Klimaanpassung
[BESTKLIMA]
Remscheid.Solingen.Wuppertal

Geographisches Institut | RWTH AACHEN UNIVERSITY

BESTKLIMA

Teilprojekt

Siedlungsklimatische Modellierung

ANHANG

STADT REMSCHEID DER OBERBÜRGERMEISTER | Solingen | STADT WUPPERTAL | DAS BERGISCHE STÄDTEDREIECK

BESTKLIMA

Bericht: Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung

ANHANG

Bearbeitung

RWTH Aachen, Geographisches Institut,
Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie
Dr. Gunnar Ketzler, M.A.
Cathrin Werkmeister, M.Sc.
Prof. Dr. A. Schmidt

Mitarbeit

Dimitri Falk, M.Sc. (Kartographie)
Isabell Maras, M.Sc. (Bioklima)
Bastian Paas, M.Sc. (Messprogramm)
Dr. Timo Sachsen, M.A. (Messprogramm)
Arne Thiemann, B.Sc. (Grafik)
Mona Ziemes, Dipl. Betriebsw. (Layout)

BESTKLIMA ist ein Kooperationsprojekt des Instituts für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen und den Städten Remscheid, Solingen und Wuppertal sowie der Bergischen Struktur- und Wirtschaftsförderungsgesellschaft

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE

„DAS – Umsetzung der Regionalen KlimaAnpassungsstrategie im Bergischen Städtedreieck (BESTKLIMA)“ Förderkennzeichen 03 DAS 039

Stand: Juni 2018

Anhang zu

Ketzler, G., Werkmeister, C. und Falk, D. (2018): BESTKLIMA - Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung - Bericht

Inhaltsverzeichnis

Einleitung A-7
A1 Methodik A-8
A1.1. Kaltluftmodellierungen A-8
A1.2 Messfahrten und Geostatistik – Hot Spots A-12
A1.2.1 Durchführung der Messkampagnen A-12
A1.2.2 Geostatistische Auswertung der Messkampagnen A-14
A1.3 Humanbiometeorologische Analysen A-18
A1.3.1 Humanbiometeorologische Analyse der Messdaten A-21
A1.3.2 Human-biometeorologische Befragung A-21
A1.3.3. Stadtteilbezogene Anwohner-Umfrage des ISB A-22
A2 Untersuchungsstandorte und klimatische Einordnung A-24
A2.1 Untersuchungsstandorte A-24
A2.2 Das Klima im Bergischen Land A-25
A3 Siedlungsklimatische Modellierung für die Städte Remscheid, Solingen und Wuppertal A-26
A3.1 Klimatologische Einordnung des Sommers 2016 im Bergischen Land A-26
A3.2 Siedlungsklimatische Modellierungen A-29
A3.2.1 Siedlungsklimatische Modellierung Gesamtgebiet A-29
A3.2.2 Siedlungsklimatische Modellierung Remscheid A-30
A3.2.3 Siedlungsklimatische Modellierung Solingen A-42
A3.2.4 Siedlungsklimatische Modellierung Wuppertal A-52
Zu Kap. 3.3 Neueste Klimaszenarien für NRW A-64
A-4 Zusammenfassung A-65
Quellen A-69
Tabellenanhang A-73

Abbildungsverzeichnis

A1-1: Rückzugsorte in Remscheid (Ostbahnhofsgelände und Umgebung) A-22
A1-2: Rückzugsorte in Solingen (Ohligs und Umgebung) A-23
A1-3: Rückzugsorte in Wuppertal (Arrenberg und Umgebung) A-23
A2-1: Untersuchungsgebiete A-24
A3-1: Trend der heißen Tage für Remscheid und Projektion bzw. Daten für RS-Lennep A-26
A3-2: Trend der heißen Tage für Solingen und Projektion bzw. Daten für SG-Wald A-27
A3-3: Remscheid (gesamt) - Temperaturmodell als Ergebnis der geostatistischen Modellierung A-32
A3-4a: Geschlecht der Befragten an den Messstandorten. A-34
A3-4b: Wohlbefinden der Befragten am Aufenthaltsort. A-34
A3-5: Bioklimatische Belastung (PET, UTCI) und Lufttemperatur (Ta) in Remscheid. A- 35
A3-6: Solingen - Verlauf der Lufttemperatur, Station Solingen-Wald. A-46
A3-7: Lage der untersuchten Straßenabschnitte A-50
A3-8: Gesamtergebnisse der Sonderauswertung klimatische Wirkung von Straßenbäumen A-51
A3-9: Überlagerung von Tal- (schwarz) und Hangkaltluft A-52
A3-10: Kaltluftbewegungen in Wuppertal 3 h nach Sonnenuntergang nach dem „Handlungskonzepts Klima und Lufthygiene für die Stadt Wuppertal“ A-53
A3-11: Prognostizierte Veränderung der Heiz- und Kühlgraftage in NRW A-54
A3-12: Wuppertal - Temperaturmodell für Wuppertal-Arrenberg und Umgebung A-56
A3-13: RCP-Emissionspfade im Vergleich zu den SRES-Emissionspfaden bis 2050 A-64
A4-1: BESTKLIMA – Kernergebnisse für Remscheid (Poster) A-66
A4-2: BESTKLIMA – Kernergebnisse für Solingen (Poster) A-67
A4-3: BESTKLIMA – Kernergebnisse für Wuppertal (Poster) A-68

Tabellenverzeichnis

A1-1: Eckdaten zu den Messkampagnen in den drei Projektstädten A-13

A1-2: Referenzstationen in den Städten des Bergischen Städtedreiecks A-14

A1-3: Merkmale der multiplen Regressionsanalysen A-16

A3-1: Monats- und Jahresmittelwerte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte sowie monatliche Häufigkeiten von Sommertagen, heißen Tagen, Frosttagen und Eistagen an der Messstation Wuppertal-Bundesallee im Jahr 2004 im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten an der DWD-Station Wuppertal-Buchenhofen A-28

A3-2: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter am Pirnaplatz A-36

A3-3: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter in den Grünanlagen in Remscheid A-37

A3-4: Wohlbefinden der Befragten an den beiden Extremstandorten in Remscheid A-38

A3-5: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter am Standort Keldersstraße A-47

A3-6: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter im Park an der Wittenberg-straße A-48

A3-7: Wohlbefinden der Befragten an den beiden Extremstandorten in Solingen-Ohligs A-49

A3-8: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter am Robert-Daum-Platz A-60

A3-9: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter am Gutenbergplatz (in %) A-61

A3-10: Wohlbefinden der Befragten an den beiden Extremstandorten in Wuppertal-Arrenberg A-62

Einleitung

Dieser Anhang enthält ergänzende Fakten, Hintergrundinformationen und Quellenangaben zu einigen Kapiteln des Abschlussberichts „BESTKLIMA – Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung“.

Die Gliederung bezieht sich auf die Kapitel des Abschlussberichts „BESTKLIMA - Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung“. Sofern auf Abbildungen außerhalb des Anhangs Bezug genommen wird, ist dies entsprechend vermerkt.

A1 Zu Kap. 1 Methodik

Zu den interessantesten der neueren Ansätze in der Stadtklimatologie gehört die Untersuchung der Kühlleistung von Böden (LANUV, 2015); in diesem im Jahr 2015 konzipierten BESTKLIMA-Teilprojekt „Siedlungsklimatische Modellierung“ konnte er leider nicht berücksichtigt werden. Da es sich hier um eine - vom Maßstab her - kleinräumige Fragestellung handelt, die Details (unterschiedliche Zustände von Böden in nicht bebauten Bereichen) von großräumigeren Landnutzungseffekten (landwirtschaftliche, Siedlungsflächen etc.) im Rahmen der siedlungsklimatischen Modellierung betrifft, kann sie ohne weiteres später noch in Klimaanpassungsstrategien integriert werden. Derzeit müsste ohnehin erst einmal die Verfügbarkeit der entsprechenden Grundlagendaten geklärt werden, wobei neben den vom LANUV allgemein empfohlenen Datengrundlagen (z.B. Bodendaten für eine Bestimmung potentieller Kühlleistungen), eher auch Daten zu Verdichtungszustand und Feuchtigkeitsgehalt sowie Thermalbildpaare in Frage kommen (für eine Bestimmung tatsächlicher Kühlleistungen).

A1.1. Kaltluftmodellierungen

Nächtliche Kaltluftströme stellen bei austauscharmen Wetterlagen einen wichtigen Luftaustauschprozess dar und können bei sommerlichen Schönwetterlagen – insbesondere abends und in der frühen Nacht - erhebliche Abkühlungsleistungen erbringen. Zur Beurteilung nächtlicher Kaltluftströme wurden Modellierungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes vorgenommen (Sievers, 2008).

Alle Modellläufe wurden mit den Standardeinstellungen für die KLAM_21-Landnutzungsklassen, den Abkühlungsantrieb (-30 Wm-2) und dem Start-Offset für die abendliche städtische Überwärmung (0.5°C) betrieben (Sievers, 2008) und repräsentieren typische Verhältnisse in Nächten mit windschwacher Strahlungswitterung. Der Modelloutput wurde für zwei Zeitpunkte in der Nacht ausgewertet: eine frühe Nachtsituation zu einem Zeitpunkt 3 h nach Eintreten einer negativen Energiebilanz in der bodennahen Luftschicht (im Folgenden vereinfacht als „3 h nach Sonnenuntergang“ bezeichnet; in den Sommermonaten näherungsweise gegen Mitternacht) und eine späte Nachtsituation zu einem Zeitpunkt 8 h nach

Sonnenuntergang (in den Sommermonaten näherungsweise gegen Ende der Nacht = Sonnenaufgang).

Die Ergebnisse der Modellrechnungen wurden aufgrund des begrenzten Untersuchungsrahmens im Untersuchungsgebiet lediglich für zwei spezielle Fragestellungen (siehe Auswertung temporäre Messstation Remscheid-Stöcken, Kap. 3.2.2, und Auswertung Messstation Wuppertal-Bundesallee, Kap. 3.2.4) mit Messdaten verglichen. Allerdings liegen entsprechende Analysen von Messergebnissen (Ballonsondierungen, Stationsdaten, mobile Messungen) sowohl in Bezug auf die Temperaturen als auch die Kaltluftvolumenströme für Aachen vor (siehe z.B. Sachsen et al, 2012), die die Modellergebnisse dort in guter Näherung bestätigen.

Es wurde nicht näher untersucht, wie häufig sich im Bergischen Land nächtliche Kaltluftströme ausbilden, die den Modellergebnissen entsprechen. Im Raum Aachen treten solche Kaltluftströme an ca. einem Drittel aller Nächte auf (Ketzler, 2002); es sind dies typischerweise Nächte nach Tagen mit relativ hohen Temperaturen, in denen dann auch Inversionsneigung besteht. Im Bergischen Land kann aufgrund der höheren Bewölkungs- und Niederschlagsneigung von einer allgemein etwas geringeren Häufigkeit ausgegangen werden, allerdings sind die engen und tiefen Talabschnitte im Einzugsgebiet der Wupper teils sehr stark gegen die Oberströmung abgeschirmt, so dass hier eher größere Häufigkeiten erwartet werden können. Generell kann die Häufigkeit von Kaltluftereignissen im Lauf der Nacht abnehmen, allerdings liegen hierzu aus dem Untersuchungsgebiet keine Daten vor.

Um die Kaltluftabflüsse in den – aufgrund der Reliefverhältnisse vermuteten - großen Kaltlufteinzugsgebieten bei der bestmöglichen Modellauflösung beurteilen zu können, wurde ein zweistufiges Modellierungsverfahren angewendet. Dabei wurde zunächst eine großräumige Modellierung mit geringer Auflösung durchgeführt; sie macht die großräumigen Strömungszusammenhänge im Kaltlufteinzugsgebiet des gesamten Tals der Wupper erkennbar. Auf deren Basis wurde dann auch der notwendige Ausschnitt für die Detailmodellierungen in hoher Auflösung festgelegt.

Die großräumige Modelldomain umfasst das Gebiet zwischen Rheintal, Ruhrgebiet und Sauerland mit 1350 x 1350 Rasterpunkten in einem Ausschnitt von 135 x 135 km bei einer Auflösung von 100 m. Das hierfür verwendete Geländemodell (ASTER, 2016) wurde auch zur Geländedarstellung in den Übersichtskarten im Berichtsband verwendet. Für die Landnutzung wurden CORINE Landnutzungsdaten verwendet (EEA, 2014; siehe ebenfalls die entsprechenden Übersichtskarten im Berichtsband).

Verschiedene sich aus der großräumigen Modellierung oder aus konkreten Planungsfragen vor Ort ergebenden Untersuchungsbedarfe ließen sich nicht auf Basis der groben Relief- und Landnutzungsdaten der großräumigen Modellierung bearbeiten. Hierzu waren spezielle Modellläufe erforderlich.

Die jeweiligen Modelldomains wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt. Es ergab sich einerseits aus der großräumigen Modellierung, dass bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 bis 1,5 ms^{-1} in den Haupttälern Kaltluftbewegungen von eher unter 15 km in der frühen Nacht und von eher unter 45 km in der späten Nacht (ca. 8 h nach Sonnenuntergang) zu erwarten sind, was durch entsprechend große Modelldomains in den einzelnen Teilgebieten berücksichtigt werden konnte. Andererseits waren damit auch die Strömungsrichtungen bekannt, um die richtige Lage der Modelldomain festzulegen. Für die endgültige Modellierungen wurde deshalb entsprechend der konkreten Aufgabenstellung ein passender Ausschnitt ausgewählt; es wurde dabei dann auch in allen Fällen eine räumliche Auflösung erreicht, die für die jeweilige Fragestellung angemessen ist (siehe entsprechende Kapitel).

Die hoch aufgelösten Modellläufe basieren auf der aktuellen Landnutzungssituation gegeben durch die von den Städten bereitgestellten ALKIS-Landnutzungsinformationen (Stadt Remscheid, 2016; Stadt Solingen, 2016; Stadt Wuppertal, 2016 b) bzw. von ASTER-Höhendaten (ASTER, 2016) bzw. in einem Fall dem DGM1 (Geobasis.nrw, 2017 a). Für die weitere Bearbeitung dieser Modellläufe wurden die Ergebnisse insbesondere für den Zeitpunkt 3h nach Sonnenuntergang verwendet. Kartographische Darstellungen der Modellergebnisse wurden teils für die kaltluftbedingten Strömungsverhältnisse (Kaltluftvolumenstromdichte in $m^3m^{-2}s^{-1}$ und Windrichtung und -geschwindigkeit) und teils für die Abkühlungsraten vorgenommen. Der in den Abbildung 3-7 – 3-9 (und in entsprechenden Abbildungen in den Kap. 3.2.2, 3.2.3 und 3.2.4) ohne Farbe dargestellte Bereich umfasst das Gebiet außerhalb der Eindringtiefe der Kaltluft (entsprechend VDI-Richtlinie Lokale Kaltluft; VDI, 2003; siehe unten). Die Verwaltungsgrenzen wurden nach DVG1 dargestellt (geobasis nrw, 2017 b).

Für planungsbezogene Detailfragen wurde eine Auswertung der Modellergebnisse auf zwei zentrale Kriterien der VDI-Richtlinie ausgerichtet:

1. die Eindringtiefe der Kaltluft,
2. die Klassifizierung von Strömungstypen.

Die Eindringtiefe der Kaltluft wird mit dem für planerische Zwecke als relevant angesehenen Unterschreiten einer Durchlüftungsrate von etwa 2 h^{-1} angesetzt, die als Merkmal für eine noch gute Durchlüftung gewertet wird (VDI, 2003, S. 35). Dabei wird eine mittlere Gebäudehöhe (Canopyhöhe) von 18 m als vertikale Bezugsgröße für die Durchlüftung angesetzt; der Schwellenwert für die Grenze der Kaltluft entspricht demnach einem Volumenstrom von 0,01 $m^3 m^{-2} s^{-1}$.

Kaltluftabfluss, -akkumulation und -stau werden entsprechend der Merkmale der VDI-Richtlinie Lokale Kaltluft (VDI, 2003, S. 35, Tabelle 6) unterschieden. Dabei wird die Kombination aus Strömungsgeschwindigkeit und Schichtdicke als Kriterium herangezogen. Hangabwärtiger Kaltluftabfluss wird mit Werten < 5 $m^3 m^{-2} s^{-1}$ definiert (bis 2 ms^{-1} („1-3ms^{-1}“] und bis 10m Mächtigkeit), talabwärtige Kaltluftströme (in der VDI-RL etwas unglücklich als „Kaltluftakkumulation“ bezeichnet) mit Werten darüber. Für Kaltluftstau wird der Schwellenwert der Kaltluftmächtigkeit von > 50 m nach VDI-RL in Verbindung mit dem Schwellenwert der Strömungsgeschwindigkeit von < 0,5 m s^{-1} verwendet.

Zusätzlich werden Kaltluftüberströmungen (Transfluenzen; Sachsen et. al., 2013) über die Talwasserscheiden hinweg berücksichtigt.

A1.2 Messfahrten und Geostatistik – Hot Spots

Die in der Studie gewählte Vorgehensweise für die Auswertung von klimatologischen (speziell: Temperatur-) Daten zur Ermittlung von thermischen Belastungsschwerpunkten (Hot Spots) ist an Modellstudien aus dem ExWOST-Programm des BMVBS angelehnt (BMVBS, 2012; z.B. Saarbrücken bzw. Jena). Im Unterschied zu manchen anderen Studien basiert die Vorgehensweise in dieser Arbeit allerdings auf flächendeckenden bzw. geostatistisch modellierten Messdaten, insbesondere aus den Messprogrammen an Hitzetagen in den drei Städten.

A1.2.1 Durchführung der Messkampagnen

In allen drei Städten wurden im Umfeld der Sonderuntersuchungsgebiete an einem Hitzetag Messkampagnen mit Messfahrten und Punktmessungen an Messstationen durchgeführt (siehe Tabelle A1-1).

Die Temperaturmessdaten wurden nachmittags (teils bis abends) auf mit PKW durchgeführten Messfahrten gewonnen; dabei kam ein schneller Multisensor (URBMOBI; Temperatur, Feuchte, Globalstrahlung und GPS-Signal) zum Einsatz (Seidel et al., 2016).

Die Werte wurden als Relativwerte auf die gleichzeitig gemessenen Daten von Referenzstationen (Solingen-Wald, LANUV, 2016 a, Remscheid-Lennep, DWD, 2016, bzw. Wuppertal-Bundesallee, Stadt Wuppertal, 2016 b) bzw. auf die Temperatur über Grünflächen am Stadtrand („Freilandtemperatur“) bezogen. Aus den mehreren aufeinander folgenden Messfahrten und der sich daraus ergebenden Temperaturänderung an jedem Messpunkt wurde durch Zeitkorrektur ein Temperaturwert für alle Messpunkte zu einem einheitlichen Messzeitpunkt berechnet (für den Zeitpunkt des Temperaturmaximums an der Referenzstation).

Tab. A1-1: Eckdaten zu den Messkampagnen in den drei Projektstädten.

Untersuchungs-gebiet	**Datum**	**Messstationen**		**Messfahrten**
		Grünstandort	**Versiegelter Standort**	
Solingen-Ohligs	23.06.2016	Park an der Wittenbergstraße 14.41-20.40 Uhr	Keldersstraße 15.00-20.40 Uhr	 15.38-21.34 Uhr
Remscheid-Ostbahnhofs-viertel	19.07.2016	Zuwegung Zum Kuckuck 14.25-21.20 Uhr	Pirnaplatz 14.40-20.40Uhr	 17.00- 21.02 Uhr
Wuppertal-Arrenberg	25.08.2016/ 28.08.2016	Gutenbergplatz 25.08.2016: 14.36-21.11 Uhr	Robert-Daum-Platz 25.08.2016: 15.30-21.38 Uhr	 28.08.2016: 14.25-16.38 Uhr

Tab. A1-2: Referenzstationen in den Städten des Bergischen Städtedreiecks.

Station (Betreiber)	**Breitengrad**	**Längengrad**	**Stationshöhe**	**Zeitraum**	**Klimaelemente**
Solingen-Wald (LA-NUV)	51,18 N	7,05 O	207 m über NN	1998-heute	Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Luftdruck, Strahlungsbilanz , Windrichtung, Windgeschwindigkeit.
Remscheid-Lennep (DWD)	51,18 N	7,251 O	345 m über NN	2011-heute	Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, Niederschlag, monatlich gemittelte Werte für die Windstärke
Wuppertal-Bundesallee (Stadt Wuppertal)	51,252 N	7,135 O	etwa 172 m über NN (142 m Geländehöhe+ 30 m Gebäudehöhe, 6 m über Firstniveau)	1995-heute	Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windrichtung, Windgeschwindigkeit

A1.2.2 Geostatistische Auswertung der Messkampagnen

Die räumlichen Merkmale der lokalen Wärmeinseln in den Sonderuntersuchungsgebieten wurden mit einem auf Lufttemperaturmessungen basierenden geostatistischen Ansatz ermittelt (siehe Buttstädt et al. 2014).

Die Messdaten der Messfahrten wurden zur Entwicklung eines für den jeweiligen Ort spezifischen geostatistischen Wärmeinselmodells für festgelegte Referenzpunkte extrahiert. Diese Referenzpunkte sind je nach Bebauungssituation unterschiedlich dicht entlang der Messfahrtrouten an Straßenabschnitten verteilt (bei der Datenverarbeitung werden nur Temperaturmesswerte verwendet, an denen das Messfahrzeug eine Mindestgeschwindigkeit von 5 ms^{-1} nicht unterschreitet; vergl. Seidel et al., 2016). Die Lage dieser Referenzpunkte in den drei Städten ist in den jeweiligen Kapiteln dargestellt.

Das geostatistische Wärmeinselmodell zielt auf die Identifizierung und Quantifizierung der durch planerisch beeinflussbare Landnutzungsparameter wie Versiegelungsgrad, Grünflächen, Waldflächen, Gebäudegrundfläche etc. verursachten Wärmeinselanteile ab (Buttstädt et al., 2014). Für die Referenzpunkte werden dementsprechend Statistiken dieser – zuvor in Rasterdaten umgewandelten - Landnutzungsparameter erstellt; diese werden über

ein Landnutzungsmodell aus den ATKIS-Daten gewonnen (Landnutzungsschlüssel: siehe Tabelle A2 im Anhang). Die Analyse des Zusammenhangs zwischen Landnutzung und gemessener Lufttemperatur wurde auf Basis der Liegenschaftskatasterdaten (ALKIS; Stadt Remscheid, 2016; Stadt Solingen, 2016; Stadt Wuppertal, 2016 a) durchgeführt. Die gebäude- und flächenbezogenen ALKIS-Daten wurden dazu mittels einer Konversionstabelle in die Landnutzungsklassen „Gebäude“, „versiegelte Fläche“, „unversiegelte Fläche“ und „Wald/Park“ übertragen.

Die Temperatur wird grundsätzlich nicht nur von den Landnutzungsparametern direkt am Messpunkt sondern durch Turbulenz auch in einem weiteren Umkreis beeinflusst (vergl. Buttstädt et al. 2014). Aufgrund des eingeschränkten Untersuchungsrahmens wurde in einem vereinfachten Verfahren ein Footprint-Radius von 100 m angesetzt; auf die aufwändige statistische Analyse optimaler Footprint-Radien (ggf. 200 m oder 500 m) wurde verzichtet. Die Anwendung des 100 m-Footprint-Radius auf die Landnutzungsdaten wurde mit einer GIS-basierten Neighbourhood-Statistik realisiert (diese wie alle anderen GIS-Anwendungen dieser Arbeit wurden mit ArcGIS, Version 10.4.1, durchgeführt).

Für die kleinräumigen Sonderuntersuchungsgebiete wurde keine spezielle Signifikanz- und Residualanalyse durchgeführt, wie dies für ganze Stadtgebiete zusätzliche Informationen ergeben kann. Besondere Landnutzungsfälle (Wasserflächen, stark verkehrsbelastete Straßen) wurden mit einer Ausnahme ebenfalls nicht näher untersucht; im Rahmen eines kleinen studentischen Projekts wurde ein Bereich mit einer großen Anzahl „Bergischer Häuser“ (regionaltypischer Fachwerkhaustyp mit auffälliger Schieferverkleidung) auf deren eventuelle Klimaeffekte untersucht (siehe Kap. A3.2.1).

Die Analyse des Zusammenhangs zwischen Temperatur und Landnutzung erfolgt für jedes Untersuchungsgebiet mit einem separaten multiplen linearen Landnutzungsregressionsansatz (Buttstädt et al., 2014). Das Bestimmtheitsmaß R^2 der einzelnen Korrelationsanalysen gibt für jedes Untersuchungsgebiet an, wie groß der Anteil der durch die betrachteten Landnutzungsparameter erklärten Varianz ist (und umgekehrt, der - durch nicht allgemein erfasste Merkmale wie Straßenbegrünung, Gebäudezustand, - stellung und – farbe etc. oder durch unbekannte Faktoren verursachten - nicht erklärten Varianz).

Die sich für die drei Städte ergebenden multiplen Regressionsgleichungen lauten wie folgt (Versiegelungsgrad ver, Gebäudegrundfläche geb, Grünflächenanteil grü und Wald-/Parkanteil wald; Footprint-Radien: 100 m, Angaben zu den Landnutzungsanteilen in Prozent):

Tab. A1-3: Merkmale der multiplen Regressionsanalysen.

