mit Windgeschwindigkeiten unter 1,5 m/s sowohl im 2 m-, als auch im 10 m- Niveau. So war die Windrichtungsverteilung im Wesentlichen stark durch die Orographie beeinflusst.

Regional spielen dabei das Rheintal und die umgebenden Höhenzüge im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes die Hauptrolle. Kleinräumig können auch Straßenzüge und Bahntrassen einen Einfluss haben.

Bei den, auf Grund der Kürze des Zeitraums, nicht repräsentativen Windmessungen dominierte an der Innenstadtstation „Wilhelmstraße“ die Windrichtung Südwest mit 30 % der Fälle, am seltensten waren die nördlichen Richtungen mit weniger als 7 % der Fälle vertreten. Es ist davon auszugehen, dass zum Teil die Ausrichtung der Straße eine Leitwirkung einnimmt.

In der „Karlstraße“ wurden für die Mehrheit der Fälle, zwischen 65 % und 70 %, Windrichtungen im Sektor zwischen Südost und Südwest im 2m-Niveau registriert, wobei die Windrichtung zwischen Süd und Südwest überwog. Entsprechend laufen die Straßenachsen von Südwesten und Südosten auf die Messstation zu. In 10 m Höhe wehte der Wind überwiegend, in über 30 % der Fälle, aus Südost. Dies entspricht der Hauptwindrichtung bei Schwachwindlagen im Rheintal. Auch im amtlichen Gutachten über das Stadtklima von Bonn (OTTE et al. 1990) wurde, in den in Rheinnähe über einen Zeitraum von 2 Jahren betriebenen Stationen „Mehlem“, „Friesdorf“, „Regierungsviertel“ und „Zentrum“, Südost als Hauptwindrichtung bei Schwachwind beobachtet.

Für die Station „Nelly-Sachs-Weg“ in Vilich-Müldorf ist bei Schwachwind keine vorherrschende Windrichtung erkennbar. Dort spielt, neben lokaler Bebauung und Bewuchs, unterschiedlicher orographischer Einfluss eine Rolle. Drei bis vier Kilometer westlich liegt der Rhein; in unmittelbarer Nähe im Norden fließt der Mühlenbach und noch etwas weiter nördlich befindet sich das Siegtal; einige Kilometer weiter südlich beginnen die Ausläufer des Siebengebirges. Durch diese vielseitige landschaftliche

Prägung wird die Strömungsrichtung beeinflusst. So ist vorstellbar, dass keine eindeutige Präferenz der Windrichtung vorlag. Ein ähnliches Ergebnis für die Auswertung der Windrichtung bei Schwachwind lieferte die nahegelegene Station „Bechlinghoven“ in dem bereits erwähnten amtlichen Gutachten über das Stadtklima von Bonn (OTTE et al. 1990).

#### 4.4.2 Vergleich des Tagesganges der Temperatur

Der gemittelte Temperaturtagesgang zeigt gut den Unterschied zwischen den einzelnen Messstationen (Abbildung 15).

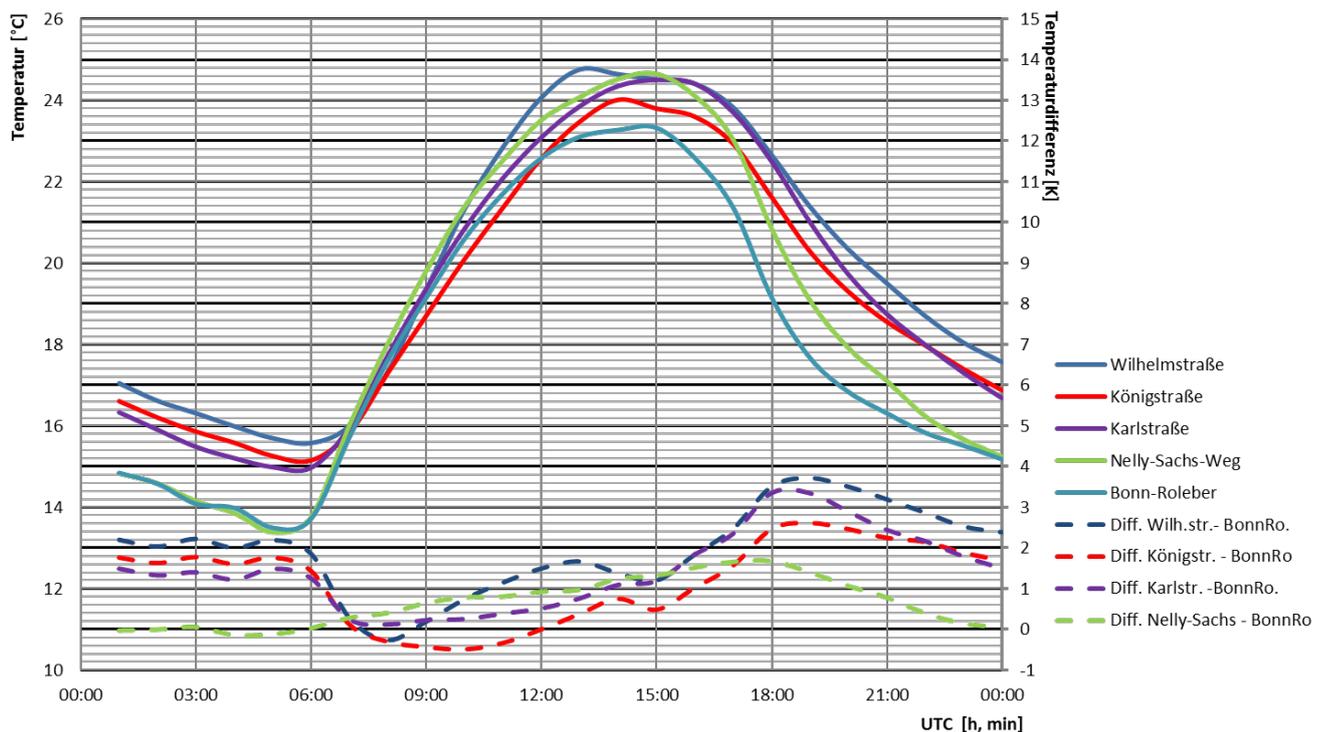


Abbildung 15: Mittlerer Tagesgang der 2 m Temperatur an den 4 temporären Messstationen in Bonn und der stationären DWD-Messstation in Bonn-Roleber (hellblaue Linie) im September 2016 (Bezug: linke Ordinate), sowie die Differenzen zwischen den jeweiligen temporären Temperaturmessungen und den zeitlich entsprechenden Temperaturwerten von Bonn-Roleber (gestrichelte Linien, Bezug: rechte Ordinate).

Die Temperaturkurve von Bonn-Roleber im östlichen Randbereich von Bonn (hellblaue Kurve), zeigt den typischen Verlauf einer Station außerhalb der Stadt mit verhältnismäßig niedrigen Werten während der Nachtstunden, ca. 2 Kelvin niedriger als die Innenstadtstationen „Wilhelmstraße“ und „Königstraße“. Direkt nach Sonnenaufgang geht die Temperaturkurve steil nach oben, erreicht aber auch während des Tages geringere Tageshöchstwerte im Vergleich zu den übrigen Stationen. Das lässt sich zum großen Teil durch die Lage auf einer Hochebene auf 159 m Höhe und damit ca. 100 m höher als die städtischen Stationen erklären. Zusätzlich kann der nahe gelegene, ca. 150 m westlich angrenzende Wald thermisch begünstigend wirken.

Die grüne Kurve (Nelly-Sachs-Weg) repräsentiert den Tagesgang einer Stadtrandstation mit stärkerer nächtlicher Abkühlung verglichen mit den 3 übrigen städtischer gelegenen temporären Stationen und einem ähnlichen Temperaturverlauf, während der Stunden vor Sonnenaufgang, wie bei der bereits erwähnten langjährigen Referenzstation Bonn-Roleber.

Direkt nach Sonnenaufgang erfolgt auch am Nelly-Sachs-Weg ein steiler Temperaturanstieg, sowie nach Sonnenuntergang ein unmittelbarer Temperaturabfall. Das ist der typische Temperaturverlauf für eine, einige Kilometer vom Stadtzentrum entfernt gelegene, Station. Mit zunehmender Entfernung vom Zentrum nimmt die Gebäudedichte ab. Die geringere Gebäudemasse führt dazu, dass weniger Wärme am Tag gespeichert und in den Abendstunden abgegeben wird. Die Luft kühlt somit im Umland stärker ab als in der Stadt.

Der September 2016 hatte, wie auf Abbildung 13 und Abbildung 14 ersichtlich, eine deutlich größere Tagesamplitude als ein Durchschnittsseptember. Folglich gab es verhältnismäßig viele Tage mit hoher Strahlungsintensität. Wie schon in vorangegangenen Untersuchungen, z. B. für Köln (siehe LANUV 2013), bestätigte sich auch bei dieser Messepisode, dass zur Zeit der Tagesmaxima, die Temperaturwerte der unterschiedlichen temporären Stationen aufgrund der starken turbulenten Durchmischung nur geringfügig voneinander abweichen.

Die dunkelblaue Kurve (Station Wilhelmstraße) gibt den Temperaturverlauf für eine typische Innenstadtstation wieder. Sie verzeichnet von den 4 temporären Stationen die höchsten nächtlichen Temperaturwerte und erreicht nach einem starken Temperaturanstieg in den Morgenstunden schon in der Mittagszeit ein Temperaturmaximum. Ein weiterer Temperaturanstieg im Verlauf des Nachmittags tritt an der Station „Wilhelmstraße“ wegen Abschattung durch umgebende Gebäude nicht auf.

Einen relativ ähnlichen Verlauf der Temperaturkurve (siehe Abbildung 15, rote Linie) zeigt die Messstation „Königstraße“, die, wie oben beschrieben, auch in der Innenstadt gelegen ist. In der Nacht liegt die Temperatur, durch das Aufheizen der umgebenden Gebäude, nur geringfügig niedriger als bei der Messstation „Wilhelmstraße“. Allerdings verläuft der Temperaturanstieg nach Sonnenaufgang flacher als bei der „Wilhelmstraße“. Das ist teilweise durch die Nähe der hohen Bäume auf dem Hinterhofareal begründet. Außerdem lässt sich dies durch die nahegelegene Bahntrasse erklären, die die Luftzufuhr von einer etwas weiter südöstlich gelegenen Kleingartenanlage sowie von der Grünanlage um einen Sportpark begünstigt. Ebenso regulierend wirkt die Begrünung entlang der Trasse. Außerdem kann der morgendliche Temperaturanstieg an Innenstadtstationen durch Gebäudeschatten verzögert erfolgen. Genau wie beim Temperaturverlauf bei der Station „Wilhelmstraße“ wird das Maximum am frühen Nachmittag abgekappt. Wenn die Sonne Richtung Südwest dreht, sorgen jeweils hohe Gebäude für Abschattung. Das erklärt den relativ abrupten Temperaturrückgang zwischen 13:00 Uhr und 14:00 Uhr.

Der Messstandort „Karlstraße“ repräsentiert die Lage in einem Industriegebiet. Während des Messzeitraums befand sich die Messstation auf einer großzügigen Freifläche, die nicht asphaltiert, sondern mit Schotter bedeckt war, innerhalb der industriellen Bebauung. Die dazugehörige Temperaturkurve (siehe Abbildung 15, lila Kurve) zeigt

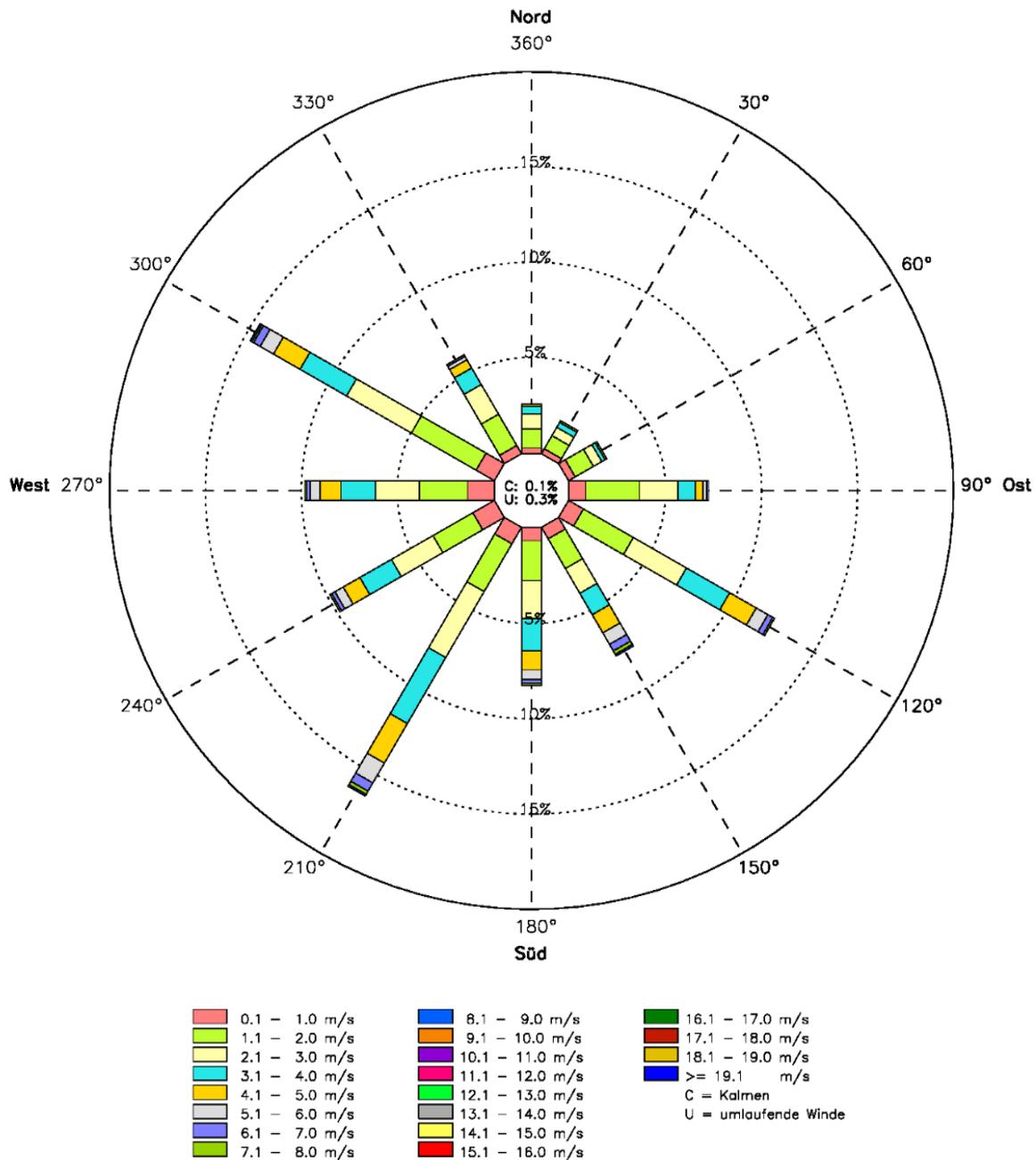
in den Nachtstunden, gegenüber den in der Innenstadt gelegenen Stationen „Wilhelmstraße“ (Differenz etwas mehr als 0,5 Kelvin) und „Königstraße“ (Differenz etwas weniger als 0,5 Kelvin), geringfügig niedrigere Temperaturwerte. Ein anzunehmender Grund dafür ist die etwas offenere Messfeldlage und auch die verhältnismäßig nahe Peripherie mit Grünflächen und Feldern in Eendenich und Dransdorf. Aufgrund der tagsüber unbehindert erfolgenden Einstrahlung zeigen die Temperaturkurven der Stationen „Karlstraße“ und Nelly-Sachs-Weg“ zwischen 9 Uhr und 16 Uhr einen glatteren Verlauf als die Innenstadtstationen.

Die gestrichelten Linien der Temperaturdifferenzen zwischen den temporären Messstationen und der ländlich gelegenen festen Station Bonn-Roleber als Referenzstation (siehe Abbildung 15) zeigen deutliche Unterschiede der drei städtisch gelegenen Stationen (Wilhelmstraße, Königstraße und mit Einschränkung Karlstraße) in der Zeit zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang. Die größten Differenzbeträge, zwischen 2,6 Kelvin und 3,8 Kelvin gibt es am Abend nach 18 UTC, was der Sonnenuntergangszeit im September in Bonn entspricht. Im Einzelfall konnten, anhand der Tagestemperaturkurven innerhalb dieses Zeitraums, Temperaturunterschiede über 5 Kelvin zwischen Innenstadt und Außenbezirk registriert werden. Qualitativ ähnliche Ergebnisse mit höchsten Temperaturunterschieden zwischen Stadt und Stadtrand zur Sonnenuntergangszeit ergaben sich auch bei den Messungen für das Projekt „Klimawandelgerechte Metropole Köln“ (siehe LANUV 2013). Die am Stadtrand gelegene Station „Nelly-Sachs-Weg“ weist in den Nachtstunden zwischen 0 und 6 Uhr keine Differenz gegenüber der Station Bonn-Roleber auf. Während des Tages differieren die Werte, wie bereits erwähnt, zumindest zum Teil auf Grund der Lage von Bonn-Roleber auf einer Hochebene.

# Stärkewindrose

in Prozent der Jahresstunden

Station: Bonn-Roleber (2229)  
Zeitraum: 01/1987 - 12/2016



Die Länge der einzelnen Farbstufen entspricht der prozentualen Häufigkeit, mit der die jeweilige Windgeschwindigkeit aus der angegebenen Windrichtung auftritt.

Abbildung 16: Stärkewindrose der Station Bonn-Roleber in 10 m über Grund für die Jahre 1987 bis 2016.

Im September 2016 gab es wegen häufig vorgekommener Hochdruckwetterlagen mehrere Episoden von sogenannten windschwachen Strahlungs Nächten (WSSN) und den dazugehörigen Tagen, die auf Grund entsprechender vom Deutschen Wetterdienst entwickelten Kriterien ermittelt wurden. Verständlicherweise ist der Tagesgang (Differenz zwischen Temperaturmaximum und Temperaturminimum) deutlich größer an Tagen mit WSSN (gemittelt für die „Wilhelmstraße“ 11,3 Kelvin und für den „Nelly-Sachs-Weg“ 14,1 Kelvin) (siehe Abbildung 17), als an Tagen, wo die entsprechenden Kriterien nicht erfüllt wurden (gemittelt für die „Wilhelmstraße“ 6,6 Kelvin und für den „Nelly-Sachs-Weg“ 7,7 Kelvin) (s. Abbildung 18).

Beim Vergleich der Werte mit WSSN (siehe Abbildung 17) und ohne WSSN (siehe Abbildung 18) für die Innenstadtstation „Wilhelmstraße“ und die Stadtrandstation „Nelly-Sachs-Weg“ fällt insbesondere die größere Temperaturdifferenz bei den Minima auf. Für WSSN Tage beträgt der Unterschied im Mittel 2,8 Kelvin, für die übrigen Tage 1,3 Kelvin.

Es ist davon auszugehen, dass dieser thermische Unterschied zwischen Stadt und Stadtrand mit entsprechend geringerer nächtlicher Abkühlung in der Stadt an heißen Hochsommertagen noch stärker ausfällt, weil den Gebäuden dann ein längerer Zeitraum zum Aufheizen zur Verfügung steht.

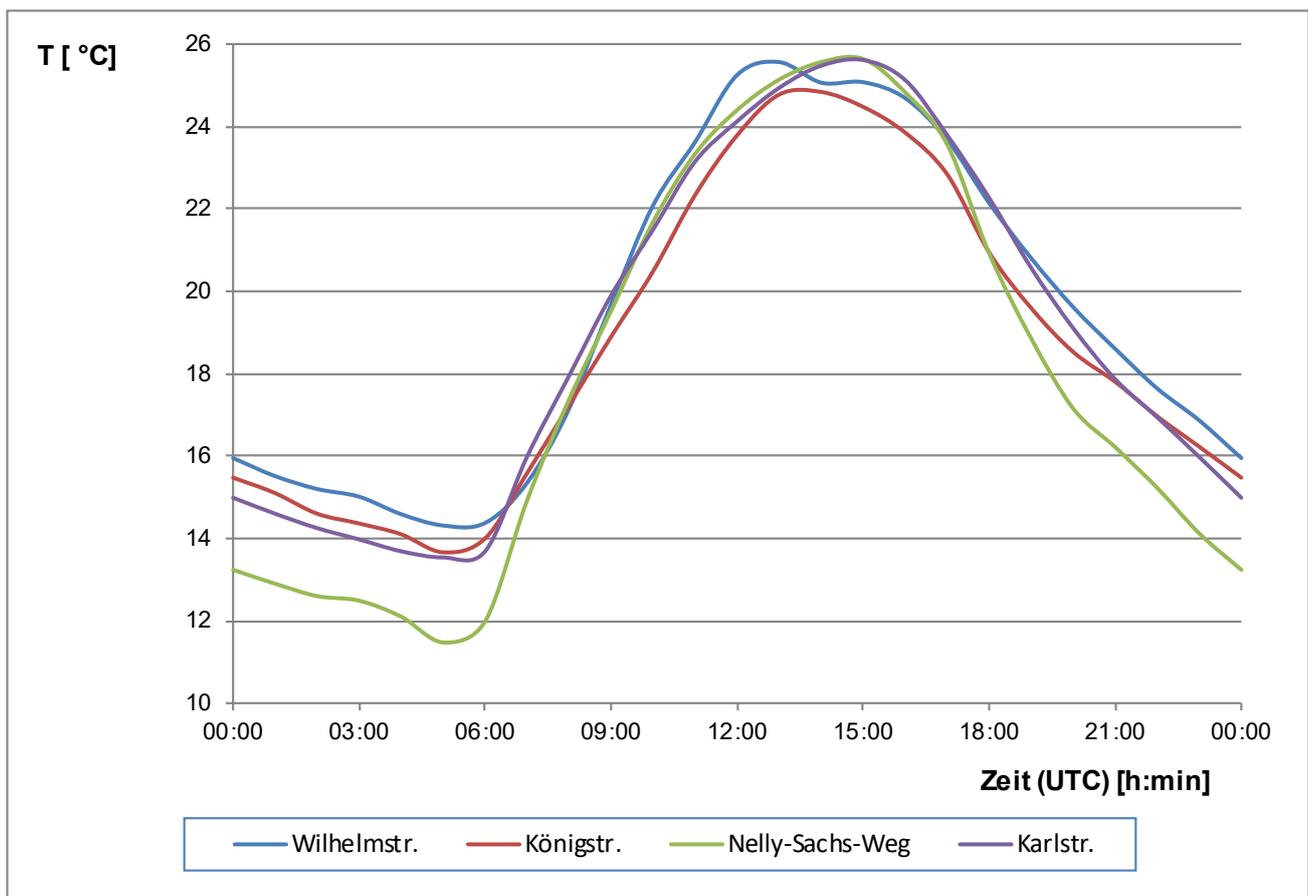


Abbildung 17: Mittlerer Tagesgang der 2 m Temperatur an den temporären Messstationen für Tage mit windschwachen Strahlungs Nächten im September 2016.

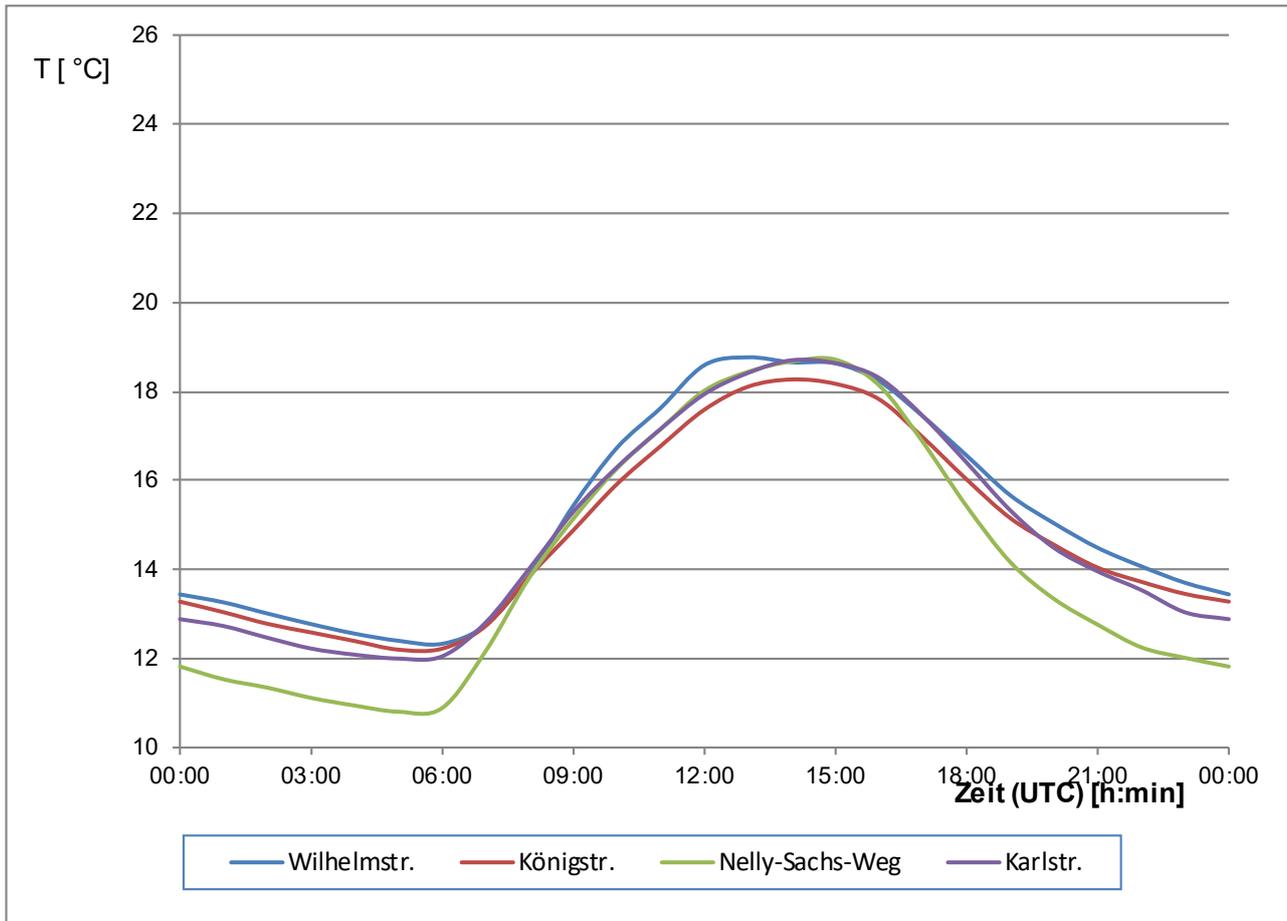


Abbildung 18: Mittlerer Tagesgang der 2 m Temperatur an den temporären Messstationen für Tage ohne windschwache Strahlungsnächte im September 2016.

#### 4.4.3 Vergleich des Tagesganges der gefühlten Temperatur

Die Lufttemperatur eignet sich nur eingeschränkt zur Beschreibung und Bewertung der thermischen Umwelt mit ihren Auswirkungen auf das (thermische) Wohlbefinden des Menschen. Zur Bewertung, ob und bei welcher meteorologischen Situation die Stadtbewohner einer Wärmebelastung und Gefährdung der Gesundheit ausgesetzt sind, werden nach derzeitigem Stand der Wissenschaft Energiebilanzmodelle des Menschen unter Einbeziehung relevanter Mechanismen des Wärmeaustausches verwendet.

„Hohe Temperaturen bei gleichzeitig hoher Luftfeuchtigkeit können zu einer Wärmebelastung und damit zu Hitzestress führen, da der Schweiß nicht ausreichend verdunstet und die fehlende Abkühlung zu einer Erhöhung der menschlichen Kerntemperatur führen kann“ (LANUV 2013).

Vom Deutschen Wetterdienst wird zur Bewertung der Wärmebelastung das Klima-Michel-Modell angewandt und die gefühlte Temperatur (GT) berechnet. Als Eingabedaten sind Angaben zur Lage des Ortes und Werte der Temperatur, der mittleren Strahlungstemperatur, der Windgeschwindigkeit und der relativen Luftfeuchte notwendig.

Die innerstädtischen Stationen „Wilhelmstraße“ und „Karlstraße“ weisen in der Regel eine geringere relative Feuchtigkeit auf als die am Stadtrand gelegenen Stationen, wie der „Nelly-Sachs-Weg“ (siehe Abbildung 19). Dies ist allerdings primär der Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte von der Lufttemperatur geschuldet. Auch die Windgeschwindigkeit ist auf Grund der Umfeldraugigkeit im innerstädtischen Bereich meist niedriger (siehe Abbildung 20). Die Messstation „Karlstraße“ bildet, trotz der Lage im städtischen industriell geprägten Bereich, eine Ausnahme, weil um die Station eine sehr große Freifläche existiert.

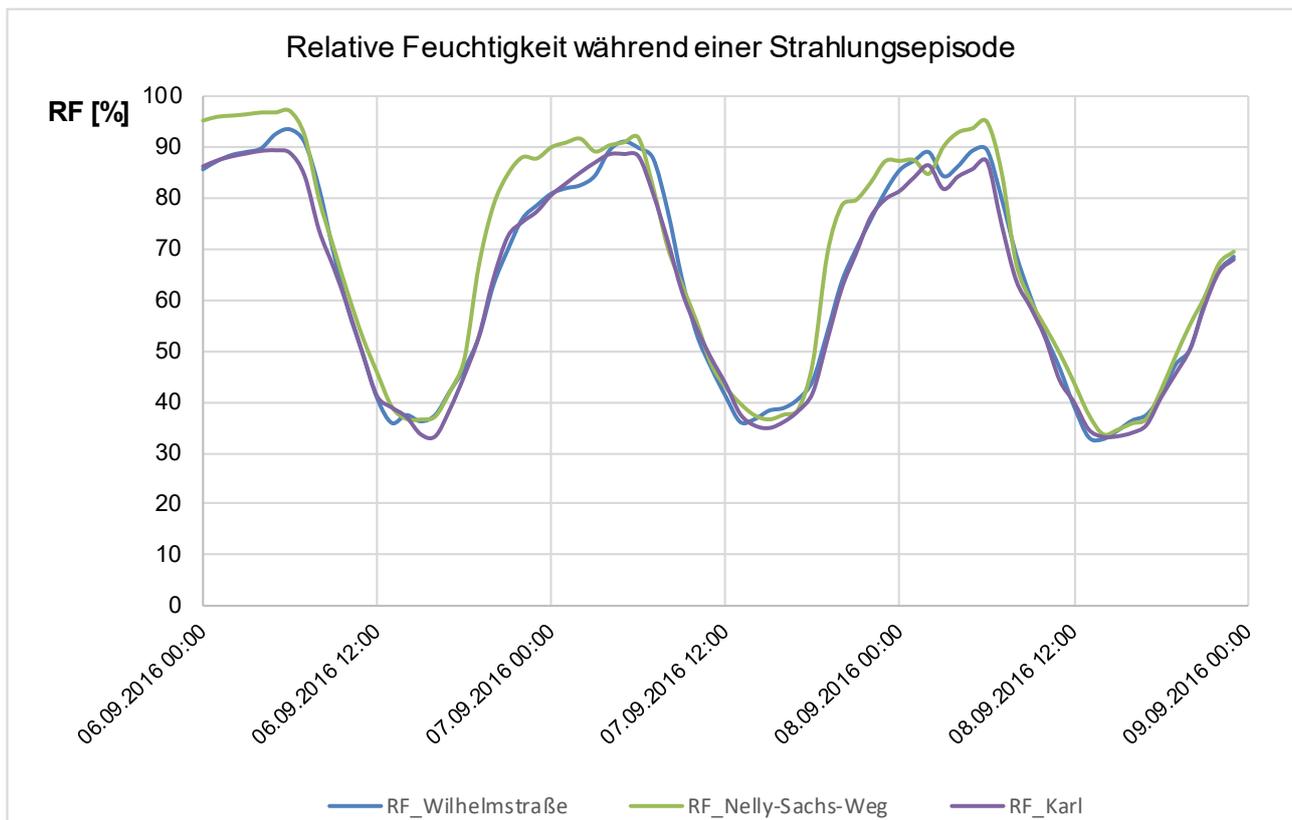


Abbildung 19: Verlaufskurve der relativen Luftfeuchte in 2 m über Grund (in %) während einer Strahlungswetterepisode im September 2016 (06.09.2016 bis 08.09.2016).

Innerhalb des ausgewählten Zeitraums mit einer Reihung von Strahlungstagen mit großer Tagestemperaturamplitude und windschwachen Strahlungsnächten lagen die Temperaturmaxima der temporären Messtationen „Wilhelmstraße“ (Innenstadt) und „Nelly-Sachs-Weg“ (Stadtrandlage) bei ähnlichen Temperaturwerten, wobei es sukzessive wärmer wurde. Am 06.09.2016 wurden ca. 26 °C registriert, am 07.09.2016 ca. 27 °C und am 08.09.2016 erreichten die Temperaturmaxima Werte knapp unter 30 °C (siehe Abbildung 21).

Die Werte der gefühlten Temperatur (GT) wiesen auch während des Tages etwas größere Temperaturunterschiede zwischen den Stationen auf. Nach dem morgendlichen Anstieg der gefühlten Temperatur auf ein deutlich höheres Temperaturniveau von über 30 °C, am 08.09.2016 zum Teil sogar über 35 °C, konnte eine Temperaturdifferenz von 1 Kelvin, zum Teil sogar 2 Kelvin zwischen „Wilhelmstraße“ (Innenstadt) und „Nelly-

Sachs-Weg“ (Stadtrandlage) ermittelt werden. Bezüglich des Schwellwerts von  $GT = 32 \text{ }^\circ\text{C}$  bedeutet der unterschiedliche Verlauf der GT Werte, dass Menschen, die in der Innenstadt leben oder arbeiten an einem Tag, wie dem 08.09.2016, über zwei Stunden länger starker Wärmebelastung ausgesetzt sind, als Menschen, die sich in am Stadtrand in lockerer Bebauung aufhalten können.

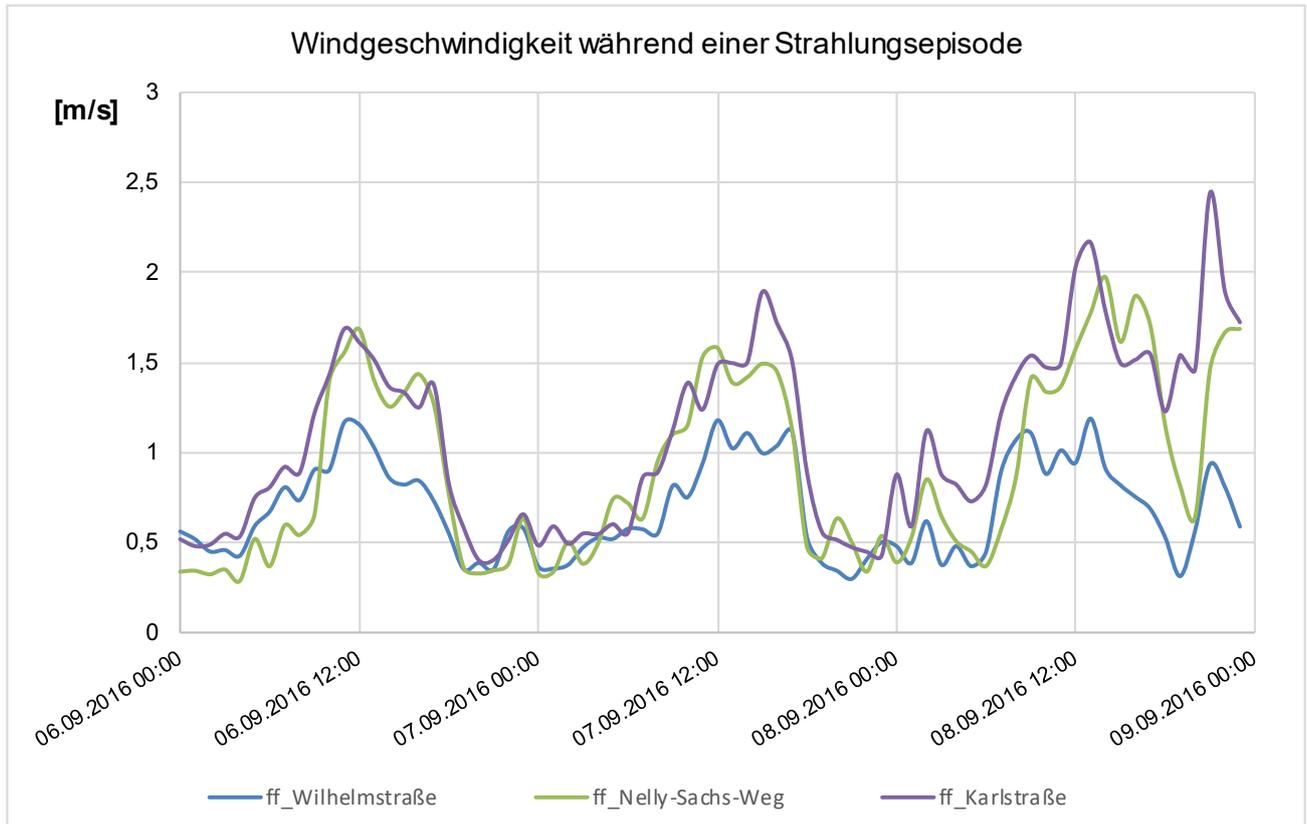


Abbildung 20: Verlaufskurve der Windgeschwindigkeit in 2 m über Grund in m/s während einer Strahlungsepisode im September 2016 (06.09.2016 bis 08.09.2016).

