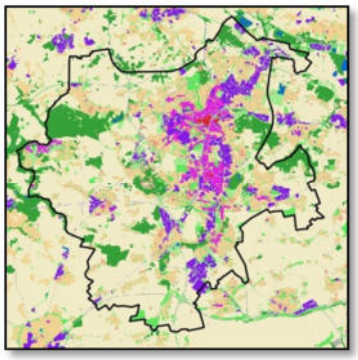
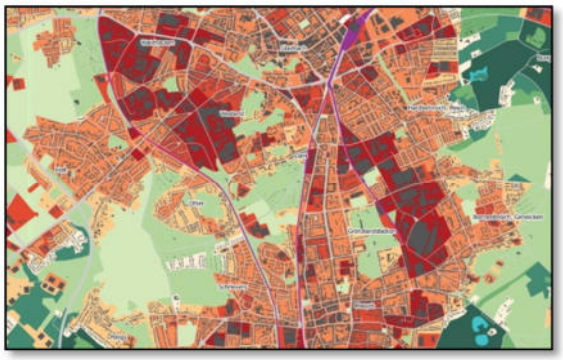
Stadtklimaanalyse Mönchengladbach





Stadt Mönchengladbach
Dezernat Planen, Bauen, Mobilität, Umwelt
Fachbereich Umwelt
41050 Mönchengladbach

Erstellt von:
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover

November 2019

Auftrag:	Stadtklimaanalyse für die Stadt Mönchengladbach
Auftraggeber:	Stadt Mönchengladbach Fachbereich Umwelt 41050 Mönchengladbach
Projektnummer:	2_18_001
Berichtsnummer:	Abschlussbericht_2_18_001_Moenchengladbach_ Stadtklimaanalyse_Rev02
Version:	2
Datum:	14. November 2019
Erstellt von:	Dipl.-Geogr. Elke Hipler
Geprüft von:	Dipl.-Geogr. Harald Kuttig

GEO-NET
Umweltconsulting GmbH

Geschäftsführer:
Dipl.-Geogr. Thorsten Frey
Dipl.-Geogr. Peter Trute

Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover
Germany
Tel. +49 (0) 511 388 72 00
Fax +49 (0) 511 388 72 01

info@geo-net.de
www.geo-net.de

Amtsgericht Hannover
HRB 61218

Hannoversche Volksbank eG
kto. 532 248 000
blz 251 900 01

BIC VOHADE2H
IBAN DE81 2519 0001
0532 2480 00
VAT DE 228892587

Die Erstellung des Gutachtens erfolgte entsprechend dem Stand der Technik nach besten Wissen und Gewissen. Das Gutachten bleibt bis zur Abnahme und Bezahlung alleiniges Eigentum des Auftragnehmers. Die Veröffentlichung bzw. Vervielfältigung und Weitergabe des Gutachtens bzw. von Auszügen oder Ergebnissen an Dritte bedarf des schriftlichen Einverständnisses von GEO-NET Umweltconsulting GmbH.

Inhaltsverzeichnis

Glossar ---------- *V*

1 Ziele und Analyseansatz ---------- *1*

2 Fachliche Grundlagen ---------- *3*

2.1 Der Stadtklimaeffekt ---------- **3**

2.1.1 Autochthone Wetterlagen in Mönchengladbach ---------- 4

2.2 Planungsrechtliche Grundlagen ---------- **5**

3 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse ---------- *7*

3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D ---------- **7**

3.2 Parametrisierung der Eingangsvariablen ---------- **8**

3.3 Betrachtete Wetterlage ---------- **10**

3.4 Eingangsdaten für die Modellrechnung ---------- **11**

3.4.1 Abgrenzung und Bewertung der klimaökologisch wirksamen Nutzungsstrukturen ---------- 15

4 Modellergebnisse ausgewählter Parameter ---------- *17*

4.1 Methode ---------- **17**

4.2 Nächtliches Temperaturfeld ---------- **17**

4.2.1 Theoretische Grundlagen ---------- 17

4.2.2 Nächtliches Temperaturfeld in Mönchengladbach ---------- 18

4.3 Kaltluftströmungsfeld ---------- **21**

4.3.1 Theoretische Grundlagen ---------- 21

4.3.2 Kaltluftströmungsfeld in Mönchengladbach ---------- 21

4.4 Kaltluftvolumenstrom ---------- **23**

4.4.1 Theoretische Grundlagen ---------- 23

4.4.2 Räumliche Verteilung des Kaltluftvolumenstroms in Mönchengladbach ---------- 24

4.5 Thermische Situation am Tage ---------- **26**

4.5.1 Theoretische Grundlagen ---------- 26

4.5.1 Thermische Situation am Tage in Mönchengladbach ---------- 26

5 Klimaanalysekarten ---------- *28*

5.1 Methode ---------- **28**

5.2 Nachtsituation ---------- **28**

5.2.1 Elemente der Klimaanalysekarte Nachtsituation ---------- 28

5.2.2 Die Klimaanalysekarte Nachtsituation für Mönchengladbach ---------- 29

5.3 Tagsituation ---------- **31**

6 Planungshinweiskarten ---------- *34*

6.1 Methode ---------- **34**

6.1.1 Standardisierung der Parameter (z-Transformation) ---------- 34

6.1.2 Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen (Wirkunsgraum) ---------- 35

6.1.3 Bewertung der Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) 36

6.2 Bewertung der klimatischen Situation im Stadtgebiet Mönchengladbach 41

6.2.1 Nachtsituation 41

6.2.2 Tagsituation 43

6.2.3 Schlussfolgerungen 46

7 Die landesweite Klimaanalyse NRW 48

8 Demographische Betroffenheit 52

8.1 Methode 52

8.2 Demographische Betroffenheit: Hitzesensible Bevölkerungsgruppen 52

8.3 Konfliktbereiche / Betroffenheitsanalyse 53

9 Maßnahmen zur Reduktion des Hitzeinseleffektes 57

9.1 Übergeordnete Maßnahmen / Gesamtstädtische Ebene 58

9.1.1 Massnahme 01: Erhalt und Entwicklung von Kaltluftentstehungsgebieten und Kaltluftschneisen 58

9.1.2 Massnahme 02: Erhalt und Entwicklung grossräumiger Grün-, Wald- und Freiflächen 58

9.1.3 Massnahme 03: Vernetzung und Anbindung grüner Infrastruktur 60

9.1.4 Massnahme 04: Erhalt und Schaffung von offenen bewegten Wasserflächen 60

9.2 Lokale Maßnahmen 61

9.2.1 Massnahme 05: Rückbau 61

9.2.2 Massnahme 06: Entsiegelung 61

9.2.3 Massnahme 07: Grüne Parkierung, Verschattung von Parkflächen 62

9.2.4 Massnahme 08: Verschattung von Strassen, Plätzen und Gebäuden 62

9.2.5 Massnahme 09: Neueinrichtung und Erhalt von Pocket-Parks 63

9.2.6 Massnahme 10: Innen- und Hinterhofbegrünung 63

9.2.7 Massnahme 11: Erhöhung der Oberflächen- Albedo (Reflexion) 64

9.2.8 Massnahme 12: Neueinrichtung von erlebbarem Wasser im öffentlichen Raum (z. B. Wasserspielplätze) 64

9.3 Massnahmen an Gebäuden 65

9.3.1 Massnahme 13: Energetische Gebäudesanierung 65

9.3.2 Massnahme 14: Dachbegrünung 66

9.3.3 Massnahme 15: Fassadenbegrünung 66

9.3.4 Massnahme 16: Sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden 67

10 Zusammenfassung und Ausblick 69

Quellenverzeichnis 71

Anhang 74

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Prinzipskizze Flurwind 3
Abbildung 2 Häufigkeit der autochthonen Wetterlagen im Zeitraum 1993 bis 2018 (stündliche Mittelwerte) nach ConWx Reanalysedaten (EMD 2019) 5
Abbildung 3 Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit 9
Abbildung 4 Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle 10
Abbildung 5 Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen 11
Abbildung 6 Anteile der FITNAH-Nutzungskategorien im Untersuchungsgebiet in Prozent 14
Abbildung 7 Nutzungsstruktur in einem Ausschnitt des Untersuchungsgebiets (in der Mitte liegt der Hbf Mönchengladbach) 14
Abbildung 8 Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation 16
Abbildung 9 Nächtliches Temperaturfeld in einem Ausschnitt des Innenstadtbereichs Mönchengladbachs mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen (im Hintergrund: Satellitenbild) 20
Abbildung 10 Nächtliches Strömungsfeld für einem Ausschnitt des Stadtgebiets Mönchengladbachs. Die Strömungspfeile sind aus Gründen der Übersichtlichkeit auf 100 m Rasterweite aggregiert. 22
Abbildung 11 Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom 23
Abbildung 12 Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in einem Ausschnitt des Stadtgebiets. Die Strömungspfeile sind aus Gründen der Übersichtlichkeit auf 100 m Rasterweite aggregiert 25
Abbildung 13 Wärmebelastung am Tage in einem Ausschnitt des Stadtgebiets 27
Abbildung 14 Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungsraum 29
Abbildung 15 Klimaanalysekarte Nachtsituation für einen Ausschnitts des Stadtgebiets 31
Abbildung 16 Flächenanteile der Wärmebelastung am Tage im Siedlungsraum 32
Abbildung 17 Klimaanalysekarte Tagsituation für einen Ausschnitts des Stadtgebiets 33
Abbildung 18 Veranschaulichung der Standardisierung zur Bewertung von Parametern (z-Transformation) 34
Abbildung 19 Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen in der Nacht 39
Abbildung 20 Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen am Tage 41
Abbildung 21 Flächenanteile der Bioklima Kategorien in der Planungshinweiskarte nachts jeweils für Wohnsiedlungsflächen (links) und Gewerbeflächen (rechts) 42
Abbildung 22 Flächenanteile der Bioklima Kategorien in der Planungshinweiskarte tags jeweils für Wohnsiedlungsflächen (links) und Gewerbelächen (rechts) 45
Abbildung 23 Planungshinweiskarten Nacht (links) und Tag (rechts), Ausschnitte 46
Abbildung 24 Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte NRW, Nachtsituation (GEO-NET & Planungsgruppe Umwelt, 2017) 49
Abbildung 25 Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte NRW, Tagsituation (GEO-NET & Planungsgruppe Umwelt, 2017) 50
Abbildung 26 Ausschnitt aus der kombinierten Klimaanalysekarte NRW (Planungshinweiskarte) (GEO-NET & Planungsgruppe Umwelt, 2017) 51
Abbildung 27 Prozentuale Verteilung Altersgruppen in der Bevölkerung der Stadt Mönchengladbach 53
Abbildung 28 Tags bioklimatische ungünstige und sehr ungünstige Siedlungsgebiete (vgl. Planungshinweiskarte Tag) 54
Abbildung 29 Nachts bioklimatische ungünstige und sehr ungünstige Wohngebiete (vgl. Planungshinweiskarte Nacht) 54
Abbildung 30 Gebiete mit hohem Anteil an Kindern und hochaltrigen Bewohnern 55
Abbildung 31 Räumliche Nähe der grünen Erholungsflächen zu Siedlungsflächen 55
Abbildung 32 Konfliktbereiche (`Hot Spots´) im Stadtgebiet Mönchengladbach (im Format DIN A3 im Anhang) 56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung 13
Tabelle 2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004)... 26
Tabelle 3: Einordnung der bioklimatischen Belastung im Siedlungs- und Gewerberaum in der Nacht (Lufttemperatur) und Flächenmittelwert sowie Standardabweichung (sd) der meteorologischen Parameter für die entsprechenden Flächen im Stadtgebiet Mönchengladbachs. 35
Tabelle 4: Einordnung der bioklimatischen Belastung im Siedlungs- und Gewerberaum am Tage (PET) und Flächenmittelwert sowie Standardabweichung (sd) der meteorologischen Parameter für die entsprechenden Flächen im Stadtgebiet Mönchengladbachs. 36
Tabelle 5: Einordnung des Kaltluftvolumenstroms (z-Transformation) 37
Tabelle 6: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise. 42
Tabelle 7: Flächenanteile bioklimatische Bedeutung der Grünareale im Stadtgebiet in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise. 43
Tabelle 8: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete am Tage und abgeleitete Planungshinweise 44
Tabelle 9: Flächenanteile bioklimatische Bedeutung der Grünareale im Stadtgebiet am Tage und abgeleitete Planungshinweise. 46
Tabelle 10: Vergleich der bioklimatischen Situation tags und nachts für exemplarische Stadtteile 47
Tabelle 11: Maßnahmen zur Reduktion des Hitzeinseleffektes. 57
Tabelle 12: Größe, Umgebung, Kühleffekt und thermische Reichweite städtischer Grünflächen (nach Kuttler, 2011. Verändert) 59

Glossar

Albedo: Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

Allochthone Wetterlage: Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert.

Ausgleichsraum: Grüngeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

Autochthone Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen (geringe bis keine Wolkenbedeckung), die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können.

Autochthones Windfeld: Strömungen, deren Antrieb im Betrachtungsgebiet selber liegt und die nicht durch großräumige Luftdruckgegensätze beeinflusst werden, z.B. → *Kaltluftabflüsse* und → *Flurwinde*, die sich als eigenbürtige, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen → *autochthonen Wetterlage* ausbilden.

Bioklima: Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).

FITNAH: Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenis Heat Sources. FITNAH als dreidimensionales nichthydrostatisches Modell erlaubt eine detaillierte Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der verschiedenen meteorologischen Parameter wie Wind und Temperatur. FITNAH wurde als das „Deutsche Regionale Klimamodell“ ausgewählt und übertrifft die in der VDI-RL 3783 festgelegten Anforderungen. Es liefert auch die Möglichkeit, Bewertungsmaßstäbe für die ansonsten eigene Modellanwendungen notwendig wären, zu berechnen (z. B. PET, PMV).

Flurwind: Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

Grünfläche: Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete

Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

Kaltluftabfluss: Flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auftretende Kaltluftabflüsse. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Der Abfluss erfolgt schubweise. Er setzt bereits vor Sonnenuntergang ein und kann die ganze Nacht andauern.

Kaltlufteinwirkbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung (Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen → *Kaltluftvolumenstrom* durchflossen werden; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

Kaltluftentstehungsgebiete: Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen → *Kaltluftvolumenstrom*, die → *Kaltluftleitbahnen* speisen (→ *Flurwinde* zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen..

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden → *Kaltluftentstehungsgebiete* (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Beinhalten thermisch induzierte Ausgleichströmungen sowie reliefbedingte → *Kaltluftabflüsse*.

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft* in der Einheit m³, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

Kelvin (K): SI-Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur, die zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet wird. Der Wert kann in der Praxis als Abweichung in Grad Celsius (°C) interpretiert werden.

Klimaanalysekarte: Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht sowie am Tage im Stadtgebiet und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

PET (Physiologisch äquivalente Temperatur)**:** Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

Planungshinweiskarte: Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* für die Tag- und die Nachtsituation und Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

Städtische Wärmeinsel (*Urban Heat Island*)**:** Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

Strömungsfeld: Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der → *Flurwinde* in 2 m über Grund während einer → *autochthonen* Wetterlage.

Strukturwind: Kleinräumiges Strömungsphänomen, das sich zwischen strukturellen Elementen einer Stadt ausbildet (bspw. zwischen einer innerstädtischen → *Grünfläche* und der Bebauung entlang einer angrenzenden Straße).

Wirkungsraum: Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Siedlungs- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

z-Transformation: Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschließend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.

1 Ziele und Analyseansatz

Die Stadt Mönchengladbach hat die GEO-NET Umweltconsulting GmbH in Kooperation mit Prof. Dr. G. Gross (Leibnitz Universität Hannover) mit der Durchführung einer Stadtklimaanalyse beauftragt. Zentrale Aufgabe dieser Klimaanalyse ist die flächendeckende Untersuchung der klimatischen Situation im Stadtgebiet von Mönchengladbach sowie die Identifikation von Belastungsräumen (Wirkräumen) und Ausgleichsräumen. Das Schutzgut *Klima* ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas, die dadurch mitbestimmte lufthygienische Situation und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und auch die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

Als Grundlage für die Analyse und Bewertung der siedlungsklimatischen Zusammenhänge dienen die modellierten meteorologischen Parameter der Klimaanalyse. Methodischer Ausgangspunkt für die Analyse der klimaökologischen Funktionen ist die Gliederung der Stadtfläche in drei Raumkategorien:

- größtenteils bioklimatisch belastete Siedlungsräume (**Wirkräume**)
- Kaltluft produzierende, unbebaute und vegetationsgeprägte Flächen (**Ausgleichsräume**)
- Luftaustauschprozesse, welche allein thermisch („Flurwindsystem“) oder thermisch-orographisch angetrieben (Kaltluftabfluss, „Berg-Talwindsystem“) sein können und teils erhebliche Entfernungen überbrückend Wirk- und Ausgleichsräumen miteinander verbinden (**Kaltluftleitbahnen**).

Aus dieser Untergliederung in Wirk- und Ausgleichsräume sowie verbindende Strukturen ergibt sich ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges, welches kartographisch in Form der **Klimaanalysekarten** (Tag- und Nachtsituation) abgebildet ist. Anschließend wurden in einem weiteren Schritt die Empfindlichkeiten dieser Funktionen/Räume gegenüber strukturellen Veränderungen bewertet und in Form von **Planungshinweiskarten** (Tag- und Nachtsituation) dargestellt. Die Umsetzung in raumspezifische klimaökologische Qualitätsziele mündet in der Forderung nach Handlungsempfehlungen. Durch konkrete Zuordnung planungsrelevanter Aussagen zu den wichtigen, das klimaökologische Prozessgeschehen steuernden Strukturelementen wie z. B. Kaltluftentstehungsflächen können Flächen benannt werden, die in ihrem Bestand gesichert und vor negativen Einflüssen geschützt werden sollen. Andererseits werden Belastungsräume mit einem Mangel an Durchlüftung identifiziert, welche mithin sanierungsbedürftig sind. Dieses Vorgehen unterscheidet sich damit von der früher verbreiteten – und sich im Wesentlichen auf die VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 stützenden – statischen Betrachtung auf der Basis von Klimatopen, in welchen ein, den unterschiedlichen Nutzungen entsprechendes, einheitliches Mikroklima unabhängig von der Lage des Klimatops angenommen wird (VDI 2015). Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung eingesetzte Methode bietet den Vorteil, dass das Luftaustauschgeschehen und die Verhältnisse der bodennahen Atmosphäre umfassend abgebildet werden. Somit liegt eine räumlich hochauflösende Information und Bewertung der klimaökologischen Gegebenheiten sowohl für die Nacht- als auch für die Tag-Situation vor, welche für die verschiedenen Planungsebenen/-träger bereitgestellt werden. Eine Betroffenheitsanalyse anhand von Bevölkerungsstatistiken zeigt anschließend, wo die empfindlichen Gebiete („Hot Spots“) liegen, in denen empfindliche Bevölkerungsgruppen auf besonderen Hitzestress treffen. Im Anschluss wird ein Katalog mit konkreten Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Erhalt des thermischen Komforts sowie Reduzierung von Hitzestress während hochsommerlichen Extremsituationen dargestellt.

Im Jahr 2017 entstand im Auftrag des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW die landesweite Klimaanalyse (LANUV 2018 sowie GEO-NET & Planungsgruppe Umwelt 2017). In einer Rasterauflösung von 100 m x 100 m wurden unter Verwendung des mesoskaligen Modells FITNAH (vgl. Glossar) Klimaparameter für die Tag – und die Nachtsituation berechnet.

In der vorliegenden Klimaanalyse basieren die Untersuchungen dagegen auf einer Modell-Rasterauflösung von 25 m x 25 m. Somit ist diese Analyse um ein 16-faches detaillierter als die landesweite Klimaanalyse NRW. Während in letzterer der Fokus auf überörtlichen, überregionalen Prozessen und Funktionen lag, dient die Stadtklimaanalyse Mönchengladbach der Untersuchung sowie Bewertung bioklimatischer Zusammenhänge auf lokaler Ebene (bis hin zu einzelnen Baublöcken). Eine Einordnung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung in die landesweite Klimaanalyse geschieht in Kapitel 7.

2 Fachliche Grundlagen

2.1 DER STADTKLIMAEFFEKT

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 1973). Gründe hierfür sind bspw. der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenüber steht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion der Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als *Städtische Wärmeinsel* bezeichnet.

Solch belastenden Situationen entstehen vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen und sind durch einen ausgeprägten Tagesgang der Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt (autochthone Wetterlagen). Durch lokal unterschiedliche Abkühlungsraten entstehen Temperatur- und damit Dichteunterschiede, die Ausgleichsströmungen hervorrufen (Flurwinde; Abbildung 1) (DFG 1988).

Unter diesen Rahmenbedingungen kommt es tagsüber zu einem konvektiven Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper. Als Folge des entstehenden bodennahen Tiefdruckgebietes treten Ausgleichsströmungen in Form eines bodennahen Zuströmens von Luft aus dem Umland über gering bebaute Flächen hin zum Stadtgebiet auf. Das Aufsteigen von Warmluftblasen verursacht zusätzlich eine Böigkeit der bodennah nachströmenden Luft, sodass die Ausgleichsströmungen am Tage weniger sensibel auf Strömungshindernisse reagieren als in der Nacht. Während der Tagsituation führen sie aufgrund eines meist ähnlichen Temperaturniveaus im Umland nicht zum Abbau von Wärmebelastungen in den Siedlungsflächen, tragen aber zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht und damit zur Verdünnung von Luftschadstoffen bei.

In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen dagegen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagerte Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld. Während der nächtlichen Abkühlung fließt kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und ggf. innerstädtischen Grün- bzw. Freiflächen in das wärmere Stadtgebiet ein. Da der bodennahe Zustrom mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt, kann dieser Luftaustausch nur entlang von Flächen ohne blockierende Strömungshindernisse erfolgen, insbesondere über sogenannten Kaltluftleitbahnen.

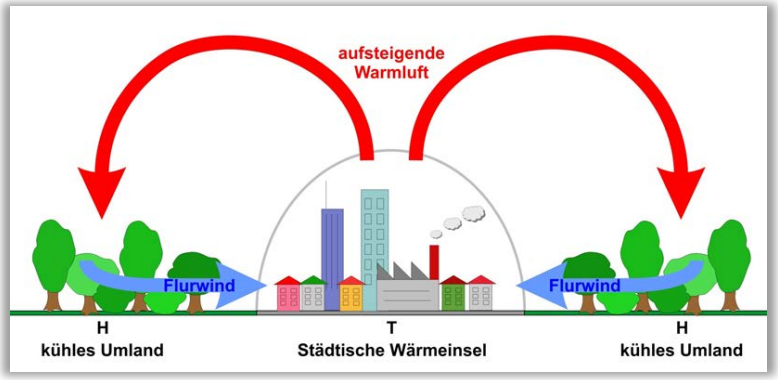


Abbildung 1 Prinzipskizze Flurwind

Neben der vom Menschen freigesetzten Abwärme, kommt es durch den hohen Versiegelungsgrad zu einer Erwärmung des Stadtgebietes. Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei städtischen, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Beton und Asphalt besitzen eine geringe Albedo[1], sodass viel Strahlung absorbiert wird und sich die Flächen am Tag stark aufwärmen. In der Nacht kann die gespeicherte Wärme als langwellige Ausstrahlung an die Atmosphäre abgegeben werden (Häckel 2012, Malberg 2002). Aufgrund der starken Versiegelung und geringeren Wasserverfügbarkeit ist der Energieverbrauch zur Verdunstung herabgesetzt, sodass der latente Wärmestrom in der Stadt geringer, der fühlbare Wärmetransport dagegen höher ausfällt. Beide Aspekte haben höhere Temperaturen des Stadtgebiets im Vergleich zum Umland zur Folge (Schönwiese 2008), sodass deren Bevölkerung einer größeren thermischen Belastung ausgesetzt ist.

Verkehr, Industrie und Hausbrand bewirken nicht nur einen anthropogenen Wärmefluss, sondern führen auch zu vermehrten Emissionen. Entsprechend weist die Luft in der Stadt erhöhte Verunreinigungen durch Schadstoffe und Staub auf, die sich negativ auf die Gesundheit des Menschen auswirken können. Da die Windgeschwindigkeiten in der Stadt in der Regel herabgesetzt sind, kann kein ausreichender Luftaustausch stattfinden, um die Luftqualität merklich zu verbessern (Kuttler 2009).

Dies erklärt die Notwendigkeit der Betrachtung des Stadtklimas, insbesondere da ein Großteil der Bevölkerung in Städten wohnt und demzufolge Belastungen so gering wie möglich gehalten werden sollten, um gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse sicherzustellen.

Das vorliegende Gutachten untersucht die Strömungsverhältnisse einer autochthonen Sommernacht (vgl. Glossar). Diese ist mit einer *stark stabilen* Schichtung zu vergleichen, doch wird kein übergeordneter Wind berücksichtigt. Somit wird das Strömungsfeld durch die lokalen Gegebenheiten hervorgerufen (Flurwinde, Kaltluftabflüsse). Stadtplanerische Maßnahmen vermögen am ehesten das Prozessgeschehen während autochthoner Wetterlagen zu beeinflussen, sodass deren Kaltlufthaushalt Grundlage für die Ausweisung von Kaltluftleitbahnen ist. Übergeordnete Strömungen verhindern die Ausbildung eines autochthonen Klimas, wirken aber ebenfalls auf das Stadtklima und können in Bezug auf die Luftreinhaltung eine wichtige Rolle bei der Durchlüftung einer Stadt spielen. Planerisch lassen sich diese weniger beeinflussen, doch sollte dafür gesorgt werden, dass Belüftungsachsen aus den Hauptanströmungsrichtungen – in Mönchengladbach insbesondere aus Südwesten bis Westen – in das Stadtgebiet bestehen bleiben.

2.1.1 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN IN MÖNCHENGLADBACH

Um die Häufigkeit von autochthonen Wetterlagen für das Kerngebiet Mönchengladbachs zu untersuchen, wurden ConWx-Daten verwendet. Diese sind von EMD in Kooperation mit ConWx ApS entwickelt worden (EMD, 2019). Dabei handelt es sich um stündliche Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie Wolkenbedeckungsgrad aus einem Wettermodell für West- und Zentraleuropa, das durch die ERA-Interim Reanalysedaten des European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) angetrieben wird. Die Auflösung des Modells beträgt 0,03° x 0,03° Breitengrad/Längenrad, was für Deutschland im Mittel einer Auflösung von etwa 3,3 km x 2,1 km Nord-Süd/West-Ost entspricht. Verwendete Kriterien für eine autochthone Wetterlage sind hier eine Windgeschwindigkeit von < 2,7 m/s und ein Bedeckungsgrad von < 1/8. In der folgenden Abbildung (Abbildung 2) ist die Häufigkeit des Auftretens solch einer Wetterlage für jeden Monat dargestellt. In den Sommermonaten Juni bis August treffen diese Wetterlagen am ausgewerteten Koordinatenpunkt im Zentrum Mönchengladbachs in ca. 21 bis 26 % der Zeiträume auf.

[1] Rückstrahlvermögen einer Oberfläche

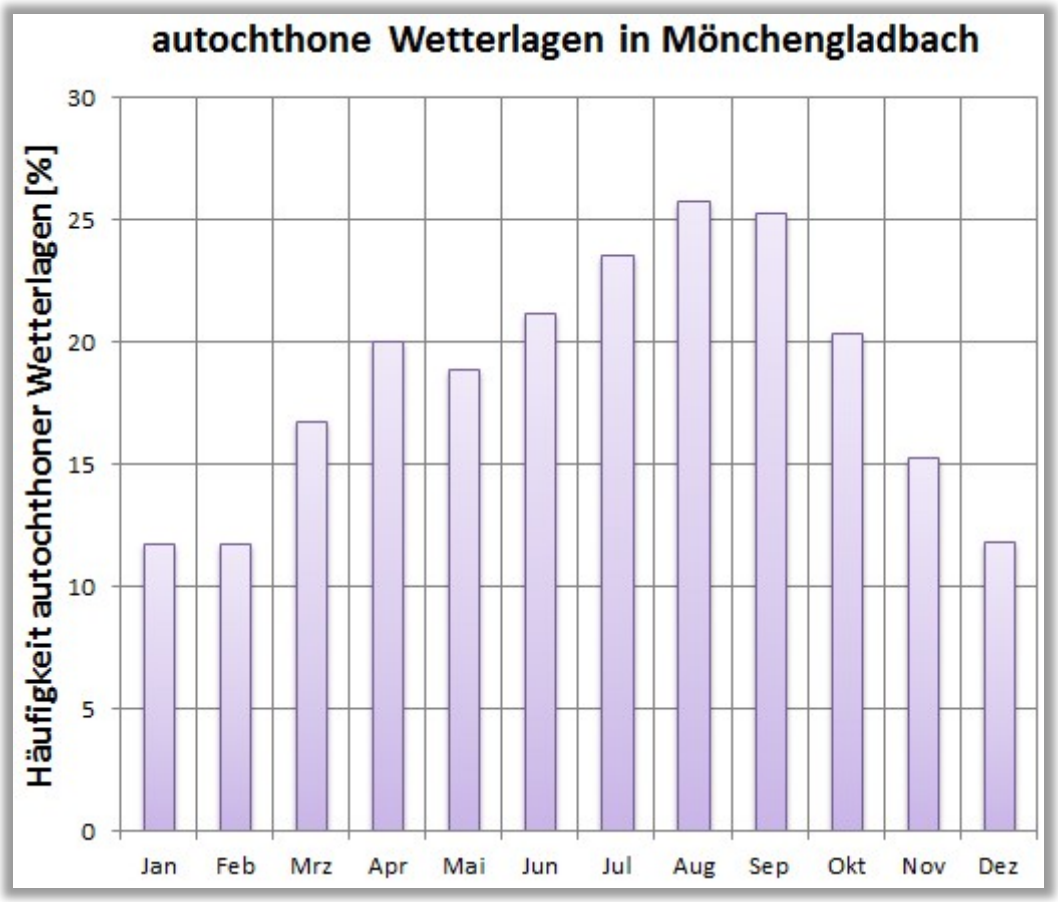


Abbildung 2 Häufigkeit der autochthonen Wetterlagen im Zeitraum 1993 bis 2018 (stündliche Mittelwerte) nach ConWx Reanalysedaten (EMD 2019)

2.2 PLANUNGSRECHTLICHE GRUNDLAGEN

Mit dem *Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung in den Städten und Gemeinden* im Jahr 2011 sind die Belange von Klimaschutz und Klimaanpassung in der Bauleitplanung gestärkt (Novellierung des Baugesetzbuchs (BauGB)) und nun ausdrücklich zu einer Aufgabe der Bauleitplanung nach § 1 (5) BauGB erklärt worden: „Die Bauleitpläne sollen […] dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den **Klimaschutz und die Klimaanpassung**, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern […].“ Zusätzlich heißt es in § 1a (5) BauGB: „Den Erfordernissen des Klimaschutzes soll sowohl durch Maßnahmen, die dem **Klimawandel** entgegenwirken, als auch durch solche, die der **Anpassung an den Klimawandel** dienen, Rechnung getragen werden.“

In **Flächennutzungsplänen** (FNP; vorbereitende Bauleitplanung) können z.B. Anlagen, Einrichtungen und sonstige Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, dargestellt werden (§ 5 (2) S. 2c BauGB). So bietet sich durch den FNP bspw. die Möglichkeit der Sicherung von Freiflächen, die der Kaltluftproduktion dienen, sowie von Frischluftbahnen und Ventilationsbahnen. In FNP wird vor allem das mesoskalige Klima betrachtet (räumliche Auflösung der Karten ca. 25 m bis 100 m), während in **Bebauungsplänen** (B-Plan; verbindlichen Bauleitplanung) das Mikroklima in den Vordergrund rückt (ca. 2 m bis 10 m; VDI 2015). Nach § 8 (2) sind B-Pläne aus dem FNP zu entwickeln, sodass die dort getroffenen Regelungen berücksichtigt werden müssen. B-Pläne bieten u.a. über folgende Festsetzungen die Möglichkeit stadtklimatischen Anforderungen zu begegnen (vgl. § 9 (1) BauGB):

- Gebäudekörperstellung und Maß der baulichen Nutzung (u.a. Grundflächenzahl, Geschoßflächenzahl, Zahl der Vollgeschosse bzw. Höhe der baulichen Anlage), jeweils auch mit dem Ziel klimarelevante Luftströmungen zu unterstützen und Belüftungsachsen zu sichern
- Öffentliche und private Grünflächen (Parkanlagen, Kleingärten, Sport-, Spielplätze, Friedhöfe, etc.)
- Begrünung von Straßenzügen, Parkplätzen und Gleistrassen
- Anpflanzen bzw. Erhalt von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen
- Dach- und Fassadenbegrünung

Ein weiteres Steuerungsinstrument ist die Erstellung von **Grünordnungsplänen** (GOP). Eine rechtliche Verpflichtung zur Aufstellung von GOP gibt es nicht, doch können ihre Inhalte durch die Integration in B-Pläne Rechtsverbindlichkeit erlangen. GOP ergeben sich aus dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), in dem auf die klimatische Wirkung der Landschaft verwiesen wird: „Zur dauerhaften Sicherung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts sind insbesondere Luft und Klima auch durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege zu schützen; dies gilt insbesondere für Flächen mit günstiger lufthygienischer oder klimatischer Wirkung wie Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete oder Luftaustauschbahnen […]“ (§ 1 (3) S. 4 BNatSchG).