Remscheid

Multiple Regressionsgleichung:

T=geb*0.0173+wald*-0.0036+ver*0.0062+grü*-0.0114

(R^2: 0.602, Höheneffekt: -0,80K/100m, Konstante b: + 3.1852)

Rechnerischer Temperatureffekt der Flächennutzungen:

Grünfläche („Freiland“):	± 0,00 K
Wald/Park:	+ 0,78 K
versiegelte Fläche:	+ 1,76 K
Gebäudefläche:	+ 2,87 K

Solingen

Multiple Regressionsgleichung:

T= geb*-0.0009+wald*-0.0193+vers*-0.0024+grün*-0.0307

(R^2: 0.369*, Höheneffekt: +0,12K/100m*, Konstante b: + 2,0153)

* siehe Erläuterungen in Kap. A3.2.3

Rechnerischer Temperatureffekt der Flächennutzungen:

Grünfläche („Freiland“):	± 0,00 K
Wald/Park	+ 1,14 K
versiegelte Fläche:	+ 2,83 K
Gebäudefläche:	+ 2,98 K

Wuppertal

Multiple Regressionsgleichung:

T= geb*-0.0677+wald*-0.0926+vers*-0.0906+grün*-0.1112

(R^2: 0.556, Höheneffekt: -0,42K/100m, Konstante b: + 8,7971)

Rechnerischer Temperatureffekt der Flächennutzungen:

Grünfläche („Freiland“):	± 0,00 K
Wald/Park:	+ 0,86 K
versiegelte Fläche:	+ 2,06 K
Gebäudefläche:	+ 2,75 K

Die unterschiedlichen Konstanten ergeben sich aus Unterschieden der Lage der jeweiligen Referenzstationen. Einerseits sind dies Unterschiede der Aufstellungshöhe (W-Bundesallee: Messungen über Dach), anderseits Effekte der Lage in der Stadt (Wuppertal: städtischer Standort in Tallage, Remscheid und Solingen: mäßig verdichtetes Gewerbegebiet am Stadtrand in Kuppen- bzw. Hanglage).

Entsprechend der Landnutzungsverteilung im jeweiligen Gesamtgebiet können auf Basis der Regressionsgleichungen für die Untersuchungsgebiete jeweils Temperaturverteilungen als Wärmeinselmodell modelliert werden (siehe Kap. 3.2).

Ein Abgleich der räumlichen Temperaturdifferenzen der Messfahrten mit Daten von Zeitreihen z.B. eines Stadt-Umland-Messstationspaares, ist wegen der Datenlage in allen drei Städten nicht möglich.

A1.3 Humanbiometeorologische Analysen

Die Bearbeitung der klimatologischen Fragestellungen geschieht insgesamt vor dem Hintergrund des hohen Schadenspotentials. Beim Phänomen der städtischen Wärmeinsel sind die Schadenbeträge gering, allerdings sind die gesundheitlichen Auswirkungen groß.

Eine Studie der Münchener Rückversicherung aus dem Jahr 2012 (Munich RE, 2012) geht für die Periode 1970 - 2011 von 10.00 Todesopfern in Deutschland durch Wetterkatastrophen aus, von denen 92 % auf klimatologische Ereignisse wie Temperaturextreme zurückgehen, während 6 % Sturmereignissen und 2 % Überschwemmungsereignissen zugeschrieben werden. Dies entspricht nicht der Wahrnehmung in der Öffentlichkeit, die eher der Verteilung bei den Schadenssummen entspricht (8 %, 64 %, 28 %).

Eine neuere Studie zeigt, dass eine höhere Zahl von Todesfällen als bisher angenommen auf erhöhte Sommertemperaturen zurückgeführt werden muss; für Berlin sind dies in der Periode 2001 – 2010 ungefähr 1.600 zusätzliche Todesfälle pro Jahr, also etwa 45 Todesfälle pro 100.000 Einwohner pro Jahr (Scherer et al., 2014). Auch andere epidemiologische Untersuchungen langzeitig aufgezeichneter Daten weisen auf eine hohe Korrelation zwischen Mortalitätsrate und Temperatur im Hochsommer hin. Dies bestätigten Analysen von täglichen Mortalitätsdaten über 30 Jahre (1968 - 1997) aus Baden Württemberg über den Einfluss thermischer Bedingungen. So kam es dort an Tagen mit mäßiger oder starker Wärmebelastung zu einem signifikanten Anstieg der Mortalitätsrate. Im Hitzesommer 1987 wurde dabei an einzelnen Tagen ein Anstieg der Mortalitätsrate auf 24,6 % beobachtet (Leschewski & Jendritzky, 2002).

Extreme thermische Bedingungen haben auch allgemein großen Einfluss auf das menschliche Wohlbefinden und die Gesundheit. Mit zunehmender Hitzebelastung wird das Herz-Kreislauf-System vermehrt gefordert. Dabei können hitzebedingte Beschwerden, wie Defizite von extrazellulärer Flüssigkeit und Kochsalz, sowie eine Störung der Thermoregulation zu Hitzeerschöpfung, Hitzeschlag bis hin zu Hitzekrämpfen führen. Erhebliche Einstrahlung von Sonnenstrahlen kann zudem einen Sonnenstich zur Folge haben (Koppe, 2005). Besonders gefährdet sind überwiegend Personen mit Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen, ältere Menschen auf Grund ihrer eingeschränkten Anpassungskapazität (Jendritzky et al. 1998), sowie Kleinkinder mit ihrer noch instabilen Thermoregulation (Kaminski et al. 2012). Wie der Sommer 2003 gezeigt hat, können die Auswirkungen extremer sommerlicher Hitzeperioden immens sein (allein 14.802 zusätzliche Todesfälle während der Hitzewelle in Frankreich; EEA (2005), nach der gleichen Quellen waren auch die wirtschaftlichen Schäden erheblich. Nach Schätzungen des Earth Policy Institutes in

Washington (Larsen 2006) sind 2003 bis zu 52.000 Menschen in Folge von Hitzebelastung gestorben. In Deutschland wurden 7.000 zusätzliche Todesfälle im Jahr 2003 registriert (Schär & Jendritzky, 2004).

Speziell stehen hohe nächtliche Temperaturen im Verdacht bei Hitzewellen eine Zunahme von Erkrankungen und erhöhte Sterblichkeit insbesondere bei älteren Menschen zu verursachen, was auf Veränderungen im Thermoregulationssystem zurückgeht (Kalkstein 1993; Abenhaim 2005). Eine reduzierte nächtliche Abkühlung der Außenluft wird auch das Innenraumklima beeinflussen; dabei überlagern sich Effekte aus reduzierter nächtlicher Abkühlung der Außenluft und Wärmespeicherung der Gebäude vom Tage und verstärken so den Effekt. Obwohl keine genauen zahlenmäßigen Zusammenhänge angebbar sind, muss davon ausgegangen werden, dass schon eine geringe Reduktion der nächtlichen Abkühlung unter den in den Modellläufen betrachteten durchschnittlichen Verhältnissen während extremer Hitzeperioden deutlich verstärkt und dann auch gesundheitlich relevant wird.

In Bezug auf die Verteilungsmuster gibt es räumliche Überlagerungen von Hitzebelastung („thermischer wirkungskomplex“) und lufthygienischen Problembereichen („luftchemischer Wirkungskomplex“) in Städten (Merbitz et al., 2012), die allerdings im Rahmen dieses Teilprojektes nicht näher untersucht werden konnten.

Zusatzinformationen zu Funktionen städtischer Grünflächen am Tag bei Hitzeperioden („Klimaoasen“)

Innerstädtische Grünflächen können positiven Einfluss auf die bebaute städtische Umgebung haben. Dabei ist die Skala der Effekte von der Größe der Grünfläche abhängig. Je nach umgebender Bebauung ist die Reichweite der klimatischen Auswirkungen begrenzt (Katzschner, 2011). Das Innere und die Umgebung von Parks charakterisieren sich durch niedrigere Lufttemperaturen (Katzschner, 2011), eine höhere relative Luftfeuchte und eine in der Regel bessere Luftqualität. Grund ist das Verdunstungs- und Filterpotenzial der Vegetation. Eine Vernetzung von Grünflächen – und idealerweise auch von Kaltluftproduktions- und -abflussflächen - führt zu einer Verbesserung der klimatischen Effekte (Kuttler, 2011 a, 2011 b). Schrumpfungsprozesse in Städten sollten in diesem Zusammenhang gezielt zum Rückbau versiegelter Flächen genutzt werden (Kuttler 2011 b). Im Hinblick auf die Zusammensetzung der Vegetation sind Arten zu bevorzugen, die keine oder nur in geringem Umfang sogenannte BVOCs emittieren (z.B. Simpson & McPherson, 2011). BVOCs, die biogene Variante der Kohlenwasserstoffe, werden bei hohen Lufttemperaturen von Laub- und Nadelbäumen sowie Sträuchern emittiert (Kuttler, 2011 a) und sind nachteilig, da sie zur Bildung von Ozon beitragen.

Fassaden- und Dachbegrünungen tragen auf verschiedene Weise zur Verbesserung des Mikroklimas in der Stadt bei und sind geeignete Maßnahmen zur Minderung nachteiliger stadtklimatischer Effekte. Hinsichtlich der Oberflächen- und Lufttemperatur führt die Begrünung von Dach- und Wandflächen zu einer Verringerung der gemessenen Werte. Durch die vegetationsbedingte Verschattung sinken die Oberflächentemperaturen, was wiederum geringere Lufttemperaturen in der angrenzenden Luftschicht zur Folge hat. Zudem wird durch die Vegetation Wasser verdunstet, durch den Energiebedarf kühlt die Pflanzenoberfläche ab. Als Folge sinken die Lufttemperaturen im Pflanzenbestand (Oberndorfer et al., 2007) und in dessen Umgebung. Fassaden- und Dachbegrünung führen neben der Verringerung der Lufttemperatur im Außenbereich in gleicher Weise zu einer Verbesserung des Innenraumklimas. So werden sommerliche Temperaturmaxima abgemildert. In der Heizperiode führt die im Vegetationsbestand vorhandene Luftschicht zu einer zusätzlichen Isolation des Gebäudes, was einen geringeren Energiebedarf zur Folge hat. Voraussetzung ist jeweils eine wirksame Wasserversorgung (die im Dachbereich oft mit statischen Problemen verbunden sein kann). Durch Dach- und Fassadenbegrünung werden die Luftaustauschverhältnisse – anders als bei dichter Baum- und Strauchvegetation – nicht beeinflusst.

Bei Fassaden- und Dachbegrünung spielt die Wasserversorgung eine zentrale Rolle, da die Abkühlungseffekte überwiegend durch die Verdunstung von Wasser vermittelt werden. Bei schlechter Wasserversorgung (extensive Dachbegrünung) sind die klimatischen Effekte klein, bei guter (intensive Dachbegrünung) groß. Da letztere aber statisch aufwändig sein kann, stellt Fassadenbegrünung, d.h. die vertikale Anordnung von Vegetation mit Verbindung zum Boden, eine Alternative dar.

Grün im Straßenraum – insbesondere in Form hoch aufwachsender Baume – führt zur Verschattung und in Folge zu einer Steigerung des Aufenthaltskomforts während strahlungsintensiver Witterung (Katzschner, 2011). Die Verschattung am Tage führt zu einer geringeren Wärmespeicherung des städtischen Baumaterials (Gebäude und Straßen), was sich mindernd auf die nächtliche Wärmeabgabe dieser auswirkt. Reduzierte Lufttemperaturen in Folge von Verschattung mindern zudem das Ozonbildungspotenzial, das durch KFZ Emissionen gegeben ist. Bei der Betrachtung von Auswirkungen auf die Luftqualität im Straßenraum ist die Vegetation differenziert zu betrachten. Zwar werden zum einen durch Deposition Luftschadstoffkonzentrationen verringert, zu anderen kann jedoch ein eingeschränkter Luftaustausch zu einer Schadstoffanreicherung führen. Die jeweiligen Auswirkungen sind stark standortabhängig. Stadtbäume tragen – im Vergleich zu ländlichen Baumbeständen – in einem hohen Maße zur Reduktion von CO_2 bei.

A1.3.1 Humanbiometeorologische Analyse der Messdaten

Für die Berechnung der Bioklima-Indizes wird u.a. das am Meteorologischen Institut der Universität Freiburg entwickelte Modell *RayMan* eingesetzt, dessen Anwendung sich bereits in einer Vielzahl Untersuchungen bewährt hat (z.B. Matzarakis, Rutz & Mayer 2007). Im eigentlichen Fokus des Modells steht die Simulation der kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse und eine anschließenden Modellierung der mittleren Strahlungstemperatur T_{mrt}. Über die Angabe einer Vielzahl von meteorologischen und personenbezogenen Parametern lassen sich auch die thermischen Bewertungsindizes PET und UTCI wiedergeben (Matzarakis, Rutz & Mayer 2007).

A1.3.2 Human-biometeorologische Befragung

Die Fragebögen verteilen sich wie folgt auf die einzelnen Untersuchungsgebiete: 36,8 % aus Solingen-Ohligs, 9,2 % aus Remscheid-Ostbahnhofsviertel und 53,9 % aus Wuppertal-Arrenberg. Insgesamt wurden 56,6 % der Befragten an einem Grünstandort und 43,4 % der Befragten an einem versiegelten Standort befragt. Die Anzahl der Befragten in den jeweiligen Untersuchungsgebieten und Messstandorten kann je nach Fragestellung schwanken, da einige Fragebögen fehlende Werte aufweisen. Sie wurden dennoch in der Analyse berücksichtigt, um vor allem bei der Auswertung der subjektiven Wahrnehmung einzelner Klimaparameter ein differenzierteres Abbild der Antworten zu gewährleisten. Daher sind die angegeben Stichprobenumfänge in Tab. 1-2 nicht feststehend.

Die Befragung in Remscheid konnte nicht parallel zur Messkampagne durchgeführt werden und wurde daher an einem anderen heißen Tag nachgeholt. Darüber hinaus wurden in Remscheid nicht nur am Messstandort „Zuwegung Zum Kuckuck“ Passanten befragt, sondern auch in einer weiteren Grünanlage, den Konsumterrassen, da der Messstandort am Mess- und Befragungstag nur wenig frequentiert war.

A1.3.3. Stadtteilbezogene Anwohner-Umfrage des ISB

Die Auswertung der Umfrage „Ergebnisse der Befragung zum Thema Hitze in Remscheid, Solingen und Wuppertal“ ist Teil des BESTKLIMA-Endberichts.

Als spezielle Teilanalyse wurde die Fragestellung, welche Orte in den bzw. in der Umgebung der Untersuchungsgebiete RS-Ostbahnhofsgelände, SG-Ohligs und W-Arrenberg bei Hitzebelastung aufgesucht werden („Rückzugsorte“), von der Arbeitsgruppe Klimatologie ausgewertet. Die folgenden Abbildungen (Abb. A1-1, A1-2 und A1-3) stellen die wesentlichen Ergebnisse dar. Angegeben wird jeweils die Art des Rückzugsortes und die Zahl der Nennungen.

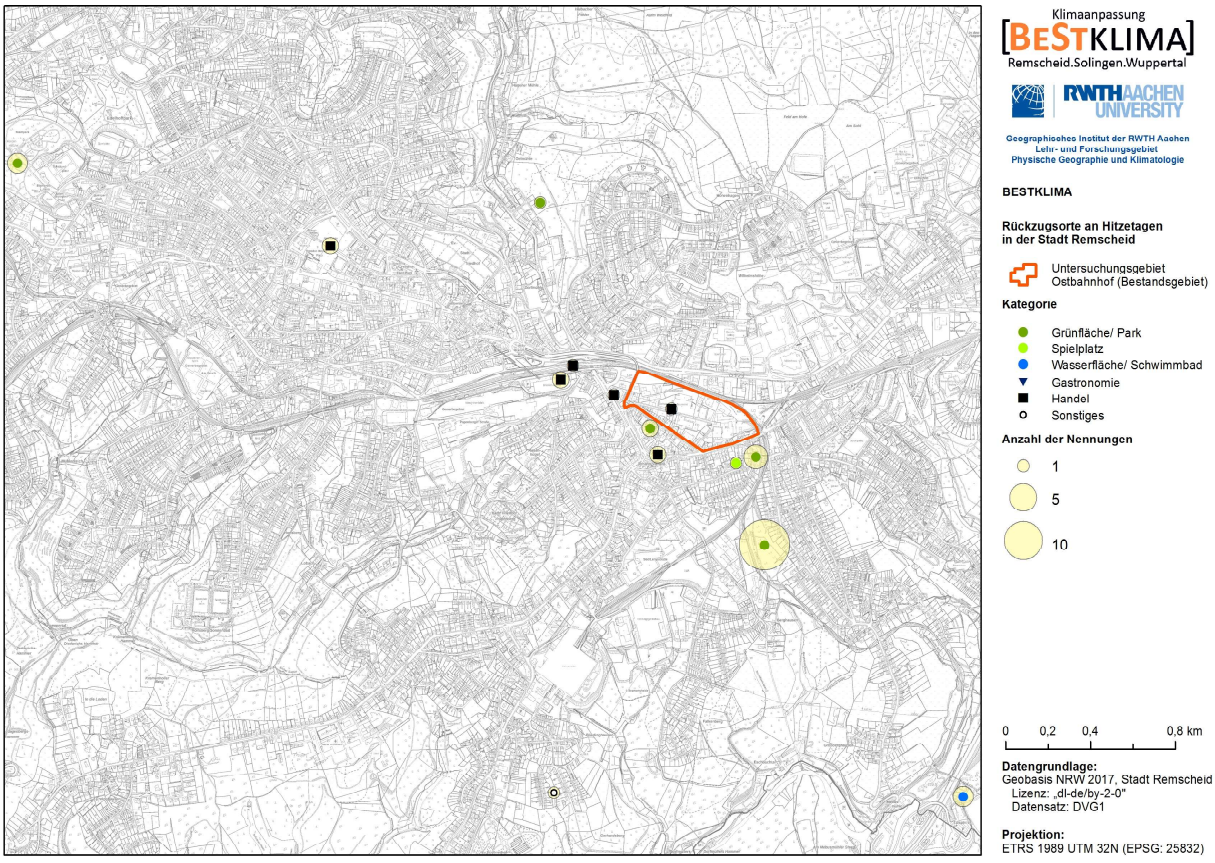


Abbildung A1-1: Rückzugsorte in Remscheid (Ostbahnhofsgelände und Umgebung)

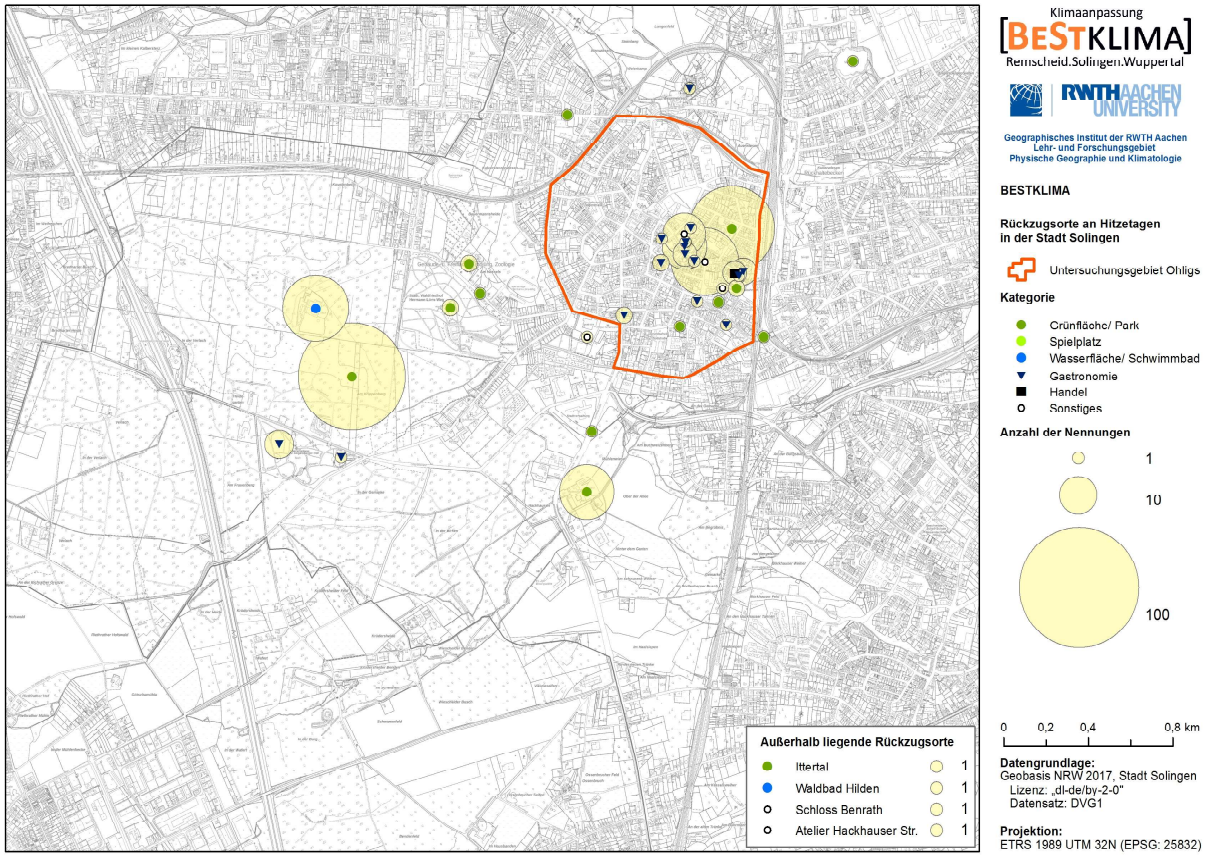


Abbildung A1-2: Rückzugsorte in Solingen (Ohligs und Umgebung)

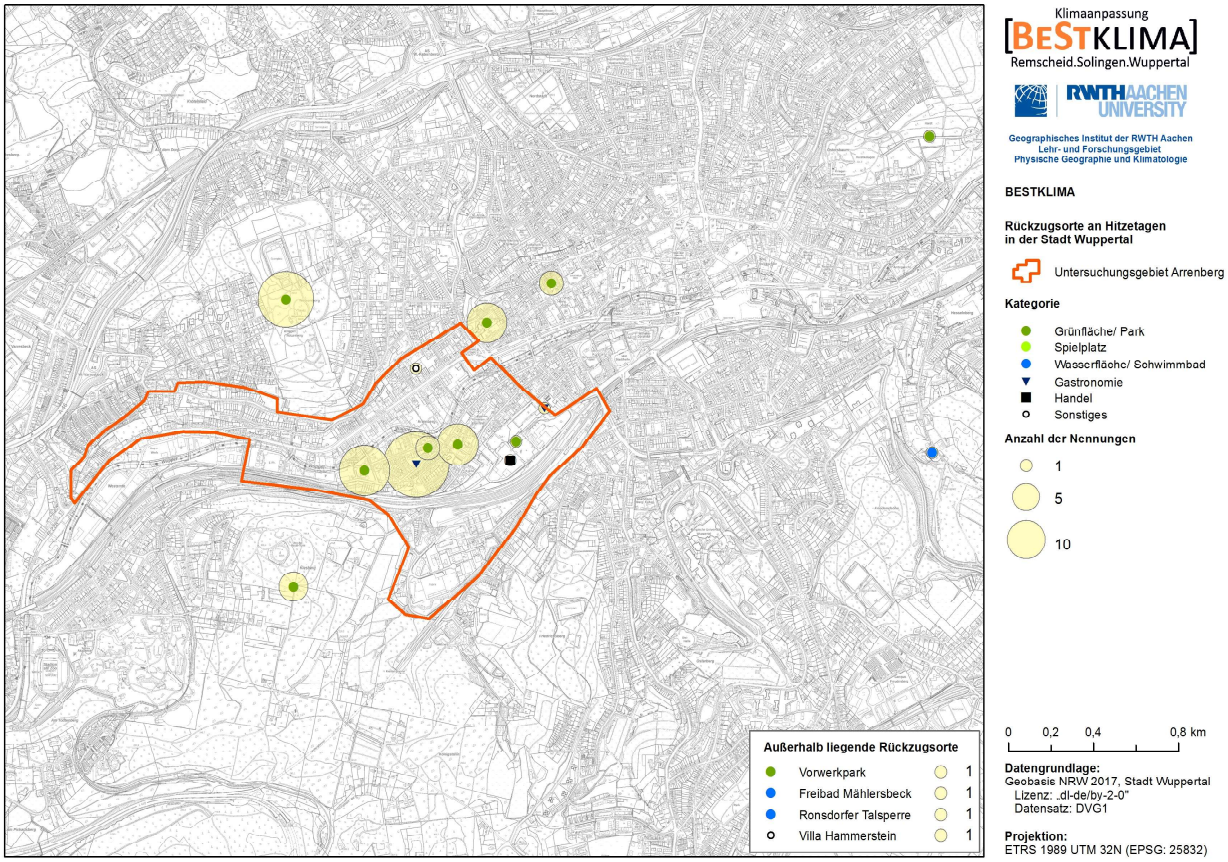


Abbildung A1-3: Rückzugsorte in Wuppertal (Arrenberg und Umgebung)

A2 Untersuchungsstandorte und klimatische Einordnung

A2.1 Untersuchungsstandorte

Bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete wurde – neben der Feststellung, dass sich den Kaltluftmodellierungen zufolge dort auch nachts städtische Wärmeinseln im Sommer bilden können – der stadtplanerische Bedarf auf dem Wege der Abstimmung mit den Projektbeteiligten berücksichtigt. Die Auswahl der einzelnen Messstandorte erfolgte nach dem Kriterium der größtmöglichen Differenzierung zwischen versiegelten und begrünten Standorten im öffentlichen Raum.