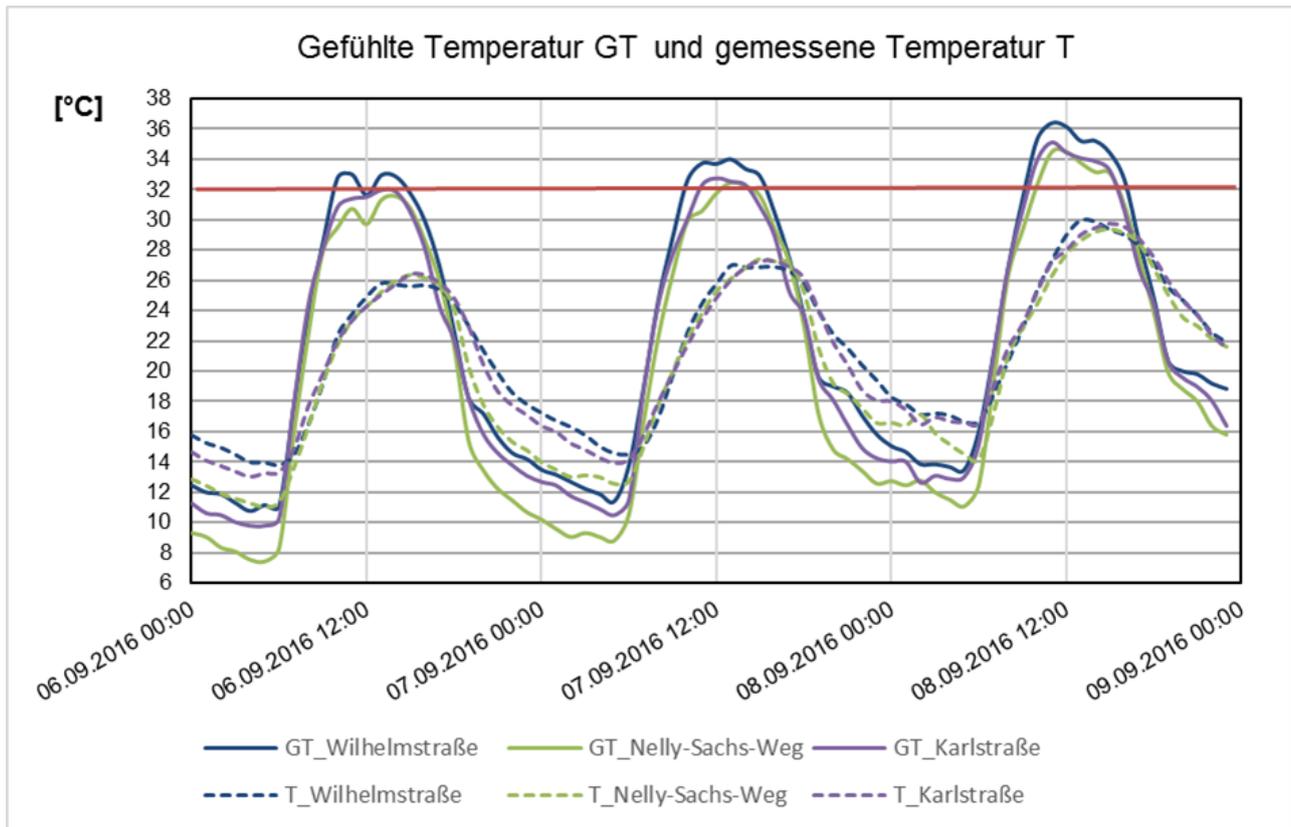


Abbildung 21: Verlauf der gefühlten Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) (durchgezogene Linien), die mit dem Klima-Michel-Modell berechnet wurde, und der gemessenen Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) (gestrichelte Linien) in 2 m über Grund; Schwellwert für eine starke Wärmebelastung: Gefühlte Temperatur =  $32^{\circ}\text{C}$  (rote Linie).

#### 4.4.4 Auswertung der Profilmessfahrten

Die Methodik und Planung der Profilmessfahrten ist in Kapitel 4.3 beschrieben. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Messfahrten näher beschrieben werden.

Die Sonnenuntergangsfahrt am 03. Juli 2018, 21:29 – 22:18 UTC wies entlang der gesamten Messstrecke einen Temperaturunterschied von ca. 6 Kelvin auf (siehe Abbildung 22). Dabei lag der kälteste Streckenabschnitt erwartungsgemäß außerhalb der Bebauung im Norden von Bonn auf einem Feldweg von Buschdorf Richtung Rhein. Dort wurden Temperaturwerte zwischen  $19,3$  und  $21,8^{\circ}\text{C}$  registriert. Vergleichbar niedrige Werte, meist sogar unter  $20^{\circ}\text{C}$  wurden auf dem Milchgasserweg, der weniger als 100 m vom Rhein entfernt, parallel dazu verläuft, gemessen. Dieser Weg führt zur einen Seite an Feldern vorbei und wird zur anderen Seite von einem Wiesengelände mit Büschen und Bäumen begrenzt. Im Bereich der Bebauung von Graurheindorf lag die Temperatur über 2 Kelvin höher, bei Werten um  $22^{\circ}\text{C}$  (siehe Abbildung 22).

Auch der Streckenabschnitt zwischen Graurheindorf und Auerberg zeigt deutliche Temperaturunterschiede zwischen bebautem Terrain und nicht bebautem Gebiet. Bei der Überquerung des Tales vom Rheindorfer Bach sinkt die Temperatur erneut unter  $21^{\circ}\text{C}$ . Auerberg weist eine leichte Inhomogenität der Bebauung auf, wobei überwie-

gend Mehrfamilien- und Reihenhausbauung, aber auch Doppelhaus- und Zeilenbauung, sowie zum Teil eine offene Bauweise mit Einfamilienhäusern, zu finden ist. Im zentralen Bereich von Auerberg (in Nähe der Haltestelle Auerberg Mitte) an der Pariser Straße herrscht geschlossene Blockrandbebauung vor. Folglich wurden auf den Streckenabschnitten in diesem Bereich, höhere Temperaturwerte von über 23,5 °C, aufgenommen.

Die höchsten Temperaturen der Messfahrt nach Sonnenuntergang liegen über 24,5 °C, teilweise über 25 °C. Dieses ca. 1 km lange Stück entlang der Messroute weist in Abbildung 22 Temperaturen im roten Bereich der Farbskala auf und befindet sich im zentralen Bereich der Innenstadt, westlich von der Kennedybrücke. In der dort vorherrschenden geschlossenen Blockrandbebauung wird die durch Einstrahlung erzeugte Wärme gut gespeichert. Die relativ hohen Temperaturwerte entlang dieser Bauung sind vergleichbar mit den Temperaturwerten von der temporären Messstation „Wilhelmstraße“ (auf Abbildung 22 durch grünen Punkt in der Nähe der Messroute in der zentralen Innenstadt gekennzeichnet). Die temporäre Messstation „Wilhelmstraße“ wies mit einem Mittel von 19,6 °C im September 2016, an vergleichbaren Tagen mit Strahlungswetter, nach Sonnenuntergang um 20 UTC (entspricht 22 Uhr MESZ) einen höheren Temperaturwert als die beiden anderen Innenstadtstationen „Karlstraße“ mit 19,1 °C und „Königstraße“ mit 18,5 °C auf (siehe Abbildung 17). Dies entspricht in der Relation den Temperaturwerten, die auf der Profifahrt am 03.07.2018 nach Sonnenuntergang (zwischen 21:29 und 22:18 UTC, entspricht 23:29 und 00:18 MESZ), bei der Vorbeifahrt an den temporären Stationen registriert wurden, mit der gleichen Reihenfolge von „Wilhelmstraße“ mit ca. 25 °C, „Karlstraße“ mit ca. 24 °C und „Königstraße“ mit ca. 23 °C. An weiteren Streckenabschnitten im Kernbereich der „City“ sowie auf der umgebenden Ringstraße (Hochstadenring, Kaiser-Karl-Ring) wurden auch relativ hohe Temperaturen (> 23,5 °C) gemessen, was ebenso auf eine recht dichte wärmespeichernde Bauung zurückzuführen ist.

Ähnliche Temperaturwerte (> 23,5 °C) finden sich in der industriell geprägten Weststadt, südwestlich des Bahndammes und nordwestlich der Endenicher Straße. Es ist davon auszugehen, dass sowohl die Gebäude, als auch die recht großen überwiegend asphaltierten Flächen zwischen den Gebäuden viel einkommende Strahlung absorbieren. Das spiegelt sich auch in den Messergebnissen der sich dort befindlichen temporären Messstation „Karlstraße“ wider. Das Temperaturmaximum unterscheidet sich kaum von den übrigen temporären Messstationen. Etwas niedrigere Werte wurden in der Zeit zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang registriert, was der spezifischen Lage der Messstation auf einer unversiegelten Freifläche, während eines Bauvorhabens im Zeitraum der Messungen, geschuldet war.

## Profilmessfahrt Bonn am 03.07.2018, 21:29 - 22:18 UTC

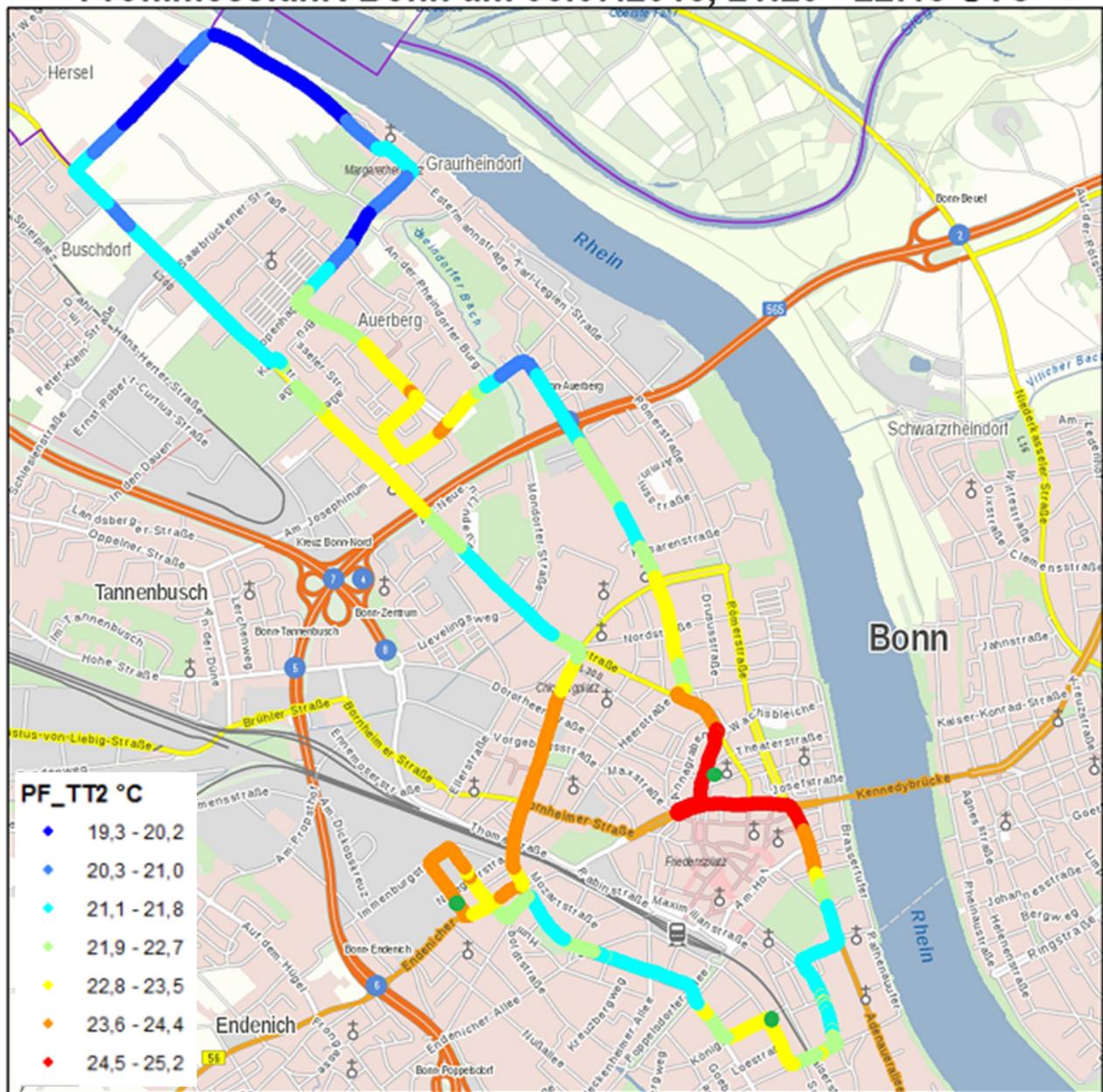


Abbildung 22: Profilmessfahrt in Bonn, 03.07.2018, 21:29 - 22:18 Uhr (UTC): entlang der Messroute aufgenommene Temperaturwerte in 1,9 m über Grund (siehe Legende). Die grünen Punkte kennzeichnen die Lage der temporären Messstationen (Kartenhintergrund copyright: ESRI).



Abbildung 23: Luftbild der Innenstadt von Bonn mit den eingezeichneten Untersuchungsgebieten (Quelle Kartenhintergrund: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus, DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community).

Das Luftbild in Abbildung 23 zeigt, dass die geschlossene Blockrandbebauung in der südlichen Innenstadt zwischen Hofgarten, Poppelsdorfer Allee, im Bereich südlich des Hauptbahnhofs bis Endenich durch etliche Bäume und kleine Grünanlagen, wie das Baumschulwäldchen, aufgelockert ist. So lagen die Messwerte in der Regel unter 23,5 °C und somit deutlich (ca. 2 Kelvin) unter den Messungen im zentralen Innenstadtbereich. Noch etwas niedrigere Werte, zwischen 21,9 und 22,7 °C wurden direkt in den an das „Grün“ angrenzenden Streckenabschnitten (Vorbeifahrt am Hofgarten, Überquerung der Poppelsdorfer Allee und Fahrt entlang des Baumschulwäldchens) erreicht. Außerdem ist anzunehmen, dass der Rhein eine klimatisch günstige Wirkung auf die Passage entlang des Hofgartens einnimmt, da die Wassertemperatur am Mittelrhein im Sommer bei durchschnittlich 18 °C ([www.wassertemperatur.co/rhein-wassertemperatur](http://www.wassertemperatur.co/rhein-wassertemperatur)) liegt.

Der komplette Messroutenverlauf zeigt in den Streckenabschnitten zwischen nördlicher Innenstadt (Kaiser-Karl-Ring) und Autobahn 565 niedrigere Temperaturwerte (meist zwischen 22,0 °C und 23,0 °C), und somit ca. ein Kelvin kühler als auf der Strecke innerhalb der Ringstraße. Dies lässt sich auf der Kölner Straße gut mit der Querung des Rheindorfer Baches, sowie den Grünanlagen um den Sportpark Nord, in Verbindung bringen.

Die Profilmessfahrt vor Sonnenaufgang am 12.09.2018 bei windschwacher Strahlungswetterlage zeigt Temperaturunterschiede von ca. 5 Kelvin entlang der Strecke (siehe Abbildung 24). Die räumliche Temperaturverteilung verläuft relativ ähnlich, wie bei der beschriebenen Sonnenuntergangsfahrt vom 03. Juli 2018. Das Temperaturniveau liegt jedoch ca. 7 Kelvin niedriger.

Analog befindet sich der wärmste Streckenabschnitt wieder im Innenstadtbereich und der kälteste auf den Feldwegen im Nordteil der Route. Verhältnismäßig niedrige Temperaturen wurden erneut bei der Querung des Rheindorfer Baches und im Süden der Strecke beim Überfahren der Bahntrasse gemessen. In den übrigen Bereichen wurde eine geringere thermische Variabilität registriert als bei der Julifahrt nach Sonnenuntergang.

Die bei der Profilmessfahrt aufgezeichneten Temperaturmesswerte liefern einen guten Anhaltspunkt für die flächenmäßige Temperaturverteilung in der Stadt Bonn und können somit als Hilfe zur Einschätzung der Modellgüte für berechnete Temperaturverteilungen dienen.

### Profilmessfahrt Bonn am 12.09.2018, 04:03 - 04:53 UTC

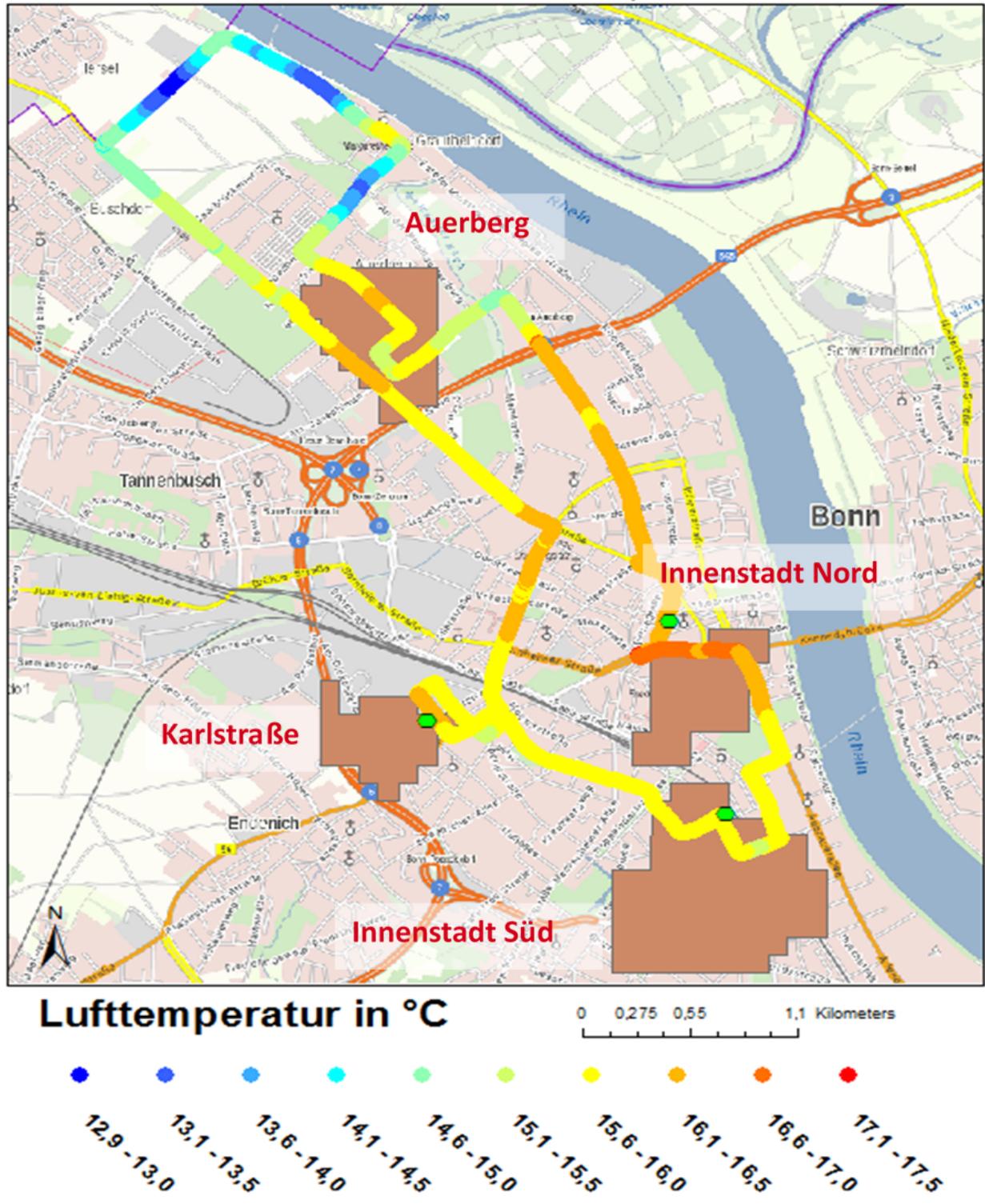


Abbildung 24: Profilmessfahrt in Bonn, 12.09.2018, 04:03 - 04:53 Uhr (UTC): entlang der Messroute aufgenommene Temperaturwerte in 1,9 m über Grund (siehe Legende). Die temporären Messstandorte sind mit grünen Punkten gekennzeichnet und die entlang der Messroute liegenden Untersuchungsareale für die Modellsimulation sind in der Graphik als braune Flächen dargestellt (Kartenhintergrund copyright: ESRI).

## 5 Simulation von Anpassungsmaßnahmen mit MUKLIMO\_3

### 5.1 Auswahl der städtebaulichen Anpassungsmaßnahmen

In diesem Kapitel werden verschiedene Anpassungsmaßnahmen in ihren klimatischen Wirkungen bewertet. Hierfür wurden Einzelmaßnahmen sowie Kombinationen aus unterschiedlichen Anpassungsmaßnahmen ausgewählt. Bei den Anpassungsmaßnahmen wurden 2 Maßnahmen im Dachniveau betrachtet, zum einen Dachbegrünung und alternativ eine Erhöhung der Dachalbedo. Zudem wurden Versiegelungs- und Entsiegelungsmaßnahmen untersucht und die Wirkung dieser unterschiedlichen Maßnahmen auch bei gleichzeitiger Wohnraumgewinnung durch Nachverdichtung oder Aufstockung.

Bei der Dachbegrünung unterscheidet man zwischen extensiver und intensiver Dachbegrünung, wobei die Art der Bepflanzung entscheidend ist. Während die intensive Dachbegrünung mit vollwertigem Bodenaufbau die Möglichkeit unterschiedlichen Bewuchses zulässt, im Extremfall sogar von Bäumen, ist die extensive Dachbegrünung eher dünn-schichtig aufgebaut und für die einfache Flora geeignet. Letztere ist somit auch bei geringerer Tragfähigkeit des Daches geeignet. Im Modell wurde für die Klimaanpassungsmaßnahmen eine relativ universell einsetzbare semi-intensive Aufbauhöhe von 25,1 cm gewählt.

Dachbegrünung wirkt sich in vielerlei Hinsicht vorteilhaft aus. Je nach Begrünungsart und Niederschlagsmenge wird bei einem Regenereignis ein großer Anteil des Niederschlagswassers zurückgehalten. Durch die Verdunstung des gespeicherten Wassers ergibt sich während Hitzeepisoden eine lokale Verbesserung bezüglich der Oberflächentemperatur des Daches. Durch die Abgabe von Feuchtigkeit (Evapotranspiration) kühlt sich die Luft ab und führt zu einer Reduktion der Lufttemperatur oberhalb des Dachniveaus und auch im inneren des begrünten Gebäudes (im Vergleich zu einem normalen, ungedämmten Dach). Außerdem wirkt die Bepflanzung als natürlicher Filter für Luftschadstoffe.

Eine Änderung der Albedo (Reflexionsvermögen) des Daches derart, dass der Rückstrahleffekt des Sonnenlichtes verstärkt wird, erfordert den Einsatz spezieller Materialien (z. B. helle Dachziegel). Danach ist, im Gegensatz zur Dachbegrünung, über Jahre keine weitere Pflege mehr erforderlich. Ohne Reinigung der helleren Oberflächen geht die erhöhte Albedo allerdings langsam wieder zurück. In erster Linie führt die Albedo-Erhöhung bei Hitzeepisoden zu einer thermischen Verbesserung (Abkühlung) im Dach- und – in geringerem Maß – im Straßenraum sowie zu einem angenehmeren, kühleren Innenraumklima.

## Konventionelles Dach Dachbegrünung

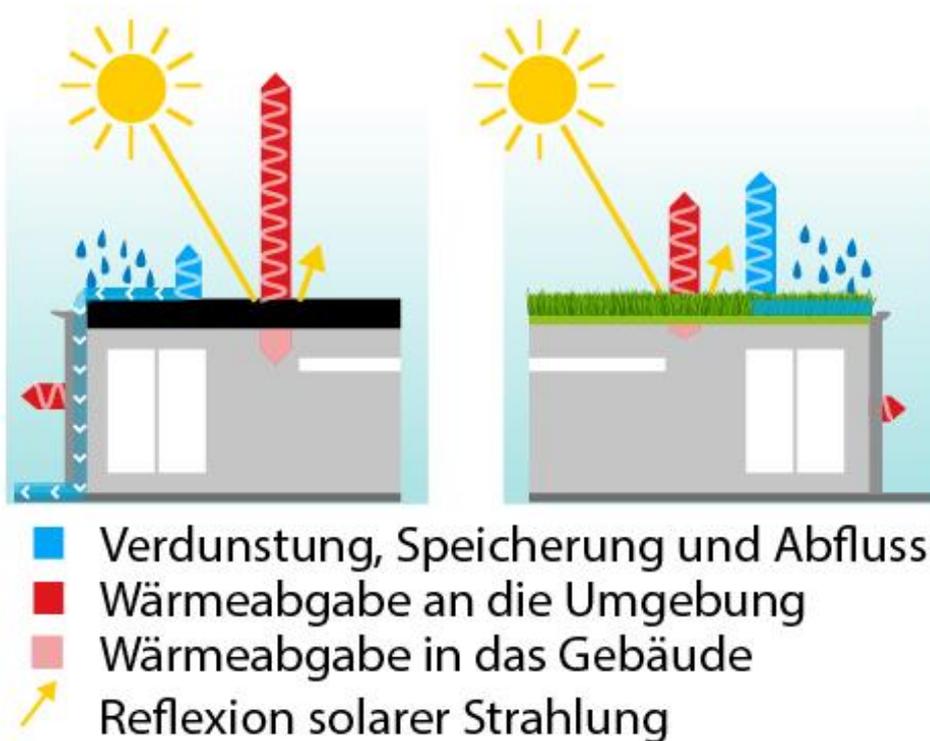


Abbildung 25: Wärmeabgabe der Sonnenstrahlung an die Umgebung und in das Gebäude bei einem herkömmlichen Dach und bei einem begrüntem Dach. Grafik: DWD

Neben den beiden Anpassungsmaßnahmen im Dachniveau soll eine weitere Maßnahme am Boden, nämlich eine schrittweise Änderung des Versiegelungsgrades der nicht bebauten Flächen in den Untersuchungsgebieten, simuliert werden. Dieser wird in 10 %-Schritten verändert und die Auswirkungen werden mit MUKLIMO\_3 berechnet. Diese Maßnahme wirkt, im Gegensatz zu den beiden Maßnahmen an Dächern, direkt im Straßenraum, d.h. im Höhenniveau, in dem sich Passanten bewegen.

Eine teilweise Entsiegelung der asphaltierten Böden kann vielfältige Vorteile für das Umgebungsklima bieten. Der Boden könnte dann zum Teil wieder als Speicherraum für Niederschlagswasser dienen und somit als Regulator des Wasserhaushaltes wirken. Mehr Bepflanzung würde zur Filterung und Reinigung der Luft beitragen und durch die Filterung des Bodens zu einer guten Grundwasserqualität beitragen. Die Luft wäre weniger staubig und trocken und durch die Evapotranspiration auch kühler.

Die Modellsimulationen sollen Hinweise darauf geben, welche Anpassungsmaßnahme das Stadtklima thermisch am günstigsten beeinflussen könnte.

Für den nicht modifizierten Modelllauf ohne Klimaanpassungsmaßnahmen (Referenzlauf, „Ist-Zustand“) wurden die folgenden Annahmen anhand der Bebauungsklassifizierung getroffen:

## Referenzlauf:

- Dachalbedo 20 %
- Keine Dachbegrünung
- Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden je nach Landnutzungsart:
  - Versiegelungsgrad 80 % bei hoher Verdichtung
  - Versiegelungsgrad ca. 50 bis 60 % bei Doppel- und Mehrfamilienhäusern
  - Versiegelungsgrad 30 bis 40 % bei Einfamilienhäusern und dörflicher Bebauung
- Bodentemperatur 19 °C als Annahme für den Startwert, wobei von einer konstanten Bodentemperatur ausgegangen wird
- Gewässertemperatur von 20 °C, wegen einer angenommenen Hitzeepisode etwas höher als der sommerliche Durchschnittstemperaturwert für den Rhein bei Bonn, der bei 18 °C liegt
- Innenraumtemperatur von 24 °C als Durchschnittsinnenraumtemperatur für den Modellinput. Sicherlich kann diese, je nach Lage, Lüftungsverhalten und baulicher Isolierung, stark variieren

Es wurden folgende Einzelmaßnahmen (siehe Tabelle 2) und folgende Maßnahmenkombinationen (siehe Tabelle 3) simuliert, wobei die Änderungen nicht für den gesamten Untersuchungsausschnitt gerechnet wurden, sondern nur für die speziell ausgewählten 7 Untersuchungsareale, wie in Kapitel 5.5 beschrieben.

Tabelle 2: Variationen der drei Anpassungsmaßnahmen.

Dachalbedo	Dachbegrünung	Versiegelungsgrad (zwischen den Gebäuden)
-----	Dachbegrünung 10 %	Versiegelungsgrad 10 %
Dachalbedo 20 %	Dachbegrünung 20 %	Versiegelungsgrad 20 %
Dachalbedo 30 %	Dachbegrünung 30 %	Versiegelungsgrad 30 %
Dachalbedo 40 %	Dachbegrünung 40 %	Versiegelungsgrad 40 %
Dachalbedo 50 %	Dachbegrünung 50 %	Versiegelungsgrad 50 %
Dachalbedo 60 %	Dachbegrünung 60 %	Versiegelungsgrad 60 %
Dachalbedo 70 %	Dachbegrünung 70 %	Versiegelungsgrad 70 %
Dachalbedo 80 %	Dachbegrünung 80 %	Versiegelungsgrad 80 %
-----	Dachbegrünung 90 %	Versiegelungsgrad 90 %
-----	Dachbegrünung 100 %	-----

Tabelle 3: Maßnahmenkombinationen aus Wohnraumgewinnung (Nachverdichtung, Aufstockung) und jeweils zwei Anpassungsmaßnahmen.

Nachverdichtung	Nachverdichtung	Aufstockung	Aufstockung
Nachverdichtung 3 % Dachbegrünung 10 % Entsiegelung 3 %	Nachverdichtung 10 % Dachbegrünung 10 % Entsiegelung 3 %	Aufstockung 1 Etage Dachbegrünung 10 % Entsiegelung 3 %	Aufstockung 2 Etagen Dachbegrünung 10 % Entsiegelung 3 %
Nachverdichtung 3 % Dachbegrünung 10 % Entsiegelung 10 %	Nachverdichtung 10 % Dachbegrünung 10 % Entsiegelung 10 %	Aufstockung 1 Etage Dachbegrünung 10 % Entsiegelung 10 %	Aufstockung 2 Etagen Dachbegrünung 10 % Entsiegelung 10 %
Nachverdichtung 3 % Dachbegrünung 20 % Entsiegelung 3 %	Nachverdichtung 10 % Dachbegrünung 20 % Entsiegelung 3 %	Aufstockung 1 Etage Dachbegrünung 20 % Entsiegelung 3 %	Aufstockung 2 Etagen Dachbegrünung 20 % Entsiegelung 3 %
Nachverdichtung 3 % Dachbegrünung 20 % Entsiegelung 10 %	Nachverdichtung 10 % Dachbegrünung 20 % Entsiegelung 10 %	Aufstockung 1 Etage Dachbegrünung 20 % Entsiegelung 10 %	Aufstockung 2 Etagen Dachbegrünung 20 % Entsiegelung 10 %

## 5.2 Typische Wetterlage in Bonn als Antrieb für die Modellrechnungen

Besonders geeignet für die Untersuchung von Stadtklimaeffekten, sowie der städtischen Wärmeinsel (Urban Heat Island UHI) sind windschwache Strahlungswetterlagen. So ist nach HENNINGER und WEBER (2019) die UHI in Städten besonders deutlich während autochthoner, strahlungsintensiver Witterungsbedingungen ausgeprägt, während derer die mikrometeorologischen Unterschiede zwischen der Landoberfläche Stadt/ Umland besonders signifikant ausgebildet sind. Autochthone Wetterlagen gehen üblicherweise mit geringen Bedeckungsgraden, niedrigen Windgeschwindigkeiten, hohem Luftdruck und stabilen atmosphärischen Schichtungsverhältnissen während der nächtlichen Ausstrahlungsperiode einher.

Daher wurde als Ausgangswetterlage für die Modellrechnungen mit MUKLIMO\_3 eine sommerliche Hochdruckwetterlage Mitte Juli mit Temperaturwerten größer als 25 °C und einer südöstlichen Strömung ausgewählt. Dies entspricht einer häufig vorkommenden Windrichtung im Rheintal bei Schwachwindverhältnissen. Die für das Modell ausgewählten Startparameter geben vergleichbare Wetterverhältnisse wider, wie an den Tagen, an denen Profilmfahrten durchgeführt wurden. So konnte recht gut der Vergleich zwischen Modellrechnung und Realität gezogen werden (siehe Kapitel 4.4.4 Auswertung der Profilmessfahrten).

Abbildung 26 zeigt die Wetterlage von dem Julitag, an dem die Profilmfahrten stattgefunden haben; diese würde auch die Voraussetzungen für eine Modellausgangswetterlage liefern. Prägend war ein Hoch mit Schwerpunkt über dem Atlantik von über 1030 hPa und einem Hochdruckkeil, der sich über Großbritannien, die Nordsee, die Niederlande, weite Teile Deutschlands bis nach Tschechien und die Slowakei ausdehnte. Der Ausläufer eines schwachen Tiefs mit einem Kerndruck unter 1015 hPa über der Bretagne lag relativ stationär über Nordfrankreich, der Schweiz und Österreich und

beeinflusste nur den Süden und Südwesten Deutschlands mit dichteren Wolken und an der Luftmassengrenze zum Teil mit konvektivem gewittrigem Niederschlag im Bergland. In der Region vom Mittel- bis zum Niederrhein, somit auch im Bonner Raum, herrschte ruhiges, schwachgradientiges Wetter mit wolkenfreiem Himmel oder nur geringer, hoher Bewölkung und Temperaturen nahe 30°C vor. Dies entspricht einer autochthonen Strahlungswetterlage.

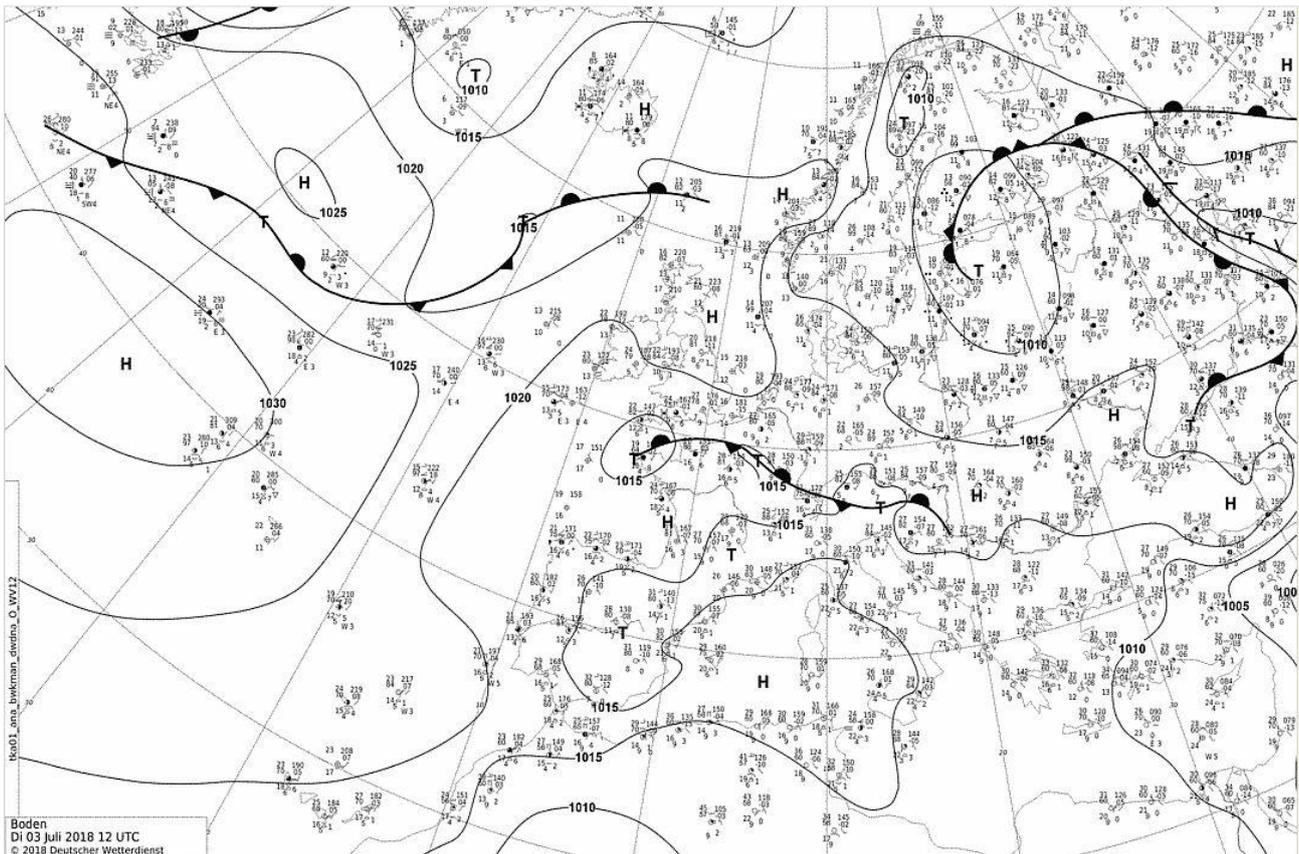


Abbildung 26: Wetterkarte vom 03.07.2018, 12 Uhr (UTC) mit Stationswetterdaten und der Bodendruckverteilung (Isobaren) sowie den eingezeichneten, analysierten Fronten.