Eine Verbesserung der bioklimatischen Situation in Städten kann auch per **Luftreinhalteplan** erreicht werden. Die dort festgesetzten Maßnahmen müssen laut §42 Abs. 2 BImSchG „einen integrierten Ansatz zum Schutz von Luft, Wasser und Boden verfolgen“. Indirekt sind dadurch positive Auswirkungen auf das Stadtklima möglich. Frischluftschneisen können geschützt werden. Diese sorgen nicht nur für eine gute Durchlüftung und möglichst schnellen Abtransport von Schadstoffen, sondern können auch als Kaltluftleitbahnen dienen oder zumindest kleinräumig gesteigerten Kaltluftaustausch begünstigen.

Nach § 11 (1) BauGB können Gemeinden insbesondere zur Vorbereitung und Durchführung städtebaulicher Maßnahmen durch einen Vertragspartner **städtebauliche Verträge** schließen. Diese können ein geeignetes Mittel zur Umsetzung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen in der Bauleitplanung sein, sofern sie frühzeitig in dem öffentlich-rechtlichen Vertrag vereinbart werden. Im Zuge der **Stadtsanierung** sind auch **informelle Planungsinstrumente** wie ein **städtebaulicher Rahmenplan** denkbar (§ 140 BauGB), um städtebauliche Vorgaben und Ziele zum Klima zu definieren.

Mit der anstehenden Novellierung des *Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung* (UVPG) finden die Belange des Klimaschutzes und der Klimaanpassung verstärkt Eingang in die **Umweltverträglichkeitsprüfung** (UVP) als übergeordnetes umweltpolitisches Instrument.

3 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse

3.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH 3D

Die vorliegende Klimaanalyse verwendet das mesoskalige Modell FITNAH, mit dessen Hilfe die relevanten meteorologischen Variablen numerisch berechnet und in einem entsprechend zu definierenden Raster repräsentativ darstellt werden. Die Grundlagen dieses Modells sowie eine detaillierte Beschreibung von FITNAH ist der entsprechenden Fachliteratur zu entnehmen (Groß 1993). Nachfolgend werden lediglich die wichtigsten Rahmenbedingungen erläutert. Die Modellergebnisse liegen als punkthafte Daten in einem regelmäßigen Gitter vor. Diese Werte werden im GIS per zonaler Statistik auf geeignete Referenzflächen transformiert (vgl. Kapitel 5). Für eine Bewertung und Kategorisierung der Ergebnisse bedarf es einer Standardisierung nach geltenden Richtlinien (vgl. Kapitel 6).

Neben globalen Klimamodellen und regionalen Wettervorhersagemodellen wie sie zum Beispiel vom Deutschen Wetterdienst für die tägliche Wettervorhersage routinemäßig eingesetzt werden, nehmen kleinräumige Modellanwendungen für umweltmeteorologische Zusammenhänge im Rahmen von stadt- und landschaftsplanerischen Fragestellungen einen immer breiteren Raum ein. Die hierfür eingesetzten mikro- bis mesoskaligen Modelle erweitern das Inventar meteorologischer Werkzeuge zur Berechnung atmosphärischer Zustände und Prozesse.

Der Großteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Größenordnung einer Stadt oder einer Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von einigen Metern bis hin zu Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis hin zu Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene werden diese in die Meso- und Mikroskala eingeordnet. Beispiele für mesoskalige Phänomene sind der Einfluss orographischer Hindernisse auf den Wind wie Kanalisierung und Umströmungseffekte, Land-See-Winde, Flurwinde, sowie das Phänomen der urbanen Wärmeinsel. Beispiele für mikroskalige Effekte sind u. a. kleinräumige Düseneffekte in Straßenschluchten, Verwirbelungen in Innenhöfen und Luv-Lee-Effekte an linienhaften Gehölzstrukturen (Hecken) aber auch die klimaökologischen Auswirkungen von Begrünungsmaßnahmen.

Das mesoskalige Modell FITNAH ist in der Lage aufwändige und oft wenig repräsentative Messkampagnen zu ersetzen, indem es physikalisch fundiert die räumlichen oder zeitlichen Lücken zwischen bekannten und zur Modell-Kalibrierung verwendeten Messungen schließen kann. Dazu berechnet es Wind- und Temperaturfelder sowie weitere meteorologische Größen in ihrer raumfüllenden Struktur.

Für jede meteorologische Variable wird eine physikalisch fundierte mathematische Berechnungsvorschrift aufgestellt. Alle mesoskaligen Modelle und damit auch FITNAH basieren daher, genauso wie Wettervorhersage- und Klimamodelle auch, auf einem Satz sehr ähnlicher Bilanz- und Erhaltungsgleichungen. Das Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (*Navier-Stokes Bewegungsgleichung*), der Massenerhaltung (*Kontinuitätsgleichung*) und der Energieerhaltung (*1. Hauptsatz der Thermodynamik*).

Je nach Problemstellung und gewünschter Anwendung kann dieses Grundgerüst noch erweitert werden um z. B. die Effekte von Niederschlag auf die Verteilung der stadtklimatologisch wichtigen Größen zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel gelöst werden. Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt in einem numerischen Raster. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom mesoskaligen Modell erfasst werden können. Je feiner das Raster gewählt wird, umso mehr Details und Strukturen werden aufgelöst.

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH 3D verwendete räumliche Maschenweite 25 m. Die vertikale Gitterweite ist dagegen nicht äquidistant d. h. die jeweilige vertikale Ausdehnung von sich überlagernden Rasterzellen ist variabel. So sind hier die Rechenflächen in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Parameter möglichst realitätsnah zu erfassen. Die untersten Rechenflächen liegen in Höhen von 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80 und 100 m über Grund. Nach oben hin wird der Abstand (Δz) zunehmend größer, wobei die Modellobergrenze in einer Höhe von 3000 m über Grund liegt. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich unter der gegebenen Fragestellung auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m über Grund = Aufenthaltsbereich des Menschen).

3.2 PARAMETRISIERUNG DER EINGANGSVARIABLEN

Das mesoskalige Modell FITNAH berechnet alle meteorologischen Variablen als repräsentative Werte für das entsprechende Raster. Mit der Rasterweite wird somit auch die Dimension der räumlich noch auflösbaren Strukturen festgelegt. Typische Rasterweiten sind 25 m x 25 m bis 1.000 m x 1.000 m. Sie decken damit in etwa den Maßstabsbereich von 1:20.000 bis 1:100.000 ab und entsprechen somit den Planungsebenen der Flächennutzungsplanung bzw. der Regionalplanung. Sind vorhandene Strukturen von ihrer räumlichen Ausprägung her kleiner als die Rasterweite, ist das Modell nicht in der Lage diese zu berechnen (beispielsweise können einzelne Wolken in globalen Klimamodellen nicht berechnet werden). Ist nun aber bekannt, dass solche vom Modell nicht erfassbaren Strukturen relevante Auswirkungen auf die lokalklimatischen Größen haben, die berechnet werden sollen, so müssen derartige Strukturen gleichwohl in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit ist dabei die Darstellung der summarischen Effekte der nicht aufgelösten Strukturen durch die vom Modell berechneten Variablen (Parametrisierung).

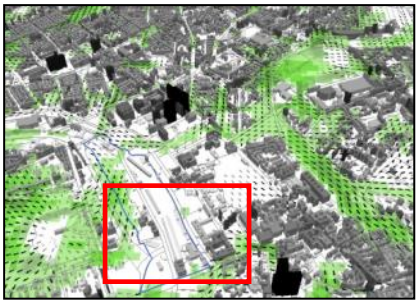
Die beiden wichtigsten derart fein aufgelösten Strukturen, welche bei stadtklimatischen Fragestellungen berücksichtigt werden müssen, sind einzelne Gebäude und der Baumbestand. Diese sind in ihrer räumlichen Ausdehnung so klein, dass sie üblicherweise durch das gewählte Rechengitter nicht erfasst werden können und somit parametrisiert werden müssen. In bebautem Gelände wirken einzelne Gebäude als Strömungshindernis und verzögern diese. Lokal kann es zwar durch Düseneffekte auch zu einer Beschleunigung des Windes kommen, in der summarischen Betrachtung über eine Gebäude beinhaltende Rasterzelle überwiegt indes die Verlangsamung der Strömung. Gleichzeitig wird durch die Vielzahl der unterschiedlichen Strömungshindernisse die Turbulenz verstärkt. Darüber hinaus wird auch die Temperaturverteilung in starkem Maße modifiziert, da die in die bodennahe Atmosphäre ragenden Baukörper bis zur mittleren Bauhöhe in einem Wärmeaustausch mit der Umgebung stehen. Die Temperatur wird durch die gebäudespezifischen Parameter wie Gebäudehöhe, Überbauungsgrad oder anthropogen Abwärme bestimmt und damit das Temperaturfeld der bodennahen Atmosphäre bis in die mittlere Höhe der Bebauung modifiziert (Grundlagen und Beschreibung: Groß 1989).

Diese Effekte können in Ermangelung einer detaillierten Erfassung jedes einzelnen Gebäudes über einen Porositätsansatz berücksichtigt werden. Einzelne Gebäude füllen nur einen Anteil des Volumens aus, welches durch das horizontale Raster und die Anordnung der Rechenflächen in der Vertikalen aufgespannt wird. Dieses Verhältnis bestimmt dann die Porosität einer jeden Rasterzelle (Abbildung 3). Das

Rastervolumen kann folglich nur noch zu einem durch die Porosität definierten Anteil durchströmt werden, wobei die Porosität innerhalb des Raster-Körpers als gleichmäßig verteilt angenommen wird.

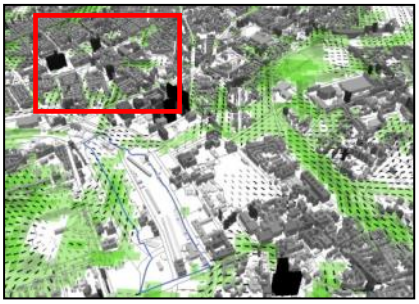
Lockere Bebauung

- Große Porosität
- Höhere Windgeschwindigkeit



Dichte Bebauung

- Kleine Porosität
- Geringere Windgeschwindigkeit



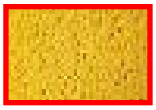


Abbildung 3 Einfluss der Bebauungsdichte auf die Strömungsgeschwindigkeit

Eine Strömung ist nur noch in den offenen Poren möglich, was für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit eine deutliche Verlangsamung aufgrund von Staueffekten und Reibung bedeutet. Ein vorhandener Baumbestand kann über die Baumhöhe, die Bestandsdichte und die Baumart charakterisiert werden. Auch diese Bestandsstrukturen sind in der Regel so klein, dass sie nicht vom Raster des Modells aufgelöst werden können und damit parametrisiert werden müssen. Eine solche Parametrisierung muss in der Lage sein, die Windberuhigung im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im oberen Kronenraum und die nächtliche Abkühlung bzw. die mittägliche Erwärmung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit Beobachtungen zu erfassen (Abbildung 4). Bei FITNAH werden zusätzliche Terme in das Gleichungssystem eingeführt, die zum einen über einen Widerstandsterm die Modifizierung des Windfeldes gewährleistet und zum anderen den Strahlungshaushalt im Bereich eines Baumbestandes modifiziert (Grundlagen und Beschreibung: Groß 1993).

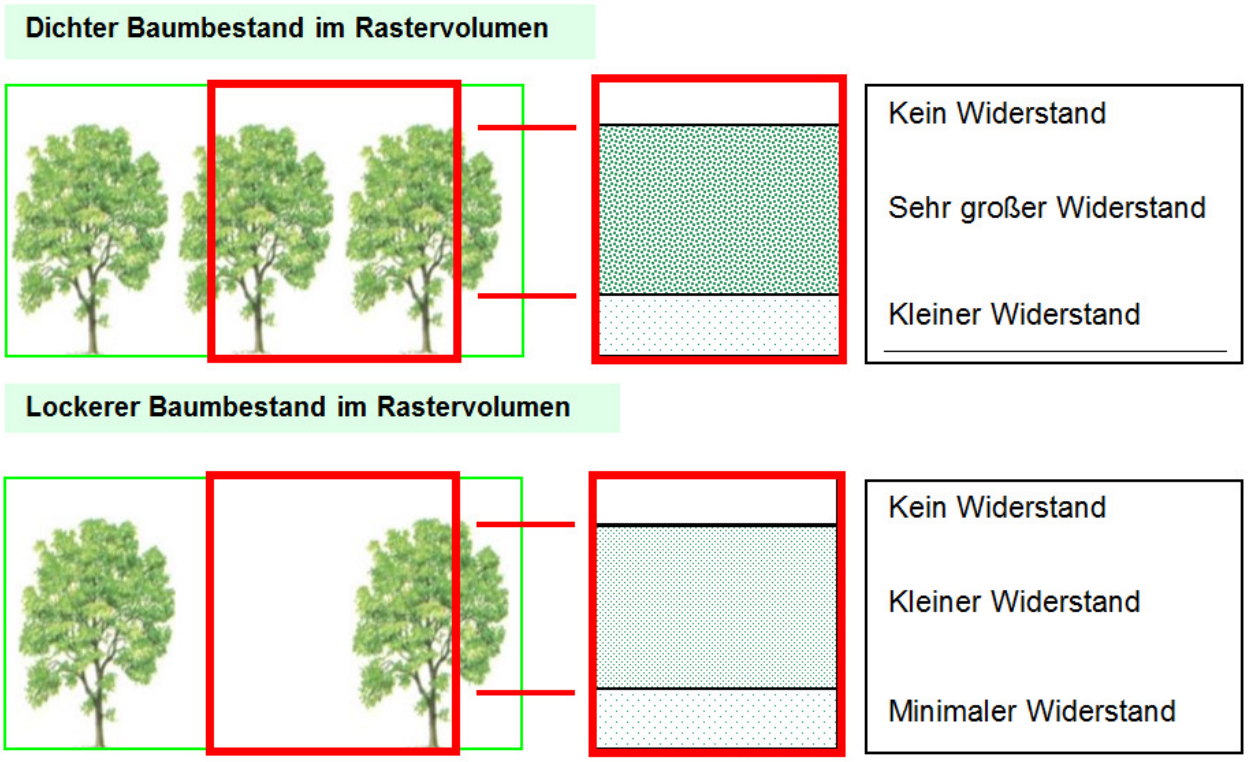


Abbildung 4 Einfluss der Vegetation auf die Durchströmbarkeit einer Rasterzelle

Die beschriebenen Parametrisierungen sind geeignet, die aus Beobachtungen bekannten, charakteristischen Veränderungen der verschiedenen meteorologischen Variablen im Bereich von Städten und Wäldern mit FITNAH zu berechnen.

3.3 BETRACHTETE WETTERLAGE

Die durchgeführte numerische Simulation mit FITNAH 3D legt eine autochthone Wetterlage zugrunde. Eine solche Witterung ist durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die im Fokus stehenden lokalklimatischen Besonderheiten einer Stadt besonders gut ausprägen. Entsprechend wurden die großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen folgendermaßen festgelegt:

- Lufttemperatur 20 °C über Freiland um 21:00 Uhr
- Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- Bedeckungsgrad 0/8 (d. h. wolkenloser Himmel)
- Kein überlagernder geostrophischer Wind

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten während der austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Bei gleichzeitig hoher Ein- und Ausstrahlung können sich somit lokal bioklimatische Belastungsräume ausbilden Diese Wettersituation stellt damit ein „Worst-Case“-Szenario dar. Charakteristisch für diese (Hochdruck-)Wetterlage ist die Entstehung von Kaltluftströmungen (Flurwinde), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden und zu einem Abbau der Belastungen beitragen.

In Abbildung 5 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur

Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Hinsichtlich des täglichen Temperaturverlaufs zeigt sich, dass Freiflächen wie z.B. Wiesen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können wie bebaute Flächen, hingegen ist die nächtliche Abkühlung der Siedlungsflächen vor allem durch die vorhandenen Wärme speichernden Materialien deutlich herabgesetzt. Bei den durch niedrige Vegetation (u. a. Wiesen) geprägten Grünflächen trägt der Mangel an Verschattung zum hohen mittäglichen Temperaturniveau bei, während indes nachts aufgrund des geringen Bodenwärmestroms und der fehlenden Horizontüberhöhung (kaum Gegenstrahlung) die Abkühlung am stärksten ist. Waldflächen weisen im Vergleich der dargestellten Nutzungstypen eine mittlere Ausprägung mit einer geringeren Tages-Amplitude auf. Sowohl die nächtliche Auskühlung als auch die mittägliche Erwärmung werden durch das Kronendach bezogen auf das 2 m-Niveau gedämpft. Zudem werden auch hinsichtlich der Windgeschwindigkeiten die Einflüsse von Bebauung und Vegetationsstrukturen im abgebildeten Vertikalprofil deutlich.

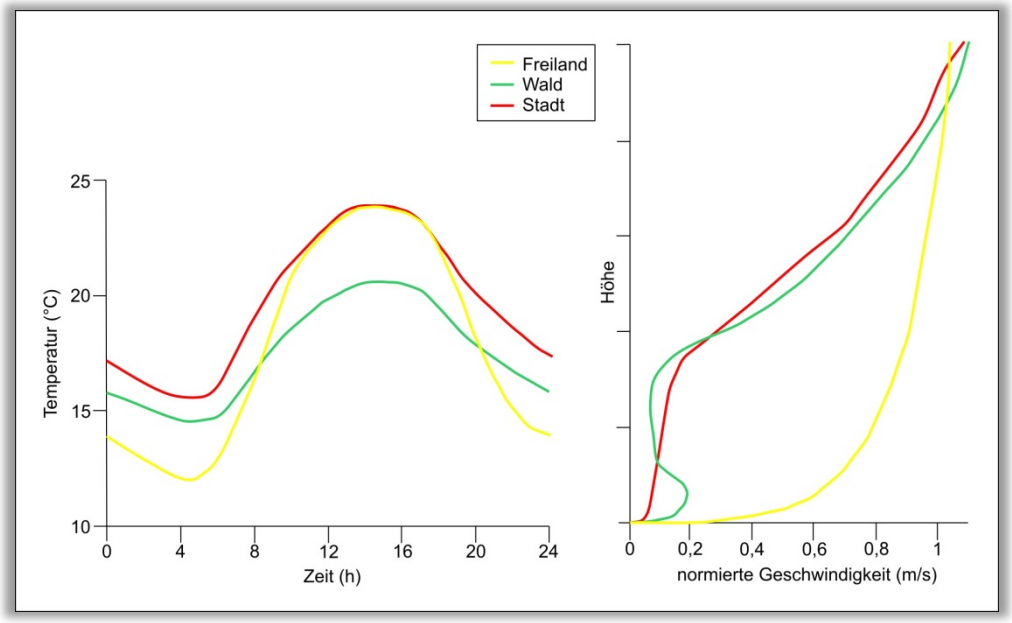


Abbildung 5 Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen

3.4 EINGANGSDATEN FÜR DIE MODELLRECHNUNG

Die Nutzungsstruktur und die Geländehöhe sind die zentralen Eingangsdaten für die Klimamodellierung, da über die Oberflächengestalt, die Höhe der jeweiligen Nutzungsstrukturen sowie deren Versiegelungsgrad das Strömungs- und Temperaturfeld entscheidend beeinflusst wird. Die hierfür erforderlichen Geodaten wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt und entstammen den ALKIS-Daten (Nutzung) bzw. dem digitalen Geländemodell (DGM) in 1 m Auflösung. Zusätzlich wurden Geodaten vom „Urban Atlas“ des „Copernicus Land Monitoring Service“ (EEA 2017) verwendet. Ausgehend von einer Fläche des Stadtgebietes Mönchengladbach von ca. 170 km² wurde ein Untersuchungsgebiet mit den Abmessungen 19,5 x 19,0 km gebildet, das dementsprechend eine Fläche von mehr als 370 km² umfasst. Die Modellierung der meteorologischen Parameter erfolgte für 592.800 Rasterzellen mit einer Zellengröße von jeweils 25 m x 25 m.

Mönchengladbach liegt im Niederrheinischen Tiefland, ca. 15 km westlich des Rheins. Das Stadtgebiet ist relativ flach, das Gelände fällt in Richtung Nordosten ab. Der höchste Punkt im Stadtgebiet ist die Rheydter

Höhe (133 m ü. NN) südwestlich des Stadtzentrums, der niedrigste Punkt liegt im Stadtteil Donk im Nordosten der Stadt mit 35 m ü. NN.

Die für die Klimaanalyse notwendigen orographischen (reliefbezogenen) Eingangsparameter wurden auf Grundlage eines digitalen Geländehöhenmodells des Landes (Landesregierung NRW 2018) mit einer Auflösung von 1 m abgeleitet.

Von zentraler Bedeutung für die Klimamodellierung ist die möglichst exakte Abbildung der Nutzungsstruktur. Nutzungsbedingte Veränderung des örtlichen Windfeldes und des Wärmehaushaltes sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Ausbildung eines gegenüber dem Umland veränderten Stadtklimas. Zahlreiche der vielen stadtklimatologisch relevanten Parameter lassen sich daher über die Strukturhöhe, die Bebauungsdichte und den Grad der Oberflächenversiegelung einer Fläche abschätzen. Die Ausprägung dieser Einflussgrößen ist nutzungsabhängig und nimmt bei gleichen Nutzungstypen ähnliche Werte an. Somit ermöglicht die Analyse der Nutzungen im Untersuchungsgebiet eine Abgrenzung von Gebieten ähnlicher stadtstruktureller Ausstattung und der damit einhergehenden stadtklimatischen Charakteristika. Hier wurde auf die ALK-Daten der Stadt Mönchengladbach zurückgegriffen. Auf dieser Grundlage wurden 12 Nutzungsklassen definiert, die eine unter klimatischen Gesichtspunkten sinnvolle Differenzierung der Oberflächenstruktur erlauben (Tabelle 1). Da auf Maßstabsebene einer mesoskaligen Klimamodellierung keine Einzelgebäude aufgelöst werden, kommen für die Einordnung der Strukturhöhe nutzungsklassifiziert vorliegende Literaturdaten (u. a. MOSIMANN et al. 1999) zum Einsatz, die auf empirisch gewonnenen Untersuchungsergebnissen aus mehreren deutschen Städten beruhen. Der Versiegelungsgrad wurde ebenfalls mittels der Landnutzungsklassen parametrisiert. Aus der Verknüpfung der unterschiedlichen Quellen ist somit eine aktuelle Informationsebene zur Realnutzung, Strukturhöhe und Oberflächenversiegelung vorhanden. Eine Bilanzierung der Nutzungskategorien für das Untersuchungsgebiet zeigen Abbildung 6 und Abbildung 7. Den größten Flächenanteil weist mit etwa 54 % Freiland auf, gefolgt von Wald- und Gehölzflächen mit ca. 9 %. Einzel- und Reihenhausbebauung nehmen 8 % der Fläche des Untersuchungsgebietes ein.

Klasse	Flächentyp	Beschreibung	Mittlerer Versiegelungsgrad (%) / Mittlere Strukturhöhe (m)
1	Zentrumsbebauung	Kerngebietsnutzung, welche durch einen sehr hohen Bebauungs- und Versiegelungsgrad gekennzeichnet ist.	95 / 25,0
2	Block- und Blockrandbebauung	Vergleichsweise dicht bebaute und häufig auch stark versiegelte Siedlungsfläche. Baustrukturell ist sie meist durch geschlossene Blockinnenhöfe geprägt. Sie umfasst sowohl Vorkriegs- als auch Nachkriegsbauten.	78 / 15,0
3	Industrie- und Gewerbefläche	Sie weist einen ähnlich hohen Versiegelungsgrad wie die Zentrumsbebauung auf, gleichzeitig ist der versiegelte Flächenanteil oft größer als der mit Gebäuden bestandene.	87 / 10,0
4	Zeilen- und Hochhausbebauung	Zu diesem Flächentyp zählen sowohl freistehende Punkthochhäuser als auch halboffene Blockrandbebauung und Zeilenbebauung. Gemeinsames Merkmal ist ein relativ hoher Grünflächenanteil, welcher sich durch die zwischen den Gebäudekörpern befindlichen Abstandsflächen ergibt.	55 / 15,0
5	Einzel- und Reihenhausbebauung	Dieser Typ weist unter den Siedlungsräumen den geringsten Überbauungsgrad auf. Der Übergang zwischen dicht ausgeprägter Reihenhausbebauung und einer Zeilenbebauung ist fließend.	41 / 5,0
6	Straßenraum	Ebenerdig versiegelte Fläche des Straßenraums.	95 / 0,0
7	Gleisfläche	Schienenverkehrsfläche mit geringer Strukturhöhe.	25 / 0,5
8	Baulich geprägte Grünfläche	Unter diesem Flächentyp sind vegetationsgeprägte Flächen zusammengefasst, welche zugleich auch einen gewissen Anteil an versiegelter Fläche (Zuwegungen) oder Bebauung aufweisen. Dazu zählen z. B. Kleingartenanlagen und Gartenbauflächen, sowie Spiel- und Sportplätze. Es überwiegt aber letztlich die Eigenschaft als Grünfläche.	25 / 5,0
9	Freiland	Beinhaltet vor allem landwirtschaftlich genutzte Wiesen und Weiden sowie ackerbaulich genutzte Flächen. Innerstädtisch handelt es sich meist um Rasenflächen mit geringem Gehölzanteil.	5 / 1,0
10	Gehölz	Diese Nutzungskategorie umfasst sowohl innerstädtische Parkareale und Gehölzflächen als auch Obstbauflächen, Baumschulen und Straßenbegleitgrün.	5 / 2,0
11	Wald	Waldflächen sowie waldartige Bestände	5 / 12,5
12	Wasser	Still- und Fließgewässer.	0 / 0,0

Tabelle 1: Nutzungskategorien der Klimamodellierung

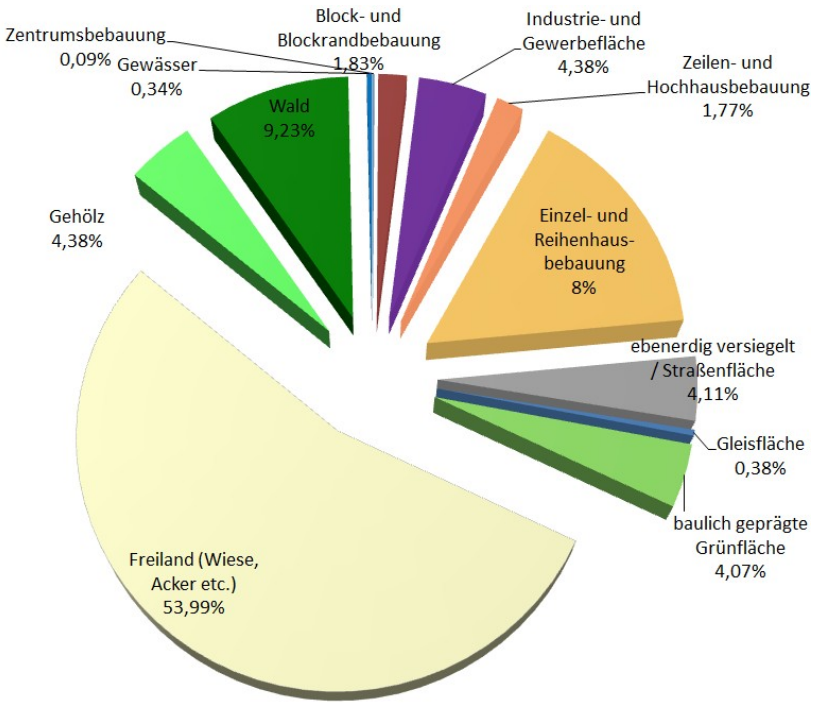


Abbildung 6 Anteile der FITNAH-Nutzungskategorien im Untersuchungsgebiet in Prozent

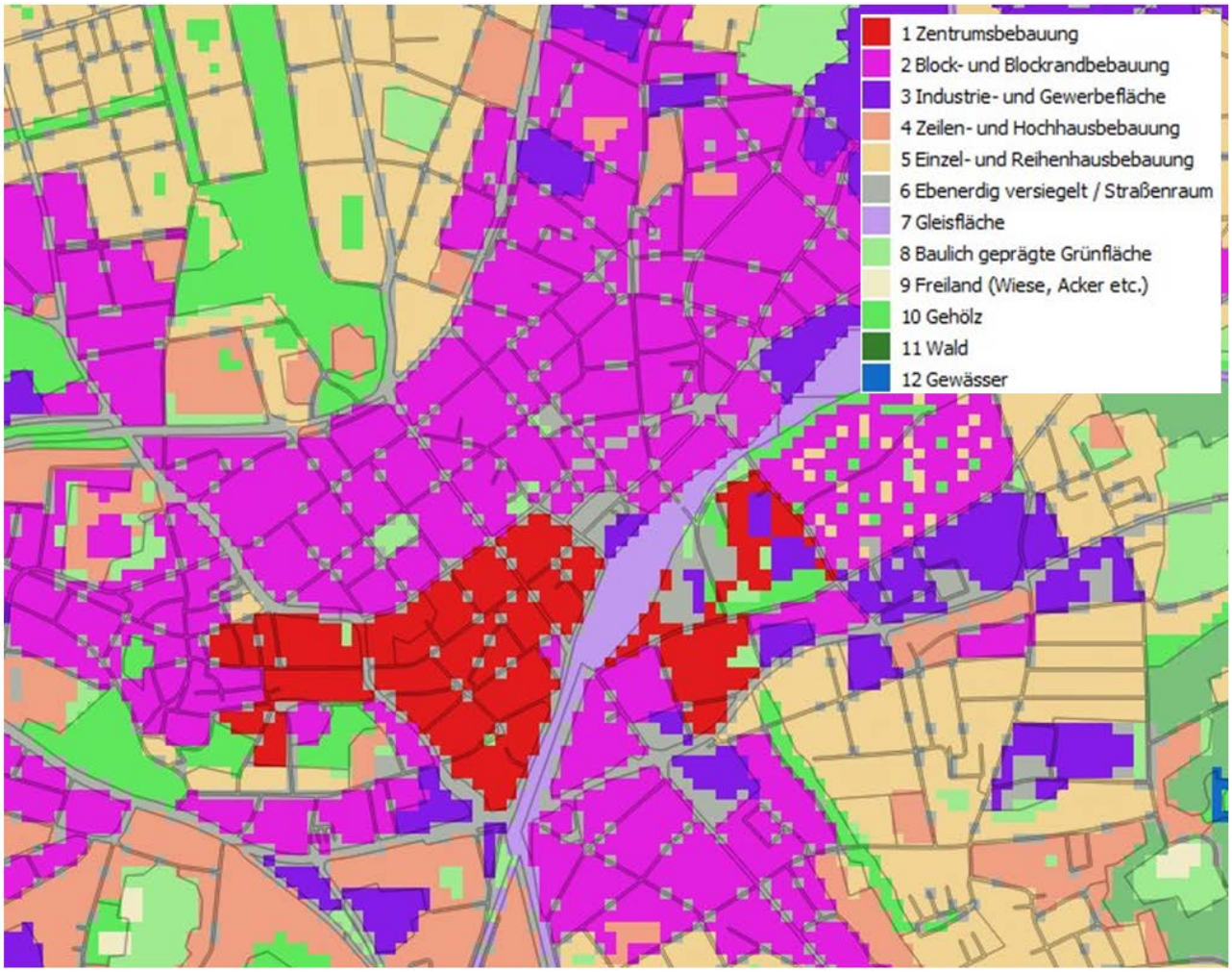


Abbildung 7 Nutzungsstruktur in einem Ausschnitt des Untersuchungsgebiets (in der Mitte liegt der Hbf Mönchengladbach)

Die Eingangsdaten wurden bezüglich Nutzungskategorien anhand aktueller Luftbilder (Bezugsjahr 2017) visuell abgeglichen und auf Plausibilität geprüft. Folgende in Umsetzung befindliche Bebauungspläne wurden in Absprache mit dem Auftraggeber eingearbeitet:

- REME Gelände (BP 792-O, Frühzeitige Beteiligung 14.05.2018)
- Seestadt mg+ (BP 793-O, , Frühzeitige Beteiligung 08.05.2018)
- Maria-Hilf Areal (B-Plan 794-N, Vorentwurf, Stand 20.6.2018).