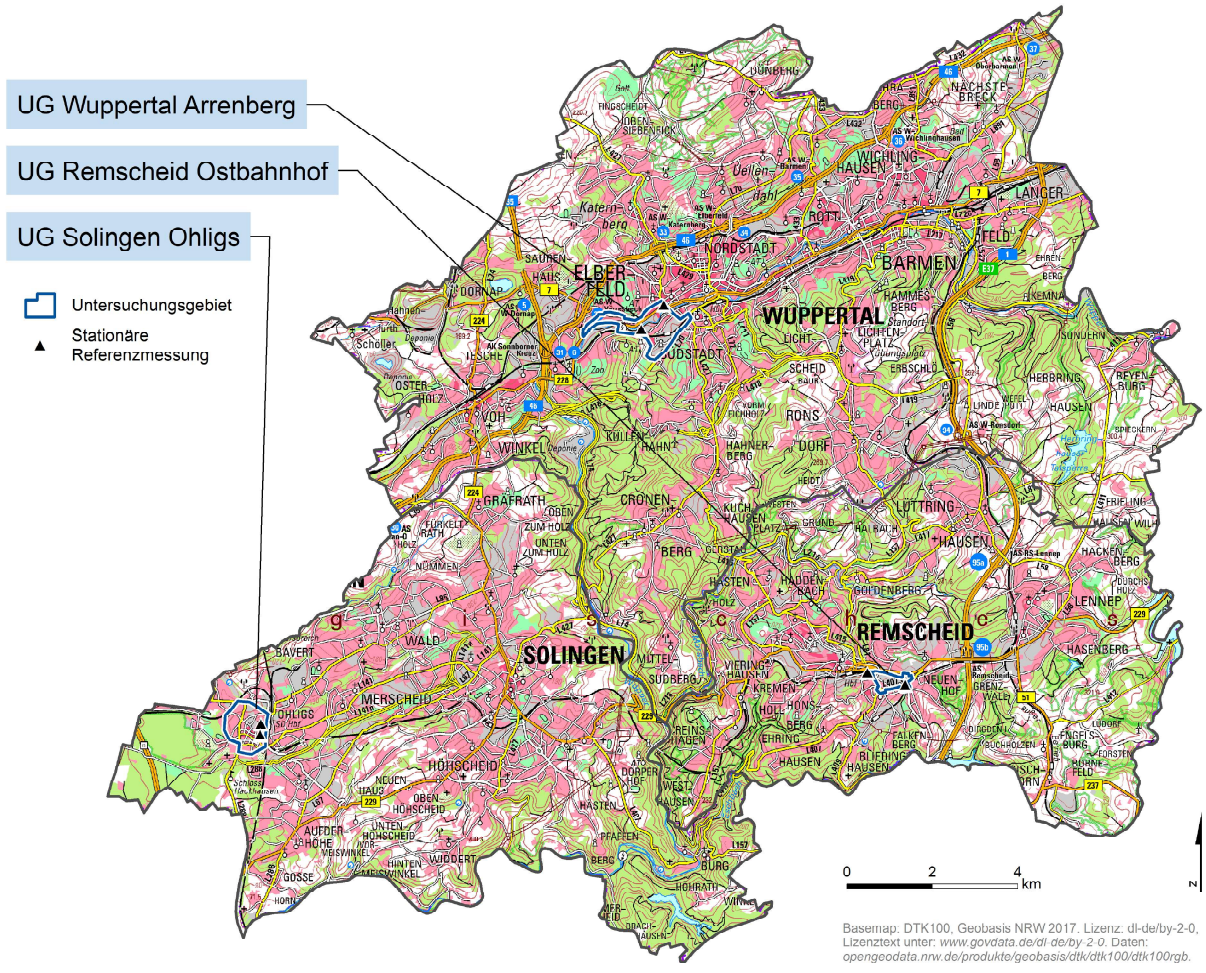


Abb. A2-1: Untersuchungsgebiete

.

A2.2 Das Klima im Bergischen Land

Allgemeine bzw. Detailinformationen zum Klima im Bergischen Land können den Klimaanalysen Wuppertal und Solingen (Kuttler et al., 1993, bzw. Lohmeyer, 2000) entnommen werden.

A3 Siedlungsklimatische Modellierung für die Städte Remscheid, Solingen und Wuppertal

A3.1 Klimatologische Einordnung des Sommers 2016 im Bergischen Land

Messwerte und Projektionen

Wie für Wuppertal in Verbindung mit der am längsten durchgehend betriebenen Station im Untersuchungsgebiet (W-Buchenhofen) im Textband erläutert, können auch für Remscheid und Solingen die°–°mangels durchgehender Zeitreihe teils rechnerisch rekonstruierten – Häufigkeiten heißer Tage (T_{max} ≥°30°C) mit einer anderen Zeitreihe bzw.°-°in Verbindung damit – einer Klimaprojektion verglichen werden.

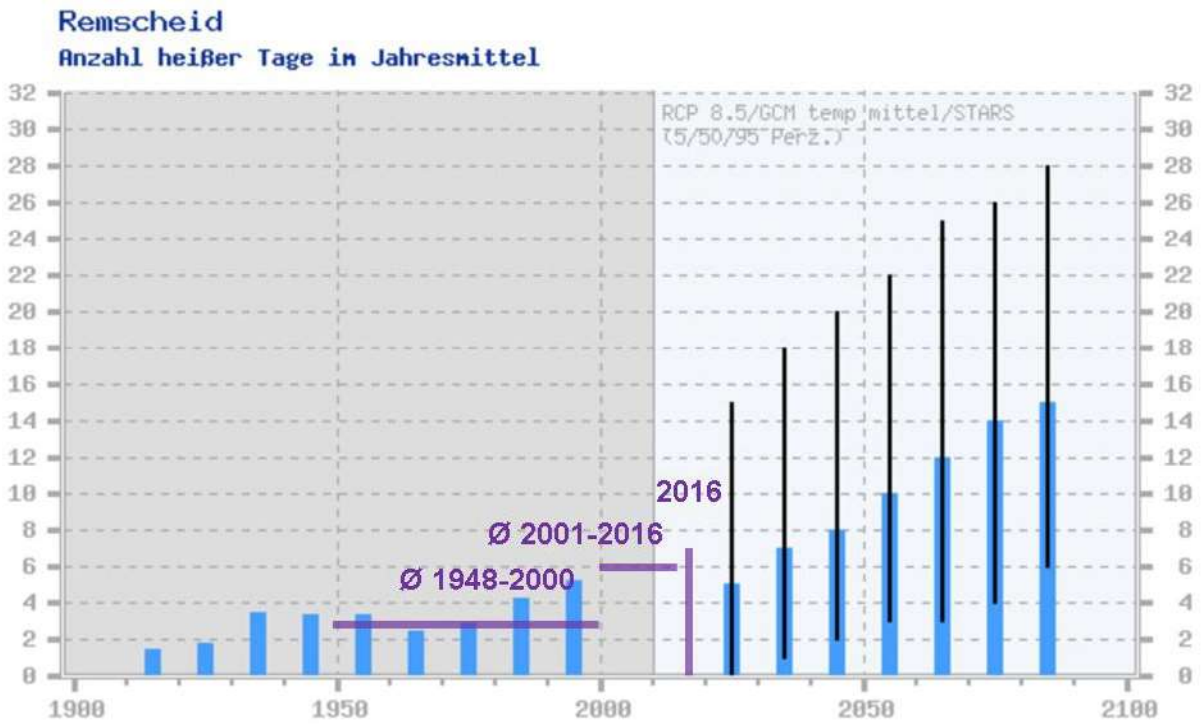


Abb. A3-1: Trend der heißen Tage für Remscheid und Projektion bzw. Daten für RS-Lennep ..... (Quelle

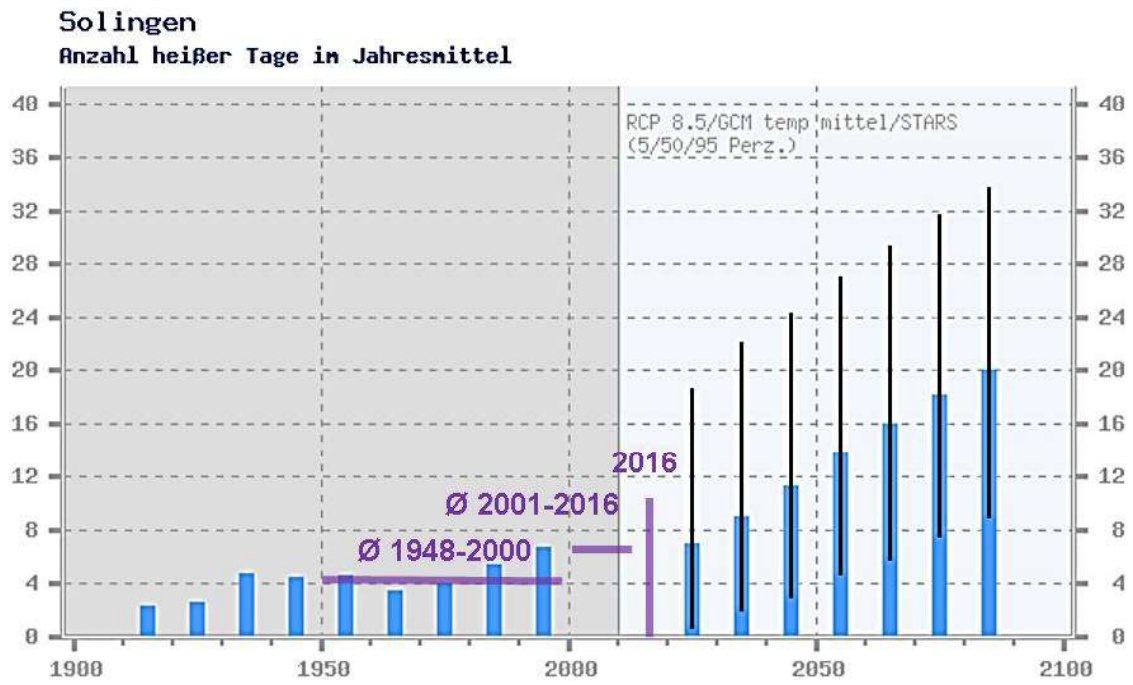


Abb. A3-2: Trend der heißen Tage für Solingen und Projektion bzw. Daten für SG-Wald (Quelle: PIK 2015 (klimafolgenonline.com)).

Aus dem Luftmessbericht Wuppertal 2014 (Müller-BBM, 2015) ergeben sich für 2014 für die Stationen Wuppertal Bundesallee im Vergleich zum Zeitraum 1981 – 2010 für die heißen Tage und andere besondere Tage folgende Werte:

Tab. A3-1: Monats- und Jahresmittelwerte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte sowie monatliche Häufigkeiten von Sommertagen, heißen Tagen, Frosttagen und Eistagen an der Messstation Wuppertal-Bundesallee im Jahr 2004 im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten an der DWD-Station Wuppertal-Buchenhofen.

Messgröße	Zeitraum	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Temperatur (°C)														
DWD	1981-2010	2,6	2,9	6,0	9,3	13,6	16,2	18,4	17,6	14,1	10,5	6,4	3,4	10,1
Bundesallee	2014	5,5	6,3	9,2	12,5	13,1	16,5	19,8	16,2	15,8	13,3	8,6	3,8	11,7
Sommertage (T_{max} > 25 °C)														
DWD	1981-2010	0	0	0	1	4	7	12	10	3	0	0	0	37
Bundesallee	2014	0	0	0	0	3	5	17	4	2	0	0	0	31
Heiße Tage (T_{max} > 30°C)														
DWD	1981-2010	0	0	0	0	0	1	4	3	0	0	0	0	8
Bundesallee	2014	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	3
Frosttage (T_{min} < 0°C)														
DWD	1981-2010	14	13	8	3	0	0	0	0	0	1	5	11	55
Bundesallee	2014	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6	9
Eistage (T_{max} < 0°C)														
DWD	1981-2010	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8
Bundesallee	2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
relative Feuchte (%)														
Bundesallee	2009 - 2013	90	84	73	66	68	70	70	71	79	81	86	89	77
Bundesallee	2014	84	78	68	70	74	70	75	79	83	85	86	92	79

Tropennächte

Zum Vergleich: Die Anzahl von Tropennächten betrug in 2016 an der Station Solingen-Wald 6 (207°m über NN, vorstädtisches Gebiet), Wuppertal-Bundesallee 2015: 5, in Bonn (2015) 4 - 6, in Köln 7 (ländliche Station) bzw. 17 (städtische Station) (LANUV 2016b: 47). Für die urban geprägte Region bestehend aus Emschergenossenschaft, Lippeverband und Ruhrgebiet (hoher Verstädterungsgrad) wird eine mittlere jährliche Auftrittshäufigkeit des klimatischen Kenntages Tropennacht angegeben bzw. erwartet für (Lautenschlager et al. 2009 zit. nach Kuttler et al. 2013; Annahmen: IPCC-Treibhausgasemissionsszenario A1B, Modell CLM/ECHAM5): 1961 - 1990: 0,2, 2021 - 2050: 1,6, 2070 - 2100: 6,8.

A3.2 Siedlungsklimatische Modellierungen

A3.2.1 Siedlungsklimatische Modellierung Gesamtgebiet

Allgemeine Informationen zur Durchführung der Kaltluftmodellierung und der Aufbereitung der Daten können den Erläuterungen zu Kap. 1.1 entnommen werden.

Aus dem Übersichtsmodelllauf ergaben sich insbesondere in Remscheid besondere Fragen zu Kaltluftüberströmungen auf der Talschulter zwischen oberem und unterem Tal der Wupper. Die Auswertung hier findet sich im Bericht „Sonderuntersuchung Klimamessung Lennep / Bergisch Born“ im hinteren Teil dieses Anhangs). Zwischen Oberbarmen und Gevelsberg, zwischen Vohwinkel und Haan sowie – in kleinerem Umfang - an einzelnen Stellen im Stadtgebiet von Solingen ergaben sich ebenfalls Hinweise auf Kaltluftüberströmungen; für diese ergaben sich allerdings keine Hinweise darauf, dass sie für aktuelle Planungsfragen relevant sind, so dass sie nicht eingehender untersucht wurden.

Sonderauswertung: „Bergische Häuser“

Im Zuge der Untersuchungen ergab sich die Fragestellung, ob die regionaltypischen Gebäude des mit der sehr dunklen Schieferverkleidung versehenen „Bergischen Hauses“ besondere Klimaeffekte hervorrufen können. Die Schieferverkleidung dient i.w. dem Schutz gegen die großen Niederschlagsmengen auf den Höhen des Bergischen Landes, wegen ihrer Farbe können bei windschwachen Strahlungswetterlagen aber auch Auffälligkeiten des Energieumsatzes an der Außenhaut des Gebäudes erwartet werden, die zu einer Erwärmung des Umfeld führen können.

Eine hierauf bezogene geostatistische Auswertung von Messfahrtdaten wurde für einen Straßenabschnitt in Bergisch Born mit stellenweise relativ vielen solcher Gebäude durchgeführt. Dabei ergaben sich Hinweise darauf, dass Bergische Häuser möglicherweise tatsächlich eine etwas stärkere Erwärmung ihres Umfelds verursachen können als andere Häuser (ca. + 0,1 K).

In Anbetracht der Tatsache, dass diese Art von Gebäuden tatsächlich nur in den Höhenlagen mit ihren relativ niedrigen Temperaturen noch eine gewisse Verbreitung hat, ist in der gegenwärtigen Phase des Klimawandels kein Bedarf an eingehender Analyse abzusehen.

A3.2.2 Siedlungsklimatische Modellierung Remscheid

Kaltluftmodellierungen

Die kaltluftbezogenen Detaildarstellungen basieren auf einer Auswertung der Kaltluftmodellierung mit Bezug zu zentralen Kriterien der VDI-Richtlinie „Lokale Kaltluft“ (VDI, 2003; siehe auch Kap 1.1):

1. die Eindringtiefe der Kaltluft (Volumenstrom > 0,01 m^3 m^{-2} s^{-1} = Luftaustauschrate von 2 h^{-1} bei 15 m Gebäudehöhe),

2.die Klassifizierung von Strömungstypen:

- hangabwärtiger Kaltluftabfluss (Volumenstrom < 5 m^3 m^{-2} s^{-1}),
- talabwärtige Kaltluftströme („Kaltluftakkumulation“; Volumenstrom ≥ 5°m^3 m^{-2} s^{-1}),
- Kaltluftstau (Kaltluftmächtigkeit >°50°m und Strömungsgeschwindigkeit < 0,5 m s^{-1}).

Zusätzlich werden Kaltluftüberströmungen berücksichtigt (nach Sachsen et al., 2013).

Die Frage, wie wahrscheinlich es ist, dass die oberen Hanglagen von Remscheid tatsächlich in der späten Nacht weitflächig von dünner Kaltluft bedeckt sind, kann aufgrund der Modellergebnisse nicht beurteilt werden. Die Kaltluftbildung kann durch nächtliche Störungen in der bodennahen Grenzschicht behindert werden (VDI, 2003); dies ist insbesondere in ungeschützten Lagen in der späteren Nacht zu erwarten. Aufklärung könnten hier nur längere Messreihen erbringen.

Sofern solche Störungen aber eintreten, ist mäßige bis starke Oberströmung als Ursache anzusehen; ein Belüftungsproblem durch fehlende Kaltluftzufuhr ist damit aber ausgeschlossen. Dies bedeutet, dass eine Belüftung der oberen Hanglagen entweder tatsächlich durch Hangkaltluft erfolgt oder –°wenn dies nicht der Fall ist°– durch die Oberströmung. Unter Bedingungen des Klimawandels langfristig stärker ansteigenden Temperaturen, würde sich allerdings eine allgemeine Nachverdichtung dennoch als ungünstig erweisen.

Die Situation im unteren Tal der Wupper (unterhalb von Wuppertal) kann grundsätzlich auch mit einer komplexen Überlagerung von Talkaltluft im Haupttal und seitlichem Einströmen von Kaltluft aus den kleineren Seitentälern in ähnlicher Weise wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben werden. Da der Hauptkaltluftstrom nicht direkt mit einer warmen Stadt in Wechselwirkung steht, kann durchaus im Gegensatz zur Situation in Wuppertal-Arrenberg, hier sehr kalte Kaltluft aus dem Haupttal unter mäßig kalter aus den Seitentälern liegen, womit eine

besonders starke Abkühlung verbunden wäre. Dies kann allerdings auf Basis der Modelldaten nicht im Einzelnen nachvollzogen werden.

Messfahrten und Geostatistik - Hot Spots

Ergebnisse der geostatistischen Auswertung der Messfahrtdaten für Remscheid (Versiegelungsgrad ver, Gebäudegrundfläche geb, Grünflächenanteil grü und Wald-/ Parkanteil wald; Footprint-Radien: 100 m, Angaben zu den Landnutzungsanteilen in Prozent):

Multiple Regressionsgleichung:

T=geb*0.0173+wald*-0.0036+ver*0.0062+grü*-0.0114

(R^2: 0.602, Höheneffekt: -0,80K/100m, Konstante b: +°3.1852)

Rechnerischer Temperatureffekt der Flächennutzungen:

Grünfläche („Freiland“):	± 0,00 K
Wald/Park:	+ 0,78 K
versiegelte Fläche:	+ 1,76 K
Gebäudefläche:	+ 2,87 K

Die geostatistischen Auswertungen beziehen sich auf den baulichen Innenbereich. Gebiete mit relativ hoher thermischer Belastung (Hot-Spots) ergeben sich dabei als Gesamtheit derjenigen Rasterzellen, die einen Temperaturwert größer als die mittlere Temperatur plus mittlerer Streuung (Standardabweichung) aufweisen. Relativ gering belastete Gebiete haben Temperaturwerte kleiner als die mittlere Temperatur minus mittlerer Streuung (siehe Abbildung A3-3).

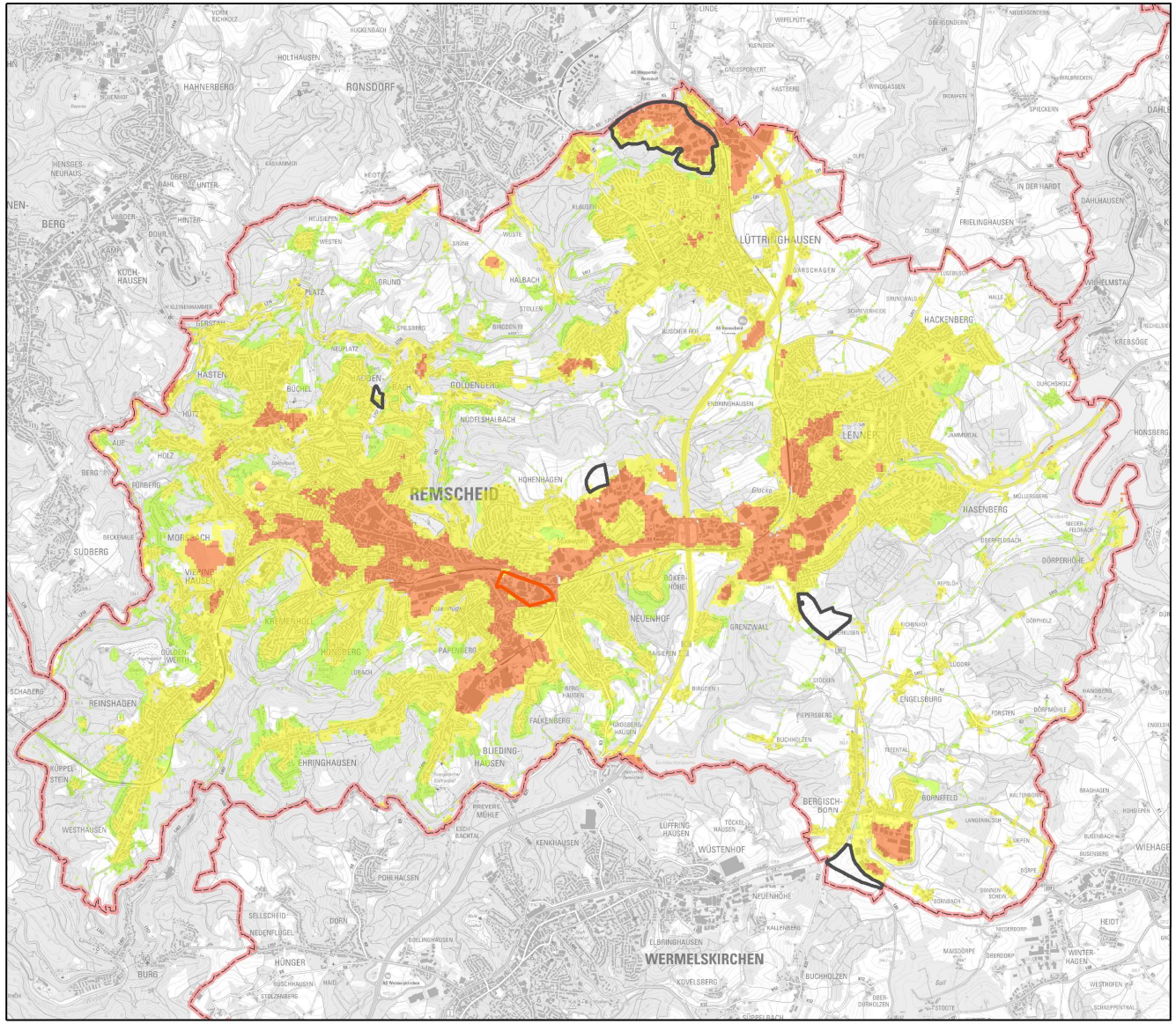


Abb. A3-3: Remscheid (gesamt) - Temperaturmodell als Ergebnis der geostatistischen Modellierung.

Human-Biometeorologie für innerstädtische Extremstandorte

Die Bioklima-Indizes PET und UTCI werden mittels der an beiden Messstandorten erhobenen Globalstrahlung (und über das Model RayMan modellierten Strahlungstemperatur) sowie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit berechnet. Die Analyse der thermischen Indizes erfolgt auf Basis von 10-Minuten Mittelwerten, welche sowohl für den versiegelten als auch für den vegetationsreichen Standort ermittelt wurden. Beim Vergleich der Lufttemperatur- und Globalstrahlungswerte wurde der Mittelwert jeweils über Minutenwerte verwendet.

Wahrnehmung einzelner Klimaparameter

Die Sonneneinstrahlung wird an den Extremstandorten als sehr warm wahrgenommen und dies wird sowohl als angenehm als auch unangenehm bewertet (Befragungsergebnisse; siehe Abb. A3-4a, A3-4b und A3-5). Die Lufttemperatur wird in den Grünanlagen wärmer wahrgenommen als am versiegelten Standort, an allen Standorten wird dieser Klimaparameter aber überwiegend angenehm empfunden. Die Luftfeuchtigkeit wird an allen Standorten überwiegend sehr niedrig oder eher niedrig eingestuft, was von den meisten Befragten als angenehm empfunden wird.

Bei der Frage nach dem Wohlbefinden werden beide Extremstandorte vom Großteil der Befragten positiv (angenehm) bewertet, obwohl die berechneten thermischen Belastungen im Mittel am versiegelten Standort höher als am vegetationsreichen ist. Betrachtet man den Zeitraum, in dem der versiegelte Standort besonnt und der begrünte Standort verschattet war, herrscht im Mittel an beiden Extremstandorten moderater Hitzestress, wobei die thermischen Belastungen am versiegelten Standort etwas höher sind als am begrünten.