Auf dem Composite-Satellitenbild bestehend aus sichtbarem und infrarotem Anteil ist die Wolkenbedeckung und -höhe über Mittel- und Südeuropa zu sehen. Bonn (Abbildung 27, gelbe Markierung) lag in dem weiträumigen, wolkenfreien oder nur gering bewölkten Bereich zwischen Benelux und Tschechien, wo sich noch der Keil eines atlantischen Hochs auswirkte. Der häufig wolkenlose Himmel ist auf dem Satellitenbild anhand der Länderkonturen und der zusätzlich eingezeichneten blau eingefärbten Stationskreise erkennbar.

Dichte Bewölkung, die auf Abbildung 27 lila eingefärbt ist, befand sich weiter südlich, an der Luftmassengrenze, die Teile Frankreichs, der Nord- und Ostschweiz, sowie Südwestdeutschland und den Westen Österreichs beeinflusste. Dabei waren vor allem über

dem Alpenraum Gewitter eingelagert, die auf dem Bild (Abbildung 27) als hellere, weiße, punktförmige Cluster in die Wolkenstruktur eingelagert sind.

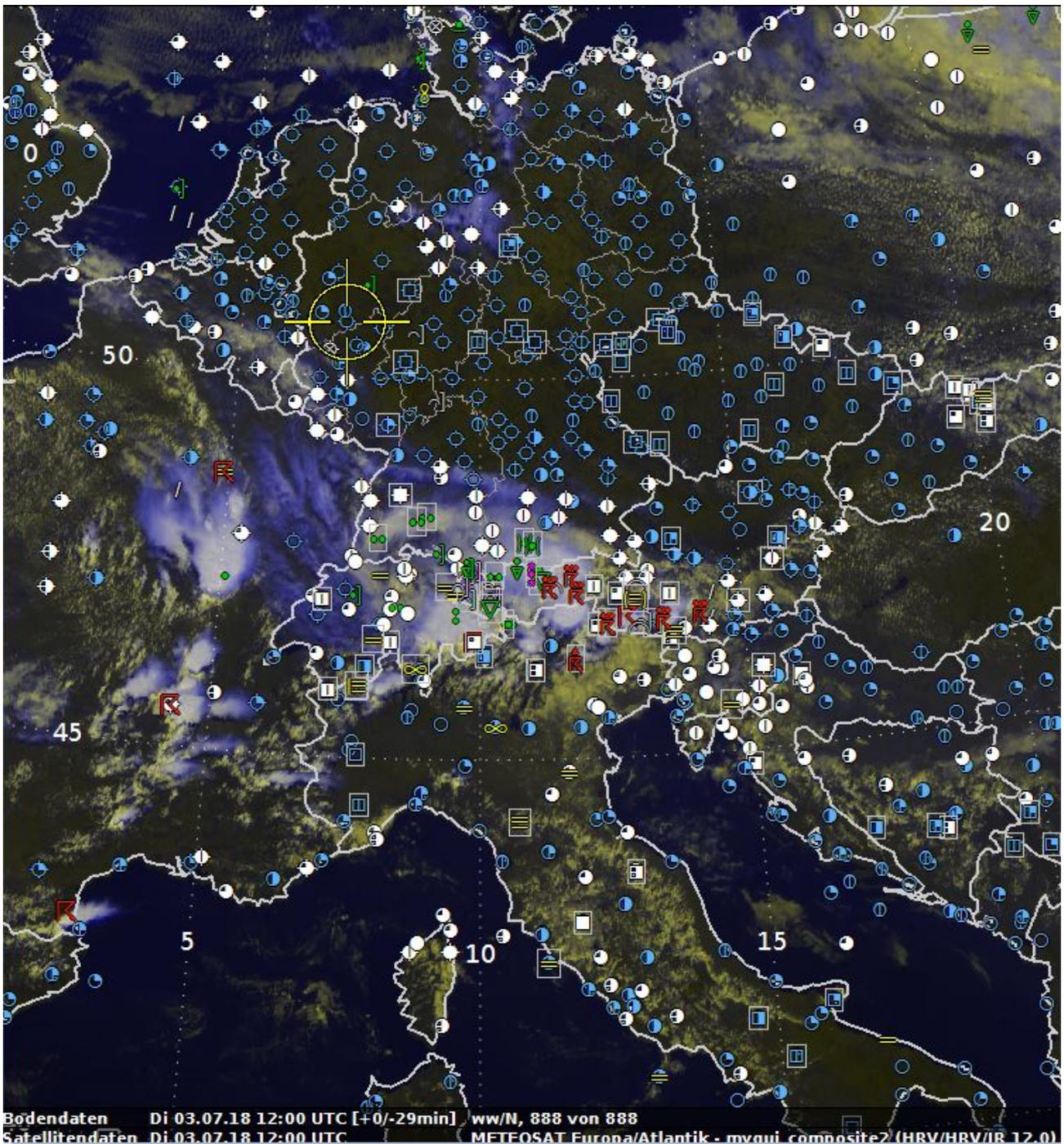


Abbildung 27: Composite-Satellitenbild vom 03.07.2018, 12 Uhr (UTC) bestehend aus sichtbarem Anteil und Infrarot-Anteil (Bewölkung in niedrigem Niveau in gelblichgrünen Farbtönen, hochreichende konvektive Bewölkung in Lila und hellem Lila. Außerdem Symbole für die Bodendaten.

### 5.3 Untersuchungsgebiete für die Modellrechnungen

Abbildung 4 (siehe Kapitel 3.3) zeigt das Gesamtuntersuchungsgebiet (26 km x 24 km), das die Stadt Bonn vollständig beinhaltet. Auf der Karte sind die unterschiedlichen Landnutzungsarten zu erkennen.

„Blau“ werden die Gewässer dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der Rhein, der auf der Karte von Südosten nach Nordwesten fließt. Von Osten mündet in geschwungenem Bogen die Sieg in den Rhein. Im Nordosten des Kartenausschnitts befindet sich die Wahnbachtalsperre.

In Rottönen werden die bebauten Flächen dargestellt. Die Innenstadt mit geschlossener Blockrandbebauung (dunkelrot) befindet sich linksrheinisch, relativ zentral auf der abgebildeten Karte. Hochverdichtete Bebauung ist in einem dunklen Rotton abgebildet. Hellere Rottöne stehen für lockerer bebauten Flächen bis zu einem hellen Orangebraun für die offene Bauweise von Ein- und Zweifamilienhäusern.

Industriegelände ist in grauer Farbe eingezeichnet. Landwirtschaftliche Flächen sind in Gelbtönen abgebildet und liefern mit knapp 30 % den prozentual größten Anteil der 20 festgelegten Landnutzungsklassen. Mit einem beinahe ebenso großen Teil sind in der Karte dunkelgrüne Flächen vertreten, die Waldgebiete repräsentieren. Die helleren Grüntöne zeigen die Lage von innerstädtischen Grünflächen, sowie Flächen geringer baulicher Nutzung.

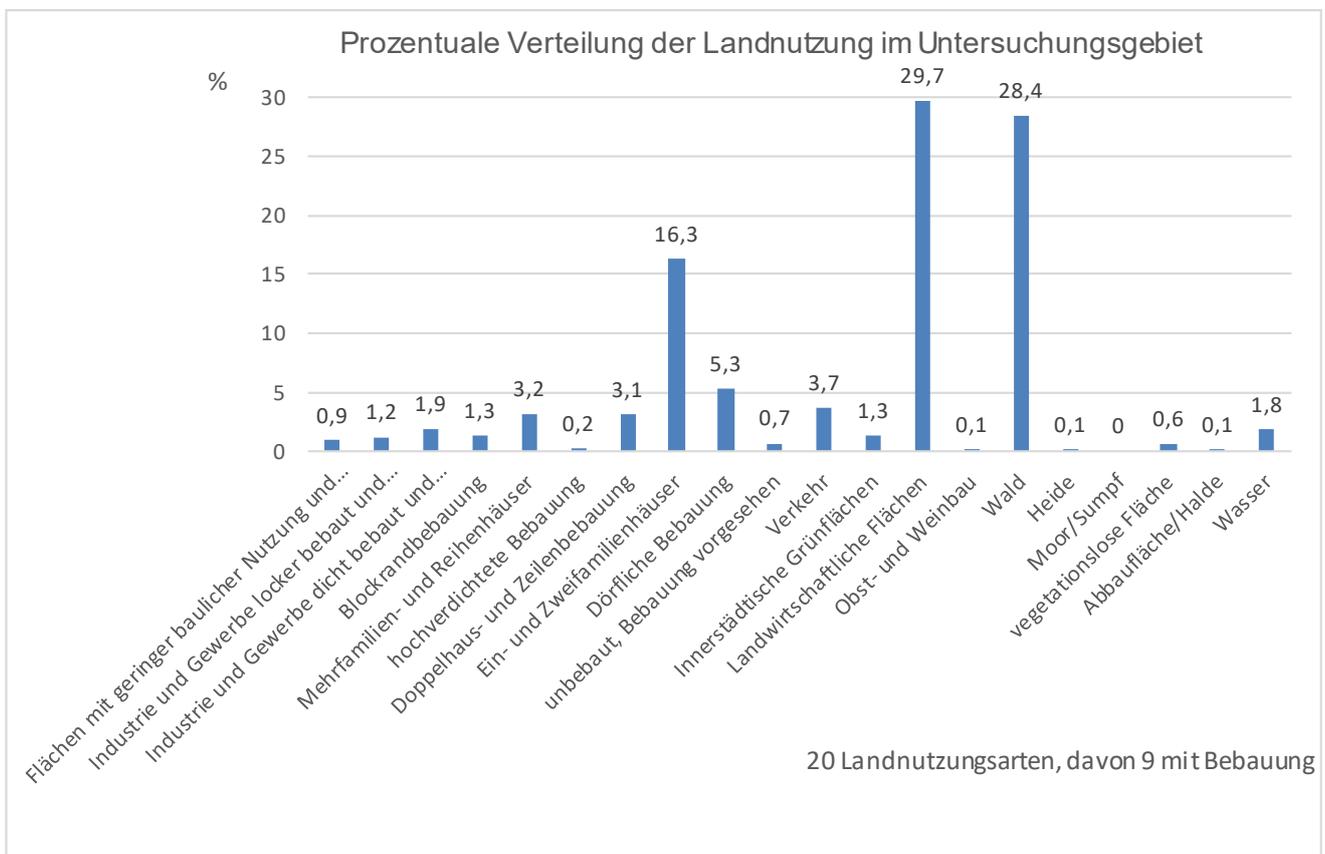


Abbildung 28: Prozentuale Verteilung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet.

Abbildung 28 veranschaulicht, dass sich weit über die Hälfte der Fläche des Gesamtuntersuchungsgebiets auf Wald und landwirtschaftliche Flächen verteilt und demnach unversiegelt ist. Nicht einmal ein Viertel der Fläche ist bebaut. Auch wenn die bebaute Fläche einen deutlich kleineren Teil ausmacht, kommt es vornehmlich dort bei sommerlichen Strahlungswetterlagen zu einer starken Wärmebelastung.

Da sich versiegelte Flächen mit Bebauung in besonderem Maße an heißen Tagen aufheizen und dort auch die Hitze gespeichert wird, ist es von großem Interesse, zu untersuchen, wie stark sich unterschiedliche Untersuchungsgebiete erwärmen und wie diese auf Klimaanpassungsmaßnahmen ansprechen.

So wurden, wie in Abbildung 29 zu sehen ist, 7 verschiedene Areale mit Bebauung ausgewählt, die innerhalb des Untersuchungsgebiets jeweils einem relativ homogenen Bebauungstyp zugeordnet werden konnten, aber von Gebiet zu Gebiet unterschiedliche Bebauungstypen aufweisen. Die Gebiete sind zwischen 28 und 90 ha groß und überschreiten somit eine Mindestgröße, die notwendig ist, um jeweils ein eigenes Mikroklima auszubilden und somit aussagekräftige Ergebnisse für die Modellsimulation zu erhalten.

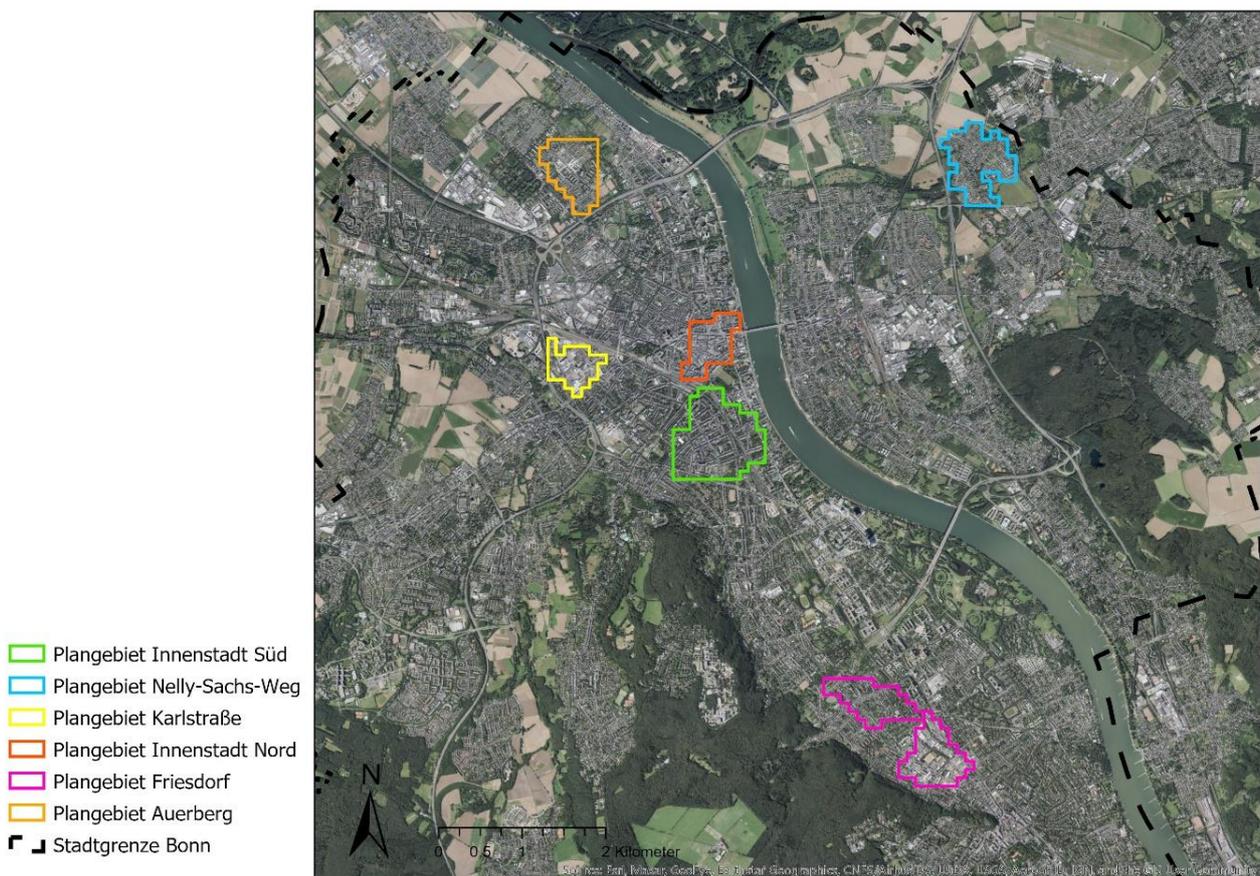
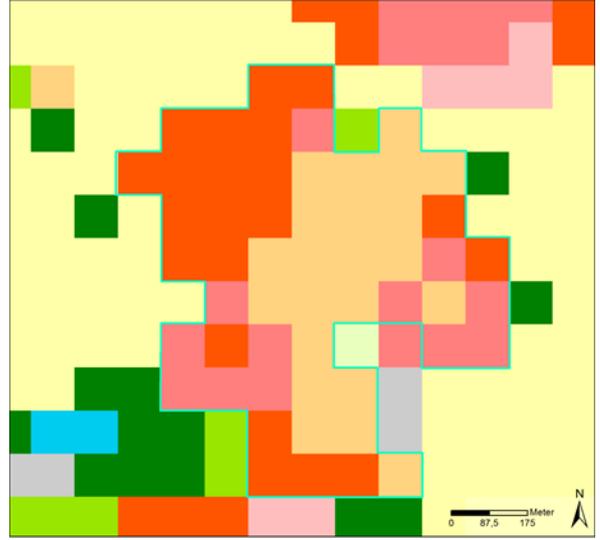


Abbildung 29: Ausgewählte Plangebiete der Stadt Bonn für die Untersuchungen mit Anpassungsmaßnahmen vorgenommen wurden (Quelle Kartenhintergrund: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus, DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community).

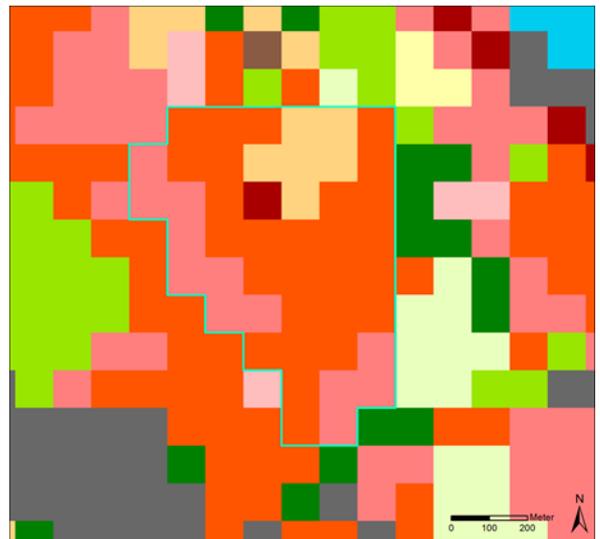
In vier von den sieben Untersuchungsgebieten konnten temporäre Messstationen für ca. 1,5 Monate im Spätsommer bis Herbst 2016 aufgestellt werden (siehe Kapitel 4.2 und Abbildung 24). Ein Vergleich der Messungen mit den Modellberechnungen diente als Hilfe zur Modellgüteabschätzung.

Von den sieben Untersuchungsgebieten gibt es zwei Gebiete in der Innenstadt (Innenstadt Nord und Innenstadt Süd) mit durchweg „geschlossener Blockrandbebauung“ als Bebauungstyp (in der Abbildung 30 mit dunklem Rot gekennzeichnet). Das südliche Untersuchungsgebiet ist mit 90 ha das größte in sich homogene Areal, das ausgewählt werden konnte und eignet sich dafür, Unterschiede innerhalb des Areals zu ermitteln, die überwiegend durch die verschiedenartige naturräumliche Nutzung oder durch die Orographie der umgebenden Gitterzellen zu erklären sind (siehe Abbildung 30, unterste Reihe).

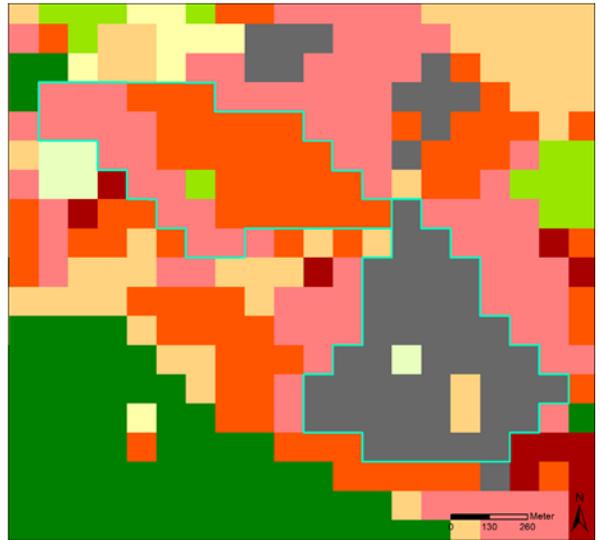
Bonn Villich-Müldorf



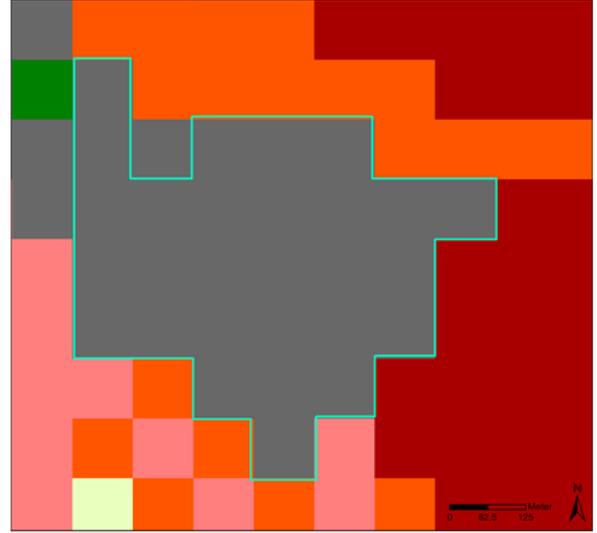
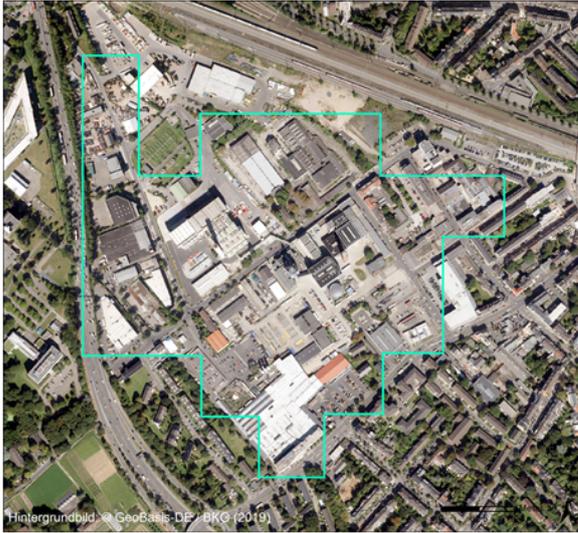
Bonn Auerberg



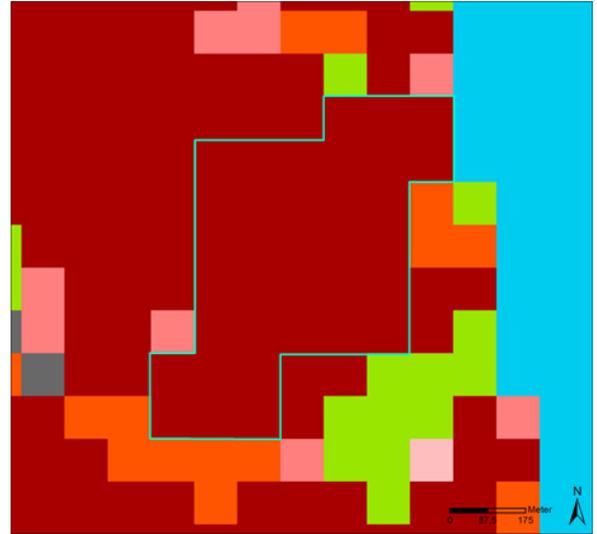
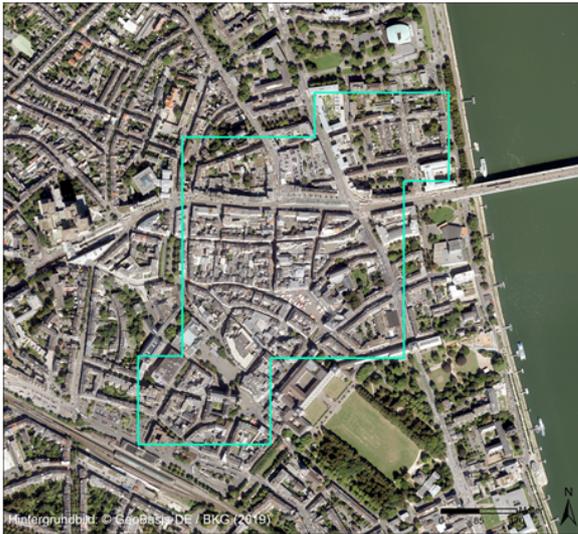
Bonn Friesdorf



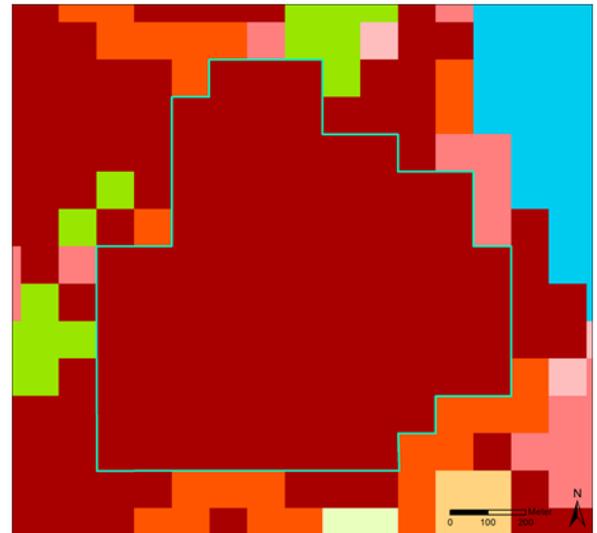
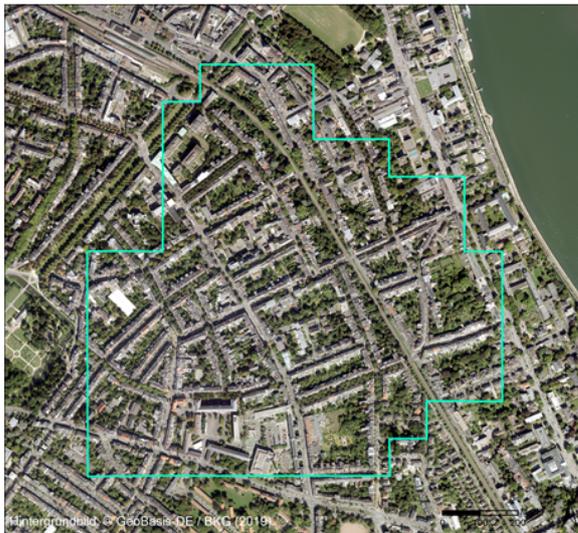
Bonn Karlstraße



Innenstadt Nord



Innenstadt Süd



## Landnutzung

 Abbaufäche/Heide	 landwirtschaftliche Fläche
 Blockrandbebauung (geschlossen)	 Mehrfamilien- und Reihenhäuser
 Dörfliche Bebauung	 Obst und Wein
 Doppelhaus- und Zeilenbebauung	 offene Bauweise (Ein- und Zweifamilienhäuser)
 Flächen geringer baul. Nutzung mit hohem Grünanteil	 unbebaut (Bebauung vorgesehen)
 hochverdichtete Bebauung	 vegetationslose Fläche
 Innerstädtische Grünflächen	 Verkehrsflächen
 Industrie und Gewerbe dicht bebaut und hoch versiegelt	 Wald
 Industrie und Gewerbe locker bebaut und gering versiegelt	 Wasser

Abbildung 30: Überblick über die Lage der Plangebiete (linke Spalte: Quelle Luftbild: BKG 2019 GEOBasis-DE) und deren Landnutzung (rechte Spalte, Legende entspricht Legende in Abbildung 4).

Beide Innenstadtgebiete sind westlich des Rheins in unmittelbarer Flussnähe gelegen. Die beiden relativ homogen strukturierten Gebiete sind lediglich durch einen „Grünstreifen“ zwischen Hofgarten und Poppelsdorfer Allee zur einen Seite, und dem Bonner Hauptbahnhof zur anderen Seite, getrennt und somit in ihren thermischen Wirkungen gut vergleichbar. Jeweils im Norden der Untersuchungsgebiete befindet sich eine temporäre Messstation, so dass die Modellergebnisse gut anhand der Messungen verifiziert werden können.

Das kleinste Untersuchungsgebiet „Karlstraße“, mit einer Größe von 28 ha, liegt westlich der Innenstadt und hat ebenfalls einen sehr hohen Versiegelungsgrad, ist jedoch industriell geprägt. Das Gebiet ist nach Norden hin abgegrenzt durch die Schneise der Bahntrasse in der Bonner Weststadt. Im Westen befindet sich die Autobahn und westlich davon steigt das Gelände an, Richtung Hardthöhe. Im Süden von Bonn liegt das Untersuchungsareal „Bonn-Friesdorf“, das sich in zwei Teiluntersuchungsgebiete aufteilt, ein industriell geprägtes, hoch versiegeltes „Friesdorf-Südost“ und ein durch Wohnen dominiertes „Friesdorf-Nordwest“ (siehe Abb. 30, dritte Reihe).

„Friesdorf-Südost“ lässt sich von der Lage und vom Landnutzungscharakter mit der „Karlstraße“ vergleichen. Der Rhein fließt ungefähr 1,5 km weiter östlich und die Kotenforstterrasse erhebt sich wenige 100 m im Westen bis Südwesten. Im Südosten hingegen, der Hauptanströmrichtung bei Strahlungswetterlagen, liegt die geschlossene Blockrandbebauung des Bad Godesberger Zentrums. Insgesamt ist das Gebiet mit 43 ha etwas größer und nicht komplett homogen industriell genutzt. „Friesdorf-Nordwest“ weist eine Größe von 41 ha auf. Es ist geprägt durch Doppelhaus- und Zeilenhausbebauung sowie Mehrfamilien- und Reihenhäuser. Innerhalb dieser Bebauung liegt ein Park, der etwa einen Hektar groß ist.

Am nördlichen Stadtrand von Bonn wurden zwei weitere überwiegend locker bebaute Areale als Untersuchungsgebiete ausgewählt „Auerberg“ und „Vilich-Müldorf“ (siehe Abbildung 30, erste und zweite Reihe). Beide sind charakterisiert durch Doppelhaus- und Zeilenhausbebauung, Mehrfamilien- und Reihenhäuser sowie in offener Bauweise Ein- und Zweifamilienhäuser, deren Anteil in „Vilich-Müldorf“ höher ist als in „Auerberg“.

## 5.4 MUKLIMO\_3-Modellsimulation für den Ist-Zustand (Referenzlauf)

Zur Klimauntersuchung für den Ist-Zustand wurde mit dem Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 ein Referenzlauf durchgeführt. Als Eingangsdaten für den Referenzlauf, wurden Höhen- und Landnutzungsdaten (s. Kapitel 3.3) verwendet und ein geeignetes Temperatur- und Feuchteprofil gewählt, wie es einem wolkenarmen und schwachwindigen Sommertag im Juli mit den dazugehörigen Sonnenaufgangs- und Sonnenuntergangszeiten entspricht (siehe Kapitel 5.2). Bodenfeuchte- und Temperaturprofil im Boden wurden der Bodenart, einer Lehm Bodenart, im Bonner Raum angepasst. Für bestimmte andere Werte, wie die Albedo (Rückstrahlvermögen) der versiegelten Flächen wurden Literaturangaben übernommen.

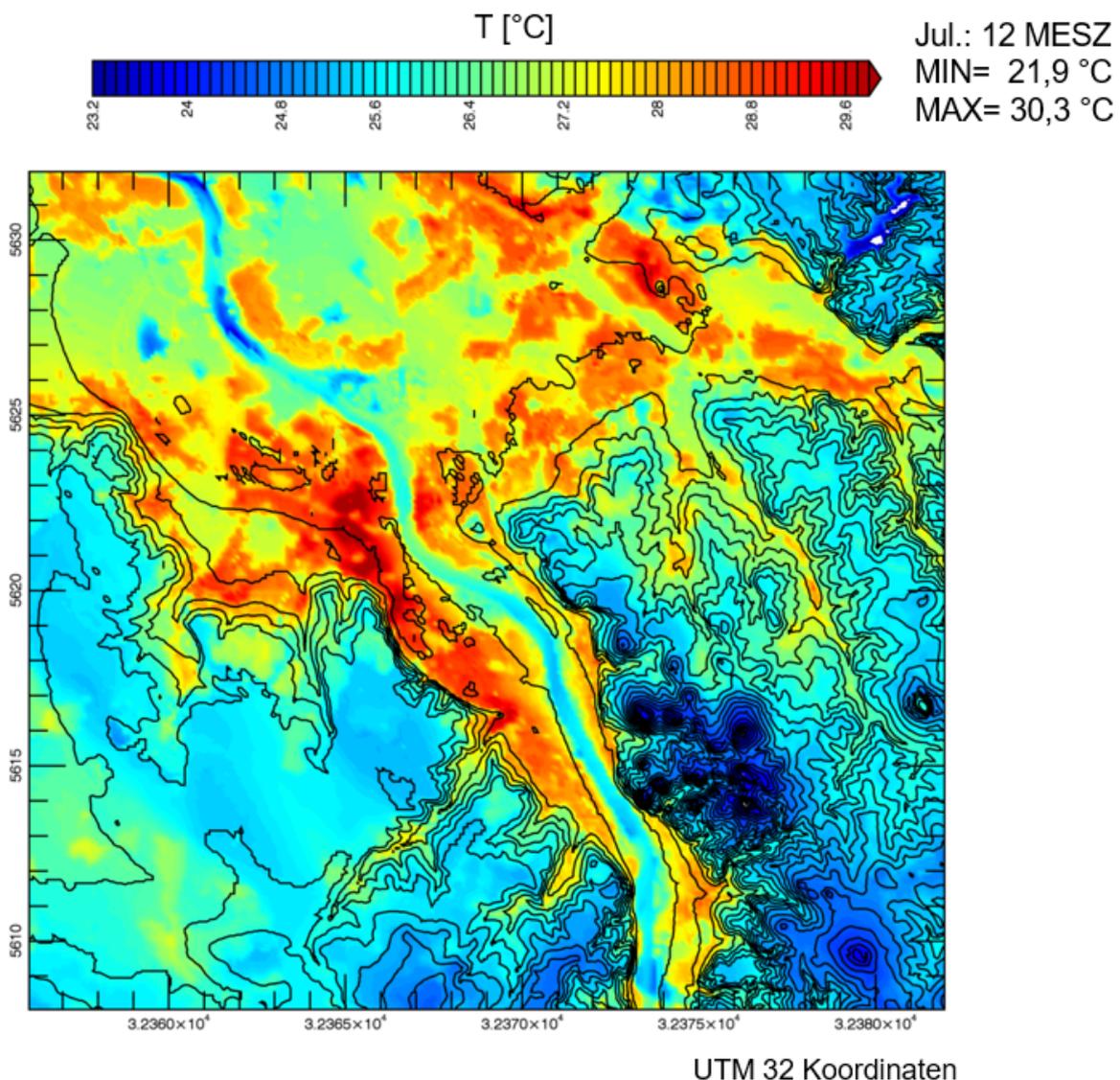


Abbildung 31: Mit MUKLIMO\_3 berechnete Temperaturverteilung (in °C) in 2 m Höhe über Grund für einen Sommertag ( $>25$  °C), bzw. im Innenstadtgebiet heißen Tag ( $>30$  °C) Mitte Juli für die Stadt Bonn und Umgebung zum Mittagstermin für den Ist-Zustand (Referenzlauf); schwarze Linien: Isohypsen (Linien gleicher orographischer Höhe, erste Isohypse hier bei 60 m, dann in 20 m-Schritten).

Die mit den genannten Eingangsdaten vom Modell berechnete Temperaturverteilung für den Mittagstermin liegt zwischen ca. 22 °C in den Hochlagen des Siebengebirges und ca. 30 °C in Teilen der Bonner Innenstadt (siehe Abbildung 31).

Erwartungsgemäß ist in den dicht besiedelten und hoch versiegelten Gebieten die Tagestemperatur zum Mittagstermin bereits deutlich höher angestiegen als im Umland. In Teilen der Innenstadt, der nördlichen, aber auch südlichen Innenstadt, sowie Bad Godesberg und auch Siegburg liegen die Temperaturwerte über der 30-Grad-Marke.

Die Luft über den Gewässern erscheint im Sommer tagsüber kälter als die Umgebungsluft. Das lässt sich sehr gut am Rhein erkennen, der in der Mitte der Darstellung von Südost nach Nordwest verläuft. Er ist in Blau- bis Türkistönen abgebildet. Wie man der Legende entnehmen kann, liegt die berechnete Lufttemperatur über dem Wasser meist zwischen 24,5 °C und 25,5 °C, lediglich im Innenstadtbereich manchmal noch knapp darüber. Als Eingabegröße für das Modell wurde eine Wassertemperatur von 20 °C gewählt, also etwas höher als der sommerliche Durchschnittstemperaturwert für den Rhein bei Bonn von 18 °C. Die Luft über der Wahnbachtalsperre im Nordosten des Bereichs weist noch niedrigere Temperaturen auf (dunkelblaue Färbung). Auch Seen mit einer Größe von mehreren Hektar lassen sich anhand der tieferen Temperaturwerte identifizieren (z. B. Herseler See im Nordwesten des Bereichs, sowie auf gleicher Höhe, aber auf der anderen Rheinseite der Mondorfer See).