3.4.1 ABGRENZUNG UND BEWERTUNG DER KLIMAÖKOLOGISCH WIRKSAMEN NUTZUNGSSTRUKTUREN

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 25 m zu erzeugen. Aus diesen gerasterten Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form rasterweise berechneter Klimaparameter (Abbildung 8). Qualifizierende Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein.
Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und maßstabsgerechte Einheiten zu übertragen, werden den Referenzflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Als Basis für die Referenzflächen wurden die – leicht bearbeiteten – Polygone des „Urban Atlas“ (EEA 2017) verwendet. Dafür werden die Rechenergebnisse aller Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zonaler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche eine umfassende Statistik aller zugehörigen Klimaparameter, die u.a. den Mittelwert der flächenspezifischen Werteausprägungen umfasst.

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als hochaufgelöste rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (vgl. Kapitel 4), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (vgl. Kapitel 5 und 6). Auf diese Weise bleibt, in Ergänzung zur abstrahierten Darstellung der klimatischen Funktionszusammenhänge (als Flächen- und Beziehungstypen in den Synthesekarten), die flächeninterne Heterogenität der Klimaparameter als Detailinformation jederzeit abrufbar.

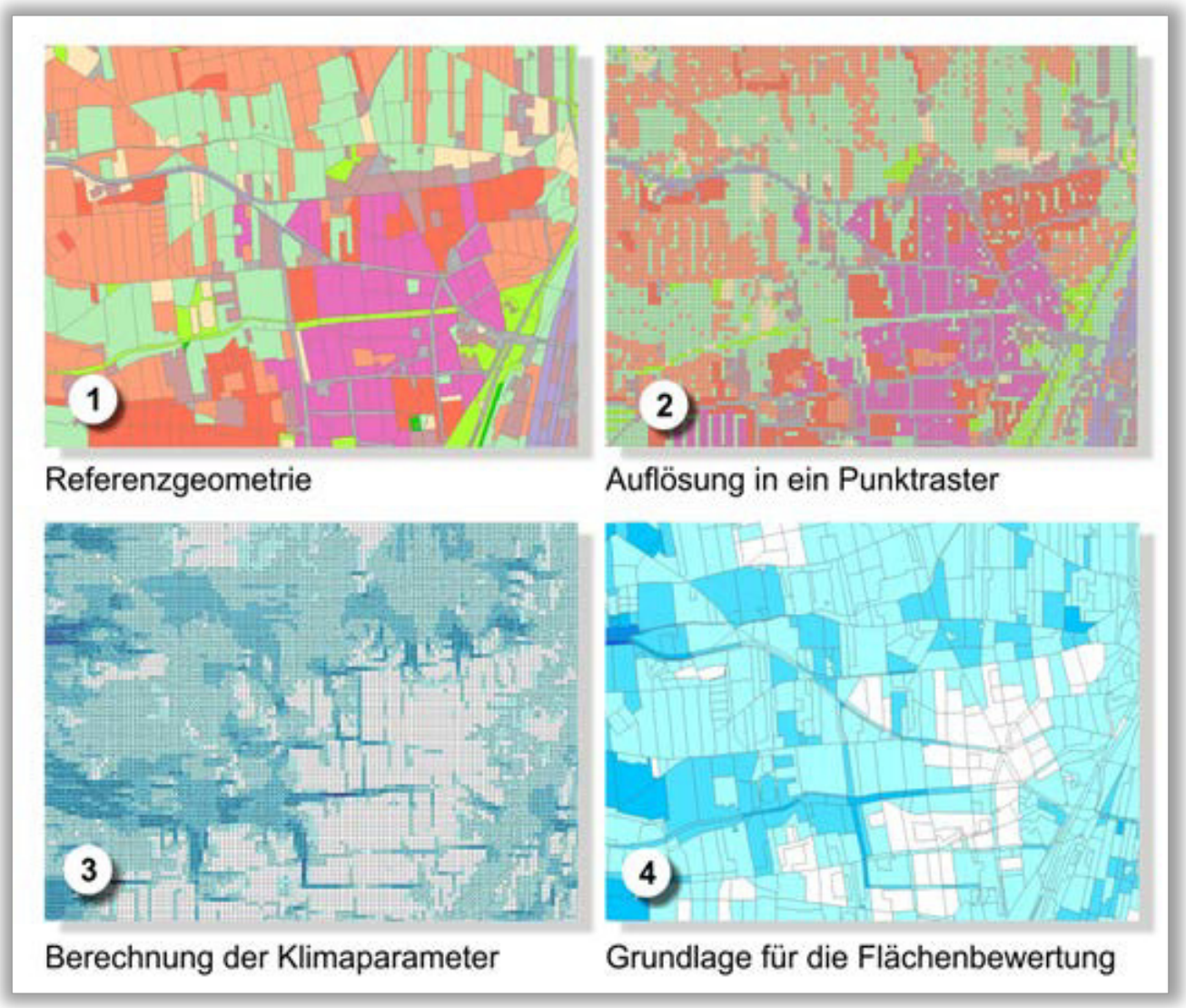


Abbildung 8 Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

4 Modellergebnisse ausgewählter Parameter

4.1 METHODE

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) beschrieben. Sie basieren auf einer räumlichen Auflösung von 25 m (pro Rasterzelle ein Wert) und gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen (in 2 m ü. Gr.) sowie eine autochthone Sommerwetterlage (vgl. Kapitel 3.3).

Auslöser der ermittelten Austausch-Prozesse sind die Temperaturunterschiede zwischen vergleichsweise warmen Wirkungsräumen und kühleren Ausgleichsräumen. Wirkungsräume werden im Folgenden auch als Siedlungsräume bezeichnet, und umfassen alle Wohn- und Gewerbeflächen, entsprechend den Nutzungskategorien 1 bis 5 (vgl. Tabelle 1). Ausgleichsräume sind die im Folgenden auch als Grünflächen bezeichneten, außerhalb von Siedlungen gelegenen, vegetationsgeprägten, weitgehend unversiegelten Flächen sowie größere innerorts gelegene Grünflächen wie Parks, Landschaftsgärten oder Stadtwälder (Nutzungskategorien 8 bis 11, vgl. Tabelle 1).

Flächenbezogene Analysen werden im anschließenden Kapitel zu den Klimaanalysekarten vorgenommen (z.B. die Ableitung von Kaltluftleitbahnen).

4.2 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

4.2.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher i.d.R. einen ausgeprägten Abfall während der Abend- und Nachtstunden. Kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages wird das Temperaturminimum erreicht. Das Ausmaß der Abkühlung kann, je nach den meteorologischen Verhältnissen, der Lage des Standorts und den landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften, große Unterschiede aufweisen, sodass sich bereits auf kleinem Raum ein differenziertes Temperaturfeld mit großen Temperaturabweichungen einstellen kann. Besonders auffällig ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume („städtische Wärmeinsel“), dessen gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnisse sich auf einige wesentliche Faktoren zurückführen lassen. Hierzu gehören

- die erhöhte Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der versiegelten Böden und Oberflächen,
- die durch die Geometrie der städtischen Baukörper vergrößerte strahlungsabsorbierende Oberfläche,
- die herabgesetzte Verdunstung durch den hohen Versiegelungsgrad und die direkte Einleitung des Niederschlagswassers in die Kanalisation oder die Vorflut,
- die über die vermehrte Emission von Gasen und Aerosolen zugunsten eines langwelligen Strahlungsgewinns veränderte Strahlungsbilanz (lokaler Treibhauseffekt),
- die Wirkung der Stadt als Strömungshindernis mit hoher aerodynamischen Rauigkeit (vgl. Glossar) und die damit verbundene Behinderung der Durchlüftung und des Luftaustausches mit dem Umland,
- die erhöhte anthropogen bedingte Wärmeproduktion.

Damit ist das Ausmaß der Temperaturabweichung im ***Siedlungsbereich*** vor allem von der Größe der Stadt und der Dichte der Überbauung abhängig.

Grünbestimmte Flächen weisen eine höhere Abkühlungsrate auf als bebaute Areale. Dabei üben auch das Relief (Exposition, Geländeneigung) und die Lage im Mosaik der Nutzungen und ihrer dynamischen Luftaustauschprozesse einen Einfluss aus.

Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im ***Wald*** beruht zu einem großen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Größere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, wobei hier sauerstoffreiche und wenig belastete Luft bereitgestellt wird. Während im Stammraum tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ geringe Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit vorherrschen, treten nachts durch die abschirmende Wirkung des Kronendachs vergleichsweise milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können demnach auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen, nachts fällt deren Kaltluftproduktion dagegen geringer aus als über unversiegelten Freiflächen – außerdem können sie ein Strömungshindernis darstellen.

Im Falle der **Wasserflächen** sorgen die hohe spezifische Wärmekapazität des Wassers, seine besondere Art der Strahlungsabsorbtion und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte tagesperiodische Temperaturamplitude, insbesondere über größeren Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der Umgebung sind, wirken größere Gewässer auf bebaute Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung zusätzlich verringern.

Die Entwicklung der Temperatur im Tagesverlauf in Abhängigkeit von der Oberflächennutzung ist schematisch in Abbildung 5 auf Seite 11 dargestellt. Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen, Aussagen zum Auftreten thermisch und/oder orographisch induzierter Ausgleichsströmungen zu treffen sowie die räumliche Ausprägung und Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine autochthone Sommernacht als besondere Wetterlage zu verstehen. Die daraus abgeleiteten relativen Unterschiede innerhalb des Stadtgebiets bzw. zwischen den Nutzungsstrukturen gelten dagegen weitestgehend auch während anderer Wetterlagen, sodass die Flächenbewertung etwa der Planungshinweiskarten auf diesen beruht (vgl. Kapitel 6).

4.2.2 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD IN MÖNCHENGLADBACH

Das sich um 04:00 Uhr in der Nacht einstellende Lufttemperaturfeld ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Darstellung für den gesamten Untersuchungsraum ist im Anhang zu finden. Die Temperaturwerte umfassen mit minimal weniger als 13 °C über stadtfernen Freiflächen und maximal mehr als 21 °C im Stadtkern eine Spannweite von ca. 9 °C. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 17,0 °C.

Das Temperaturfeld ist auch innerhalb der bebauten Gebiete räumlich differenziert, weil Areale mit Einzelhaus- oder Blockbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen (Abbildung 9).

Die höchsten Temperaturen treten mit > 21 °C in den Kernbereichen der Innenstadt auf und resultieren aus dem hohen Bauvolumen und Oberflächenversiegelungsgrad im Stadtzentrum. Ähnlich hohe Temperaturen ergeben sich in den über das gesamte Stadtgebiet verteilten Industrie- und Gewerbegebieten, in denen

zusätzlich zum hohen Versiegelungsgrad die anthropogene Wärmeemission in die Modellrechnung eingeflossen ist.

Die sich an den Innenstadtbereich anschließende und in den Stadtteilzentren auftretende Block- und Blockrandbebauung besitzt mit ca. 19 - 20 °C ebenfalls ein erhöhtes Temperaturniveau. Große Teile der Richtung Stadtrand gelegenen Siedlungsflächen sind durch eine ausgedehnte Einzel- und Reihenhausbebauung geprägt (u.a. *Lürrip, Hardterbroich, Pesch*) und vor allem in den Siedlungsbereichen außerhalb der Kernstadt (z. B. *Holt, der südliche Teil von Wickrath-Mitte, Bonnenbroich-Geneicken, Wickrathberg ,Rheindahlen*)). Diese weisen unter den bebauten Flächen mit durchschnittlich 17,8 °C das geringste Temperaturniveau auf, Werte über 19 °C werden in der Regel nicht erreicht. Die durch Abstandsflächen geprägte Zeilen- und Hochhausbebauung tritt im Untersuchungsgebiet nur auf kleinen Flächen auf (z. B. an Rheydter Straße, Fliethstraße und Speickstraße in Gladbach und Westend sowie an der Volksgartenstraße in Hardterbroich-Pesch), und liegt mit ca. 19,0 °C zwischen den übrigen Strukturtypen.

Im Temperaturfeld treten unbebaute, vegetationsgeprägte Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor. Die niedrigsten Temperaturen im Untersuchungsgebiet sind mit ca. 13 °C über ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Arealen im Umland zu verzeichnen. Diese liegen innerhalb der Stadtgrenzen vor allem in den Stadtteilen Rheindahlen-Land, Wickrath-West, Wanlo und Hardt-Mitte. Ähnlich geringe Werte können in Senkenbereichen auftreten, in denen sich Kaltluft sammelt. Dies ist in großem Maße in den Tagebaugruben am Südrand des Untersuchungsgebietes der Fall. Die dort entstehende Kaltluft hat keine Wirk-Zusammenhänge zum Stadtklima im Stadtgebiet Mönchengladbach.

In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und verhindert damit auch ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. Temperaturwerte um 17 °C erreicht werden. Große Waldflächen im Stadtgebiet sind vor allem der *Hardter Wald*, *Bungtwald und Volksgarten, Zoppenbroicher Park und Nordwald*. Die nächtliche Temperatur der innerstädtischen Grünflächen ist sowohl abhängig von der Flächengröße als auch von Bewuchsdichte und – höhe sowie von der umgebenden Bebauungsstruktur. Große innerstädtische Parkstrukturen (z.B. *Freizeitpark Dahl,* F*riedhof Nordstraße, Bunter Garten,* und alle Kleingartenanlagen), zeigen im Temperaturfeld Werte zwischen 16 und 18 °C. Größere Freiflächen ohne oder mit nur niedrigem Bewuchs treten dagegen im Stadtgebiet mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen deutlich hervor und stellen demnach nachts potentielle Entlastungsräume für die umliegenden Siedlungsflächen dar, so z. B. die Ernst-Reuter Sportanlagen mit angrenzenden Freiflächen bis hin zum Vitus-Park mit rund 16 °C.

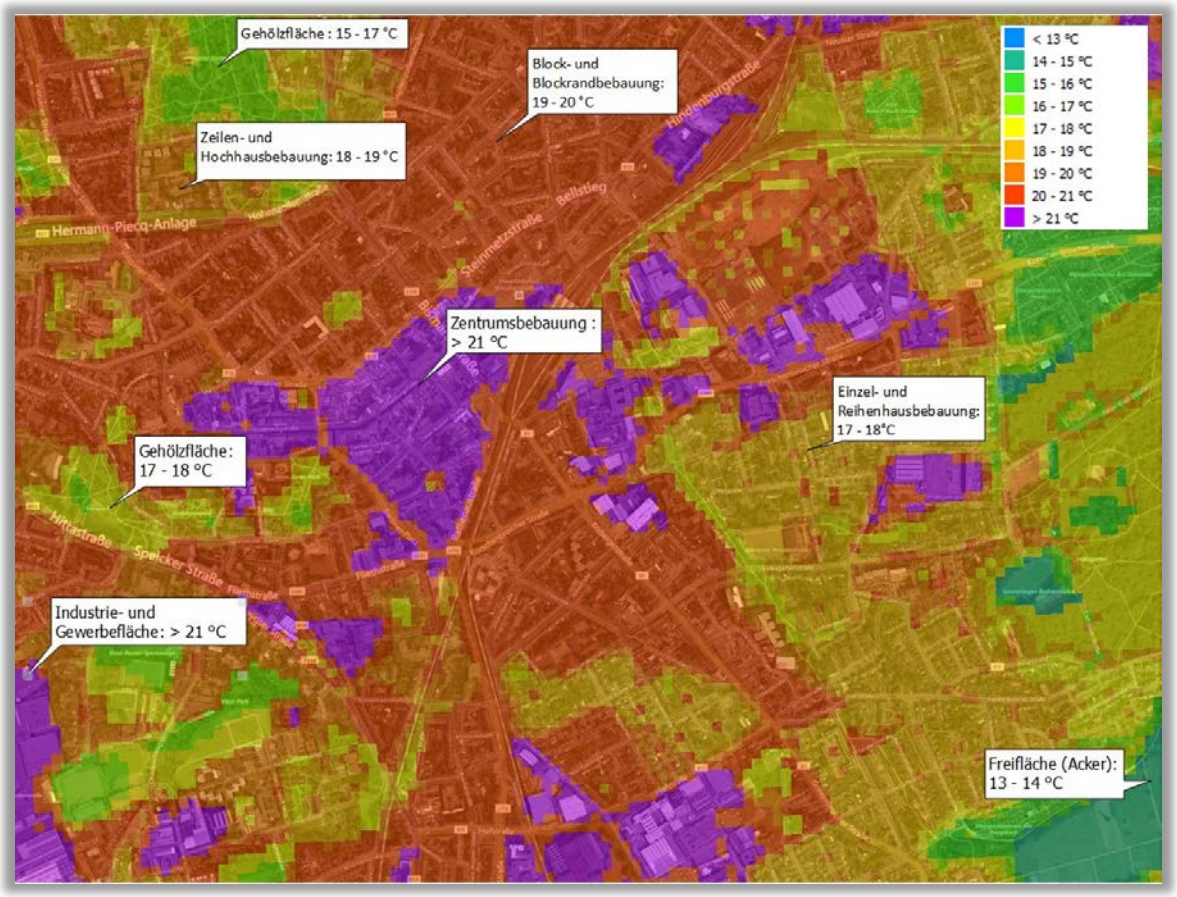


Abbildung 9 Nächtliches Temperaturfeld in einem Ausschnitt des Innenstadtbereichs Mönchengladbachs mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen (im Hintergrund: Satellitenbild)

4.3 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

4.3.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Die variable bodennahe Lufttemperaturverteilung bedingt horizontale und vertikale Luftdruckunterschiede, welche wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. Die wichtigsten nächtlichen Luftströmungen dieser Art sind Hangabwinde und Flurwinde – letztgenannte treten im Untersuchungsgebiet aufgrund der vergleichsweise geringen Reliefenergie häufiger auf.

Ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen Oberflächen abwärts gerichtete Strömungen ein, weil die hangnahe Luft durch nächtliche Ausstrahlung stärker abkühlt als die freie Luft in gleicher Höhe. Aufgrund ihrer höheren Dichte fließt die kühlere Bodenluft hangabwärts. Die Ausprägung dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt (Mosimann et al. 1999). ***Hangabwinde*** erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa 3 m/s, ihre vertikale Mächtigkeit liegt zumeist unterhalb von 10 m (Hergert 1991). In ebenen Lagen bilden sich unter günstigen Bedingungen sogenannte ***Flurwinde*** aus, die radial auf einen überwärmten Raum ausgerichtet sind. Flurwinde entstehen, wenn sich infolge der Überwärmung von überbauten oder versiegelten Gebieten gegenüber dem Umland ein lokales thermisches Tief aufbaut. Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (Kiese et al. 1988). Kleinräumige Strömungsphänomene, die zwischen einzelnen strukturellen Elementen innerhalb der Stadt auftreten, werden ***Strukturwinde*** genannt.

Den hier beschriebenen Phänomenen kommt eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu. Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis. Aus diesem Grund sind die Durchlüftung der Stadtkörper und ihr Luftaustausch mit dem Umland generell herabgesetzt. Die Abfuhr von schadstoffbelasteten und überwärmten Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr frischer und kühlerer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

4.3.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN MÖNCHENGLADBACH

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickeln. Abbildung 10 zeigt das für den Zeitpunkt 04:00 Uhr modellierte Strömungsfeld für einen Ausschnitt des Stadtgebiets, das sich während einer sommerlichen austauscharmen Strahlungswetternacht herausgebildet hat. Die momentane Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird – bei Geschwindigkeiten über 0,1 m/s – über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren dargestellt. Im Strömungsfeld sind die Hinderniswirkung der Gebäude und die daraus resultierende Umlenkung der Strömung gut zu erkennen. Die Darstellung für den gesamten Untersuchungsraum ist im Anhang zu finden.

Die unterlegten Farben stellen die Windgeschwindigkeit flächenhaft dar. Abgebildet sind alle Rasterzellen mit einer Windgeschwindigkeit von mindestens 0,1 m/s, für die unter Berücksichtigung der gebietstypischen Ausprägung eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit angenommen werden kann.

Die für das 2 m-Niveau wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu reliefbedingten Maximalwerten von ca. 1,5 m/s auf Freiflächen außerhalb der Kernstadt (siehe gesamtstädtische Abbildung im Anhang). Insgesamt liegen die Werte relativ niedrig, da das

Strömungsfeld während der angenommenen autochthonen Wetterlage vorwiegend durch thermisch induzierte Flurwinde bestimmt ist und nur vereinzelt Hangabwinde auftreten. Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten mit auf das Stadtgebiet zielenden Strömungsrichtungen treten auf der Freifläche östlich des Tiergartens / Beller Bruchs bzw. südlich der Mülforter Straße auf (siehe gesamtstädtische Abbildung im Anhang). Abfallend vom Kamphausener Weg (ca. 90 m ü. NN) tritt in Richtung Mülforter Straße (ca. 50 m ü. NN) ein für das Untersuchungsgebiet relativ großes Gefälle auf, welches die Kaltluftströmung antreibt. Bei den größeren Grünzügen die bis in das Stadtgebiet hineinreichen handelt es sich fast ausschließlich um Waldflächen. Diese liefern nachts relativ wenig Kaltluft. Höhere Werte für Strömungsgeschwindigkeiten treten über den Frei- und Gehölzflächen am Stadtrand auf (u.a. Friedhof Rheydt und angrenzende Kleingartenanlagen bis an die Rheydter Straße, die Freiflächen am Bungtbach zwischen Schloss Rheydt und Hardterbroich-Pesch (unten rechts in Abbildung 10), und vom städtischen Hauptfriedhof bis zum Bunten Garten). Auch die breiten Gleisflächen in Richtung Mönchengladbach Hauptbahnhof weisen relativ hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf (in Abbildung 10). In Richtung des Zentrums nimmt die Strömungsgeschwindigkeit ab, vornehmlich aufgelockerte Siedlungsbereiche werden noch wirksam durchlüftet (> 0,1 m/s), während in weiten Teilen des Stadtkerns keine wirksame Strömung mehr erreicht wird.

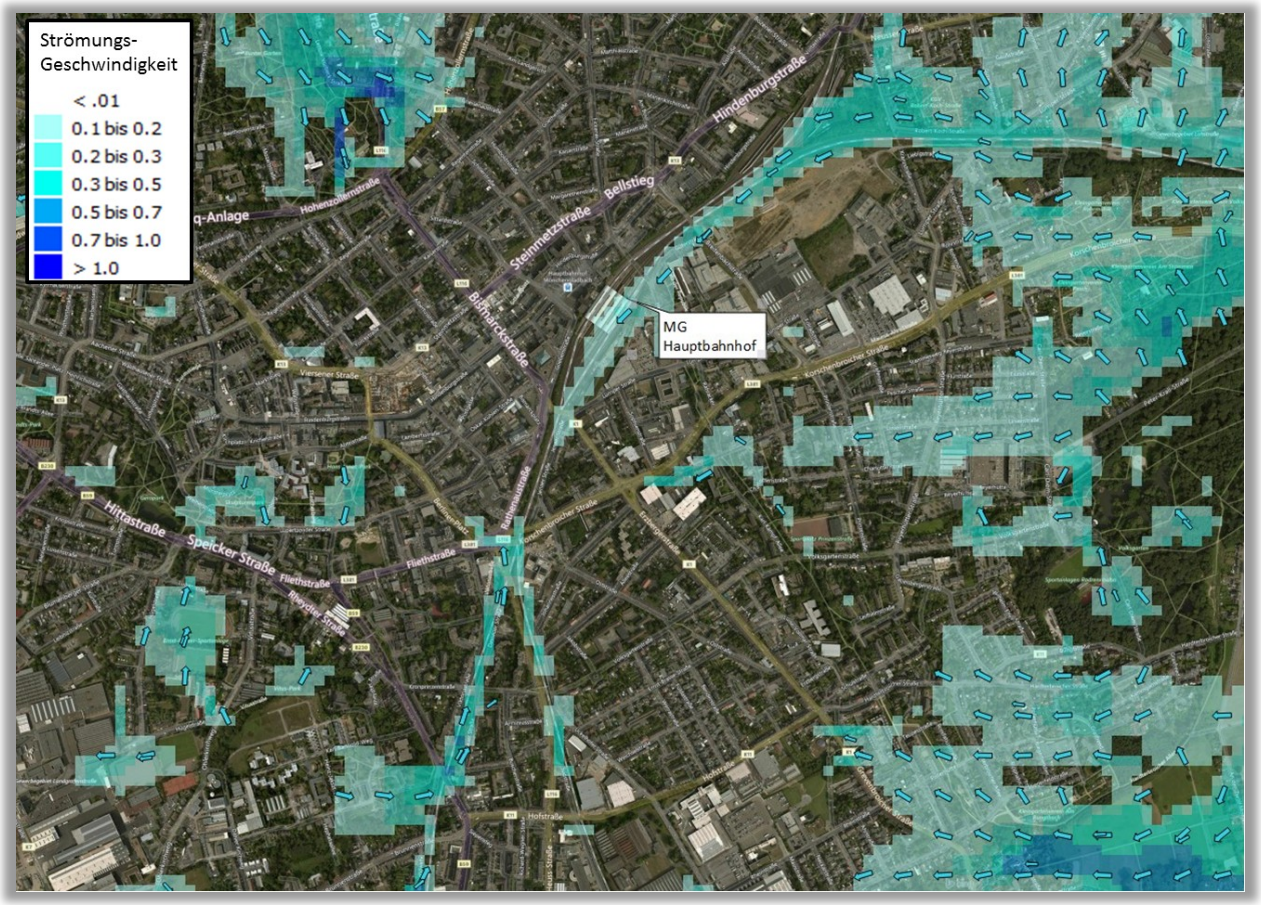


Abbildung 10 Nächtliches Strömungsfeld für einem Ausschnitt des Stadtgebiets Mönchengladbachs. Die Strömungspfeile sind aus Gründen der Übersichtlichkeit auf 100 m Rasterweite aggregiert.

4.4 KALTLUFTVOLUMENSTROM

4.4.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Wie bereits im Vorkapitel zum autochthonen Windfeld erläutert, kommt den lokalen thermischen Windsystemen eine besondere Bedeutung beim Abbau von Wärme- und Schadstoffbelastungen größerer Siedlungsräume zu. Weil die potenzielle Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche aber nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der sogenannte Kaltluftvolumenstrom.

Vereinfacht ausgedrückt stellt der Kaltluftvolumenstrom das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite) dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m³, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abbildung 11). Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite (hier 25 m), ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als rasterbasierte Volumenstrom-*Dichte* aufzufassen. Die hier verwendete Einheit der Kaltluftvolumenstromdichte ist m³/s pro Rasterzelle.

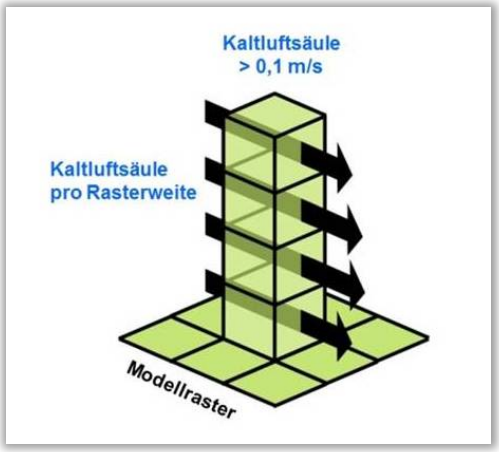


Abbildung 11 Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

Dieser Wert kann über ein 25 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz veranschaulicht werden, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Wird nun die Menge der pro Sekunde durch das Netz strömenden Luft bestimmt, ist diese als rasterbasierte Volumenstromdichte zu verstehen.

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Der jeweilige Beitrag beschleunigender und bremsender Faktoren zur Dynamik der Strömung wird unter anderem stark von der bisherigen zeitlichen Entwicklung des Abflusses beeinflusst. So können sich beispielsweise die Kaltluftströmungen über einer Fläche im Laufe der Nacht dadurch ändern, dass die Fläche zunächst in einem Kaltluftabflussgebiet und später in einem Kaltluftsammelgebiet liegt. Letzteres kann als Hindernis auf nachfolgende Luftmassen wirken und von diesen über- oder umströmt werden. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab.

Gebäude, Mauern oder Straßendämme können als Strömungshindernisse wirken und luvseitig markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt wesentlich von der Siedlungsgröße, Bebauungsdichte, anthropogenen Wärmefreisetzung und der Menge einströmender Kaltluft ab.

4.4.2 RÄUMLICHE VERTEILUNG DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS IN MÖNCHENGLADBACH

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum folgt im Wesentlichen dem Muster des Kaltluftströmungsfeldes, weicht an einigen Stellen jedoch von diesem ab. Abbildung 12 zeigt die Kaltluftvolumenstromdichte für einen Ausschnitt des Stadtkerns. Eine Darstellung für das gesamte Untersuchungsgebiet ist im Anhang zu finden.

Die geringsten Werte finden sich abermals im Stadtkern, der aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung nur beschränkt durchlüftet wird und in dem nur wenige Grünflächen hohen Kaltluftentstehungspotenzials vorhanden sind (Abbildung 12). Ähnliches gilt für die großen Waldflächen, da hier der dichte Bewuchs den Kaltluftstrom behindert und die Ausgleichsleistungen einschränkt. In Waldflächen beträgt die Kaltluftvolumenstromdichte in der Regel zwischen < 100 m^3/s bis zu 200 m^3/s in Waldrandnähe. Die über Freiflächen mit Siedlungsbezug entstehende Kaltluft strömt als Ausgleichsleistung in Richtung der Siedlungsgebiete und sorgt für die höchsten Werte von über 300 m^3/s. Insbesondere entlang von Grünachsen dringt die Kaltluft auch in die Bebauung ein und kann dort die thermische Belastung senken (Z. B. Friedhof Rheydt, Schmölderpark, Hauptfriedhof bis Bunter Garten).

Die meisten Industriegebiete Mönchengladbachs profitieren aus mehreren Gründen von höherem Kaltluftzustrom als die innerstädtischen Wohn- und Gewerbeflächen: Erstens liegen sie fast ausschließlich am Siedlungsrand, mit Anschluss an kaltluftproduzierende und -transportierende Grün- oder Freiflächen oder locker bebauten Wohnsiedlungen (z. B. Regiopark, Industrie- und Gewerbegebiete in Uedding und im weiteren Verlauf der Krefelder Straße sowie Gewerbegebiet Bungt und Gewerbegebiet westlich vom Bahnhof Rheydt), zweitens kann auf großen Parkplätzen und Lagerflächen zwischen großen Gebäuden die Kaltluft ungehindert strömen, drittens gehen die Industriegebiete mit einer mittleren Strukturhöhe von 10 Metern im Gegensatz zu 15 Metern (Blockrandbebauung) bzw. 25 Metern (Zentrums-Bebauung) in die Modellrechnung ein (vgl. Tabelle 1 auf Seite 13), so dass eine ausreichend mächtige Kaltluftschicht in der Höhe weniger behindert wird. Beispielhaft sei hier das Industriegebiet Landgrafenstraße (unten links in Abbildung 12) genannt, das mit Kaltluft aus den südwestlich gelegenen Kleingartenanlagen sowie den östlich liegenden Sportplätzen versorgt wird. In der dichter bebauten Innenstadt, die umringt ist von Block- und Blockrandbebauung, dagegen kommt kaum noch Ausgleichsströmung an. Letztendlich weisen in Mönchengladbach die Industriegebiete ein zu den Innenstadtflächen vergleichbares Temperaturniveau auf.

Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit in der Regel an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammen hängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als Trittsteine für Kaltluft dienen (so z. B. vom Friedhof Rheydt bis an die Rheydter Straße). Auch in Siedlungsquartieren mit hohem Freiflächenanteil bzw. geringem Überbauungsgrad ist ein Kaltluftstrom feststellbar, zum Beispiel in der einzel- und reihenhausgeprägten Siedlung westlich vom Volksgarten (Abbildung 12). Folglich sind die in das Siedlungsgebiet reichenden Kaltluftvolumenströme ausgeprägter als die – in 2 Metern Höhe über Grund dargestellten – Windgeschwindigkeiten in der Darstellung des Kaltluftströmungsfeldes. Das Kaltluftprozessgeschehen (Kaltluftleitbahnen, Kaltlufteinzugsgebiete und Kaltlufteinwirkbereiche) wird in der Klimaanalysekarte näher untersucht (Kapitel 5.2.1).