Auswertung Standorte

Pirnaplatz: Am Pirnaplatz nehmen alle Befragten die Sonneneinstrahlung als sehr warm wahr, bewerten dies allerdings auf einer Bandbreite von sehr angenehm bis eher unangenehm unterschiedlich. Die Lufttemperatur wird sowohl als sehr kalt als auch als warm bis sehr warm empfunden. Die Befragten bewerten dies überwiegend angenehm. Die Luftfeuchtigkeit wird ebenfalls unterschiedlich empfunden und positiv bewertet: zwei Befragte nehmen diese als sehr niedrig und angenehm wahr, ein Befragter als eher niedrig und eher unangenehm und ein weiterer Befragter als eher hoch, aber angenehm. Auch die Windgeschwindigkeit wird differenziert wahrgenommen: zum einen niedrig sowie eher niedrig und zum anderen eher hoch. Insgesamt wird dies aber als überwiegend angenehm eingestuft.

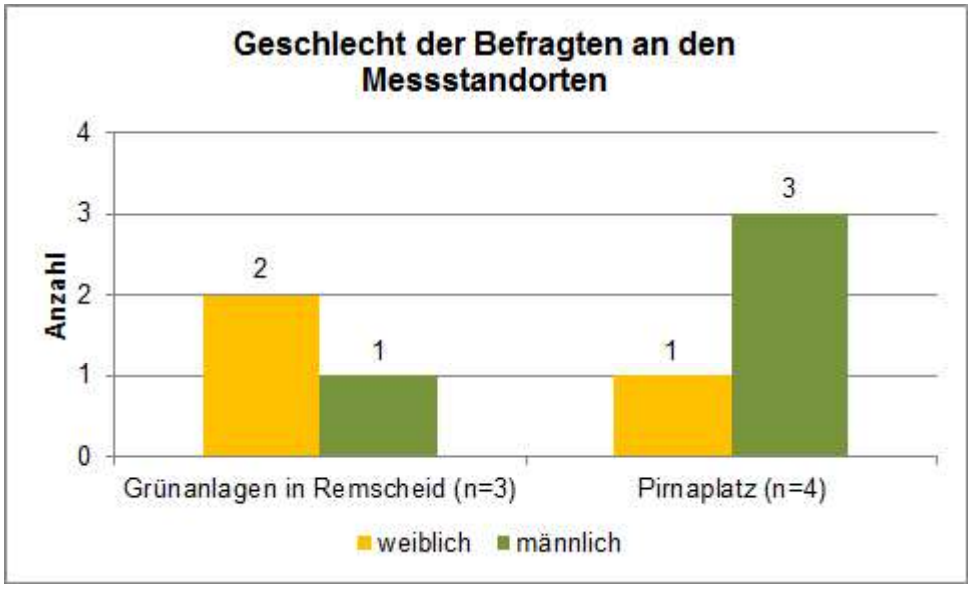


Abb. A3-4a: Geschlecht der Befragten an den Messstandorten.

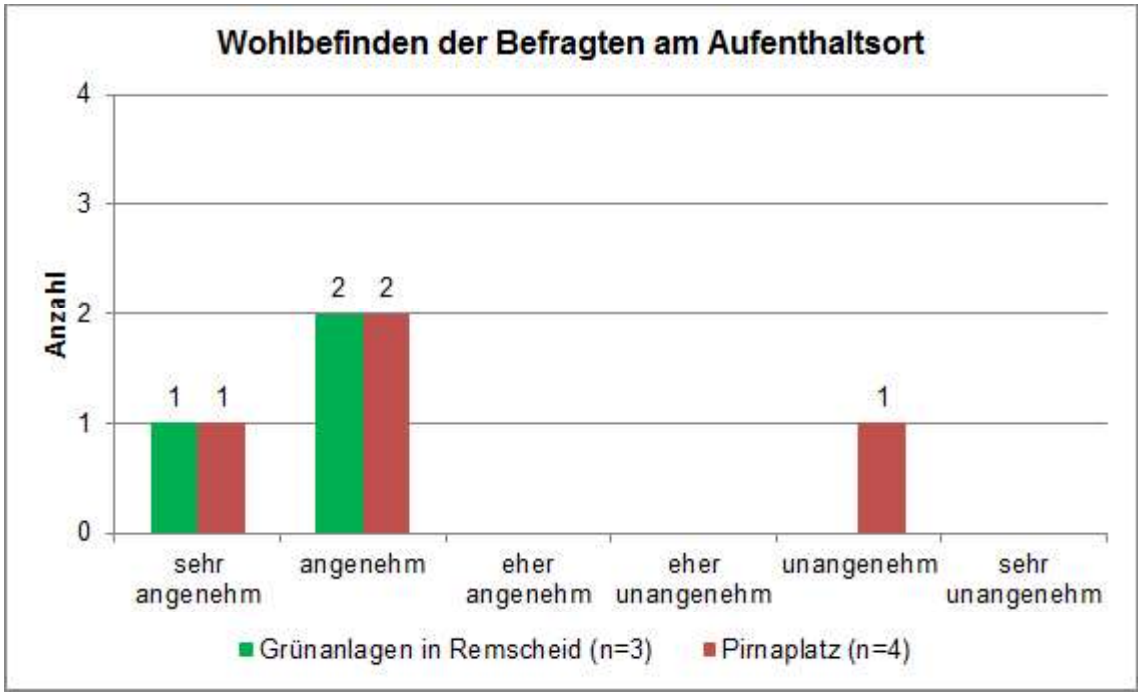


Abb. A3-4b: Wohlbefinden der Befragten am Aufenthaltsort.

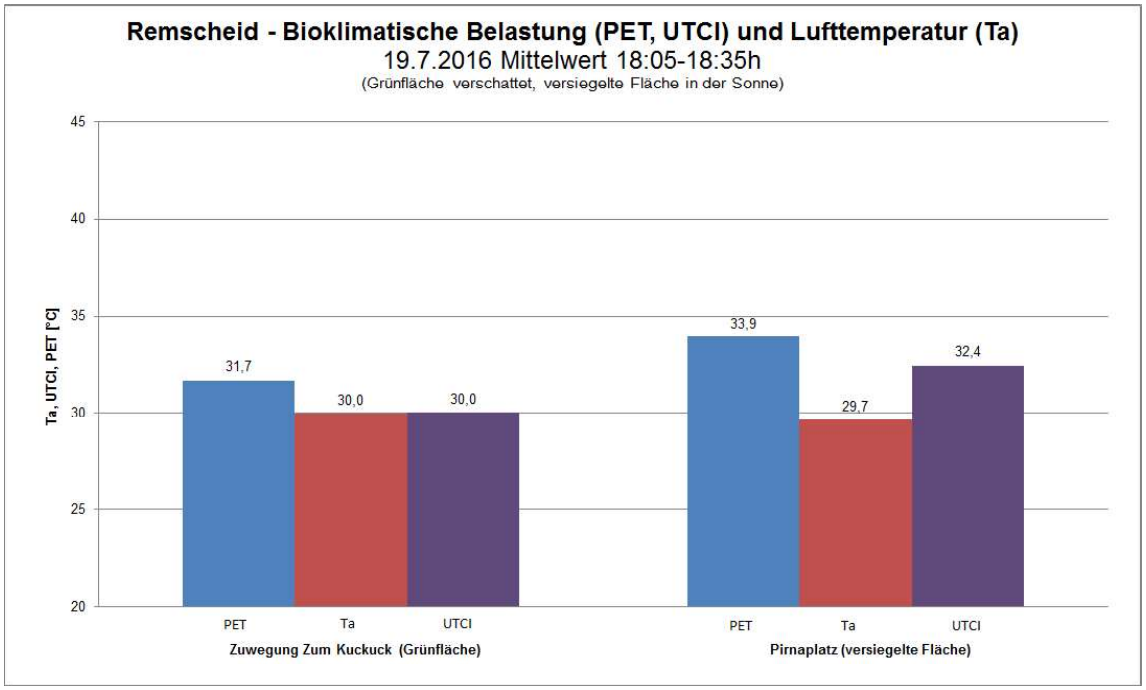


Abb. A3-5: Bioklimatische Belastung (PET, UTCI) und Lufttemperatur (Ta) in Remscheid.

Tab. A3-2: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter am Pirnaplatz (Anzahl der Nennungen).

			Bewertung						
			sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm	total
	Sonneneinstrahlung (n=4)	sehr warm	1	1		2			4
	Luft-temperatur (n=4)	sehr kalt	1						1
		warm		1		1			2
		sehr warm		1					1
		total	1	2		1			
	Luft-feuchtigkeit (n=4)	sehr niedrig		2					2
		eher niedrig				1			1
		eher hoch		1					1
		total		3		1			
	Wind (n=4)	niedrig		1					1
		eher niedrig		1		1			2
		eher hoch	1						1
		total	1	2		1			

Grünanlagen (Zuwegung Zum Kuckuck und Konsumterrassen): Die Klimaparameter werden insgesamt gesehen am versiegelten Standort etwas negativer bewertet, wenn man die Anzahl der Nennungen zwischen eher unangenehm und sehr unangenehm betrachtet. Die Sonneneinstrahlung wird warm bis sehr warm wahrgenommen, was zum einen als sehr angenehm und zum anderen als eher unangenehm und unangenehm empfunden wird. Die Lufttemperatur wird ebenfalls zwischen warm und sehr warm eingestuft, was von allen Befragten als angenehm bewertet wird. Die Luftfeuchtigkeit wird eher niedrig und angenehm

sowie eher hoch und sehr unangenehm wahrgenommen. Der Wind wird zwischen sehr niedrig und niedrig eingestuft, was überwiegend als angenehm empfunden wird.

Tab. A3-3: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter in den Grünanlagen in Remscheid (Anzahl der Nennungen).

			Bewertung						
			sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm	total
	Sonneneinstrahlung (n=3)	warm	1			1			2
		sehr warm					1		1
		total	1			1	1		
	Luft-temperatur (n=3)	warm		1					1
		sehr warm		2					2
		total		3					
	Luft-feuchtigkeit (n=3)	eher niedrig		2					2
		eher hoch						1	1
		total		2				1	
	Wind (n=3)	sehr niedrig	1	1					2
		niedrig		1					1
		total	1	2					

Tab. A3-4: Wohlbefinden der Befragten an den beiden Extremstandorten in Remscheid-Ostbahnhofsviertel (Anzahl der Nennungen).

Standort	sehr angenehm	Angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	Unangenehm	sehr unangenehm
Pirnaplatz (n=4)	1	2			1	
Grünanlagen in Remscheid (n=3)	1	2				

Sonderauswertung Kaltluftüberströmung bei Stöcken

Zur Klärung des tatsächlichen Vorhandenseins eines vermutlich erheblichen Kaltluftüberströmungsbereichs wurde vom 19.7.2016 bis 23.8.2016 eine automatische Wetterstation an der Borner Straße auf Höhe der Ortslage Stöcken an einem Strommast in 4 m über Grund betrieben (UTM-Koordinaten [ETRS 89] 32378373m, 5670303m; zwischen Borner Straße 99 und 103). Die Station (Campbell Scientific) war mit einem Windgeber (Typ Young) und einem Temperatur- und Feuchtegeber (Typ Campbell) ausgestattet; die Daten wurden in einem Intervall von 60 min aufgezeichnet.

Die Auswertung basiert auf einer Auszählung von Nachtstunden, an denen die an der Station registrierte Windrichtung der modellierten Windrichtung bei Kaltluftüberströmung entspricht (45° Nordost). Für die fraglichen Zeitpunkte wurde geprüft, ob die Windrichtung systematisch und deutlich (+- 45°) von der gleichzeitig an Referenzstationen (Solingen-Wald, Wuppertal-Hammesberg) registrierten abweicht. Dabei wurde berücksichtigt, dass auch an diesen Kaltlufteinfluss vorhanden sein kann. Diese Auszählung liefert konservative Ergebnisse, da Fälle von Kaltluftüberströmung nicht erfasst werden, bei denen die Referenzstationen die gleiche Windrichtung (+- 45°) aufweisen. Es wurden nur die Nachtstunden zwischen 21 h und 5 h ausgewertet.

Die mittlere Windrichtung bei so definierter Kaltluftüberströmung beträgt laut Auswertungsergebnis 40° (Nordost), was fast genau der aus den Modelldaten abgeleiteten entspricht.

Sonderauswertung: Klimafunktionsanalyse Remscheid

Die Klimafunktionskarte Remscheid basiert auf wesentlichen Merkmalen der „Arbeitskarte 4: Klimafunktionskarte“ aus dem „Fachbeitrag Umwelt zum Flächennutzungsplan der Stadt Remscheid“ (Hamann & Schulte, 1999) mit einer Nachkartierung bzw. den Nutzungsfestsetzungen des FNP Remscheid (Stadt Remscheid, 2017) und wurde um Ergebnisse des KlimaschutzTeilkonzepts „Anpassung an den Klimawandel für die Städte Solingen und Remscheid“ (ISB, 2013; Stadt Solingen, 2013) und des vorliegenden Berichts „Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung“ ergänzt. Nachrichtlich enthalten sind Daten zu Verkehrsflächen (Stadt Remscheid, 2017)

Flächenhafte Klimafunktionen

Die Klimatope „**Freiland**“ und „**Wald**“ basieren auf den Geodatensätzen „Landwirtschaftliche_Flaechen“ und „Waldflaechen“ aus dem aktuellen Flächennutzungsplan Remscheid (Stadt Remscheid, 2017). Die direkte Übernahme ist bei diesen Flächentypen ohne weiteres möglich, weil die Realnutzung kaum von den Nutzungsfestsetzungen des FNP abweichen darf, die wiederum den Bestimmungsmerkmalen dieser Klimatope (Stock, 1992) weitgehend entsprechen. Allerdings wurden einige Flächen nachkartiert, da diese Klimatope umgekehrt sehr wohl auf Flächen vorliegen können, die nicht genauso im FNP ausgewiesen sind.

Die innerhalb des baulichen Innenbereichs liegenden Klimatope „**Parkklima**“, „**Siedlungsklima**“ und „**Stadtklima**“ sowie „**Wasserfläche**“ wurden aus dem „Fachbeitrag Umwelt zum Flächennutzungsplan der Stadt Remscheid“ (Hamann & Schulte, 1999) übernommen. Diese Klimatope sind stark abhängig von einer Überlagerung von Festsetzungen und Realnutzungsmerkmalen, die im Rahmen dieses Teilprojekts nicht aufgearbeitet, sondern nur – wie vorhanden – übernommen werden konnten. Hier wurden aber ebenfalls Nachkartierungen vorgenommen, die teils zusätzlich wegen des älteren Bearbeitungsstands erforderlich waren.

Das Klimatop „**Innenstadt**“ wurde auf Basis von Schwellenwerten für Bebauungsdichten in Anlehnung an die in der „Klimafunktionskarte Ruhrgebiet“ (Stock, 1992) angegebenen Werte abgegrenzt. Während dort allerdings großräumige Bebauungsdichten (Häuserblöcke, statistische Bezirke) als Basis verwendet werden, liegen in Remscheid überhaupt nur zwei relativ kleine Gebiete mit Innenstadtcharakter vor, so dass die Bebauungsdichte hier jeweils im viel kleineren 100 m-Umkreis (unter Verwendung von ALKIS-Daten mittels focal statistics mit ArcGIS) betrachtet wurde. Es wird hier deshalb nicht genau der Schwellenwert für die Gebäudegrundrissfläche bezogen auf eine größere Fläche von 25 % nach Stock (1992),

sondern – weil hier, anders als in größeren Gebieten, keine größeren Straßen, Plätze, Hofflächen etc. vorliegen - ein um 50 % erhöhter Schwellenwert (37,5 %) angesetzt. Die Ergebnis-Rasterdaten wurden auf einen, den vorhandenen Klimatopinformationen entsprechenden Auflösungsgrad generalisiert.

Spezielle Klimafunktionen

Kuppenlagen mit erhöhter thermischer Belastung tagsüber bei windschwachen Wetterlagen wurden aus Messdaten des „Teilprojekts Siedlungsklimatische Modellierung“ abgeleitet (siehe Bericht und Anhang, Kapitel 3.2.2., Abschnitt „Ergebnis Messfahrten und Geostatistik - Hot Spots“).

Kuppenlagen mit erhöhter Betroffenheit gegenüber Starkwind sind dem KlimaschutzTeilkonzept „Anpassung an den Klimawandel für die Städte Solingen und Remscheid“ entnommen (ISB, 2013, S. 197; "Erhöhte Betroffenheit gegenüber Starkwind").

Nächtliche Kaltluft

Kaltluftströme wurden aus Modelldaten des Kaltluftabflussmodells KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes abgeleitet (spezifischer Kaltluftvolumenstrom 8 h nach Sonnenuntergang nach VDI, 2003 ≥ 5 $m^3 m^{-2} s^{-1}$; siehe Bericht und Anhang, Kapitel 3.2.2., Abschnitt Kaltluftmodellierungen).

Kaltluftstau wurde aus Modelldaten des Kaltluftabflussmodells KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes abgeleitet (Kaltluftmächtigkeit >50 m und Strömungsgeschwindigkeit $< 0{,}5$ m s^{-1} 8h nach Sonnenuntergang nach VDI, 2003; siehe Bericht und Anhang, Kapitel 3.2.2., Abschnitt Kaltluftmodellierungen).

Kuppenlagen ohne Kaltlufteinfluss wurden aus Modelldaten des Kaltluftabflussmodells KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes abgeleitet (Gebiete außerhalb [oberhalb] der Eindringtiefe der Kaltluft 8 h nach Sonnenuntergang; siehe Bericht und Anhang, Kapitel 3.2.2., Abschnitt Kaltluftmodellierungen).

Kaltluftströmung (Strömungspfeile) wurde aus Modelldaten des Kaltluftabflussmodells KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes abgeleitet (Windvektoren 8 h nach Sonnenuntergang; siehe Bericht und Anhang, Kapitel 3.2.2., Abschnitt Kaltluftmodellierungen).

Großräumige Kaltluftüberströmung wurde aus Modelldaten des Kaltluftabflussmodells KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes abgeleitet und qualitativ in den beiden Gebieten dargestellt, in denen es hinreichende Belege dafür gibt, dass dies auch tatsächlich [Stöcken] oder sehr wahrscheinlich [Großhülsberg] bzw. auch mengenmäßig erheblich der Fall ist (8 h

nach Sonnenuntergang; siehe Bericht und Anhang, Kapitel 3.2.2., Sonderauswertung Kaltluftüberströmung bei Stöcken).

Die dargestellten **Baugebiete** und das **Bestandsgebiet** stellen Sonderuntersuchungsgebiete dar, die in Bericht und Anhang, Kapitel 3.2.2., näher betrachtet werden.

A3.2.3 Siedlungsklimatische Modellierung Solingen

Kaltluftmodellierungen

Die kaltluftbezogenen Detaildarstellungen basieren auf einer Auswertung der Kaltluftmodellierung mit Bezug zu zentralen Kriterien der VDI-Richtlinie „Lokale Kaltluft“ (VDI, 2003; siehe auch Kap. 1.1):

1. die Eindringtiefe der Kaltluft (Volumenstrom > 0,01 m^3 m^{-2} s^{-1}),

2.die Klassifizierung von Strömungstypen:

- hangabwärtiger Kaltluftabfluss (Volumenstrom < 5 m^3 m^{-2} s^{-1}),
- talabwärtige Kaltluftströme („Kaltluftakkumulation“; Volumenstrom ≥ 5 m^3 m^{-2} s^{-1}),
- Kaltluftstau (Kaltluftmächtigkeit > 50 m und Strömungsgeschwindigkeit < 0,5 m s^{-1}).

Zusätzlich werden Kaltluftüberströmungen berücksichtigt (nach Sachsen et al., 2013).

Der Betrieb von Oberleitungsbussen in Solingen ist in diesem Zusammenhang von Vorteil. Unabhängig von den (am Einsatzort) bauartbedingt sehr geringen Schadstoffemissionen, haben E-Motoren auch einen sehr hohen Wirkungsgrad und setzen daher (am Einsatzort) deutlich weniger Abwärme frei als Verbrennungsmotoren.

Messfahrten und Geostatistik - Hot Spots

Ergebnisse der geostatistischen Auswertung der Messfahrtdaten für Solingen-Ohligs (Versiegelungsgrad ver, Gebäudegrundfläche geb, Grünflächenanteil grü und Wald-/Parkanteil wald; Footprint-Radien: 100 m, Angaben zu den Landnutzungsanteilen in Prozent):

Multiple Regressionsgleichung: T= geb*-0.0009+wald*-0.0193+vers*-0.0024+grün*-0.0307

(R^2: 0.369, Höheneffekt: +0,12K/100m*, Konstante: + 2,0153)

Rechnerischer Temperatureffekt der Flächennutzungen:

Grünfläche („Freiland“):	± 0,00 K
Wald/Park	+ 1,14 K
versiegelte Fläche:	+ 2,83 K
Gebäudefläche:	+ 2,98 K

Der statistische Zusammenhang zwischen den Landnutzungsparametern und der Lufttemperatur ist für Solingen-Ohligs (s.o.) deutlich schlechter als für Remscheid und Wuppertal (siehe Kap. 3.2.3). Dies ist so zu interpretieren, dass in Solingen-Ohligs nur 36,9 % der Temperaturvarianz durch den Zusammenhang zu den hier betrachteten planerisch direkt beeinflussbaren Landnutzungsparametern erklärt wird; die Werte für Remscheid und Wuppertal entsprechen einer deutlich größeren erklärten Varianz. In Anbetracht der notgedrungen stark vereinfachten Annahmen für die Berücksichtigung der Turbulenzeffekte und des dementsprechend vermutlich hierauf zurückgehenden nicht geringen Varianzanteils, sind die Ergebnisse für Remscheid und Wuppertal durchaus befriedigend, für Solingen hingegen unbefriedigend.

Eine nähere Betrachtung der Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse zeigt, dass bei den nur in Solingen-Ohligs durchgeführten Messfahrten (anders als bei der einen Messfahrt in der Gesamtstadt) nicht nur ein schlechteres Bestimmtheitsmaß vorliegt, sondern auch die in der Analyse mitgeführte Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur nicht erwartungsgemäß abgebildet wird. Der rechnerische Höhengradient ist – anstatt nicht sehr weit vom adiabatischen Temperaturgradienten entfernt und vor allem gleich gerichtet zu sei – mit +1,2 K/100 m positiv statt negativ, d.h. die Temperatur nicht mit der Höhe zu. Hier spielen vermutlich einerseits die geringen Höhenunterschiede innerhalb von Solingen-Ohligs eine Rolle (s.u.) sowie die Tendenz zu dichterer Bebauung auf Kuppen; und weniger dichter in den tieferen Lagen. Andererseits wäre bei einer am Hang gelegenen Stadt zudem denkbar, dass es im Rahmen eines tagsüber bestehenden Talwinds (siehe auch Kuttler et al., 1993, Abb. 29) zu einer Teilkompensation der höhenbedingten Temperaturabnahme kommt bzw. es im Luv des Bergischen Landes zu verstärkter Konvektion und damit Durchmischung mit dementsprechend stärker verwischtem Zusammenhang zwischen Bebauungsmustern, Höhenlage und Lufttemperatur kommt. Mangels einschlägiger Veröffentlichungen zu dieser Frage, kann dies im Rahmen dieser Studie aber leider nicht geklärt werden; sofern eine Klärung dieser Frage erfolgen soll, müsste dies anderweitig untersucht werden.

Eine Messfahrt für größere Teile von Solingen entlang eines Profils bis zum höher gelegenen Zentrum erbrachte – bei gleich sonst ähnlichen Koeffizienten (T= geb*-0.0020+wald*-0.0075+vers*0.0009+grün*-0.0224) und ähnlich schlechter Korrelation (R^2 = 0,354) - einen plausiblen Wert für den Höhengradienten (-0,9K/100m). Dies deutet zusätzlich darauf hin, dass der unplausible Höhengradient innerhalb von Solingen-Ohligs auch teilweise ein Ergebnis der geringen Höhenunterschiede dort sein kann. Dass beide nacheinander durchgeführten Messfahrten gleich schlecht korrelieren, kann als Hinweis darauf gesehen werden, dass im gesamten nach Westen sich abdachenden Stadtgebiet ähnliche, die Korrelation

verschlechternde Bedingungen herrschen, was die Vermutung bestärkt, dass erhöhte Durchmischung eine Rolle spielt.

Die auf einer weiteren Messfahrt festgestellten extrem niedrigen Temperaturen im Tal der Wupper an der Müngstener Brücke (7 K kälter als in Solingen-Ohligs bei fast gleicher Höhenlage) weisen aber auch in anderer Hinsicht auf grundsätzlich ungeklärte Temperaturverhältnisse in Solingen hin. Eine Differenz von mehr als -6 K gegenüber dem Zentrum kann aus dem Höhenunterschied von ca. 120 m nicht resultieren (+1,2 K wären demnach zu erwarten); dies ist auch nicht durch den rechnerischen Temperaturunterschied zwischen Innenstadt und Wald zu erklären (-2 - 3 K). Offensichtlich besteht in dem engen und stark verschatteten Tal, vermutlich auch in Verbindung mit dem wasserreichen kühlen Fluss, auch am Tag eine latente Inversionsneigung.

Die Identifizierung von Hotspots (Bereichen besonderer Wärmebelastung) basiert auf einer Klasseneinteilung relativ zur örtlichen Schwankungsbreite der Temperatur. Hier werden auf Basis des Temperaturmodells Klassen für „geringe thermische Belastung“, „mäßige thermische Belastung“und „starke thermische Belastung“ nach einer Statistik der Temperaturverteilung ermittelt. Als Schwellenwerte dienen Mittelwert - Standardabweichung und Mittelwert + Standardabweichung (wie bei: Landeshauptstadt Saarbrücken, 2012).