Die orographisch bedingten Temperaturoegensätze zwischen Tälern und Hochlagen werden vom Modell gut erfasst. Die Taleinschnitte von Mehlemer Bach, Godesberger Bach, Hardtbach westlich des Rheins, sowie Lauterbach und Pleisbach südlich der Sieg heben sich thermisch deutlich von der höher gelegenen Umgebung ab. Das Temperaturniveau liegt in den genannten Tälern zur Mittagszeit zwischen 27 °C und 28 °C. Auf den Höhen des Siebengebirges, die sich zum Teil über 400 m erstrecken, lassen sich Temperaturwerte von meist unter 24 °C ablesen. Dies entspricht einem nahezu trockenadiabatischen Temperaturrückgang von fast 1 Kelvin pro 100 m Höhe. Das ist plausibel, weil für die Modellrechnung ein Strahlungstag mit nur geringer Bewölkung und tagsüber starker vertikaler Durchmischung ausgewählt wurde.

Es wurde eine weitere Modellrechnung für den Ist-Zustand für einen Septembertag durchgeführt. Auch diese vom Modell berechnete Temperaturverteilung für September zu einem Nachttermin entspricht den allgemeinen klimatologischen Vorstellungen an einem Strahlungstag (siehe Abbildung 32). Das Temperaturniveau liegt am Morgen um 6 Uhr MESZ zwischen ca. 11 °C und 17,5 °C.

Vor allem in den Tälern ist die nächtliche Kaltluft gut anhand der blauen Einfärbung sichtbar. Die Luft über den Gewässern ist um diese Jahres- und Tageszeit in der Regel wärmer als die Umgebungsluft. Deswegen erscheint der Rhein als rotes Band auf der Graphik mit ca. 1 bis 2 Kelvin höheren Lufttemperaturen als die direkte Umgebung. Als Eingabegröße für das Modell wurde eine Wassertemperatur von 20 °C angenommen, also etwas höher als die im Spätsommer durchschnittlich gemessene Wassertemperatur am Mittelrhein. Ebenso sind die übrigen Seen und die Wahnbachtalsperre in Orange-Rottönen gut zu erkennen.

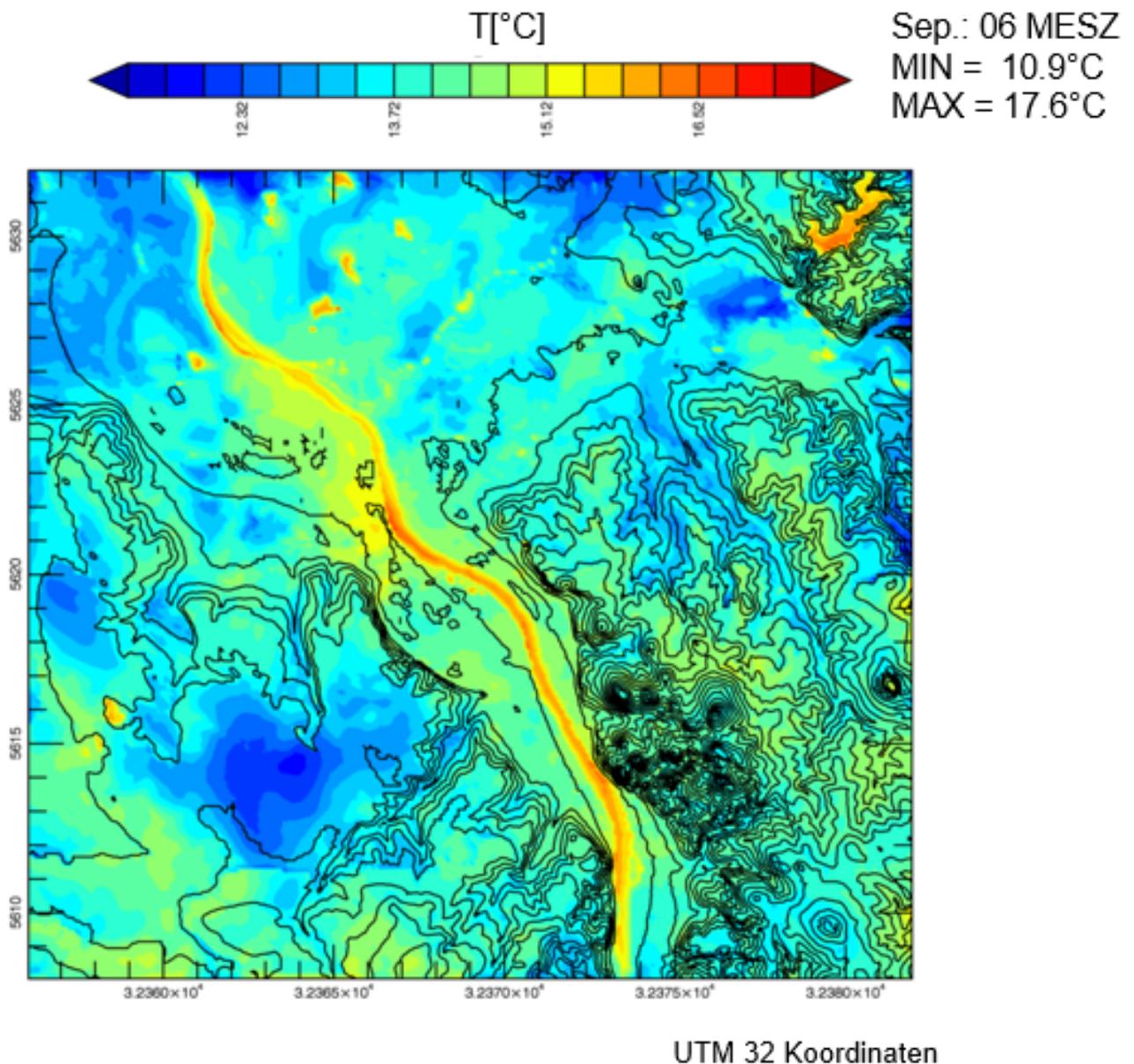


Abbildung 32: Mit MUKLIMO\_3 berechnete Temperaturverteilung (in °C) in 2 m über Grund für einen warmen, wolkenarmen Tag Mitte September für die Stadt Bonn und Umgebung am frühen Morgen; schwarze Linien: Isohypsen (Linien gleicher orographischer Höhe, erste Isohypse hier bei 60 m, dann in 20 m-Schritten).

Inwieweit die vom Modell berechnete Temperaturverteilung mit der Realität übereinstimmt, ließ sich durch einen direkten Vergleich mit den Ergebnissen der in Kapitel 5.3 beschriebenen Profilmfahrten ermitteln. Abbildung 33 zeigt auf der linken Seite den Messroutenverlauf der spätabendlichen Profilmfahrt am 03.07.2018. Der Ausschnitt der vom Modell berechneten abendlichen Temperaturverteilung des Juli-Laufs (siehe Abbildung 33, rechts) wurde der Größe der linken Karte weitgehend angepasst, wie anhand des Rheinverlaufs zu erkennen ist. Auf beiden Bildern wurde für die Temperaturverteilung die gleiche Farbskala gewählt, für die niedrigen Temperaturen Blautöne,

für die hohen Werte Rottöne. Die Temperaturen dazwischen erscheinen im Übergang von Türkis zu Grün, Gelb und Orange.

Ein Vergleich der beiden Bilder in Abbildung 33 zeigt qualitativ eine gute Übereinstimmung der Temperaturmessung der Profilfahrt mit der Temperaturverteilung der Modellsimulation.

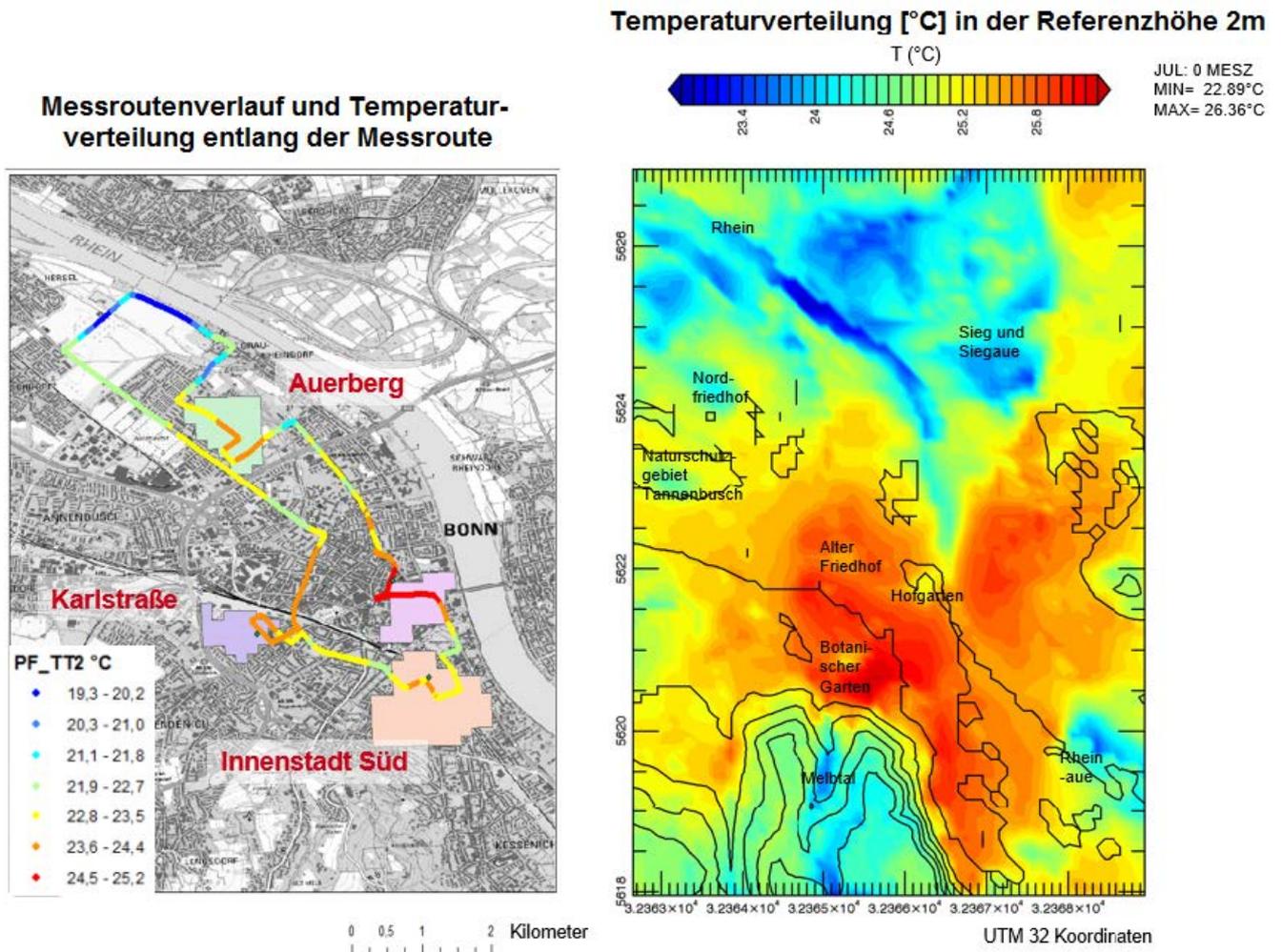


Abbildung 33: Temperaturverteilung entlang des Messroutenverlaufes (ca. 1,9 m Höhe über Grund) am 03.07.2018, 21:29 Uhr - 22:18 Uhr (UTC) im Vergleich zur mit MUKLIMO\_3 berechneten Temperaturverteilung in 2 m Höhe über Grund für eine Julnacht um 22 Uhr (UTC) (entspricht 00:00 Uhr (MESZ)).

Im nördlichen Teil ist der Übergang von der eher kühlen bebauungsfreien Zone zu der noch kühleren Passage entlang des Rheins recht gut zu erkennen. Ein leichter Temperaturanstieg im Bereich von Auerberg ist entlang der Messroute gut zu sehen, wird vom Modell allerdings in leicht abgeschwächter Form gezeigt. Auch die gegenüber der Umgebung deutlich erhöhten Temperaturwerte in der Innenstadt (Rottöne) finden sich sowohl auf der Messstrecke, als auch in der Modellsimulation wieder. In der südlichen

Innenstadt scheint das Modell, relativ gesehen, etwas höhere Temperaturwerte zu liefern, als entlang der Profiliroute gemessen wurden. Bei etwas größeren Grünflächen, wie dem Hofgarten, dem Botanischen Garten und dem Alten Friedhof, wird sowohl vom Modell, als auch bei den graphischen Temperaturentwertungen der Profilfahrt ein Temperaturrückgang registriert. Dieser ist allerdings auf Grund der größeren Auflösung im Modell nicht ganz so ausgeprägt. Auf dem westlichen Teil der Messroute kongruieren die gemessenen und berechneten Temperaturwerte zumindest qualitativ miteinander. Das Temperaturniveau des Modells fällt geringfügig höher aus und die Temperaturspanne ist nicht so ausgeprägt wie bei den Messungen. Dennoch lassen sich streckenweise qualitativ gute Übereinstimmungen festmachen.

Um einen weiteren Anhaltspunkt für die Güte des Modells zu gewinnen, war es sinnvoll, nicht nur die vom Modell berechnete Temperaturverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt auszuwerten, sondern auch den Tagesgang der Temperatur und anderer Parameter zu untersuchen. Hierfür wurde für den ausgewählten, repräsentativen Modelltag im Juli zu jeder Modellstunde jeweils ein räumliches Mittel der Temperatur für die ausgewählten Untersuchungsareale gebildet und diese anschließend als Zeitreihe dargestellt.

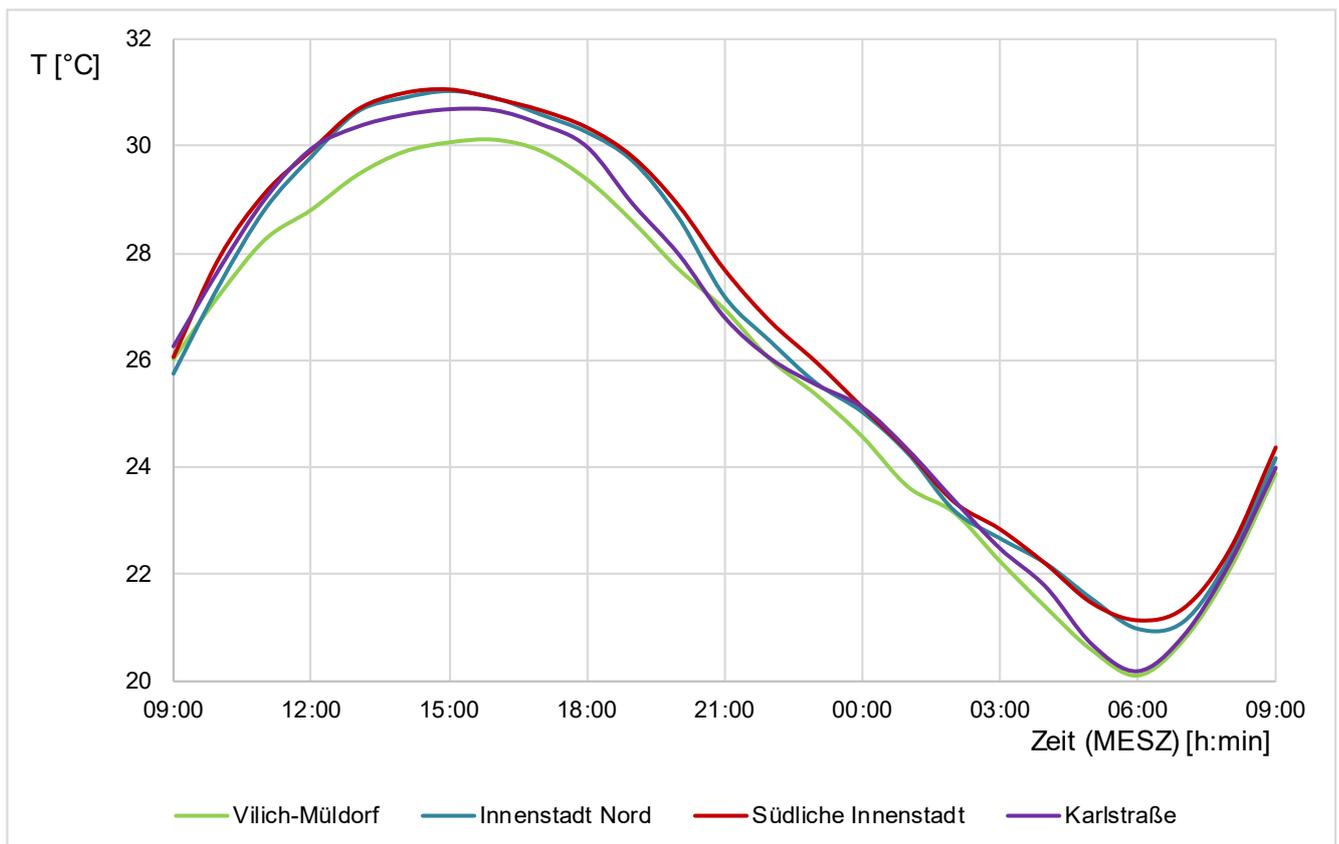


Abbildung 34: Mit MUKLIMO\_3 berechneter Temperaturverlauf (in °C) in Bodennähe für einen repräsentativen heißen Julitag. Die unterschiedlichen Temperaturkurven zeigen die für die jeweiligen Untersuchungsareale stündlich gemittelten Temperaturwerte.

Die von MUKLIMO\_3 berechneten Temperaturkurven für einen repräsentativen Julitag (siehe Abbildung 34) lassen einen für einen Strahlungstag plausiblen Tagesgang der Temperatur erkennen, mit einem deutlichen Anstieg der Temperaturen vom Morgen bis zum Nachmittag und einem Temperaturabfall vom Abend bis zum frühen Morgen des Folgetags. Die Temperaturdifferenz zwischen Minimum und Maximum der jeweiligen Kurven beträgt ungefähr 10 K. Dabei liegen die stündlichen Temperaturmittel, die über das Untersuchungsareal „Innenstadt Nord“ (siehe Abbildung 34, blaue Linie) und auch über das Areal „Innenstadt Süd“ (siehe Abbildung 34, rote Linie) gebildet wurden, sowohl während der Tages-, als auch während der Nachtstunden mit ca. 1 Kelvin über den berechneten Modellwerten der grünen Kurve des Untersuchungsareals „Vilich-Müldorf“, einer Stadtrandlage. Der Verlauf der gemittelten Temperaturwerte des industriell geprägten, aber bereits am Rand der dichten Bebauung gelegenen Untersuchungsareals „Karlstraße“ (siehe Abbildung 34, lila Linie), zeigt tagsüber kaum niedrigere Tagestemperaturwerte, aber nachts ein ähnlich niedriges Temperaturminimum wie „Vilich-Müldorf“. Somit weist die Temperaturkurve „Karlstraße“ den größten Tagesgang auf.

Ein Vergleich der vom Modell simulierten Juli-Temperaturkurven (siehe Abbildung 34) mit den gemessenen Temperaturverläufen für die gemittelten Werte von Strahlungstagen im September 2016 (Abbildung 17) lässt sich auf Grund der anderen Jahreszeit und des daher anderen Temperaturniveaus nur qualitativ führen.

Tabelle 4 liefert eine Rangliste der jeweils höchsten und niedrigsten Temperaturextremwerte sowie den größten Temperaturtagesgang der gemessenen Werte im Vergleich zu den vom Modell berechneten Werten. Dabei lassen sich folgende Übereinstimmungen oder Ähnlichkeiten feststellen:

In der Innenstadt werden tendenziell höhere Temperaturwerte erreicht. Das Untersuchungsareal „Innenstadt Nord“ liegt zum einen beim Temperaturmaximum auf dem ersten Platz, zum anderen weist es relativ hohe Temperaturminima sowohl beim Modell, als auch bei den Messungen auf. Der Temperaturtagesgang fällt in der Innenstadt Nord und Süd im Vergleich zum Umland niedriger aus. Die berechneten, bzw. gemessenen Temperaturkurven zeigen ein rasches Erreichen des Temperaturmaximums und einen verzögerten Temperaturrückgang bis zum Minimum (siehe Abbildung 17 und Abbildung 34).

Die Station „Innenstadt Süd“ (Königstraße) belegt bei den Messungen, im Gegensatz zum Untersuchungsareal „Innenstadt Süd“, dessen Werte vom Modell berechnet wurden, nur Platz 4 beim Temperaturmaximum, was zum Teil der Abschattung durch die Umgebung geschuldet zu sein scheint (siehe Kapitel 4.4.2).

Das Modell simuliert, ähnlich wie für das Untersuchungsareal „Innenstadt Nord“, relativ hohe Temperaturen am Nachmittag. Es ist anzunehmen, dass dies zumindest teilweise auf die dort vorgegebene Landnutzungsclassen „dichte Blockrandbebauung“ zurückzuführen ist. In der Realität liegt das Untersuchungsareal im Bereich dichter Bebauung in der Innenstadt, d. h. es ergibt sich diese Landnutzungsclassen bei einer Gitterauflösung von 100 m x 100 m. Bei genauer Betrachtung der Luftbilder für die beiden Untersuchungsareale in der Innenstadt (Abbildung 30, linke Spalte, untere beide Bilder) wird jedoch deutlich, dass der Teil „Innenstadt Süd“ etwas mehr von Alleebäumen

und Hinterhofbegrünung aufgelockert wird. Diese Tatsache und die direkte Lage der Messstation „Königstraße“ in einem Hinterhof mit nahem Baumbestand (Ausführung siehe Kapitel 5.2) tragen dazu bei, dass die Tagestemperaturen auf einem etwas niedrigerem Niveau verharren als bei der Temperaturkurve der Messstation „Wilhelmstraße“.

Das am Stadtrand gelegene Untersuchungsareal „Vilich-Müldorf“ und die dafür repräsentative Messstation „Nelly-Sachs-Weg“ zeichnen sich durch niedrige Temperaturminima und einen verhältnismäßig hohen Temperaturtagesgang aus. Die Tagestemperaturen werden vom Modell, relativ gesehen, etwas niedriger simuliert (siehe Tabelle 4, 4. Platz). Dies kann mit dem Stadtrandeinfluss zusammenhängen. Allerdings ist anzunehmen, dass die Temperaturmessungen der temporären Station „Nelly-Sachs-Weg“ der Realität näherkommen, denn schon in vorangegangenen Untersuchungen, wie zum Beispiel dem LANUV-Fachbericht „Klimawandelgerechte Metropole Köln“ (LANUV 2013) lieferten die Stadtrandstationen an Strahlungstagen ähnlich hohe Temperaturmaxima wie die Innenstadtstationen und unterschieden sich lediglich bei der gefühlten Temperatur.

Das am Westrand der Innenstadt gelegene, industriell geprägte Untersuchungsareal „Karlstraße“ und auch die dort liegende Messstation „Karlstraße“ zeigen eine ähnliche Tendenz wie das Untersuchungsareal „Vilich-Müldorf“. Strahlungsbedingt gibt es hohe Temperaturmaxima, allerdings nicht ganz so hoch wie in Teilen der Innenstadt, so dass sowohl bei den Messungen, als auch der Modellsimulation der dritte Platz (siehe Tabelle 4) belegt wird. Den Temperaturhöchstwerten folgt ein deutlicher abendlicher Temperaturrückgang bis zum frühen Morgen mit entsprechend niedrigen Temperaturminima, die bei der Modellsimulation im Verhältnis zu den anderen Untersuchungsgebieten noch niedriger liegen. Dies führt zu einer großen Tagestemperaturamplitude mit Platz 2 anhand der Messungen und Platz 1 beim Modell.

Tabelle 4: Einordnung der gemessenen und vom Modell berechneten Temperaturwerte für die jeweiligen Untersuchungsgebiete.

Rangfolge	höchstes Temp.-maximum	höchstes Temp.-maximum	niedrigstes Temp.-minimum	niedrigstes Temp.-minimum	größte Temp.-amplitude	größte Temp.-amplitude
	Messungen	Modell	Messungen	Modell	Messungen	Modell
1. Platz	Innenstadt Nord	Innenstadt Nord Innenstadt Süd	Vilich-Müldorf	Vilich-Müldorf	Vilich-Müldorf	Karlstraße
2. Platz	Vilich-Müldorf	Innenstadt Nord Innenstadt Süd	Karlstraße	Karlstraße	Karlstraße	Vilich-Müldorf
3. Platz	Karlstraße	Karlstraße	Innenstadt Süd	Innenstadt Nord	Innenstadt Nord	Innenstadt Süd
4. Platz	Innenstadt Süd	Vilich-Müldorf	Innenstadt Nord	Innenstadt Süd	Innenstadt Süd	Innenstadt Nord

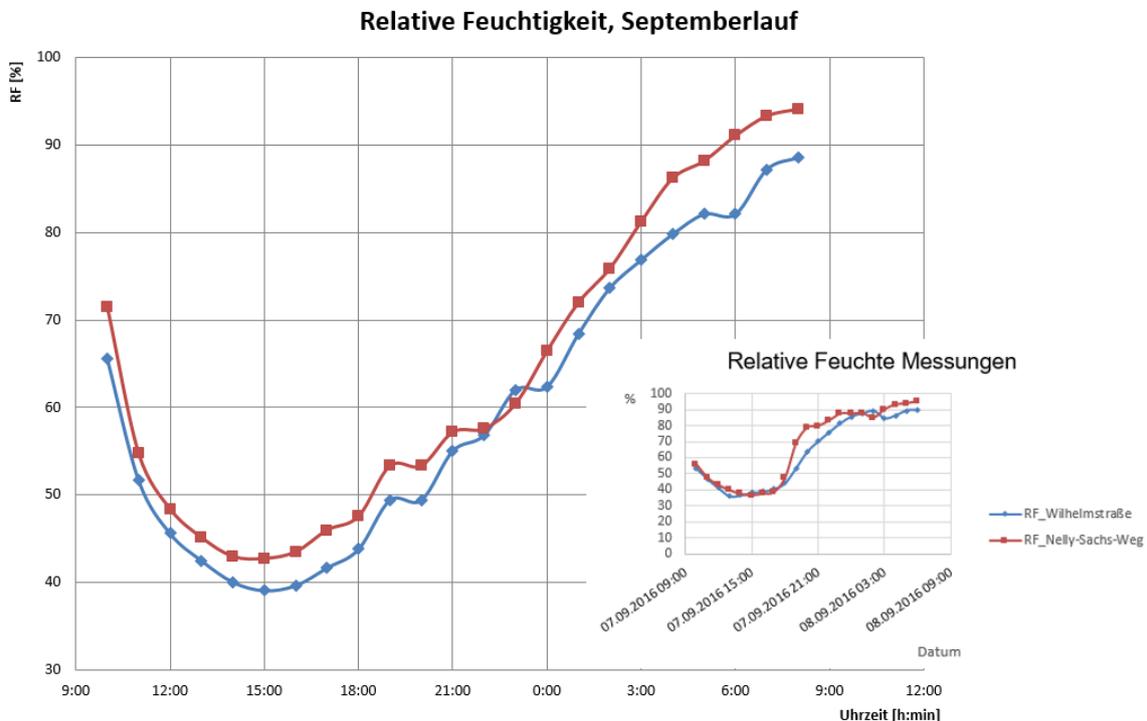


Abbildung 35: Mit MUKLIMO\_3 berechneter Tagesgang der relativen Feuchte für einen repräsentativen Strahlungstag im September (großes Bild) im Vergleich zu den gemessenen Werten der relativen Feuchte an einem Strahlungstag (08.09.2016) während der Messphase, auf beiden Graphiken entspricht die blaue Linie einer Innenstadtstation und die rote Linie einer Stadtrandstation.

Neben dem Tagesgang der Temperatur wurde auch der der relativen Luftfeuchte untersucht. Die vom Modell simulierten Kurvenverläufe der relativen Feuchte für einen Modelltag im September für den Bereich „nördliche Innenstadt“ (siehe Abbildung 35: großes Bild, blaue Linie) und „Vilich-Müldorf“ (siehe Abbildung 35, großes Bild, rote Linie) geben den typischen Verlauf für einen Strahlungstag wieder mit einem Absinken der Werte bis die Höchsttemperatur am Nachmittag erreicht ist und einem nachfolgenden Anstieg bis in die Morgenstunden, wobei die Werte der relativen Feuchte im Stadtrandbereich „Vilich-Müldorf“ in der Regel höher liegen als in der Innenstadt. Die auf Abbildung 35 im kleinen Bild dargestellten Verlaufskurven von den Messungen harmonisieren gut mit dem jeweiligen Tagesgang der relativen Feuchte, der an einem Strahlungstag im September 2016 an den Messstationen „Wilhelmstraße“ (siehe Abbildung 35, kleines Bild, blaue Linie) und „Nelly-Sachs-Weg“ (siehe Abbildung 35, kleines Bild, rote Linie) gemessen wurde.

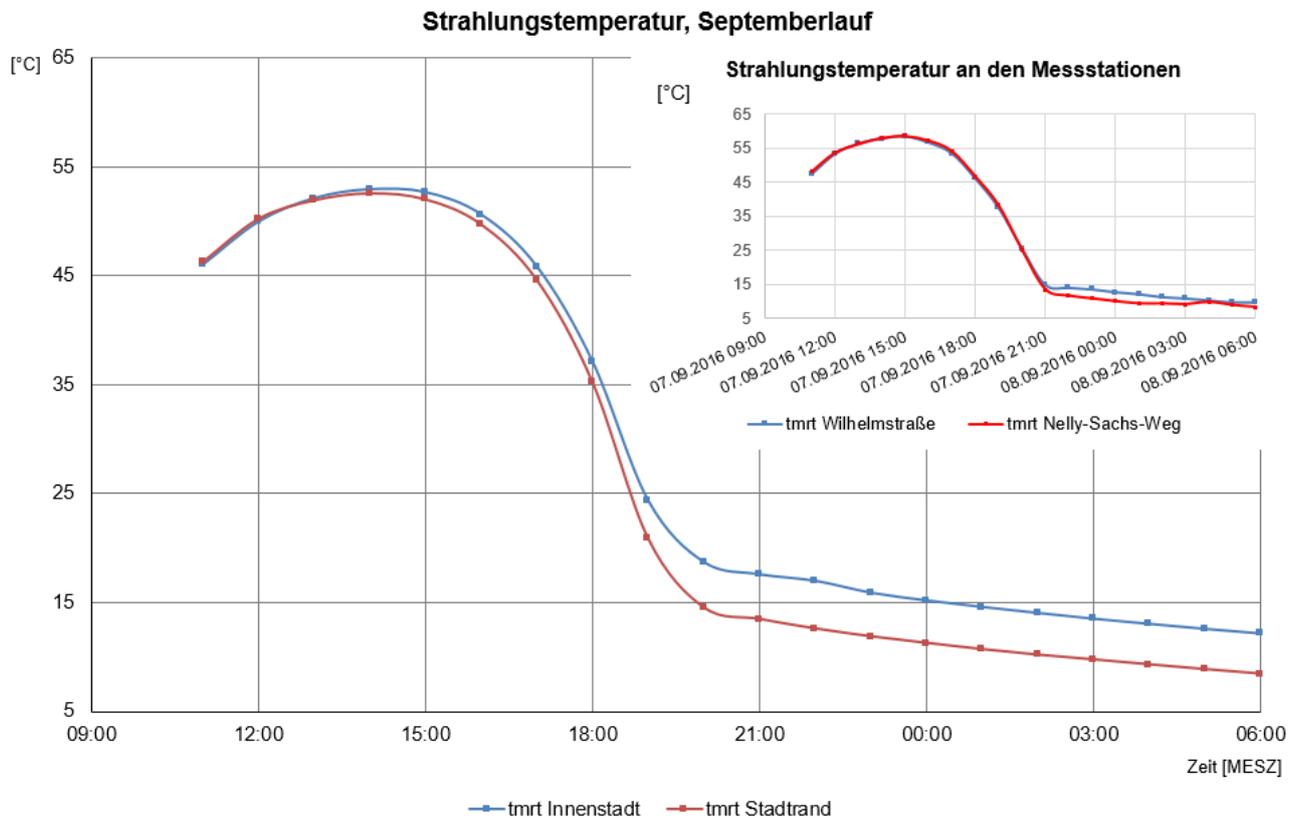


Abbildung 36: Mit MUKLIMO\_3 berechneter Tagesgang der Strahlungstemperatur (tmrt) für einen repräsentativen Strahlungstag im September (großes Bild) im Vergleich zu den gemessenen Werten der Strahlungstemperatur an einem Strahlungstag (07.09.2016) während der Messphase, auf beiden Graphiken entspricht die blaue Linie einer Innenstadtstation und die rote Linie einer Stadtrandstation.

Neben der Temperatur und der relativen Feuchte spielt auch die Strahlungstemperatur für die Berechnung der gefühlten Temperatur eine Rolle. Ein Vergleich des Tagesganges der durch Messungen ermittelten Werte mit den Modellwerten liefert einen

ähnlichen Kurvenverlauf. Im Tagesverlauf steigt sowohl die Strahlungstemperaturkurve für die Innenstadtlage (siehe Abbildung 36, blaue Linie), als auch für den Stadtrand (siehe Abbildung 36, rote Linie) an und zeigen beide einen nahezu identischen Verlauf. Zur Nacht sinken die Werte ab, wobei die blaue Kurve (Innenstadt) jeweils höhere Strahlungstemperaturwerte aufzeigt.

In einer abschließenden Bewertung zum MUKLIMO\_3-Referenzlauf ist festzustellen, dass sowohl der zeitliche Verlauf unterschiedlicher Modellparameter, als auch die räumliche Temperaturverteilung qualitativ einem Vergleich mit entsprechenden Messwerten zufriedenstellend standhält.

## **5.5 MUKLIMO\_3-Modellsimulationen für einzelne Klimaanpassungsmaßnahmen**

Für die Untersuchung der Anpassungsmaßnahmen wurde der MUKLIMO\_3-Referenzlauf als Basis genommen. Ausgehend von der Grundeinstellung des Referenzlaufs (siehe Kapitel 5.1) wurde jeweils ein Anpassungsparameter variiert, die übrigen aber konstant gehalten. Die Landnutzungsklassen innerhalb der sieben beschriebenen Untersuchungsgebiete (siehe Kapitel 5.3) wurden so modifiziert, dass prozentual zunehmende Dachbegrünung (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % und 100 %) simuliert werden konnte. Ebenso wurde in besagten Arealen mit der Dachalbedo, also dem Reflexionsvermögen der Dächer, auf Grund von Farbe und Material, verfahren. Sukzessive wurde (in 10 %-Schritten) die Albedo von 20 % bis zu einem Wert von 80 %, der beispielsweise durch sehr helle Dachziegel erzielt werden kann, erhöht.

Als weitere Klimaanpassungsmaßnahme wurde innerhalb der Untersuchungsgebiete mit dem Modell eine Änderung des Versiegelungsgrades nicht bebauter, asphaltierter Fläche durchgeführt. Hierbei wurde ebenfalls in 10 %-Schritten vorgegangen.

Um ein Gefühl für die thermische Wirksamkeit der unterschiedlichen Anpassungsmaßnahmen zu erhalten, wurde zunächst der vermutlich nicht realisierbare „Extremfall“ der Maßnahmen betrachtet, das heißt entweder 100 % Dachbegrünung oder 80 % Dachalbedo oder eine fast vollständige Entsiegelung der asphaltierten Fläche zwischen den Gebäuden in den jeweiligen Untersuchungsarealen. Die versiegelte Fläche, die je nach Landnutzungsklasse zwischen ca. einem Drittel der Gesamtfläche (z. B. Einfamilienhäuser) und ca. der Hälfte der Gesamtfläche (z. B. Blockrandbebauung) einnimmt, wird auf einen Versiegelungsgrad von nur 10 % der Gesamtfläche gebracht (siehe Abbildung 3).

Um den Unterschied zwischen dem Referenzlauf und einem Modelllauf mit Klimaanpassungsmaßnahmen darzustellen wurden Differenzbilder berechnet. So wurde jeweils von der durch Klimaanpassungsmaßnahmen modifizierten Temperaturverteilung die Temperaturverteilung des Referenzlaufes abgezogen.