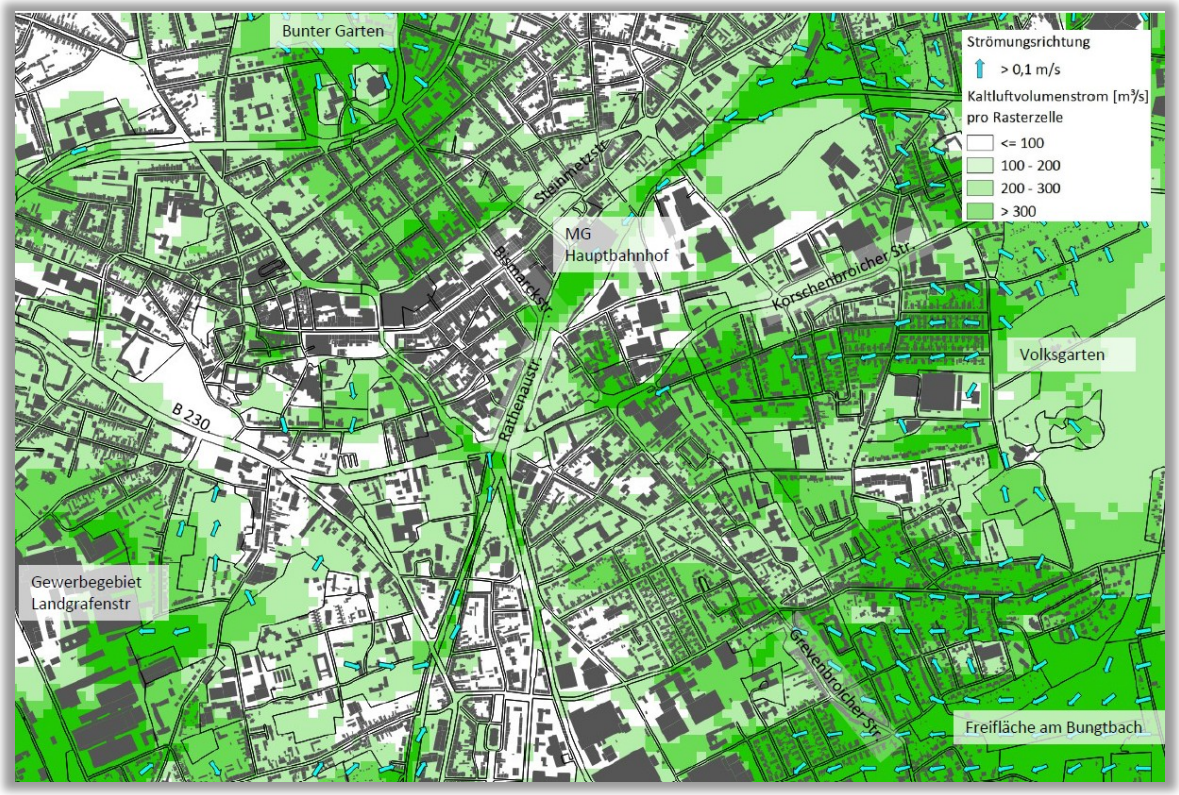


Abbildung 12 Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in einem Ausschnitt des Stadtgebiets. Die Strömungspfeile sind aus Gründen der Übersichtlichkeit auf 100 m Rasterweite aggregiert

Analog zu den Ergebnissen des Strömungsfelds weisen siedlungsferne Freiflächen im Kontext autochthoner Bedingungen geringe Werte auf, da hier der Antrieb durch den Wärmeinseleffekt von nahen Siedlungsflächen fehlt (vgl. Darstellung des gesamten Untersuchungsraums im Anhang).

4.5 THERMISCHE SITUATION AM TAGE

4.5.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen[2]. Beispiele für solche Kenngrößen sind der PMV-Wert (*Predicted Mean Vote*) und der UTCI (*Universal Thermal Climate Index*).

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET(*Physiologisch Äquivalente Temperatur*; vgl. Höppe und Mayer 1987) um 14:00 Uhr herangezogen. Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Größe, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die vorliegenden Ergebnisse für Mönchengladbach mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar.

Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tabelle 2; VDI 2004).

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
8 °C	Kalt	Starke Kältebelastung
13 °C	Kühl	Mäßige Kältebelastung
18 °C	Leicht kühl	Schwäche Kältebelastung
20 °C	Behaglich	Keine Wärmebelastung
23 °C	Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
29 °C	Warm	Mäßige Wärmebelastung
35 °C	Heiß	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung

Tabelle 2: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004)

4.5.1 THERMISCHE SITUATION AM TAGE IN MÖNCHENGLADBACH

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. PET-Werte ≤ 26 °C stellen eine Ausnahme dar und sind einzig über größeren Gewässern zu finden, die tagsüber eine kühlende Wirkung auf ihre direkte Umgebung haben (z.B. *Nierssee und Baggersee nördlich der Trabrennbahn*). Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit einer *schwachen Wärmebelastung* ab (PET ≤ 27 °C) (Abbildung 13*)*. Der Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. liegt unterhalb des Kronendachs und ist

[2] Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).

somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können (Abbildung 13).

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine *mäßige Wärmebelastung* auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer *starken Wärmebelastung* betroffen ist. Die höchsten Werte werden vor allem über versiegelten Gewerbegebieten erreicht, die über mehrere Flächen im Stadtgebiet verteilt oft zwischen Kernstadtbereich und Einfamilienhaussiedlungen am Stadtrand liegen (bis zu mehr als *41 °C PET; extreme Wärmebelastung*). Auch die Gleisfläche am Hauptbahnhof zeigt Werte von über 42 °C (Abbildung 13) Ebenfalls sehr hohe Werte treten in der hoch versiegelten Innenstadt auf, allerdings sorgen andererseits die höheren Gebäude und die dichte Bebauung für eine gewisse Verschattung und dadurch Abkühlung. Trotzdem werden auch im Zentrum von Mönchengladbach und Rheydt Temperaturen von über 39 °C PET erreicht (Abbildung 13). Innerhalb des Stadtkerns zeichnen sich Grünstrukturen mit einer vergleichsweise geringen Wärmebelastung aus. Über unversiegelten Freiflächen dagegen erreicht die thermische Belastung durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung sowohl innerhalb als auch außerhalb der Stadt annähernd gleich hohe Werte wie die Kernstadt und die Industriegebiete.

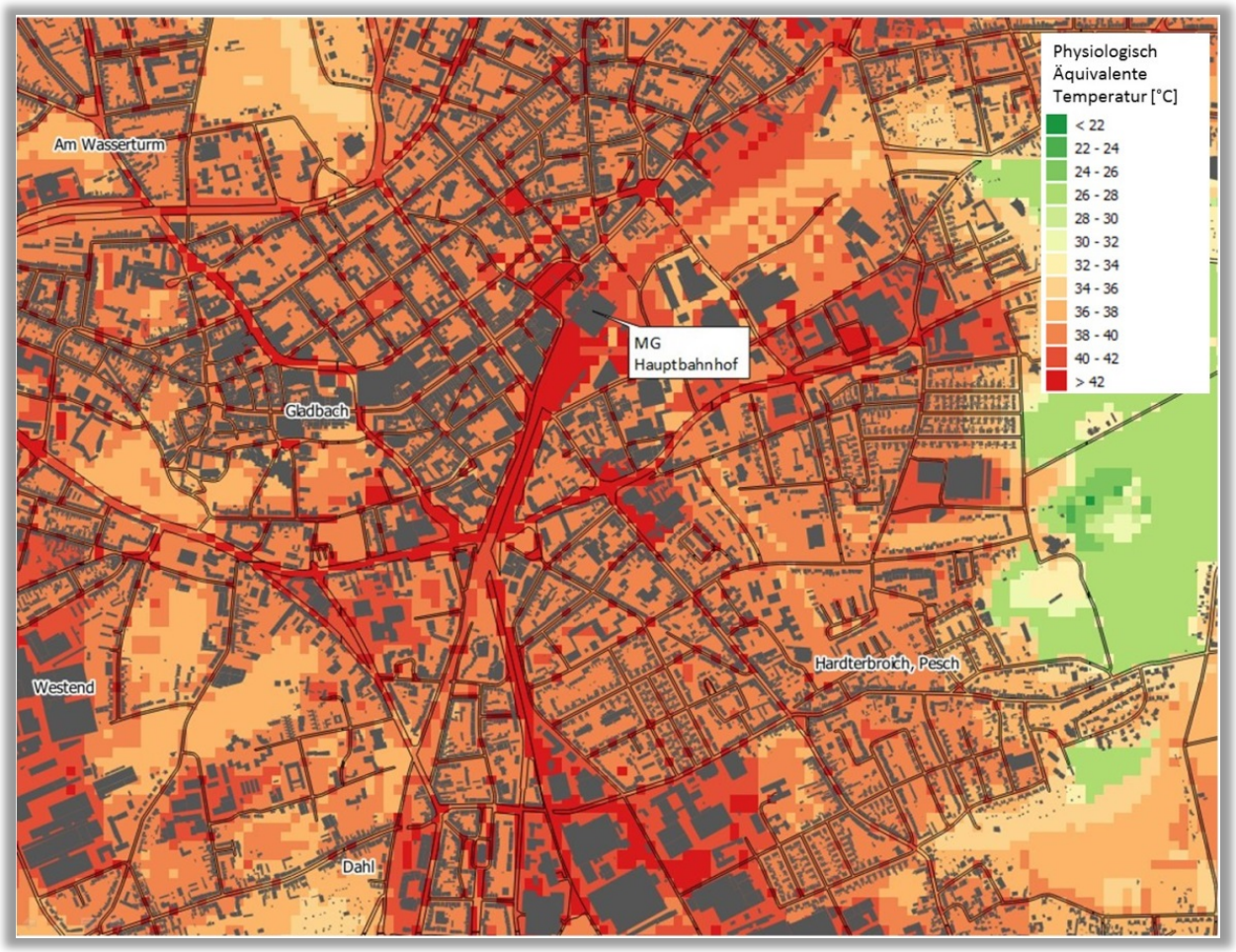


Abbildung 13 Wärmebelastung am Tage in einem Ausschnitt des Stadtgebiets

5 Klimaanalysekarten

5.1 METHODE

Um Aussagen über Funktionszusammenhänge treffen zu können, müssen unterschiedliche Flächeneinheiten von Grünarealen einerseits und bebauten Bereichen andererseits in ihren klimatischen Merkmalen untereinander abgrenzbar sein. Zum Beispiel ist die Kaltluftlieferung von Grünflächen sehr unterschiedlich ausgeprägt, auch in den Siedlungsflächen kann die bioklimatische Situation je nach Bebauungsstruktur und Lage im Raum stark variieren. Um diese Heterogenität in den Klimaanalyse- bzw. Planungshinweiskarten darstellen zu können, wurden Blockflächen anhand ihrer Nutzungsinformationen unterschieden und ihnen jeweils die Ergebnisse der Klimaparameter aus der Modellrechnung zugeordnet (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Kaltluftvolumenstrom, PET).

Die Klimaanalysekarte[3] für die Nachtsituation bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches im gesamten Untersuchungsraum ab (Strömungsfeld, Kaltluftleitbahnen). Für Siedlungs- und Gewerbeflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar, basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer autochthonen Sommernacht um 04:00 Uhr morgens. Für die Tagsituation wurde eine separate Klimaanalysekarte erstellt, die die Wärmebelastung auf Grün-, Siedlungs- und Gewerbeflächen zeigt. Außerhalb des Stadtgebiets erlauben die Ergebnisse der Modellrechnung aufgrund der geringeren räumlichen und qualitativen Auflösung der Eingangsdaten zwar eine Darstellung des Prozessgeschehens, lassen jedoch keine tiefergehende Analyse bzw. Ableitung flächenkonkreter Maßnahmen zu (insbesondere am Rand des Untersuchungsgebiets).

5.2 NACHTSITUATION

5.2.1 ELEMENTE DER KLIMAANALYSEKARTE NACHTSITUATION

Die nächtliche Überwärmung der Siedlungsflächen beruht auf dem Temperaturunterschied zu unversiegelten Grünflächen im Stadtgebiet (Stadtgrenze Mönchengladbach), die unter den angenommenen Bedingungen eine mittlere Lufttemperatur von 14,5 °C aufweisen. Der ***Wärmeinseleffekt*** ergibt sich als Abweichung von diesem Bezugswert und stellt somit eine geeignetere Kenngröße zur Erfassung des Stadtklimaeffekts dar als absolute Temperaturwerte.

Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der ***Kaltlufteinwirkbereich*** kennzeichnet das bodennahe Ausströmen der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer autochthonen Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Einwirkbereich befindliche Bebauung in der Nacht vergleichsweise günstigere Verhältnisse aufweist. Kaltlufteinwirkbereiche werden durch Windgeschwindigkeiten von mindestens 0,1 m/s innerhalb der Bebauung definiert und sind in der Klimaanalysekarte durch Schraffur gekennzeichnet. Dabei erfolgt die Darstellung rastergenau auf Ebene der Modellergebnisse, d.h. ggf. werden nur Teile einer Blockfläche als Kaltlufteinwirkbereich ausgewiesen.

Grün- und Freiflächen werden hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert. Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten insbesondere unversiegelte Freiflächen (z.B. Ackerflächen) sowie durch aufgelockerten Vegetationsbestand geprägte Grünflächen wie z.B. Parkareale, Kleingärten und Friedhofsanlagen (sowohl innerhalb als auch außerhalb der Siedlungsräume), doch auch Wälder können als Kaltluftentstehungsgebiete fungieren. Für die Charakterisierung der Ausgleichsleistung wird in der

[3] Die Klimaanalysekarte ersetzt nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 die ehemalige synthetische Klimafunktionskarte (VDI 2014).

Klimaanalysekarte der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Er drückt den Zustrom von Kaltluft aus den benachbarten Rasterzellen aus (vgl. Kapitel 4.4).

In der Klimaanalysekarte wird das Prozessgeschehen des Kaltlufthaushalts dargestellt, d.h. der Kaltluftvolumenstrom wird in Form quantitativer Angaben in abgestufter Flächenfarbe abgebildet, ohne eine Bewertung vorzunehmen. Zudem werden über Grünflächen ***Flurwinde*** ab einer (als wirksam angesehenen) Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s durch Pfeilsignatur in Hauptströmungsrichtung gezeigt, sofern sie eine bedeutende Rolle für das Kaltluftprozessgeschehen spielen.

Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale, Wasserflächen und breite Straßenräume. Da Leitbahnen selbst ebenfalls Kaltluft produzieren können, lassen sich Freiflächen, von denen Kaltluft direkt in die Bebauung strömt, nicht immer trennscharf abgrenzen von Leitbahnen, die als mehr oder weniger reine „Transportwege“ fungieren. Kaltluftleitbahnen sind vorwiegend thermisch induzierte und auf das Siedlungsgebiet ausgerichtete linienhafte Strukturen, die Flurwinde in das Stadtgebiet hineintragen, während Kaltluftabflüsse flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auftreten.

Kaltlufteinzugsgebiete kennzeichnen Grünflächen mit einem überdurchschnittlichen Kaltluftvolumenstrom, die Kaltluftleitbahnen speisen (Flurwinde zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. über diese hinaus bis in das Siedlungsgebiet reichen.

5.2.2 DIE KLIMAANALYSEKARTE NACHTSITUATION FÜR MÖNCHENGLADBACH

Die mittlere nächtliche Lufttemperatur über allen Siedlungsflächen im Stadtgebiet liegt bei 18,6 °C. Bei Betrachtung der Flächenanteile zeigt sich, dass fast 95 % der bebauten Flächen einen Wärmeinseleffekt von > 2 °C aufweisen, und mehr als die Hälfte sogar > 4 °C (Abbildung 14). Die Anteile beziehen sich auf Siedlungsflächen innerhalb des Stadtgebiets, wobei aufgelockerte Areale mit Einzel- und Reihenhausbebauung tendenziell durch eine geringere und Gewerbeflächen sowie Zentrums- bzw. Block(rand)bebauung durch eine stärkere Überwärmung geprägt sind (Abbildung 15). 49 % der Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gelten als Kaltlufteinwirkbereich.

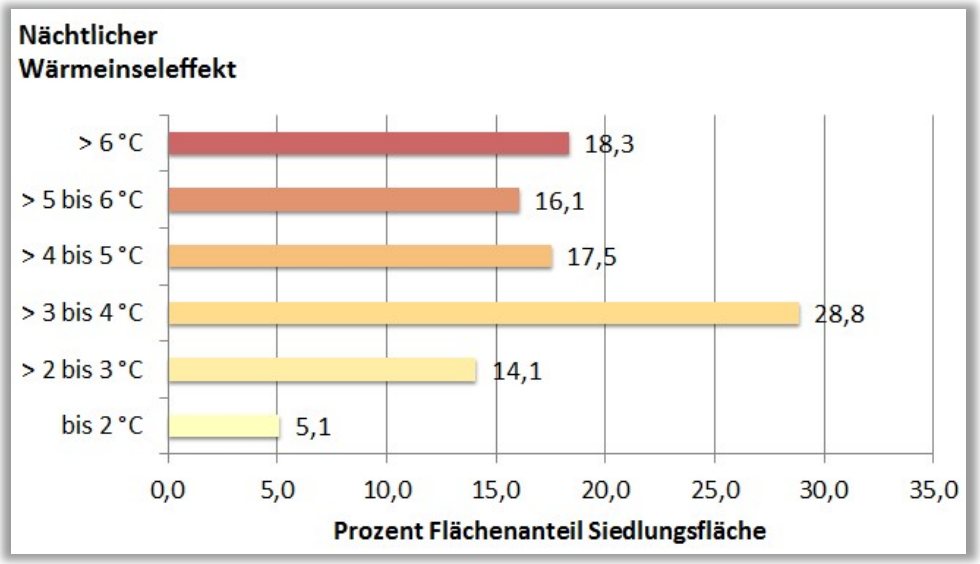


Abbildung 14 Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungsraum

Das Stadtgebiet von Mönchengladbach wird aus mehreren Himmelsrichtungen von Kaltluftströmungen erreicht. Es gibt wenige (leitbahntypische) linienhafte Grünstrukturen, die in Richtung Kernstadt hineinreichen. Dennoch sind einige Grünflächen mit ausgeprägtem Kaltlufttransport in die überwärmten Siedlungsgebiete festzustellen. Von Westen hier sind vier prägnante Kaltluftleitbahnen auszumachen: an der Grenze zwischen den Stadtteilen Venn und Holt fließen bis zu über 450 m³/s (pro 25 m Rasterzelle) von den Acker- / Freiflächen über die Sportanlagen und Kleingärten in das Gewerbegebiet an der Monschauer Straße und darüber hinaus in das nördlich davon gelegene Wohngebiet in Waldhausen. Zwei weitere westliche Leitbahnen werden aus den landwirtschaftlichen Flächen östlich der Autobahn 61, zwischen Pongs und Holt, gespeist. Von dort ist einerseits ein Kaltluftstrom über den Friedhof Rheydt ins Stadtteil Schrieveres, sowie andererseits über die Grün- und Kleingartenflächen an der Monschauer Straße nach Ohler zu verzeichnen. Als „Trittstein“ dienen die Grünflächen entlang der Konradstraße: hier kann die Kaltluft im weiteren Verlauf bis nach Dahl an die Rheydter Straße transportiert werden. In Eicken im Nordwesten der Stadt strömt die auf den Flächen des Städtischen Hauptfriedhofs und umgebenden Freiflächen entstehende Kaltluft entlang des Grünstreifens an den Bahngleisen südlich des Nordwalds, in das Wohngebiete an der Bergstraße, sowie in Fortsetzung über die Freiflächen zwischen der Hovener Straße und den Bahngleisen bis nach Neuwerk-Mitte hinein.

Von Osten ist eine Leitbahn von den Freiflächen um Schloss Rheydt in Richtung der Einzel- und Reihenhausbebauung in Hardterbroich-Pesch sowie dem Gewerbegebiet Mitte auszumachen.

Im Südosten der Stadt ist ein in Richtung Stadtgebiet relativ großes Gefälle zu finden (noch größere Höhenunterschiede bestehen im Nordosten des Untersuchungsgebietes, dort zeigt die Fallrichtung aber nicht in Richtung Stadtgebiet, ist also für die Kaltluftversorgung irrelevant). Hier sind vier Kaltluftleitbahnen verzeichnet: Von Süden in Richtung der Mülforter Straße (vgl. auch Kapitel 4.3.2), von Südost über den Tiergarten und Beller Bruch sowie von den Freiflächen in Sasserath über den Friedhof an der Wiedemannstraße nach Odenkirchen-Mitte hinein und ins Gewerbegebiet Oppelner Straße.

Der Grünflachenverbund zwischen Städtischem Hauptfriedhof und Buntem Garten erstreckt sich am Nordrand des Stadtgebiets linienförmig in Richtung Kernstadt und erfüllt somit typische Eigenschaften einer Kaltluftleitbahn. Allerdings verhindert der hohe Bewuchs (welcher eine hohe Aufenthaltsqualität am Tage und damit eine große Erholungsfunktion bietet) einen ausgeprägten Kaltlufttransport und damit die Identifizierung als Kaltluftleitbahn.

Die in Hauptwindrichtung (südwestlich bis westlich) orientierten Kaltluftleitbahnen dienen auch während allochthoner Wetterlagen mit übergeordneten Windfeldern als wichtige Ventilationsbahnen.

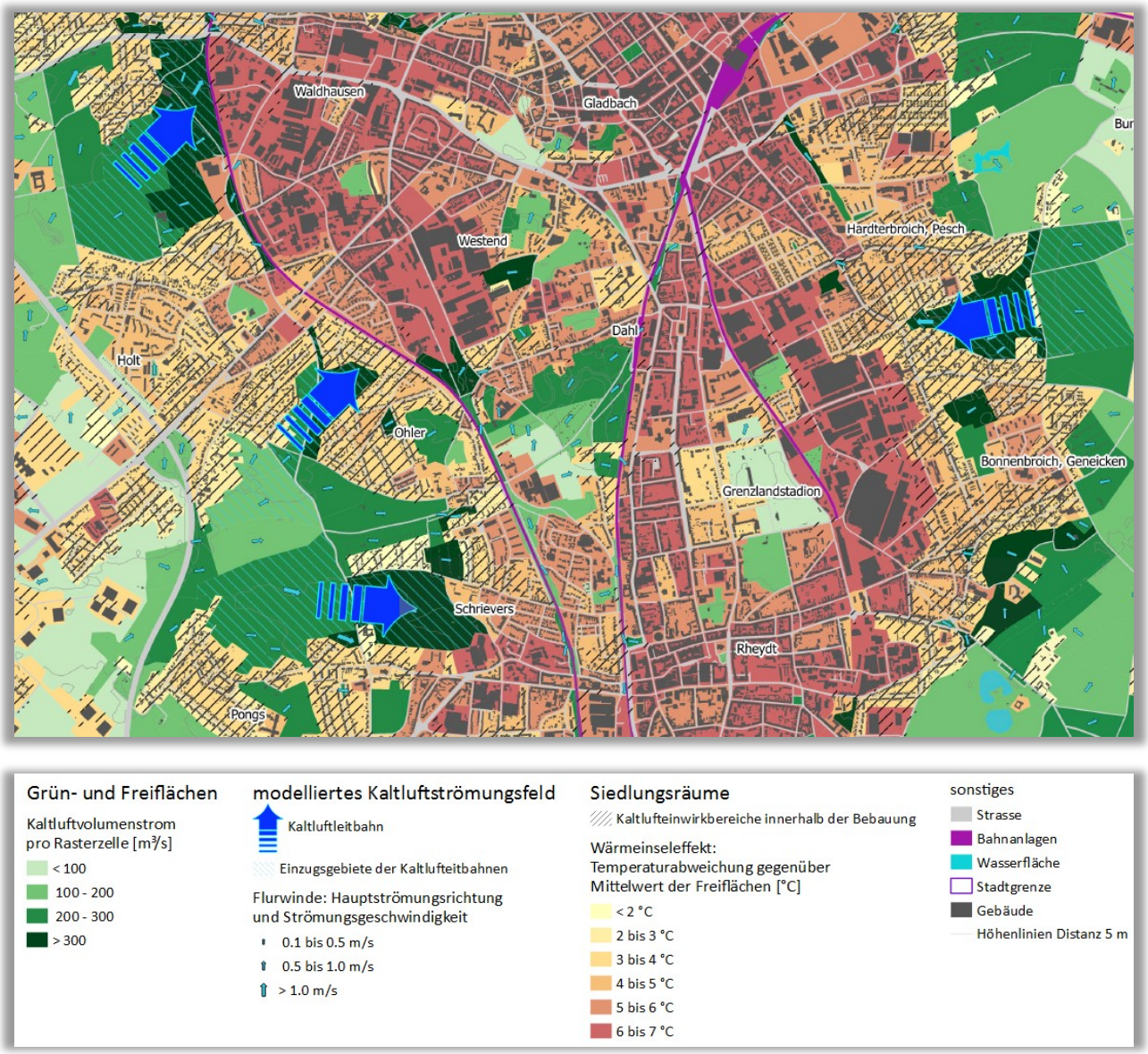


Abbildung 15 Klimaanalysekarte Nachtsituation für einen Ausschnitts des Stadtgebiets

5.3 TAGSITUATION

Zur Bestimmung der ***Aufenthaltsqualität am Tage*** ist die PET, als thermischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung, der maßgebende Parameter (vgl. Kapitel 4.5). Die Wärmebelastung wird in der Klimaanalysekarte für die Tagsituation sowohl für Grünflächen als auch für den Siedlungs- und Gewerberaum quantitativ dargestellt. Die Einteilung orientiert sich dabei an den physiologischen Belastungsstufen nach VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9 (vgl. Tabelle 2 auf S. 26).

Die Siedlungsflächen Mönchengladbachs weisen unter den gegebenen Annahmen eines Strahlungstages tagsüber größtenteils eine *starke Wärmebelastung auf* (Abbildung 16), Gewerbeflächen sogar überwiegend mit Temperaturen über 39,5°C, was auf den geringen Grünanteil und den insbesondere bei Gewerbeflächen meist relativ hohen Versiegelungsgrad zurückzuführen ist. Siedlungsflächen mit höchstens *mäßiger Wärmebelastung* stellen eine Ausnahme dar – dabei handelt es sich um aufgelockerte Flächen mit erhöhtem Grünanteil, die häufig am Siedlungsrand und in der Nähe von Wäldern oder Gewässern liegen, so

z. B. das ehemalige NATO-Hauptquartier in Rheindahlen sowie Hardt oder Wickrathberg. Weitere Beobachtungen zur räumlichen Verteilung der PET am Tage sind dem Kapitel 4.5.1 zu entnehmen.

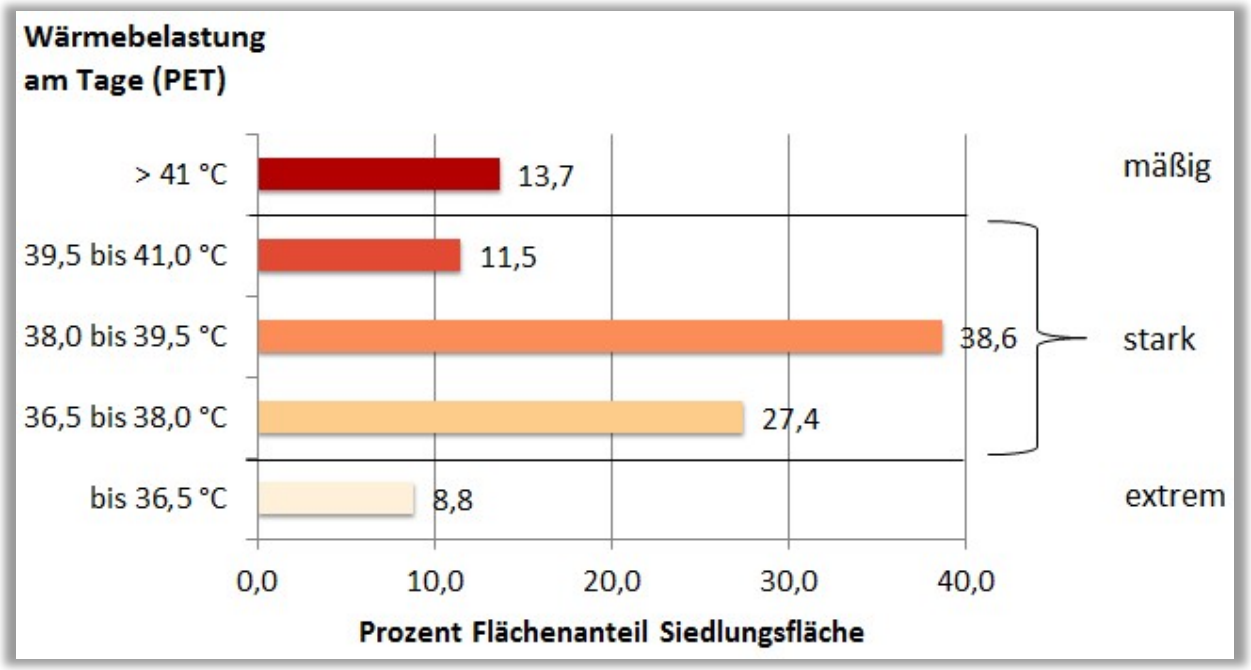
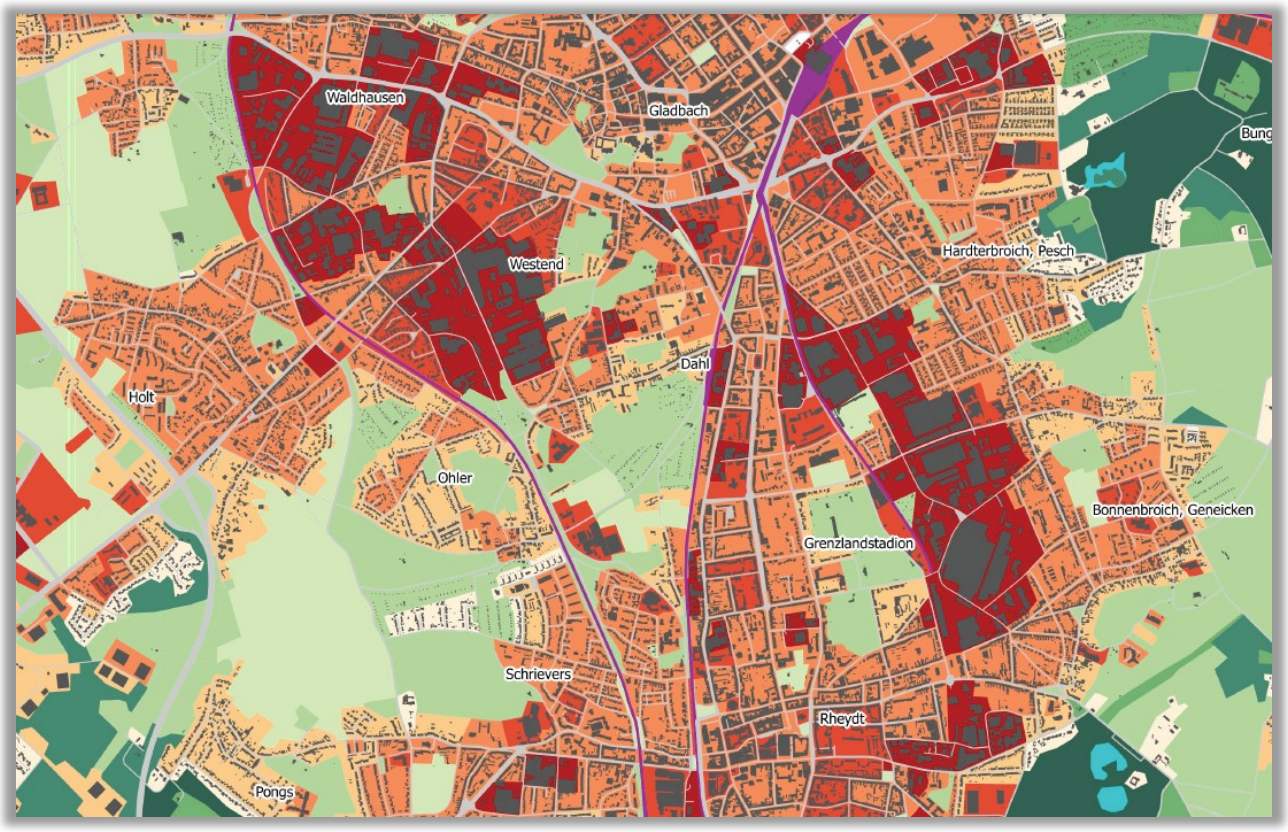


Abbildung 16 Flächenanteile der Wärmebelastung am Tage im Siedlungsraum

Bei den Grünflächen ist die geringste Wärmebelastung in Waldgebieten zu finden, welches ihrer schattenspendenden Wirkung in Bezug auf das Aufenthaltsniveau des Menschen in 2 m ü. Gr. zugeschrieben werden kann. *Starke bis extreme Wärmebelastungen* finden sich über den großen Freiflächen im Außenbereich (Ackerflächen). Die übrigen Flächen, insbesondere im Kernstadtbereich, weisen größtenteils eine *starke Wärmbelastung* auf, wobei diese wesentlich über den Anteil an (schattenspendenden) Grünstrukturen gesteuert wird. Begrünte, unversiegelte Innenhöfe sind am Tage die kühlsten Aufenthaltsorte in der Kernstadt. Sie sind aufgrund des mesoskaligen Untersuchungsansatzes nicht explizit abgebildet, haben aber – solange sie groß genug sind um im Raster der Eingangsdaten berücksichtigt zu werden – kühlenden Einfluss auf den jeweiligen Siedlungsblock.