Human-Biometeorologie für innerstädtische Extremstandorte

Auswertung der human-biometeorologischen Messdaten

Die humanbiometeorologischen Messdaten an den beiden Standorten in Solingen-Ohligs wurden aufgrund unvollständiger Messwerte der Sonnenstrahlung für den Gesamtmesszeitraum nur eingeschränkt verarbeitet. Es wurde nur die tatsächlich gemessene Lufttemperatur verwendet, da der Versuch einer Modellierung der Strahlungstemperatur und der Berechnung abgeleiteter biometeorologischer Größen sich nicht als ausreichend nachvollziehbar erwies.

In Solingen-Ohligs nahmen insgesamt 28 Personen an der humanbiometeorologischen Befragung teil, davon acht am versiegelten Standort Keldersstraße und 20 am Grünstandort Park an der Wittenbergstraße. Die Anzahl der Antworten ist je nach Fragestellung aufgrund teilweise fehlender Antworten unterschiedlich (daher wird die Anzahl der Befragten (n) jeweils angegeben). In Solingen-Ohligs wurden sowohl Männer als auch Frauen befragt und die Befragten verteilen sich über die Altersgruppen 18 - 34, 35 - 54, 55 - 64 und 65 - 74. Den größten Anteil der Befragten stellen an beiden Standorten die 18 - 34-Jährigen (52,6 %,

n=19 am Grünstandort; 71,4 %, n=7 am versiegelten Standort). Alle Befragten (n=26) haben als aktuellen Wohnort „eine Stadt in Deutschland“ angegeben.

Wahrnehmung einzelner Klimaparameter

Bezüglich der Wahrnehmung einzelner Klimaparameter ergibt sich für den Standort Keldersstraße folgendes Bild: Die Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur werden vom Großteil der Befragten als warm und sehr warm eingestuft, wobei die Einstufung warm noch eher angenehm empfunden wird als die Einstufung sehr warm (wird als eher unangenehm bewertet). Die Luftfeuchtigkeit stufen die meisten eher hoch und eher unangenehm ein. Beim Wind ergibt sich kein klares Bild: dieser wird von den Befragten sowohl eher niedrig als auch eher hoch eingeschätzt. Das Empfinden einer eher hohen Windgeschwindigkeit wird als angenehm empfunden, das einer eher niedrigeren Windgeschwindigkeit als eher unangenehm.

Im Gegensatz zum Standort Keldersstraße sind die Ergebnisse für den Parkstandort insgesamt betrachtet differenzierter, was auf den größeren Stichprobenumfang zurückgeführt werden könnte. Die Sonneneinstrahlung wird ebenfalls von den meisten Befragten als warm und sehr warm eingestuft, was von den Befragten sehr unterschiedlich empfunden wird; sowohl als sehr angenehm als auch als unangenehm. Die Lufttemperatur wird zwischen eher warm und sehr warm wahrgenommen, was ebenfalls sowohl als sehr angenehm als auch sehr unangenehm bewertet wird. Eine eher hohe Luftfeuchtigkeit wird als eher unangenehm empfunden, hingegen wird eine niedrige Luftfeuchtigkeit sowohl als angenehm als auch unangenehm bewertet. Eine niedrige Windgeschwindigkeit wird von den meisten Befragten als eher unangenehm bewertet, eine eher niedrige und eher hohe Windgeschwindigkeit als überwiegend angenehm empfunden.

Wohlbefinden am Aufenthaltsort

Die Befragten wurden ebenfalls nach ihrem Wohlbefinden am Aufenthaltsort gefragt, wobei sich zwischen den beiden Extremstandorten deutliche Unterschiede feststellen lassen: Am Parkstandort bewerten 70 % der Befragten (n=20) ihr Wohlbefinden als angenehm, wohingegen dies nur 25 % der Befragten (n=8) in der Keldersstraße so bewerten.

Interpretation

Die Ergebnisse am Parkstandort sind differenzierter, was mit dem größeren Stichprobenumfang zusammenhängen könnte. Die Klimaparameter werden an beiden Standorten unterschiedlich eingestuft und bewertet. Die Einstufungen der Klimaparameter Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur in warm und sehr warm werden am Parkstandort positiver bewertet als am versiegelten, was auf die generelle positive Wahrnehmung einer Grünfläche zurückgeführt werden kann. Der Anteil der Befragten, die die Luftfeuchtigkeit eher hoch und als eher angenehm oder eher unangenehm einstufen, ist am versiegelten

Standort höher als am Parkstandort. Dies kann mit dem Stichprobenumfang zusammenhängen, da dieser am Parkstandort differenzierter und größer ist. Der Wind wird am versiegelten Standort eher hoch und angenehm bewertet, am Grünstandort hingegen eher niedrig, was sowohl angenehm als auch unangenehm bewertet wird.

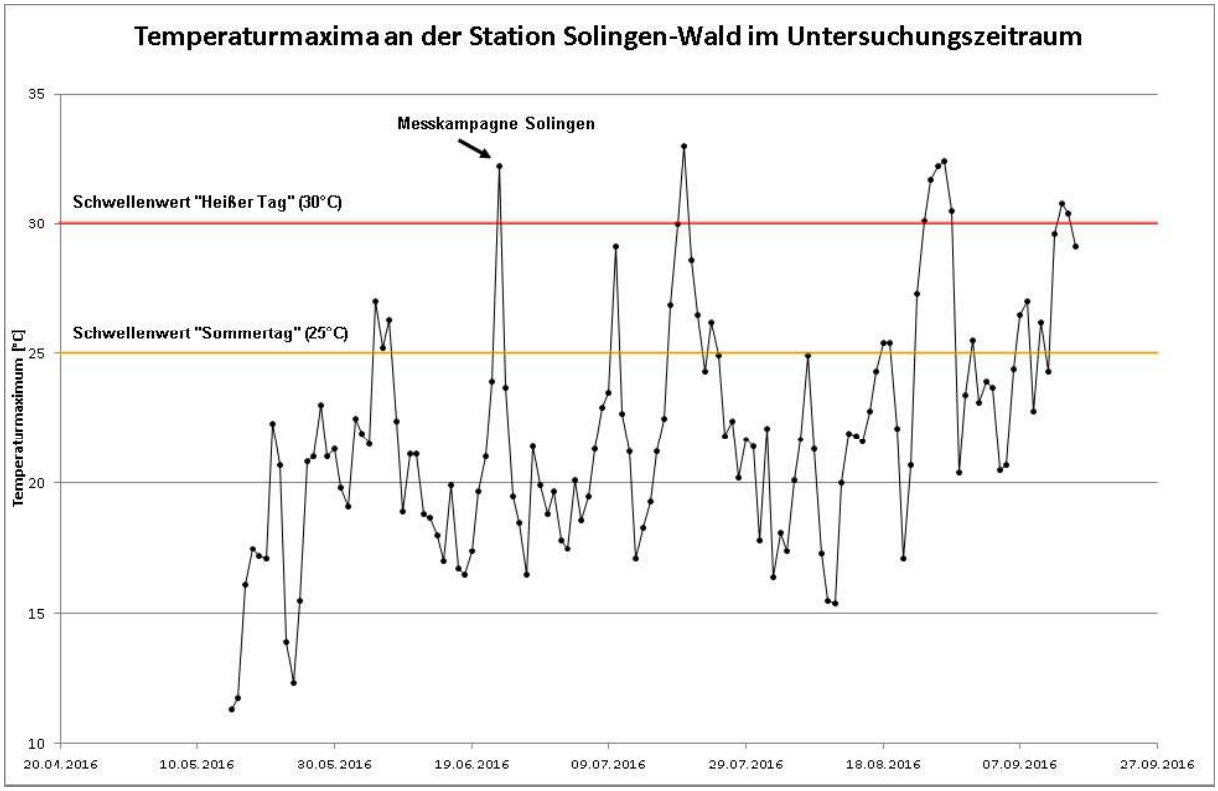


Abb. A3-6: Solingen - Verlauf der Lufttemperatur, Station Solingen-Wald.

Darüber hinaus spielen bei der Wahrnehmung der Klimaparameter soziodemographische Faktoren, aber auch die Position des Befragten (in der Sonne / im Schatten), der Zeitpunkt der Befragung (z.B. nachmittags oder abends) sowie die allgemeine Witterungsverhältnisse im meteorologischen Sommer 2016 eine Rolle. „Aufgrund des unterschiedlichen Metabolismus (hier der Grundumsatz) kann das thermische Empfinden außerhalb des Komfort in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht variieren“ (Jendritzky et al. 2007: 84). Befragungsgruppen dieser Untersuchung unterscheiden sich z.T. in der Alters- und Geschlechterstruktur: Am Parkstandort wurden beispielsweise prozentual mehr Frauen als Männer befragt und am versiegelten Standort mehr Männer als Frauen. An beiden Standorten wurde der Großteil der Befragten im Schatten befragt, die Befragungszeitpunkte unterscheiden sich jedoch: In der Grünanlage wurden die Personen vorrangig zwischen 14:00 und 16:00 Uhr befragt sowie am Abend ab 18:00 Uhr, am versiegelten Standort wurden die Personen zwischen 17:30 und 18:00 Uhr sowie zwischen 16:00 und 16:30 Uhr befragt. Hinsichtlich der allgemeinen Witterungsbedingungen lagen die Tageshöchstwerte der Lufttemperatur nur an drei Tagen im Juni

vor dem Messtag am 23.06.2016 über 25 °C, aber „richtig warm“ war es vor dem Messtag noch nicht, sodass eine länger andauernde Hitzebelastung vor dem ersten Messtag nicht eingetreten ist (s. Abb. A3-6).

Bezüglich der Einschätzung des subjektiven Wohlbefindens an den beiden Extremstandorten gehen die Befragungsergebnisse mit der berechneten thermischen Belastung, die am versiegelten Standort über den gesamten Messzeitraum höher als am Grünstandort ist, einher.

Tab. A3-5: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter am Standort Keldersstraße (Angaben in Prozent).

			Bewertung						
			sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm	total
Wahrnehmung	Sonneneinstrahlung (n=8)	warm	-	12,5	12,5	-	-	-	25,0
		Sehr warm	-	12,5	12,5	25,0	12,5	12,5	75,0
		total	-	25,0	25,0	25,0	12,5	12,5	
	Lufttemperatur (n=8)	warm	-	12,5	37,5	-	-	-	50,0
		sehr warm	-	-	-	25,0	25,0	-	50,0
		total	-	12,5	37,5	25,0	25,0	-	
	Luftfeuchtigkeit (n=8)	eher niedrig	-	-	12,5	-	-	-	12,5
		eher hoch	-	-	12,5	62,5	-	-	75,0
		hoch	-	-	-	12,5	-	-	12,5
		total	-	-	25,0	75,0	-	-	
	Wind (n=8)	eher niedrig	-	12,5	-	25,0	-	-	37,5
		eher hoch	25,0	25,0	12,5	-	-	-	62,5
		total	25,0	37,5	12,5	25,0	-	-	

Tab. A3-6: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter im Park an der Wittenbergstraße (Angabe in Prozent).

			Bewertung						
			sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm	total
Wahrnehmung	Sonneneinstrahlung (n=20)	kalt	-	5,0	-	-	-	-	5,0
		eher kalt	-	-	5,0	-	-	-	5,0
		eher warm	-	5,0	5,0	-	-	-	10,0
		warm	-	15,0	15,0	5,0	-	-	35,0
		sehr warm	5,0	10,0	5,0	10,0	10,0	5,0	45,0
		total	5,0	35,0	30,0	15,0	10,0	5,0	
	Lufttemperatur (n=18)	eher warm	-	5,6	11,1	-	-	-	16,7
		warm	5,6	11,1	11,1	5,6	11,1	-	44,5
		sehr warm	-	11,1	-	5,6	11,1	11,1	38,9
		total	5,6	27,8	22,2	11,2	22,2	11,1	
	Luftfeuchtigkeit (n=19)	niedrig	-	10,5	-	5,3	5,3	-	21,1
		eher niedrig	-	10,5	-	-	-	5,3	15,8
		eher hoch	5,3	-	10,5	21,1	-	-	36,9
		hoch	-	5,3	-	-	5,3	10,5	21,1
		sehr hoch	-	-	-	-	5,3	-	5,3
		total	5,3	26,3	10,5	26,4	15,9	15,8	
	Wind (n=20)	sehr niedrig	5,0	-	-	20,0	-	5,0	30,0
		niedrig	-	-	15,0	5,0	5,0	-	25,0
		eher niedrig	5,0	10,0	5,0	5,0	-	-	25,0
		eher hoch	5,0	10,0	-	-	5,0	-	20,0
		total	15,0	20,0	20,0	30,0	10,0	5,0	

Tab. A3-7: Wohlbefinden der Befragten an den beiden Extremstandorten in Solingen-Ohligs (Angaben in Prozent).

Standort	sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm
Keldersstraße (n=8)	-	25,0	-	37,5	37,5	-
Park an der Wittenbergstraße (n=20)	15,0	70,0	15,0	-	-	-

Sonderauswertung: begrünte Straßenabschnitte

Im Rahmen der Sonderauswertung zur bioklimatischen Wirkung von Straßenbäumen in Solingen-Ohligs wurden auf Messfahrten registrierten Daten für Straßenabschnitte mit unterschiedlichem Bestand an Straßenbäumen analysiert. Die untersuchten Straßenabschnitte Solingen-Ohligs befinden sich teils in Blockrandbebauung, teils in lockerer Bebauung (siehe Abbildung A3-7 bzw. A3-8).

Die Werte für den UTCI wurden entsprechend Kap. A1.3.1 berechnet. Neben den auf den Messfahrten gemessenen Daten (Temperatur, relative Luftfeuchte und Globalstrahlung) wurden dazu auch die gleichzeitig gemessenen Winddaten der Station Solingen-Wald für die Berechnung herangezogen. Eine statistische Analyse des Zusammenhangs zwischen UTCI und den vereinfacht gewonnenen Daten zur Baumdichte für die untersuchten Straßenabschnitte weist darauf hin, dass der Zusammenhang relativ eng ist ($R^2 = 0{,}8661$).

Die Gesamtergebnisse wurden als Poster aufbereitet (siehe Abb. A3-8; Verkleinerung).

Darin sind als „Messpunkte entlang der Messroute“ mobile Messdaten aus dem Datensatz „Solingen_M1_urbmobi“ vom 23.06.2017, der um Messpunkte mit einer Geschwindigkeit von unter 2 m/s (Ventilationsgeschwindigkeit aspirierter Thermometer) bereinigt wurde, wodurch die Anzahl der Punkte von 1.620 auf 1.118 reduziert wurde.

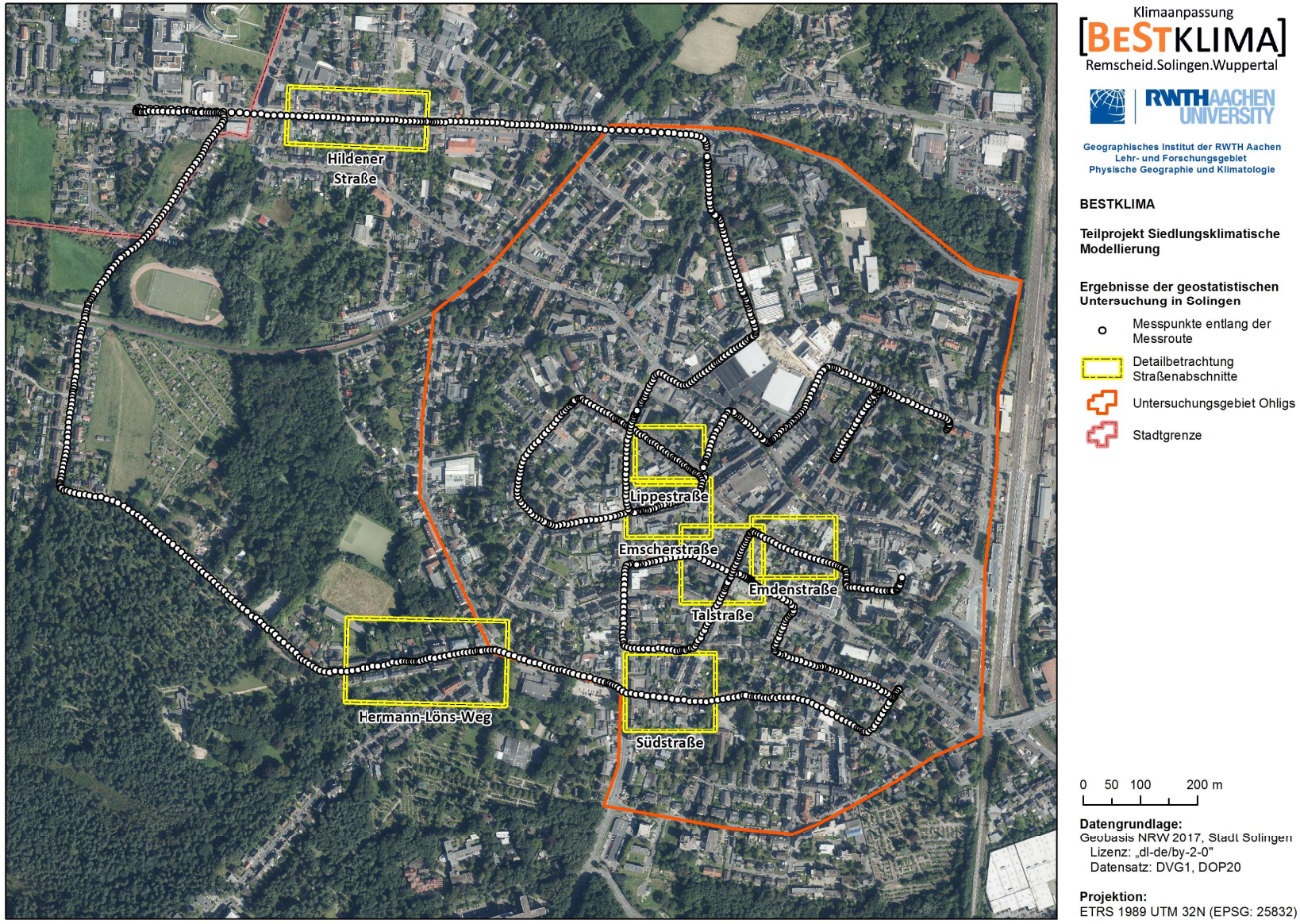


Abb. A3-7: Lage der untersuchten Straßenabschnitte.

BESTKLIMA – Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung

Temperatureffekte von Straßenbegrünung in Solingen

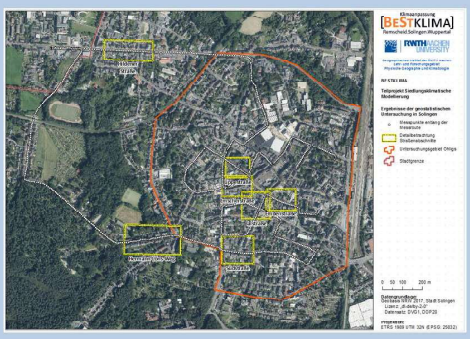
Gunnar Ketzler*, Cathrin Werkmeister, Isabell Maras
Geographisches Institut, RWTH Aachen University, Aachen, Germany
(*Email: gunnar.ketzler@geo.rwth-aachen.de)

Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts Bestklima wurde die räumliche Ausdehnung von Gebieten besonderer Hitzebelastung untersucht. Als Basis dienten Messdaten von einem heißen Tag (23.6.2016), Daten der Referenzstation Solingen-Wald und Geodaten.
Zur Bewertung der thermischen Belastung wurde der Bioklimaindex UTCI (Universal Thermal Climate Index) berechnet, mit dem der Wärmeaustausch zwischen dem menschlichen Körper und der Umwelt (direkte Umgebung) beschrieben werden kann.

Untersuchungsgebiet

Das Messprogramm in Solingen war auf den Ortsteil Solingen-Ohligs konzentriert; einzelne Messungen wurden auch im gesamten Stadtgebiet vorgenommen. Solingen-Ohligs liegt im Tal und wurde aufgrund der besonderen baulichen Situation ausgewählt.



Überblick: Temperatureffekte von Straßenbegrünung in Solingen

Auf Basis von Messdaten einer Messfahrt an einem heißen Tag (Tmax >= 30°C; 23.6.2016) wurden Straßenabschnitte in Bezug auf Temperaturentlastungseffekte der Straßenbegrünung untersucht. Aus den Messdaten der Temperatur, Feuchte und Globalstrahlung sowie den Winddaten der Feststation Solingen Wald wurde die bioklimatische Belastung berechnet (Bioklimaindex UTCI als gefühlte Temperatur). Diese Daten wurden für Straßenabschnitte mit unterschiedlichem Begrünungsgrad aufbereitet.

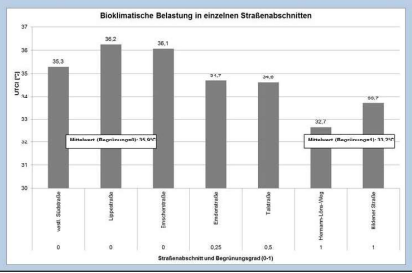


Abbildung 2a
Bioklimaindex UTCI für verschiedene Straßenabschnitte

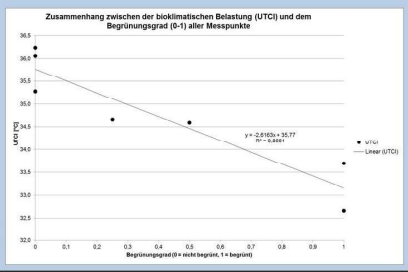
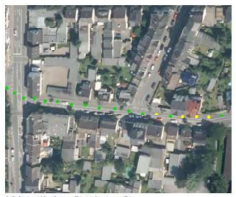


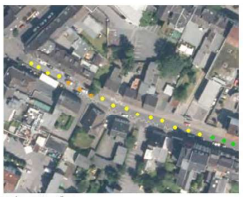
Abbildung 2b
Zusammenhang zwischen Bioklimaindex UTCI und Begrünungsgrad

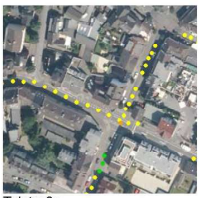
Datenbeispiele für verschiedene Straßenabschnitte (dargestellt ist nur die Lufttemperatur)


Westliche Südstraße


Lippestraße


Emscherstraße


Emdenstraße


Talstraße


Hermann-Löns-Weg


Hildener Straße

Lufttemperaturen relativ zum Freiland während einer Messfahrt am 23.6.2016

- 0,0 0,5 K
- 0,51 - 1,0 K
- 1,01 - 1,5 K
- 1,51 - 2,0 K
- 2,01 2,5 K
- 2,51 - 3,0 K

Geographisches Institut
RWTH Aachen
Templergraben 55
D-52056 Aachen, Germany
www.rwth-aachen.de

Abb. A3-8: Gesamtergebnisse der Sonderauswertung klimatische Wirkung von Straßenbäumen (Verkleinerung des Workshop-Posters vom 16.12.2016 in Solingen).

A3.2.4 Siedlungsklimatische Modellierung Wuppertal

Teilergebnis Kaltluftmodellierungen

Die kaltluftbezogenen Detaildarstellungen für die Städte basieren auf einer Auswertung der Kaltluftmodellierung mit Bezug zu zentralen Kriterien der VDI-Richtlinie 3787 „Lokale Kaltluft“ (VDI, 2003; siehe auch Kap. 1.1):

1. die Eindringtiefe der Kaltluft (Volumenstrom > 0,01 $m^3 m^{-2} s^{-1}$),

2. die Klassifizierung von Strömungstypen:
   - hangabwärtiger Kaltluftabfluss (Volumenstrom < 5 $m^3 m^{-2} s^{-1}$),
   - talabwärtige Kaltluftströme („Kaltluftakkumulation“; Volumenstrom ≥ 5 $m^3 m^{-2} s^{-1}$),
   - Kaltluftstau (Kaltluftmächtigkeit >50 m und Strömungsgeschwindigkeit < 0,5 m s^{-1}).

Zusätzlich werden Kaltluftüberströmungen berücksichtigt (nach Sachsen et al 2013).

Nach den Kriterien der VDI-Richtlinie „Lokale Kaltluft“ liegt in Arrenberg überwiegend kein Kaltluftstau vor, da nach der VDI-RL hierfür eine bestimmte Kombination aus Strömungsgeschwindigkeit und Kaltluftmächtigkeit erforderlich ist, die hier nicht gegeben ist. Allerdings kann diese Situation der aufeinander zu gerichteten Kaltluftströme nur mit Konvergenz und stagnierender Luft einhergehen, was in der Praxis zu ähnlichen planerischen Konsequenzen führt.

Die Überlagerung von Talkaltluft im Haupttal und seitlichem Einströmen von Kaltluft von Hängen und aus Mulden kann sich in Wuppertal vermutlich in ähnlicher Weise vollziehen, wie dies Abbildung A-3-9 zeigt. Die Hangkaltluft ist in der Regel kälter als die Talkaltluft und schiebt sich daher unter die Talkaltluft. Sofern die Talkaltluft ausbleibt, ist die Hangkaltluft noch vorhanden.

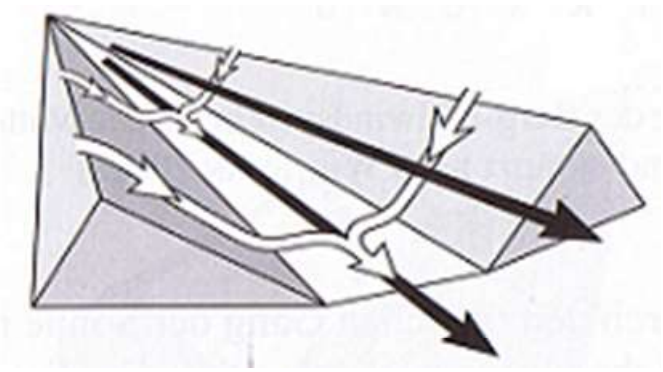


Abb. A3-9: Überlagerung von Tal- (schwarz) und Hangkaltluft (weiß; schematisch, nach Defant, zitiert nach Bendix, 2004).