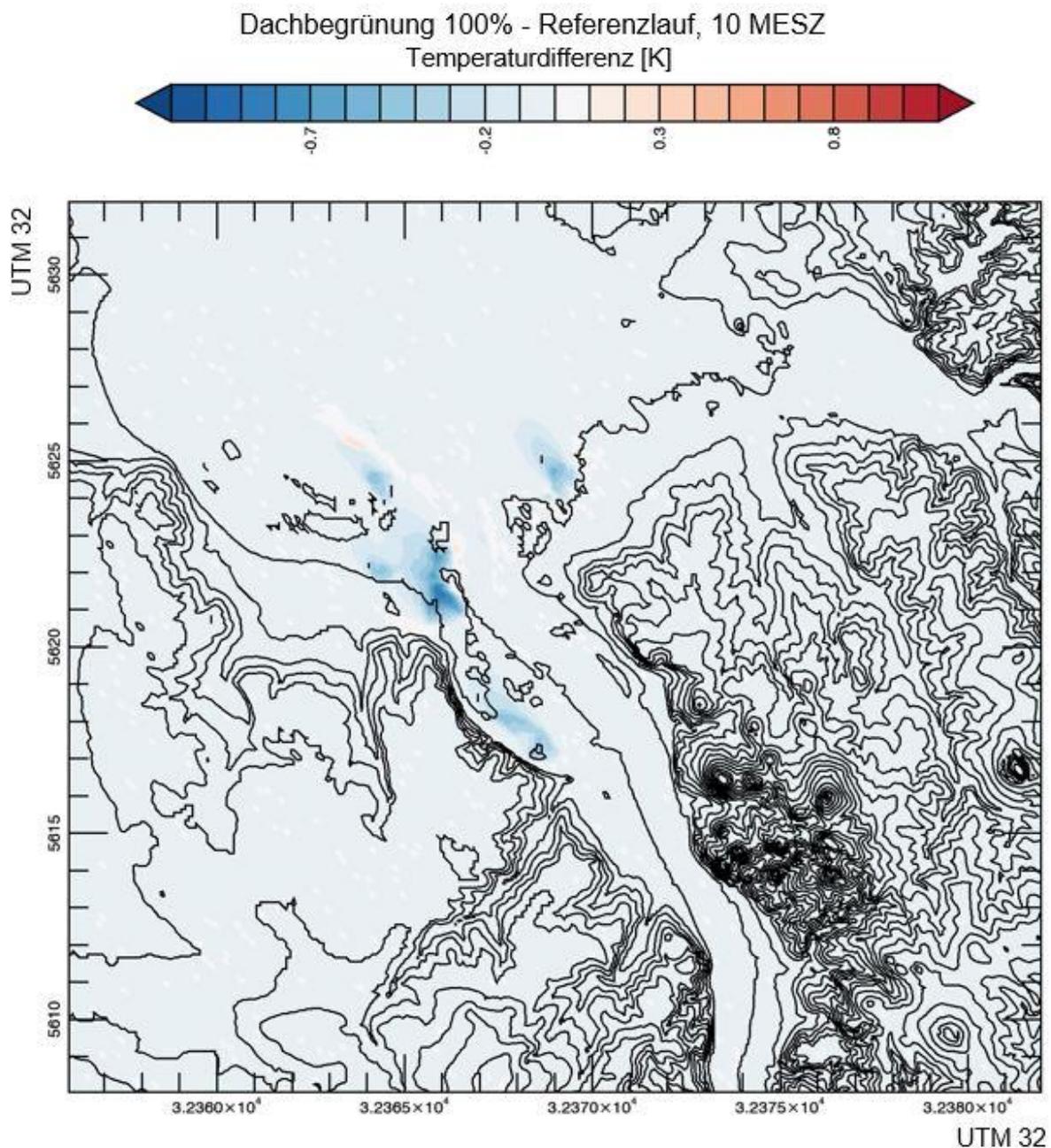


Abbildung 37: Verteilung der berechneten Temperaturdifferenz in Bodennähe um 10:00 Uhr (MESZ) zwischen dem Rechenlauf mit einer Dachbegrünung von 100 % in den Untersuchungsgebieten und dem Referenzlauf; schwarze Linien: Isohypsen (Linien gleicher orographischer Höhe, erste Isohypse hier bei 60 m, dann in 20 m-Schritten).

In Abbildung 37 sind bereits für 10 Uhr (MESZ) Temperaturunterschiede zwischen dem Referenzlauf und dem modifizierten Lauf mit einer Dachbegrünung von 100 % im Bereich der Untersuchungsgebiete sehr gut zu erkennen. Erwartungsgemäß fällt die Differenz im Bereich der Innenstadt mit geschlossener Blockrandbebauung besonders hoch aus, meist über 0,5 Kelvin, in der südlichen Innenstadt sogar fast 1 Kelvin. Geringere Unterschiede, aber ebenfalls eine positive Auswirkung, in Form einer leichten Abkühlung, sind in den Außenbezirken Auerberg, Vilich-Müldorf (Nelly-Sachs-Weg) und Friesdorf zu erkennen. Die Klimaanpassungsmaßnahmen (in diesem Fall Veränderung der Dachalbedo auf 80 %) wirken sich in der Referenzhöhe von 2 m nicht nur in

den jeweiligen Untersuchungsarealen aus, sondern auch noch einige 100 m leeseitig in Strömungsrichtung, d.h. hier aufgrund der vorgegebenen Anströmung aus Südost nach Nordwesten.

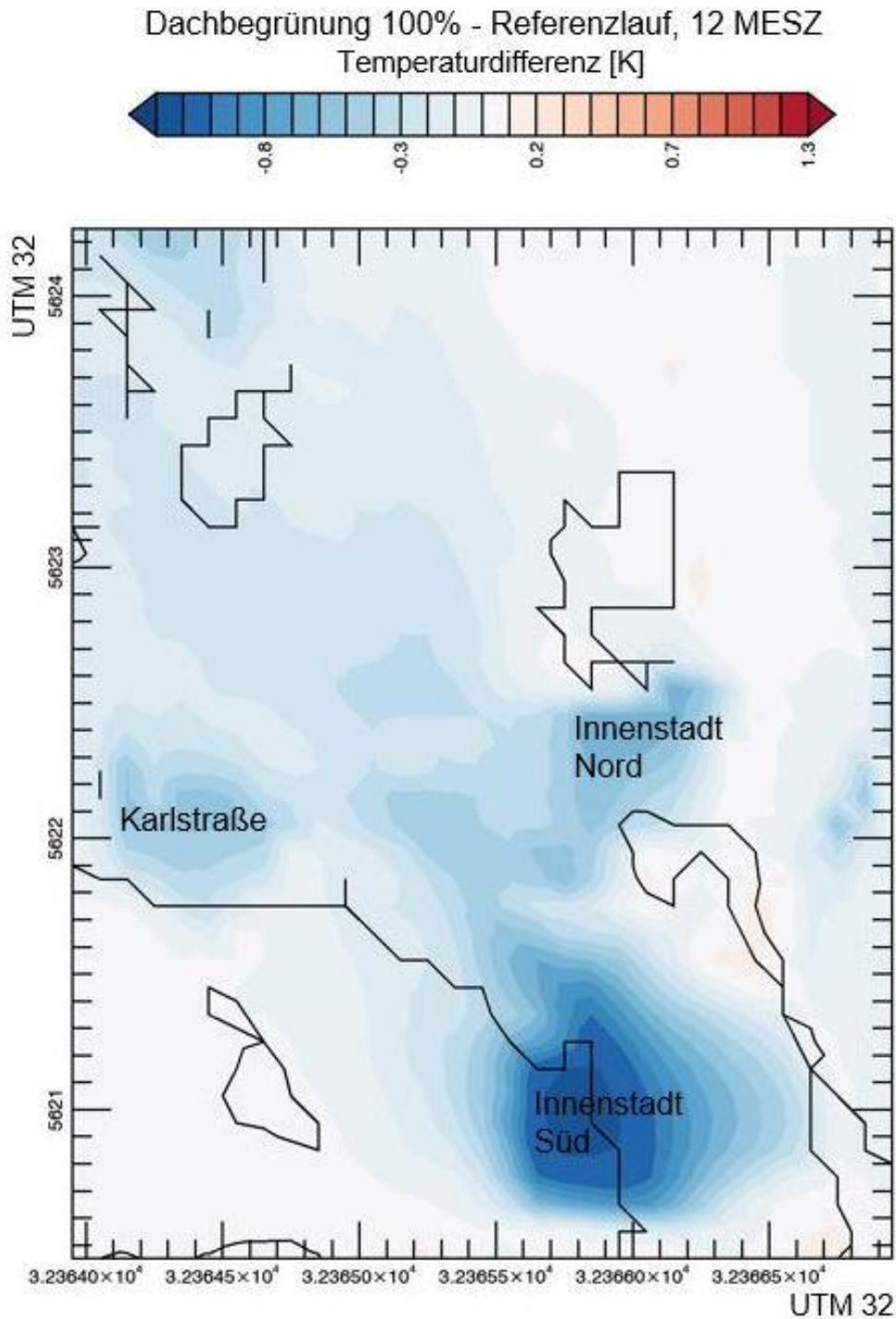


Abbildung 38: Verteilung der Temperaturdifferenz in Bodennähe um 12:00 Uhr (MESZ) zwischen dem für die Untersuchungsgebiete modifizierten Lauf mit einer Dachbegrünung von 100 % und dem Referenzlauf. Ausschnitt mit Untersuchungsarealen: Innenstadt-Süd, Innenstadt-Nord und Karlstraße; schwarze Linien: Isohypsen (Linien gleicher orographischer Höhe, erste Isohypse hier bei 60 m, dann in 20 m-Schritten (siehe Abbildung 37)).

Zum Mittag intensiviert sich der Temperaturunterschied zwischen dem Referenzlauf und dem modifizierten Lauf. Ein vergrößerter Ausschnitt zum 12 Uhr MESZ-Termin (siehe Abbildung 38) zeigt die höchste Differenz von ca. 1,3 Kelvin in der südlichen Innenstadt. Der Effekt des Transports von niedrigeren Temperaturwerten in Strömungsrichtung ist gut zu sehen.

Wenn die Dächer in den Untersuchungsarealen komplett begrünt werden (siehe Abbildung 37), werden die thermischen Auswirkungen auf das Referenzniveau in 2 m Höhe in nahezu identischer Weise simuliert wie die Auswirkungen durch Veränderung des Reflexionsvermögens der Dächer (Dachalbedo 80 %, ohne Abbildung).

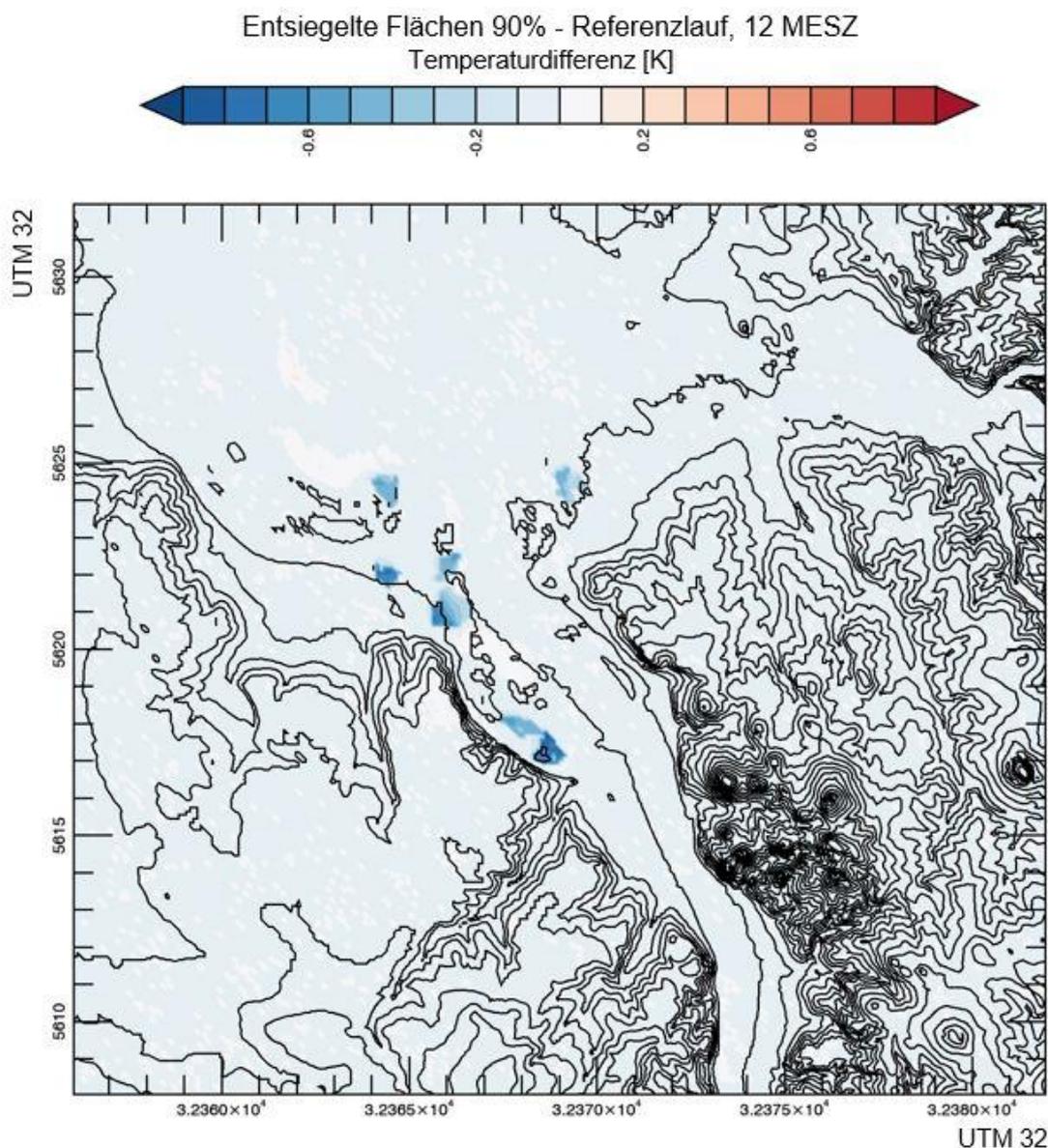


Abbildung 39: Verteilung der Temperaturdifferenz in Bodennähe um 12:00 Uhr (MESZ) zwischen dem für die Untersuchungsgebiete modifizierten Lauf mit einer Entsiegelung aller Flächen zwischen den Gebäuden bis zu einem Versiegelungsgrad von 10 % und dem Referenzlauf; schwarze Linien: Isohypsen (Linien gleicher orographischer Höhe, erste Isohypse hier bei 60 m, dann in 20 m-Schritten (siehe Abbildung 37)).

Wenn die Dächer in den Untersuchungsarealen komplett begrünt werden (siehe Abbildung 37), werden die thermischen Auswirkungen auf das Referenzniveau in 2 m Höhe in nahezu identischer Weise simuliert wie die Auswirkungen durch Veränderung des Reflexionsvermögens der Dächer (Dachalbedo 80 %, ohne Abbildung).

Bei der Entsiegelung der jeweiligen Untersuchungsgebiete bis zu einem Versiegelungsgrad von nur 10 % (siehe Abbildung 39) wirkt sich diese Anpassungsmaßnahme in der Referenzhöhe von 2 m thermisch deutlicher aus als die Veränderungen, die im Dachniveau vorgenommen wurden. So kann um 12 Uhr MESZ in einigen Untersuchungsarealen eine Temperaturdifferenz, und somit Abkühlung gegenüber dem Referenzlauf, von fast einem Kelvin abgelesen werden. Da im Straßenniveau die Windgeschwindigkeiten niedriger sind als im Dachniveau, findet die Abkühlung nur direkt über dem Untersuchungsareal statt und es können in den Modellergebnissen keine nennenswerten Auswirkungen auf benachbarte Gebiete in Strömungsrichtung festgestellt werden. So sind die Größe und Umriss der Untersuchungsareale, auf Grund der Temperaturdifferenzen zwischen Gebäuden mit Dachbegrünung und ohne Dachbegrünung, klar erkennbar. Die größten Temperaturdifferenzen werden bei der Entsiegelung der dicht bebauten Gebiete (Untersuchungsareale in der Innenstadt) ab dem Mittag registriert, dann wenn in Verbindung mit der Lufttemperaturerhöhung, sich der Asphalt sehr stark erwärmt und gleichzeitig über entsiegelten Flächen Feuchtigkeit verdunsten kann, was einen Temperaturanstieg mindern würde. Um 13 Uhr MESZ gibt es im Innenstadtbereich lokal Temperaturdifferenzen über 1,5 Kelvin.

Wie sich die besprochenen Klimaanpassungsmaßnahmen zu unterschiedlichen Tageszeiten auswirken, wird in der Folge anhand von Balkendiagrammen gezeigt (siehe Abbildung 40).

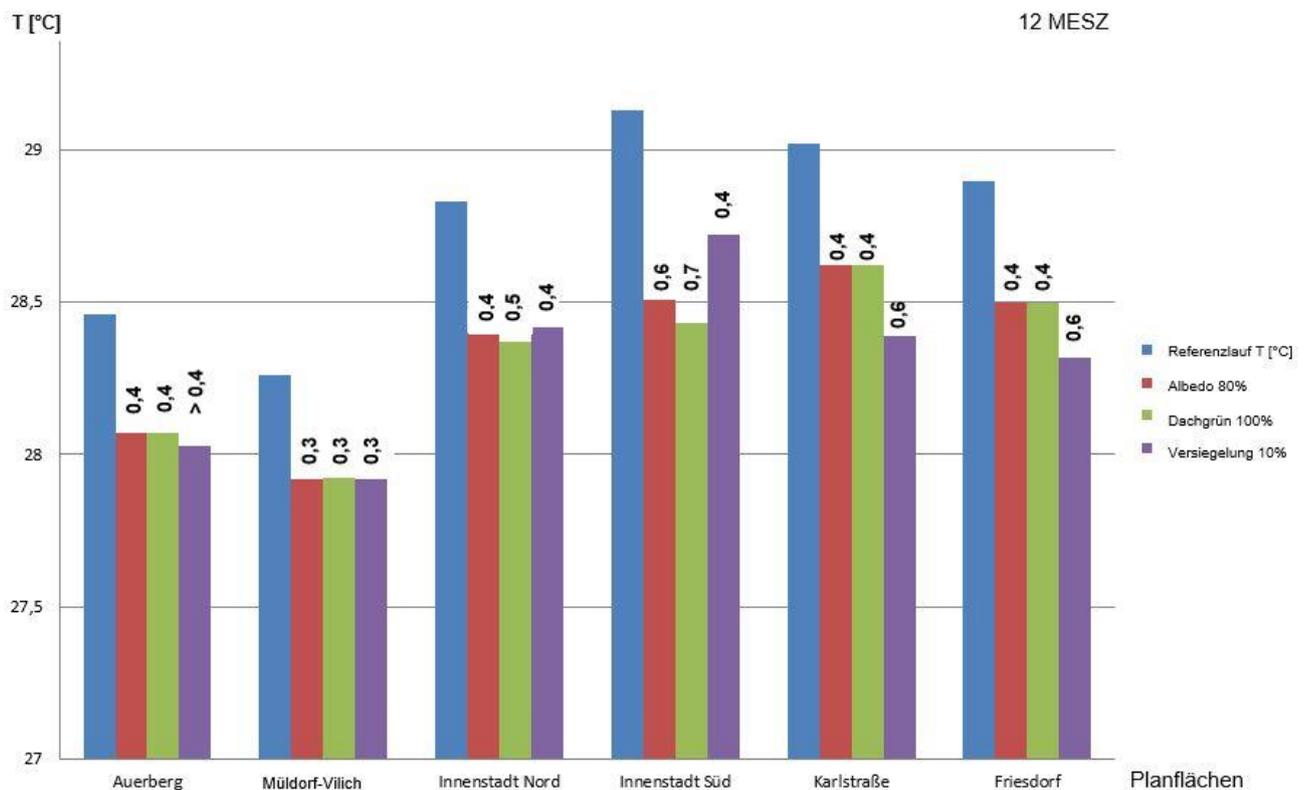


Abbildung 40 (vorige Seite): Über die Planflächen gemittelte bodennahe Temperatur (in °C) um 12:00 Uhr (MESZ), dabei im Vergleich: Referenzlauf (blauer Balken) zu - bei sonst unveränderten Bedingungen - über die jeweilige Planfläche geänderten Reflexionsvermögen der Dächer (Albedo 80 %) (roter Balken), über die jeweilige Planfläche simulierte vollständige Dachbegrünung von 100 % (grüner Balken), über die jeweilige Planfläche Entsiegelung der Fläche zwischen den Gebäuden bis zu einem Versiegelungsgrad von 10 % (lila Balken). Die über den Balken angegebenen Zahlenwerte liefern die Differenz (in Kelvin) zum Referenzlauf (blauer Balken): Positive Werte bedeuten eine Temperaturabnahme.

Das Balkendiagramm (siehe Abbildung 40) bestätigt in seiner Aussage die Abbildungen 37 bis 39. Im Schnitt liegen die Temperaturen durch die untersuchten Klimaanpassungsmaßnahmen in den jeweiligen Plangebieten zur Mittagszeit um ca. 0,5 Kelvin unter dem Wert des Referenzlaufes (blauer Balken). In den Innenstadtbereichen, vor allen Dingen in der südlichen Innenstadt fällt die simulierte Abkühlung geringfügig stärker aus.

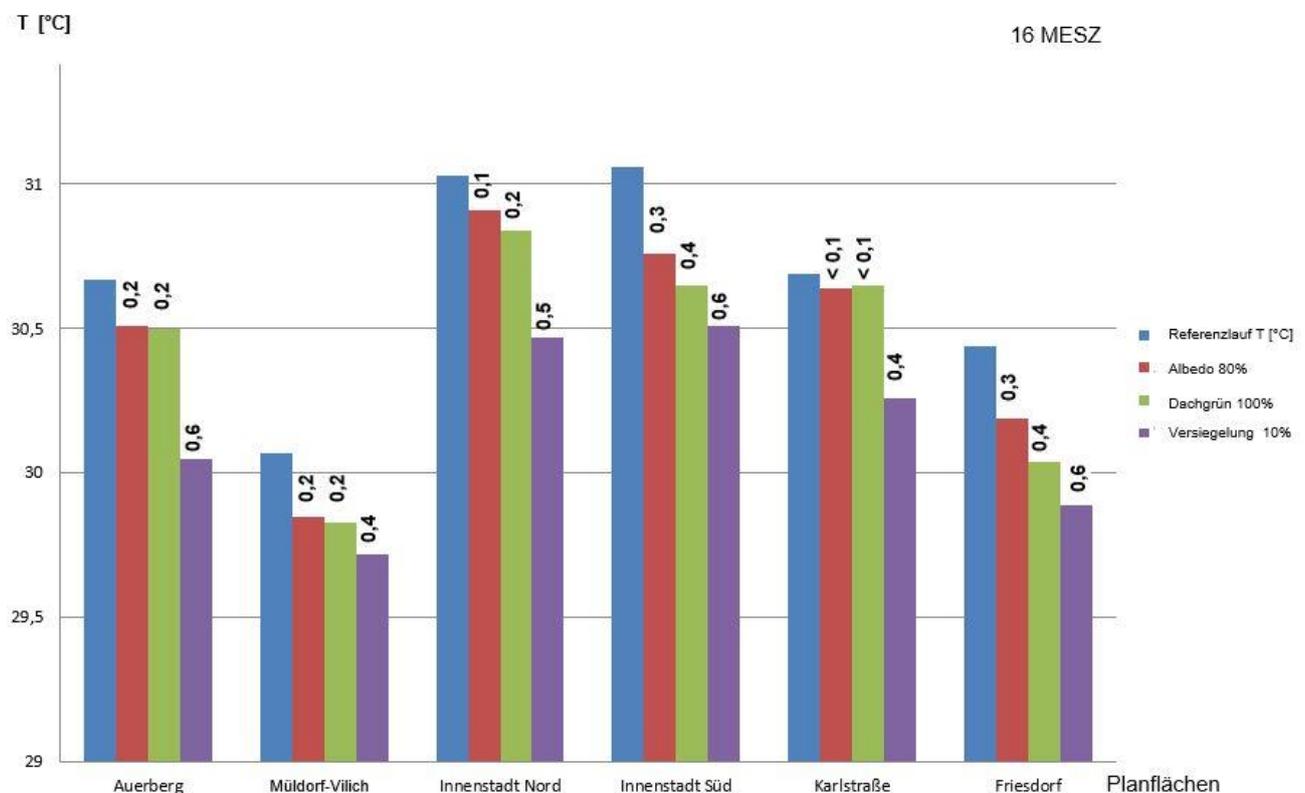


Abbildung 41: Über die Planflächen gemittelte bodennahe Temperatur (in °C) um 16:00 Uhr (MESZ), dabei im Vergleich: Referenzlauf (blauer Balken) zu - bei sonst unveränderten Bedingungen - über die jeweilige Planfläche geänderten Reflexionsvermögen der Dächer (Albedo 80 %) (roter Balken), über die jeweilige Planfläche simulierte vollständige Dachbegrünung von 100 % (grüner Balken), über die jeweilige Planfläche Entsiegelung der Fläche zwischen den Gebäuden bis zu einem Versiegelungsgrad 10 % (lila Balken). Die über den Balken angegebenen Zahlenwerte liefern die Differenz zum Referenzlauf (blauer Balken).

In den Nachmittagsstunden fällt der thermische Unterschied in den verschiedenen Untersuchungsarealen zwischen Referenzlauf (blauer Balken) und verändertem Modelllauf (roter und grüner Balken) durch Klimaanpassungsmaßnahmen geringer aus als in dem 12 Uhr-Lauf. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass dies auf die thermische Durchmischung, auf Grund der durch die Einstrahlung hervorgerufenen Turbulenz,

während des Tages zurückzuführen ist. Anders verhält es sich bei der Simulation des geringeren Versiegelungsgrades zwischen den Gebäuden (lila Balken). Hierbei ist in den meisten Untersuchungsarealen noch eine Verstärkung der Temperaturdifferenz zwischen Referenzlauf und modifiziertem Lauf zu beobachten. Die thermische Verbesserung (Abkühlung) im Referenzniveau (2 m) beträgt in der Regel mehr als 0.5 Kelvin und ist dadurch zu erklären, dass der Asphalt sich nach 12 Uhr MESZ bei Sonneneinstrahlung noch etwas weiter aufheizt.

Nachdem die Differenzenbilder (siehe Abbildung 37 bis Abbildung 39) nur grob die räumliche Temperaturverteilung innerhalb der Untersuchungsareale wiedergeben, soll nun eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Planungsgebiete in vergrößertem Maßstab erfolgen.

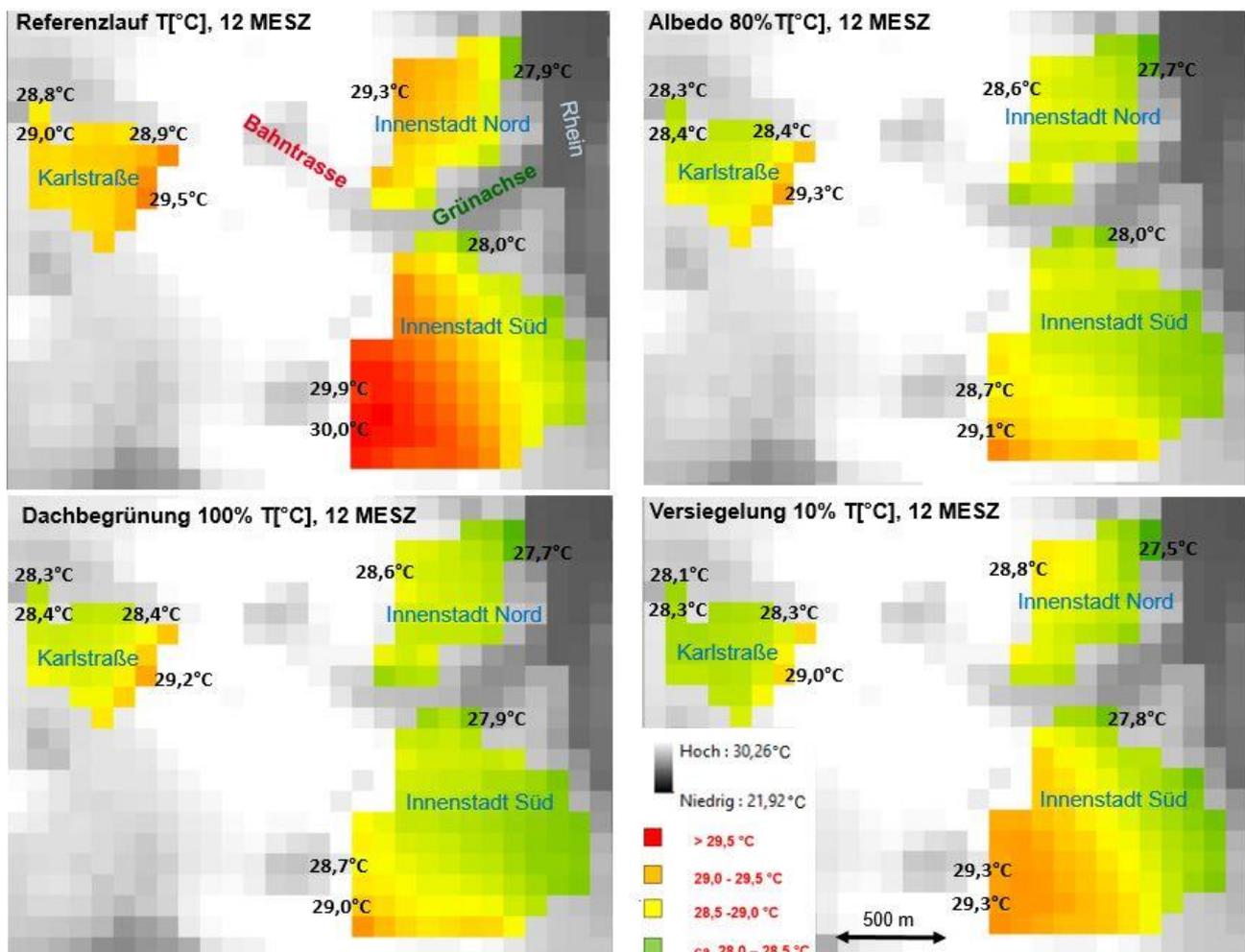


Abbildung 42: Simulierte bodennahe Temperaturverteilung in der Bonner Innenstadt um 12:00 Uhr (MESZ): kolorierte Darstellung für die Plangebiete (siehe Legende) und Grauton-Darstellung für die Temperaturverteilung außerhalb der Plangebiete im Hintergrund (siehe Legende). Referenzlauf (links oben) im Vergleich zu den Modellläufen mit Klimaanpassungsmaßnahmen. Für ausgewählte Modellgitterzellen sind zusätzlich die Werte der Lufttemperatur als Zahl angegeben.

Das flächenmäßig größte Untersuchungsgebiet ist das Gebiet „Innenstadt Süd“. Dort lässt sich beim Referenzlauf zur Mittagszeit ein Temperaturogensatz von 2 Kelvin

innerhalb der Untersuchungsfläche erkennen. Da das Gebiet, bezüglich der Landnutzung als Modelleingabedaten, homogen ist, müssen die Temperaturunterschiede auf umgebenden orographischen und naturräumlichen Gegebenheiten basieren. So ist davon auszugehen, dass der Rhein, der im Nordosten und Osten (jeweils rechter Bildrand auf den genordeten Darstellungen (siehe Abbildung 42) als dunkelgraue und somit kühlere Fläche) zu sehen ist, den nördlichen und östlichen Rand der Gebiete (Innenstadt Nord und Süd) klimatisch günstig beeinflusst. Innerhalb der Untersuchungsfläche Innenstadt Süd liegt die niedrigste Temperatur bei 28 °C. Diese wurde um die Mittagszeit im Nordosten des Gebietes simuliert. Im Gegensatz dazu, liegt der höchste vom Modell ermittelte Temperaturwert mit 30 °C im Südwesten des Bereiches. Dort werden auch die höchsten Temperaturen für einen Sommertag mit austauscharmer Wetterlage für den Gesamtuntersuchungsbereich (Stadt Bonn plus Umgebung) gerechnet.

Wie groß sind nun die thermischen Auswirkungen auf die Fläche gesehen, wenn man jeweils eine mit dem Modell gerechnete Klimaanpassungsmaßnahme betrachtet?

Gerade im Südwesten des Bereichs „Innenstadt Süd“, also dort, wo es am wärmsten ist, konnte durch die Simulation der betrachteten Klimaanpassungsmaßnahmen der größte positive Effekt erzielt werden. Die Temperatur konnte in diesem stark wärmebelasteten Bereich immerhin um fast ein Kelvin reduziert werden. Das ist insofern erwähnenswert, weil die Anpassungsmaßnahmen bezüglich der Albedo (80 %) und Dachbegrünung (100 %) im Dachniveau vorgenommen werden und die Auswirkungen im Straßenniveau in der Referenzhöhe von 2 m über Grund, also dort, wo sich der Mensch bewegt, simuliert wurden. Auch in der Mitte des Untersuchungsareals „Innenstadt Süd“ ergibt sich durch die Simulation von Dachbegrünung auf allen Dächern oder durch Änderung der Reflexion des Sonnenlichtes von Dächern auf 80 %, beispielsweise auf Grund von hellen Dachziegeln, ein Temperaturunterschied zum Referenzlauf zwischen 0,5 und 1 K. Lediglich im Norden und Osten des Bereichs, also dort, wo sich der Rhein klimatisch günstig auswirkt, greifen die Klimaanpassungsmaßnahmen kaum.

In dem deutlich kleineren Areal „Innenstadt Nord“ gibt es beim Referenzlauf auch eine Temperaturdifferenz zwischen dem Ostrand und dem Westrand des Gebietes, aber nur von etwas mehr als einem Kelvin. Hier beträgt, auf Grund der kleineren Arealgröße, die Distanz zwischen den Gitterzellen, die nahe am Rhein liegen mit einem Temperaturwert von 27,9 °C und den weiter westlich liegenden Gitterzellen mit einer Temperatur von 29,3 °C maximal 500 m. Deswegen fällt der Temperaturgegensatz vermutlich nicht so hoch aus. Die nicht ganz so stark aufgeheizten Gitterzellen befinden sich im Osten des Areals, also in unmittelbarer Nähe zum Rhein, bzw. im Südosten, nahe dem Hofgarten („Grünachse“ siehe Abbildung 42). Auch im Gebiet „Innenstadt Nord“ verhält es sich so, dass die am stärksten wärmebelasteten Gebiete am meisten durch die Klimaanpassungsmaßnahmen (Dachbegrünung, Veränderung der Albedo) profitieren. Dort kann die Temperatur um ca. 0,7 Kelvin gesenkt werden. In den thermisch begünstigten Gitterzellen am Rhein ist ein kaum merklicher Temperaturrückgang von 0,2 Kelvin zu beobachten.

Das auf der Abbildung 42 im Westen dargestellte, eher kleine Untersuchungsgebiet „Karlstraße“ ist rein industriell geprägt und erstreckt sich zwischen Bahntrasse und

Autobahn. Westlich der Autobahn steigt das Gelände bereits Richtung Hardthöhe an. Die Strömungsrichtung orientiert sich bei windschwachen Lagen an diesen Trassen, so dass die vorherrschende Windrichtung Südost bis Süd ist. Südöstlich des Areals liegt das Innenstadtgebiet mit geschlossener Blockrandbebauung. So ist es erklärbar, dass die, im Vergleich zur übrigen Fläche um etwas mehr als ein halbes Grad höheren Temperaturwerte sich im Osten des Gebiets befinden. Dort lässt sich allerdings durch die Klimaanpassungsmaßnahmen nur eine sehr geringe Temperaturabsenkung erzielen. Das kann damit zusammenhängen, dass die modifizierte Fläche eher klein ist und im Luv, wie bereits ausgeführt, dichte Bebauung liegt, aus der überwärmte Luft in das Areal hineinweht.

Bei allen drei Innenstadtgebieten wirkt sich eine Entsiegelung bis zu einem Versiegelungsgrad von 10 % thermisch einheitlicher über die Fläche aus, als bei den übrigen Anpassungsmaßnahmen. Die dadurch entstandene Temperaturreduktion liegt allgemein zwischen 0,4 und 0,7 Kelvin und beträgt lediglich im Nordosten der „Innenstadt (Süd)“ nur 0,2 Kelvin.