Grün- und Freiflächen

bioklimatische Situation, basierend auf der PET um 14 Uhr

< 27.0 °C	Schwache Wärmebelastung
27.0 - 31.0 °C	Mäßige Wärmebelastung
31.0 - 35.0 °C	
35.0 - 39.0 °C	Starke Wärmebelastung
> 39.0 °C	Starke bis extreme Wärmebelastung

Siedlungsräume

bioklimatische Situation, basierend auf der PET um 14 Uhr

< 36.5 °C	Mäßige Wärmebelastung
36.5 - 38.0 °C	Starke Wärmebelastung
38.0 - 39.5 °C	
39.5 - 41.0 °C	
> 41.0 °C	Extreme Wärmebelastung

sonstiges

- Strasse
- Bahngleis
- Wasserfläche
- Gebäude
- Stadtgrenze

Abbildung 17 Klimaanalysekarte Tagsituation für einen Ausschnitts des Stadtgebiets

6 Planungshinweiskarten

6.1 METHODE

Analog zu den Klimaanalysekarten wurde jeweils eine separate Planungshinweiskarte (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils nur auf das Stadtgebiet Mönchengladbachs beziehen. In Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 erfolgte eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen als ***Wirkungsraum*** bzw. der Bedeutung von Grünflächen als ***Ausgleichsraum*** (VDI 2008a, VDI 2015). Da sich sämtliche Bewertungen ausschließlich auf Wirkungsräume innerhalb des Stadtgebietes beziehen, ist der Außenbereich nicht dargestellt. Den Flächen werden ausgehend von ihren Bewertungen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben.

Die Modellergebnisse und Klimaanalysekarten bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage. Die Bewertung in den Planungshinweiskarten fußt dagegen auf den relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um losgelöst von einer bestimmten Wetterlage Belastungen beschreiben und Planungshinweise ableiten zu können.

6.1.1 STANDARDISIERUNG DER PARAMETER (Z-TRANSFORMATION)

Nicht immer ist ersichtlich, aufgrund welcher Kriterien eine Klassifizierung in Kategorien wie bspw. *Hoch* und *Gering* bzw. *Günstig* und *Ungünstig* erfolgt. Daher bedarf es für die qualitative Bewertung von Klimafaktoren eines begründeten nachvollziehbaren Maßstabes. In der VDI-Richtlinie 3785, Blatt 1 wird daher vorgeschlagen, für eine Beurteilung das lokale bzw. regionale Werteniveau der Klimaanalyse zugrunde zu legen und die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab heranzuziehen (VDI 2008a).

Zur besseren Vergleichbarkeit der Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen wurden die Parameter über eine ***z-Transformation*** standardisiert. Von jedem Ausgangswert der Variablen wird dazu das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt. Hieraus ergeben sich Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert (= 0) und positive sowie negative Standardabweichungen (S_i) von diesem Mittelwert festgelegt sind. Standardmäßig entstehen so vier Bewertungskategorien, die durch Mittelwert, obere und untere S_1-Schranke voneinander abgegrenzt sind (Abbildung 18).

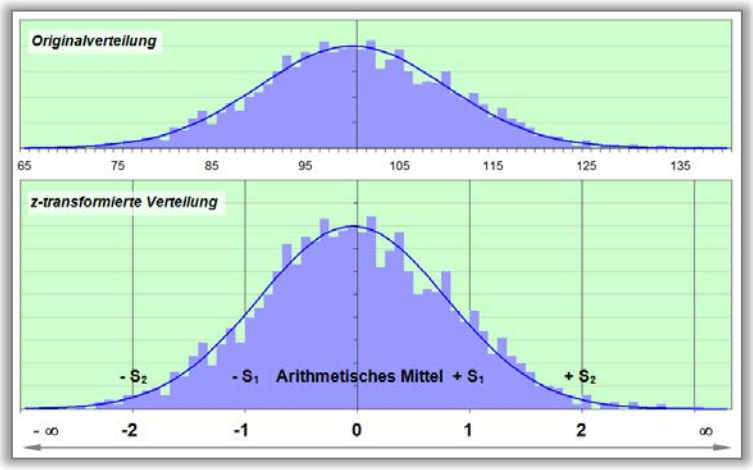


Abbildung 18 Veranschaulichung der Standardisierung zur Bewertung von Parametern (z-Transformation)

6.1.2 BEWERTUNG DER SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN (WIRKUNSGRAUM)

Der Siedlungsraum stellt den primären Wirkungsraum des stadtklimatischen Prozessgeschehens dar. Im Folgenden wird die Herleitung der bioklimatischen Belastungssituation geschildert.

In der **Nacht** ist weniger der Aufenthalt im Freien Bewertungsgegenstand, sondern vielmehr die Möglichkeit eines erholsamen Schlafes im Innenraum. Die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 weist darauf hin, dass die „Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe“ für die Bewertung der Nachtsituation darstellt und näherungsweise ein direkter Zusammenhang zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden kann (VDI 2008b, 25). Als optimale Schlaftemperaturen werden gemeinhin 16 - 18 °C angegeben (UBA 2016), während *Tropennächte* mit einer Minimumtemperatur ≥ 20 °C als besonders belastend gelten. Eine mit der PET vergleichbare Bewertungsskala existiert für die nächtliche Situation im Innenraum (noch) nicht.

Für die Planungshinweiskarte erfolgte die räumlich differenzierte Bewertung der Nachtsituation daher über die nächtliche Überwärmung. Abweichend zur Klimaanalysekarte liegt der Bewertung eine z-Transformation zugrunde, um die relativen Unterschiede im Stadtgebiet zu erfassen. Dabei wurde die bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen zur besseren Differenzierung in Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig* eingeteilt (Tabelle 4). Zu den standardmäßig vier Bewertungskategorien (definiert durch Mittelwert, obere (z = 1) und untere (z = -1) Schranke wurde für die sehr ungünstige bioklimatische Situation eine fünfte Kategorie erstellt (beginnend bei z = 2). Auch Gewerbeflächen wurden hinsichtlich ihrer bioklimatischen Situation klassifiziert, doch spielt deren Belastungssituation aufgrund der geringen Betroffenenzahlen in der Nacht eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu Wohnbauflächen.

Mittlerer z-Wert	**Temperatur** [°C] (04:00 Uhr)	**Qualitative Einordnung der bioklimatischen Situation (Funktion Schlafen)**
bis -1,0	<= 16,8	1 = Sehr günstig
> -1,0 bis -0,0	> 16,8 bis 18,2	2 = Günstig
> 0,0 bis 1,0	> 18,2 bis 19,5	3 = Weniger günstig
> 1,0 bis 2,0	> 19,5 bis 20,9	4 = Ungünstig
> 2,0	> 20,9	5 = Sehr ungünstig
Mittelwert (± sd)	18,2 (± 1,4)	

Tabelle 3: Einordnung der bioklimatischen Belastung im Siedlungs- und Gewerberaum in der Nacht (Lufttemperatur) und Flächenmittelwert sowie Standardabweichung (sd) der meteorologischen Parameter für die entsprechenden Flächen im Stadtgebiet Mönchengladbachs.

Zur Bewertung der **Tagsituation** wurde der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (vgl. Tabelle 2 auf S. 26; VDI 2004). Die Bewertung der thermischen Belastung im Stadtgebiet Mönchengladbachs orientiert sich daran, basiert jedoch letztlich auf einer z-Transformation, um das Verhältnis zwischen den Flächen im Stadtgebiet darstellen zu können (wiederum in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig*; Tabelle 4).

Die bioklimatische Bewertung am Tage ist ein Maß für die Aufenthaltsqualität in den Siedlungsflächen außerhalb von Gebäuden. Dieses übt einen gewissen Einfluss auf die Situation innerhalb der Gebäude aus, doch hängt das Innenraumklima von vielen weiteren Faktoren ab und kann hier nicht bestimmt werden.

Mittlerer z-Wert	PET [°C] (14:00 Uhr)	Qualitative Einordnung der bioklimatischen Situation (Aufenthaltsqualität am Tage)
bis -1,5	<= 36,1	1 = Sehr günstig
> -1,5 bis -0,5	>36,1 bis 37,8	2 = Günstig
> -0,5 bis 0,5	>37,8 bis 39,5	3 = Weniger günstig
> 0,5 bis 1,5	>39,5 bis 41,1	4 = Ungünstig
> 1,5	> 41,1	5 = Sehr ungünstig
Mittelwert (± sd)	38,6 (± 1,7)	

Tabelle 4: Einordnung der bioklimatischen Belastung im Siedlungs- und Gewerberaum am Tage (PET) und Flächenmittelwert sowie Standardabweichung (sd) der meteorologischen Parameter für die entsprechenden Flächen im Stadtgebiet Mönchengladbachs.

6.1.3 BEWERTUNG DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSRAUM)

Im Gegensatz zur Klimaanalysekarte stehen in der Planungshinweiskarte die stadtklimatische Bedeutung von Grünflächen sowie die Ableitung deren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika bedarf es in Hinblick auf planungsrelevante Belange einer Analyse der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichraum-Systeme im Untersuchungsgebiet. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb der Freiräume entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Für die Bewertung der bioklimatischen Bedeutung von grünbestimmten Flächen wurde ein teilautomatisiertes Verfahren angewendet, das sich wie folgt skizzieren lässt.

Die Grünflächen wurden für die Tag- und Nacht-Situation getrennt bewertet und in vier Stufen von *Geringe* bis *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* eingeteilt. Die Bewertung ist anthropozentrisch ausgerichtet, d.h. Flächen, die für den derzeitigen Siedlungsraum (bezogen auf die Stadtgrenzen Mönchengladbachs) keine Funktion erfüllen bzw. keinen Ausgleichsraum darstellen, wurden gering bewertet[4]. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden.

Für die Bewertung von Grünflächen in der **Nacht** rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten Kaltluftentstehungsgebiete bzw. Grünflächen als Teil einer Kaltluftleitbahn die höchste Bedeutung. Auch die Menge der über einer Fläche strömenden Kaltluft spielt eine Rolle. Dazu wurde der Kaltluftvolumenstrom via z-Transformation in vier Klassen von *Gering* bis *Sehr hoch* eingeteilt (Tabelle 5)).

[4] Selbst ohne Siedlungsbezug bzw. Funktion für das Kaltluftprozessgeschehen sind Grünflächen aus stadtklimatischer Sicht bebauten Flächen zu bevorzugen, sodass die Klasse *Sehr geringe Bedeutung* nicht vergeben wurde.

Mittlerer z-Wert	**Kaltluftvolumenstrom** (04:00 Uhr) [$m^3 s^{-1}$ pro Rasterzelle]	Qualitative Einordnung
bis -1	bis 70	Gering
> -1 bis 0	> 70 bis 174	Mittel
> 0 bis 1	> 174 bis 277	Hoch
> 1	> 277	Sehr hoch

Tabelle 5: Einordnung des Kaltluftvolumenstroms (z-Transformation)

Zusätzlich wurde die Entfernung zu belasteten Siedlungsräumen berücksichtigt – da in der Nachtsituation die Möglichkeit eines erholsamen Schlafs im Vordergrund steht, wurden dabei der Bewertung nur Siedlungsflächen ohne Gewerbe zugrunde gelegt.

Im Einzelnen wurde folgender Bewertungsschlüssel verwendet (vgl. vereinfachte Darstellung in Abbildung 19):

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung (4)

a) Grünflächen, die Teil einer *Leitbahn* bzw. des dazugehörigen *Kaltluftentstehungsgebietes* sind.

Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche erfolgte manuell und orientierte sich an der Ausprägung des autochthonen Strömungsfeldes der FITNAH-Simulation. Auch Grünflächen, die als Kaltluftentstehungsgebiete auf das Stadtgebiet ausgerichtete Leitbahnen speisen, sind von besonderer Bedeutung.

b) Freiflächen bzw. ≥ 1 ha große Grünflächen im Nahbereich von Siedlungsflächen mit Sehr ungünstiger oder Ungünstiger (bis 250 m Entfernung) bzw. Mittlerer bioklimatischen Situation (bis 100 m).

Grünflächen im Umfeld belasteter Siedlungsräume kommt grundsätzlich eine hohe Bedeutung zu. Zusätzlich zu ihrem Kaltluftliefervermögen wirken sie ausgleichend auf das thermische Sonderklima im meist dicht bebauten Umfeld. Je stärker der Siedlungsraum belastet ist, desto wichtiger sind Grünflächen als Ausgleichsräume, sodass die tolerierbare Entfernung zu diesen gewichtet wurde. Umso größer eine Grünfläche ist, desto weiter reichen ihre ausgleichenden Effekte in das angrenzende Siedlungsgebiet (vgl. Kuttler 2011).

Hohe bioklimatische Bedeutung (3)

c) Grünflächen < 1 ha mit mindestens *Mittlerem Kaltluftvolumenstrom (KVS)* im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 100 m).

d) Freiflächen bzw. ≥ 1 ha große Grünflächen im Umfeld von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 500 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 250 m).

e) Jeweils ≥ 1 ha große Grünflächen mit *Sehr hohem* bzw. Freiflächen mit mindestens *Hohem KVS* und Siedlungsbezug (außerhalb des in d) genannten Entfernungsbereichs, jedoch in maximal 1 km Entfernung zu Siedlungsgebieten).

Auch ohne Leitbahn-Funktion während autochthoner Sommernächte und direkten Siedlungsbezug können Grünflächen, darunter vor allem Freiflächen, während anderer Wetterlagen eine wichtige Rolle für die Durchlüftung einer Stadt einnehmen.

Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)

f) Grünflächen < 1 ha mit *Geringem KVS* im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 100 m).

Innerhalb vom Belastungsräumen sind auch Grünflächen ohne Funktion für den Kaltlufthaushalt wertvoll, da sie sich am Tage weniger stark aufheizen und entsprechend in der Nacht weniger Wärme abgeben.

g) Grünflächen < 1 ha mit mindestens *Mittleren KVS* im Umfeld von Siedlungsflächen mit *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* (bis 500 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 250 m).

h) Jeweils ≥ 1 ha große Grünflächen mit *Mittleren* oder *Hohem KVS* bzw. übrige Freiflächen mit Siedlungsbezug (vgl. e)).

i) Übrige Grünflächen mit mindestens *Hohem Kaltluftvolumenstrom*.

Geringe bioklimatische Bedeutung (1)

j) Übrige Grünflächen, die keine der genannten Kriterien erfüllen.

Abbildung 19 Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen in der Nacht

Für die **Tagsituation** basiert die Bewertung der Grünflächen im Verhältnis zu belasteten Wohn- und Gewerbeflächen hauptsächlich auf zwei Faktoren: der Entfernung – und der Erreichbarkeit/Nutzbarkeit – von kühleren Erholungsräumen. Im Unterschied zur Nachtsituation ist eine möglichst hohe Aufenthaltsqualität auch im Umfeld von Gewerbeflächen relevant, um den Beschäftigten Rückzugsorte bei Pausen oder Frischluftzufuhr beim Lüften zu bieten. Insbesondere Bäume können durch ihren Schattenwurf für ein angenehmeres Aufenthaltsklima sorgen, da der höhere Bewuchs den Strahlungseinfluss deutlich vermindert. Aus diesem Grund wird z. B. Wäldern innerhalb belasteter Räume stadtklimatisch grundsätzlich eine mindestens hohe Bedeutung zugewiesen. Im Einzelnen liegt der Einstufung folgender Bewertungsschlüssel zugrunde (vgl. vereinfachte Darstellung in Abbildung 20).

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung (4)

a) Grünflächen, die im Bereich von Wohn-/Gewerbeflächen mit einer *Sehr ungünstigen* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Ungünstigen bioklimatischen Situation* liegen (bis 100 m).

Grünflächen im Umfeld belasteter Siedlungsräume kommt grundsätzlich eine hohe Bedeutung zu. Je stärker ein Siedlungsraum belastet ist, desto wichtiger sind schattenspendende Grünflächen als Rückzugsorte, sodass die Maximal-Entfernung zu diesen entsprechend differenziert wird.

Hohe bioklimatische Bedeutung (3)

b) Grünflächen, die im Bereich von Wohn-/Gewerbeflächen mit einer *Sehr ungünstigen* (> 250 - 500 m Entfernung) bzw. *Ungünstigen bioklimatischen Situation* liegen (> 100 - 250 m).

c) Wald- und Forstflächen die die Anforderungen von a) nicht erfüllen.

Wälder stellen aufgrund ihres dichten Baumbestandes (zumeist größere) Flächen mit deutlich herabgesetzter Wärmebelastung dar und können am Tag als Rückzugsorte dienen. Waldflächen, die nahe des Siedlungsraumes liegen, wird eine besonders hohe Bedeutung zugesprochen.

Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)

d) Grünflächen (ohne Wald- und Forstflächen), die im Bereich von Wohn-/Gewerbeflächen mit einer *Ungünstigen* (> 250 - 500 m Entfernung) bzw. *Weniger günstigen bioklimatischen Situation* liegen (bis 250 m).

e) Wald- und Forstflächen die außerhalb aller vorgenannten Kategorien liegen.

Die Bedeutung von Waldflächen am Tage ist auch dann als hoch einzustufen, wenn sie nicht im unmittelbaren Siedlungsraum liegen.

f) Unversiegelte Freiflächen ohne oder mit geringem Vegetationsbestand die innerhalb der in a), b) oder d) ermittelten Flächen liegen

Aufgrund der ungehinderten Einstrahlung heizen sich unversiegelte, insbesondere trockene, Freiflächen am Tage ähnlich stark auf wie versiegelte Flächen, sodass ihnen keine hohe Bedeutung zugewiesen werden kann. Freiflächen können jedoch bei übergeordnetem Luftaustausch durchströmt werden und so für Durchlüftung sorgen, sodass Freiflächen innerhalb belasteter Siedlungsräume eine mittlere Bedeutung zugesprochen wird.

Geringe bioklimatische Bedeutung (1)

g) Grünflächen inkl. unversiegelte Freiflächen, die keine der oben genannten Kriterien erfüllen

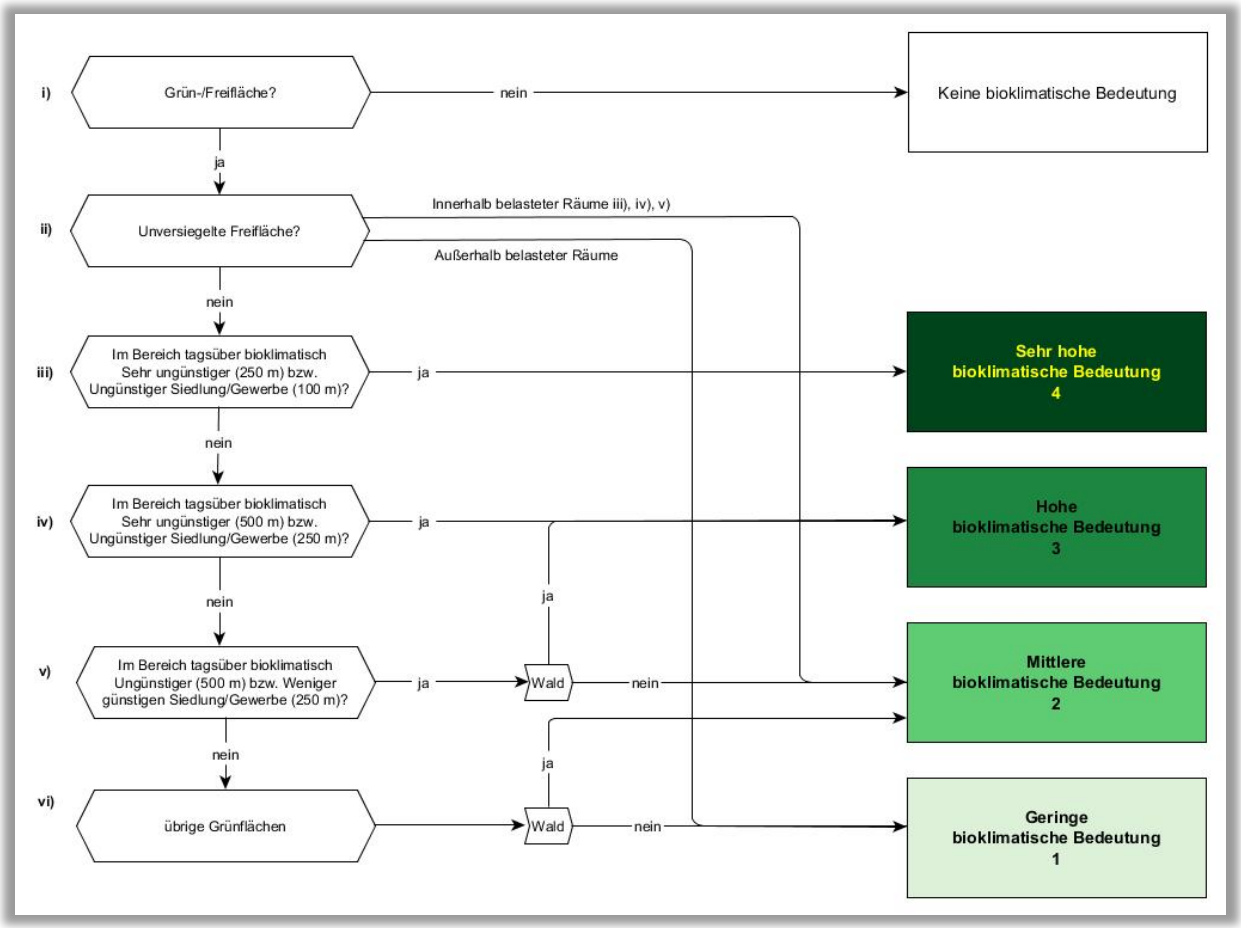


Abbildung 20 Bewertungsschema zur bioklimatischen Bedeutung von Grünflächen am Tage

6.2 BEWERTUNG DER KLIMATISCHEN SITUATION IM STADTGEBIET MÖNCHENGLADBACH

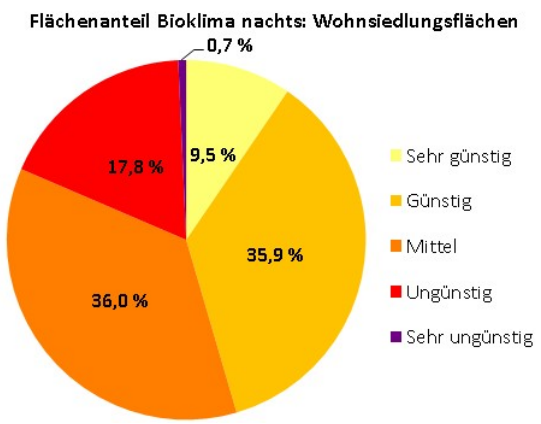
6.2.1 NACHTSITUATION

Flächen mit einer *(sehr) ungünstigen bioklimatischen Situation* machen unter reinen (Wohn-)Siedlungen einen geringen Anteil von 18,5 % aus und betreffen große Bereiche der innenstädtischen Stadtteile (Abbildung 23, Tabelle 6). Mit zunehmender Entfernung zum Kernbereich verbessert sich die bioklimatische Situation tendenziell (36,0 % der Wohnflächen weist eine *mittlere bioklimatische Situation* auf). Im gering besiedelten und durch einen höheren Grünanteil geprägten Rand- und Außenbereich herrschen überwiegend *günstige* bis *sehr günstige* Verhältnisse vor (9,5 % bzw. 35,9 % der Gesamt-Wohngebietsfläche).

Bei den Gewerbeflächen verschieben sich die Flächenanteile deutlich. Der typischerweise hohe Versiegelungsgrad und der geringe Grünanteil sorgen nachts für eine starke Überwärmung, so dass 37,2 % der Flächen eine *sehr ungünstige* bzw. 46,4 % eine *ungünstige* Situationen einnehmen. (Abbildung 23, Tabelle 6). In der Kategorie der Gewerbeflächen sind auch alle weiteren nicht wohnlich genutzten Siedlungsflächen (d. h. Flächen für Bildung, Sport und Freizeit) zusammengefasst. Letztere fallen bei den Flächenanteilen aber kaum ins Gewicht.

Bioklimatische Situation in den Siedlungsflächen, nachts	Flächenanteil [%] Wohnen	Gewerbe	Allgemeine Planungshinweise
1 = Sehr günstig	9,5	1,1	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung / Bebauung unter Beachtung klimaökologischer Belange. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Bei baulichen Maßnahmen sollte der Vegetationsanteil soweit möglich erhalten werden, um das sehr günstige Bioklima zu sichern.
2 = Günstig	35,9	2,7	Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung / Bebauung unter Beachtung klimaökologischer Belange. Das günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht notwendig. Freiflächen und der Vegetationsanteil sollten möglichst erhalten bleiben.
3 = Mittel	36,0	12,5	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung / Bebauung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen: Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen sollten erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
4 = Ungünstig	17,8	46,4	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung / Bebauung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig, vor allem durch Entsiegelung, Verschattung, Erhöhung des Vegetationsanteils. Es sollte keine weitere Verdichtung (besonders zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen. Freiflächen sollten erhalten bleiben und wo möglich vernetzt werden, um die Durchlüftung zu gewährleisten.
5 = Sehr ungünstig	0,7	37,2	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung / Bebauung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (besonders zu Lasten von Grün-/ Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z. B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Tabelle 6: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise.



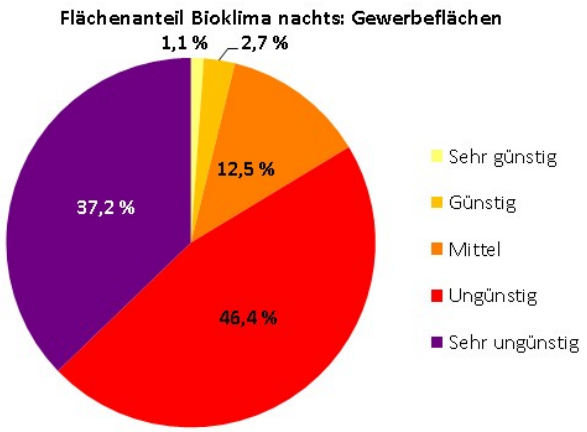


Abbildung 21 Flächenanteile der Bioklima Kategorien in der Planungshinweiskarte nachts jeweils für Wohnsiedlungsflächen (links) und Gewerbeflächen (rechts)

Wie bereits erwähnt, steht nachts die Belastung in Wohnsiedlungsflächen im Vordergrund und Maßnahmen sind vor allem für den Erhalt bzw. möglichst die Verbesserung der Situation in belasteten Flächen nötig. Doch sollten aufgrund der hohen Belastungen Gewerbeflächen nicht außer Acht gelassen werden, insbesondere da sie im Stadtgebiet von Mönchengladbach meist einen räumlichen Bezug zu Wohnbebauungen aufweisen.

Den Grünflächen im Stadtgebiet kommt nachts etwa zur Hälfte eine *Hohe* bis *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* zuteil (Tabelle 7). Diese Bedeutung gilt in Bezug auf Wohnsiedlungsgebiete. Ebenfalls knapp die Hälfte der Grünflächen (48,0 %) weist eine mittlere Bedeutung für das nächtliche Stadtklima auf, da sie in den meisten Fällen in weiterer Entfernung zu belasteten Wohnsiedlungsräumen liegen. Nur 3,1 % der Grünflächen weisen eine *Geringe Bedeutung* auf, d.h. sie erfüllen für den derzeitigen Wohnsiedlungsraum keine Funktion für den nächtlichen Kaltlufthaushalt – mehrheitlich handelt es sich dabei um siedlungsferne Waldflächen. Generell gilt, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss.

Bedeutung der Grünflächen für die Nachtsituation	**Flächenanteil** [%]	**Allgemeine Planungshinweise**
1 = Geringe	3,1	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
2 = Mittlere	48,0	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
3 = Hohe	35,4	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und es sollte eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
4 = Sehr hohe	13,5	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten vermieden werden bzw. unter Auflage von Maßnahmen zum größtmöglichen Erhalt der Ausgleichsfunktion erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/ Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).

Tabelle 7: Flächenanteile bioklimatische Bedeutung der Grünareale im Stadtgebiet in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise

6.2.2 TAGSITUATION

Auch am Tage sind deutliche Unterschiede zwischen der Aufenthaltsqualität im Freien in Wohnsiedlungsflächen und Gewerbegebieten zu erkennen. Wohngebiete zeigen mehrheitlich eine *Mittlere bioklimatische Belastung* (55,8 %) und der Anteil *(Sehr) Günstiger* Flächen überwiegt gegenüber *Ungünstigen* (39 % gegenüber 5 %, *Sehr ungünstig* bewertete Flächen sind zu vernachlässigen (Abbildung 22, Tabelle 9). Dies liegt daran, dass die meisten Wohnflächentypen Grünflächen mit schattenspendenden Grünstrukturen aufweisen. Ein Großteil der Zentrumsbereiche unterliegt am Tage nur einer mittleren bioklimatischen Belastung. Die dichte sowie hohe Bebauung sorgt für Schattenwurf zwischen den

Gebäuden. Dennoch sind angesichts des hohen täglichen Fußgängeraufkommens Maßnahmen zur Reduzierung der Hitzebelastung bzw. Verschattung zu empfehlen.

Gewerbeflächen beinhalten dagegen oftmals große versiegelte Freiflächen, in der Regel wenige Grünflächen und eher niedrigere Gebäude, sodass die Einstrahlung und entsprechend die thermische Belastung am Tage höher ausfällt (über 90 % der Gewerbeflächen sind *Ungünstige* bzw. *Sehr ungünstige Flächen*).

Knapp 11,5 % der Grünflächen wird eine mindestens *Hohe Bedeutung* zugeschrieben, d.h. sie bieten an Sommertagen eine relativ hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich als (erreichbare) Rückzugsorte für die Bevölkerung (Tabelle 9). Die Grünflächen *Mittlerer* und vor allem *Geringer Bedeutung* liegen meist außerhalb des stark hitzebelasteten Kern- Siedlungsgebietes und sind deshalb nicht als (fußläufig erreichbarer) Erholungsraum für diese bewertet, zumal es sich hier oft um weitläufige unverschattete landwirtschaftliche Flächen handelt, die wenig Erholung von Hitzestress bieten. Aber auch einige Wiesen und Rasen(Sport-) Plätze im Stadtgebiet, die aufgrund der ungehinderten Einstrahlung keinen Rückzug erlauben, fallen in diese Kategorie.