Zur Frage der Kaltluftströmung im Tal der Wupper unterhalb von Vohwinkel ergab sich, dass diese nicht talabwärts, sondern talaufwärts gerichtet ist. Wobei nahe Wuppertal große Mengen Kaltluft dieser Strömungsrichtung folgen und sich gleichzeitig zwischen Solingen und Remscheid ein großer Kaltluftstagnationsbereich ergibt. Dies deuten auch die Ergebnisse der im Rahmen des „Handlungskonzepts Klima und Lufthygiene für die Stadt Wuppertal“ mit einem anderen Kaltluftsimulationsmodell durchgeführten Kaltluftstudie an (KALM; Lohmeyer, 2000; siehe Abbildung A3-10); auch danach muss im Bereich Arrenberg ein Konvergenzbereich der Kaltluft entstehen (das Modell KALM gewichtet die städtische Überwärmung schwächer, weshalb in Arrenberg schon 4 h nach Sonnenuntergang Kaltluft einströmt, was nach dem Modell KLAM_21, wie auch nach Auswertung der Stationsdaten Wuppertal-Bundesallee, nicht bzw. nicht häufig der Fall ist).

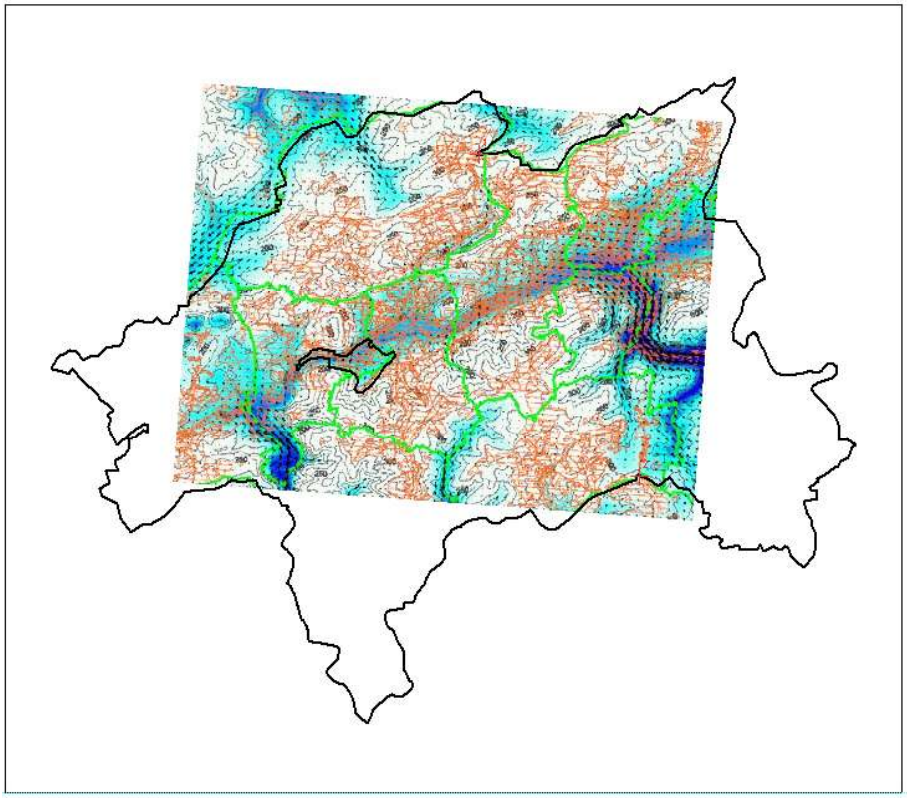


Abb. A3-10: Kaltluftbewegungen in Wuppertal 3 h nach Sonnenuntergang nah dem „Handlungskonzepts Klima und Lufthygiene für die Stadt Wuppertal“ (Lohmeyer, 2000; siehe Abb. 2.1.3).

Hintergründe zu begrünungs- und vegetationsbezogenen Maßnahmen

Im Hinblick auf klimatische Veränderungen steht die Frage im Vordergrund, wie sich vorhandene städtische Strukturen optimal nutzen lassen, um aktuell ein hohes Maß an Lebensqua-

lität in der Stadt zu gewährleisten und auch bei zukünftigen klimatischen Veränderungen möglichst geringe bioklimatische Belastungen bzw. einen möglichst hohen Aufenthaltskomfort zu ermöglichen. Eine zentrale Rolle dabei spielen – jenseits von technischen Möglichkeiten, die zudem vielfach verstärkende Rückkopplungseffekte auf die globale Erwärmung aufweisen – inner- und randstädtische Grünflächen. Diese haben großen Einfluss auf das städtische Klima und bieten zudem – im Gegensatz zum Baubestand – weitreichende Möglichkeiten adaptive Prozesse aktiv zu steuern. Die durch den Klimawandel bedingte Anhebung des Temperaturniveaus wird bis auf weiteres vor allem dazu führen, dass die Zahl der Tage, an denen wegen hoher Temperaturen Bedarf an Kühlung besteht, in Verbindung mit deren Kühlintensität (Kühlgradtage), deutlich mehr zunimmt als die der Heizgradtage abnimmt. (siehe Abbildung A3-11; PIK, 2009).

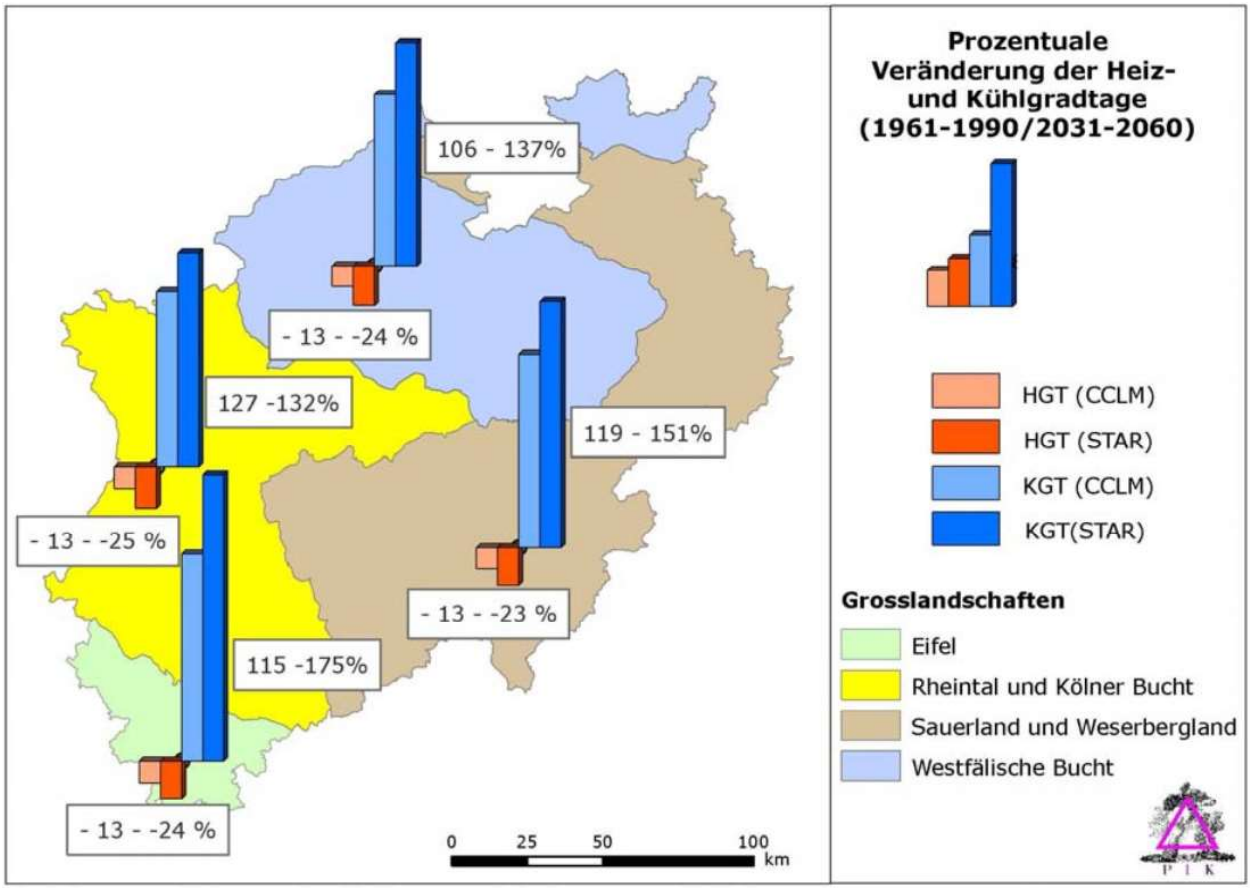


Abb. A3-11: Prognostizierte Veränderung der Heiz- und Kühlgraftage in NRW (Quelle: PIK, 2009).

Randstädtische Grünflächen können in der Nachtsituation als Belüftungsbahnen eine Rolle spielen. Bei der gegebenen Lagesituation sind Kaltluftabflüsse für die im Tal gelegenen zentralen Teile der Stadt besonders wichtig für die Versorgung der Innenstadt mit kühler und unbelasteter Luft. Speziell bei den flachen Kaltluftströmen aus Hängen und kleinen Mulden

fungieren Grünflächen einerseits als Luftleitbahn, über die die kalte Luft in Richtung Stadtzentrum strömt. Andererseits sind sie die Voraussetzung für die Entstehung von Kaltluft, die sich praktisch nur über unversiegelten Flächen bildet. Dabei zeigen sich die höchsten Produktionsraten und Abflussmengen an Kaltluft über Wiesenflächen ohne hoch aufwachsende Baum- oder Strauchvegetation, da diese in der Nacht stärker abkühlen und beim Abfluss weniger Fließwiderstand bieten (z.B. VDI, 2003).

Jüngste Untersuchungen zeigen Veränderungen der abfließenden Kaltluftvolumina durch die Änderung im Tal befindlicher Gehölzstrukturen. So konnten deutlich steigende Abflussmengen durch die Entnahme eines flächenmäßig keinen Baumbestandes in ungünstiger Lage erreicht werden (Sachsen, 2014). Modellergebnisse bestätigen ergänzend eine starke Beeinflussung des Kaltluftabflusses durch hohe und dichte Vegetationsstrukturen und die gleichzeitige Möglichkeit, durch richtige Platzierung gleiche Vegetationsvolumina mit optimierten Kaltluftabflussmengen zu vereinbaren. Alleine unter dem Gesichtspunkt der städtischen Durchlüftung sind demnach in kaltluftrelevanten Bereichen randstädtische Grünflächen mit geringer Oberflächenrauigkeit für die Reduktion innerstädtischer thermischer und lufthygienischer Belastung empfehlenswert. Bei der Betrachtung lufthygienischer Eigenschaften zeigt sich dagegen ein erhöhtes Filterpotenzial im dichten Vegetationsbestand. Es empfiehlt sich ein differenzierter Umgang mit randstädtischen Grünflächen im Hinblick auf Kaltluftentstehung und Abfluss. Eine weitere Nachverdichtung zu Lasten der vorhandenen Grünflächen ist in jedem Fall zu vermeiden, da dies zu nachteiligen Auswirkungen auf die innerstädtischen Lufttemperatur und Luftqualität führen wird, soweit der Belüftungsaspekt im Vordergrund steht.

Übersichtsmodellierung mit modifizierter Landnutzung

Da nicht klar war, ob in Wuppertal mit der bei Vohwinkel talaufwärts gerichteten Kaltluftströmung ein Sondereffekt der städtischen Wärmeinsel vorliegt, wurde ein Referenzmodelllauf der Übersichtsmodellierung mit modifizierter Landnutzung durchgeführt. Dieser Modelllauf wurde mit genau den gleichen Einstellungen und den gleichen Höhendaten wie der Übersichtsmodelllauf durchgeführt; allerdings mit einem Landnutzungsdatensatz, der für alle Oberflächen die KLAM-Landnutzungsklasse „unversiegelte Fläche“ enthält. Dies entspricht einer landwirtschaftlichen Fläche ohne Bebauung und ohne Strömungshindernisse auf der Erdoberfläche.

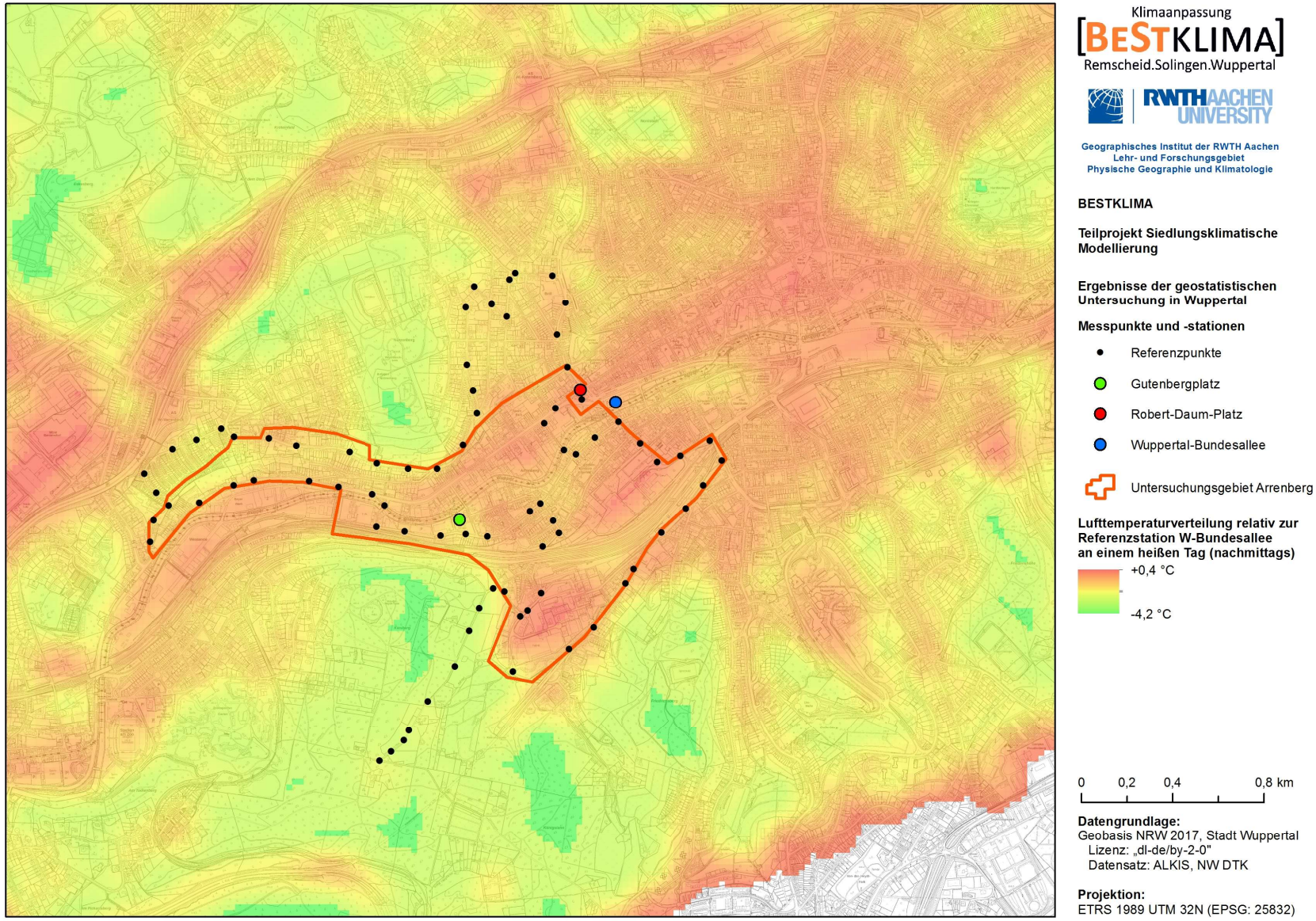


Abb. A3-12: Wuppertal - Temperaturmodell für Wuppertal-Arrenberg und Umgebung.

Ergebnis Messfahrten und Geostatistik - Hot Spots

Die Berechnung des Temperaturmodells basiert auf den Kenndaten der multiplen Regressionsanalyse nach Kap. 1.2.2. Die sich daraus ergebende Temperaturverteilung zeigt Abbildung A1-12.

Für die klassifizierte Darstellung im Berichtsband werden die Temperaturdaten nach Kenndaten der statistischen Verteilung der berechneten Temperaturwerte in Klassen aufgeteilt. Die Klassengrenzen werden dabei in Anlehnung an die Vorgehensweise von Modellstudien aus dem ExWOST-Programm des BMVBS gebildet (BMVBS, 2012; z.B. Saarbrücken bzw. Jena). Es wird danach der Mittelwert minus die Standardabweichung als oberer Schwellenwert für die Klasse „geringe Belastung“ und Mittelwert plus die Standardabweichung als oberer Schwellenwert für die Klasse „mäßige Belastung“ gesetzt; die Werte darüber werden als „hohe Belastung“ eingestuft. Abweichend von diesem Verfahren wird zur Differenzierung des Bereichs hoher thermischer Belastung eine weitere Stufe eingeführt: Temperaturwerte oberhalb des Mittelwerts plus die 1,5-fache Standardabweichung werden als Bereich „sehr hoher Belastung“ definiert.

Human-Biometeorologie für innerstädtische Extremstandorte

Datenaufbereitung

Mittels der an beiden Messstandorten erhobenen Globalstrahlung können über das Model RayMan die Werte der Strahlungstemperatur modelliert werden. Gemessene Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit komplettieren den zur Errechnung von PET und UTCI Werten notwendigen Datenpool. Die nachfolgende Analyse der thermischen Indizes erfolgt auf Basis von 10-Minuten Mittelwerten, welche sowohl für den versiegelten als auch für den vegetationsreichen Standort ermittelt worden.

Ergebnisse der Passantenbefragung

In Wuppertal-Arrenberg wurden insgesamt 41 Personen befragt, davon 21 am versiegelten Standort und 20 am Grünstandort. An beiden Standorten wurden sowohl Männer als auch Frauen befragt, wobei am Grünstandort deutlich mehr Frauen an der Befragung teilgenommen haben als Männer. Am versiegelten Standort ist das Geschlechterverhältnis weitestgehend ausgeglichen. An der Befragung haben Personen aus unterschiedlichen Altersgruppen teilgenommen, nämlich zwischen 18 - 34, 35 - 54 sowie 55 - 64 und 65 - 74. Der Anteil der Altersgruppen 18 - 34 und 35 -

54 sticht dabei deutlich heraus. Alle Befragten (n=41) haben als aktuellen Wohnort „eine Stadt in Deutschland“ angegeben.

Wahrnehmung einzelner Klimaparameter

Am Robert-Daum-Platz werden die Klimaparameter wie folgt wahrgenommen und bewertet: Die Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur werden von den meisten Befragten als warm bis sehr warm eingestuft, was sowohl als angenehm als auch eher unangenehm bewertet wird. Die Luftfeuchtigkeit wird unterschiedlich wahrgenommen und bewertet: Die Befragten empfinden diese zwischen sehr niedrig und hoch, wobei eine eher hohe und hoch empfundene Luftfeuchtigkeit zwischen angenehm und unangenehm bewertet wird. Über die Hälfte der Befragten nimmt die Luftfeuchtigkeit zwischen niedrig und eher niedrig wahr, wobei das Empfinden einer niedrigen Luft-feuchtigkeit als sehr angenehm und angenehm bewertet wird, die Bewertung einer eher niedrigen Luftfeuchtigkeit jedoch zwischen sehr angenehm und eher unangenehm schwankt. Der Wind wird ebenfalls sehr unterschiedlich eingeschätzt, wobei ein Großteil der Befragten (etwa 40 %) diesen zwischen eher niedrig und eher hoch wahrnimmt und das als angenehm empfindet.

Am Gutenbergplatz werden die Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur ebenfalls sehr warm und warm wahrgenommen, was auf einer Skala zwischen sehr angenehm und sehr unangenehm bewertet wird. Die Klimaparameter Luftfeuchtigkeit und Wind werden von den meisten Befragten niedrig und eher niedrig eingestuft, was zwischen sehr angenehm und sehr unangenehm (Luftfeuchtigkeit) und zwischen sehr angenehm und eher unangenehm (Wind) empfunden wird.

Wohlbefinden am Aufenthaltsort

Am Gutenbergplatz bewerten 50,0 % der Befragten ihr Wohlbefinden bezogen auf den Aufenthaltsort als sehr angenehm und 25,0 % als angenehm (n=20). Am Robert-Daum-Platz hingegen bewerten nur 9,5 % der Befragten ihr Wohlbefinden bezogen auf den Aufenthaltsort als sehr angenehm und 38,1 % als angenehm (n=21).

Interpretation der Ergebnisse

In der Bewertung des Klimaparameters Luftfeuchtigkeit schneidet der Grünstandort im Vergleich zum versiegelten Standort etwas besser ab. Hinsichtlich des Klimaparameters Wind wird dieser am versiegelten Standort insgesamt betrachtet positiver (angenehmer) bewertet. Bei der positiveren Bewertung des Grünstandorts spielt auch eine generell positivere Wahrnehmung einer Grünfläche eine Rolle (Klemm et al. 2015).

Darüber hinaus spielen bei der Wahrnehmung der Klimaparameter soziodemographische Faktoren, aber auch die Position des Befragten (in der Sonne / im Schatten), der Zeitpunkt der Befragung (z.B. nachmittags oder abends) sowie die allgemeine Witterungsverhältnisse im meteorologischen Sommer 2016 eine Rolle. „Aufgrund des unterschiedlichen Metabolismus (hier der Grundumsatz) kann das thermische Empfinden außerhalb des Komfort in Abhängigkeit von Alter

und Geschlecht variieren“ (Jendritzky et al. 2007: 84). Befragungsgruppen dieser Untersuchung unterscheiden sich z.T. in der Alters- und Geschlechterstruktur: Am Parkstandort wurden beispielsweise prozentual mehr Frauen als Männer befragt, wohingegen das Geschlechterverhältnis am versiegelten Standort weitestgehend ausgeglichen ist. Hinsichtlich der Altersstruktur der Befragten wurden am Gutenbergplatz eher Personen zwischen 18 - 34 interviewt, am Robert-Daum-Platz ist der Großteil der Befragten zwischen 35 - 54 Jahren alt. An beiden Standorten wurden die Befragten größtenteils im Schatten befragt, jedoch z.T. zu unterschiedlichen Zeitpunkten: In der Grünanlage fand die Befragung zwischen 15 und ca. 18 Uhr statt, am versiegelten Standort zwischen 16 und 20.30 Uhr. Die Messkampagne in Wuppertal lag in der Hitzewelle Ende August, was die Befragungsergebnisse ebenfalls beeinflusst haben könnte.

Tab. A3-8: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter am Robert-Daum-Platz (Angaben in Prozent).

			Bewertung						
			sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm	total
Wahrnehmung	Sonneneinstrahlung (n=19)	kalt	-	5,3	-	-	-	-	5,3
		eher warm	5,3	5,3	10,5	-	-	-	21,1
		warm	-	21,1	5,3	5,3	-	-	31,7
		sehr warm	5,3	10,5	5,3	15,8	5,3	-	42,4
		total	10,6	42,2	21,1	21,1	5,3	-	
	Lufttemperatur (n=18)	eher kalt	-	5,6	-	-	-	-	5,6
		eher warm	5,6	-	11,1	-	-	-	16,7
		warm	5,6	38,9	5,6	-	-	-	50,4
		sehr warm	-	11,1	-	11,1	5,6	-	28,0
		total	11,2	50,0	16,7	11,1	5,6	-	
	Luftfeuchtigkeit (n=17)	sehr niedrig	-	5,9	-	-	-	-	5,9
		niedrig	5,9	17,6	-	-	-	-	23,6
		eher niedrig	5,9	-	17,6	11,8	-	-	35,4
		eher hoch	-	5,9	11,8	-	-	-	17,7
		hoch	-	11,8	-	-	5,9	-	17,7
		total	11,8	41,2	29,4	11,8	5,9	-	
	Wind (n=18)	niedrig	5,6	5,6	5,6	-	-	-	16,8
		eher niedrig	5,6	22,2	11,1	-	-	-	39,2
		eher hoch	5,6	16,7	-	-	-	-	22,4
		hoch	5,6	11,1	-	-	5,6	-	22,4
		total	22,4	55,6	16,7	-	5,6	-	

Tab. A3-9: Wahrnehmung und Bewertung der Klimaparameter am Gutenbergplatz (in %).