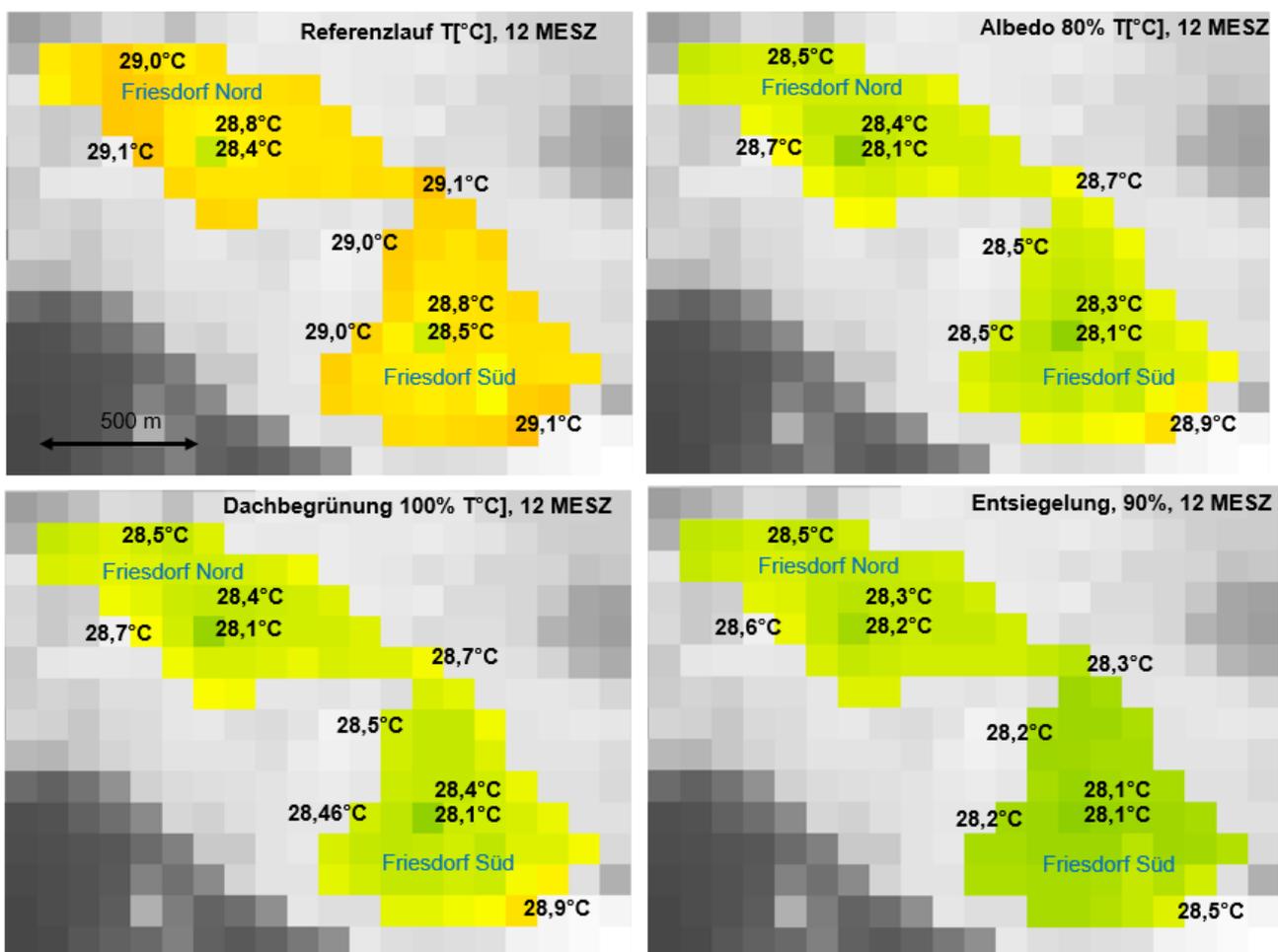


Abbildung 43: Temperaturverteilung in Bonn Friesdorf um 12:00 Uhr (MESZ): kolorierte Darstellung (siehe Legende Abbildung 42) und Grauton-Darstellung für den Hintergrund (siehe Legende Abbildung 42). Referenzlauf im Vergleich zu den modifizierten Modellläufen.

Sowohl das durch Mehrfamilien- und Doppelhäuser geprägte Untersuchungsgebiet „Friesdorf Nord“, als auch das überwiegend mit Industriegebäuden dicht bebaute

Areal „Friesdorf Süd“ (siehe Abbildung 43) liegen in einer Entfernung zwischen 1,5 und 2,5 km zum Rhein. Bei einer Anströmrichtung aus Südost befindet sich das Areal direkt im Lee des Areals „Friesdorf Süd“. Somit hat die Nähe zum Rhein nur noch einen untergeordneten Einfluss und die Modellergebnisse zeigen keine signifikanten thermischen Unterschiede innerhalb der Untersuchungsgebiete. Das räumliche Temperaturmaximum von Friesdorf Nord und Süd wird mit knapp über 29 °C ungefähr ein Grad niedriger simuliert als im Südwesten der „Innenstadt Süd“. Das räumliche Temperaturminimum in Friesdorf liegt beim Referenzlauf mit 28,4 °C ein knappes halbes Grad über den in Rheinnähe gelegenen Gitterzellen der Bonner Innenstadt. Somit verhält sich die Temperaturverteilung in Friesdorf einheitlicher als in der Innenstadt. Sowohl in „Friesdorf (Nord)“, als auch in „Friesdorf (Süd)“ wurde nur ein Temperaturunterschied von etwa 0,5 Kelvin über die Fläche berechnet.

Bei Betrachtung der Verteilung der Landnutzungsarten in Bonn-Friesdorf (siehe Abbildung 30) und im Vergleich dazu der Temperaturverteilung des vom Modell berechneten Referenzlaufs (siehe Abbildung 43 links oben), sieht man die Ursache des, wenn auch kleinen, Temperaturunterschieds. Ziemlich mittig befindet sich sowohl in Friesdorf Nord, als auch in Friesdorf Süd eine Grünfläche. Für die jeweiligen Gitterzellen wurde ein ungefähr 0,5 Kelvin niedrigerer Temperaturwert als an den Rändern der beiden Gebiete berechnet. Geringe thermische Auswirkungen der Grünfläche sind in den benachbarten Gitterzellen noch erkennbar.

Durch Klimaanpassungsmaßnahmen, wie Dachbegrünung 100 % oder Änderung der Dachalbedo auf 80 %, kann das Temperaturniveau in der Fläche um ca. 0,5 Kelvin gesenkt werden. Dabei gibt es keine nennenswerten räumlichen Unterschiede, bzw. fallen diese so klein aus, dass, in Anbetracht der Ungenauigkeiten, eine Interpretation nicht gerechtfertigt ist. Nach Durchführung einer starken Entsiegelung, bis zu einem Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden von nur 10 %, werden niedrigere Temperaturwerte erreicht als bei den Anpassungsmaßnahmen auf den Dächern. Allerdings beträgt auch für diese Klimamaßnahme die Temperaturdifferenz zum Referenzlauf immer weniger als 1 K.

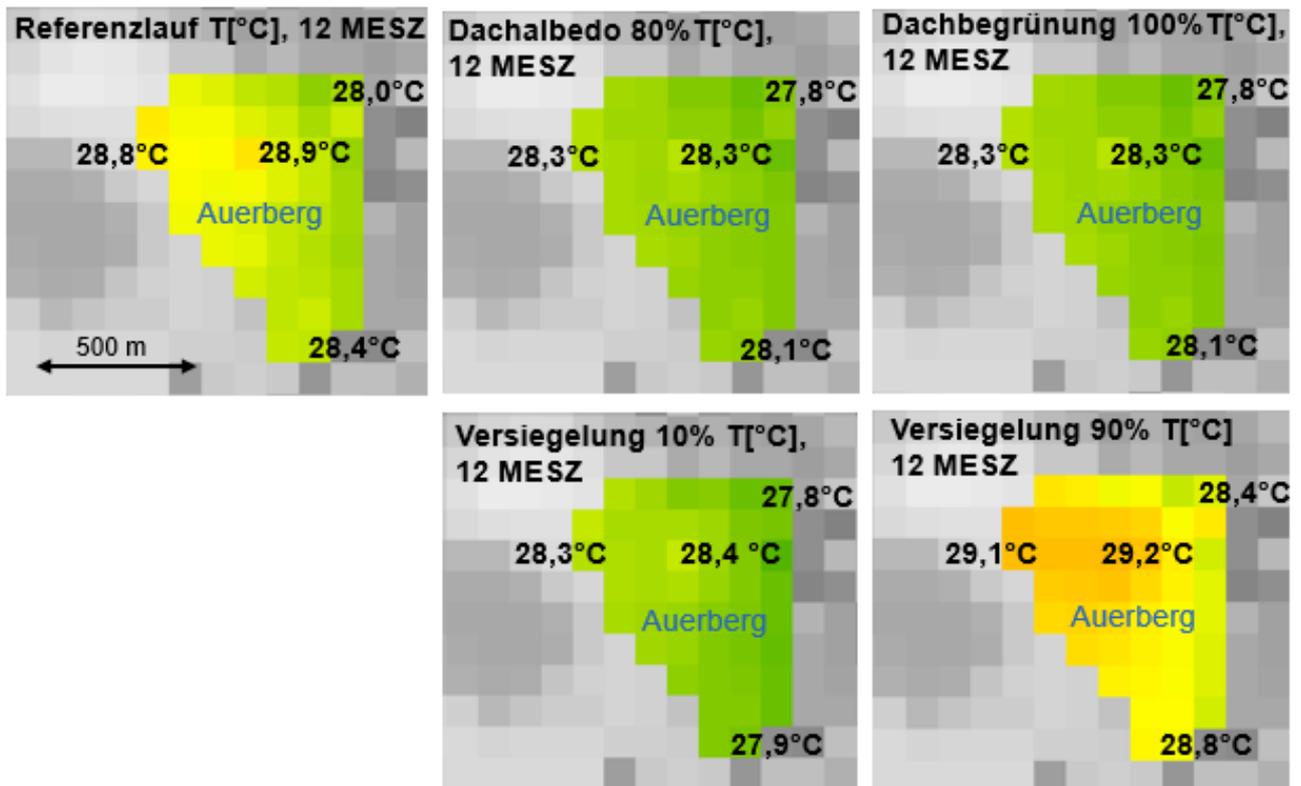


Abbildung 44: Temperaturverteilung in Bonn Auerberg um 12:00 Uhr (MESZ): kolorierte Darstellung (siehe Legende Abbildung 42) und Grauton-Darstellung für den Hintergrund (siehe Legende Abbildung 42). Referenzlauf im Vergleich zu den modifizierten Modellläufen.

Das aus einer Mischung von Doppelhaus- und Zeilenhausbebauung, sowie Mehrfamilienhäusern, aber auch Einfamilienhäusern zusammengesetzte Untersuchungsgebiet „Auerberg“ hat in der Mitte des nördlichen Teils eine Modell-Gitterzelle (100 m x 100 m) mit geschlossener Blockrandbebauung (siehe Abbildung 30, zweite Zeile, rechte Spalte). Diese weist zwar gegenüber dem Westrand des Untersuchungsareals (28,8 °C) kaum höhere Temperaturwerte (28,9 °C) auf, aber im Nordosten des Areals werden fast 1 Kelvin niedrigere Werte (28,0 °C) ermittelt (siehe Abbildung 44). Dort scheinen sich die im Luv (hier Südosten) gelegenen Grünflächen und bewaldeten Flächen, rund um die Burg Rheindorf, thermisch günstig auszuwirken.

Genau, wie in der „Innenstadt Süd“ lässt sich im thermisch begünstigten Bereich im Nordosten von Auerberg durch die unterschiedlichen Klimaanpassungsmaßnahmen nur eine sehr geringe Verbesserung (Abkühlung) erzielen. In den übrigen weiter westlich gelegenen Gitterzellen kann die Temperatur durch Klimaanpassungsmaßnahmen um 0,5 Kelvin oder mehr abgesenkt werden. Entsiegelungsmaßnahmen bis zu einem Versiegelungsgrad von 10 % zwischen den Gebäuden verbessern die thermische Situation im Westen des Bereichs auch um etwas mehr als 0,5 Kelvin, im Osten ist jedoch keine signifikante Kühlwirkung der Entsiegelung zu verzeichnen. Der Temperaturunterschied zwischen dem mit nur geringer Versiegelung angenommenen Untersuchungsareal „Auerberg“ (Versiegelungsgrad 10 %) und dem ebenso mutmaßlich sehr stark versiegelten Areal (Versiegelungsgrad 90 %) beträgt ungefähr zwischen einem

haben und einem Kelvin. Im Laufe des Nachmittags bringt die Entsiegelungsmaßnahme jedoch einen etwas deutlicheren Effekt (siehe Abbildung 40).

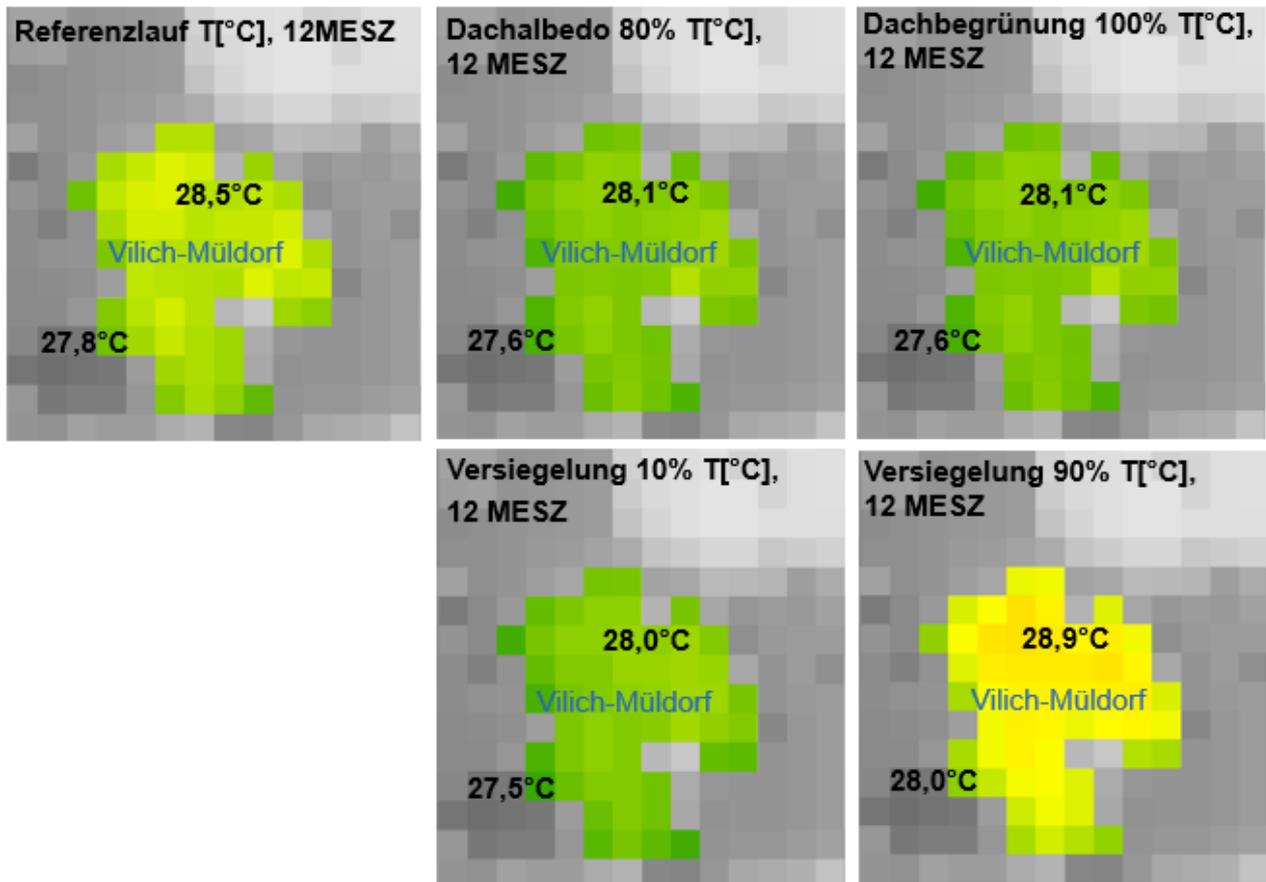


Abbildung 45: Temperaturverteilung in Bonn Vilich-Müldorf um 12:00 Uhr (MESZ): kolorierte Darstellung (siehe Legende Abbildung 42) und Grauton-Darstellung für den Hintergrund (siehe Legende Abbildung 42). Referenzlauf im Vergleich zu den modifizierten Modellläufen.

Das Untersuchungsareal „Vilich-Müldorf“ hat den prozentual gesehen höchsten Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern und damit auch unversiegelten Flächen, die ca. 40 % des Untersuchungsareals einnehmen. So ist es nachvollziehbar, dass das über die Fläche gemittelte Temperaturniveau vom Modell niedriger ist als beispielsweise die Innenstadtareale (siehe Abbildung 30). Kleine Temperaturdifferenzen innerhalb der Fläche von etwas mehr als 0,5 Kelvin lassen sich auf die unterschiedlichen Bebauungstypen zurückführen. Die höheren Temperaturwerte sind im Bereich der Doppelhaus- und Zeilenhausbebauung mit geringerem Gartenanteil zu finden. Dort können sich Klimaanpassungsmaßnahmen, wie Dachbegrünung, thermisch günstig auswirken und die Temperatur knapp 0,5 Kelvin heruntersetzen. In dem aus stadtklimatologischer Sicht begünstigten Bereich mit Ein- und Zweifamilienhäusern mit verhältnismäßig großem Grünanteil ist eine weitere Temperaturreduktion durch Klimaanpassungsmaßnahmen kaum möglich. Dennoch kann Dachbegrünung oder eine weitere Entsiegelung, beispielsweise durch die Wasserspeicherung, positiv auf das Mikroklima einwirken oder

aus biologischer Sicht positive Effekte bewirken, z. B. indem Kleinstlebewesen mehr Lebensraum zur Verfügung gestellt wird.

Die unteren beiden Teilabbildungen von Abbildung 43 veranschaulichen die Temperaturdifferenz zwischen dem Gebiet mit sehr geringem Versiegelungsgrad (10 %) und einem als sehr hoch angenommenen Versiegelungsgrad (90 %). Dieser berechnete Unterschied liegt zwischen einem halben und einem ganzen Kelvin.

## **5.6 MUKLIMO\_3-Modellsimulationen für Maßnahmenkombinationen**

Gerade in Großstädten ist, auf Grund eines stetigen Zuzugs, die Schaffung von Wohnraum erforderlich. So wurde, mit Hilfe des Stadtklimamodells MUKLIMO\_3, sowohl horizontale Nachverdichtung in unterschiedlicher Größenordnung (3 %, 10 %, 20 %), als auch eine Aufstockung von einer bzw. zwei Etagen simuliert. Ziel war herauszufinden, in wieweit solche baulichen Veränderungen das lokale Stadtklima beeinflussen. Außerdem wurde berechnet, ob die bereits vorgestellten Klimaanpassungsmaßnahmen Dachbegrünung, Entsiegelung der asphaltierten Bodenflächen sowie die Änderung der Dachalbedo, beispielsweise durch das Anbringen heller Dachziegel, auf die zu erwartende zusätzliche Aufheizung durch die oben genannten Maßnahmen (Nachverdichtung, Aufstockung) thermisch ausgleichend wirken können.

Für die Untersuchung wurde die jeweils über das Untersuchungsareal gemittelte Temperatur zum Zeitpunkt des Tagesmaximums sowie des Tagesminimums betrachtet. Die Ergebnisse des Referenzlaufs wurden mit den entsprechenden Simulationsläufen mit baulichen Veränderungen und Klimaanpassungsmaßnahmen verglichen.

## 5.6.1 Situation am Tag für Maßnahmenkombinationen

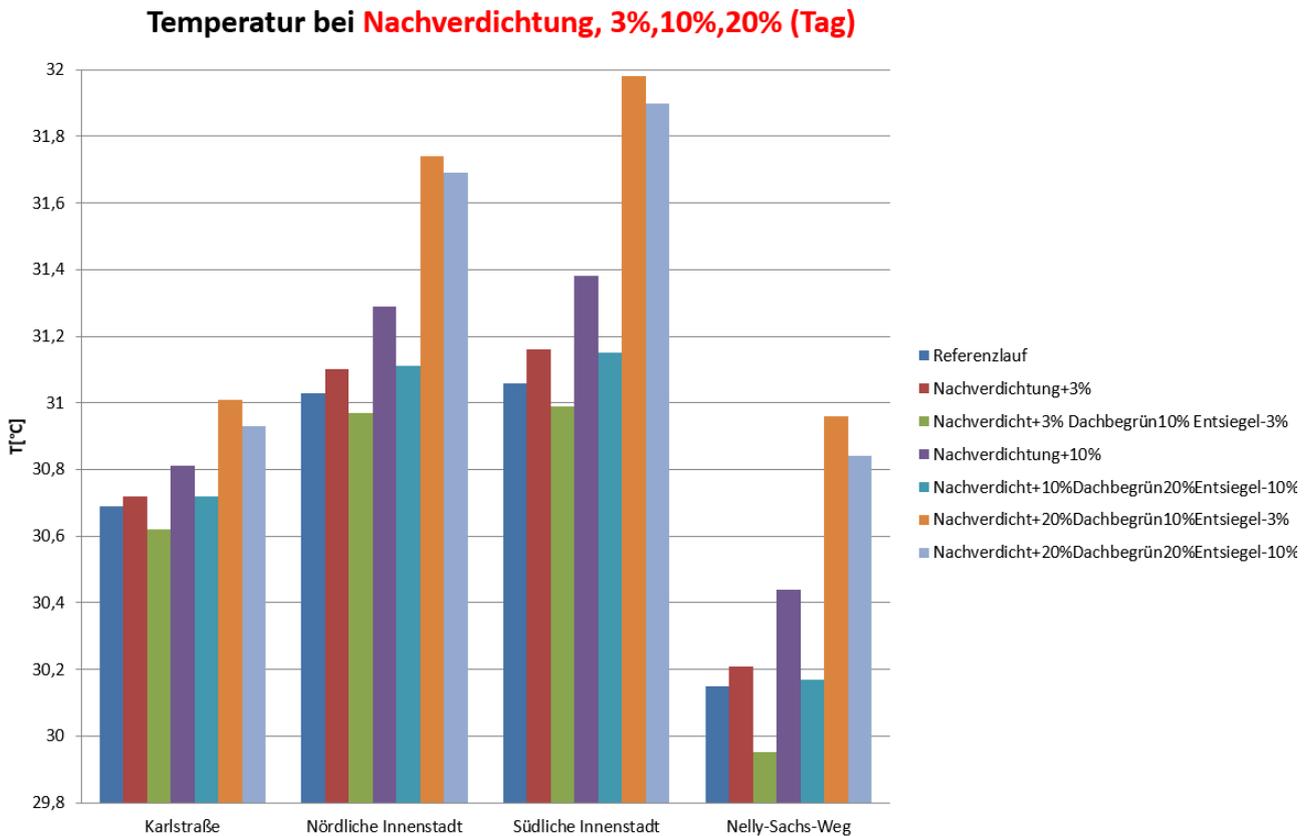


Abbildung 46: Für unterschiedliche Untersuchungsareale von MUKLIMO\_3 berechnete Tages-temperaturmaxima an einem heißen Tag im Juli (blauer Balken, Referenzlauf), sowie berechnete Temperaturhöchstwerte bei unterschiedlich starker Nachverdichtung mit und ohne Anpassungsmaßnahmen.

Für den simulierten Strahlungstag im Juli liegen die Temperaturmaxima in den betrachteten Untersuchungsarealen („Karlstraße“, „Innenstadt Nord“, „Innenstadt Süd“ und „Vilich-Müldorf“ (Nelly-Sachs-Weg)) überall über 30 °C (siehe Abbildung 44, blaue Balken). Bei einer Nachverdichtung um 3 % werden für die erwähnten Gebiete nur unwesentlich höhere Temperaturwerte (siehe Abbildung 44, rote Balken), von maximal einem Zehntelgrad berechnet. Die Temperaturzunahme liegt somit noch innerhalb der Modellunsicherheit. Durch Klimaanpassungsmaßnahmen lässt sich die „Ist-Situation“ geringfügig verbessern (siehe Abbildung 44, grüner Balken). Eine Nachverdichtung um 10 % führt in den Beispielarealen zu einer Temperaturzunahme von weniger als einem halben Kelvin (siehe Abbildung 44, lila Balken). Diese Temperaturerhöhung kann durch die Kombination von Klimaanpassungsmaßnahmen, hier 20 % Dachbegrünung und 10 % Entsiegelung, tagsüber weitgehend kompensiert werden. Eine noch größere Nachverdichtung von hypothetisch 20 %, die in der Innenstadt auf Grund der dichten Bebauung schon nicht mehr realisierbar wäre, würde, trotz nicht unerheblicher Klimaanpassungsmaßnahmen, eine Temperaturzunahme von fast einem Kelvin, sowohl im Innenstadtbereich (Untersuchungsareal „Innenstadt Süd“) (siehe Abbildung 45), als auch am Stadtrand (Untersuchungsareal „Vilich-Müldorf“ (Nelly-Sachs-Weg)) (siehe Abbildung 46) bedeuten.

## Nachverdichtung und Klimaanpassungsmaßnahmen

### Südliche Innenstadt, Maximumtemperaturen (Tag)

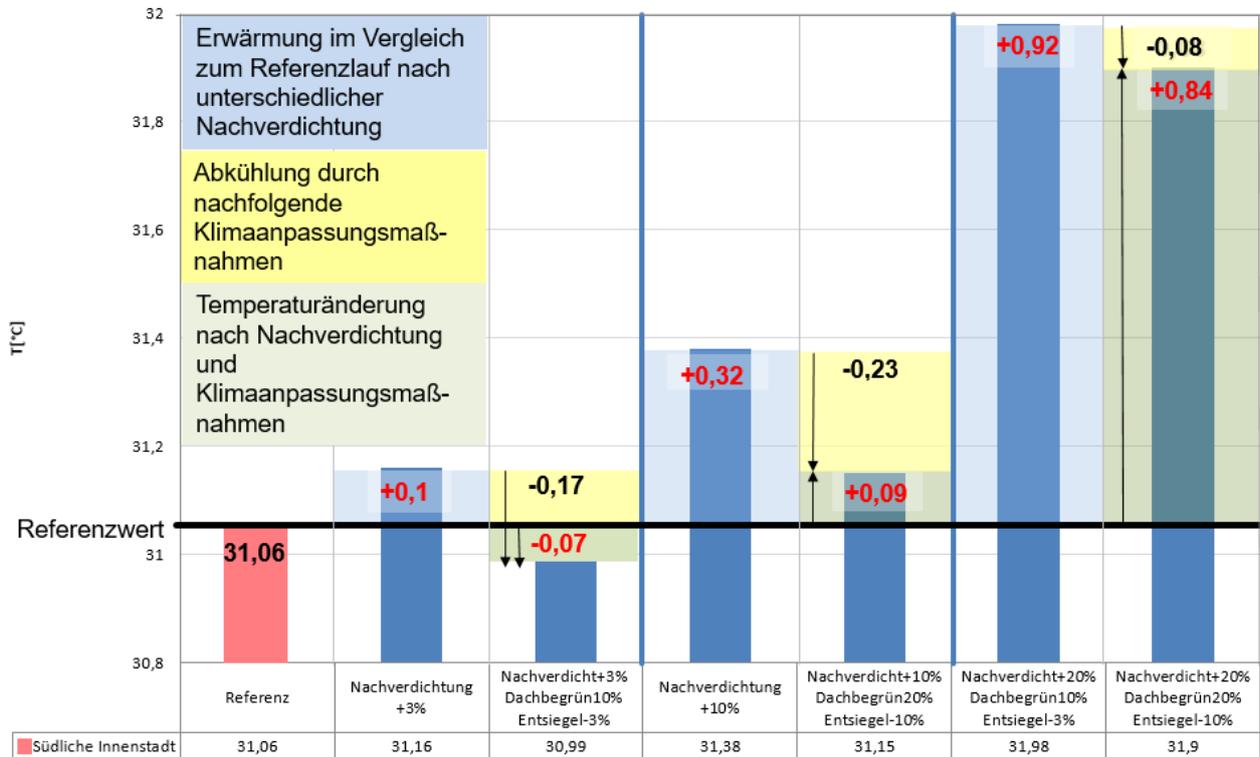


Abbildung 47: Modellsimulation der Höchsttemperatur an einem heißen Julitag für das Untersuchungsareal „Innenstadt Süd“: Referenzzustand (linker roter Balken) sowie mit Nachverdichtung (3 %, 10 %, 20 %) und Anpassungsmaßnahmen (siehe Legende). Rote Zahlen: absolute Temperaturänderung gegenüber dem Referenzlauf nach jeweils erfolgter Nachverdichtung und gegebenenfalls zusätzlichen Klimaanpassungsmaßnahmen. Schwarze Zahlen mit negativem Vorzeichen: durch Klimaanpassungsmaßnahmen erwirkte Temperaturreduktion.

Abbildung 47 und Abbildung 48 zeigen im Detail die mit dem Modell berechneten und vorangehend beschriebenen thermischen Auswirkungen auf ein ausgewähltes Innenstadtareal (siehe Abbildung 45) und auf ein Areal in einem Stadtviertel außerhalb des Zentrums (siehe Abbildung 46) nach erfolgten baulichen Maßnahmen, wie hier Nachverdichtung.

Aufstockungsmaßnahmen wirken sich, während des Tages, thermisch kaum auf das Referenzniveau in 2 m Höhe aus. Genau wie bei der Nachverdichtung um 3 % in einem Areal wird, bei Aufstockung um eine Etage, der thermische Effekt auf das Fußgärgerniveau (2 m Höhe) vom Modell MUKLIMO\_3 nur sehr gering, im Zehntelgradbereich, simuliert. Allerdings wird die Abkühlung durch Klimaanpassungsmaßnahmen in diesem Fall auch nur so gering simuliert, dass sie kaum darstellbar ist (siehe Abbildung 49). Bei einer Aufstockung um zwei Etagen liefert das Modell für das Untersuchungsareal „Innenstadt Süd“ eine Erwärmung um ca. 0,3 K, wobei bedacht werden muss, dass der stärkeren Wärmeabstrahlung durch die höheren Gebäude eine größere Abschattung durch die höhere Gebäudehöhe entgegenwirkt.

## Nachverdichtung und Klimaanpassungsmaßnahmen

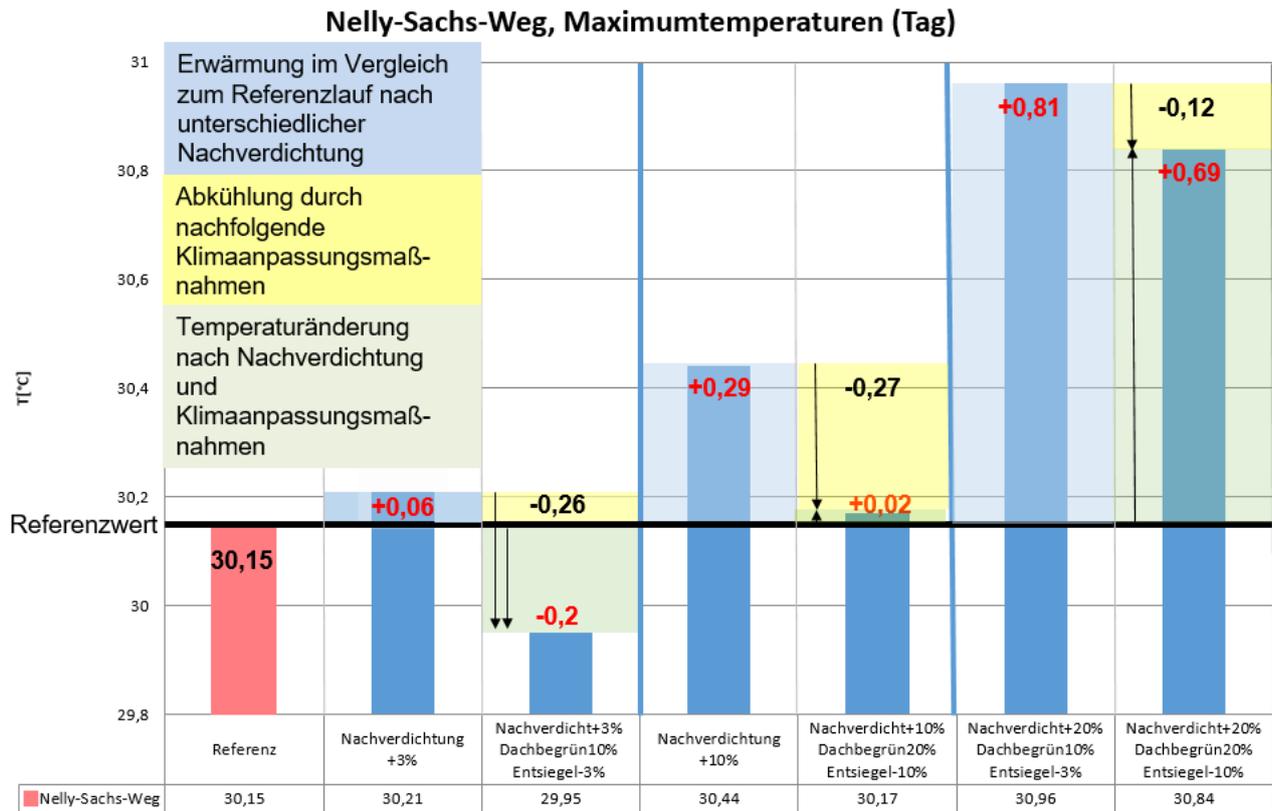


Abbildung 48: Modellsimulation der Höchsttemperatur an einem heißen Julitag für das Untersuchungsareal „Vilich-Müldorf“ (Nelly-Sachs-Weg) (linker roter Balken) sowie Nachverdichtung (3 %, 10 %, 20 %) und Anpassungsmaßnahmen (siehe Legende). Rote Zahlen: absolute Temperaturänderung gegenüber dem Referenzlauf nach jeweils erfolgter Nachverdichtung und gegebenenfalls zusätzlichen Klimaanpassungsmaßnahmen. Schwarze Zahlen mit negativem Vorzeichen: durch Klimaanpassungsmaßnahmen erwirkte Temperaturreduktion.

In dem am Stadtrand gelegenen Untersuchungsareal „Vilich-Müldorf“ (Nelly-Sachs-Weg) liegen die Temperaturdifferenzen nach Aufstockung nur im Zehntelgradbereich, zum Teil sogar im Hundertstelgradbereich, gegenüber dem Referenzlauf, und somit innerhalb der Modellgenauigkeit. Wegen der Ähnlichkeit des Diagramms mit Abbildung 47 wird auf eine weitere Abbildung für das Areal „Vilich-Müldorf“ verzichtet. Die relativ niedrigen Temperaturerhöhungen durch Gebäudeaufstockung, kann neben dem vergrößerten Schattenwurf auch dadurch begründet sein, dass die zusätzliche wärmeabstrahlende Gebäudemasse in relativ hoher Höhe nicht allzu viel Auswirkung auf das Fußgängerniveau hat.

## Aufstockung + Klimaanpassungsmaßnahmen

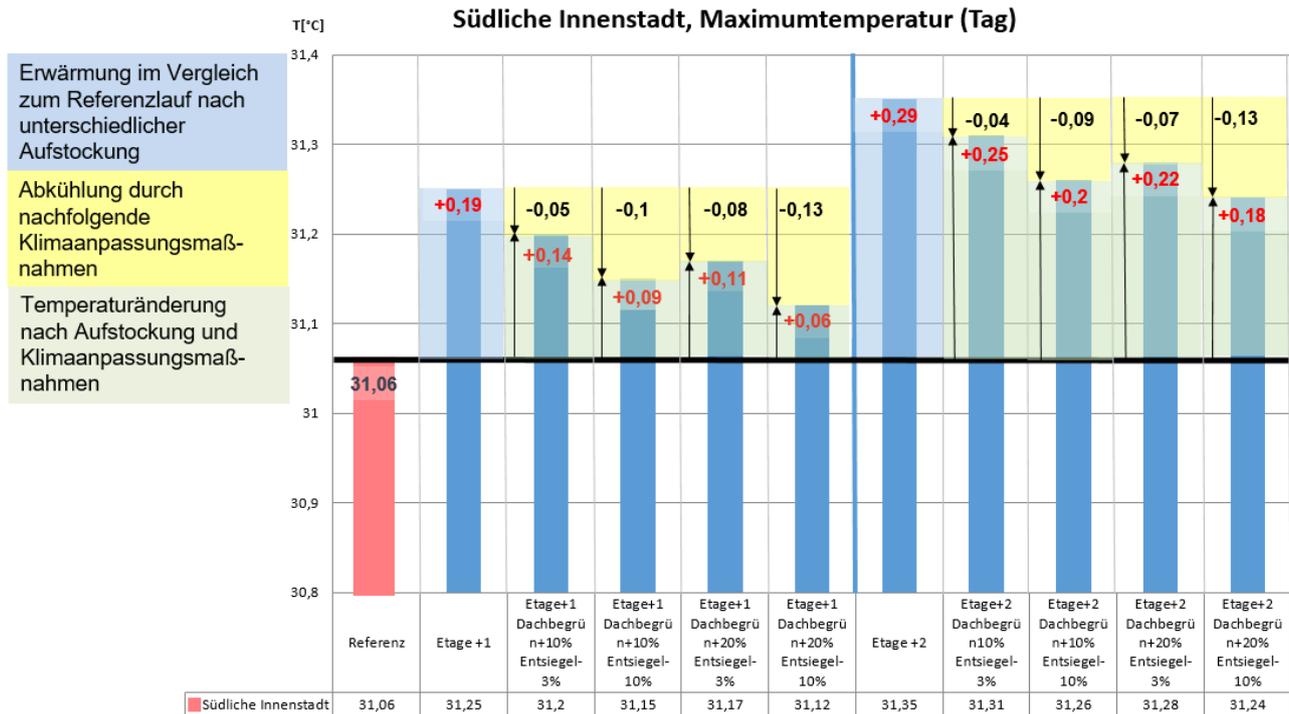


Abbildung 49: Modellsimulation der Höchsttemperatur an einem heißen Julitag für das Untersuchungsareal „Innenstadt Süd“: Referenz (linker roter Balken) sowie Aufstockung (1 Etage, 2 Etagen) zuzüglich Anpassungsmaßnahmen (siehe Legende). Rote Zahlen: absolute Temperaturänderung gegenüber dem Referenzlauf nach jeweils erfolgter Aufstockung und gegebenenfalls zusätzlichen Klimaanpassungsmaßnahmen. Schwarze Zahlen mit negativem Vorzeichen: durch Klimaanpassungsmaßnahmen erwirkte Temperaturreduktion.