Bioklimatische Situation in den Siedlungsflächen, tags	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Wohnen	Gewerbe	
1 = Sehr günstig	8,4	0,3	Den hohen Grünanteil gilt es jeweils möglichst zu erhalten. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
2 = Günstig	30,5	1,4	Den Grünanteil gilt es jeweils möglichst zu erhalten. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich, sollten bei wichtigen Fuß- bzw. Radwegen und Plätzen jedoch geprüft werden.
3 = Mittel	55,8	7,4	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insbesondere Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein.
4 = Ungünstig	5,1	45,5	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insbesondere Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
5 = Sehr ungünstig	0,1	45,4	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Dies gilt auch für Flächen des fließenden und ruhenden Verkehrs (insbesondere Fuß- und Radwege sowie Plätze). Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

Tabelle 8: Flächenanteile bioklimatisch belasteter Siedlungsgebiete am Tage und abgeleitete Planungshinweise

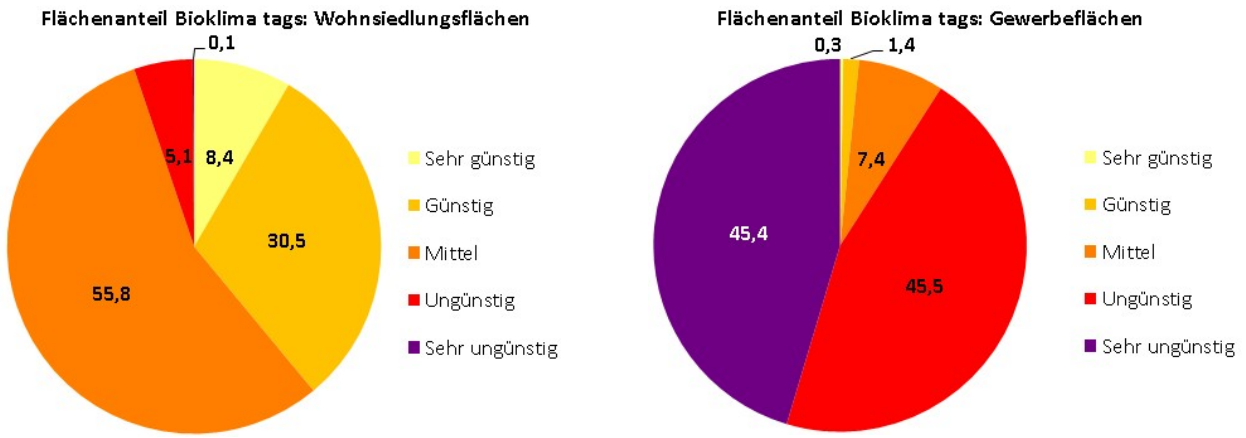


Abbildung 22 Flächenanteile der Bioklima Kategorien in der Planungshinweiskarte tags jeweils für Wohnsiedlungsflächen (links) und Gewerbelächen (rechts)

Belastungsmindernd, besonders tagsüber, wirken fußläufig erreichbare Erholungsräume in der Stadt. In den Wohnquartieren mit Einfamilien – und Reihenhausbebauung dienen die privaten Grünflächen zur Erholung. Für jeden Bewohner ohne privaten Garten wird auf internationaler Ebene empfohlen, Zugang zu Grünräumen mit mindestens 1 ha Größe in einer Entfernung von höchstens 300 m zu ermöglichen. Die Mindestgröße der Grünfläche soll eine attraktive Nutzbarkeit gewährleisten (Van den Bosch 2015 und BBSR 2017). Dabei wurden offene Grünflächen ohne Verschattung und damit von geringerer Aufenthaltsqualität (z. B. auch landwirtschaftliche Nutzflächen) ausgenommen. Siedlungsflächen ohne Erholungsraum in unmittelbarer Nähe sind in der Planungshinweiskarte (Tag) mit einem hellblau gestrichelten Rand dargestellt.

Zusätzlich sind öffentliche Einrichtungen, die vorrangig von hitzesensiblen Bevölkerungsgruppen (besonders junge und besonders alte Menschen, sowie Kranke) genutzt werden, in der Planungshinweiskarte dargestellt: Senioreneinrichtungen, Grundschulen, Kindertageseinrichtungen, Krankenhäuser, Spielplätze und Sportanlagen.

Bedeutung der Grünflächen für die Tagsituation	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
1 = Geringe	37,7	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend landwirtschaftliche Nutzflächen).
2 = Mittlere	50,7	Ergänzende klimaökologische Erholungsräume, überwiegend am Stadtrand, oder mit minderer Aufenthaltsqualität (wenig Schatten, intensive solare Einstrahlung). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
3 = Hohe	8,2	Grünflächen mit hoher Aufenthaltsqualität, die fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und schützen bzw. ggf. auszubauen. Waldflächen, die nicht in fußläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Rückzugsorte dienen können.
4 = Sehr hohe	3,4	Grünflächen mit hoher Aufenthaltsqualität, in direkter Nähe zu belasteten Siedlungsgebieten. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen, die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten. Zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/ Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).

Tabelle 9: Flächenanteile bioklimatische Bedeutung der Grünareale im Stadtgebiet am Tage und abgeleitete Planungshinweise.

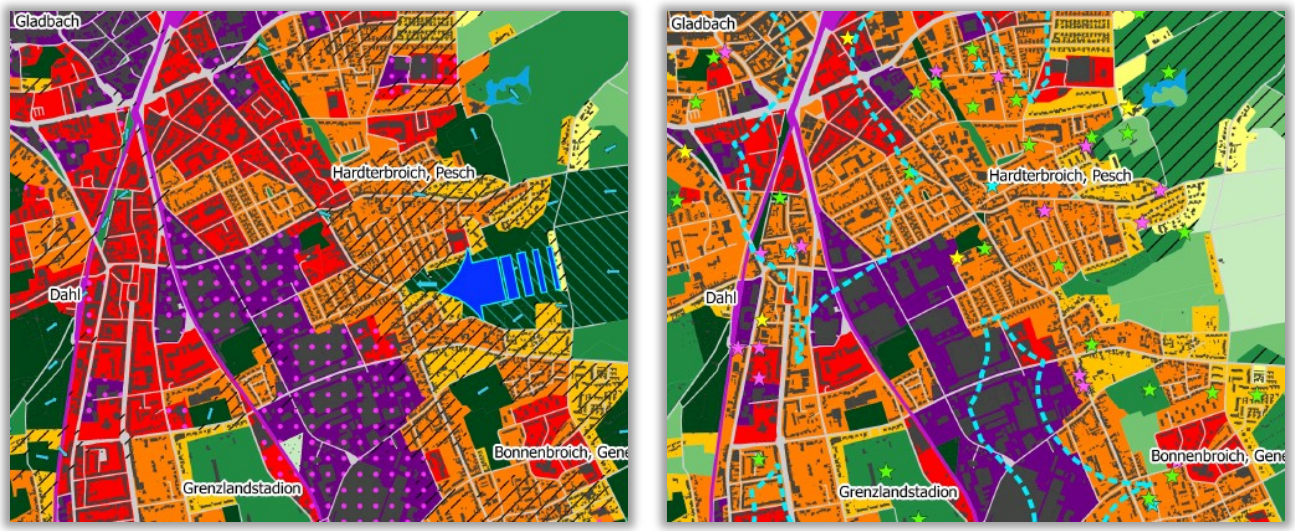


Abbildung 23 Planungshinweiskarten Nacht (links) und Tag (rechts), Ausschnitte

6.2.3 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse bestätigen, dass es in Mönchengladbach thermisch belastete Wohnbereiche gibt. Allerdings fällt der überwiegende Anteil aller Wohnbauflächen, nämlich über 90 % tags und über 80 % nachts, in die Kategorien sehr günstig bis mittel belastet. Im Falle thermisch höher belasteter Flächen sollte die bioklimatische Situation durch geeignete Maßnahmen verbessert werden. Der Anteil an bioklimatisch günstigen und sehr ungünstigen Industrie- und Gewerbegebieten ist erwartungsgemäß deutlich höher. Weite Teile des Stadtgebiets werden über die aufgezeigten Kaltluftleitbahnen bzw. kleinräumige Ausgleichsströmungen durchströmt, doch nimmt die Durchlüftung in Richtung des Stadtkerns ab bzw. ist teilweise nicht mehr gegeben. Die Stadtteile Eicken, Gladbach, Westend, Grenzlandstadion und Rheydt

werden nachts von keiner nennenswerten Kaltluftströmung erreicht. Eine Neuanlage von Kaltluftleitbahnen in innerstädtischen Bereichen ist städtebautechnisch nur in Ausnahmefällen realistisch. Nächtliche Abkühlung kann aber auch durch Maßnahmen der Hitzeprävention am Tage (Begrünung, Entsiegelung, vgl. Kap. 9) erreicht werden.

Eine ausreichende Belüftung kann nicht nur die thermische Belastung mildern, sondern sich auch positiv auf die Luftqualität auswirken. Entsprechend sollte der Erhalt bzw. die Verbesserung der Durchlüftung durch geeignete Maßnahmen im Fokus stehen und insbesondere die Funktion der Kaltluftleitbahnen erhalten, d.h. auf deren Bebauung verzichtet werden. Generell ist aus humanbioklimatischer Sicht eine bauliche Verdichtung in die Höhe dem Bau von zusätzlichen Gebäuden vorzuziehen.

Die Aufteilung in eine PHK für die Nacht- und eine für die Tagsituation hat den Vorteil, dass die einzelnen Flächen separat bewertet werden und mögliche Maßnahmen entsprechend zugeordnet werden können. Während einige Flächen für beide Zeitpunkte dieselben Tendenzen annehmen – z.B. sind innerstädtische Parkareale sowohl in der Nacht als auch am Tage i.d.R. positiv zu sehen, Gewerbefläche dagegen eher jeweils ungünstig einzustufen – treten andere Flächen auf, die unterschiedliche Bewertungen zu den beiden Zeitpunkten erfahren. So steht bspw. die günstige Wirkung von unversiegelten Freiflächen in der Nacht (Abkühlung, Durchströmbarkeit) einer meist sehr geringen Aufenthaltsqualität am Tage gegenüber. In einer kombinierten PHK für die Nacht- und Tagsituation würden solch verschiedene Bewertungen womöglich zu Lasten der Genauigkeit zu einem mittleren Zustand zusammengefasst. Mit der Aufteilung in zwei einzelne PHKs ist allerdings geboten, beide Werke bei Bauvorhaben bzw. zur Beurteilung von Flächen(-nutzungsänderungen) zu Rate zu ziehen.

In Tabelle 10 sind beispielhaft für einige Stadtteile die durchschnittliche Bewertung für die Tagsituation und die Nachtsituation gegenübergestellt. Entscheidend ist jeweils die Kategorie mit größtem Flächenanteil im Stadtteil. Diejenigen Stadtteile die am Stadtrand liegen (Hardt-Mitte, Venn, Odenkirchen-West, Wickrath-West) sind grundsätzlich nachts bioklimatisch besser gestellt als am Tage. Grund ist die Kaltluftversorgung aus den umliegenden Freiflächen. Die innerstädtischen Stadtteile Gladbach, Eicken und Rheydt sind nachts überwiegend stark erwärmt und liegen nicht im Einwirkbereich der nächtlichen Kaltluft. Ihre bioklimatische Situation ist daher nachts überwiegend ungünstig bis sehr ungünstig. Tagsüber dagegen ist die thermische Belastung in innerstädtischen Stadtteilen vielerorts mit der am Stadtrand vergleichbar.

Stadtteil	Bioklimatische Situation in den Siedlungsflächen **- tagsüber**	Bioklimatische Situation in den Siedlungsflächen **– nachts**
Gladbach	mittel	Ungünstig
Eicken	Mittel bis ungünstig	Ungünstig bis sehr ungünstig
Rheydt	mittel	ungünstig
Holt	mittel	mittel
Hardt-Mitte	Günstig bis mittel	günstig
Venn	mittel	Günstig bis mittel
Odenkirchen-West	sehr ungünstig	ungünstig
Wickrath-West	Günstig bis mittel	günstig

Tabelle 10: Vergleich der bioklimatischen Situation tags und nachts für exemplarische Stadtteile

7 Die landesweite Klimaanalyse NRW

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung lassen sich gut in den Kontext der landesweiten Klimaanalyse einordnen (LANUV 2018 sowie GEO-NET & Planungsgruppe Umwelt 2017). In dieser wurden mit einer Rasterauflösung von 100 m x 100 m – ebenfalls unter Verwendung des mesoskaligen Modells FITNAH – Klimaparamenter für die Tag – und die Nachtsituation berechnet. Ähnlich wie in der vorliegenden Untersuchung wurden Klimaanalysekarten jeweils für Tag und Nacht erstellt. Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen jeweils Ausschnitte für den Bereich Mönchengladbach. Nachts unterliegt der Großteil der bebauten Stadtfläche einem zumindest mäßigen Wärmeinseleffekt (Temperaturen von über 18,5 °C). Tagsüber ist die thermische Belastung anhand von PET (physiologisch äquivalente Temperatur, vgl. Glossar) eingestuft. Hier stehen die von hohen Gebäuden verschatteten Flächen der Kernstadt meist günstiger dar als Siedlungsbereiche im Außenbereich, die oft an stark erhitzte landwirtschaftliche Nutzflächen ohne verschattende Vegetation angrenzen.

Abbildung 26 zeigt einen Ausschnitt aus der Karte für die kombinierte Bewertung der Tag- und Nachtsituation in Bezug auf planungsrelevante Belange. Große Teile der innerstädtischen Flächen weisen eine mindestens ungünstige bioklimatische Situation auf. Entsprechend ist den umliegenden Grün- und Freiflächen in ihrer Funktion als Ausgleichsraum eine hohe bioklimatische Bedeutung zugeordnet.

Mönchengladbach zeigt eine vergleichbare bioklimatische Situation wie die Städte Gelsenkirchen und Krefeld, die eine ähnliche Einwohnerzahl haben. In Aachen – welches ebenfalls eine vergleichbare Einwohnerzahl aufweist – ist die Situation tagsüber vergleichbar, nachts allerdings profitiert das Stadtgebiet von der Kaltluftzufuhr vom Nordrand der Eifel, dementsprechend erreichen die Temperaturen im Aachener Stadtgebiet nachts kaum über 20 °C, was im Vergleich mit Mönchengladbach eine günstigere Situation bewirkt (vgl. LANUV 2018).

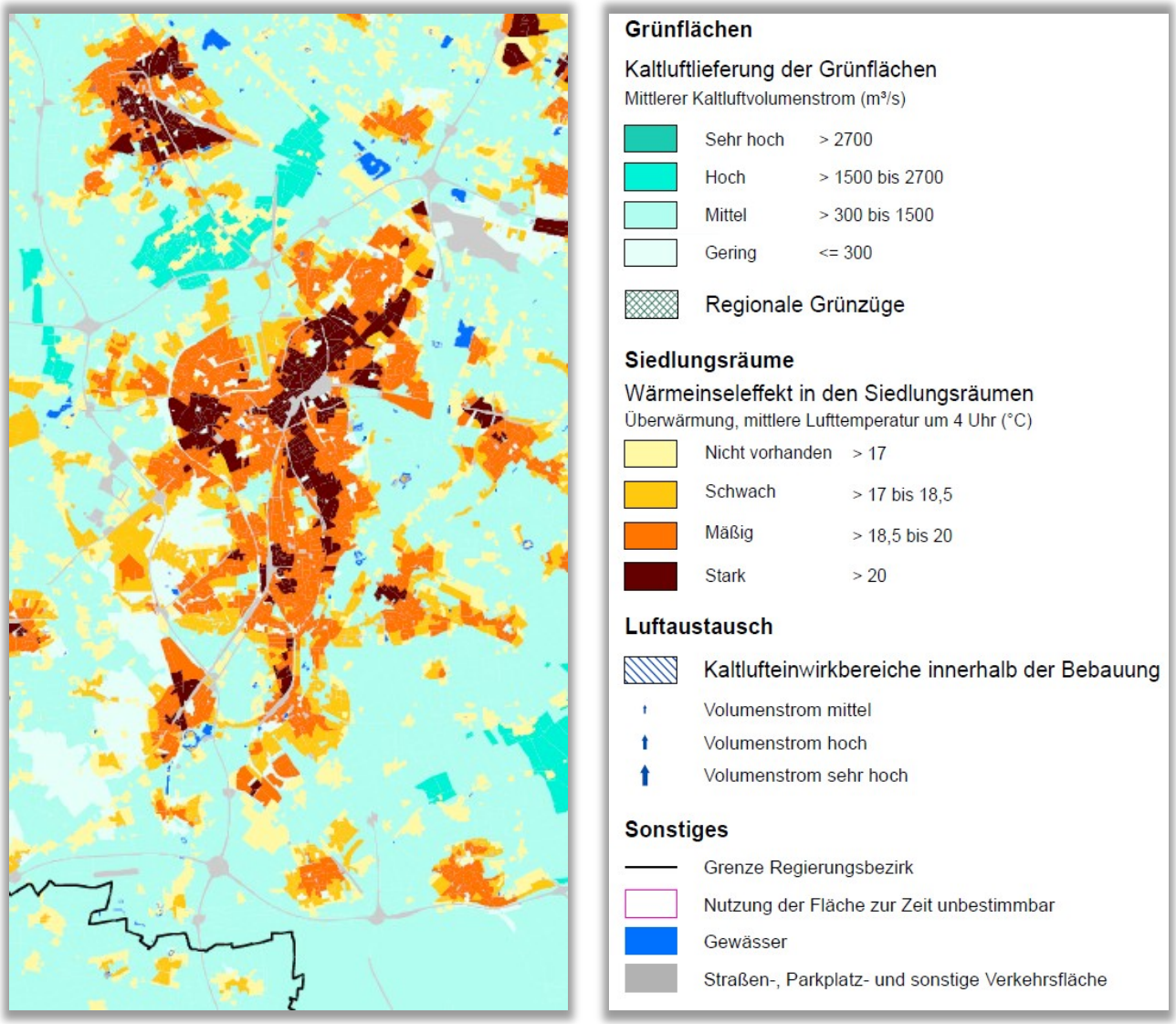


Abbildung 24 Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte NRW, Nachtsituation (GEO-NET & Planungsgruppe Umwelt, 2017)

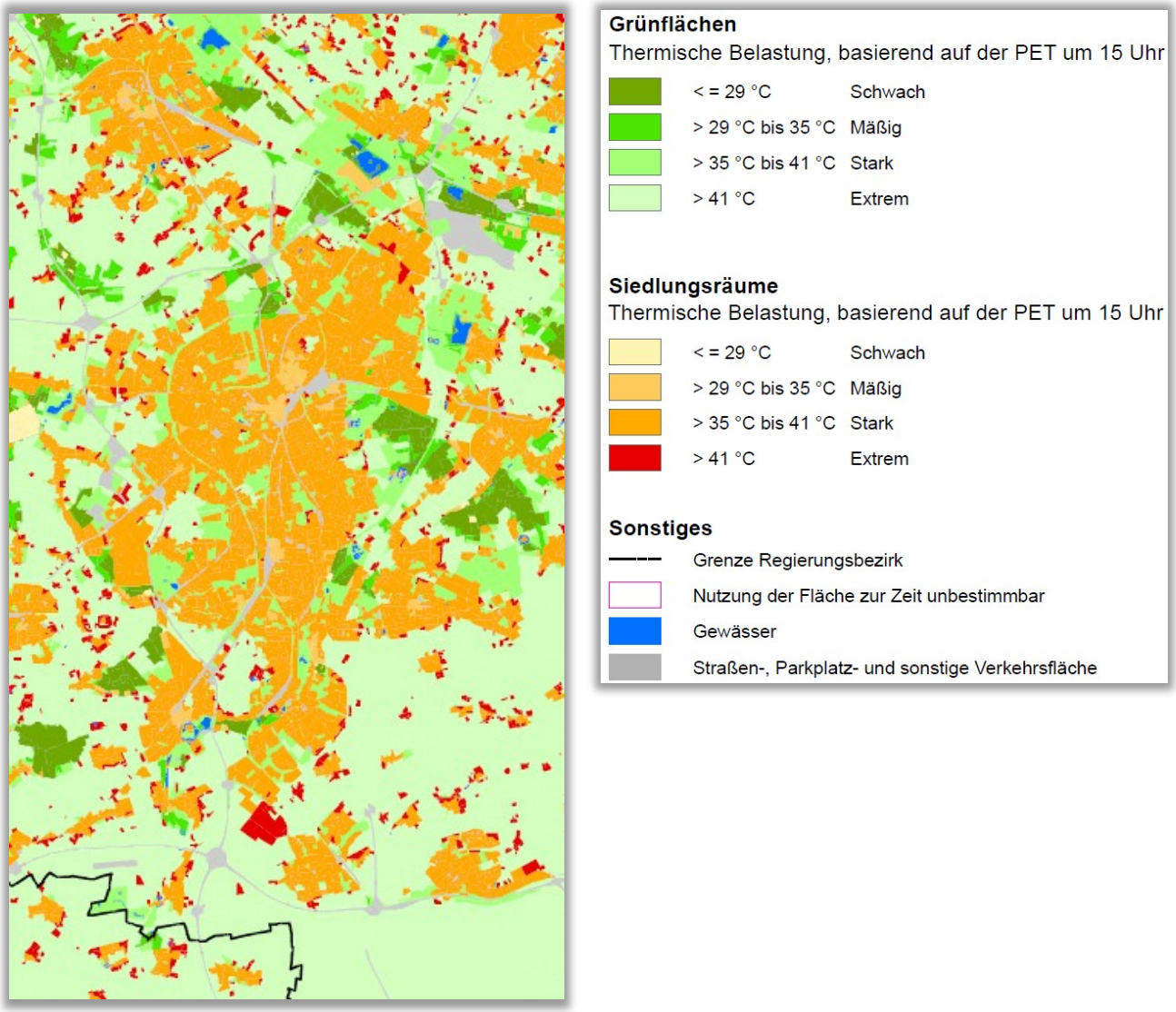


Abbildung 25 Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte NRW, Tagsituation (GEO-NET & Planungsgruppe Umwelt, 2017)

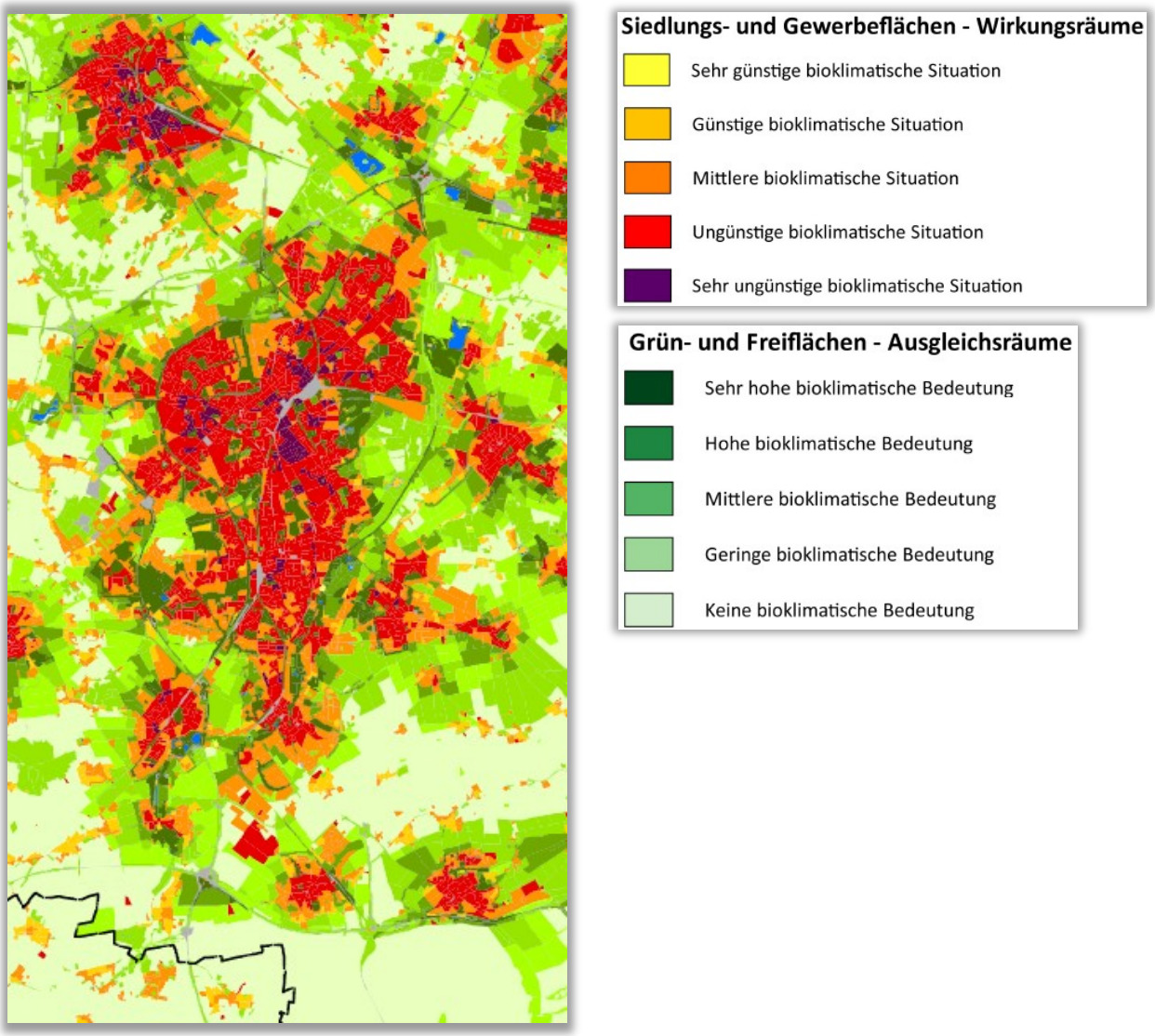


Abbildung 26 Ausschnitt aus der kombinierten Klimaanalysekarte NRW (Planungshinweiskarte) (GEO-NET & Planungsgruppe Umwelt, 2017)

8 Demographische Betroffenheit

8.1 METHODE

Die Planungshinweiskarte (PHK) Stadtklima stellt gemäß VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 das Endprodukt der gesamtstädtischen Klimaanalyse dar (VDI 2015). Gleichzeitig weist die Richtlinie darauf hin, dass das Planwerk seine wirkliche Bedeutung und Stärke erst durch die Verknüpfung zu den vom Stadtklimaphänomen betroffenen Themenfeldern entfalten kann. Die PHK bildet damit die aus fachgutachterlicher Perspektive bewertete meteorologische bzw. humanbioklimatische Basis, die als „Belastungsanalyse“ bezeichnet werden kann.

Die in der PHK vorgenommenen Bewertungen müssen zunächst von der aktuellen Flächen- bzw. Gebäudenutzung, den demographischen Verhältnissen und zukünftig geplanten Stadtentwicklungsvorhaben abstrahiert werden. Denn diese Punkte unterliegen einem stetigen Wandel, während die PHK eine Gültigkeit von 5 bis 10 Jahren besitzt (je nach Entwicklungsdynamik der Stadt bzw. der Analysemethoden). Durch die regelmäßige Rückkopplung zwischen den relativ konstant gültigen Aussagen zur stadtklimatischen Belastungen und den dynamischen Empfindlichkeiten innerhalb der Stadtbevölkerung (demographische Betroffenheit) bzw. des gebauten Stadtkörpers können in Form von Momentaufnahmen räumlich differenzierte Betroffenheitsanalysen durchgeführt werden. Die statistischen Angaben zu den Bevölkerungszahlen, eingeteilt in Altersgruppen je Baublock, wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt.

8.2 DEMOGRAPHISCHE BETROFFENHEIT: HITZESENSIBLE BEVÖLKERUNGSGRUPPEN

Mönchengladbach hat gegenwärtig ca. 270.000 Einwohnerinnen und Einwohner (Stand: 31.12.2018). Unter der Stadtbevölkerung gehört ca. jede vierte Person einer gemeinhin als hitzesensibel definierten Alterskategorie an (ca. 68.000 Personen). Zu dieser Risikogruppe zählen aufgrund ihrer noch nicht vollständig ausgeprägten Thermoregulation Kleinkinder ≤ 7 Jahre sowie aufgrund einer zunehmend geringeren Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems ältere Menschen ≥ 65 Jahre. Für Mönchengladbach ist– auch mit Blick auf den demographischen Wandel – die letztgenannte Altersgruppe von herausragender Bedeutung. Sie macht fast 20 % der Gesamtheit der Einwohnerzahl aus (ca. 52.000 Personen). Aber auch die mehr als 16.000 Kinder bis 7 Jahre sind als relevante thermisch sensible Gruppe wahrzunehmen. Die statistischen Angaben zu den Bevölkerungsgruppen pro Baublock (Stand 31.12.2017) wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt. In Abbildung 27 werden die prozentualen Anteile der Altersgruppen in der Stadt Mönchengladbach gezeigt.

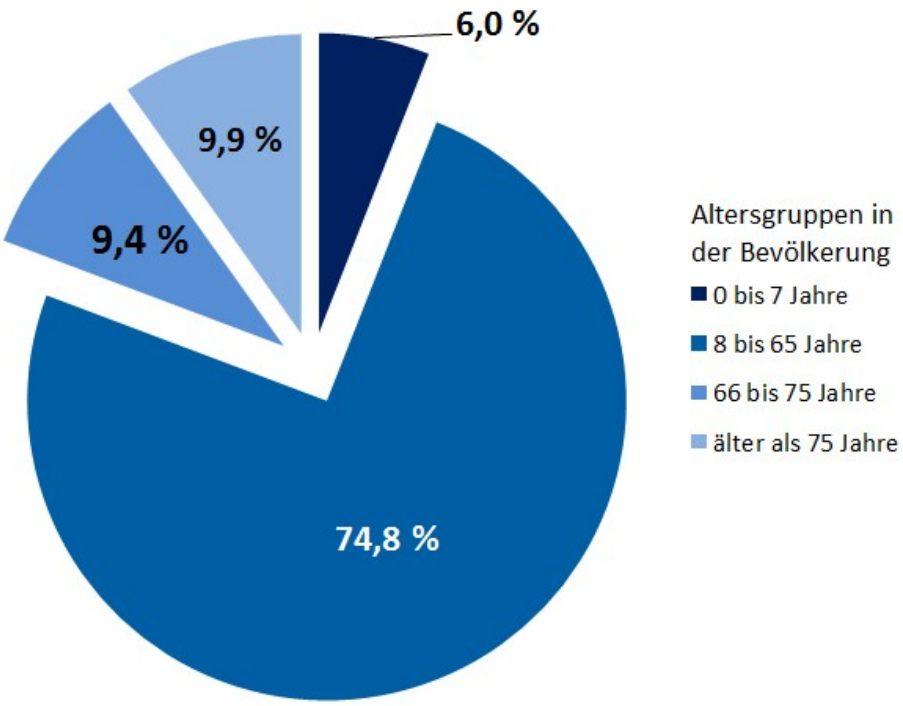


Abbildung 27 Prozentuale Verteilung Altersgruppen in der Bevölkerung der Stadt Mönchengladbach

8.3 KONFLIKTBEREICHE / BETROFFENHEITSANALYSE

Konfliktbereiche entstehen nur dort, wo eine ungünstige oder sehr ungünstige thermische Situation während belastender Wetterlagen herrscht (vgl. Kapitel 6).

Um die tatsächliche Betroffenheit (bzw. Vulnerabilität) der Risikogruppen (bis 7- jährige bzw. über 65-jährige Personen) gegenüber thermischer Belastung beurteilen zu können, wurden die Baublöcke mit den Informationen aus der modellgestützten Klimaanalyse verschnitten, und die thermisch (sehr) ungünstigen Bereiche (getrennt nach Tag- und Nachtsituation) herausgearbeitet (Abbildung 28 bzw. Abbildung 29), in denen die Dichte zumindest einer Risikogruppe mehr als 10 Personen pro Hektar beträgt (Abbildung 30). Da am Tage von einer gewissen Mobilität der erholungssuchenden Bevölkerung ausgegangen wird, wurden für die **Tagsituation** von diesen Belastungsbereichen lediglich jene selektiert, von denen keine grüne Erholungsfläche (> 1 ha) im Umkreis von 300 m zu erreichen ist (Abbildung 31, und vgl. Darstellung in der Planungshinweiskarte Tagsituation).

Zusätzlich wurden die stadtklimatisch sensiblen Flächen- und Gebäudenutzungen in die Darstellung einbezogen, die vorrangig oder ausschließlich von den demographischen Risikogruppen genutzt werden, und in bioklimatisch ungünstigen oder sehr ungünstigen Situationen liegen. Dazu zählen Einrichtungen für Senioren, Waldorf- und Grundschulen, Kindertagesstätten, Krankenhäuser, Spielplätze und Sportanlagen. Bis auf Seniorenwohnheime und Kliniken sind die genannten Einrichtungen lediglich für die Tagsituation relevant.