			Bewertung						
			sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	Unangenehm	sehr unangenehm	total
Wahrnehmung	Sonneneinstrahlung (n=20)	kalt	-	5,0	-	-	-	-	5,0
		eher warm	-	5,0	-	-	-	-	5,0
		warm	5,0	5,0	-	-	5,0	-	15,0
		sehr warm	5,0	15,0	10,0	15,0	30,0	-	75,0
		total	10,0	30,0	10,0	15,0	35,0	-	
	Lufttemperatur (n=20)	kalt	-	5,0	-	-	-	-	5,0
		eher kalt	-	5,0	-	-	-	-	5,0
		eher warm	-	-	5,0	-	-	5,0	5,0
		warm	5,0	30,0	-	-	-	-	35,0
		sehr warm	-	-	20,0	5,0	15,0	10,0	50,0
		total	5,0	40,0	25,0	5,0	15,0	10,0	
	Luftfeuchtigkeit (n=20)	sehr niedrig	-	5,0	-	-	-	-	5,0
		niedrig	-	30,0	10,0	-	10,0	5,0	55,0
		eher niedrig	5,0	10,0	5,0	-	-	-	20,0
		eher hoch	-	-	-	-	5,0	-	5,0
		hoch	5,0	5,0	-	-	-	-	10,0
		sehr hoch	-	-	-	5,0	-	-	5,0
		total	10,0	50,0	15,0	5,0	15,0	5,0	
	Wind (n=20)	sehr niedrig	5,0	5,0	-	-	20,0	-	30,0
		niedrig	10,0	25,0	-	5,0	-	-	40,0
		eher niedrig	-	10,0	10,0	-	-	-	20,0
		eher hoch	-	5,0	-	-	-	-	5,0
		hoch	-	-	-	-	5,0	-	5,0
		total	15,0	45,0	10,0	5,0	25,0	-	

Tab. A3-10: Wohlbefinden der Befragten an den beiden Extremstandorten in Wuppertal-Arrenberg (Angaben in Prozent).

Standort	sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm
Robert-Daum-Platz (n=21)	9,5	38,1	23,8	23,8	4,8	-
Gutenbergplatz (n=20)	50,0	25,0	10,0	10,0	5,0	-

Sonderauswertung Kaltluft in Arrenberg

Bei der Auswertung der Daten der Station Wuppertal-Bundesallee (Messung über Dach) wurden als Strahlungstage solche Tage definiert, deren Temperaturamplitude (Differenz aus Temperaturminimum und -maximum) über 10 K liegt.

Sonderauswertung: Planspiel - Umnutzung von Gewerbebrachflächen in Wuppertal-Langerfeld/ Heckinghausen in Grünflächen bzw. in aufgelockerte Bebauung

Diese Zusatzmodellläufe wurden mit den gleichen Einstellungen und Daten wie oben unter „Teilergebnis Kaltluftmodellierungen“ dargestellt gerechnet. Es wurde lediglich für die dargestellten Brachflächen im Bereich Wuppertal – Langerfeld / Heckinghausen die Alternativnutzung „Grünfläche“ bzw. „dichte innerstädtische Bebauung“ gerechnet.

Sonderauswertung: Zusatzmodelllauf Grünzug entlang der Wupper

Für diesen Zusatzmodellauf war aufgrund der Aufgabenstellung eine räumliche Auflösung von mindestens 5 m x 5 m erforderlich. Gleichzeitig sollte zumindest die relevante frühe Nachtsituation abgebildet werden, so dass eine Modelldomain von etwa 15 km x 10 km nötig war um das zu dieser Zeit erhebliche Einzugsgebiet abbilden zu können. Bei der gegebenen Kapazität der

aktuellen Modellversion von KLAM_21 (Update 2016) war diese Modelldomain mit der Mindestauflösung von 5 m x 5 m gerade möglich. Alle anderen Modelleinstellungen entsprachen den oben erläuterten Standardeinstellungen.

Die Umwandlungstabelle von ALKIS-Klassen in KLAM_21-Landnutzungsklassen ist im Tabellenanhang zu finden. Wegen der komplizierten Nutzungssituation im Uferbereich konnten Sonderfälle bei der modellierten Umwandlung von aktueller Nutzung in Grünflächen nicht berücksichtigt werden (z.B. Brückenbauwerke etc.).

Als Höhendaten wurde das aktuelle Geländemodell (DGM1; Geobasis.nrw, 2017 a) verwendet.

Sonderauswertung: Zusatzmodelllauf Gesamtströmungssituation Kaltluft in Wuppertal (mit und ohne Bebauung)

Dieser Zusatzmodelllauf wurde mit dem gleichen digitalen Geländemodell wie für den Ist-Zustand aber mit einer ausschließlich aus „unversiegelten Flächen“ bestehenden Landnutzung gerechnet.

Zu Kap. 3.3 Neueste Klimaszenarien für NRW

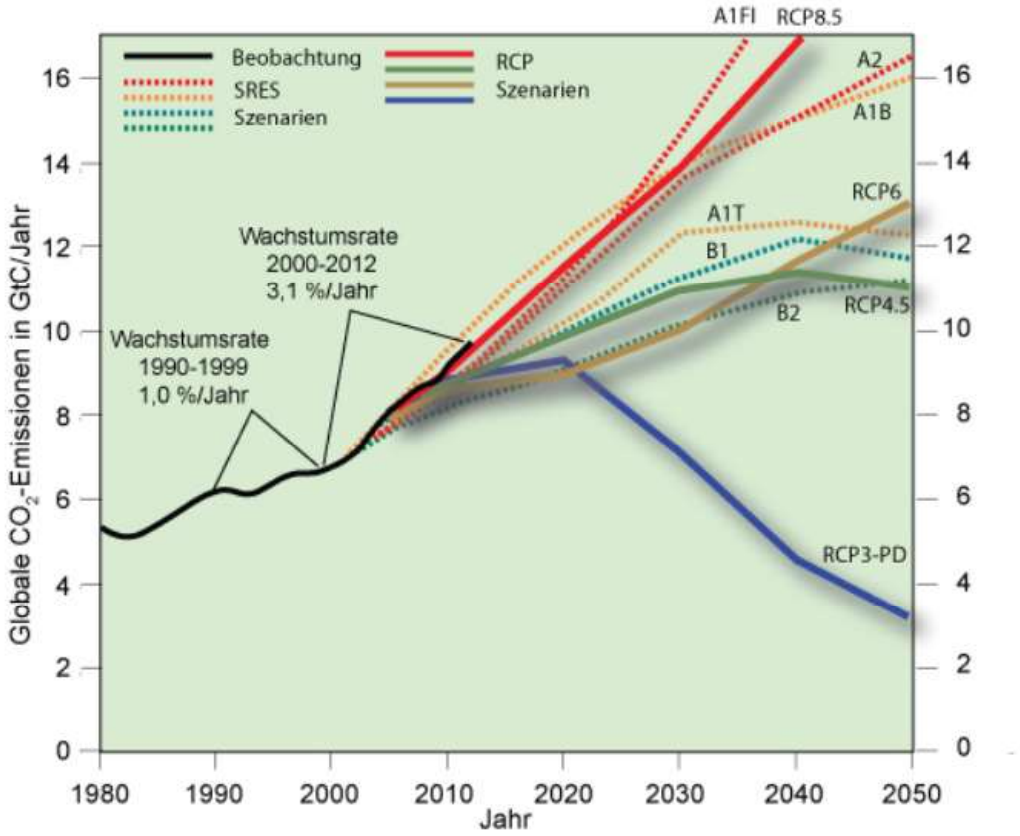


Abbildung: RCP-Emissionspfade im Vergleich zu den SRES-Emissionspfaden bis 2050 Darstellung nach: Peters, G.P., et al. (2012): Quelle: http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Datei:SRES_RCP_Szenarien.jpg#filelinks

Abb. A3-13: RCP-Emissionspfade im Vergleich zu den SRES-Emissionspfaden bis 2050.

Zur Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines bestimmten der üblicherweise vier verwendeten Repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) kann keine Aussage getroffen werden, das Umweltbundesamt Österreich konstatiert aber: "Die aktuellen Entwicklungen der globalen THG-Emissionen und Konzentrationen deuten derzeit jedoch eher auf ein Hochemissionsszenario wie RCP8.5 hin." (Umweltbundesamt, 2017)

Sonstiges

Die wichtigsten Ergebnisse für die beteiligten Städte sind in den folgenden Postern dokumentiert, die auf dem 2. Bergischen Klimaforum am 29.11.2017 in Solingen präsentiert wurden.

BESTKLIMA – Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung

Siedlungsklimatische Grundlagen im Bergischen Städtedreieck Remscheid

Gunnar Ketzler*, Dimitri Falk
Geographisches Institut, RWTH Aachen University, Aachen, Germany
(*E-Mail: gunnar.ketzler@geo.rwth-aachen.de)

Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts Bestklima wurden Grundlagendaten zum Siedlungsklima vervollständigt und systematisiert, wodurch die Basis für konkrete Maßnahmen im Rahmen der Klimaanpassung erheblich verbessert wird. Dabei handelt es sich einerseits – für die drei Städte jeweils gleich – um die Erfassung von flächigen nächtlichen Kaltluftsystemen bzw. von Hot-Spots bei Hitzeperioden in innerstädtischen Schwerpunktgebieten; die Auswertung basiert auf Berechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes und Messfahrtdaten in Verbindung mit einem geostatistischen Verfahren. Andererseits werden jeweils unterschiedliche stadtspezifische Spezialfragen untersucht.

Lokale Kaltluft in Remscheid in der frühen Nacht (3h nach Sonnenuntergang)

Die Kaltluftsituation in Remscheid ist in der frühen Nacht durch Kaltluftstau im Tal der der Wupper und den Nebentalern sowie durch Kaltluftabfluss in kleineren Mulden bzw. an Hängen geprägt; die bebauten Teile der Stadt sind hiervon kaum betroffen.
In der späteren Nacht nehmen die Kaltluftmengen im Tal der Wupper zu. Die höheren Hanglagen in Remscheid stehen dann unter Einfluss von Kaltluft, die höchsten Kuppenlagen werden aber nur ausnahmsweise erreicht. Lokal kommt es zu Kaltluftüberströmungen, wobei auf den Hohenzügen Kaltluft in Form eines Kaltluftstroms von einem Talbereich in einen anderen fließt (siehe unten).

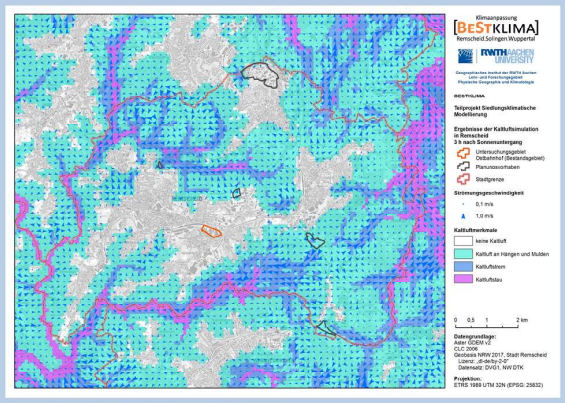


Abb. 1: Kaltluft in Remscheid (Situation in der frühen Nacht).

Bereiche besonderer Hitzebelastung („Hot-Spots") an heißen Tagen in Remscheid

Auf den dicht bebauten Kuppenlagen in Remscheid bildet sich an Hitzetagen eine längliche Warmeinsel aus. Tagsüber sind Warmeinseln allgemein eher schwacher als nachts ausgebildet, können dann aber mit besonderer Hitzebelastung verbunden sein. Aufgrund der Höhenlage der Remscheider Innenstadt sind diese Bereiche mit relativ hoher Temperaturbelastung aber nicht so ausgeprägt wie in Städten des Tieflands.
Am Untersuchungsgebiet Ostbahnhof stoßen drei Kuppenbereiche höherer Temperaturbelastung zusammen; zudem ist das Gebiet etwas weniger windexponiert. Daher ist das Belastungsniveau wiederum etwas höher als an anderen Stellen im Stadtgebiet.

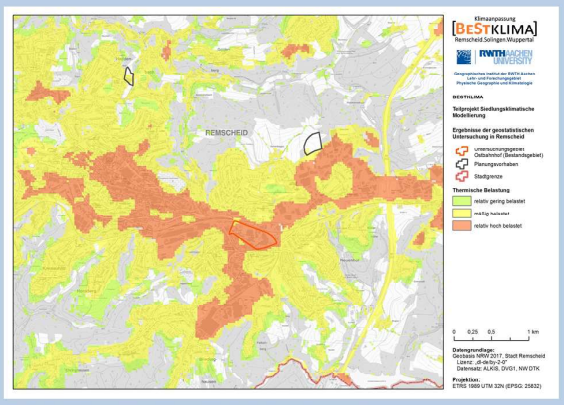


Abb. 2: Hitzebelastung in Remscheid (zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums).

Kaltluftüberströmungen in Remscheid

In der späteren Nacht (8h nach Sonnenuntergang) nehmen die Kaltluftmengen im oberen Tal der Wupper derart zu, dass sich ein erheblicher Rückstau ergibt. Dabei überströmen Teile der Kaltluft die Talschultern zum Eschbach- und Leyerbachtal bei Stöcken bzw. Großhülsberg (siehe Abb. 3).
Bei Stöcken wurde dies auch durch Messungen bestätigt. Diese Kaltluftüberströmungen verhalten sich grundsätzlich wie andere Kaltluftströme auch, allerdings befinden Sie sich nicht – wie Talkaltluft – weitgehend Tälern, sie folgen vielmehr Einsattelungen im Kuppenbereich; deshalb sind sie auch nicht in den erwartbaren Geländebereichen anzutreffen. Erkennbar sind sie z.B. an auffälligen Nebelbildungen.

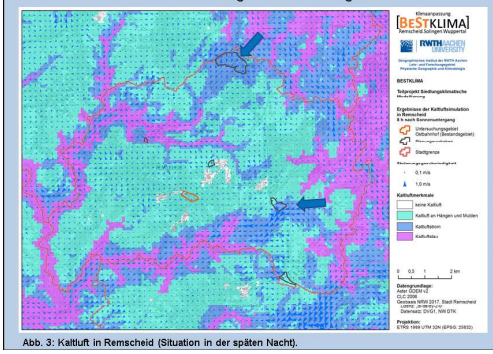


Abb. 3: Kaltluft in Remscheid (Situation in der späten Nacht).

In Stöcken ist ein Planungsvorhaben mittelbar betroffen; dies ist bei der weiteren Planung zu berücksichtigen.
In Großhülsberg soll ein bestehendes Gewerbegebiet durch das Projekt „Grau wird Grün" ökologisch aufgewertet werden; hier sind keine Konflikte zu erwarten.

Bioklimatische Untersuchungen am Ostbahnhof

Im Bereich Ostbahnhofsgelände wurden Untersuchungen mit dem Ziel der Erfassung bioklimatischer Belastungen an innerstädtischen Extremstandorten durchgeführt (Abb. 4).
Es ergaben sich mäßige Unterschiede zwischen einer versiegelten Fläche (Vorplatz des Einkaufszentrums am Pirnaplatz) und einer Grünfläche (Weg „Zum Kuckuck").
Dies resultiert aus der insgesamt sehr gut durchlüfteten Kuppenlage (Abb. 5), wo Belüftungsfragen eine große Rolle spielen (Pirnaplatz in windoffener Lage) und der Grünanteil nicht allein ins Gewicht fällt (Messstandort „Zum Kuckuck" liegt windgeschützt). Bei windschwacher Witterung dominiert allerdings doch der Begrünungsgrad und ist planungsrelevant.



Abb. 4: Bioklima-Messstandorte in Remscheid).



Abb. 5: Markante Kuppenlage der Remscheider Innenstadt.

Geographisches Institut
RWTH Aachen
Templergraben 55
D-52056 Aachen, Germany
www.rwth-aachen.de

Klimaanpassung BESTKLIMA Remscheid.Solingen.Wuppertal
DAS BERGISCHE STÄDTEDREIECK
Solingen
STADT WUPPERTAL
STADT REMSCHEID
Geographisches Institut
ISB RWTH AACHEN UNIVERSITY
RWTH AACHEN UNIVERSITY

Abb. 4-1: BESTKLIMA – Kernergebnisse für Remscheid (Poster 2. Bergisches Klimaforum 29.11.2017)

BESTKLIMA – Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung

Siedlungsklimatische Grundlagen im Bergischen Städtedreieck Solingen

Gunnar Ketzler*, Dimitri Falk
Geographisches Institut, RWTH Aachen University, Aachen, Germany
(*E-Mail: gunnar.ketzler@geo.rwth-aachen.de)

Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts Bestklima wurden Grundlagendaten zum Siedlungsklima vervollständigt und systematisiert, wodurch die Basis für konkrete Maßnahmen im Rahmen der Klimaanpassung erheblich verbessert wird. Dabei handelt es sich einerseits – für die drei Städte jeweils gleich – um die Erfassung von flächigen nächtlichen Kaltluftsystemen bzw. von Hot-Spots bei Hitzeperioden in innerstädtischen Schwerpunktgebieten; die Auswertung basiert auf Berechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes und Messfahrtdaten in Verbindung mit einem geostatistischen Verfahren. Andererseits werden jeweils unterschiedliche stadtspezifische Spezialfragen untersucht.

Lokale Kaltluft in Solingen in der frühen Nacht (3h nach Sonnenuntergang)

Die Kaltluftsituation in Solingen ist in der frühen Nacht durch große Mengen Kaltluft im Tal der Wupper sowie durch lokalen Kaltluftabfluss in kleineren Mulden bzw. Hängen auf der Abdachung zum Rheintal geprägt. Die Kaltluft im Tal der Wupper stagniert bereits am frühen Abend, Solingen-Ohligs wird von Kaltluft v. a. aus zwei kleinen, aktiven Mulden angeströmt (Lochbach- und Viehbachtal; siehe Abb. 1).
In der späteren Nacht nehmen die Kaltluftmengen zu. Allerdings werden weder Ohligs (aus den kleinen Mulden) noch Solingen-Zentrum (aus dem Tal der Wupper) komplett überströmt.

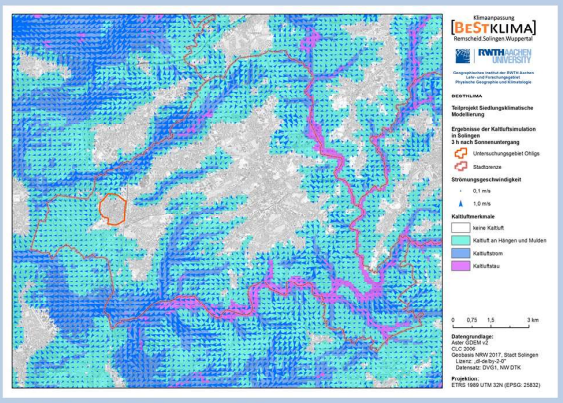


Abb. 1: Kaltluft in Solingen (Situation in der frühen Nacht).

Bereiche besonderer Hitzebelastung („Hot-Spots") an heißen Tagen in Solingen

In Solingen-Ohligs bildet sich an Hitzetagen eine lokale Wärmeinsel aus. Tagsüber sind Warmeinseln in Stadten meist eher schwacher als nachts ausgebildet, tragen dann jedoch zu einer besonderen Hitzebelastung bei. Mit 2-3 K über dem Niveau von benachbarten Grün- bzw. Waldflächen ist diese Wärmeinsel in Anbetracht der wenig verdichteten Bebauung durchaus recht stark ausgeprägt (Abb. 2).
Da die Bebauung eher relativ homogen ist, sind „Hot-Spots" kaum markant abgegrenzt; innerhalb der Bebauung sind die Temperaturunterschiede mit ca. 1 K nicht sehr groß. Einzelne große Industriebetriebe wirken insbesondere durch große versiegelte Flächen.

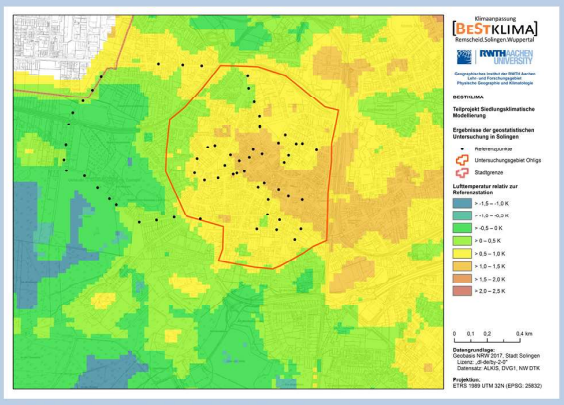


Abb. 2: Hitzebelastung in Solingen (zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums).

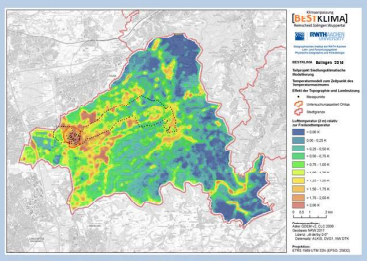


Abb. 3: Temperaturverteilung 2016 bei einem Hitzeereignis.

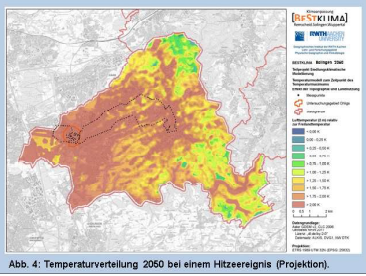


Abb. 4: Temperaturverteilung 2050 bei einem Hitzeereignis (Projektion).

Städtische Wärmeinsel in Solingen

Die geostatistische Analyse der gesamten Wärmeinsel der Stadt Solingen zeigt folgende Hauptergebnisse (Abb. 3):

- Die bauliche Dichte ist im Zentrum höher als in Ohligs,
- das Temperaturniveau ist wegen der Höhenlage im Zentrum niedriger als in Ohligs,
- in der Überlagerung beider Effekte ergibt sich eine höhere thermische Belastung in Ohligs.

Die derzeitige Gunstlage des Zentrums könnte in der Zukunft an Bedeutung verlieren. Bezogen auf heutige Freilandverhältnisse ergibt eine Klimawandel-Projektion für 2050 dort höhere Temperaturen als heute in Ohligs (Abb. 4).

Straßenbegrünung in Solingen-Ohligs

In Solingen-Ohligs wurden Daten der Messfahrten daraufhin ausgewertet, wie sich die unterschiedliche Straßenbegrünung auf die Temperatur auswirkt. Es wurden dazu auf Basis einer Luftbildkartierung Begrünungsgrade ermittelt und mit den Messdaten verglichen.
Ergebnis: Straßenabschnitte mit viel Begrünung sind bis zu 2,5 K kalter, die bioklimatische Belastung ist um bis zu 3,5° UTCI niedriger (Abb. 5 und 6).

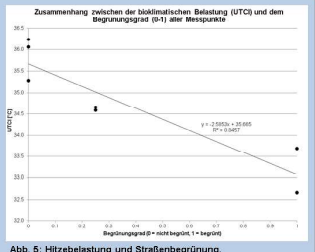


Abb. 5: Hitzebelastung und Straßenbegrünung.



Abb. 6: Lufttemperatur in verschiedenen Straßenabschnitten.

Geographisches Institut
RWTH Aachen
Templergraben 55
D-52056 Aachen, Germany
www.rwth-aachen.de

Klimaanpassung BESTKLIMA Remscheid.Solingen.Wuppertal
DAS BERGISCHE STÄDTEDREIECK
Solingen
STADT WUPPERTAL
STADT REMSCHEID
Geographisches Institut
ISB RWTH AACHEN UNIVERSITY
RWTH AACHEN UNIVERSITY

Abb. 4-2: BESTKLIMA – Kernergebnisse für Solingen (Poster 2. Bergisches Klimaforum, 29.11.2017)

BESTKLIMA – Teilprojekt Siedlungsklimatische Modellierung

Siedlungsklimatische Grundlagen im Bergischen Städtedreieck Wuppertal

Gunnar Ketzler*, Dimitri Falk
Geographisches Institut, RWTH Aachen University, Aachen, Germany
(*E-Mail: gunnar.ketzler@geo.rwth-aachen.de)

Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts Bestklima wurden Grundlagendaten zum Siedlungsklima vervollständigt und systematisiert, wodurch die Basis für konkrete Maßnahmen im Rahmen der Klimaanpassung erheblich verbessert wird. Dabei handelt es sich einerseits – für die drei Städte jeweils gleich – um die Erfassung von flächigen nächtlichen Kaltluftsystemen bzw. von Hot-Spots bei Hitzeperioden in innerstädtischen Schwerpunktgebieten; die Auswertung basiert auf Berechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes und Messfahrtdaten in Verbindung mit einem geostatistischen Verfahren. Andererseits werden jeweils unterschiedliche stadtspezifische Spezialfragen untersucht.

Lokale Kaltluft in Wuppertal in der frühen Nacht (3h nach Sonnenuntergang)

Die Kaltluftsituation in Wuppertal ist in der frühen Nacht durch Zufuhr von Kaltluft aus verschiedenen Teileinzugsgebieten geprägt. Dabei wird die massive städtische Wärmeinsel im Tal der Wupper stellenweise durch die lokale Kaltluft abgeschwächt und aufgeteilt. Neben einer langsam einsetzenden Zufuhr von Kaltluft aus dem Tal der oberen Wupper spielen dabei am frühen Abend kleinere Seitentäler und Mulden eine Rolle. Speziell ist dies auch im Untersuchungsgebiet Arrenberg der Fall (Abb. 1).
In der späteren Nacht kann Kaltluft aus dem oberen Tal der Wupper weit talabwärts vordringen. Dabei blockieren sich allerdings Kaltluftströme gegenseitig (in Arrenberg).

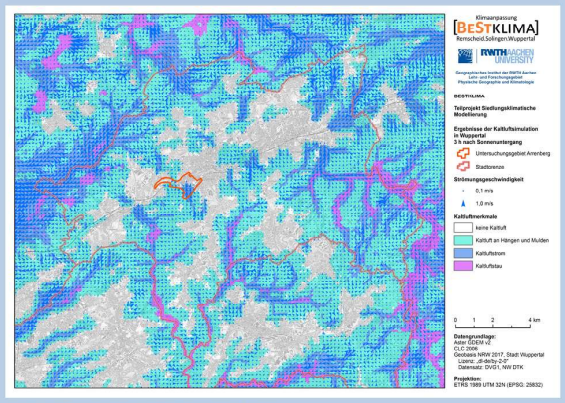


Abb. 1: Kaltluft in Wuppertal (Situation in der frühen Nacht).