### 5.6.2 Situation in der Nacht für Maßnahmenkombinationen

Während die durch moderate Nachverdichtung (3 %, 10 %) in den unterschiedlichen Untersuchungsgebieten hervorgerufene Aufheizung tagsüber nur im Zehntelgrad-Bereich simuliert wird (siehe Kapitel 6.6.1), stellt sich die nächtliche Situation anders dar. Zur Zeit der Minimumtemperaturen, ausgangs der Nacht, macht sich die starke Wärmespeicherung und Wärmeabgabe durch die Gebäude bemerkbar. Bei einer Nachverdichtung um nur 3 % im Innenstadtbereich bewirkt die zusätzliche Gebäudemasse im 2 m-Niveau, laut Modellberechnungen, eine Temperaturerhöhung um mehr als ein Kelvin. Dieser Anstieg lässt sich durch Klimaanpassungsmaßnahmen, wie eine Dachbegrünung von 10 % sowie eine Entsiegelung der asphaltierten Flächen um 3 %, nur unwesentlich dämpfen (kaum mehr als ein Zehntelgrad). Selbst eine Dachbegrünung von 20 %, kombiniert mit einer Entsiegelung von 10 %, würde auch nur eine geringfügige Temperaturreduktion, von deutlich weniger als 0,5 Kelvin, bewirken (siehe Abbildung 48).

Bei Betrachtung des Untersuchungsareals „Vilich-Müldorf“, stellvertretend für eine Siedlung am Stadtrand, macht sich eine Nachverdichtung der Größenordnung von 3 % thermisch auch in der Nacht, nicht ganz so stark bemerkbar wie im Innenstadtbereich.

Im 2 m-Niveau wird vom Modell in den frühen Morgenstunden eine Erwärmung von fast 0,5 Kelvin simuliert; diese kann jedoch durch Klimaanpassungsmaßnahmen auf weniger als die Hälfte reduziert werden (siehe Abbildung 49).

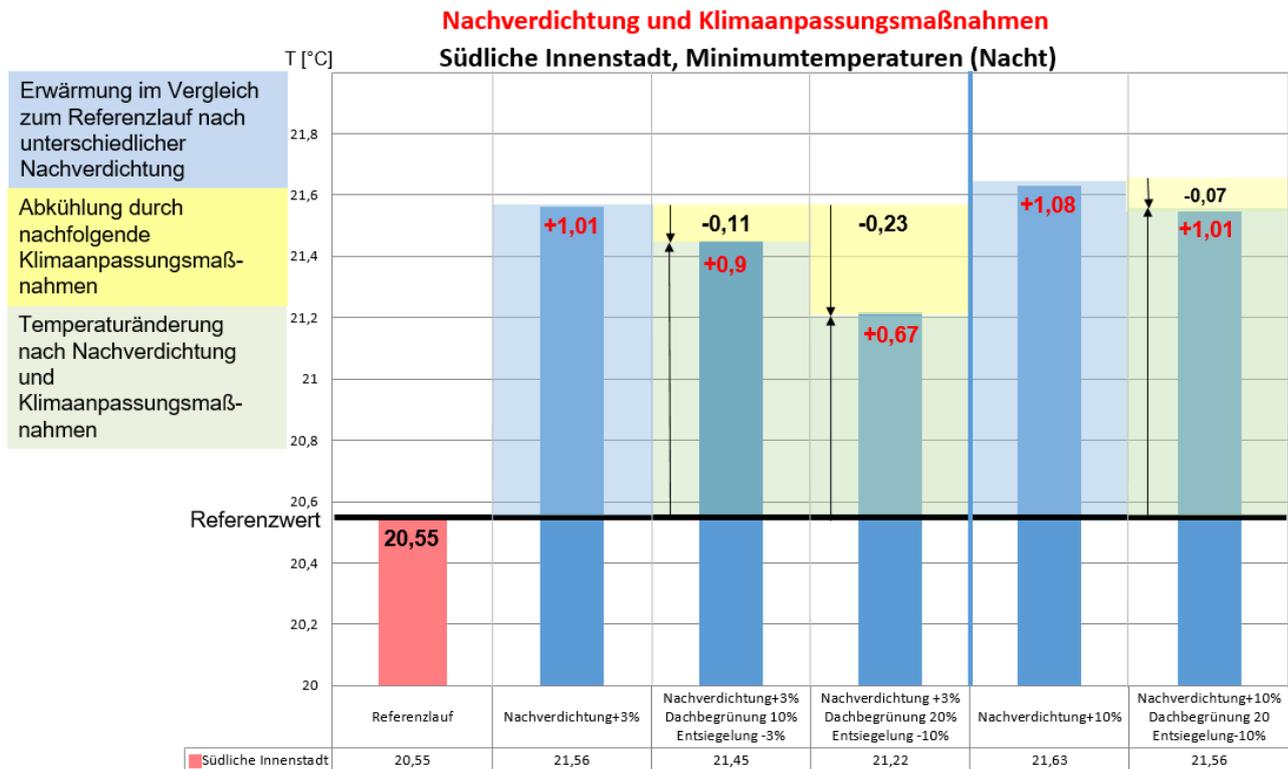


Abbildung 50: Modellsimulation der Tiefsttemperatur für einen Strahlungstag im Juli für das Untersuchungsareal „Innenstadt Süd“: Referenzlauf (linker roter Balken) sowie Nachverdichtungen von 3 % und 10 % und Anpassungsmaßnahmen (siehe Legende). Rote Zahlen: absolute Temperaturänderung gegenüber dem Referenzlauf nach jeweils erfolgter Nachverdichtung und gegebenenfalls zusätzlichen Klimaanpassungsmaßnahmen. Schwarze Zahlen mit negativem Vorzeichen: durch Klimaanpassungsmaßnahmen erwirkte Temperaturreduktion.

## Nachverdichtung und Klimaanpassungsmaßnahmen

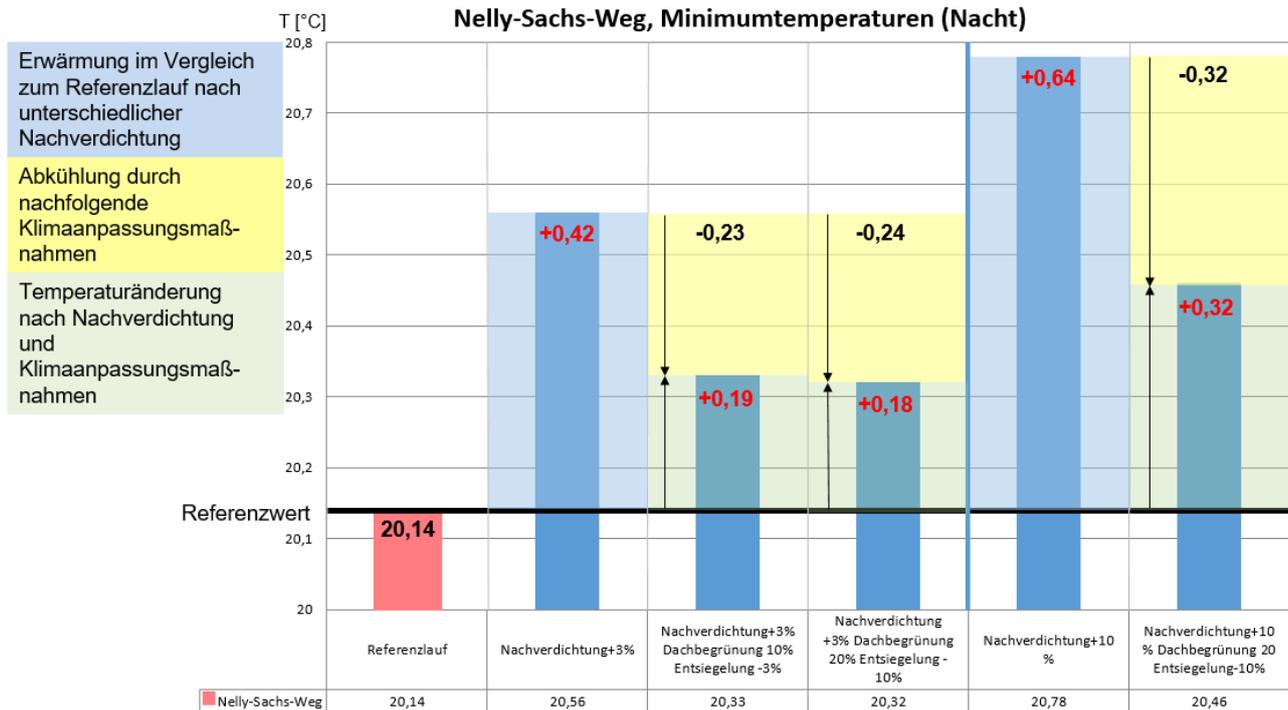


Abbildung 51: Modellsimulation der Tiefsttemperatur für einen Strahlungstag im Juli für das Untersuchungsareal „Vilich-Müldorf“ (Nelly-Sachs-Weg) (linker Balken) sowie Nachverdichtung (3 %, 10 %) und Anpassungsmaßnahmen (siehe Legende). Rote Zahlen: absolute Temperaturänderung gegenüber dem Referenzlauf nach jeweils erfolgter Nachverdichtung und gegebenenfalls zusätzlichen Klimaanpassungsmaßnahmen. Schwarze Zahlen mit negativem Vorzeichen: durch Klimaanpassungsmaßnahmen erwirkte Temperaturreduktion.

## 5.7 Zusammenfassung der Modellergebnisse für Bonn

Für die Untersuchung der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel wurden Simulationsrechnungen mit dem mikroskaligen urbanen Klimamodell MUKLIMO\_3 durchgeführt. Die horizontale Auflösung betrug 100 m x 100 m. Die Modellgitterzellen mit Bebauung werden als poröses Medium behandelt und die Klimateffekte der Bebauung als Funktion der Porosität und der Gebäudeform parametrisiert (sogenannte „nicht aufgelöste Bebauung“). Einzelne Gebäude können daher nicht dargestellt werden. Durch die Berücksichtigung des Sonnenstands und passender Modellinitialisierung kann der Verlauf der Temperatur und anderer Parameter für unterschiedliche Wettersituationen und jahreszeitliche Gegebenheiten simuliert werden (z. B. kühlende Wirkung der Gewässer im Sommer, wärmende Wirkung der Gewässer im Winter). Hierbei berechnet das Modell für die jeweilige Jahreszeit den Tagesgang der Strahlung, der Temperatur und der Feuchte sowie das Windfeld (inklusive lokaler Windsysteme wie das Berg- Talwindssystem). Bei den durchgeführten Simulationsläufen zeigt ein Vergleich mit Temperaturmesswerten, dass die modellierte Tagesamplitude – im Vergleich zu den Messungen – etwas geringer ausfällt.

Bei der gesamtstädtischen Betrachtungsweise mit einer horizontalen Gitterweite von 100 m (Stadtklimaparametrisierung) müssen Untersuchungsareale für Klimaanpassungsmaßnahmen eine Mindestgröße aufweisen, da sonst ein Eingriff, beispielsweise

eine Entsiegelung der asphaltierten Flächen, nur durch sehr wenige Modellgitterzellen repräsentiert wird und die Klimawirkungen nicht adäquat simulierbar sind. Weder einzelne Häuser (wie bereits erwähnt), noch die exakte Struktur von Straßenzügen können detailgetreu dargestellt werden. Ein Untersuchungsgebiet muss eine Mindestfläche von mehreren Gitterpunkten (abhängig von der räumlichen Auflösung des Modells) mit weitgehend homogener Landnutzung im Stadtklimamodell aufweisen, damit sich ein Referenzzustand (Istzustand) und auch Planungszustände (Modifikationen der Landnutzung durch unterschiedliche, wie in der Arbeit beschriebene, Eingriffe) hinreichend gut durch Stadtklimamodellsimulationen erfassen lassen.

Unter diesen Voraussetzungen lassen sich Aussagen zur Wirkung von Klimaanpassungsmaßnahmen, z. B. bezüglich Erwärmung oder Abkühlung, für Gebiete mit einem vorherrschenden Bebauungstyp, treffen.

Die Untersuchung stützt sich auf etwa 50 Modellläufe. Es wurde ein Referenzzustand (Ist-Zustand) berechnet, der eine Wettersituation für den Hochsommer repräsentiert. Um die Wirkung von einzelnen Anpassungsmaßnahmen bewerten zu können (Soll-Zustände), wurden Berechnungen für acht Variationen der Dachalbedo, zehn Variationen des Flächenanteils der Dachbegrünung sowie zehn Variationen des Entsiegelungsgrades zu unterschiedlichen Tageszeiten durchgeführt.

Um den Effekt der Kombination von Flächenmaßnahmen (Nachverdichtung, Aufstockung) und begleitenden kombinierten Anpassungsmaßnahmen zu untersuchen, wurden zwölf Kombinationsrechnungen zur Nachverdichtung in unterschiedlicher Größenordnung und gleichzeitig Entsiegelungs- und Dachbegrünungsmaßnahmen und weitere acht Kombinationsrechnungen bei einer hypothetischen Aufstockung um eine oder zwei Etagen bei gleichzeitiger Durchführung von Anpassungsmaßnahmen. Diese Vielzahl der durchgeführten Modellläufe ermöglichte es, hinreichend viele Vergleiche für Gebiete mit unterschiedlicher Bebauung und Landnutzung anzustellen.

Auf Grund der durchgeführten Rechnungen lassen sich die in Kapitel 6.5 getroffenen Kernaussagen treffen, die als abschließendes Résumé nachfolgend zusammengefasst werden. Zu beachten ist, dass diese Aussagen für die in Kapitel 6.5 getroffenen Annahmen gelten: schwachwindige Hochsommerlage mit geringer Bewölkung und folglich ungeminderter Einstrahlung bei großer Tagesamplitude der Temperatur.

- Von den gewählten drei Klimaanpassungsmaßnahmen (hohe Albedo der Dachflächen, Dachbegrünung, Entsiegelung des Bodens) ist im Fußgängerniveau zu fast allen Tageszeiten und für fast alle Bebauungstypen die teilweise Bodenentsiegelung (der Flächenanteile zwischen den Gebäuden) am effektivsten bei der Verbesserung des Lokalklimas (Verminderung der Wärmebelastung).
- Dachbegrünung kann am Vormittag und Mittag in Untersuchungsgebieten mit dichter Bebauung (wenn sich der Asphalt noch nicht so stark aufgeheizt hat) eine etwas stärkere Wirkung auf die Umgebungstemperatur im Fußgängerniveau entfalten als die beiden anderen Anpassungsmaßnahmen. Dann ist es sogar möglich, dass in Strömungsrichtung noch ein paar hundert Meter außerhalb des Klimaanpassungsareals ein geringfügig positiver Temperatureffekt (Abkühlung) erzielt werden kann.

- Dort, wo die größten Wärmebelastungen auftreten, können Klimaanpassungsmaßnahmen am meisten bewirken.
- Eine Grünfläche von beispielsweise 100 ha kann, gegenüber der versiegelten Umgebung, die Lufttemperaturwerte im Bereich der Grünfläche um ca. 0,5 Kelvin senken. Eine signifikante Temperaturreduktion kann im Lee der Grünfläche bis in etwa 100 m Entfernung nachgewiesen werden.
- Für die Kombinationsmaßnahmen ergibt sich, dass tagsüber bei einer Nachverdichtung um 3 % und gleichzeitigen Klimaanpassungsmaßnahmen, wie z. B. Erhöhung der Dachbegrünung auf 20 % und Entsiegelung der versiegelten Fläche um 10 %, die Klimawirkung neutralisiert werden kann, oder sogar eine geringfügige Temperaturreduktion möglich ist.
- Auch die Auswirkungen einer Nachverdichtung um 10 % ließen sich tagsüber durch hinreichend starke Klimaanpassungsmaßnahmen annähernd kompensieren. Eine noch höhere Nachverdichtung ist jedoch bei den ausgewählten Anpassungsmaßnahmen thermisch nicht mehr ausgleichbar. Ob dies durch weitere Anpassungsmaßnahmen möglich ist, wurde hier nicht untersucht.

Die untersuchten Anpassungsmaßnahmen zeigten, dass mögliche negative mikroklimatische Auswirkungen von Bebauungsmaßnahmen (Nachverdichtung, Aufstockung) durch geeignete Kombinationen aus Anpassungsmaßnahmen zum Teil kompensiert werden können. Eine Aufstockung ist in der Regel einer entsprechenden Nachverdichtung vorzuziehen, wenn allein der thermische Effekt (Wärmebelastung) betrachtet wird.

Neben der hier untersuchten Lufttemperatur sollten bei weiteren Untersuchungen thermische Indizes wie die gefühlte Temperatur mit betrachtet werden. Damit kann die Wirkung von Bebauungsmaßnahmen und Anpassungsmaßnahmen auf die Wärmebelastung und somit mögliche Gesundheitsbeeinträchtigungen der Stadtbewohnerinnen und Stadtbewohner untersucht werden. Gebäudeauflösende Stadtklimamodelle – wie das Modell PALM-4U – eröffnen die Möglichkeit, weitere Effekte wie die Fassadenbegrünung, Bäume, Fassadenoberflächen und die exakte Gebäudegeometrie genauer zu berücksichtigen. Unter zusätzlicher Berechnung des Innenraumklimas ergibt sich daraus ein detaillierteres Bild der Kombination von Bebauungs- und Anpassungsmaßnahmen auch für kleine Quartiere oder Einzelmaßnahmen und gibt der Stadtentwicklung wichtige Hinweise für klimawandelgerechte Bebauungsmaßnahmen.

## **5.8 Vergleich der Modellergebnisse für die Stadt Bonn mit Ergebnissen idealisierter Stadtquartiere in NRW**

Die Wirkung einzelner Anpassungsmaßnahmen sowie einer Kombination aus Anpassungsmaßnahmen und städtebaulicher Nachverdichtung auf die Lufttemperatur wurde für einzelne Stadtquartiere in Bonn untersucht (Kapitel 5.5 und 5.6). Nun stellt sich die Frage ob die gleichen Maßnahmen auch in anderen Stadtquartieren gleiche oder ähnliche Effekte auf die Lufttemperatur zeigen. Sollte dies der Fall sein, könnten die Aussagen zur Wirksamkeit der Anpassungsmaßnahmen auf die Lufttemperatur auch

auf andere Städte in NRW übertragbar sein. Dies zu untersuchen, soll Ziel des folgenden Kapitels sein.

Mithilfe des Stadtklimamodells MUKLIMO\_3 wurden für einen typischen Sommertag im Juli idealisierte, quadratische Stadtquartiere mit einer Fläche von 1 km<sup>2</sup> und einem horizontalen Gitterabstand von 100 m simuliert. Jedes Stadtquartier hat der Einfachheit halber einen einheitlichen Bebauungstyp mit typischen Werten für den Grundflächenanteil der Gebäude, der versiegelten und unversiegelten Fläche zwischen den Gebäuden sowie der mittleren Gebäudehöhe und der Gebäudeform. Alle Modellsimulationen wurden mit einer konstanten Geländehöhe und einem Standort mit der geographischen Breite von 51.51° N gerechnet. Trotz der vereinfachten räumlichen Darstellung bleiben dennoch die für das Stadtklima wichtigen charakteristischen Eigenschaften der städtischen Bebauung erhalten. Die Initialisierung und Modelleinstellungen für die idealisierten Simulationen entsprechen den Einstellungen die auch für die Bonn Simulationen verwendet wurden.

### 5.8.1 Vergleich der Bebauungstypen

Sowohl die Modellsimulationen für Bonn als auch die Simulationen für idealisierte Stadtquartiere nutzen die Definitionen und Charakteristika der flächendeckenden Bebauungsstrukturklassifizierung für Nordrhein-Westfalen des Leibniz-Institutes für ökologische Raumentwicklung (IÖR 2017). Zur Klassifizierung der Bebauungstypen auf Baublockebene wurde ein automatisiertes Klassifikationsverfahren angewendet, in welches sowohl amtliche Daten als auch Satellitendaten eingingen. Dabei wurden die Bebauungstypen basierend auf Gebäudegrundfläche, -höhe und -form, der Flächennutzung sowie des Versiegelungsgrades bestimmt (MÜLLER et al. 2017). Die Bebauungsstrukturklassifizierung wird zum einen als Eingangsdatensatz für die Stadtklimamodellierung mit MUKLIMO\_3 und zum anderen als Fachdatenlayer für das Tool „Hitzeangepasste Quartiersentwicklung in Nordrhein-Westfalen“ genutzt.

Die Klassifizierung der Bebauungstypen erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurde sie für die Beispielstadt Bonn durchgeführt und mithilfe vorhandener Bauungs- und Stadtstrukturdaten (in Abstimmung mit der Stadt Bonn) eingehend validiert. In einem weiteren Schritt wurde die Klassifizierung auf das Bundesland Nordrhein-Westfalen ausgedehnt. Es wurde vorausgesetzt, dass Nordrhein-Westfalen einen repräsentativen Querschnitt Deutschlands darstellt, da sowohl hoch verdichtete städtische Gebiete als auch ländliche Regionen vorhanden sind. Somit lassen sich die Bebauungstypen hinsichtlich ihrer Eigenschaften und ihres Anteils auch bundesweit übertragen.

Während die Bebauungseigenschaften, zum Beispiel die mittlere Gebäudehöhe, in den vorangegangenen Kapiteln den Gebäudehöhen der Bonner Quartiere entsprechen, wurden für die idealisierten Stadtquartiere die mittleren Gebäudehöhen entsprechend den Durchschnittswerten der Bebauungsklassen für Nordrhein-Westfalen genommen (siehe Tabelle 4).

Tabelle 5: Bebauungsmerkmale der Plangebiete der Stadt Bonn im Vergleich zu den für INKAS-NRW simulierten idealisierten Stadtquartieren (kursiv und hellgrau hinterlegt).

<b>Plangebiet Stadt Bonn</b>	<b>Prozentualer Flächenanteil der Bebauungstypen pro Plangebiet</b>	<b>Grundflächenanteil der Gebäude je Bebauungstyp</b>	<b>Mittlere Gebäudehöhe</b>
Auerberg	Doppelhaus- und Zeilenbebauung (59 %), Mehrfamilienhäuser und Reihenhäuser (26 %), Blockrandbebauung (2 %), Ein- und Zweifamilienhäuser (13 %)	20 % 23 % 37 % 17 %	9,8 m 9,7 m 13,4 m 7,6 m
<i>INKAS-NRW</i>	<i>Doppelhaus- und Zeilenbebauung</i>	<i>19 %</i>	<i>8,7 m</i>
Karlstraße	Industrie und Gewerbe dicht bebaut (100 %)	28 %	9,1 m
<i>INKAS-NRW</i>	<i>Industrie und Gewerbe dicht bebaut</i>	<i>27 %</i>	<i>8,4 m</i>
Vilich-Müldorf	Ein- und Zweifamilienhäuser (40 %), Doppelhaus- und Zeilenbebauung (38 %), Mehrfamilienhäuser und Reihenhäuser (22 %)	17 % 20 % 23 %	7,6 m 9,8 m 9,7 m
<i>INKAS-NRW</i>	<i>Ein- und Zweifamilienhäuser</i>	<i>14 %</i>	<i>7,5 m</i>
Innenstadt Nord	Blockrandbebauung (100 %)	37 %	13,4 m
<i>INKAS-NRW</i>	<i>Blockrandbebauung</i>	<i>36 %</i>	<i>12,8 m</i>
Innenstadt Süd	Blockrandbebauung (100 %)	37 %	13,4 m
<i>INKAS-NRW</i>	<i>Blockrandbebauung</i>	<i>36 %</i>	<i>12,8 m</i>
Friesdorf Nord	Doppelhaus- und Zeilenbebauung (61 %), Mehrfamilienhäuser und Reihenhäuser (37 %), Innerstädtische Grünflächen (2 %)	20 % 23 %	9,8 m 9,7 m
<i>INKAS-NRW</i>	<i>Doppelhaus- und Zeilenbebauung</i>	<i>19 %</i>	<i>8,7 m</i>
Friesdorf Süd	Industrie und Gewerbe dicht bebaut (93 %), Ein- und Zweifamilienhäuser (4 %), Flächen geringer baulicher Nutzung (2 %)	28 % 17 % 7 %	9,1 m 7,6 m 5,6 m
<i>INKAS-NRW</i>	<i>Industrie und Gewerbe dicht bebaut</i>	<i>27 %</i>	<i>8,4 m</i>

### 5.8.2 Vergleich der Anpassungsmaßnahmen

Für die idealisierten Stadtquartiere wurden die folgenden drei einzelnen Anpassungsmaßnahmen ausgewählt und simuliert:

- Anteil der versiegelten Flächen zwischen den Gebäuden minimieren (Variation zwischen 10 % und 90 %)
- Anteil der Dachbegrünung erhöhen (Variation zwischen 0 % und 100 %)
- Albedo der Dachflächen erhöhen (Variation zwischen 0,1 und 0,8)

In den Vergleich mit den Ergebnissen der Bonner Plangebiete gehen folgende Simulationen ein:

- Anteil der versiegelten Flächen zwischen den Gebäuden (10 %, 50 %, 90 %)
- Anteil der Dachbegrünung (10 %, 20 %, 90 %, 100 %)
- Albedo der Dachflächen (0,1; 0,2; 0,5; 0,7)

### 5.8.3 Ergebnisvergleich für den Anteil der versiegelten Fläche zwischen den Gebäuden

Der Ergebnisvergleich beruht auf der Maximumtemperatur und der Minimumtemperatur der untersten atmosphärischen Modellgitterzelle in 2 m Höhe über Grund. Verglichen wird der Mittelwert der Lufttemperatur des Plangebietes mit dem des idealisierten Stadtquartieres. Mit den Ergebnissen der in den Kapiteln 5.8.1 und 5.8.2 genannten Simulationen wird eine einfache lineare Regression der Form

$$y = a \cdot x + b$$

für jedes Plangebiet bzw. idealisierte Stadtquartier berechnet und die Werte der Regressionskoeffizienten „a“ und „b“ verglichen. Die Variable „x“ bezeichnet die unabhängige Variable, auch Prädiktor genannt. In den folgenden Beispielen sind dies die Werte der Anpassungsmaßnahme z. B. der Anteil der Dachbegrünung. Die Variable „y“ bezeichnet die abhängige Variable, hier die Lufttemperatur in Bodennähe. Der Regressionskoeffizient „a“ spiegelt die Steigung der Regressionsgeraden wider und zeigt, wie stark sich in unserem Beispiel die Lufttemperatur aufgrund der Anpassungsmaßnahme verändert. Je größer der Zahlenwert von „a“, desto stärker ist der Einfluss der Anpassungsmaßnahme auf die Lufttemperatur. Die Übertragbarkeit der Wirksamkeit einer Anpassungsmaßnahme hängt in erster Linie davon ab, ob der Koeffizient „a“ ähnlich ist zwischen den Bonner Simulationen und den idealisierten Simulationen. Die Regressionskonstante „b“ gibt an, welchen Wert die abhängige Variable hat, wenn die unabhängige Variable den Wert Null annimmt. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zeigt an, wie gut die ermittelte lineare Regression die Daten beschreibt. Werte nahe 1 bedeuten, dass die Datenpunkte sehr gut durch die linearen Regressionskoeffizienten wiedergegeben werden, hingegen deuten Werte nahe 0 darauf hin, dass kein linearer statistischer Zusammenhang ermittelbar ist. Für die Plangebiete, die mehr als eine Landnutzungs-kategorie haben („Auerberg“, „Vilich-Müldorf“, „Friesdorf Nord“ und „Friesdorf Süd“) werden nur die Gitterzellen der entsprechenden Landnutzungs-kategorie herangezogen, die mit den idealisierten Stadtquartieren korrespondieren.

Der Regressionskoeffizient a nimmt für das Beispiel Maximumtemperatur und Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden Werte zwischen 0,06 (z. B. Karlstraße) und 0,14 (z. B. idealisiertes Stadtquartier Blockrandbebauung) an. Für das Beispiel Minimumtemperatur und Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden liegen die Werte je nach Stadtquartier zwischen 0,04 (z. B. Karlstraße) und 0,09 (z. B. idealisiertes Stadtquartier Ein- und Zweifamilienhäuser).

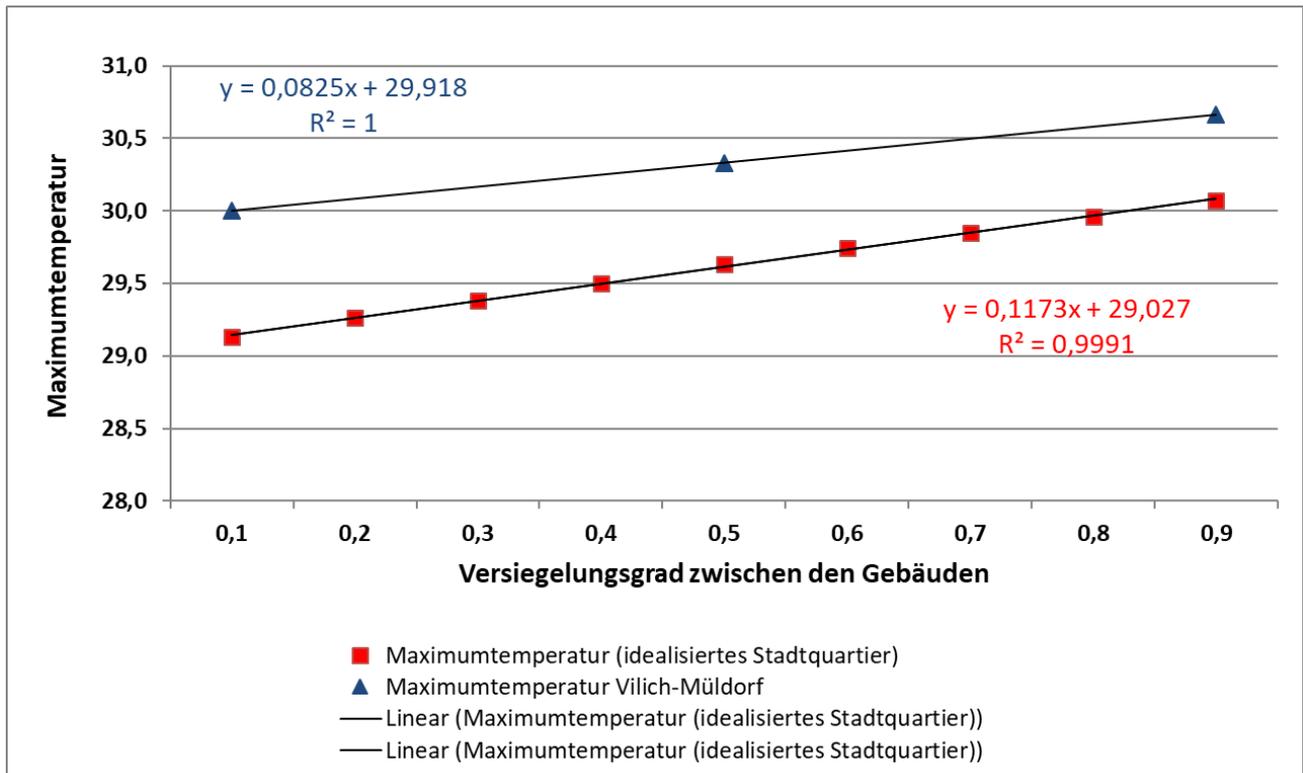


Abbildung 52: Beispiel zweier linearer Regressionen basierend auf dem Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden und der Maximumtemperatur für ein idealisiertes Stadtquartier mit Ein- und Zweifamilienhäusern und für die Modellgitterzellen mit gleichem Bebauungstyp in „Vilich-Müldorf“.

Die Änderung des Versiegelungsgrades ohne Gebäude wirkt sich somit im Mittel am Tag (Mittelwert des Koeffizienten „a“ über alle untersuchten Bebauungstypen 0,09 Kelvin pro Entsiegelung um 10 %) deutlicher aus als in der Nacht (Mittelwert des Koeffizienten „a“ über alle untersuchten Bebauungstypen 0,06 Kelvin pro Entsiegelung um 10 %). Der Vergleich zwischen den Bonner Plangebieten und den idealisierten Stadtgebieten zeigt, dass die Änderungen sowohl für die Maximumtemperatur als auch die Minimumtemperatur die gleiche Richtung und eine vergleichbare Größenordnung aufweisen. Dabei liegen die Temperaturänderungen der idealisierten Stadtquartiere mit Ausnahme von Friesdorf Süd und Friesdorf Nord und Auerberg für die Maximumtemperatur ein wenig höher als in den Bonner Plangebieten. Dies kann auf den Einfluss der Orographie und die doch recht variable Landnutzung der Bonner Plangebiete und ihres Umlandes zurückgeführt werden. Ferner sind die Bonner Plangebiete mit 28 ha bis 90 ha kleiner als die idealisierten Stadtquartiere mit 100 ha. Je größer ein Gebiet, umso kleiner sind die Einflüsse, die beispielsweise durch die Umlandlandnutzung hervorgerufen werden, und desto typischer ist die Ausprägung der Temperatur für diesen Bebauungstyp. Dennoch sind die Ergebnisse gut miteinander vergleichbar, sodass eine Übertragung der Wirksamkeit der Anpassungsmaßnahme „Entsiegelung von Flächen“ von idealisierten Stadtquartieren auf reale Quartiere gegeben scheint.

Tabelle 6: Vergleich der Lufttemperatur (Maximum und Minimum) zwischen den Bonner Plan- gebieten und den idealisierten Stadtquartieren (kursiv und grau unterlegt) für den Versiege- lungsgrad zwischen den Gebäuden.

<b>Gebiet</b>	<b>Temperatur</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<i>Idealisiertes Stadtquartier Industrie und Ge- werbe dicht (mit Umgebung dichte Bebau- ung)</i>	Max	0,0725	29,692	0,99
Karlstraße	Max	0,0563	30,272	0,99
<i>Idealisiertes Stadtquartier Blockrandbebau- ung (mit Umgebung dichte Bebauung)</i>	Max	0,1495	30,253	0,99
Innenstadt Nord	Max	0,0737	30,461	0,99
Innenstadt Süd	Max	0,0800	30,460	1,00
<i>Idealisiertes Stadtquartier Ein- und Zweifa- milienhäuser (mit Umgebung lockere Bebau- ung)</i>	Max	0,1173	29,027	0,99
Vilich-Müldorf	Max	0,0825	29,918	1,00
<i>Idealisiertes Stadtquartier Doppelhaus- und Zeilenbebauung (mit Umgebung Bebauung mittlerer Dichte)</i>	Max	0,1210	29,187	0,99
Auerberg	Max	0,1225	30,254	0,99
Friesdorf Nord	Max	0,1188	30,106	0,99
<i>Idealisiertes Stadtquartier Industrie und Ge- werbe dicht (mit Umgebung Bebauung mitt- lerer Dichte)</i>	Max	0,0565	29,253	0,99
Friesdorf Süd	Max	0,0862	30,102	0,99

<b>Gebiet</b>	<b>Temperatur</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<i>Idealisiertes Stadtquartier Industrie und Gewerbe dicht (mit Umgebung dichte Bebauung)</i>	Min	0,0405	21,165	0,99
Karlstraße	Min	0,0375	19,929	0,98
<i>Idealisiertes Stadtquartier Blockrandbebauung (mit Umgebung dichte Bebauung)</i>	Min	0,0748	21,314	0,98
Innenstadt Nord	Min	0,0200	20,327	0,53
Innenstadt Süd	Min	0,0400	20,447	0,94
<i>Idealisiertes Stadtquartier Ein- und Zweifamilien- häuser (mit Umgebung lockere Bebauung)</i>	Min	0,0912	19,598	0,96
Vilich-Müldorf	Min	0,0813	19,577	0,99
<i>Idealisiertes Stadtquartier Doppelhaus- und Zei- lenbebauung (mit Umgebung Bebauung mittlerer Dichte)</i>	Min	0,0843	20,152	0,99
Auerberg	Min	0,0513	19,500	0,98
Friesdorf Nord	Min	0,0688	19,800	0,98
<i>Idealisiertes Stadtquartier Industrie und Gewerbe dicht (mit Umgebung Bebauung mittlerer Dichte)</i>	Min	0,0348	20,346	0,99
Friesdorf Süd	Min	0,0550	19,992	0,99

### 5.8.3 Ergebnisvergleich für die Dachbegrünung und die Dachalbedo

Wie auch im vorherigen Kapitel beruht der Ergebnisvergleich auf dem Vergleich der linearen Regressionsgeraden. Da die Modellergebnisse für die Minimumtemperatur keine signifikanten Temperaturänderungen durch die Dachbegrünung und Änderung der Dachalbedo ergeben, wird nur auf den Vergleich der Maximumtemperatur eingegangen.