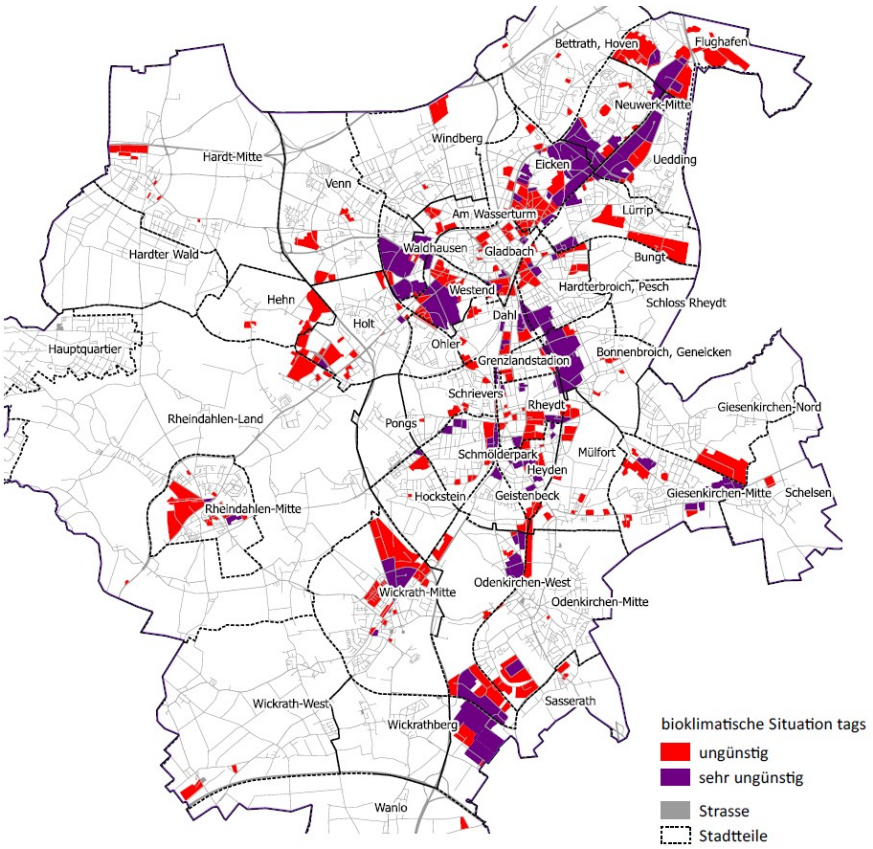


Abbildung 28 Tags bioklimatische ungünstige und sehr ungünstige Siedlungsgebiete (vgl. Planungshinweiskarte Tag)

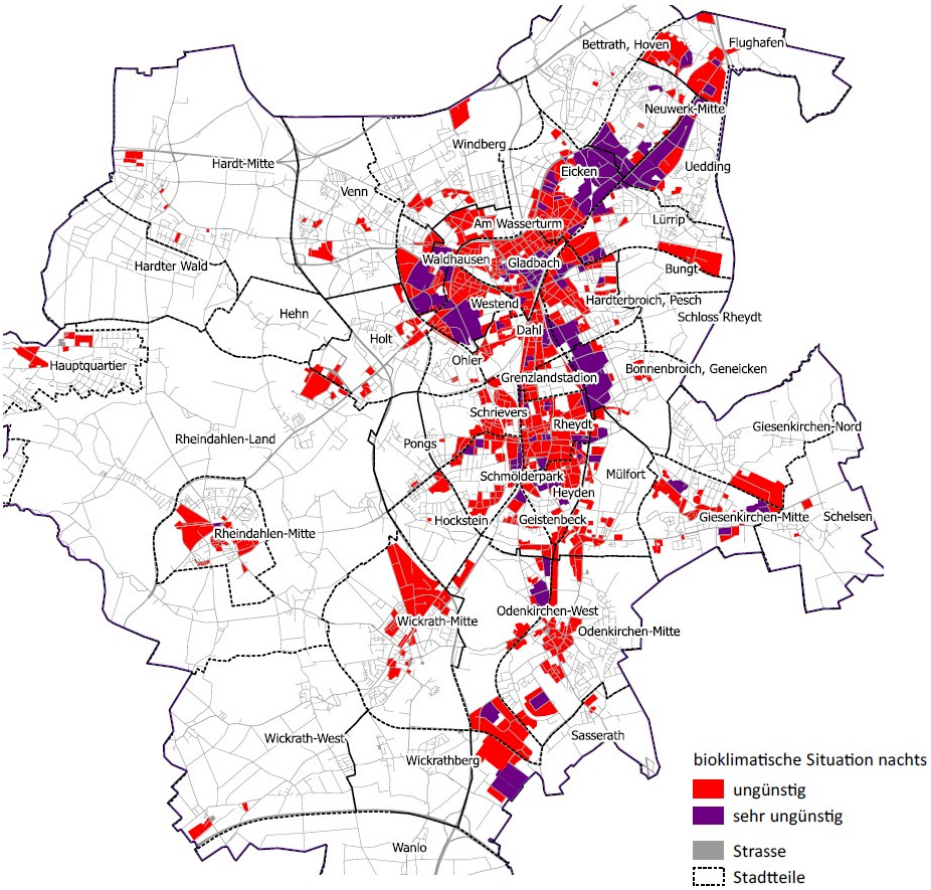


Abbildung 29 Nachts bioklimatische ungünstige und sehr ungünstige Wohngebiete (vgl. Planungshinweiskarte Nacht)

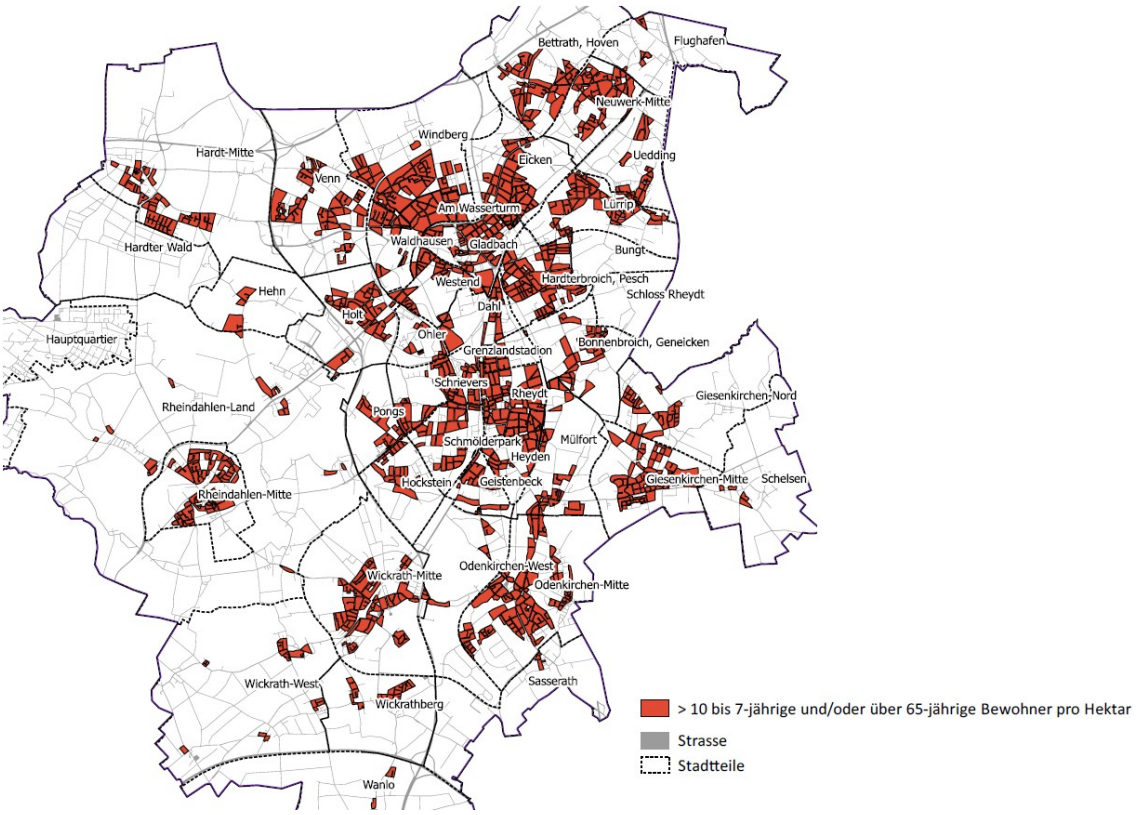


Abbildung 30 Gebiete mit hohem Anteil an Kindern und hochaltrigen Bewohnern

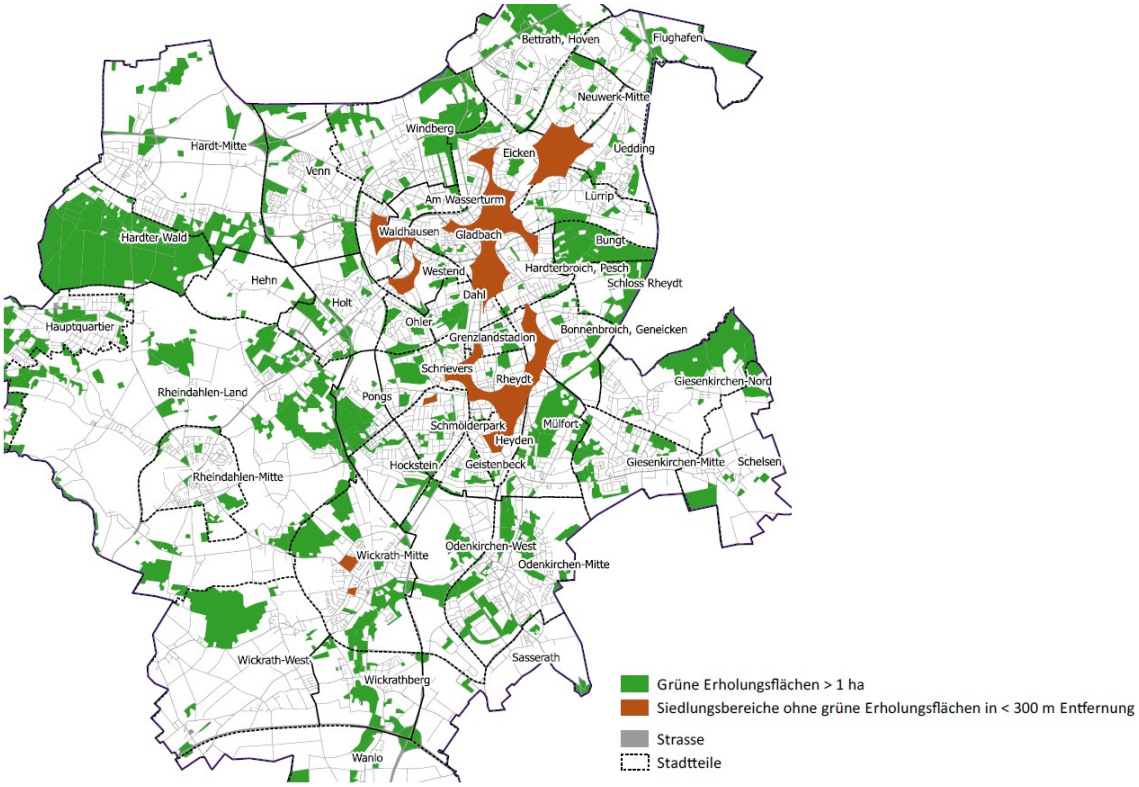


Abbildung 31 Räumliche Nähe der grünen Erholungsflächen zu Siedlungsflächen

Ergebnis der Verschneidung dieser räumlichen Konditionen sind die Konfliktbereiche (`Hot Spots´), in denen eine starke Hitzebelastung wenig hitzeresistenten Bevölkerungsgruppen gegenüberstehen. Der weitaus

größte Anteil ist dabei den Konfliktbereichen ausschließlich in der Nacht zuzuordnen (Abbildung 32 sowie im Anhang).

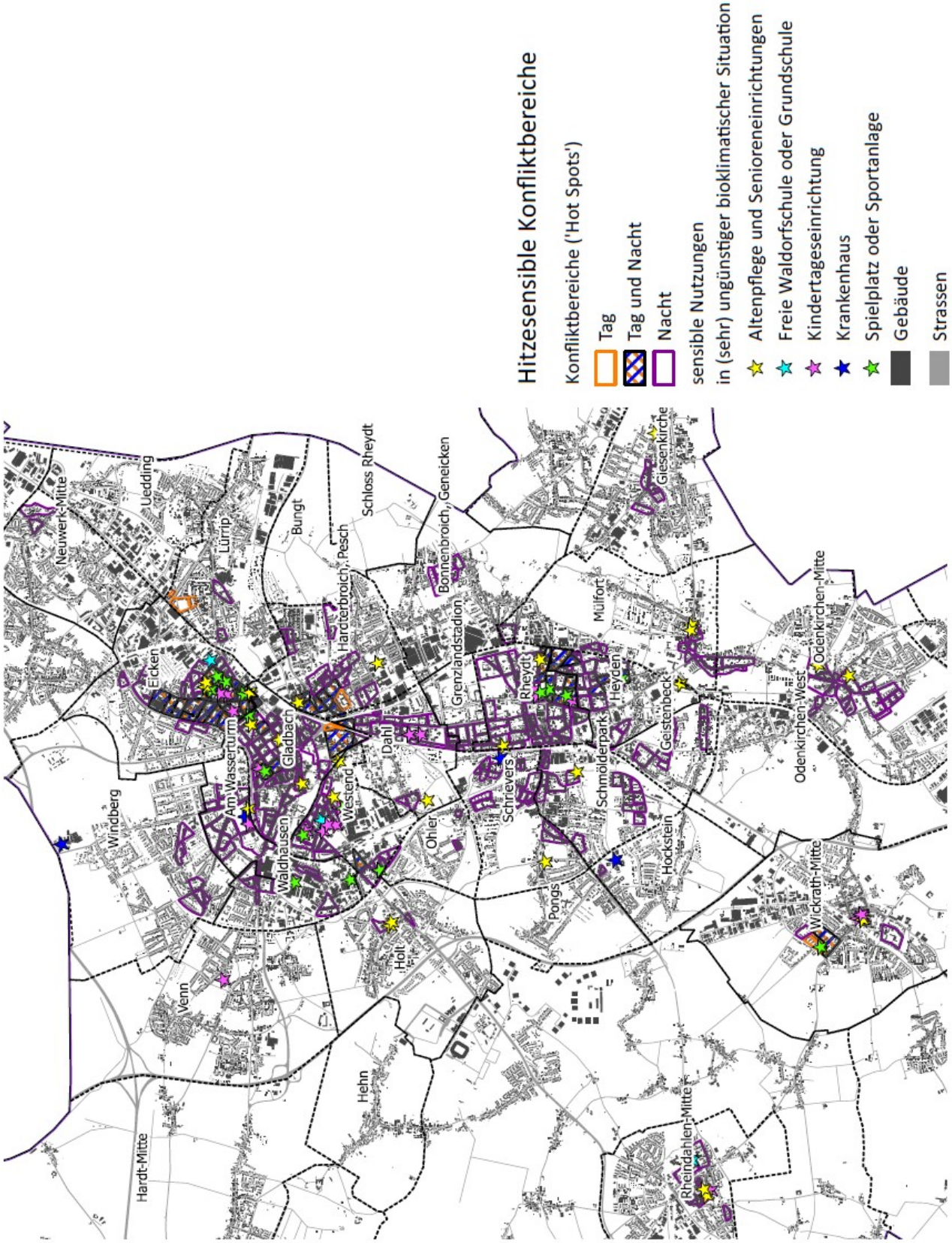


Abbildung 32 Konfliktbereiche (`Hot Spots´) im Stadtgebiet Mönchengladbach (im Format DIN A3 im Anhang)

9 Maßnahmen zur Reduktion des Hitzeinseleffektes

Zur Reduktion bzw. zur Eindämmung des Wärmeinseleffektes wurden insgesamt 16 verschiedene Maßnahmen identifiziert (Tabelle 11). Grundsätzlich können diese den drei räumlichen Ebenen der Stadt zugeordnet werden:

- Gesamtstadt, Stadtbezirke
- Stadtviertel, Stadtquartiere
- Gebäude, Grundstücke

Der Übergang zwischen den räumlichen Ebenen ist fließend, so dass auch eine eindeutige Zuordnung der Maßnahmen zu den Ebenen nicht ohne Kompromisse möglich ist. Im vorliegenden Fall wurde der Kompromiss geschlossen, dass eine Maßnahme derjenigen Raumebene zugewiesen wird, auf der ihre Umsetzung im Wesentlichen vorangetrieben werden muss.

Die grundsätzliche Auswahl der Maßnahmen erfolgte primär nach den Kriterien der Wirksamkeit, der lokalen Umsetzbarkeit sowie der formellen bzw. informellen Implementierbarkeit in die Instrumente der Stadtplanung (vgl. auch MUNLV 2010).

Übergeordnete Maßnahmen
M01 Erhalt und Entwicklung von Kaltluftentstehungsgebieten und Kaltluftschneisen
M02 Erhalt und Entwicklung großräumiger Grünanlagen (Freiflächen und Waldflächen)
M03 Vernetzung und Anbindung von Freiräumen (Stadtparks und größere Grünanlagen)
M04 Erhaltung und Schaffung von offenen und bewegten Wasserflächen

Lokale Maßnahmen
M05 Rückbau
M06 Entsiegelung
M07 grüne Parkierung, Verschattung von Parkflächen
M08 Verschattung von Straßen, Plätzen und Gebäuden
M09 Pocket Parks
M10 Innen-/ Hinterhofbegrünung
M11 Erhöhung der Oberflächen-Albedo (Reflektion)
M12 erlebbares Wasser im öffentlichen Raum (z. B. Wasserspielplätze)

Gebäudemaßnahmen
M13 energetische Gebäudesanierung
M14 Dachbegrünung
M15 Fassadenbegrünung
M16 sommerlicher Wärmeschutz an Gebäuden

Tabelle 11: Maßnahmen zur Reduktion des Hitzeinseleffektes

9.1 ÜBERGEORDNETE MAßNAHMEN / GESAMTSTÄDTISCHE EBENE

9.1.1 MASSNAHME 01: ERHALT UND ENTWICKLUNG VON KALTLUFTENTSTEHUNGSGEBIETEN UND KALTLUFTSCHNEISEN

Kurzerläuterung der Maßnahme

Kaltluftentstehungsgebiete liegen in der Regel außerhalb des Siedlungsbereiches. Um für die Stadtbewohner eine Wohlfahrtswirkung zu entfalten, muss die Kaltluft über Kaltluftleitbahnen in die Stadt hinein transportiert werden. Kaltluftleitbahnen sind linear ausgerichtete, vegetationsgeprägte und hindernisarme Freiflächen, die die Kaltluftentstehungsgebiete mit den thermisch belasteten Siedlungsbereichen verbinden. Hierbei kann es sich um Niederungsbereiche von Fließgewässern, zusammenhängende Grünzüge oder auch größere Verkehrswege handeln. Wälder ohne größeres Gefälle eignen sich aufgrund ihrer geringeren Durchlässigkeit und Auskühlungsleistung weniger als Kaltluftleitbahn aber durchaus als Kaltluftentstehungsgebiete. Der Schutz und die Vernetzung von für den Kaltlufthaushalt relevanten Flächen (vgl. Kapitel 9.1.2 und 9.1.3) können ihre anvisierte Wirkung nur dann entfalten, wenn auch sichergestellt ist, dass die entstehende Kalt- bzw. Frischluft aus den Flächen möglichst ungehindert ausströmen kann. Die Wirkung einer Kaltluftleitbahn ist umso besser je hindernisfreier sie ist. Austauschbarrieren sollten daher im Einflussbereich von Kaltluftflüssen grundsätzlich vermieden werden. Das gilt für Wälder, Parks, landwirtschaftliche Flächen und Gewässer gleichermaßen. Bei Barrieren kann es sich um quer zur Fließrichtung der Kaltluft verlaufende natürliche (z.B. Baumgruppen) oder bauliche Hindernisse (z.B. Bahndämme, Gebäude) handeln. In Einzelfällen kann eine vorhandene oder absichtlich errichtetet Barriere auch der Umleitung von Kaltluft dienen und dadurch die Durchlüftung einer Siedlung verbessern. Dabei muss nicht jede Bebauung im Randbereich oder Übergangsbereich einer Grün-/Freifläche auch gleichzeitig ein relevantes Austauschhindernis darstellen muss. Mithilfe von auf die individuelle Situation abgestimmten Gebäude-ausrichtungen und Bebauungsdichten lassen sich hier in aller Regel Kompromisse finden, sofern klimaöko-logische Belange möglichst frühzeitig in die Planung einbezogen werden.

Wirkung der Maßnahme

Die Stärke der Kaltluftzufuhr hängt von der Größe des Einzugsgebiets, der Hangneigung, der Breite der Leitbahn sowie von Fließhindernissen (Bahn- oder Straßendamm, natürliche Wälle, Häuser, hohe Vegetation etc.) ab. Grundsätzlich kann über Kaltluftentstehungsgebieten aber pro Stunde eine bis zu 12 m mächtige Kaltluftschicht entstehen. Die Temperatur in diesen Luftschichten kann 10 °C und mehr unterhalb derjenigen im Stadtkern liegen. Im unmittelbaren Einwirkungsbereich von intakten Leitbahnen kann die Temperatur daher dauerhaft um mehrere Grad Celsius abgesenkt werden.

9.1.2 MASSNAHME 02: ERHALT UND ENTWICKLUNG GROSSRÄUMIGER GRÜN-, WALD- UND FREIFLÄCHEN

Kurzerläuterung der Maßnahme

Städtische Grünflächen dienen - bei ausreichender Größe - sowohl für nächtliche Kaltluftzufuhr in die umliegenden Baublöcke als auch – bei ausreichender Verschattung und Mikroklimavielfalt – als Erholungsraum an heißen Sommertagen. Größere Parkanlagen dienen in der Regel dazu, dass man sich dort länger aufhält. Die Grünausstattung des Parks sollte deshalb abwechslungsreich sein. Neben offenen besonnten (gut wasserversorgten) Flächen müssen auch verschattete Plätze (z. B. kleine Baumgruppen und verschattete Wege) angeboten werden. Der Übergangsbereich zur angrenzenden Bebauung sollte offen gestaltet sein. Unter der Prämisse einer angemessen großen Fläche von mindestens 1-2 ha wird durch diese Konfiguration sichergestellt, dass sowohl die nächtliche Kaltluftproduktion und der -abfluss gewährleistet sind als auch der Aufenthalt am Tage für alle Zielgruppen optimiert ist.

Waldgebiete wirken als nächtliche Kaltluftproduzenten. Im Waldbestand kühlt sich im Gegensatz zum Freiland ein größeres Luftvolumen ab, erreicht jedoch deshalb nicht die tiefen Temperaturen der Freiflächen. Da es tagsüber im Wald deutlich kühler ist als auf Freiflächen oder bebauten Gebieten bietet der Wald insbesondere in der heißen Tageszeit Erholung.

Wirkung der Maßnahme

Die Reichweite der Klimafunktion von Parkanlagen in die Umgebung wird meist überschätzt (Kuttler, 2011). Untersuchungen in deutschen Großstädten zeigen den Einwirkungsbereich in die Umgebung bei wenigen 100 Metern (Tabelle 12). Als Faustformel kann man die Parkbreite als Wirkungsraum annehmen, sofern keine zu dichte Randbebauung vorliegt. Der Park und die Grünflächen haben somit in erster Linie den Effekt einer „Kühlinsel“ innerhalb der städtischen Wärmeinsel so dass die klimatisch günstige Wirkung insbesondere den Besuchern der Grünanlage zugutekommt.

Größe in ha	Stadt	Parkname	Gestaltung	Kühleffekt in K	Reichweite in m	Quelle
18	Berlin	Stadtpark Steglitz	Park mit dichtem Baumbestand	1,0 (abends)	80 – 140	Von Stülpnagel 1987
30	Mainz	Stadtpark	Wiesen und Bäume	2,0 (morgens)	< 300	Naumann 1981
44	Stuttgart	Schlossgarten	Wiesen und Bäume	1,3 (Jahresmittel) 3,8 (Tagesmittel)	200	Knapp 1998
80	Kopenhagen	Falledparken	Gras und Bäume	2,1 (22 Uhr)	100	Eliasson und Upmann 2000
125	Berlin	Kleingärten Priesterweg	Garten	5,5 (abends)	250	Von Stülpnagel 1987

Tabelle 12: Größe, Umgebung, Kühleffekt und thermische Reichweite städtischer Grünflächen (nach Kuttler, 2011. Verändert)

Eine besondere bioklimatische Bedeutung hat der Wald. Die Baumkronen-Oberfläche des belaubten Waldes bzw. des immergrünen Nadelholzwaldes schirmt den Waldboden zur Atmosphäre ab und reguliert den Wärmeumsatz so, dass der Stammraum tagsüber nicht so stark aufgeheizt wird wie die bodennahe Luftschicht über Freiflächen und sich zur Nachtzeit auch nicht extrem abkühlt. Diese den Tagesgang der Lufttemperatur ausgleichende Wirkung ermöglicht es, dass stadtnahe Wälder auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen.
Besonders günstig für die Abkühlung bei Tag sind Waldgebiete, die an Nord- und Osthängen geringer Sonneneinstrahlung unterliegen. Eine große Bedeutung hat der Wald bei Hitzetagen als Erholungsraum für die Stadtbevölkerung speziell am Tage. Die günstigen bioklimatischen Eigenschaften des Waldes sind im Folgenden aufgelistet:

- Erholungsraum in der Stadt
- Thermisches Wohlbefinden
- Reduktion des Wärmeinseleffekts
- Kaltluftproduktion

- Lebensraum für Pflanzen und Tiere
- Filter für Luftschadstoffe
- Kaum Oberflächenabfluss bei Starkregen
- Grundwassererneuerung
- Regenwasserspeicherung
- Lebensraum für Pflanzen und Tiere

9.1.3 MASSNAHME 03: VERNETZUNG UND ANBINDUNG GRÜNER INFRASTRUKTUR

Kurzerläuterung der Maßnahme

Die Vernetzung und Anbindung grüner Infrastruktur ist wichtig um eine möglichst hindernisfreie, schnelle Erreichbarkeit zu Erholungsräumen zu gewährleisten sowie auch „kühle Verbindungswege“ zwischen einzelnen Grünbereichen zu schaffen.

Wirkung der Maßnahme

Die Vernetzung der Grünbereiche hat ihre Funktion in der Gesamtausstattung der Stadt mit Grünflächen und deren schnellen Erreichbarkeit. Sie eignen sich auch als Radwegeverbindungen. Vor allem für ältere Bewohner ist es wichtig, dass sie fußläufig Grünflächen rasch auf bequemen Verbindungswegen erreichen können. Auf internationaler Ebene wird empfohlen, dass jeder Bewohner Zugang zu Grünräumen mit mindestens 1 ha Größe in einer Entfernung von höchstens 300 m haben soll (Van den Bosch 2015 und BBSR 2017). Durch die Verbindung der Grünflächen können auch Ventilationsbahnen und Frischluftschneisen in der Stadt gesichert werden. Die klimatischen Wirkungen sind abhängig von der Größe der Verbindungen und deren Lage. Synergieeffekte gibt es außerdem durch eine Vernetzung der Biotope. Aus humanbioklimatischer Sicht ist die Verbesserung dieser Situation vor allem in den thermisch belasteten und mit Grünflächen unterversorgten Wohngebieten prioritär (vgl. Kapitel 8.3). Dies kann zum einen durch die Anlage neuer Grünflächen erfolgen (hier besteht eine enge Verknüpfung zu der Schaffung von Pocket Parks und großflächiger Park- und Grünanlagen, vgl. Kapitel 9.1.2 und 9.2.5). Zum Teil kann aber auch schon eine verbesserte Anbindung der Quartiere mittels ÖPNV, Fuß- und Radwegen an größere und kleine Parkanlagen ausreichend sein. Hierzu gehören vor allem die Beseitigung oder Erleichterung der Querbarkeit von baulichen oder natürlichen Barrieren (Fließgewässer, Gleise oder stark befahrene Straßen).

9.1.4 MASSNAHME 04: ERHALT UND SCHAFFUNG VON OFFENEN BEWEGTEN WASSERFLÄCHEN

Kurzerläuterung der Maßnahme

Größere Fließ- und Standgewässer weisen für das Stadtklima grundsätzlich eine doppelte Wohlfahrtswirkung auf. Zum einen stellen sie rauhigkeitsarme Ventilationsbahnen dar, über die vor allem bei allochthonen Wetterlage Kalt- und Frischluft z.B. vom Umland in die Innenstadt transportiert wird.
Zum anderen weisen offene Wasserflächen aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherkapazität gegenüber den bodennahen Luftschichten einen sehr viel ausgeglicheneren Jahres- und Tagesverlauf auf.

Wirkung der Maßnahme

Neuere Untersuchungen (Müller, 2013) zeigen, dass über Wasserflächen der Dampfdruck nachts im Vergleich zu anderen Stadtstandorten am höchsten ist, aber am Tage im Vergleich zu Wald und Freiland geringer wird. Die Ursache liegt nach Geiger (1961) an der Konvektion und Turbulenz sowie der erhöhten Windgeschwindigkeit infolge der geringen Reibung, auch ist die Temperatur der Wasserfläche tagsüber im Sommer in der Regel niedriger. Die Evaporation einer Grasfläche (bei hinreichender Bodenfeuchte) ist an

heißen Sommertagen zur Mittagszeit höher als an einer Wasserfläche, zumal auch die wirksame Oberfläche einer Grasfläche höher ist.
Die abkühlende Funktion einer Wasserfläche beschränkt sich weitgehend auf die Wasserfläche selbst und ist beeinflusst durch die dort herrschende höhere Windgeschwindigkeit (Ventilationseffekt). Wasserflächen sind weit weniger nutzbar als Parks und Grünflächen. Vegetationsflächen erzielen höhere PET-Reduktionswirkungen als Gewässerflächen. Ausreichende Wasserversorgung der Vegetationsflächen ist notwendig, um ein maximales PET-Reduktionspotential zu erreichen (Müller, 2013).
Die glatte Wasseroberfläche lässt auch die thermisch induzierten Kaltluftflüsse besser als über einer rauen Landschaft strömen, weshalb die Übergangsbereiche der Gewässer möglichst barrierefrei im klimaökologischen Sinne gestaltet werden sollten. Die Strömungsgeschwindigkeit ist von der Wassertemperatur und dem Volumenstrom abhängig. Wärmt sich das Gewässer tagsüber bzw. über mehrere Tage stark auf, so kann es einen, vor allem geringen, Volumenstrom der nächtlichen Kaltluft aber auch weiter verringern. Liegt die oberflächennahe Temperatur des Gewässers dann über der umgebenden Lufttemperatur, kann es in den Nachtstunden „den thermischen Komfort kaum verbessern“ (Kuttler 2013, 271) oder sogar die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel verstärken. Wie oben bereits beschrieben, wirken während der Sommermonate und speziell während Hitzeperioden Gewässer auf ihr nahes Umfeld dagegen tagsüber kühlend. Auch bei kleineren Gewässern, Wasserspielplätzen oder Brunnen in Parks und auf Stadtplätzen kommt dieser Effekt zum Tragen (vgl. Kapitel 9.2.8).
Die Wirkung von Gewässern ist daher durchaus ambivalent und im Einzelfall zu beurteilen.

9.2 LOKALE MAßNAHMEN

9.2.1 MASSNAHME 05: RÜCKBAU

Kurzerläuterung der Maßnahme

Durch den Rückbau von Gebäuden werden die Bebauungsdichte und das Bauvolumen verringert, wodurch wiederum der Wärmeinseleffekt lokal reduziert wird. Auf frei werdenden Flächen können klimatische Entlastungsgebiete entstehen (z.B. Pocket Parks, vgl. Kapitel 9.2.5).

Wirkung der Maßnahme

Mit Rückbaumaßnahmen sind im Einzelfall erhebliche stadtklimatische Verbesserungen erreichbar. Die geringere Bebauung führt zur Verbesserung der Durchlüftung. Der erhöhte Vegetationsanteil senkt die umgebende Lufttemperatur und es kommt zur Verringerung des Regenwasserabflusses. Die Siedlung gewinnt an Ästhetik und bietet Erholungsmöglichkeiten vor Ort. Es entstehen neue Lebensräume, die im Idealfall mit weiteren vernetzt werden können.

9.2.2 MASSNAHME 06: ENTSIEGELUNG

Kurzerläuterung der Maßnahme

Unter Entsiegelung wird der Austausch von komplett versiegelten Flächen zugunsten von teilversiegelnden Oberflächenmaterialien (z.B. Rasengittersteine, Fugenpflaster, Sickerpflaster) verstanden. Auch eine Komplettentsiegelung mit anschließender Begrünung ist möglich.
Möglichkeiten bieten sich bei Stadtsanierungs- und Stadtumbaumaßnahmen besonders an. Eine Kopplung mit Maßnahmen anderer Anpassungskomplexe (z.B. Starkregen, Überflutung) bietet sich an.

Wirkung der Maßnahme

Das Ziel der Maßnahme ist die (teilweise) Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen. Aus klimatischer Sicht sind vor allem die Effekte einer reduzierten Wärmespeicherung sowie einer erhöhten Verdunstungskühlung von Bedeutung.

Die Vorteile der Entsiegelung sind u.a.:

- Reduktion vom Regenwasserabfluss
- erhöhte Verdunstung vom Boden
- geringere Oberflächentemperaturen
- Reduktion der thermischen Belastung
- Wasserspeicherung im Boden
- Grundwasserneubildung
- Lebensraum für Pflanzen und Tiere

9.2.3 MASSNAHME 07: GRÜNE PARKIERUNG, VERSCHATTUNG VON PARKFLÄCHEN

Kurzerläuterung der Maßnahme

Um den Versiegelungsgrad und damit die Bereiche mit hohen Oberflächentemperaturen zu reduzieren, bietet es sich an, Autoabstellplätze sowohl im privaten als auch im öffentlichen Raum zu begrünen. Für die Gestaltung der Parkierungsflächen gibt es viele Möglichkeiten, wie Pflasterrasen, Rasengittersteine, Schotterrasen etc. Die Ausgestaltung hängt im Einzelfall von der jeweiligen Nutzung und Belegung der Stellplätze ab.

Wirkung der Maßnahme

Alternativ oder ergänzend zur Begrünung können Überdachungen, Sonnensegel oder ähnliche Schatten liefernde Bauten eingesetzt werden. Aufgrund der fehlenden Verdunstung, ist ihre Wirkung im Vergleich zu Bepflanzung jedoch herabgesetzt. Darüber hinaus übernehmen Bäume und Sträucher im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Durch die Begrünung wird das Gelände ästhetisch aufgewertet, Regenwasser kann gespeichert werden, die Verdunstung wird erhöht, Oberflächentemperaturen gehen zurück.
Zusätzlich zu grünen Parkplätzen kann man durch Pflanzung großkroniger Bäume eine gute Verschattung der Fahrzeuge und des Untergrunds erreichen.
Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (Klima-Arten-Matrix von Rolof A. et al., 2008). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen.

9.2.4 MASSNAHME 08: VERSCHATTUNG VON STRASSEN, PLÄTZEN UND GEBÄUDEN

Kurzerläuterung der Maßnahme

Straßen, (Geh- und Fahrrad-)Wege sowie Stadtplätze sind der zentrale öffentliche Aufenthaltsbereich der Stadtbevölkerung und Besucher im Außenraum. Die Flächen werden entweder zum längeren Aufenthalt aufgesucht (z.B. Marktplatz) oder aber als Mittel zum Zweck genutzt, um ein Bewegungsziel zu erreichen (z. B. Arbeits- oder Einkaufsweg, Sightseeing). Mit Blick auf den Klimawandel (häufigere und intensivere Hitzeperioden), dem demographischen Wandel (höherer Anteil an hitzesensiblen Bevölkerungsgruppen), und dem angestrebten zunehmenden Fußgänger- und Fahrradverkehr sollte einer nicht gesundheitlich

belastenden thermischen Situation auf diesen Flächen besondere Beachtung geschenkt werden. Bäume und Baum-Alleen bieten sowohl für den Autoverkehr als auch für den Fußgänger Schatten. Aber auch bauliche Maßnahmen wie Kleinbauten (z. B. Wartehäuschen an ÖPNV-Haltestellen) und temporäre Installationen (Sonnenschirme, Markisen) bewirken Schutz vor Sonneneinstrahlung.

Wirkung der Maßnahme

Die Verschattung verringert die thermische Belastung durch die direkte Sonneneinstrahlung am Tage. Die beschatten Straßen und versiegelten Gehwege speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten. Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermisch Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden.
Modellierungen und Messungen zeigen eine kühlende Wirkung der Verschattung von mehreren Kelvin im unmittelbaren Umfeld der Maßnahmen. Darüber hinaus übernehmen Bäume und Sträucher im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung der Maßnahme sollte darauf geachtet werden, dass der vertikale Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an. Im Bereich von Luftleitbahnen dürfen Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und sollten möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden.

9.2.5 MASSNAHME 09: NEUEINRICHTUNG UND ERHALT VON POCKET-PARKS

Kurzerläuterung der Maßnahme

Aufgrund der eingeschränkten Mobilität insbesondere der Risikogruppen (Hochbetagte, Mütter mit Kleinkindern) sollte eine Stadt möglichst viele, kleinere Kühlinseln in den bebauten Strukturen aufweisen. Sogenannte Pocket-Parks besitzen daher als kühle Rückzugsgebiete eine besondere Bedeutung.
Diese Maßnahme kann hervorragend mit anderen Anpassungskomplexen, wie z.B. Starkregen oder Überflutung gekoppelt werden, um multifunktionale Flächen zu schaffen.

Wirkung der Maßnahme

Dominieren auf der Fläche Bäume und/oder offene Wasserflächen, bieten sie an heißen Sommertagen eine lokale Kühlinsel zum Abbau des thermischen Stresses. Ein dichtes Netz aus Pocket-Parks stellt die Nutzbarkeit durch alle zu jederzeit sicher. Sind die Pocket-Parks so verteilt, dass sie zur Vernetzung größerer Grünflächen beitragen, kann ihre bioklimatische Wirkung verstärkt werden (Scherer 2007). Darüber hinaus dienen die Anlagen auch einer Verbesserung der Biotopvernetzung.

9.2.6 MASSNAHME 10: INNEN- UND HINTERHOFBEGRÜNUNG

Kurzerläuterung der Maßnahme

Das Ziel von Innen-/Hinterhofbegrünungen liegt in der Verbesserung des Mikroklimas direkt am Ort des Eingriffs. Dabei steht die Verbesserung der Tagsituation durch die Bereitstellung von Schattenflächen im Fokus. In Kombination mit einer Entsiegelung und einer Verschattung von sonnenexponierten Gebäudeseiten kann auch eine unmittelbare Verbesserung der thermischen Situation im Gebäudeinneren insbesondere auch für die Nachtsituation erreicht werden.

Wirkung der Maßnahme

Die klimaverbessernde Wirkung von begrünten Hinterhöfen ist abhängig von der jeweiligen örtlichen Situation und den eingesetzten Mittel zu Begrünung und Verschattung. Die Wirkung bezieht sich fast ausschließlich auf den Hof selbst und entfaltet keine Fernwirkung. Sie verbessert aber wesentlich die Aufenthaltsqualität im Hofraum und trägt unter anderem auch zur Verbesserung von Sozialkontakten bei.

9.2.7 MASSNAHME 11: ERHÖHUNG DER OBERFLÄCHEN- ALBEDO (REFLEXION)

Kurzerläuterung der Maßnahme

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Ausbildung der urbanen Wärmeinsel ist die Beschaffenheit der nicht natürlichen Oberflächen (vor allem Gebäude, Dächer, Straßen). Sie bestimmt die Wärmeleitfähigkeit ins Gebäude (bzw. in den Boden) sowie die Oberflächentemperatur und damit die Lufttemperatur im angrenzenden Außenraum (Kuttler 2013).
Die Energieumsätze am Erdboden bzw. an den Wänden werden u.a. sehr stark von den Reflexionseigenschaften (Albedo) des Untergrunds bestimmt. Die Erde erhält die von der Sonne eingestrahlte Energie etwa zu gleichen Teilen im sichtbaren Strahlungsbereich, wie auch im nahen Infrarotbereich.
Für die Energieaufnahme an den Oberflächen ist also die Albedo beider Spektralbereiche, die sehr unterschiedlich sein kann, von Bedeutung. Insbesondere weiße und helle Oberflächen reflektieren die Sonnenstrahlung stark. Der reflektierte Anteil trägt damit nicht mehr zur Erwärmung der Oberfläche bei.

Wirkung der Maßnahme

Ein Maß für das Rückstrahlvermögen von Oberflächen ist die Albedo. Sie gibt das Verhältnis von einfallender zu reflektierter Strahlung an und wird in Werten von null bis eins angegeben. Eine hohe Albedo hat aus thermischer Perspektive sowohl eine positive Auswirkung auf die Wärmeleitung als auch auf die Lufterwärmung. Je höher also die Albedo der Baumaterialien oder der Fassadenanstriche („cool colors“) ist, desto mehr einfallende Sonnenstrahlung wird von ihnen reflektiert und desto geringer fällt die Erwärmung der Oberfläche und der angrenzenden Luftmassen aus. Auch die Entsiegelung und Begrünung führen oft zu einer Albedoerhöhung, da Pflanzen ein höheres Rückstrahlvermögen als beispielsweise dunkler Asphalt aufweisen. Die Maßnahme kann vor allem beim Neubau von Gebäuden und Straßen angewendet werden. Vor allem bei Südfassaden, die der stärksten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, ist ein heller Anstrich empfehlenswert.

9.2.8 MASSNAHME 12: NEUEINRICHTUNG VON ERLEBBAREM WASSER IM ÖFFENTLICHEN RAUM (Z. B. WASSERSPIELPLÄTZE)

Kurzerläuterung der Maßnahme

Offene Wasserflächen weisen eine positive Wirkung auf die thermische Situation auf. Dies gilt insbesondere für die Tagsituation. Hier findet Verdunstung statt, die Energie aus der umgebenden Luft benötigt und diese abgekühlt („Verdunstungskühlung“). Je größer die Wasseroberfläche, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Bewegtes Wasser erzielt eine stärkere kühlende Wirkung als stehendes Gewässer, da die verdunstungsfähige Oberfläche bei der Bewegung vergrößert wird. In Sommernächten verbessern Wasserflächen aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherkapazität hingegen eher nicht den thermischen Komfort. Während langer Wärmeperioden können sie in den Nachtstunden sogar wärmer werden als die umgebende Luft und somit deren Abkühlung verringern (Kuttler 2013).

Wirkung der Maßnahme

Bei Springbrunnen, Wasserspielen und Wasservernebler kommt es infolge der Wasserverdunstung zu einer Abkühlung der Luft. Bei diesen Einrichtungen wird die Wasseroberfläche stark vergrößert und somit die Verdunstungsrate. Lokal lassen sich dadurch merkliche Abkühlungsraten erreichen.
Eine weitere abkühlende Wirkung kommt bei direkter Berührung mit dem Wasser zustande. Dabei ist es weniger der anhaltende Kontakt mit dem Wasser (Baden ausgenommen), sondern die Benetzung der Hautoberfläche mit einem Wasserfilm, der sehr schnell verdunstet und die Haut merklich abkühlt.
Eine Kopplung mit Maßnahmen der Pocket-Parks sollte geprüft werden (Kapitel 9.2.5).

9.3 MASSNAHMEN AN GEBÄUDEN

9.3.1 MASSNAHME 13: ENERGETISCHE GEBÄUDESANIERUNG

Kurzerläuterung der Maßnahme

Die energetische Gebäudesanierung ist in erster Linie eine Klimaschutzmaßnahme, die durch technische und bauliche Maßnahmen den (Heiz-)Energiebedarf der zu sanierenden Gebäude verringern soll. Allerdings weisen die gängigen Dämmmaterialien auch einen geringeren Wärmedurchgang von außen nach innen auf, so dass im Sommer auch der thermische Komfort im Innenraum verbessert wird.

Wirkung der Maßnahme

Klimaangepasstes Bauen ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei der Verdichtung sind entsprechende Maßnahmen möglich. Im Neubau bietet sich außerdem die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlaf- bzw. Arbeitszimmern der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird.

Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas.

Die Energieeinsparverordnung (EnEV 2013) regelt die einzuhaltende Qualität der Dämmstoffe. Es besteht eine enge Verbindung zu Maßnahme Erhöhung der Oberflächenalbedo (Kapitel 9.2.7), auch Fassaden- und Dachbegrünungen weisen dämmende Eigenschaften auf (vgl. Kapitel 9.3.2 und 9.3.3).
Folgende Sanierungsmaßnahmen sind sinnvoll:

- Außenwanddämmung
- Dachdämmung
- Dämmung der Keller-Außenwände
- Fenstersanierung
- Heizungssanierung (z.B. Niedertemperaturkessel, Brennwertkessel, Mikro-KWK, Wärmepumpe, Strahlungsheizung)
- Kellerdeckendämmung
- Solarthermie zur Warmwasser- und/oder Heizungsunterstützung
- Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung

Diese Maßnahmen sollten jedoch gekoppelt sein mit einem hinreichenden Sonnenschutz im Sommer (Kapitel 9.3.4), da ansonsten durch die Fenster zu viel Sonnenenergie ins Haus gelangt.

9.3.2 MASSNAHME 14: DACHBEGRÜNUNG

Kurzerläuterung der Maßnahme

Es gibt grundsätzlich zwei Formen einer Dachbegrünung. Extensive Dachbegrünungen haben eine dünne Substratschicht und eine rasenartige Vegetation. Intensive Dachbegrünungen hingegen zeichnen sich durch mehrere Substratschichten und höhere Vegetation auf. Über die Verdunstungsleistung kühlen sie die dachnahen Luftmassen daher auch stärker. Sie können je nach Platzverfügbarkeit eine Gartenlandschaft mit Bäumen, Teichen, Sumpfzonen und Wegen darstellen und bedürfen im Regelfall einer Pflege, sowie ggf. einer Bewässerung und Düngung (FLL 2002, DDV 2011). Die Dachbegrünung kommt neben dem Stadtklima zusätzlich auch der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Biodiversität zugute.
Auch Photovoltaikanlagen können auf Gründächern weiterhin installiert werden. Die Dachbegrünung wirkt sich hier durch ihre Kühlfunktion sogar positiv auf die Leistung der PV-Anlagen aus.

Wirkung der Maßnahme

Die kühlende Wirkung einzelner Dachbegrünungen beschränkt sich auf die Luftmassen direkt über der Dachoberfläche. Mit der Maßnahme lässt sich also vor allem das Innenraumklima in den darunter liegenden Dachgeschoßwohnungen verbessern (Groß 2012). Es kann allerdings begründet angenommen werden, dass eine Begrünung vieler Dächer auch einen signifikanten Effekt auf die gesamtstädtische Wärmeinsel aufweist. Oberflächentemperaturen werden am Tage stark gesenkt. Regenwasser wird zurückgehalten. Schon eine Substratdecke von 6-10 cm reduziert bei extensiver Begrünung den jährlichen Regenwasserabfluss erheblich. Intensive Gründächer können zudem begangen werden und bieten damit auch unmittelbar eine thermische Komfortzone. Dachbegrünungen sind mit vielen weiteren Synergieeffekten verbunden. Hierzu zählen u.a. Reduktion des Niederschlagsabflusses, Lärmminderung und die Erhöhung der Biodiversität (Pfoser et al. 2013).
Alle Dachbauweisen bis ca. 45° sind für Begrünungen grundsätzlich geeignet. Eine Prüfung der statischen Verhältnisse ist erforderlich. Vor allem für die intensive Begrünung ist eine massive Baukonstruktion unabdingbar. Außerdem muss das Dach wasserdicht sein und gegen Durchwurzelung geschützt werden (FFL 2008).
Nach § 9(1) 25 BauGB ist es bei Neuplanungen rechtlich möglich, eine Dachbegrünung vorzuschreiben. Im Bestand kann durch städtische Förderprogramme die nachträgliche Begrünung von Flachdächern unterstützt werden.

9.3.3 MASSNAHME 15: FASSADENBEGRÜNUNG

Kurzerläuterung der Maßnahme

Der planmäßige und kontrollierte Bewuchs geeigneter oder speziell vorgerichteter Fassaden mit Pflanzen wird als Fassadenbegrünung bezeichnet. Es wird zwischen erd- und fassadengebundenen Systemen unterschieden. Begrünte Hausfassaden haben eine ähnliche Wirkung wie die Gründächer. Sie verbessern die klimatischen Bedingungen am Gebäude, die klimatische Fernwirkung ist allerdings gering (MUNLV, 2010). Außerdem wirken sie positiv auf die Luftqualität (insbesondere Feinstaub) sowie auf die Energiebilanz des Gebäudes.

Wirkung der Maßnahme

In erster Linie wirkt die Grünfassade dämmend auf das Gebäude und führt zu Abmilderung der Innentemperaturextreme im Tages- und Jahresverlauf. Das schattenwerfende Blattwerk, die Luftschicht zwischen der Vegetation und der Hauswand sowie die Evaporation verringern die Wärmeaufnahme und die Oberflächentemperatur der Gebäudehülle und erhöhen den thermischen Komfort in allen Stockwerken des Gebäudeinneren sowie im unmittelbar angrenzenden Außenklima. Ein weiterer positiver Effekt ist die Verbesserung der Luftqualität in der Nähe der Fassadenbegrünung. Die relativ große Pflanzenoberfläche ad- und absorbiert den Feinstaub und andere Luftschadstoffe. Auch eine lärmmindernde Wirkung der Fassadenbegrünung ist messtechnisch nachgewiesen. Ähnlich wie Dachbegrünung tragen auch Fassadenbegrünungen zur Speicherung und Verdunstung von Niederschlagswasser und damit zum Hochwasserschutz sowie zur Erhöhung der Biodiversität bei (Pfoser et al. 2013).

Es gibt diverse Ausführungsmöglichkeiten einer Fassadenbegrünung. Die Entscheidung hängt hauptsächlich von den Bauwerkseigenschaften ab und sollte gut geplant werden, um eventuelle Schäden am Gebäude oder der Begrünung zu vermeiden. Dabei ist sowohl der Aufbau (Pflanzenart, Befestigungsart und die entstehende Last) zu berücksichtigen als auch die späteren pflegerischen Maßnahmen (Bewässerung, Pflanzenschnitt) (FLL 2000). Die Maßnahme der Fassadenbegrünung sollte insbesondere bei der Stadtsanierung eine wichtige Rolle spielen, da in den dicht bebauten Stadtteilen oft keine anderen Flächen zur Begrünung vorhanden sind. Gemeinden können Fassadenbegrünungen in den Bebauungsplänen nach § 9 Absatz 1 Nummer 25 Baugesetzbuch (BauGB) ebenso rechtsverbindlich festsetzen wie Dach-begrünungen.

9.3.4 MASSNAHME 16: SOMMERLICHER WÄRMESCHUTZ AN GEBÄUDEN

Kurzerläuterung der Maßnahme

Der Überhitzung von Räumen vorzubeugen ist das wesentliche Ziel des sommerlichen Wärmeschutzes. Es gilt, ein behagliches Innenraumklima während der Sommermonate sicherzustellen und gleichzeitig den Energieverbrauch für die Kühlung möglichst gering zu halten. Der Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz ist in der EnEV geregelt und für neu zu errichtende Wohngebäude und Nichtwohngebäude verpflichtend (EnEV 2013 in Verbindung mit DIN 4108-2 2005). Auch für die Höhe der Raumtemperatur in Arbeitsstätten gibt es Technische Regeln (ASTA 2010).

Wirkung der Maßnahme

Die mögliche Überwärmung von Gebäuden hängt nach DIN 4108 von verschiedenen Faktoren ab wie die Ausrichtung des Gebäudes, die Abmessungen des Raumes, die Ausrichtung und Größe der Fenster, die Art der Verglasung, den Sonnenschutz, dem Lüftungsverhalten, interne Wärmequellen (z. B. Personenwärme, Abwärme von Computern oder Beleuchtung) sowie die Wärmespeicherkapazität der verwendeten Baustoffe (Innen- und Außenwände, Geschossdecken, Dämmstoff im Dach). Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes an Gebäuden beziehen sich maßgeblich auf die Fensterflächen:

- Verschattung der Fensterflächen eines Gebäudes durch bauliche Maßnahmen (z.B. Überstände)
- Sonnenschutzelemente: Außen liegende Verschattungen sind deutlich effizienter als innenliegende
- Sonnenschutzglas zur Senkung des Wärmeeintrags
- Bauteilkonstruktionen, welche den Energieeintrag in Gebäude vermindern und solare Gewinne durch hohe Speichermassen puffern
- erhöhte Luftwechselraten in den kühlen Stunden des Tages, um die in das Gebäude eingebrachte Energie abzuführen.

Neben der Verglasung sind aber auch die verwendeten Baumaterialien entscheidend. Je geringer ihre Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit sind, desto weniger tragen sie zur Aufheizung des Innenraums bei bzw. unterstützen dessen nächtliche Auskühlung. Dieser Effekt wird durch Beschattung der Gebäudehülle unterstützt.

Maßnahmen in der Umgebung der Gebäude, wie die Verschattung durch Bäume sind ebenfalls sehr sinnvoll, da die Bäume zudem positiv auf das Außenklima wirken. Bei der Verwendung von Laubbäumen beschränkt sich die Verschattung weitgehend auf das Sommerhalbjahr. Ein solarer Zugewinn im Winter ist damit gewährleistet.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die aktuelle Stadtklimaanalyse für Mönchengladbach konzentriert sich auf den thermischen Wirkkomplex zwischen der städtischen Bebauung als Wirkungsraum und den Grünflächen aus Ausgleichsraum. Dabei wird das auf den Menschen wirkende Bioklima in den Fokus gestellt.

Mittels des Stadtklimamodells FITNAH 3D wurden flächendeckende Ergebnisse der wichtigsten meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung und Kaltluftvolumenstrom für die Nachtsituation bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) für die Tagsituation berechnet. Der Simulation liegt eine autochthone sommerliche Wetterlage zugrunde (herabgesetzter Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht, hohe Ein- und Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel). Zur Innwertsetzung und Erstellung von Planungskarten wurden die rasterbasierten Ergebnisse auf die Flächen einzelner Nutzungsstrukturen übertragen.

Die Klimaanalysekarten spiegeln die Überwärmung der Siedlungsflächen und das Kaltluftprozessgeschehen für das gesamte Untersuchungsgebiet wider. Sie veranschaulichen die strukturellen Unterschiede auf das Temperaturfeld sowie den städtischen Wärmeinseleffekt (bis zu 7 K höhere Temperaturen im Stadtkern verglichen mit siedlungsfernen Freiflächen), bilden die in einer autochthonen Sommernacht entstehenden Ausgleichsströmungen ab (Flurwinde) und identifizieren mehrere für die Durchströmung des Stadtgebiets besonders wichtige Kaltluftleitbahnbereiche sowie die am Tage wichtigen Erholungsräume im Grünen.

Die Planungshinweiskarten quantifizieren die Belastung in den Siedlungsflächen (Wirkungsraum) sowie die Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume im Stadtgebiet. In der Nacht ist ein erholsamer Schlaf von besonderer Bedeutung, sodass in der Bewertung die reinen Wohngebiete im Vordergrund stehen. Am Tage ist die Aufenthaltsqualität im Freien der maßgebliche Parameter und es werden Gewerbeflächen in die Bewertung eingeschlossen. Die Planungshinweiskarte kann somit als „Belastungsanalyse“ bezeichnet werden. In einer anschließenden „Betroffenheitsanalyse“ wurden durch ein Verschneiden der thermisch belasteten Wohngebiete mit den Bevölkerungszahlen die Konfliktbereiche (Hot Spots) erarbeitet, in denen ein hoher Anteil an hitzesensiblen Bewohnern (Kinder unter 7 Jahre bzw. Erwachsene über 65 Jahre) einer bioklimatisch ungünstigen oder sehr ungünstigen Situation ausgesetzt sind.

In der Nacht belastete Siedlungsflächen treten insbesondere in der Innenstadt sowie den umliegenden Gebieten auf, während sich die bioklimatische Situation mit zunehmender Entfernung zum Kernbereich tendenziell verbessert. Am Tage sind deutliche Unterschiede zwischen der Aufenthaltsqualität im Freien in Wohnsiedlungsflächen und Gewerbegebieten zu erkennen. Wohngebiete zeigen mehrheitlich eine höchstens mittlere Belastung, Gewerbeflächen dagegen oftmals ungünstige bioklimatische Bedingungen. An Sommertagen bieten über 60 % % der Grünflächen im Stadtgebiet von Mönchengladbach eine mittlere bis hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich als (erreichbare) Rückzugsorte für die Bevölkerung. In der Nacht weist etwa die Hälfte der Grünflächen eine hohe bis sehr hohe Bedeutung in Bezug auf das Kaltluft-prozessgeschehen auf. Während vor allem innerstädtische Parkareale sowohl in der Nacht als auch am Tage in der Regel eine positive Wirkung ausüben, steht bspw. die günstige Wirkung von unversiegelten Freiflächen in der Nacht (Abkühlung, Durchströmbarkeit) einer meist sehr geringen Aufenthaltsqualität am Tage gegenüber (hohe Einstrahlung). Folglich gilt es beide Planungshinweiskarten bei der Beurteilung von Flächen zu betrachten.

Aus den Ergebnissen der Stadtklimaanalyse kann festgehalten werden, dass es in Mönchengladbach thermisch belastete Siedlungsbereiche gibt, deren bioklimatische Situation möglichst durch geeignete Maßnahmen verbessert werden sollte. Weite Teile des Stadtgebiets werden über die aufgezeigten Kaltluftleitbahnen – deren Funktion durch Bebauung nicht eingeschränkt werden sollte – bzw.

kleinräumige Ausgleichsströmungen durchströmt, doch nimmt die Durchlüftung in Richtung des Stadtkerns ab und fällt in der Innenstadt sowie den meisten zentrumsnahen Bereichen nur gering aus bzw. ist teilweise nicht mehr gegeben. Eine ausreichende Belüftung kann nicht nur die thermische Belastung mildern, sondern sich auch positiv auf - die in diesem Gutachten nicht näher betrachtete - Luftqualität auswirken. Entsprechend sollte der Erhalt bzw. die Verbesserung der Durchlüftung durch geeignete Maßnahmen im Fokus stehen.

Soweit möglich, sollte der Grünanteil im Kernstadtgebiet erhöht werden, insbesondere in thermisch belasteten Bereichen (Verschattung / Begrünung der Innenstadt, Pocket-Parks, großflächige Grünanlagen).

Bei Nachverdichtungen im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss.

Den bewerteten Siedlungs- und Grünflächen sind jeweils allgemeine Planungshinweise zugeordnet, die eine erste Einschätzung möglicher Maßnahmen bzw. Gebote erlauben, doch bezogen auf den Einzelfall genauer betrachtet werden müssen. Betroffenheiten wurden anhand von demographischen Daten identifiziert und ein Katalog mit Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Erhalt des thermischen Komforts sowie Reduzierung von Hitzestress während hochsommerlicher Extremsituationen wurde abgeleitet.

Das Stadtklima von Mönchengladbach ist zwar momentan durch keine übermäßig starke Wärmebelastung geprägt, und bis auf die Innenstadt erfolgt auch eine gute Durchlüftung, da viele Kaltluftleitbahnen frei von Bebauung gehalten werden, jedoch wird es in Zukunft zu einer Temperaturerhöhung allein durch den Klimawandel kommen. Ziel ist es also, die städtebauliche Entwicklung klimagerecht umzusetzen.

Der deutsche Anpassungsprozess wird vom Umweltbundesamt bzw. vom dortigen „Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass)“ im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) gesteuert. Die Bundesrepublik gehört mit der 2008 verabschiedeten „Deutschen Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels (DAS)“ (Bundesregierung 2008) sowie dem „Aktionsplan Anpassung I + II“ (Bundesregierung 2011, 2015) zu den Vorreitern des Kontinents. Für die deutschen Kommunen können Fördermittel im Rahmen der „Kommunalrichtlinie“ beantragt werden, die es einer Stadt ermöglichen, Strategien und Konzepte für den Klimaschutz erarbeiten zu lassen.

Quellenverzeichnis

Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA) (2010): Technische Regel für Arbeitsstätten: Raumtemperatur, ASR A3.5, Quelle: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)(28.08.2015). Internet: http://www.baua.de/cae/servlet/contentblob/1108456/publicationFile/89166/ASR-A3-5.pdf (Zugriff: 30.05.2018)

BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2017): Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz. Bonn

Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels.

Bundesregierung (2011): Aktionsplan Anpassung zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. www.bmub.bund.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/aktionsplan-anpassung-zur-deutschen-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel/

Bundesregierung (2015): Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Abruf am 3.01.2018. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_fortschrittsbericht_bf.pdf

DDV (=Deutscher Dachgärtner Verband e.V.) (2011): Leitfaden Dachbegrünung für Kommunen. Nutzen, Fördermöglichkeiten, Praxisbeispiele.

DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.

DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den WärmeschutzEnEV (2005): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energie-sparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV).

EEA (European Environment Agency), 2017: Copernicus Land Monitoring Service – Local Component: Urban Atlas. Copenhagen.
Online: https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/

EMD, 2019: ConWx-Reanalyse, Stundenmittel der Windgeschwindigkeit in 10 m– 200 m Höhe am Gitterpunkt 51.20°N 6.44°E im Zeitraum Januar 1993 – Dezember 2018, EMD International A/S.

EnEV (2013): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV).

FLL (=Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.) (2000): Fassadenbegrünungs-richtlinie – Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen von Kletterpflanzen.

FLL (=Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.) (2002): Pflege und Wartung von Begrünten Dächern. FLL: Selbstverlag.

FLL (=Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.) (2008): Dachbegrünungs-richtlinie - Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. FLL: Selbstverlag.

Geiger, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig: Vieweg Verlag, 4. Auflage

GEO-NET & Planungsgruppe Umwelt (2017): Analyse der klimaökologischen Funktionen und Prozesse für das Bundesland Nordrhein-Westfalen. Hannover

Groß, G. (1989): Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. Beitr. Phys. Atmosph. , H 62 , S. 57-72.

Groß, G. (1993): Numerical Simulation of canopy flows. Springer Verlag Heidelberg.

Groß, G. (2012): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol. 21, No. 2, 173-181.

Häckel, H. (2012): Meteorologie. 7. Auflage. Stuttgart.

Hergert (1991): Klimatische und lufthygienische Situation am Kronsberg und die Beeinträchtigung der klimaökologischen Ausgleichswirkung durch Bebauung. Diplomarbeit an der Universität Hannover.

Höppe, P. und H. Mayer (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadt-klimas. Landschaft und Stadt 19 (1): S. 22-29.

Jendritzky, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan. Nr. 114.

Kiese, O. (1988): Die Bedeutung verschiedenartiger Freiflächen für die Kaltluftproduktion und die Frischluftversorgung von Städten. Landschaft + Stadt 20, H.2: S. 67-71.

Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig. Band 13.

Kuttler, W. (2009): Klimatologie. Paderborn.

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

Kuttler, W. (2013): Klimatologie. Kapitel: Lokale Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel. Paderborn: Schöningh (2. Auflage).

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein – Westfalen LANUV (2018): Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen. LANUV-Fachbericht 86. Recklinghausen. Online Karten unter https://www.klimaanpassung-karte.nrw.de/

Landesregierung NRW (2018): Open Data NRW, DGM in 1 m Auflösung. Download unter https://open.nrw/ (Zugriff im Januar 2018)

Malberg, H. (2002): Meteorologie und Klimatologie- Eine Einführung. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.

Mosimann et al. (1999): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Informationsdienst Natur-schutz Niedersachsen. Heft 4/99: S. 202-275.

Müller, N. (2013) – Stadtklimatische Adaptationsmaßnahmen in Oberhausen vor dem Hintergrund des Globalen Klimawandels. Essener Ökologische Schriften Bd. 33, Hrsg. Wilhelm Kuttler, Bernd Sures

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

Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. Atmospheric Environment (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.

Pfoser et al. (2013): Gebäude, Begrünung und Energie: Potenziale und Wechselwirkungen. Interdisziplinärer Leitfaden als Planungshilfe zur Nutzung energetischer, klimatischer und gestalterischer Potenziale sowie zu den Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäudeumfeld, Forschungsbericht, Technische Universität Darmstadt.

Scherer, D. (2007): Viele kleine Parks verbessern Stadtklima. Mit Stadtplanung Klima optimieren. TASPO Report Die grüne Stadt, 15.

Schönwiese, C.- D. (2008): Klimatologie. 3. Auflage. Stuttgart.

UBA (2016) - Umweltbundesamt: Heizen, Raum-temperatur.
Online: *www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltbewusstleben/heizen-raumtemperatur*

VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 9. Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene.

Van den Bosch et al. (2015): Development of an urban green space indicator and the public health rationale.Scandinavian Journal of Public Health 10/2015, Göteborg.

VDI (2008a): VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.

VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.

VDI (2015): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.

Anhang

Karte Modellergebnisse Temperatur nachts

Karte Modellergebnisse Kaltluftströmungsfeld

Karte Modellergebnisse Kaltluftvolumenstrom

Karte Modellergebnisse Thermische Situation am Tag

Karte Konfliktbereiche (`Hot Spots‘), DIN A3