Bereiche besonderer Hitzebelastung („Hot-Spots") an heißen Tagen in Wuppertal

In den dicht bebauten und wegen gewerblicher Nutzung auch verbreitet versiegelten Tallagen in Wuppertal bildet sich an Hitzetagen eine großflächige Wärmeinsel aus. Auch wenn städtische Wärmeinseln tagsüber eher schwächer als nachts ausgebildet sind, sind sie Ursache für besondere sommerliche Hitzebelastung. Aufgrund der geringen Höhenlage der Wuppertaler Innenstadt ist das Temperaturniveau recht hoch, die Bereiche mit relativ hoher Temperaturbelastung sind deshalb auch besonders heiß.
Im Untersuchungsgebiet Arrenberg ist das Temperaturniveau – bis auf „Hot-Spots" um Gewerbebetriebe – flächig eher niedriger als im Zentrum von Elberfeld (Abb. 2).

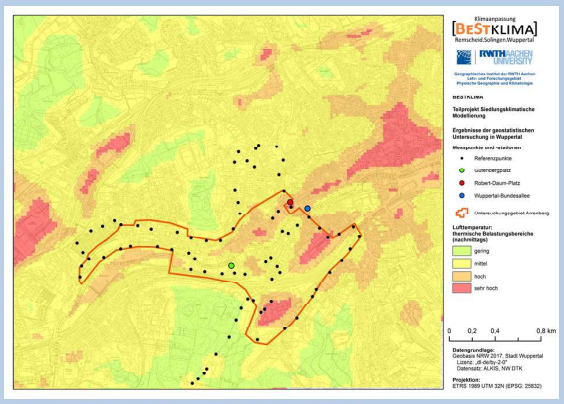


Abb. 2: Hitzebelastung in Wuppertal (zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums).

Kaltluftkonfluenz in Wuppertal

Später in der Nacht (8h nach Sonnenuntergang) strömen große Mengen Kaltluft aus dem oberen Tal der Wupper in die Innenstadt ein, Kaltluftstau im unteren Tal der Wupper bewirkt das gleiche, nur in entgegengesetzter Richtung. In Arrenberg stauen sich die beiden Kaltluftströme (Konfluenz), der Luftaustausch ist dann stark beeinträchtigt (Abb. 3). Dies ergibt sich nicht nur aus Modellrechnungen, sondern auch aus Messdaten der Station Wuppertal-Bundesallee.

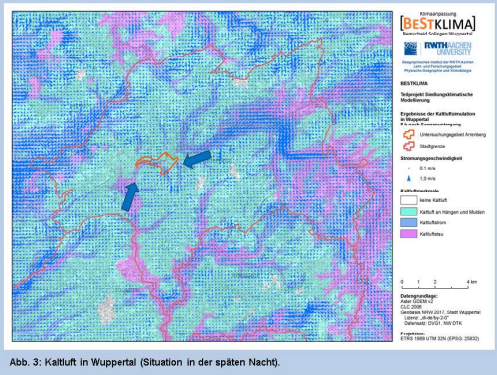


Abb. 3: Kaltluft in Wuppertal (Situation in der späten Nacht).

Detailstudien zur Kaltluft in Wuppertal

Zur Klärung des Kaltluftstaus bei Arrenberg wurde eine hoch aufgelöste Simulation durchgeführt. Diese ergab, dass zahlreiche kleine Seitentäler und Mulden auch Kaltluft produzieren, die aber den Talboden wegen Hindernissen nicht ausreichend erreicht (Abb. 4). Sie haben aber das Potenzial die mit Schadstoffen belastete Stadtluft auszutauschen, bevor sich die beiden großen Kaltluftströme blockieren.

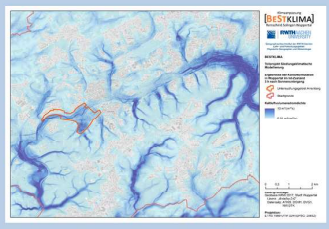


Abb. 4: Hoch aufgelöste Kaltluftsimulation (Situation in der frühen Nacht).

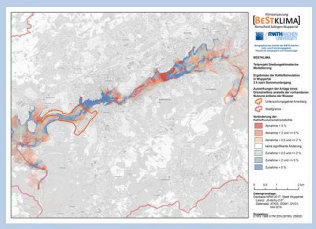


Abb. 5: Veränderung der Kaltluftmenge durch Uferbegrünung.

Mit Hilfe eines weiteren Modellaufs wurde auch die Frage untersucht, ob eine Uferbegrünung der Wupper positive Auswirkungen auf die Luftaustauschsituation und bei Hitzewetterlagen haben kann.
Es zeigte sich, dass eine beidseitige Uferbegrünung von je 5 m lokal durchaus Veränderungen der Kaltluftmenge bewirken kann. Dabei gibt es sowohl Zunahmen (wo mehr Kaltluft hinströmt) als auch Abnahmen (wo Kaltluft wegströmt). Ersteres ist in dichterer Bebauung wie Barmen, Elberfeld und auch Arrenberg der Fall, letzteres zum oberen Tal der Wupper hin und zwischen Barmen und Elberfeld (bei wenig dichter Bebauung; siehe Abb. 5).

Geographisches Institut
RWTH Aachen
Templergraben 55
D-52056 Aachen, Germany
www.rwth-aachen.de

Abb. 4-3: BESTKLIMA – Kernergebnisse für Wuppertal (Poster 2.Bergisches Klimaforum, 29.11.2017)

Quellen

Abenhaim, L. (2005): Lessons from the heat-wave epidemic in France (Summer 2003). Extreme weather events and public health responses. W. Kirch, B. Menne and R. Bertollini. Berlin, Heidelberg, New York, Springer: 161 - 166.

ASTER (2016): ASTER Global Digital Elevation Map Announcement; https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp, Daten für das Untersuchungsgebiet heruntergeladen am 11.2.2016

Bendix, J. (2004): Geländeklimatologie

BMVBS Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2012: StadtKlima - Kommunale Strategien und Potenziale zum Klimawandel - Ergebnisse, Modellprojekte. Ein ExWoSt-Forschungsfeld

Buttstädt, M., Schneider, C. (2014): Thermal Load in a Medium-Sized European City using the Example of Aachen; in: Erdkunde, Vol. 68, No. 2, · 71 – 83

CLIMATE SERVICE CENTER Helmholtz-Gesellschaft (2015): regionaler Klimaatlas Deutschland; abgerufen am 13.1.2015

DWD – Deutscher Wetterdienst (2015): Mittelwerte 30-jähriger Perioden; http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten__kostenfrei%2Fkldat__D__mittelwerte__node.html%3F__nnn%3Dtrue; abgerufen am 13.1.2015)

DWD – Deutscher Wetterdienst (2016): CDC (Climate Data Center); https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html; abgerufen am 16.9.2016)

EEA - European Environment Agency (2005): Vulnerability and adaptation to climate change in Europe; EEA Technical report No 7/2005

EEA – European Environmental Agency (2014): Corine Land Cover 2006 seamless vector data; http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-vector-data-version-2; abgerufen am 19.8.2014

geobasis.nrw (2017a): Geobasisdaten der Vermessungs- und Katasterverwaltung NRW – Digitale Geländemodelle DGM1; https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoehenmodelle/gelaendemodelle/index.html, abgerufen am 25.1.2017

geobasis.nrw (2017b): Geobasisdaten der Vermessungs- und Katasterverwaltung NRW – Digitale Verwaltungsgrenzen DVG1; https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/topographie_sonderkarten/verwaltungsgrenzen/index.html, abgerufen am 24.8.2017

Hamann & Schulte (1999):Fachbeitrag Umwelt zum Flächennutzungsplan der Stadt Remscheid - Erläuterungsbericht

ISB (2013): KlimaschutzTeilkonzept „Anpassung an den Klimawandel für die Städte Solingen und Remscheid“

Jendritzky (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit, DOI: 10.18452/1981, https://edoc.hu-berlin.de/handle/18452/2633, heruntergeladen am 29.12.2017

Jendritzky, G. et al. (1998): Medizinische Klimatologie. Kap. 4,7 Klimaänderungen. In: Chr. Gutenbrunner, G. Hildebrandt (Hrsg.): Handbuch der Balneologie und medizinischen Klimatologie. Berlin: Springer; 589-598Schär, C., G. Jendritzky (2004): Hot news from Summer 2003. news and views. Nature. Vol.432, 2 Dec 2004, 559-5

Jendritzky, G., D. Fiala, G. Havenith, C. Koppe, G. Laschewski, H. Staiger, B. Tinz (2007): Thermische Umweltbedingungen. In: DWD (Hrsg.): Promet 33 (3/4): 83-94).

Kalkstein L.S. (1993): Health and climate change. Direct impacts in cities.; in: Lancet. 1993 Dec 4;342(8884):1397-9.

Kaminski, U., Mebs, D., Amendt, J., Kuch, U., Klimpel, S. (2012): Auswirkungen auf die Gesundheit. In: Klimawandel und Biodiversität– Folgen für Deutschland. Mosbrugger, Volker; Brasseur, Guy; Schaller, Michaela; Stribrny, Bernhard (Hrsg.)

Katzschner, L. (2011): Strategies for Urban Climate and Urban Development under Consideration of the Global Climate Change; Proceedings of City Weathers: Meteorology and Urban Design 1950 – 2010; 23-246.2011; Manchester.

Koppe, C. 2005: Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse., Ber. d. DWD, 226, Offenbach

Klemm, W., B. G. Heusinkveld, S. Lenzholzer, M. H. Jacobs, B. Van Hove (2015): Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summertime in The Netherlands. In: *Building and Environment* 83 (2015): 120-128.

Kuttler, W. (2011a): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen; in: Environmental Sciences Europe, 23:11

Kuttler, W. (2011b): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen; in: Environmental Sciences Europe, 23:21

Kuttler, W., Roßmann, F., Steffens, H. (1993): Stadtklimaanalyse Solingen; im Auftrag der Stadt Solingen, Amt für Umweltschutz

Landeshauptstadt Saarbrücken (2012): Städtische Freiraumplanung als Handlungsfeld für Adaptionsmaßnahmen. Abschlussbericht des Saarbrücker Modellprojektes im Rahmen des ExWoSt-Forschungsprogramms "Urbane Strategien zum Klimawandel - Kommunale Strategien und Potenziale. Saarbrücken.

LANUV Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2010): Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen. LANUV-Fachbericht 27. Recklinghausen.

LANUV (2015): Kühlleistung von Böden, Leitfaden zur Einbindung in stadtklimatische Konzepte in NRW, LANUV-Arbeitsblatt 29, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen 2015

LANUV Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2016a): Messwerte Station Solingen-Wald - alle abschließend validierten Messwerte dieser Station seit Messbeginn; http://opendata.lanuv.nrw.de/abt4/OpenKontiLUQS_SOLI_alt.csv, abgerufen am 5.7.2016

LANUV Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2016b): Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016, LANUV-Fachbericht 74

Larsen, J. (2006): Setting the Record Straight: More than 52,000 Europeans Died from Heat in Summer 2003. Abrufbar unter: http://www.earth-policy.org/plan_b_updates/2006/update56

Lautenschlager et al. 2009 zit. nach Kuttler W., Dütemeyer D., Bent Barlag A. (2013): Steuerungswerkzeug zur städtebaulichen Anpassung an thermische Belastungen im Klimawandel; in: dynaklim-Publikation Nr. 34 / Februar 2013

Leschewski, G.; Jendritzky, G. (2002): Effects of the thermal environment on human health: An investigation of 30 years daily mortality data from SW Germany. In: Climate Research 21, 91-103.

Lohmeyer (2000): Handlungskonzept Klima und Lufthygiene für die Stadt Wuppertal

Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. (2007): Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model; Int J Biometeorol (2007) 51:323–334

Merbitz, H., M. Buttstädt, S. Michael, W. Dott, C. Schneider (2012): GIS-based identification of spatial variables enhancing heat and poor air quality in urban areas. - Applied Geography, 33 (4), 94-106, DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.06.008 .

Müller-BBM (2015) Luftmessbericht Wuppertal, 2014

Munich RE (2012): ; Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, GeoRisikoForschung, NatCatSERVICE – Stand Juli 2012; https://www.munichre.com/de/reinsurance/business/non-life/natcatservice/index.html

MUNLV - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2009): Anpassung an den Klimawandel - Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen

MUNLV - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2010): Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Essen.

MUNLV - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2015): Klimaatlas Nordrhein-Westfalen; http://www.klimaatlas.nrw.de; abgerufen am 13.1.2015

Oberndorfer, E. et al. (2007): Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services; in: BioScience, 57(10):823-833. 2007

PIK - Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2014): Portal KlimafolgenOnline.com; www.klimafolgenonline.com, abgerufen am 4.11.2015

PIK - Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2009): Klimawandel in Nordrhein-Westfalen. Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren. Abschlussbericht des PIK für das MUNLV. Potsdam

Sachsen, T. (2014): Die Wirkung von Vegetation in randstädtischen Kaltluftleitbahnen – Studien zur Kaltluft in Aachen

Sachsen, T., Ketzler, G., Schneider, C. (2012): The reduction of urban heat stress by optimized vegetation structures; Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climates; Dublin.

Sachsen. T., Ketzler, G., Knörchen, A., Schneider, C. (2013): Past and future evolution of nighttime urban cooling by suburban cold air drainage in Aachen; Die Erde, vol 144, no 3-4

Seidel, Jochen; Ketzler, Gunnar; Bechtel, Benjamin; Thies, Boris; Philipp, Andreas; Boehner, Juergen; Egli, Sebastian; Eisele, Micha; Herma, Felix; Langkamp, Thomas; Petersen, Erik; Sachsen, Timo Gerhard ; Schlabing, Dirk; Schneider, Christop (2016)h: Mobile measurement techniques for local and micro-scale studies in urban and topo-climatology; in: Die Erde 147(1), S. 15-39

Scherer, D., Fehrenbach, U., Lakes, T., Lauf, S., Meier, F. und Schuster, C. (2014): Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany; in: Die Erde, Vol. 144, No. 3-4Ketzler, G. (2002): Untersuchungen an Kaltluftströmen in kleinen stadtnahen Tälern; in: Aachener Geographische Arbeiten, Heft 36, S. 21-64Sievers, U. (2008): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21: theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells; in: Berichte des Deutschen Wetterdienstes; 227

Simpson, J.R. & E.G. McPherson (2011): The tree BVOC index; in: Environmental Pollution 159(8-9): 2088-2093

Stadt Remscheid (2016): ALKIS-Daten

Stadt Remscheid (2017): Flächennutzungsplan und ATKIS-Daten (bereitgestellt am 5.4.2017)

Stadt Solingen (2013). Ratsbeschluss zum Klimaschutzteilkonzept Stadt Solingen (2016): ALKIS-Daten

Stadt Wuppertal (2016a): ALKIS-Daten

Stadt Wuppertal (2016b): Messdaten der Station Wuppertal-Bundesallee

Stock, P. (1992): Synthetische Klimafunktionskarte Ruhrgebiet

Umweltbundesamt (2017): Szenarien & Projektionen; http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/klima/klimawandel/klimaszenarien/?L= , abgerufen am 25.7.2017)

VDI Verein Deutscher Ingenieure (2003): VDI Richtlinie 3787 – Umweltmeteorologie – Blatt 5 Lokale Kaltluft

Tabellenanhang

Klimaanpassung [BESTKLIMA] Remscheid.Solingen.Wuppertal

Begleitinformation und Fragebogen zur Passanten-Befragung

Humanbiometeorologische Befragung der Passanten zu ihrem Wohlbefinden an einem Hitzetag

Lieber Teilnehmer, liebe Teilnehmerin,

im Rahmen des Projektes „BESTKLIMA – Klimaanpassung Remscheid-Solingen-Wuppertal“ führt die Arbeitsgruppe des Geographischen Instituts der RWTH Aachen eine Befragung unter Passanten zu deren Wohlbefinden in den Städten Remscheid, Solingen und Wuppertal an besonders heißen Tagen durch.

Das Projekt BESTKLIMA wird in Kooperation des Instituts für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen und der Arbeitsgruppe Klimatologie und Physische Geographie am Geographischen Institut der RWTH Aachen mit den Städten Remscheid, Solingen und Wuppertal sowie der Regionalagentur Bergisches Städtedreieck bearbeitet.

Die Befragung zielt darauf ab, Ihre Wahrnehmung des lokalen Klimas an diesem Ort zu erfahren und anhand der Ergebnisse Empfehlungen an die Stadtentwicklung Ihrer Stadt zu geben. Daher bitten wir Sie, an der Umfrage teilzunehmen und damit die klimagerechte Stadtentwicklung Ihrer Stadt zu unterstützen. Die Umfrage dauert ca. 10 Minuten. Ihre Daten werden anonym behandelt und ausgewertet und nicht an Dritte weitergegeben. Für Fragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Vielen Dank, dass Sie sich Zeit nehmen und an der Befragung teilnehmen!

Kontakt:

Cathrin Werkmeister (M.Sc.)
Geographisches Institut RWTH Aachen
Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geographie und Klimatologie
E-Mail: cathrin.werkmeister@geo.rwth-aachen.de

A Metadaten

Vom Interviewer auszufüllen

1. **Untersuchungsgebiet**
   - ☐ Remscheid - Ostbahnhofsviertel
   - ☐ Solingen - Ohligs
   - ☐ Wuppertal - Arrenberg
2. **Messpunkt**
   - ☐ Blockinnenhof/versiegelte Fläche
   - ☐ Grünanlage
3. **Datum und Uhrzeit der Befragung**

   (A) Datum: _____

   (B) Anfangsuhrzeit: _____
4. **Haltung des Probanden**

   ☐ Stehend ☐ Sitzend
5. **Position des Probanden**

   ☐ Im Schatten ☐ In der Sonne

   ☐ Sonstiges:_____
6. **Bekleidungskombination des Befragten**
   - ☐ Sommerliche Bekleidungskombination (z.B. Unterwäsche, T-Shirt, Shorts, Sandalen)
   - ☐ Wärmere Bekleidungskombination (z.B. Unterwäsche, lange Hose, Pullover, Schuhe)
   - ☐ Sonstiges:_____

B Fragen zur Wahrnehmung des heutigen Wetters

Sehr geehrte/er Teilnehmer/in, in diesem Abschnitt geht es um Ihre Wahrnehmung des heutigen Wetters.

7. **Wie geht es Ihnen heute?**

sehr gut	gut	mittelmäßig	schlecht	sehr schlecht
☐	☐	☐	☐	☐

8. **Wie würden Sie das Wetter heute allgemein beschreiben?**

   (Mehrfachantworten sind möglich)

   ☐ sonniges, schönes Wetter ☐ wolkig ☐ schwül, heiß

   ☐ heiter, leicht bewölkt ☐ trübes, regnerisches Wette ☐ windig

9. Wie nehmen Sie die Sonneneinstrahlung in diesem Moment wahr?

	sehr kalt	kalt	eher kalt	eher warm	warm	sehr warm
(A)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm
(B)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

10. Wie empfinden Sie die Lufttemperatur in diesem Moment?

	sehr kalt	kalt	eher kalt	eher warm	warm	sehr warm
(A)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm
(B)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

11. Wie nehmen Sie die Luftfeuchtigkeit in diesem Moment wahr?

	sehr niedrig	niedrig	eher niedrig	eher hoch	hoch	sehr hoch
(A)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm
(B)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

12. Wie empfinden Sie den Wind in diesem Moment?

	sehr niedrig	niedrig	eher niedrig	eher hoch	hoch	sehr hoch
(A)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm
(B)	☐	☐	☐	☐	☐	☐

C Fragen zur Wetterfühligkeit allgemein

Sehr geehrte/er Teilnehmer/in, in diesem Abschnitt geht es darum, wie Sie im Allgemeinen das Wetter empfinden.

13. Sind Sie wetterfühlig? (z.B. Müdigkeit, Kopfdruck, Schwindel, Schlaf- und Konzentrationsstörungen)

überhaupt nicht	ein bisschen	mittelmäßig	ja, wetterfühlig	ja, sehr wetterfühlig
☐	☐	☐	☐	☐

14. Falls Sie unter chronischen Erkrankungen leiden, leiden Sie besonders unter Hitzeperioden im Sommer?

☐ Ja ☐ Nein ☐ Keine Angabe

15. Nehmen Sie im Sommer Hitze zeitweise als Belastung in dieser Stadt wahr?

☐ Ja
☐ Nein

D Fragen zur Wahrnehmung des Messstandortes

Liebe/er Teilnehmer/in, nun werden Ihnen konkrete Fragen zum Wohlbefinden an diesem Ort gestellt.

16. Wie lange sind Sie heute schon draußen unterwegs?

Geschätzt in Minuten: _____

17. Wie wirkt sich dieser Ort auf ihr Wohlbefinden aus?

sehr angenehm	angenehm	eher angenehm	eher unangenehm	unangenehm	sehr unangenehm
☐	☐	☐	☐	☐	☐

18. Welche Maßnahmen sollten in diesem Stadtteil umgesetzt werden, um die Situation der Bevölkerung bei starker Hitze zu verbessern? *(Mehrfachantworten sind möglich)*

☐ Grün- und Freiflächen
☐ Bäume oder andere Schattenspender
☐ Wasserflächen / Brunnen
☐ Sitzgelegenheiten
☐ Informations-/ Warntafeln
☐ Andere: _____

19. Nehmen Sie klimatische Unterschiede zwischen diesem Ort und der Innenstadt wahr? Empfinden Sie die Sonneneinstrahlung beispielsweise an diesem Ort positiver/negativer im Vergleich zur Innenstadt? *(Bitte ankreuzen)*

	Positiv	**Negativ**	**Kein Unterschied**
Sonneneinstrahlung			
Lufttemperatur			
Luftfeuchtigkeit			

Wind			

E Persönliche Angaben

Liebe/er Teilnehmer/in, zum Schluss möchten wir Sie bitten einige Daten zu Ihrer Person zu beantworten. Außerdem können Sie am Ende dieses Fragebogens gerne ein Feedback zur Befragung und zum Thema geben.

20. Alter:

- ☐ 18 bis 34 Jahre
- ☐ 35 bis 54 Jahre
- ☐ 55 bis 64 Jahre
- ☐ 65 bis 74 Jahre
- ☐ Älter als 75 Jahre
- ☐ Keine Angabe

21. Geschlecht:

- ☐ weiblich
- ☐ männlich

22. Aktueller Wohnort:

- ☐ In einer Stadt in Deutschland, nämlich:_____
- ☐ In einer Stadt im Ausland, nämlich: _____(Stadt)

_____(Land)

23. Ihr Feedback:

Haben Sie noch Anregungen oder möchten Sie ein Feedback zu diesem Thema geben?
Dann notieren Sie

Vielen Dank für Ihre Teilnahme ☺

24. Ende der Befragung (Uhrzeit): _____

Tabelle A 2: Konversionstabelle für Landnutzungen aus ATKIS

BEZEICHNUNG	Objektkennung	OA_GRUPPE	KLAM-Klassen	KLAM-Name	Vers_Grad	Gebäude	Wasser	Wald	Vers_90	Gruen
AX_Gehoelz	43003	Vegetation	3	Wald	0	0	0	1	0	1
AX_Wald	43002	Vegetation	3	Wald	0	0	0	1	0	1
AX_Bahnverkehr	42010	Verkehr	4	halbversiegelte Fläche	50	0	0	0	0	0.5
AX_Bergbaubetrieb	41004	Siedlung	4	halbversiegelte Fläche	50	0	0	0	0	0.5
AX_FlaecheBesondererFur	41007	Siedlung	4	halbversiegelte Fläche	50	0	0	0	0	0.5
AX_Flugverkehr	42015	Verkehr	4	halbversiegelte Fläche	50	0	0	0	0	0.5
AX_Halde	41003	Siedlung	4	halbversiegelte Fläche	50	0	0	0	0	0.5
AX_TagebauGrubeSteinbru	41005	Siedlung	4	halbversiegelte Fläche	50	0	0	0	0	0.5
AX_UnlandVegetationslos	43007	Vegetation	4	halbversiegelte Fläche	50	0	0	0	0	0.5
AX_Weg	42006	Verkehr	4	halbversiegelte Fläche	50	0	0	0	0	0.5
AX_Friedhof	41009	Siedlung	6	Park	0	0	0	1	0	1
AX_Heide	43004	Vegetation	6	Park	0	0	0	1	0	1
AX_Moor	43005	Vegetation	6	Park	0	0	0	1	0	1
AX_SportFreizeitUndErholu	41008	Siedlung	6	Park	0	0	0	1	0	1
AX_Sumpf	43006	Vegetation	6	Park	0	0	0	1	0	1
AX_Wohnbauflaeche	41001	Siedlung	6	Park	0	0	0	1	0	1
AX_Landwirtschaft	43001	Vegetation	7	unversiegelte Fläche	0	0	0	0	0	1
AX_FlaecheGemischterNut	41006	Siedlung	8	versiegelte Fläche	100	0	0	0	1	0
AX_IndustrieUndGewerbef	41002	Siedlung	8	versiegelte Fläche	100	0	0	0	1	0
AX_Platz	42009	Verkehr	8	versiegelte Fläche	100	0	0	0	1	0
AX_Strassenverkehr	42001	Verkehr	8	versiegelte Fläche	100	0	0	0	1	0
AX_Fliessgewaesser	44001	Gewaesser	9	Wasser	0	0	1	0	0	0
AX_StehendesGewaesser	44006	Gewaesser	9	Wasser	0	0	1	0	0	0