Der Regressionskoeffizient „a“ der Maximumtemperatur nimmt für die Albedo der Dachflächen Werte zwischen -0,01 (z. B. Karlstraße) und -0,07 (z. B. idealisiertes Stadtquartier Blockrandbebauung) an. Im Mittel über alle Plangebiete und idealisierten Stadtquartiere liegt der Wert bei -0,04 Kelvin pro Erhöhung der Dachalbedo um 0,1 (10 %). Dieser Wert ist deutlich kleiner als die Werte beim Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden für die Maximum- und Minimumtemperatur. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Anpassungsmaßnahme auf Dachniveau angewendet wird und der Einfluss auf die bodennahe Temperatur geringer ist als bei einer Anpassungsmaßnahme im Straßenniveau. Dennoch ist durch die Erhöhung der Albedo eine, wenn auch kleine, Verbesserung in Bezug auf die Reduktion der städtischen Überwärmung erreichbar. Der Vergleich zwischen den Bonner Plangebieten und den idealisierten Stadtgebieten zeigt, dass tagsüber die Kühlwirkung durch eine erhöhte Albedo eine vergleichbare Größenordnung aufweist. Dabei liegen die erzielbaren Temperaturänderungen der idealisierten Stadtquartiere mit Ausnahme von „Friesdorf Süd“, „Friesdorf Nord“ und „Vilich-Müldorf“ höher als in den Bonner Plangebieten.

Für die Dachbegrünung ergeben sich vergleichbare Ergebnisse zur Dachalbedo. Der Regressionskoeffizient „a“ nimmt für das Beispiel Maximumtemperatur und Dachbegrünung Werte zwischen etwa -0,01 (z. B. Karlstraße) und -0,05 (z. B. idealisiertes Stadtquartier Blockrandbebauung) an. Im Mittel über alle Plangebiete und idealisierten Stadtquartiere liegt der Wert bei -0,03 Kelvin pro Erhöhung der Dachbegrünung um 10 Prozent. Dieser Wert ist somit kleiner als die Werte für die Maximum- und Minimumtemperatur beim Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden und bei der Dachalbedo. Der Vergleich zwischen den Bonner Plangebieten und den idealisierten Stadtgebieten zeigt, dass tagsüber die Kühlwirkung durch Dachbegrünung eine vergleichbare Größenordnung aufweist. Wie auch bei der Dachalbedo liegen die Temperaturänderungen der idealisierten Stadtquartiere höher als in den Bonner Plangebieten mit Ausnahme von „Friesdorf Süd“, „Friesdorf Nord“ und „Auerberg“. Ein Vergleich zwischen „Vilich-Müldorf“ und dem zugehörigen idealisierten Stadtquartier wurde nicht durchgeführt, da das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  mit einem Wert von 0.16 für den idealisierten Lauf statistisch keine lineare Zunahme der Kühlwirkung mit zunehmender Dachbegrünung belegt. Insgesamt belegen jedoch sowohl die Ergebnisse für die Albedo der Dachflächen als auch für die Dachbegrünung, dass die Wirksamkeit der Anpassungsmaßnahme von idealisierten Stadtquartieren auf reale Stadtquartiere übertragen werden kann.

Tabelle 7: Vergleich der Maximumtemperatur zwischen den Bonner Plangebieten und den idealisierten Stadtquartieren (kursiv und grau unterlegt) für die Albedo der Dachflächen.

<b>Gebiet</b>	<b>Temperatur</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<i>Idealisiertes Stadtquartier Industrie und Gewerbe dicht (mit Umgebung dichte Bebauung)</i>	Max	-0,0521	30,317	0,99
Karlstraße	Max	-0,0114	30,753	0,99
<i>Idealisiertes Stadtquartier Blockrandbebauung (mit Umgebung dichte Bebauung)</i>	Max	-0,0743	31,602	0,99
Innenstadt Nord	Max	-0,0191	31,087	0,98
Innenstadt Süd	Max	-0,0468	31,181	0,99
<i>Idealisiertes Stadtquartier Ein- und Zweifamilienhäuser (mit Umgebung lockere Bebauung)</i>	Max	-0,0264	29,389	0,99
Vilich-Müldorf	Max	-0,0354	30,348	0,99
<i>Idealisiertes Stadtquartier Doppelhaus- und Zeilenbebauung (mit Umgebung Bebauung mittlerer Dichte)</i>	Max	-0,0365	29,798	0,99
Auerberg	Max	-0,0324	30,969	0,99
Friesdorf Nord	Max	-0,0534	30,845	0,99
<i>Idealisiertes Stadtquartier Industrie und Gewerbe dicht (mit Umgebung Bebauung mittlerer Dichte)</i>	Max	-0,0461	29,746	0,99
Friesdorf Süd	Max	-0,0505	30,890	0,99

Tabelle 8: Vergleich der Maximumtemperatur zwischen den Bonner Plangebieten und den idealisierten Stadtquartieren (kursiv und grau unterlegt) für die Dachbegrünung.

<b>Gebiet</b>	<b>Temperatur</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<i>Idealisiertes Stadtquartier Industrie und Gewerbe dicht (mit Umgebung dichte Bebauung)</i>	Max	-0,0350	30,251	0,99
Karlstraße	Max	-0,0062	30,735	0,98
<i>Idealisiertes Stadtquartier Blockrandbebauung (mit Umgebung dichte Bebauung)</i>	Max	-0,0506	31,505	0,99
Innenstadt Nord	Max	-0,0175	31,064	0,99
Innenstadt Süd	Max	-0,0419	31,135	0,99
<i>Idealisiertes Stadtquartier Ein- und Zweifamilienhäuser (mit Umgebung lockere Bebauung)</i>	Max	0,0076	29,276	0,16
Vilich-Müldorf	Max	-0,0212	30,293	0,99
<i>Idealisiertes Stadtquartier Doppelhaus- und Zeilenbebauung (mit Umgebung Bebauung mittlerer Dichte)</i>	Max	-0,0121	29,719	0,57
Auerberg	Max	-0,0200	30,960	1,00
Friesdorf Nord	Max	-0,0325	30,776	0,99
<i>Idealisiertes Stadtquartier Industrie und Gewerbe dicht (mit Umgebung Bebauung mittlerer Dichte)</i>	Max	-0,0285	29,675	0,99
Friesdorf Süd	Max	-0,0307	30,812	0,99

#### 5.8.4 Das Tool „Hitzeangepasste Quartiersentwicklung in Nordrhein-Westfalen“

Der Vergleich der Modellergebnisse der Bonner Plangebiete mit den idealisierten Stadtquartieren zeigt, dass die berechneten Wirkungen der verschiedenen Anpassungsmaßnahmen gut mit den Messergebnissen übereinstimmen und die Übertragung auf landesweite Bebauungstypen möglich ist. Die Modellergebnisse für die idealisierten Stadtquartiere bilden die Grundlage des neuen Planungs-Tools „Hitzeangepasste Quartiersplanung in Nordrhein-Westfalen“ (INKAS-NRW). Das Tool INKAS-NRW baut mit seiner Funktionalität und Bedienung auf dem Informationsportal Klimaanpassung in Städten (INKAS) auf (BUCHHOLZ et al. 2016).

Das anwenderfreundliche Tool für Kommunen und Stadtplaner steht online zur Verfügung. Mit dem Tool können interaktiv verschiedene Anpassungsmaßnahmen und ihre Wirkung in einem frei wählbaren Stadtquartier geprüft und so für die jeweiligen Gegebenheiten die effektivste Anpassungsmaßnahme abgeleitet werden. Im Fokus steht hierbei die Anpassung an sommerliche Hitzeperioden durch städtebauliche Maßnahmen, wie beispielsweise die Erhöhung des Grünflächenanteils, der Dachbegrünung oder Veränderungen der Materialeigenschaften (Albedo).

Der Einstieg erfolgt über das Fachinformationssystem (FIS) Klimaanpassung des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV 2020). In der Kartenansicht Fachdaten befindet sich der Kartenlayer „Hitzeangepasste Quartiersplanung“. Durch einen Klick in die Kartenansicht oder die Eingabe in der Adressensuche können beliebige Stadtquartiere ausgewählt werden. Beim Klicken auf das Stadtquartier öffnet sich ein neues Fenster zum dortigen Bebauungstyp und der Quartiersumgebung. Neben dem Bebauungs- und Freiflächentyp sowie dem Umgebungstyp gibt es weitere detaillierte Informationen zu Parametern des ausgewählten Gebietes. Hierzu zählen unter anderem der Versiegelungsgrad, der Bebauungsgrad und die mittlere Gebäudehöhe. Die Parameter werden sowohl für das ausgewählte Gebiet dargestellt als auch im Vergleich zu den Mittelwerten für NRW. Mit Klick auf die Schaltfläche „zur Auswahl der Anpassungsmaßnahmen“ öffnet sich ein externes Fenster und Sie werden zur Anwendung INKAS-NRW des Deutschen Wetterdienstes weitergeleitet. Dort können Sie für den ausgewählten Bebauungstyp und voreingestellten Umgebungstyp standardisierte Klimaanpassungsmaßnahmen auswählen und deren Wirkung auf die Lufttemperatur im Stadtquartier bestimmen.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert durch das LANUV und das MULNV NRW.

In erster Linie möchten wir uns bei den Projektmitarbeiter\*innen Frau Dr. Nicole Kauke (LANUV-NRW), Frau Jessica Löffler (Stadt Bonn), Herrn Joachim Helbig (Stadt Bonn) und Herrn Dr. Dieter Misterek (ehemals Stadt Bonn) für die hervorragende Organisation, die sehr gute Koordination und die gelungene Zusammenarbeit im Projekt bedanken. Die regelmäßigen Projekttreffen und die fruchtbaren Diskussionen haben wesentliche Impulse für diesen Bericht gegeben.

Unser weiterer Dank gilt Herrn Dr. Meinolf Kossmann (DWD), der durch hilfreiche Kommentare und konstruktive Kritik erheblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Unser Kollege Kelly Stanley (DWD) hat die Summary überarbeitet. Auch ihm sei herzlichst gedankt.

Sehr anerkennenswert ist der Einsatz der Kollegen der mobilen Messeinheit (MME) des DWD Lars Müller und Jesko Kruda, die mit großem Engagement, zum Teil auch nachts, Profifahrten durchgeführt haben. Die Fahrten wurden dankenswerterweise durch den Leiter der MME, Peter Stanislawsky, koordiniert.

Vielen Dank an Marlen Hoischen und Christin Schmidt. Sie haben während ihres Praktikums im Studium mit sehr viel Fachwissen und Fleiß in entscheidendem Maß bei der graphischen Umsetzung der Ergebnisse geholfen.

Außerdem haben einige Unterstützer\*innen geholfen und etliche Stunden darauf verwandt, mit akribischer Genauigkeit den Text auf Fehler in Form und Inhalt, zu untersuchen. Hierfür möchten wir Frau Ute Laudert, Herrn Karsten Mix und Herrn Sigmar Roll recht herzlich danken.

## Literaturverzeichnis

- BRASSEUR, G. P., JACOB, D., SCHUCK-ZÖLLER, S., 2017: Klimawandel in Deutschland. *Springer Open*, Geesthacht, 348 pp. DOI: 10.1007/978-3-662-50397-3.
- BUCHHOLZ, S., KOSSMANN, M., ROOS, M., 2016: INKAS - a guidance tool to assess the impact of adaptation measures against urban heat. *Meteorol. Z.* **25**, No. **3**, 281-289.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB) (jetzt: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)), 2015: Grünbuch Stadtgrün, Grün in der Stadt - Für eine lebenswerte Zukunft, Berlin, 96 pp.
- DWD, 2020: Nationaler Klimareport. 4. korrigierte Auflage, Deutscher Wetterdienst Potsdam, 54 pp.
- COUMOU, D. et al., 2018: The influence of arctic amplification on mid-latitude summer circulation. *Nature Communications* **9**.
- FENNER, D., MEIER, F., SCHERER, D., POLZE, A., 2014: Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001–2010. *Urban Climate* Volume **10**, Part 2, 308-331. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.02.004.
- FRÜH, B. et al., 2011b: Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. *Journal Applied Meteorology and Climatology* **50(1)**, 167-184.
- GROSS, G., 2012: Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing. *Meteorol. Z.* **21**, No. 2, 173-181.
- GROSS, G., 1989: Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. In: LANUV-Fachbericht **50** (LANUV, DWD, Stadt Köln, StEB Köln), 2013: Klimawandelgerechte Metropole Köln. 146 pp.
- HALBIG, G., STEURI, B., BÜTER, B., HEESE, I., SCHULTZE, J., STECKING, M., STRATBÜCKER, S., WILLEN, L., WINKLER, M., 2019: User requirements and case studies to evaluate the practicability and usability of the urban climate model PALM-4U. *Meteorologische Zeitschrift* **28**, 139 - 146. DOI: 10.1127/metz/2019/0914.
- HENNINGER, S., WEBER, S., 2019: Stadtklima. *Verlag Ferdinand Schöningh ein Imprint der Brill Gruppe*, Paderborn, 260 pp.
- INKAS, 2020: Informationsportal Klimaanpassung in Städten. URL: <https://www.dwd.de/inkas>. Aufgerufen am 12.10.2020.
- IÖR, 2017: Abschlussdokumentation Bebauungsstrukturklassifizierung für Nordrhein-Westfalen (Werkvertrag Nr. 5013857), Im Auftrag des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW Koblenz-Landau.
- JENDRITZKY, G. et al., 1990: Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung* **114**.

- KUTTLER, W., 2012: Climate Change on the Urban Scale - Effects and Counter-Measures in Central Europe. In: Earth and Social Dimensions of Climate Change, *Netra Chhetri*. DOI: [10.5772/50867](https://doi.org/10.5772/50867).
- LANUV, 2020: Hitzeangepasste Quartiersplanung. URL: <https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaanpassung-in-nrw/fis-klimaanpassung-nordrhein-westfalen/hitzeangepasste-quartiersplanung>. Aufgerufen am 12.10.2020.
- LANUV (LANUV, DWD, Stadt Köln, StEB Köln), 2013: Klimawandelgerechte Metropole Köln. LANUV-Fachbericht **50**, 146 pp. URL: [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3\\_fachberichte/30050.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30050.pdf). Aufgerufen am 07.09.2021.
- JING, L., LIANG, Y., 2021: The impact of tree clusters on air circulation and pollutant diffusion-urban micro scale environmental simulation based on ENVI-met. IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* **657**.
- MÜLLER, N., HECHT, R., BUCHHOLZ, S., 2017: Bebauungsstrukturklassifikation NRW - Grundlage für Klimamodellsimulationen. In: Flächennutzungsmonitoring IX - Nachhaltigkeit von Siedlung und Verkehr? ISBN: 978-3-944101-73-6, IÖR Schriften. **73**, Rhombos-Verlag, Berlin, URL: <https://www.ioer.de/publikationen/ioer-schriften/ioer-schriften-73/>.
- OTTE, U., JUNG, M., JENDRITZKY, G., 1990: Amtliches Gutachten über das Stadtklima von Bonn, *Deutscher Wetterdienst*, Essen, 141pp.
- RIEDIGER, U., GRATZKI, A., 2014: Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift* **23**, 231- 252.
- ROSENZWEIG, C. et al., 2018: Climate Change and the Cities, *Cambridge University Press*, 350 pp.
- SCHERER, D., ANTRETTNER, F., BENDER, S., CORTEKAR, J., EMEIS, S., FEHRENBACH, U., GROSS, G., HALBIG, G., HASSE, J., MARONGA, B., RAASCH, S., SCHERBER, K., 2019: Urban Climate Under Change [UC]2 - A National Research Programme for Developing a Building-Resolving Atmospheric Model for Entire City Regions. *Meteorologische Zeitschrift* **28**, 95 - 104. DOI: 10.1127/metz/2019/0913.
- SIEVERS, U., ZDUNKOWSKI, W., 1986: A microscale urban climate model. *Beitr. Phys. Atmosph.* **59**, 13-40.
- SIEVERS, U., 2012: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO\_3 Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **240**, Offenbach am Main.
- STAIGER, H., LASCHEWSKI, G., GRÄTZ, A., 2012: The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A. scientific basics. *International journal of biometeorology* **56(1)**, 165-76.
- ZUVELA-ALOISE, M., KOCH, R., BUCHHOLZ, S. et al., 2016: Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change* **135**, 425-438.

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Lage des Untersuchungsgebietes in NRW (kleines Bild links) und topographische Kartendarstellung des Untersuchungsgebietes 26 km x 24 km mit dem eingezeichneten Umriss der Stadt Bonn.....	14
Abb. 2	Geländehöhendarstellung des Untersuchungsgebiets (Geländehöhen in Metern, s. Legende) .....	15
Abb. 3	Unterteilung der 9 Bebauungstypen bezüglich der Flächenaufteilung (s. Legende) und Gebäudehöhe (blaue Rechtecke).....	16
Abb. 4	Untersuchungsgebiet mit Landnutzungsverteilung, verwendete Landnutzungsklassen (s. Legende) .....	18
Abb. 5	Von MUKLIMO_3 berechnete Temperaturverteilung in 2 m Höhe über Grund für einen heißen Tag im Juli mit einer Anströmrichtung aus Südost .....	20
Abb. 6	Lage der kontinuierlich messenden (blau) und temporären (rot) Messstandorte .....	22
Abb. 7	Umland- und Stadtstrukturen im Umkreis von 100 m (türkise Linie) um die vier temporären und die zwei kontinuierlich messenden Messstandorte (roter Punkt).....	23
Abb. 8	Temporäre Messstation Wilhelmstraße, Messaufbau: Messhütte mit Temperatur- und Feuchtemessung, Niederschlagstopf (Pluvio Ott), GLOBE-Thermometer für die Messung der mittleren Strahlungstemperatur (schwarze Kugel).....	24
Abb. 9	Messstation an der Königstraße mit Messhütte für die Lufttemperatur und Luftfeuchte. ....	25
Abb. 10	Messstation an der Karlstraße (hier Stationsmast mit Windmesser in 10 m Höhe für zusätzliche Vergleiche zu den Messungen in 2 m Höhe.) .....	26
Abb. 11	Lage der Messstation am Nelly-Sachs-Weg, Stationsmast mit Solarmodul, Datenlogger und Messsensoren für Temperatur und relative Feuchtigkeit in 2 m Höhe sowie Globe-Thermometer (schwarze Kugel) und Niederschlagstopf (Pluvio Ott) links vom Stationsmast.....	27
Abb. 12	Route der ca. einstündigen Profilmessfahrten durch Bonn (dicke schwarze Linie).....	29
Abb. 13	Temperaturtagesgang September 2016 in 2 m über Grund (rote Linie) im Vergleich zum Durchschnittsseptember (2001 bis 2016, blaue Linie) für die Station Bonn-Roleber.....	31
Abb. 14	Temperaturtagesgang September 2016 in 2 m über Grund (rote Linie) im Vergleich zum Durchschnittsseptember (2001 - 2016, blaue Linie) für die Station Flughafen Köln-Bonn.....	31
Abb. 15	Mittlerer Tagesgang der 2 m Temperatur an den 4 temporären Messstationen in Bonn und der stationären DWD-Messstation in Bonn-Roleber (hellblaue Linie) im September 2016 (Bezug: linke Ordinate), sowie die Differenzen zwischen den jeweiligen temporären Temperaturmessungen und den zeitlich entsprechenden Temperaturwerten von Bonn-Roleber (gestrichelte Linien, Bezug: rechte Ordinate).....	33
Abb. 16	Stärkewindrose der Station Bonn-Roleber in 10m über Grund für die Jahre 1987 bis 2016 .....	36
Abb. 17	Mittlerer Tagesgang der 2 m Temperatur an den temporären Messstationen für Tage mit windschwachen Strahlungsnächten im September 2016 .....	37
Abb. 18	Mittlerer Tagesgang der 2 m Temperatur an den temporären Messstationen für Tage ohne windschwache Strahlungsnächte im September 2016.....	38

Abb. 19	Verlaufskurve der relativen Luftfeuchte in 2 m über Grund (in %) während einer Strahlungswetterepisode im September 2016 (06.09.2016 bis 08.09.2016).....	39
Abb. 20	Verlaufskurve der Windgeschwindigkeit in 2 m über Grund in m/s während einer Strahlungsepisode im September 2016 (06.09.2016 bis 08.09.2016).....	40
Abb. 21	Verlauf der gefühlten Temperatur (°C) (durchgezogene Linien), die mit dem Klima-Michel-Modell berechnet wurde, und der gemessenen Temperatur (°C) (gestrichelte Linien) in 2 m über Grund; Schwellwert für eine starke Wärmebelastung: Gefühlte Temperatur = 32°C (rote Linie) .....	41
Abb. 22	Profilmessfahrt in Bonn, 03.07.2018, 21:29 - 22:18 Uhr (UTC): entlang der Messroute aufgenommene Temperaturwerte in 1,9 m über Grund (s. Legende). Die grünen Punkte kennzeichnen die Lage der temporären Messstationen (Kartenhintergrund copyright: Esri) .....	43
Abb. 23	Luftbild der Innenstadt von Bonn mit den eingezeichneten Untersuchungsgebieten (Quelle Kartenhintergrund: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus, DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community).....	44
Abb. 24	Profilmessfahrt in Bonn, 12.09.2018, 04:03 - 04:53 Uhr (UTC): entlang der Messroute aufgenommene Temperaturwerte in 1,9 m über Grund (s. Legende). Die temporären Messstandorte sind mit grünen Punkten gekennzeichnet und die entlang der Messroute liegenden Untersuchungsareale für die Modellsimulation sind in der Graphik als braune Flächen dargestellt (Kartenhintergrund copyright: ESRI).....	46
Abb. 25	Wärmeabgabe der Sonnenstrahlung an die Umgebung und in das Gebäude bei einem herkömmlichen Dach und bei einem begrünten Dach.....	48
Abb. 26	Wetterkarte vom 03.07.2018, 12 Uhr (UTC) mit Stationswetterdaten und der Bodendruck-Verteilung (Isobaren) sowie den eingezeichneten, analysierten Fronten.....	51
Abb. 27	Composite-Satellitenbild vom 03.07.2018, 12 Uhr (UTC) bestehend aus sichtbarem Anteil und Infrarot-Anteil (Bewölkung in niedrigem Niveau in gelblichgrünen Farbtönen, hochreichende konvektive Bewölkung in Lila und hellem Lila. Außerdem Symbole für die Bodendaten .....	52
Abb. 28	Prozentuale Verteilung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet.....	53
Abb. 29	Ausgewählte Plangebiete der Stadt Bonn für die Untersuchungen mit Anpassungsmaßnahmen vorgenommen wurden (Quelle Kartenhintergrund: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus, DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community) .....	54
Abb. 30	Überblick über die Lage der Plangebiete (linke Spalte: Quelle Luftbild: BKG 2019 GEOBasis-DE) und deren Landnutzung (rechte Spalte, Legende entspricht Legende in Abb. 4).....	58
Abb. 31	Mit MUKLIMO_3 berechnete Temperaturverteilung (in ° C) in 2 m Höhe über Grund für einen Sommertag, bzw. im Innenstadtgebiet heißen Tag Mitte Juli für die Stadt Bonn und Umgebung zum Mittagstermin für den Ist-Zustand (Referenzlauf); schwarze Linien: Isohypsen (Linien gleicher orographischer Höhe, erste Isohypse hier bei 60 m, dann in 20 m-Schritten).....	59
Abb. 32	Mit MUKLIMO_3 berechnete Temperaturverteilung (in °C) in 2 m über Grund für einen warmen, wolkenarmen Tag Mitte September für die Stadt Bonn und	

	Umgebung am frühen Morgen; schwarze Linien: Isohypsen (Linien gleicher orographischer Höhe, erste Isohypse hier bei 60m, dann in 20m-Schritten).....	61
Abb. 33	Temperaturverteilung entlang des Messroutenverlaufes (ca. 1,9 m Höhe über Grund) am 03.07.2018, 21:29 Uhr - 22:18 Uhr (UTC) im Vergleich zur mit MUKLIMO_3 berechneten Temperaturverteilung in 2 m Höhe über Grund für eine Julinacht um 22 Uhr (UTC) (entspricht 00:00 Uhr MESZ).....	62
Abb. 34	Mit MUKLIMO_3 berechneter Temperaturverlauf (in °C) in Bodennähe für einen repräsentativen heißen Julitag. Die unterschiedlichen Temperaturkurven zeigen die für die jeweiligen Untersuchungsareale stündlich gemittelten Temperaturwerte .....	63
Abb. 35	Mit MUKLIMO_3 berechneter Tagesgang der relativen Feuchte für einen repräsentativen Strahlungstag im September (großes Bild) im Vergleich zu den gemessenen Werten der relativen Feuchte an einem Strahlungstag (08.09.2016) während der Messphase, auf beiden Graphiken entspricht die blaue Linie einer Innenstadtstation und die rote Linie einer Stadtrandstation. ....	66
Abb. 36	Mit MUKLIMO_3 berechneter Tagesgang der Strahlungstemperatur (tmrt) für einen repräsentativen Strahlungstag im September (großes Bild) im Vergleich zu den gemessenen Werten der Strahlungstemperatur an einem Strahlungstag (07.09.2016) während der Messphase, auf beiden Graphiken entspricht die blaue Linie einer Innenstadtstation und die rote Linie einer Stadtrandstation.....	67
Abb. 37	Verteilung der berechneten Temperaturdifferenz in Bodennähe um 10:00 Uhr (MESZ) zwischen dem Rechenlauf mit einer Dachbegrünung von 100 % in den Untersuchungsgebieten und dem Referenzlauf .....	69
Abb. 38	Verteilung der Temperaturdifferenz in Bodennähe um 12:00 Uhr (MESZ) zwischen dem für die Untersuchungsgebiete modifizierten Lauf mit einer Dachbegrünung von 100 % und dem Referenzlauf. Ausschnitt mit Untersuchungsarealen: Innenstadt-Süd, Innenstadt-Nord und Karlstraße; schwarze Linien: Isohypsen (Linien gleicher orographischer Höhe, erste Isohypse hier bei 60 m, dann in 20 m-Schritten (s. Abb. 37)) .....	70
Abb. 39	Verteilung der Temperaturdifferenz in Bodennähe um 12:00 Uhr MESZ zwischen dem für die Untersuchungsgebiete modifizierten Lauf mit einer Entsiegelung aller Flächen zwischen den Gebäuden bis zu einem Versiegelungsgrad von 10 % und dem Referenzlauf; schwarze Linien: Isohypsen (Linien gleicher orographischer Höhe, erste Isohypse hier bei 60 m, dann in 20 m-Schritten (s. Abb. 37)).....	71
Abb. 40	Über die Planflächen gemittelte bodennahe Temperatur (in °C) um 12:00 Uhr (MESZ), dabei im Vergleich: Referenzlauf (blauer Balken) zu - bei sonst unveränderten Bedingungen - über die jeweilige Planfläche geändertem Reflexionsvermögen der Dächer (Albedo 80 %) (roter Balken), über die jeweilige Planfläche simulierte vollständige Dachbegrünung von 100 % (grüner Balken), über die jeweilige Planfläche Entsiegelung der Fläche zwischen den Gebäuden bis zu einem Versiegelungsgrad von 10 % (lila Balken). Die über den Balken angegebenen Zahlenwerte liefern die Differenz (in Kelvin) zum Referenzlauf (blauer Balken): Positive Werte bedeuten eine Temperaturabnahme.....	73
Abb. 41	Über die Planflächen gemittelte bodennahe Temperatur um 16:00 Uhr (MESZ), dabei im Vergleich: Referenzlauf (blauer Balken) zu - bei sonst unveränderten Bedingungen - über die jeweilige Planfläche geändertem Reflexionsvermögen der	

	Dächer (Albedo 80 %) (roter Balken), über die jeweilige Planfläche simulierte vollständige Dachbegrünung von 100 % (grüner Balken), über die jeweilige Planfläche Entsiegelung der Fläche zwischen den Gebäuden bis zu einem Versiegelungsgrad 10 % (lila Balken). Die über den Balken angegebenen Zahlenwerte liefern die Differenz zum Referenzlauf (blauer Balken). ....	73
Abb. 42	Simulierte bodennahe Temperaturverteilung in der Bonner Innenstadt um 12:00 Uhr (MESZ): kolorierte Darstellung für die Plangebiete (s. Legende) und Grauton-Darstellung für die Temperaturverteilung außerhalb der Plangebiete im Hintergrund (s. Legende). Referenzlauf (links oben) im Vergleich zu den Modellläufen mit Klimaanpassungsmaßnahmen. Für ausgewählte Modellgitterzellen sind zusätzlich die Werte der Lufttemperatur als Zahl angegeben .....	74
Abb. 43	Temperaturverteilung in Bonn Friesdorf um 12:00 Uhr (MESZ) kolorierte Darstellung (s. Legende Abb. 42) und Grauton-Darstellung für den Hintergrund (s. Legende Abb.42). Referenzlauf im Vergleich zu den modifizierten Modellläufen.....	76
Abb. 44	Temperaturverteilung in Bonn Auerberg um 12:00 Uhr (MESZ) kolorierte Darstellung (s. Legende Abb. 42) und Grauton-Darstellung für den Hintergrund (s. Legende Abb. 42). Referenzlauf im Vergleich zu den modifizierten Modellläufen.....	78
Abb. 45	Temperaturverteilung in Bonn Vilich-Müldorf um 12:00 Uhr (MESZ) kolorierte Darstellung (s. Legende Abb. 42) und Grauton-Darstellung für den Hintergrund (s. Legende Abb. 42). Referenzlauf im Vergleich zu den modifizierten Modellläufen.....	79
Abb. 46	Für unterschiedliche Untersuchungsareale von MUKLIMO_3 berechnete Tagestemperaturmaxima an einem heißen Tag im Juli (blauer Balken, Referenzlauf), sowie berechnete Temperaturhöchstwerte bei unterschiedlich starker Nachverdichtung mit und ohne Anpassungsmaßnahmen.....	81
Abb. 47	Modellsimulation der Höchsttemperatur an einem heißen Julitag für das Untersuchungsareal „Innenstadt Süd“: Referenzzustand (linker roter Balken) sowie mit Nachverdichtung (3 %, 10 %, 20 %) und Anpassungsmaßnahmen (s. Legende). Rote Zahlen: absolute Temperaturänderung gegenüber dem Referenzlauf nach jeweils erfolgter Nachverdichtung und gegebenenfalls zusätzlichen Klimaanpassungsmaßnahmen. Schwarze Zahlen mit negativem Vorzeichen: durch Klimaanpassungsmaßnahmen erwirkte Temperaturreduktion.....	82
Abb. 48	Modellsimulation der Höchsttemperatur an einem heißen Julitag für das Untersuchungsareal „Müldorf-Vilich (Nelly-Sachs-Weg)“ (linker roter Balken) sowie Nachverdichtung (3 %, 10 %, 20 %) und Anpassungsmaßnahmen (s. Legende). Rote Zahlen: absolute Temperaturänderung gegenüber dem Referenzlauf nach jeweils erfolgter Nachverdichtung und gegebenenfalls zusätzlichen Klimaanpassungsmaßnahmen. Schwarze Zahlen mit negativem Vorzeichen: durch Klimaanpassungsmaßnahmen erwirkte Temperaturreduktion.....	83
Abb. 49	Modellsimulation der Höchsttemperatur an einem heißen Julitag für das Untersuchungsareal „Innenstadt Süd“: Referenz (linker roter Balken) sowie Aufstockung (1 Etage, 2 Etagen) zuzüglich Anpassungsmaßnahmen (s. Legende). Rote Zahlen: absolute Temperaturänderung gegenüber dem Referenzlauf nach jeweils erfolgter Aufstockung und gegebenenfalls zusätzlichen	

	Klimaanpassungsmaßnahmen. Schwarze Zahlen mit negativem Vorzeichen: (s. Abb. 47).....	84
Abb. 50	Modellsimulation der Tiefsttemperatur für einen Strahlungstag im Juli für das Untersuchungsareal „Innenstadt Süd“: Referenzlauf (linker roter Balken) sowie Nachverdichtungen von 3 % und 10 % und Anpassungsmaßnahmen (s. Legende). Rote Zahlen: absolute Temperaturänderung gegenüber dem Referenzlauf nach jeweils erfolgter Nachverdichtung und gegebenenfalls zusätzlichen Klimaanpassungsmaßnahmen. Schwarze Zahlen mit negativem Vorzeichen: durch Klimaanpassungsmaßnahmen erwirkte Temperaturreduktion.....	85
Abb. 51	Modellsimulation der Tiefsttemperatur für einen Strahlungstag im Juli für das Untersuchungsareal „Vilich-Müldorf“ (Nelly-Sachs-Weg) (linker Balken) sowie Nachverdichtung (3 %, 10 %) und Anpassungsmaßnahmen (s. Legende). Rote Zahlen: absolute Temperaturänderung gegenüber dem Referenzlauf nach jeweils erfolgter Nachverdichtung und gegebenenfalls zusätzlichen Klimaanpassungsmaßnahmen. Schwarze Zahlen mit negativem Vorzeichen: durch Klimaanpassungsmaßnahmen erwirkte Temperaturreduktion.....	86
Abb. 52	Beispiel zweier linearer Regressionen basierend auf dem Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden und der Maximumtemperatur für ein idealisiertes Stadtquartier mit Ein- und Zweifamilienhäusern und für die Modellgitterzellen mit gleichem Bebauungstyp in „Vilich-Müldorf“.....	92

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Lage und Messausstattung der temporären Messstandorte .....	22
Tab. 2	Variationen der drei Anpassungsmaßnahmen .....	49
Tab. 3	Maßnahmenkombinationen aus Wohnraumgewinnung (Nachverdichtung, Aufstockung) und jeweils zwei Anpassungsmaßnahmen.....	50
Tab. 4	Einordnung der gemessenen und vom Modell berechneten Temperaturwerte für die jeweiligen Untersuchungsgebiete.....	66
Tab. 5	Bebauungsmerkmale der Plangebiete der Stadt Bonn im Vergleich zu den für INKAS-NRW simulierten idealisierten Stadtquartieren (kursiv und hell grau hinterlegt) .....	90
Tab. 6	Vergleich der Lufttemperatur (Maximum und Minimum) zwischen den Bonner Plangebieten und den idealisierten Stadtquartieren (kursiv und grau unterlegt) für den Versiegelungsgrad zwischen den Gebäuden .....	92
Tab. 7	Vergleich der Maximumtemperatur zwischen den Bonner Plangebieten und den idealisierten Stadtquartieren (kursiv und grau unterlegt) für die Albedo der Dachflächen.....	95
Tab. 8	Vergleich der Maximumtemperatur zwischen den Bonner Plangebieten und den idealisierten Stadtquartieren (kursiv und grau unterlegt) für die Dachbegrünung....	96

# Berichte des Deutschen Wetterdienstes

Nr. 254 S. Krähenmann, A. Walter und L. Klippel:

Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Downscaling und multivariate Bias-Adjustierung – Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes entwickelte Verfahren zum Postprocessing von Klimamodelldaten

Nr. 253 L. Hannak und S. Brinckmann:

Parallelmessungen an deutschen Klimareferenzstationen – Schlussfolgerungen im Hinblick auf Homogenität und Messunsicherheiten

Nr. 252 G. Mühlbacher, M. Koßmann, K. Sedlmeier und K. Winderlich:

Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes („Alpines Pumpen“) in München

Nr. 251 T. Winterrath, C. Brendel, M. Hafer, T. Junghänel, A. Klameth, E. Walawender, E. Weigl und A. Becker: Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie

Nr. 250 C. Hinz:

Optische Erscheinungen und andere ungewöhnliche Wetterphänomene auf der Wetterwarte Fichtelberg

Nr. 249 H. Noppel:

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

Nr. 248 U. Sievers:

Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO\_3. - Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen

Nr. 247 K. Trusilova und W. Riecke:

Klimauntersuchung für die Metropolregion Hamburg zur Entwicklung verschiedener meteorologischer Parameter bis zum Jahr 2050

Nr. 246 S. Hänsel, A. Schucknecht, F. Böttcher, C. Bernhofer und J. Matschullat:

Niederschlagsveränderungen in Sachsen von 1901 bis 2100 - Starkniederschlags- und Trockenheitstrends

Nr. 245 P. Winkler:

Untersuchung zu historischen und neuzeitlichen Dampfdruckmessungen am Observatorium Hohenpeißenberg

Nr. 244 C. Brendel, E. Brisson, F. Heyner, E. Weigl und B. Ahrens:

Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Thüringen

Nr. 243 K. Hoffmann, W. Bivour, B. Früh, M. Koßmann und P.-H. Voß:

Klimauntersuchungen in Jena für die Anpassung an den Klimawandel und seine erwarteten Folgen - ein Ergebnisbericht

Nr. 242 C. Stein und G. Maliltz:

Das Hochwasser an Elbe und Donau im Juni 2013: Wetterentwicklung und Warnmanagement des DWD: Hydrometeorologische Rahmenbedingungen

Nr. 241 A. Hoff, C. Drüe und H.-R. Sonnabend:

Messphysik und Datenverarbeitung der Verkehrsflugzeuge als meteorologische Sensorträger

Nr. 240 U. Sievers:

Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO\_3. - Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung





**Deutscher Wetterdienst**

Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes  
Bildungszentrum  
Am DFS-Campus 4  
63225 Langen

Über [www.dwd.de](http://www.dwd.de) gelangen Sie  
auch zu unseren Auftritten in:

