

## KLIMAANALYSE STADT INGOLSTADT

Erstellung einer Klimaanalyse- und Planungshinweiskarte auf Grundlage vorliegender Modell-ergebnisse als Fachinformation für die Novellierung des Flächennutzungs- und Landschaftsplans.

## Klimaanalyse Stadt Ingolstadt

Auftraggeber: Stabsstelle Klima, Biodiversität und Donau  
Mauthstraße 4  
85049 Ingolstadt



**Stadt Ingolstadt**

Auftragnehmer: INKEK GmbH  
Institut für Klima- und Energiekonzepte  
Schillerstraße 50 in 34253 Lohfelden

**INKEK** Institut  
für Klima- und  
Energiekonzepte

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Sebastian Kupski, MSc(Eng) Janalisa Hahne  
Qualitätssicherung: Prof. Dr. Lutz Katzschner

Lohfelden, 18.03.2022

  
Sebastian Kupski, Dipl.-Ing. Stadtplaner-IngKH  
(Geschäftsführer)

## Inhalt

<b>1</b>	<b>HINTERGRUND UND AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>6</b>
1.1	Stadtklimatische Einordnung Untersuchungsgebiet	7
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>9</b>
2.1	Ziele von Stadtklimaanalysen	10
2.2	Stadtklimatischer Bewertungsindex	12
<b>3</b>	<b>METHODIK</b>	<b>13</b>
3.1	Einführung Klimaanalysekarte	13
3.2	Methodik zur Erstellung von Klimaanalysekarte	14
<b>4</b>	<b>DATENGRUNDLAGE</b>	<b>16</b>
4.1	Datenbestand Klimaanalyse Stadt Ingolstadt	16
<b>5</b>	<b>VORGEHENSWEISE</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>KLIMAAANALYSEKARTE</b>	<b>20</b>
6.1	Klimatope	20
6.2	Legende der Klimaanalysekarte	25
6.3	Klimaanalysekarte	26
<b>7</b>	<b>KONTROLLMESSKAMPAGNE</b>	<b>27</b>
7.1	Stationäre Messung	28
7.2	Profilmessfahrten	31
7.3	Vertikalsondierung	33
7.4	Mobile Bioklima-Messungen	35
7.5	Evaluation der Kontrollmesskampagne	36
<b>8</b>	<b>PLANUNGSHINWEISKARTE</b>	<b>38</b>
8.1	Beschreibung der räumlichen Planungshinweise	39
8.2	Legende der Planungshinweiskarte	42
8.3	Planungshinweiskarte	44
<b>9</b>	<b>KLIMAWIRKUNGS- UND VULNERABILITÄTSANALYSE</b>	<b>45</b>
9.1	Tabellarische Auswertung	46
9.2	Kartografische Auswertung (Ampelkarte)	50
<b>10</b>	<b>SCHLUSSBETRACHTUNG</b>	<b>51</b>
<b>11</b>	<b>QUELLEN</b>	<b>54</b>
<b>12</b>	<b>ANHANG</b>	<b>56</b>

## Abbildungen

Abbildung 1: Karte der Stadtbezirke Stadt Ingolstadt. (Kartografie und Geobasis: Amt für Verkehrsmanagement und Geoinformation Statistik und Stadtforschung). .....	7
Abbildung 2: Windrose LÜB-Station Rechbergstraße (Luftreinhalte-/Aktionsplan für die Stadt Ingolstadt, 2007). ..	8
Abbildung 3: Schema "Thermischer Wirkungskomplex". Dargestellt sind die unterschiedlichen Parameter, die sich auf den Wärmehaushalt des Menschen auswirken. Durch planerische Eingriffe können diese Bedingungen beeinflusst werden (nach dem Klima-Michel-Modell, DWD). .....	12
Abbildung 4: Prinzipielle Vorgehensweise zur Erstellung einer Stadtklimakarte nach Lohmeyer 2008. ....	14
Abbildung 5: Schematische Abbildung der angewandten Vorgehensweise. ....	19
Abbildung 6: Legende der Klimaanalysekarte Stadt Ingolstadt 2022. ....	25
Abbildung 7: Klimaanalysekarte Stadt Ingolstadt 2022 (ohne Maßstab, Original im Anhang). ....	26
Abbildung 8: Aufbau der Kontrollmesskampagne im Sommer 2021 Ingolstadt (Original im Anhang). ....	27
Abbildung 9: Windrose Rathaus, Auswertung der Windverteilung während der Messkampagne. ....	29
Abbildung 10: Auswertung der Messergebnisse "Mittlere nächtliche Abkühlung" der 6 Vergleichsstandorte. ....	30
Abbildung 11: Auswertung Profilmessfahrten während einer Strahlungsnacht (Original im Anhang). ....	32
Abbildung 12: Vertikale Temperaturprofile der drei Messorte (links: morgens, rechts: abends). ....	33
Abbildung 13: Auswertung PET-Verlauf Rathausplatz am 20.07.2021. ....	35
Abbildung 14: Ausschnitt der Temperaturprofile Messfahrten und der modellierten nächtlichen Lufttemperatur mit Markierung der Konrad-Adenauer-Brücke. ....	37
Abbildung 15: Empfohlene Anwendungsreihenfolge bei der Verwendung von Stadtklimakarten. ....	38
Abbildung 16: Teil 1 der Legende der Planungshinweiskarte Ingolstadt (Ausgleichsräume). ....	42
Abbildung 17: Teil 2 der Legende der Planungshinweiskarte Ingolstadt (Lasträume). ....	43
Abbildung 18: Planungshinweiskarte Stadt Ingolstadt 2022 (ohne Maßstab, Original im Anhang). ....	44
Abbildung 19: Klimawirkungs- und Vulnerabilitätskonzept (Umweltbundesamt 2017). ....	45
Abbildung 20: Übersicht der statistischen Unterbezirke / Stadtbezirke Ingolstadt. ....	46
Abbildung 21: Flächenanalyse (prozentuale Klimatopverteilung innerhalb der Unterbezirke / Stadtbezirke und der Gesamtstadt), Original im Anhang. ....	47
Abbildung 22: Vulnerabilitätsanalyse - Vulnerable Gruppen in Belastungsklimatopen, Original im Anhang. ....	49
Abbildung 23: Stadtkarte mit stadtklimatischem Handlungsbedarf bezogen auf die vulnerable Bevölkerung (ohne Maßstab, Original im Anhang). ....	50

## Tabellen

Tabelle 1: Bereiche von Hitzestress in Abhängigkeit des Bewertungsindex PET (Katzschner et al. 2010). ....	13
Tabelle 2: Steuerungsinstrumente für die Planung auf unterschiedlichen Maßstabsebenen und entsprechende Fachbeiträge. ....	15
Tabelle 3: Digitale Eingangsdaten. ....	16

*Bei allen Bezeichnungen, die auf Personen bezogen sind, meint die gewählte Formulierung alle Geschlechter, auch wenn aus Gründen der leichteren Lesbarkeit und Verständlichkeit die männliche Form gewählt wurde.*

*Die Erstellung des Gutachtens erfolgte nach Stand der Technik sowie nach bestem Wissen und Gewissen. Klimatische Analysen und Wetterbedingungen unterliegen einer entsprechenden Variabilität, das tatsächliche Eintreten kann naturgemäß nicht sicher prognostiziert werden. Der Auftragnehmer übernimmt keinerlei Haftung bei Nichteintritt der dargestellten Ergebnisse.*

## **Glossar** (basierend auf DWD, UBA)

### **Albedo**

Rückstrahlvermögen diffus reflektierender (aber nicht spiegelnder) Oberflächen, angegeben als Verhältnis von reflektierter zu einfallender kurzwelliger Strahlung. Eine Oberfläche mit einer Albedo von 0,3 z.B. reflektiert 30% der einfallenden Strahlung und absorbiert 70%. Je heller die Oberfläche, desto größer ist ihre Albedo.

### **Austauscharme Strahlungswetterlage** → Autochthone Wetterlage

#### **Autochthone Wetterlage**

Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, 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.

#### **Mesoklima**

Unter Mesoklima versteht man den Bereich, der zwischen dem Mikroklima und dem Makroklima liegt. Während das Makroklima hauptsächlich von großskaligen und das Mikroklima vor allem von kleinskaligen, lokalen Prozessen beeinflusst ist, ist es im Mesoklima eine Mischung von beiden. Damit umfassen die Skalen der mesoskaligen Phänomene etwa eine horizontale Ausdehnung von ca. 1 bis 2000 km. Geländeform, Hangneigung und Beschaffung der Erdoberfläche sind dabei wichtige Parameter.

Beispielsweise können viele Phänomene des Stadtklimas (wie z.B. die Hitzeinsel) dem Mesoklima zugeordnet werden. Durch die Überlagerung von großskaligen und lokalen Einflüssen sind die Phänomene des Mesoklimas nicht immer einfach zu untersuchen oder vorherzusagen.

#### **Mikroklima**

Das Mikroklima beschreibt mittlere atmosphärische Zustände und wiederkehrende Phänomene im mikrometeorologischen Maßstabsbereich. Nach Orlanski (1975) werden atmosphärische Prozesse mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern der Mikroskala zugeordnet. Mit Mikroklima ist damit das spezielle Klima eines Areals gemeint, das sich in den bodennahen Luftschichten ausbildet und stark von den vorhandenen Oberflächen (Untergrund, Bewuchs, Bebauung), z.B. deren Rauigkeit und thermischen Eigenschaften, beeinflusst ist. Verschiedenheiten in der Geländeform oder im Pflanzenbewuchs können dabei auf engem Raum große Unterschiede in der Temperatur oder der Windgeschwindigkeit verursachen.

#### **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.

#### **Vulnerabilitätsanalyse**

Einschätzung der Gefährdung von Systemen durch den Klimawandel, z.B. Betroffenheit durch Hitze im städtischem Raum. Vulnerabilität (Verwundbarkeit) umfasst eine Vielzahl von Konzepten und Elementen, unter anderem Empfindlichkeit oder Anfälligkeit gegenüber Schädigungen und die mangelnde Fähigkeit zur Bewältigung und Anpassung.

## 1 Hintergrund und Aufgabenstellung

Aufgrund der stadtklimatischen Veränderungen, die sich durch eine Veränderung der Flächennutzung und im Zuge des projizierten Klimawandels in Deutschland ergeben werden, sind umfangreiche Grundlageninformationen von besonderer Bedeutung. Nur wenn die heutige Planung auf fundierten Bewertungen der zukünftigen Entwicklung aufbaut, ist eine klimabewusste Ausrichtung umsetzbar.

Laut der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS, Fortschrittsbericht 2020) nimmt die Stadt- und Raumplanung eine „Schlüsselrolle im Bereich der Klimaanpassung“ ein. Da sich die steigende Hitzebelastung negativ auf die menschliche Gesundheit auswirkt, ist im Themenbereich „Stadtklima und Luftqualität“ ein großer Handlungsbedarf gegeben.

Im Vorgriff auf die anstehende Novellierung des Flächennutzungs- und Landschaftsplans soll für Ingolstadt eine Klimaanalysekarte und eine Planungshinweiskarte nach der Richtlinienreihe 3787 des VDI (Verein Deutscher Ingenieure) als Fachbeitrag erstellt werden. Dazu sollen bereits erhobene Ergebnisse der gesamtstädtischen numerischen Modellierung von stadtklimatisch relevanten Kenngrößen für die Ist-Situation der Stadt als Grundlage genutzt werden. Ergänzende Arbeitsschritte sind eine umfangreiche Kontrollmesskampagne sowie eine Vulnerabilitätsanalyse auf Basis von Sozialdaten. Ziel ist es, klimaökologische Aussagen zum Wärmeinseleffekt, den Wechselwirkungen im Stadtgebiet und Planungsempfehlungen zu formulieren.

Die rechtliche Grundlage der Notwendigkeit stadtklimatischer Erhebungen im Planungsprozess, auch vor dem Hintergrund des projizierten globalen Klimawandels, stellt neben dem Raumordnungsrecht insbesondere das Baugesetzbuch (BauGB) dar. Gemäß BauGB § 1 Absatz 5 Satz 2 sollen Bauleitpläne u. a. dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung, speziell auch in der Stadtentwicklung, zu fördern. Gemäß BauGB § 1 Absatz 6 Ziffer 7 sind bei der Aufstellung von Bauleitplänen u. a. die Schutzgüter „Klima“ und „Luft“ zu berücksichtigen, entsprechend sollen Fachinformationen in Stadtklimakarten umgesetzt werden und durch daraus abgeleitete Planungshinweiskarten ergänzt werden.

Um dies aufzugreifen, hat die Stadt Ingolstadt die Erarbeitung einer Klimaanalysekarte mit darauf aufbauender Planungshinweiskarte, im Vorgriff einer anstehenden Novellierung des Flächennutzungs- und Landschaftsplan, beauftragt. Der vorliegende Projektbericht beschreibt die Methodik und die Ergebnisse dieser gesamtstädtischen Klimaanalyse. Die Grundlagendaten stammen aus einer hochaufgelösten Modellierung von stadtklimatischen Kenngrößen für die Ist-Situation in Ingolstadt in einer 10 m Auflösung (Klimaanalyse Ingolstadt, Zwischenbericht – Methodik und Ergebnisse 2020, GEO-NET Umweltconsulting GmbH).

## 1.1 Stadtklimatische Einordnung Untersuchungsgebiet

Die Stadt Ingolstadt

Abbildung 1) ist klimatisch geprägt einerseits von der Beckenlage des Donautals und andererseits durch die Tatsache, dass sich die Stadt im Randeinflussbereich des beginnenden Jurahanges befindet. Ingolstadt ist durch einen ausgeprägten Jahresgang der Lufttemperatur gekennzeichnet, „geringen Niederschlägen“ und einer hohen Sonnenscheindauer. Der wärmste Monat ist regelmäßig der Juli mit im Mittel  $> 19\text{ °C}$ , der kälteste der Januar mit  $< -2\text{ °C}$ . Die jährliche Niederschlagsmenge in Ingolstadt liegt im langjährigen Mittel bei 650 - 700 mm (aus Luftreinhalte-/Aktionsplan für die Stadt Ingolstadt, 2007).

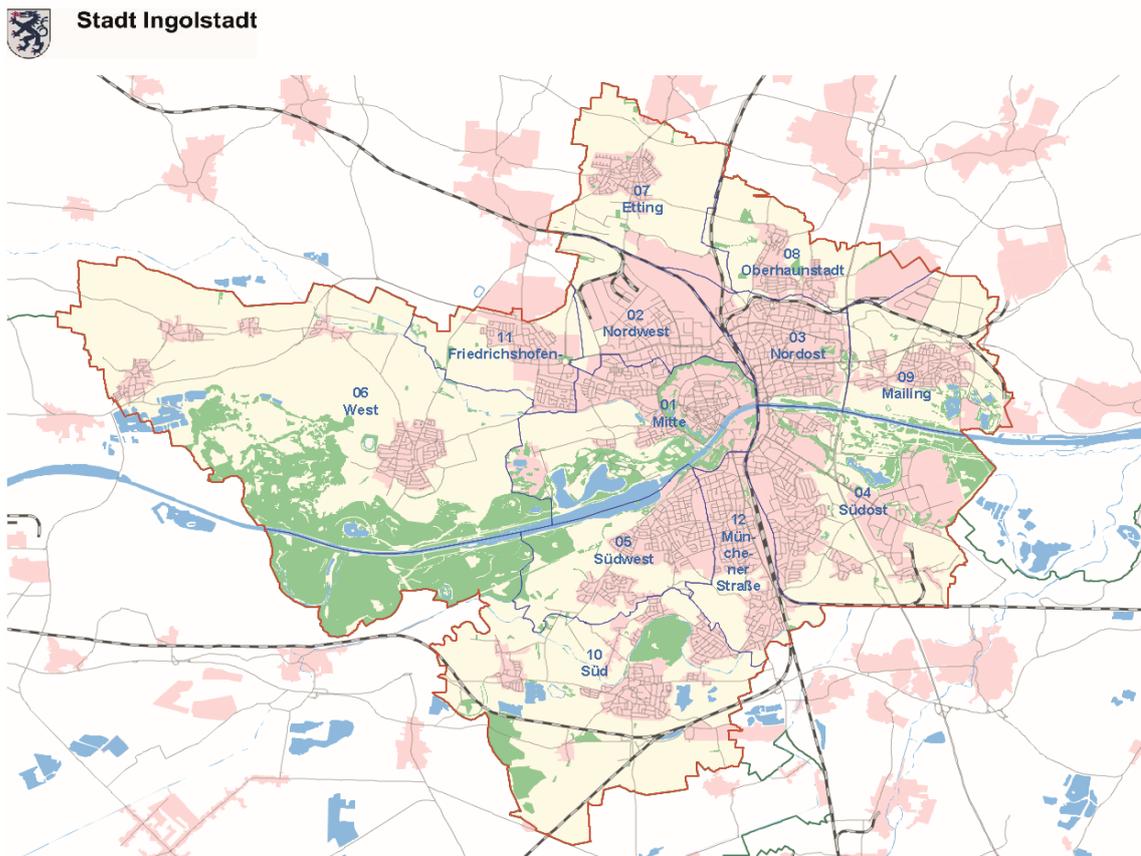


Abbildung 1: Karte der Stadtbezirke Stadt Ingolstadt. (Kartografie und Geobasis: Amt für Verkehrsmanagement und Geoinformation Statistik und Stadtforschung).

Für die Windstatistik wurden langjährige Aufzeichnungen der LÜB (Luftthygienische Landesüberwachungssystem Bayern) Messstation in der Rechbergstraße verwendet, die auch zur Beurteilung der Windverteilung in Ingolstadt bei der Luftreinhaltung Verwendung finden. Ergänzend hierzu wurde im Sommer 2021 eine umfangreiche Kontrollmesskampagne während einer geeigneten Wetterlage durchgeführt, um die dynamische Komponente des Stadtklimas entsprechend berücksichtigen zu können. Wie aus der Windrose (Abbildung 2) ersichtlich ist, überwiegen Winde aus westsüdwestlicher Richtung.

Durch die Bebauung der Stadt verändern sich die lokalen Windverhältnisse. Dies gilt bezüglich der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung. Durch die Erhöhung der Bodenrauigkeit (Barrieren) in Form von Bauwerken, kommt es zu einer reduzierten Windgeschwindigkeit im Mittel im Vergleich zum gering bebauten Umland. Allerdings kann es zu Böigkeiten und lokalen Windfeldveränderungen im heterogenen Stadtgefüge

kommen, was zu Zugerscheinungen und teilweisen Nutzungseinschränkungen im Nahfeld von Gebäuden führen kann.

Neben dem überregionalen Windfeld (Luftleitbahnen in Richtung der Hauptwindrichtung) sind insbesondere lokale Windsysteme von großer Bedeutung, die sich vor allem bei schwachem überregionalem Wind ausbilden und das Potenzial besitzen, auch bei anhaltendem Hochdruckeinfluss (windschwache Wetterlage) wirksam zu sein.

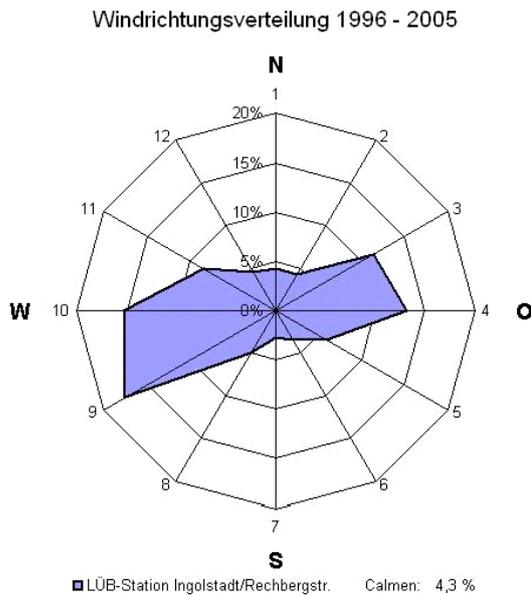


Abbildung 2: Windrose LÜB-Station Rechbergstraße (Luftreinhalte-/Aktionsplan für die Stadt Ingolstadt, 2007).

## 2 Einleitung und Aufgabenstellung

Die angewandte Stadtklimatologie befasst sich seit geraumer Zeit mit Analysemethoden, die direkte Grundlagen für eine Vielzahl planerischer Fragestellungen hervorbringen. Das Stadtklima setzt sich dabei aus zwei Komponenten zusammen, da es sowohl durch thermische als auch dynamische Aspekte geprägt wird. Starke Einfluss hat dabei der Mensch, da durch seinen Eingriff in die Umwelt auch die klimatischen Bedingungen beeinflusst und verändert werden. Ausgehend von einem hohen Versiegelungsgrad der Oberflächen, dem teilweise sehr geringen Vegetationsanteil, der Wärmespeicherfähigkeit der verwendeten Materialien sowie dem eingeschränkten Luftaustausch aufgrund der hohen Bodenrauigkeit, stellt der städtische Raum im Vergleich zum Umland eine besondere Ausgangslage dar.

Durch die bereits beschriebene Topografie ist ein besonders sensibler Austausch von Luftmassen zu erwarten, sodass auch der umliegende Bereich des Gemarkungsgebietes der Stadt Ingolstadt in klimatischen Betrachtungen berücksichtigt werden muss. Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bereichen können nur so sinnvoll betrachtet und in Bezug gesetzt werden.

Abschließend steht der Stadt Ingolstadt eine Klimaanalyse zur Ermittlung des Gefährdungspotenzials sowie Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel (Planungshinweiskarte) zur Verfügung. Zudem stehen planungsrelevante Aufgaben, Maßnahmen und Empfehlungen für eine klimabewusste Entwicklung bereit. Dafür werden als Grundlage u.a. folgende Kartenwerke angefertigt:

### Klimaanalysekarte (ehem. Klimafunktionskarte)

Ziel dieser Untersuchung ist es, das Stadtgebiet in der Ist-Situation detailreich zu analysieren, um Grundlagen für die räumliche Interpretation der Klimawirkung von Vegetation, Baudichten bzw. Bauhöhen zu erhalten. Auf diese Weise sollen flächenbezogene Aussagen ermöglicht werden. In der generierten Klimaanalysekarte können die klimatischen Wechselwirkungen der Klimatope (d. h. Gebiete ähnlicher mikroklimatischer Ausprägung) sowie lokale und regionale dynamische Prozesse (z. B. Luftleitbahnen, Kalt- und Frischluftabflüsse) abgelesen werden.

### Planungshinweiskarte

Um die Integration der Ergebnisse in die Planungsprozesse reibungslos zu gestalten, wurde aufbauend auf der Klimaanalysekarte eine Planungshinweiskarte abgeleitet, in der die analysierten und vielschichtigen Ergebnisse zusammengefasst sind. Durch die vereinfachte Darstellung ist es möglich, schnell und eindeutig eine Einschätzung der klimatischen Bedeutung einer Fläche zu erhalten. Auf Basis eines Katalogs mit Planungsempfehlungen können fundierte und lokal abgestimmte Maßnahmen direkt den Flächen zugeordnet werden.

Geeignete Wetterlagen für stadtklimatische Untersuchungen laut DMG (Deutsche Meteorologische Gesellschaft) sind:

*„Für das Erkennen von lokalklimatischen Einzelheiten geeignete Wetterlagen sind von hohem Luftdruck geprägt, bei denen nur geringe Windgeschwindigkeiten auftreten und nur geringe oder keine Bewölkung vorhanden ist. Die geringe Windgeschwindigkeit verhindert die Zufuhr von neuen Luftmassen: innerhalb einer einheitlichen Luftmasse erreichen die lokalklimatischen Eigenheiten ihre größten Gegensätze. Geringe oder fehlende Bewölkung bewirkt einen sehr ausgeprägten Tagesgang nahezu aller Klimaelemente, z. B. Temperatur, Feuchte und Wind.“*

## 2.1 Ziele von Stadtklimaanalysen

Das Signal, welches von Klimaveränderungen ausgeht, wird sich in Ballungsräumen und innerstädtischen Gebieten verstärkt auswirken. Die Zunahme an austauscharmen Strahlungswetterlagen vermehrt den Hitzestress, vor allem innerhalb windschwacher Stadträume. Zu beachten ist somit, wie sich der Wärmeinseleffekt und die Belüftung auf die Lufthygiene und den thermischen Komfort auswirken. Die Hitzewellen im Juni und August 2003, im Juli/August 2015 sowie im Sommer 2018 und 2019 sind dafür eindrucksvolle Beispiele.

Damit Wohlbefinden, Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Menschen in Städten auch zukünftig gesichert sind und lebenswerte urbane Räume weiterhin ermöglicht werden, muss die Stadtplanung schon heute städtebauliche Planungen so optimieren, dass die thermischen Belastungen auch unter extremen Hitzebedingungen sowohl im Freien als auch in den Innenräumen auf ein erträgliches Maß begrenzt werden.

Richtlinien werden vor dem Hintergrund einer stadtplanerischen Anwendung erstellt, um mit einheitlicher Untersuchungsmethodik zur Ergebnisdarstellung und zur Bewertung des Stadtklimas zu kommen. Bei der Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene im Bereich der Stadtplanung ist es von größter Bedeutung, nicht auf die Darstellung der großräumigen mittleren klimatischen Verhältnisse einzugehen, sondern die differenzierte Betrachtung der einzelnen innerstädtischen Kleinklimate, einschließlich ihrer gegenseitigen Wechselwirkungen, heranzuziehen. Das Mesoklima wird danach typischerweise dem Stadtentwicklungsplan und dem Flächennutzungsplan im Maßstab 1:25.000 bis 1:10.000 zugeordnet, während die Bauleitplanung im Maßstab von 1:2.000 bis 1:5.000 im mikroklimatischen Bereich bearbeitet werden muss (siehe Tabelle 2).

Klimaanalysen und Stadtklimakarten werden vor dem Hintergrund der Stadtentwicklungsprozesse erarbeitet, die sich durch den Wandel wachsender oder auch schrumpfender Städte ergeben. Damit verbunden ist die Tendenz, innerstädtisches Wohnen wieder attraktiver zu machen und die verdichtete Stadt gegenüber der Ausbreitung des Stadtraumes in das Umland vorzuziehen. Stadtplanungsziele und Planungsebenen sind mit den klimatischen Bewertungsmethoden in ihrer räumlichen, zeitlichen und quantitativen Beschreibung und Festlegung zusammenzuführen. Überall dort, wo dies bereits geschehen ist, wie in den Regionalplänen als Flächen für schützenswerte Klimafunktionen oder in den Stadtentwicklungs- und Flächennutzungsplänen als Überwärmungsbereiche, Frischluftversorgung und Luftleitbahnen, werden die Funktionen mit Planungsmaßnahmen belegt.

Stadtklimatologie erstreckt sich über die Bereiche Stadtplanung und Architektur, Gebäude- und Bauleitplanung sowie Quartiers- und Stadtentwicklungsplanung. Sie unterstützt den Anwender bei der Bewertung der thermischen und lufthygienischen Situation und der Auswirkung von Flächen, Verdichtungen, Konversionsmaßnahmen, Stadtrückbau und Einzelbaumaßnahmen. Die Berücksichtigung des Klimas in der Stadtplanung erfordert eine detaillierte Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen den städtischen Faktoren und der Atmosphäre. Die Ergebnisse werden in Abhängigkeit von der Stadtplanungsebene, als Karten in unterschiedlicher räumlicher Auflösung, dargestellt. Festlegungen von Untersuchungsmethoden und die Bewertung der Ergebnisse für den thermischen und lufthygienischen Wirkungskomplex sind abhängig von der Planungsebene und den hier verfügbaren Daten.

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat sich zur Aufgabe gestellt, Richtlinien zu verfassen und Verfahren zur Erstellung von Klimakarten einheitlich zu regeln, um sie vergleichbar zu machen. Hierzu existieren einschlägige VDI Richtlinien:

Vorgehensweise nach VDI RL 3787 Blatt 1 (Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen: 2015-09):

„In der vorliegenden Richtlinie wird beschrieben, wie stadtklimatische Sachverhalte in Karten dargestellt, bewertet und über daraus abgeleitete Hinweiskarten für die Planung nutzbar gemacht werden können.

Diese Karten stellen eine wichtige Grundlage für die Flächennutzungs- und Bauleitplanung auf kommunaler und regionaler Ebene dar und gewinnen im Zuge des Klimawandels und der Umweltgerechtigkeit zunehmend an Bedeutung.

Hinsichtlich der dargelegten Aspekte zur Human-Biometeorologie wird auf die Richtlinien VDI 3785 Blatt 1 (Umweltmeteorologie – Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima) und VDI 3787 Blatt 2 (Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung – Teil I: Klima) verwiesen, die wichtige, im Rahmen von Bewertungen der Wärmebelastung zu berücksichtigenden Faktoren ausführlich beschreiben und zudem die Grundlage dieser Richtlinie darstellen.“

In Richtlinie 3785 Blatt 1 geht es demnach um die „planungsrelevante Stadtklimatologie“, während es in Richtlinie 3787 Blatt 1 um die „Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen“ geht. Zusammenfassend werden in den beiden Richtlinien folgende stadtklimatisch relevanten Fragestellungen dargestellt, wie sie auch in den EU Guidelines zum 5. Rahmenprogramm entwickelt wurden:

- räumliche Ausprägung und Wirksamkeit des Luftmassenaustauschs (Be- und Entlüftung);
- räumlich zeitliche Ausprägung der thermischen und lufthygienischen Aspekte des Stadtklimas, bzw. Auftreten von thermischen Belastungen (Besonnungs-, Verschattungsverhältnisse);
- räumliche Darstellung und Bewertung der Wirkungs- und Belastungsräume;
- energetische Optimierung durch Standortbestimmung aus der Stadtklimaanalyse mit Überwärmungsräumen und Kaltluftgebieten, Baudichte.

Die Aufgabe einer planungsbezogenen Stadtklimatologie ist die Verbesserung der lufthygienischen und thermischen Bedingungen (Katzschner 2004):

- Abbau von Wärmeinseln (Wärmeinsel als Indiz für den thermischen Komfort), Freiraumplanung;
- Optimierung der städtischen Belüftung (Luftaustausch, Luftleitbahnen), Stadtplanung und Stadtentwicklung für die Lufthygiene und den thermischen Komfort;
- Vermeidung von Luftstagnation bei Inversionswetterlagen, Vermeidung von Barrieren für den Luftaustausch;
- Erhaltung und Förderung von Frischluft- oder Kaltluftentstehungsgebieten für den Luftaustausch und somit zur Verbesserung der lufthygienischen Situation.

Auf Grundlage dieser Erhebungen erfolgt die räumliche Festlegung in einer verbindlichen Planung. Festlegungen können dabei sein: das Freihalten von Kalt- bzw. Frischluftentstehungsflächen (Hanglagen) und von Luftleitbahnen, Gebäudeausrichtung/ -höhe und Bebauungsdichte.

Solche Festlegungen können gemäß § 1a Baugesetzbuch (BauGB) in der Bauleitplanung erfolgen. Darüber hinaus sind aufgrund der Stadtklimaanalysen Darstellungen freizuhaltenen Flächen im Flächennutzungsplan möglich. Ebenso kann überprüft werden, ob Festsetzungen in der Regionalplanung erfolgt sind. Klimabelange werden dort in der Planung regionaler Grünzüge berücksichtigt.

Planerisch gesetzliche Instrumente sind im „Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung“ (UVPG) und in der „strategischen Umweltprüfung“ (SUP) zu finden. Die allgemeinen Belange des Klimas können mithilfe von Stadtklimakarten qualitativ bewertet und in die Planungswerke integriert werden.

## 2.2 Stadtklimatischer Bewertungsindex

Grundlage der analysierten Klimatope (siehe Klimatope), bzw. deren Abgrenzungen, bildet der stadtklimatische Bewertungsindex „physiologisch äquivalente Temperatur“ (PET) (vgl. Höppe 1999).

Die biometeorologische Kenngröße PET beschreibt unter Berücksichtigung der thermophysologischen Zusammenhänge das thermische Empfinden des Menschen (Brandenburg und Matzarakis, 2007), und ist somit eine physikalische Kenngröße für das Wohlbefinden, das vom thermischen Wirkungskomplex abhängig ist (siehe Abbildung 3). Dabei liegt das Behaglichkeitsniveau des Menschen bei einem PET-Wert von 24°C. Neutralität herrscht dann, wenn so viel Wärme vom menschlichen Körper aufgenommen wird, wie selbstständig wieder abgegeben werden kann.

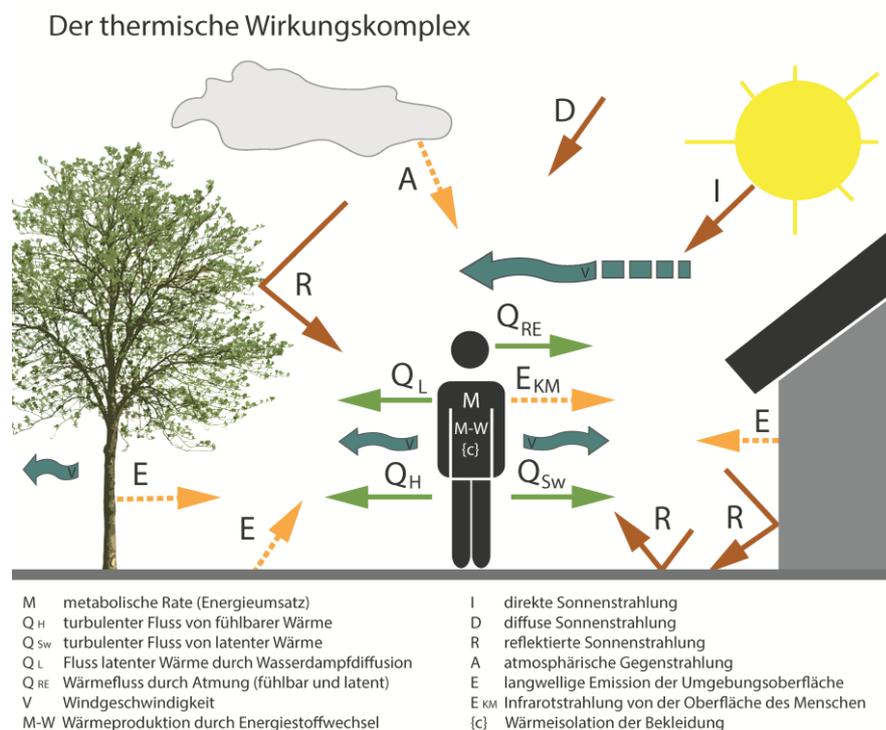


Abbildung 3: Schema "Thermischer Wirkungskomplex". Dargestellt sind die unterschiedlichen Parameter, die sich auf den Wärmehaushalt des Menschen auswirken. Durch planerische Eingriffe können diese Bedingungen beeinflusst werden (nach dem Klima-Michel-Modell, DWD).

Um Fehlinterpretationen vorzubeugen, werden die PET-Werte (angegeben in °C) in Abhängigkeit des Stressniveaus des Menschen in die Kategorien der Tabelle 1 eingeordnet.

Dabei kommen dem Wohlbefinden und der menschlichen Gesundheit eine besondere Bedeutung zu. Thermische Belastung in Form von Hitze belastet den Organismus, erhöht den Hitzestress und ist auch für eine Erhöhung der Morbiditäts- und Mortalitätsraten, insbesondere von älteren Menschen und Menschen mit Vorerkrankungen, verantwortlich.

Tabelle 1: Bereiche von Hitzestress in Abhängigkeit des Bewertungsindex PET (Katzschner et al. 2010).

PET (°C)	subjektives Empfinden	Stressniveau
> 42	sehr heiß	extremer Hitzestress
35 – 41	heiß	starker Hitzestress
29 – 34	sehr warm	moderater Hitzestress
25 – 28	warm	schwacher Hitzestress
18 – 24	neutral	kein thermischer Stress
13 – 17	kühl	schwacher Kältestress
< 13	kalt	Kältestress

### 3 Methodik

Im Folgenden werden die in diesem Gutachten verwendeten Karten und deren Erstellung erläutert.

#### 3.1 Einführung Klimaanalysekarte

Eine Klimaanalysekarte stellt ein klimaökologisches Gutachten dar, welches für eine bestimmte geografische Verortung angefertigt wird. In den VDI-Richtlinien (insbesondere VDI RL 3787 Blatt 1) wird die Vorgehensweise zur Generierung einer Klimaanalysekarte festgelegt. Hauptsächlich werden diese Gutachten für Ballungsräume und größere Städte erstellt. Die Anwendung der VDI Richtlinien macht eine Vergleichbarkeit zwischen Städten möglich. Grundlage ist stets die Analyse der Ist-Situation, also eine möglichst präzise Abbildung der realen Klimafunktionen im Untersuchungsraum. Diese Analyse der Ist-Situation wurde im Zuge dieser Untersuchung zudem messtechnisch erfasst und validiert. Die Analyse des planungsrechtlichen bzw. zukünftig erreichbaren Zustandes erfolgt in einem weiteren Schritt. Für eine komplexe Abbildung der Ist-Situation ist eine entsprechende Datenbasis Grundvoraussetzung. Aus klimaökologischen Gesichtspunkten sind Faktoren wie Höheninformationen und Fließgewässer ein erster Anhaltspunkt, um die natürlichen Bedingungen abzubilden. Analog hierzu spielen die anthropogenen Einflüsse eine entscheidende Rolle. Gerade in den Städten hat die vom Menschen verursachte Veränderung der Erdoberfläche den größten und in den meisten Fällen auch negativsten Einfluss. Deshalb werden ebenso Daten bezüglich der Flächennutzung und Gebäudeinformationen benötigt. Je detaillierter die Eingangsdaten vorliegen, umso präziser und kleinteiliger können die Analysen ausfallen.

Neben den Geoinformationen ist das Wissen um klimarelevante Parameter von Bedeutung. Dabei ist die Lage eines verdichteten Stadtgebietes in Bezug auf Belüftung und regionale Windsysteme von besonderer Bedeutung. Aber auch lokale und kleinräumige Windzirkulationen entwickeln sich durch physikalische Prozesse und können im Rahmen einer Klimaanalysekarte berechnet werden. Weitere Klimaparameter lassen sich durch die geografische Lage des Untersuchungsraumes ableiten.

### 3.2 Methodik zur Erstellung von Klimaanalysekarte

Bei der statistischen Verknüpfung verschiedenster Sachinformationen ist die Gewichtung bzw. die Einflussnahme der einzelnen Faktoren von großer Bedeutung. Da diese Faktoren aus klimatischen Gründen von Untersuchungsraum zu Untersuchungsraum unterschiedlich sind, besteht derzeit noch kein automatisiertes System zur Erstellung einer Klimaanalysekarte (Lohmeyer 2008), siehe Abbildung 4.

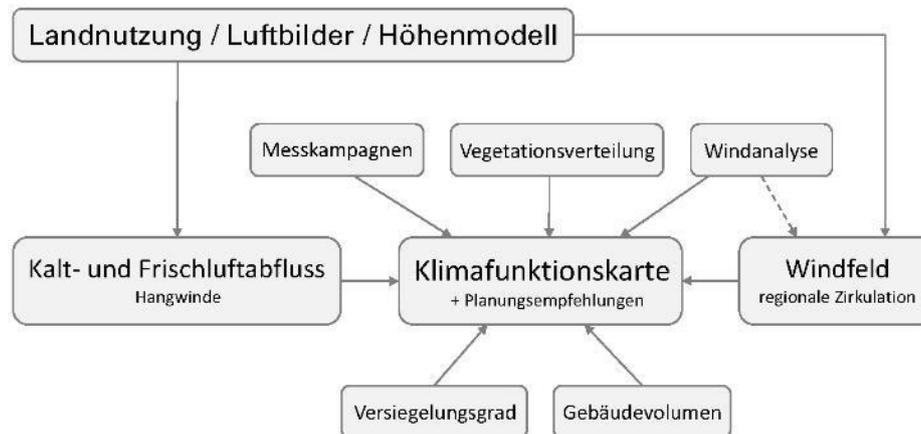


Abbildung 4: Prinzipielle Vorgehensweise zur Erstellung einer Stadtklimakarte nach Lohmeyer 2008.

Klimatische Rahmenbedingungen sind sehr heterogen, was durch die geografische Lage, die absolute Höhe über dem Meeresspiegel des Untersuchungsgebietes oder durch eine kontinentale bzw. maritime Beeinflussung verursacht wird. Neben diesen übergeordneten Faktoren gibt es eine Vielzahl kleinräumiger Einflüsse. Auf einer kleineren Skala können unterschiedliche Effekte, wie Binnengewässer oder Tallagen, die örtlichen klimatischen Verhältnisse stark prägen. Somit ist eine vorgeschaltete klimatische Einschätzung unumgänglich, wobei entsprechend ein größerer Ausschnitt als der abgegrenzte Untersuchungsraum zu betrachten ist.

Nach der Gruppierung von Themenkarten in die beiden klimatischen Komponenten Dynamik und Thermik, die beide unterschiedlichen Einfluss auf die jeweiligen Ebenen des Stadtklimas haben, wird durch geeignete Funktionen und Algorithmen mit anschließender Generalisierung das Produkt in Form der Klimaanalysekarte aggregiert.

Die dynamische Komponente beinhaltet Luftbewegungen unterschiedlicher Skalierung wie Frisch- und Kaltluftabflüsse, regionale Strömungen und synoptische Winde. Eine zusätzliche, entscheidende Themenkarte der Dynamik ist die Einflussnahme der Hangwinde. Diese Strömungen entstehen durch das Berg-Tal-Windsystem, das tagesperiodisch auftritt und gerade bei einem ausgeprägten Relief an Mächtigkeit gewinnen kann (Häckel 1985).

Das klimatische Wechselspiel beinhaltet neben der Belüftungssituation die thermischen Eigenschaften der Erdoberfläche. In diesem Zusammenhang ist die Albedo der Oberfläche eine zentrale Größe (Kupski 2017), da unterschiedliche Reflexions- und Absorptionsverhalten maßgeblich den Wärmehaushalt der städtischen Grenzschicht bestimmen (Oke 2006). In diesem Themenfeld ist der Effekt der Wärmeinsel Stadt besonders gut erkennbar, denn durch die Erwärmung der künstlichen Baumaterialien, gekoppelt mit der hohen Wärmespeicherleistung und der langsamen Abkühlrate, werden gerade in den Nachtstunden höhere Lufttemperaturen als im unbebauten Umland verursacht (Hupfer, Kuttler 1998; Baumüller et. al 1995).

Tabelle 2 fasst zusammen, welche Instrumente auf der jeweiligen Maßstabsebene zu welcher Klimaanalyse führen. Die VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 stellt dazu fest:

„Bei den in dieser Richtlinie beschriebenen Klimaanalyse- und Lufthygienekarten handelt es sich nicht um die amtlichen Festlegungskarten, sondern um thematische Fachkarten, deren Inhalte entscheidend für die praktische Raumanalyse und sachgerechte Durchführung von Planungsprozessen sind“.

Tabelle 2: Steuerungsinstrumente für die Planung auf unterschiedlichen Maßstabsebenen und entsprechende Fachbeiträge.

Instrumente und Pläne		Maßstab, räumliche Auflösung der Karten	Fachbeiträge Klimaanalyse (Lufthygiene und Human-Biometeorologie)
Raumordnungsplanung	Regionalplan	1 : 50.000 bis 1 : 100.000, ≥ 100 m	Mesoklima Klimaanalysekarten: flächendeckende Immissionschutzkarten, thermische Belastungsräume (Überwärmungsräume), Luftleitbahnen, Kaltluftentstehungsflächen, Planungshinweiskarte
Bauleitplanung	Vorbereitende Bauleitplanung: Flächennutzungsplan	1 : 5.000 bis 1 : 25.000, 25 m bis 100 m	Mesoklima Klimaanalysekarten: gebietsbezogene Immissionskarten, Luftaustausch, thermische Belastungsräume (Überwärmungsräume), Planungshinweiskarte
	Verbindliche Bauleitplanung: Bebauungsplan, Baugenehmigungsverfahren	≤ (1 : 1.000), 2 m bis 10 m	Mikroklima Klimaanalysekarten: lokale Immissionsberechnungen an Hot Spots, Nachbarschaftsbetrachtungen, Luftaustausch, human-biometeorologische Eignungsuntersuchungen an Hot Spots Planungshinweiskarte

## 4 Datengrundlage

Für eine Klimaanalyse sind die regionalen Klimaverhältnisse wichtig. Von planerischer Bedeutung sind:

- thermische Verhältnisse (Wärmeinsel Stadt) und die
- Belüftungssituation im Sinne der horizontalen Durchmischung.

Daraus ergibt sich im Zusammenhang mit der Klimaanalysekarte die planerische Bewertung (Planungshinweiskarte) von einzelnen Flächen.

### 4.1 Datenbestand Klimaanalyse Stadt Ingolstadt

Den Ausgangspunkt dieser Projektbearbeitung bildet die bereits durchgeführte Klimaanalyse Ingolstadt, Methodik und Ergebnisse aus dem Sommer 2020 (GEO-NET 2020), in der die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld, Kaltluftvolumenstrom und Kaltluftproduktionsrate (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) berechnet wurden (Tabelle 3, Nr. 1-5).

Neben diesen Daten aus der Simulation wurden weitere Analyseschritte durchgeführt, die darin verwendeten Daten sind in Tabelle 3 Nr. 6-8 aufgeführt.

Tabelle 3: Digitale Eingangsdaten.

Nr.	Datensatz
1	Kaltluftproduktionsrate (4 Uhr)
2	Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom (4 Uhr)
3	Physiologisch äquivalente Temperatur (14 Uhr)
4	Nächtliche Lufttemperatur (4 Uhr)
5	Bodennahes Windfeld (4 Uhr)
6	ATKIS Basis-DLM
7	Statistische Daten Stadt Ingolstadt
8	TopPlusOpen

## 5 Vorgehensweise

Stadtklimatisch relevante Faktoren im mesoklimatischen Maßstab:

### *Relieftypisierung*

- Herausarbeitung klimatisch relevanter topografischer Faktoren (z. B. Höhenrücken, Täler, Hangneigungen, Exposition) und die sich daraus ableitende Luftleitpotenzialbestimmung.

### *Strukturtypisierung*

- Herausarbeitung der v. a. nutzungsbedingten Oberflächenrauigkeit, differenziert nach klimatischer Relevanz (z. B. potenzielle Barrierewirkung bzw. Kanalisierung von Luftmassen).

### *Gebäudevolumen*

- Herausarbeitung der gebäudeabhängigen Barrierewirkung und der daraus resultierenden Minderung des Belüftungspotenzials auf Basis der Gebäudefläche und –höhe.

### *Nutzungstypisierung*

- Herausarbeitung der thermischen Bedeutung unterschiedlicher Oberflächennutzungen und Zusammenfassung mikroklimatisch ähnlicher Nutzungen (z. B. potenzielle Kaltluftentstehungsgebiete, potenzielle Überwärmungsgebiete).

### *Abflussbahnen und Abflussrichtungen*

- Herausarbeitung der orografisch bedingten Schneisen, in Abhängigkeit von der Relieftypisierung, der Gebäudevolumina und der Strukturtypisierung als ergänzender Faktor.

### *Gebäudemasse*

- Herausarbeitung der gebäudeabhängigen thermischen Belastung durch die Wärmespeicherkapazität und Reflexion.

### *Versiegelung der Oberflächen*

- Herausarbeitung und zweidimensionale Kartierung der versiegelten Bereiche und Generalisierung bestimmter Gebietstypen.

### Funktionsanalyse

- Die Analyse erfolgt zunächst zweigleisig, unterteilt nach dynamischen und thermischen Aspekten. Anschließend wird die gegenseitige Einflussnahme im Sinne einer Wirkungsanalyse untersucht und entsprechend eingearbeitet.

### Dynamische Analyse

- Verknüpfung der dynamisch (und lufthygienisch) relevanten Erhebungsebenen untereinander (Bestimmung z. B. der spezifischen Aktivität von Kalt-/Frischluffentstehungsgebieten).

### Thermische Analyse

- Verknüpfung der thermischen (und lufthygienischen) Nutzungseigenschaften untereinander sowie mit den dynamischen Einflussfaktoren des Reliefs und der Strömungsstruktur (Bestimmung z. B. des Auftretens von Kaltluftseen und des Abkühlungseinflusses auf Überwärmungsbereiche).

### Funktionssynthese

- Klimaanalysekarten stellen die Verknüpfung der dynamischen und thermischen Themenebenen in Bezug auf klimaökologische Potenziale, Defizite und Funktionen dar und symbolisieren damit eine idealtypische Wiedergabe der real existierenden flächenbezogenen, klimaökologischen Situation als Ausgangsbasis für die klimaökologische Bewertung.

### Bewertung von Einzelaspekten/-kriterien

- Auf Basis der Funktionsanalyse bzw. der Klimaanalysekarte sowie unter der Annahme von planerischen Fragestellungen der Bauleitplanung, erfolgt eine Bewertung sowohl der klimaökologischen Potenziale als auch der Defizitbereiche.
- Hierzu werden insgesamt sechs einzelne Bewertungskriterien herangezogen, separat betrachtet und bewertet. Diese dienen als Ausgangsbasis für die zusammenfassende Gesamtbewertung. Schematische Darstellung siehe Abbildung 5.
- Weitere Informationen und Ergebnisse der berechneten Klimaparameter aus der Klimaanalyse können im Zwischenbericht (GEO-NET 2020) im Detail nachgelesen werden.

Schematische Abbildung der angewandten Vorgehensweise

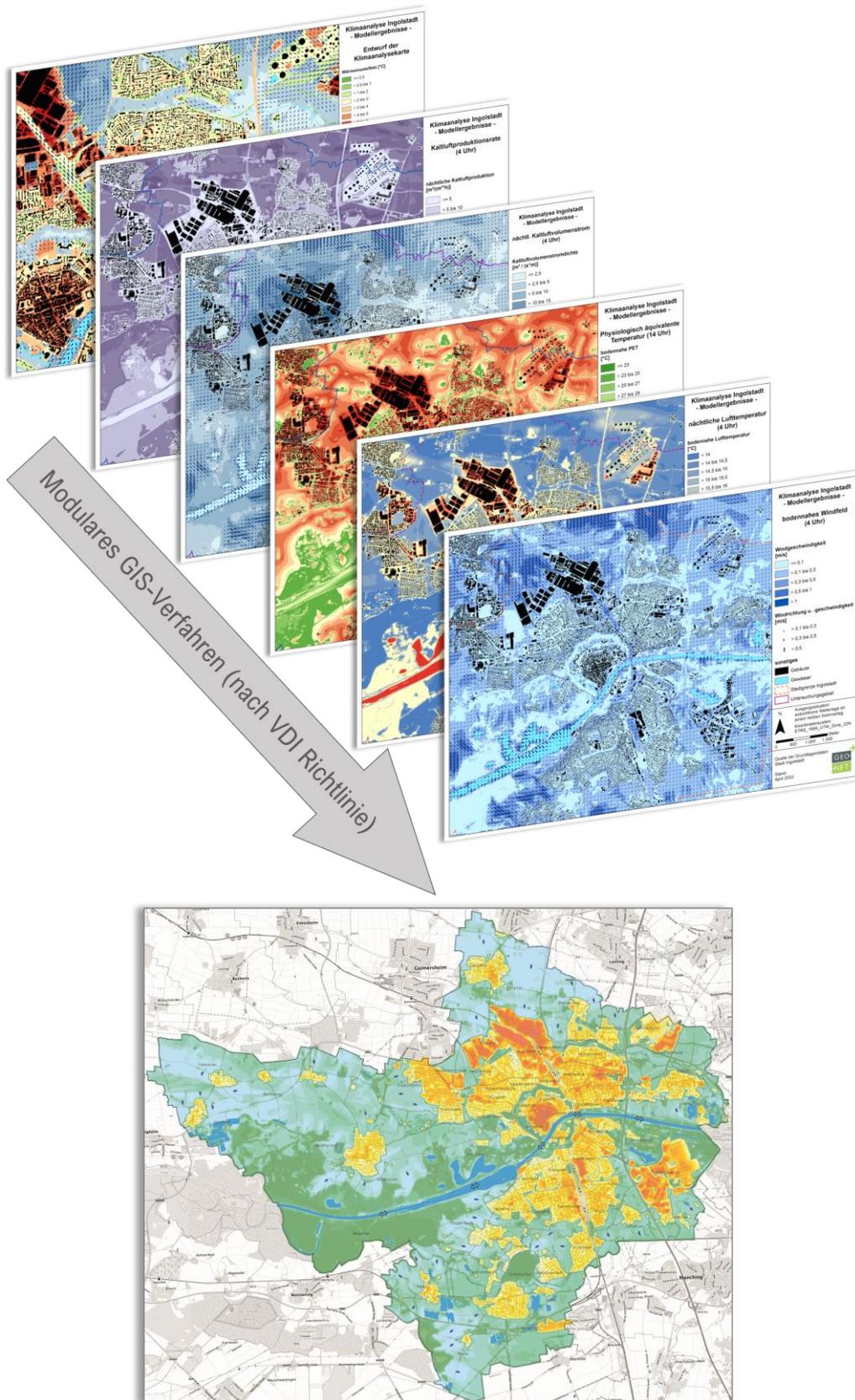


Abbildung 5: Schematische Abbildung der angewandten Vorgehensweise.

## 6 Klimaanalysekarte

Eine Klimaanalysekarte stellt die räumlichen Klimateigenschaften einer Bezugsfläche dar, die sich in Form unterschiedlicher Klimatope einstellen. Dargestellt werden darin die thermischen und dynamischen Verhältnisse.

### 6.1 Klimatope

Klimatope bezeichnen räumliche Einheiten, in denen die mikroklimatisch wichtigsten Faktoren relativ homogen und die mikroklimatischen Bedingungen wenig unterschiedlich sind (VDI RL 3787 Blatt 1).

Die Legende ist in sechs Klimatope unterteilt, welche farblich zugeordnet sind. Zusätzlich gibt es in dieser Legende, die auf dem Kartenwerk erscheint, eine kurze Beschreibung zur Einordnung der Funktionen. Die klimaökologische Wertigkeit ist an der linken Seite angedeutet und verläuft von sehr wertvoll (+) für die naturnahen Klimatope bis hin zu defizitär (-) für die Belastungsbereiche.

Eine wichtige Grundlage für die Charakterisierung der Klimatope ist der aufgeführte thermische Index PET (Höppe, 1999). Er beschreibt und bewertet die Eigenschaften und die Wirkung der Klimatope der Klimaanalysekarte auf den Menschen und vermittelt das thermische Stressniveau (siehe Kap. 2.2). Grundlage bilden die Untersuchungen über das thermische Empfinden aus verschiedenen Forschungsprojekten, z. B. im Rahmen der „klimazwei-Projekte“ (Katzschner et al., 2010).

#### Klimatopbeschreibung nach VDI RL 3787 Blatt 1:

Im Folgenden ist die Auflistung nach Richtlinie dargestellt, bei der Klimaanalysekarte Stadt Ingolstadt zum Teil nur implizit vorhanden, jedoch inhaltlich berücksichtigt.

### *Gewässerklima (implizit vorhanden)*

Aufgrund der hohen Wärmekapazität von Wasser, kommt es an den Oberflächen von Gewässern zu nur schwachen tagesperiodischen Temperaturschwankungen, das heißt Wasserflächen sind am Tag relativ kühl und nachts vergleichsweise warm. Sie können daher das lokale Klima stark beeinflussen. Jedoch bleibt ihr klimatischer Einfluss in der Regel lediglich auf das Gewässer selbst und die unmittelbaren Randbereiche beschränkt.

Ein positiver Effekt für die klimatische Situation wird durch die geringe Rauigkeit von Gewässerflächen bewirkt, wodurch Austausch- und Ventilationsverhältnisse begünstigt werden. Dadurch ist eine Wirkung als funktionstüchtige Luftleitbahn möglich.

*Hinweise für die Planung: Undurchlässige Strukturen (z. B. geschlossene Bebauung oder dichte Hecken bis hin zu Waldflächen) sollten am Uferstrand und den angrenzenden Bereichen vermieden werden.*

### *Freilandklima*

Freilandklimatope stellen sich überwiegend über unbewaldeten, vegetationsbestandenen Außenbereichen ein. Sie zeichnen sich durch ungestörte Tagesgänge von Lufttemperatur und -feuchte und weitgehend unbeeinträchtigte Windströmungsbedingungen aus und wirken als Kaltluftentstehungsgebiete. Da in den Freilandbereichen selten Emittenten für Luftschadstoffe vorkommen und bei geeigneten Wetterlagen in den Nachtstunden Kaltluftmassen gebildet werden, können diese Bereiche eine sehr hohe Ausgleichsfunktion für die human-biometeorologisch und lufthygienisch belasteten, bebauten Bereiche besitzen.

*Hinweise für die Planung: Aufforstungs- und Siedlungsmöglichkeiten entsprechend den lokalklimatischen Verhältnissen, jedoch zudem Bedeutung der Flächen für den großräumigen Luftaustausch beachten (z. B. in Stadtrandlage). Erhaltung des Kaltluftentstehungspotenzials.*

### *Waldklima*

Das Klima im Stammraum eines Waldes wird durch den Energieumsatz (verminderte Ein- und Ausstrahlung) bestimmt. Dichte und höher wachsende Baumvegetation führt zu gedämpften Tagesgängen von Lufttemperatur und -feuchte sowie zu niedrigen Windgeschwindigkeiten im Bestand. Das Kaltluftentstehungsgebiet befindet sich oberhalb des Kronenraums. Deshalb sind Waldgebiete auf geeigneten Flächen hochrelevant für die Entstehung von Kaltluft/Frischlufft und deren Dynamik. Waldflächen erweisen sich aufgrund sehr geringer thermischer und human-biometeorologischer Belastungen als wertvolle Regenerations- und Erholungsräume. Darüber hinaus übernehmen Wälder bei geringen oder fehlenden Emissionen die Funktion als Frischluft- und Reinluftgebiete, können jedoch aufgrund der hohen Rauigkeit keine Luftleitfunktion übernehmen.

*Hinweise für die Planung: Erhalten und ausbauen soweit lokalklimatisch verträglich (siehe Hindernisse für den Kaltluftabfluss).*

### *Klima innerstädtischer Grünflächen*

Die klimatischen Verhältnisse innerstädtischer Park- und Grünanlagen sind zwischen denen von Freiland- und Waldklima einzustufen. Dabei variiert die klimatische Reichweite von Parkflächen in Abhängigkeit von der Größe und Form der Parkanlagen, deren Ausstattung sowie von der Anbindung an die Bebauung oder Durchlüftungsbahnen.

Die Klimawirksamkeit von Grünflächen beschränkt sich je nach Größe, Relief und Rauigkeit auf die Fläche selbst (Mikroklimaeffekt), kann jedoch auch stadtklimatisch positive Fernwirkungen aufweisen.

Verschiedene Untersuchungen und Modellierungen haben gezeigt, dass mikro-klimatische Kühlungseffekte in Abhängigkeit der Verdunstungsleistung und Beschattung auch bei geringer Flächengröße nachweisbar sind. Bei einer engen Vernetzung können kleinere Grünflächen zur Abmilderung von Wärmeinseln beitragen, u. a. indem sie den Luftaustausch fördern.

*Hinweise für die Planung: Erhalten und möglichst vernetzen, offene Randbebauung erhalten oder anstreben (zur Förderung des Luftaustauschs).*

### *Vorstadtklima (implizit vorhanden)*

Das Klimatop ist dem Übergangsbereich zwischen Freilandklima und dem Klima bebauter Flächen zuzuordnen und wird durch eine grüngerprägte Flächennutzung und Oberflächenstruktur geformt. Es überwiegt der Einfluss des unbebauten Geländeanteils. Dieser Klimatoptyp ist charakteristisch für die Vorstadtsiedlungen, Gartenstädte oder Ortsränder, die darüber hinaus oft im unmittelbaren Einflussbereich des Freilands stehen und dadurch günstige bioklimatische Verhältnisse aufweisen. Das Klima in den Vorstadtsiedlungen zeichnet sich durch eine leichte Dämpfung der Klimaelemente Lufttemperatur, -feuchte, Wind und Strahlung aus. Die Windgeschwindigkeit ist niedriger als im Freiland, aber höher als in der Innenstadt.

*Hinweise für die Planung: Weitere Versiegelung vermeiden, Arrondierung möglich. Emissionsarme Energieversorgung anstreben.*

### *Stadtrandklima*

Das Stadtrandklima unterscheidet sich vom Vorstadtklima durch eine dichtere Bebauung und einen geringeren Grünflächenanteil. Dennoch handelt es sich um Bereiche mit einer lockeren Bebauung und einer relativ günstigen Durchgrünung. Hieraus resultiert eine nur schwache Ausprägung von Überwärmung, zu- meist kann von einem ausreichenden Luftaustausch sowie eher günstigen bioklimatischen Bedingungen in diesen Gebieten ausgegangen werden.

*Hinweise für die Planung: Besonders in diesen Klimatopen ist die Grünflächenvernetzung zum Freiland zu erhalten oder zu schaffen. Hohe, geschlossene Bauformen und verriegelnde Bebauung zum Umland vermeiden. Emissionsarme Energieversorgung anstreben.*

*Stadtklima*

Charakteristisch für das Stadtklima ist eine überwiegend dichte, geschlossene Zeilen- und Blockbebauung mit hauptsächlich hohen Baukörpern und Straßenschluchten. Bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad, die ausgeprägten Oberflächenrauigkeiten und geringen Grünflächenanteile, ist der Stadtkörper während austauscharmer Strahlungsnächte deutlich überwärmt. Tagsüber treten hohe Strahlungstemperaturen auf, die zu Hitzestress führen. Die dichte städtische Bebauung verursacht ausgeprägte Wärmeinseln mit eingeschränkten Austauschbedingungen, die mit zeitweise ungünstigen human-biometeorologischen Verhältnissen und erhöhter Luftbelastung verbunden sind und das Stadtklima prägen.

*Hinweise für die Planung: Entsiegelung, Blockentkernung und -Begrünung, Fassaden-, Dachbegrünungen anstreben, hohe Verkehrsdichte in engen Straßenschluchten vermeiden, Verkehrsberuhigung und emissionsarme Energieversorgung anstreben.*

*Innenstadtklima*

Kennzeichnend für das Innenstadtklima sind ein sehr hoher Versiegelungsgrad, hohe Oberflächenrauigkeit sowie ein geringer Grünflächenanteil, der lediglich durch Einzelbäume im Straßenraum sowie kleine Rasenflächen, zum Teil mit Strauchvegetation als Straßenbegleitgrün, charakterisiert ist. Aufgrund dieser Eigenschaften weist das Innenstadtklima die stärksten mikroklimatischen Veränderungen im Stadtgebiet auf. Hierzu zählt vor allem der starke Wärmeinseleffekt, bedingt durch die Wärmespeicherfähigkeit der städtischen Oberflächen und die starken Windfeldveränderungen, die sich in den straßenparallelen Be- und Entlüftungssituationen widerspiegeln. Human-biometeorologisch ist dies sehr ungünstig.

*Hinweise für die Planung: Siehe Stadtklima, Vorrang für emissionsarme Energieversorgung*

*Gewerbe-/Industrieklima (implizit vorhanden)*

Gewerbebetriebe mit den dazugehörigen Produktions-, Lager- und Umschlagstätten prägen das Mikroklima maßgeblich. Bedingt durch den hohen Versiegelungsgrad in Kombination mit erhöhten Emissionen an Produktionsstätten kommt es verstärkt zu lufthygienischen und human-bioklimatischen Belastungssituationen. Zu diesen Flächen zählen auch häufig Sonderflächen, wie militärisch genutzte Flächen usw.

*Hinweise für die Planung: Dach- und Fassadenbegrünung anstreben. Begrünung von Parkplätzen, Flächenbegrünung, Grünvernetzung, Entsiegelung, durchgängige Belüftungsstrukturen erhalten/schaffen, Beschränkung auf emissionsarme Betriebe, emissionsarme Energieversorgung, z. B. Fernwärme.*

*Gleisanlagen (implizit vorhanden)*

Extremer Lufttemperaturtagesgang, trocken, nachts mögliche Kaltluftleitbahnen, geringe Strömungshindernisse.

*Hinweise für die Planung: Von Emittenten und bei Umnutzung von erhöhter Rauigkeit freihalten. Flächenbegrünung vorsehen zum Erhalt der hochwertigen Funktion.*

## Klimaphänomene nach VDI RL 3787 Blatt 1:

### *Kaltluftbahn/ Kaltluftabflussrichtung*

Der Kaltluftabfluss ist ein thermisches, während der Nacht induziertes Windsystem (Hangabwind). Dabei fließt die am Hang bodennah erzeugte Kaltluft ab. Diese, durch Temperatur- und Dichteunterschiede entstehenden, bodennahen Kaltluftabflüsse, initiieren und/oder verstärken das nächtliche Windsystem. Generell beeinflusst Kaltluft das lokale Klima signifikant. Die vertikale Mächtigkeit der Kaltluftabflüsse ist auf wenige Dekameter beschränkt.

Neben der Stärke des Abflusses ist es entscheidend, ob durch die Kaltluft unbelastete (=Frischluff) oder belastete Luftmassen herab transportiert werden. Kaltluft kann sich zudem an Hindernissen aufstauen und in Senken und Tälern ansammeln (Sammelgebiete). In der Regional- und Stadtplanung sind Entstehungsgebiete, Sammelgebiete und Abflüsse der Kaltluft zu berücksichtigen.

### *Luftleitbahn*

Durch Ausrichtung, Oberflächenbeschaffenheit und Breite stellt eine Luftleitbahn eine bevorzugte Fläche für den bodennahen Luftmassentransport dar. Luftleitbahnen, häufig auch als Ventilationsbahn bezeichnet, sind durch geringe Rauigkeit (keine hohen Gebäude, nur einzelnstehende Bäume), möglichst geradlinige oder nur leicht gekrümmte Ausrichtung und größere Breite (möglichst in einem Längen-/Breitenverhältnis 20:1) gekennzeichnet. Sie ermöglichen den Luftmassenaustausch zwischen Umland und Stadt. Die Wirksamkeit hängt von der Windverteilung ab, in Kombination mit der Ausrichtung der Luftleitbahn. Ferner können Luftleitbahnen vor allem bei Schwachwindlagen von großer Bedeutung für die klimatische Entlastung innerstädtischer Gebiete sein. Das Relief kann die Funktion als Luftleitbahn unterstützen. Effiziente Luftleitbahnen werden z. B. durch breite Flussauen gebildet. Breite, geradlinige Straßen oder Bahnanlagen können auch Luftleitbahnen darstellen. Luftleitbahnen können je nach Nutzung und Emissionseintrag lufthygienisch und thermisch beeinträchtigt sein.

### *Durchlüftungsbahn*

Als Durchlüftungsbahnen werden klimarelevante Luftleitbahnen mit unterschiedlichem thermischem und/oder lufthygienischem Niveau bezeichnet, auf denen bei austauscharmen und/oder austauschreichen Wetterlagen lufthygienisch belastete oder unbelastete Luftmassen mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften in das Zielgebiet, hier die Stadt, transportiert werden.

### 6.2 Legende der Klimaanalysekarte

Die Legende der Klimaanalysekarte beschreibt sowohl die thermische (Farbkodierung), als auch die dynamische (Schraffur und Symbolik) Komponente des Stadtklimas in der Stadt Ingolstadt.

#### Klimatope (thermische und dynamische Komponente):

Kategorie	Name	Beschreibung
Klimakologische Wertigkeit	<b>Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiet</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Freilandklima</b> . Hoch aktive, vor allem kaltluftproduzierende Flächen im Außenbereich; Größtenteils mit geringer Rauigkeit und/oder entsprechender Hangneigung.
	<b>Frischluf-entstehungsgebiet</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Waldklima</b> . Flächen ohne Emissionsquellen; hauptsächlich mit dichten Baumbestand und hoher Filterwirkung.
	<b>Misch- und Übergangsklimate</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Klima inner-städtischer Grünflächen</b> . Flächen mit hohem Vegetationsanteil, geringe und diskontinuierliche Emissionen; Pufferbereiche zwischen unterschiedlichen Klimatopen.
	<b>Überwärmungspotential</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Vorstadtklima</b> . Baulich geprägte Bereiche mit versiegelten Flächen, aber mit viel Vegetation in den Freiräumen; Größtenteils ausreichende Belüftung.
	<b>Moderate Überwärmung</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Stadtklima</b> . Dichte Bebauung, hoher Versiegelungsgrad und wenig Vegetation in den Freiräumen; Belüftungsdefizite.
	<b>Starke Überwärmung</b>	Orientierung nach VDI Klimaeigenschaft: <b>Innenstadtklima</b> . Stark verdichtete Innenstadtbereiche/ City, Industrie- und Gewerbeflächen mit wenig Vegetationsanteil und fehlender Belüftung.

Wärmebelastung / heat load

#### Hervorhebung Dynamische Komponente:

Kategorie	Name	Beschreibung
großräumig	 <b>Luftleitbahn Donau</b>	Durch Ausrichtung, Oberflächenbeschaffenheit und Breite bevorzugte Fläche für den bodennahen Luftmassentransport. Luftleitbahnen sind durch geringe Rauigkeit gekennzeichnet. Sie ermöglichen den Luftmassenaustausch zwischen Umland und Stadt. Ferner können Luftleitbahnen vor allem bei Schwachwindlagen von großer Bedeutung für die klimatische Entlastung sein.
	 <b>Kaltluftbahn/ Kaltluftabflussrichtung</b>	Thermisches, während der Nacht induziertes Windsystem. Dabei fließt die am Hang bodennah erzeugte Kaltluft ab. Das Pfeilsymbol entspricht der Abflussrichtung. Der Kaltluftabfluss lässt bei entsprechender Geländeneigung die Kaltluftmassen aus dem zugehörigen Kaltlufteinzugsgebiet heraus wirksam werden.
kleinräumig	 <b>Durchlüftung/ Durchlüftungsbahn</b>	Neben Luftleitbahnen auch Gleisanlagen, breite Straßen, Flussläufe etc. die als zusätzliche Bahnen belüftend wirken. Kanalisierung von Luftströmungen.
	 <b>Durchlüftungsbahn Gleisanlagen</b>	Starker Lufttemperaturtagesgang, trocken, nachts mögliche Kaltluftleitbahn, geringe Strömungshindernisse.

Abbildung 6: Legende der Klimaanalysekarte Stadt Ingolstadt 2022.

### 6.3 Klimaanalysekarte

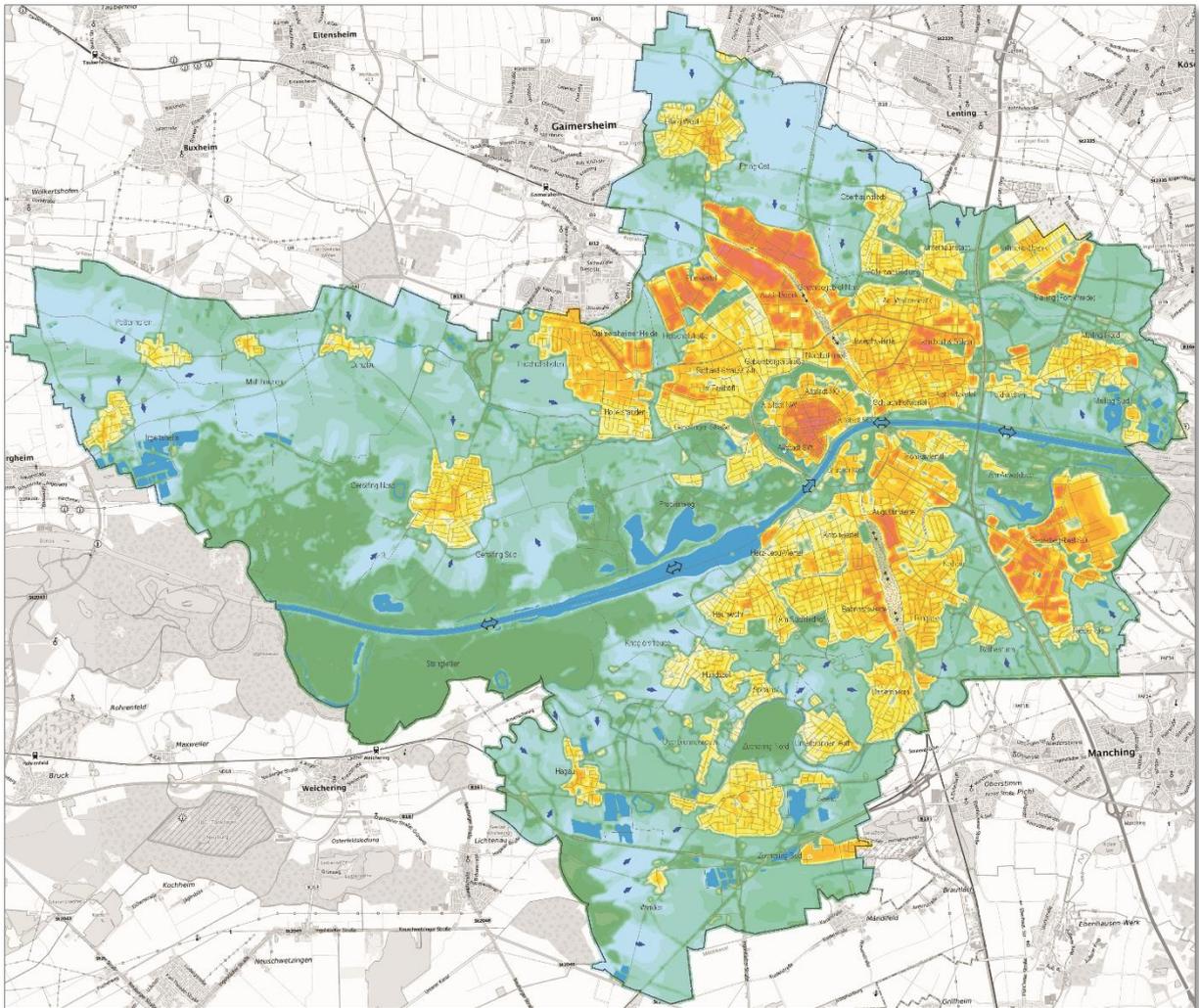


Abbildung 7: Klimaanalysekarte Stadt Ingolstadt 2022 (ohne Maßstab, Original im Anhang).

## 7 Kontrollmesskampagne

Im Sommer 2021 wurde ein umfangreiches Messprogramm im Stadtgebiet Ingolstadts durchgeführt, welches zur Validierung und zur Kalibrierung der Modellergebnisse diente, so dass möglichst reale Aussagen zu den klimaökologischen Funktionen und Wechselwirkungen generiert werden konnten.

Das Messprogramm setzte sich aus unterschiedlichen Bestandteilen zusammen und beinhaltet sämtliche relevante Parameter, die in der angewandten Stadtklimatologie mit dem Fokus Klimaanalysekarten und Planungshinweiskarten zu erstellen, wesentlichen Einfluss haben.

Der Messaufbau besteht aus stationären Messungen, einer zeitlich und räumlich hochaufgelösten Messfahrt und einer unterstützenden Vertikalsondierung bei geeigneter Wetterlage. Die Methodik folgt VDI 3785 Blatt 2 „Umweltmeteorologie: Methoden bodengebundener Stadt- und Standortklimamessungen mit mobilen Messsystemen“ und Berechnung der Indizes nach VDI 3787 Blatt 2 „Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas“.

- Stationäre Messungen
- Profilmessfahrt
- Vertikalsondierung

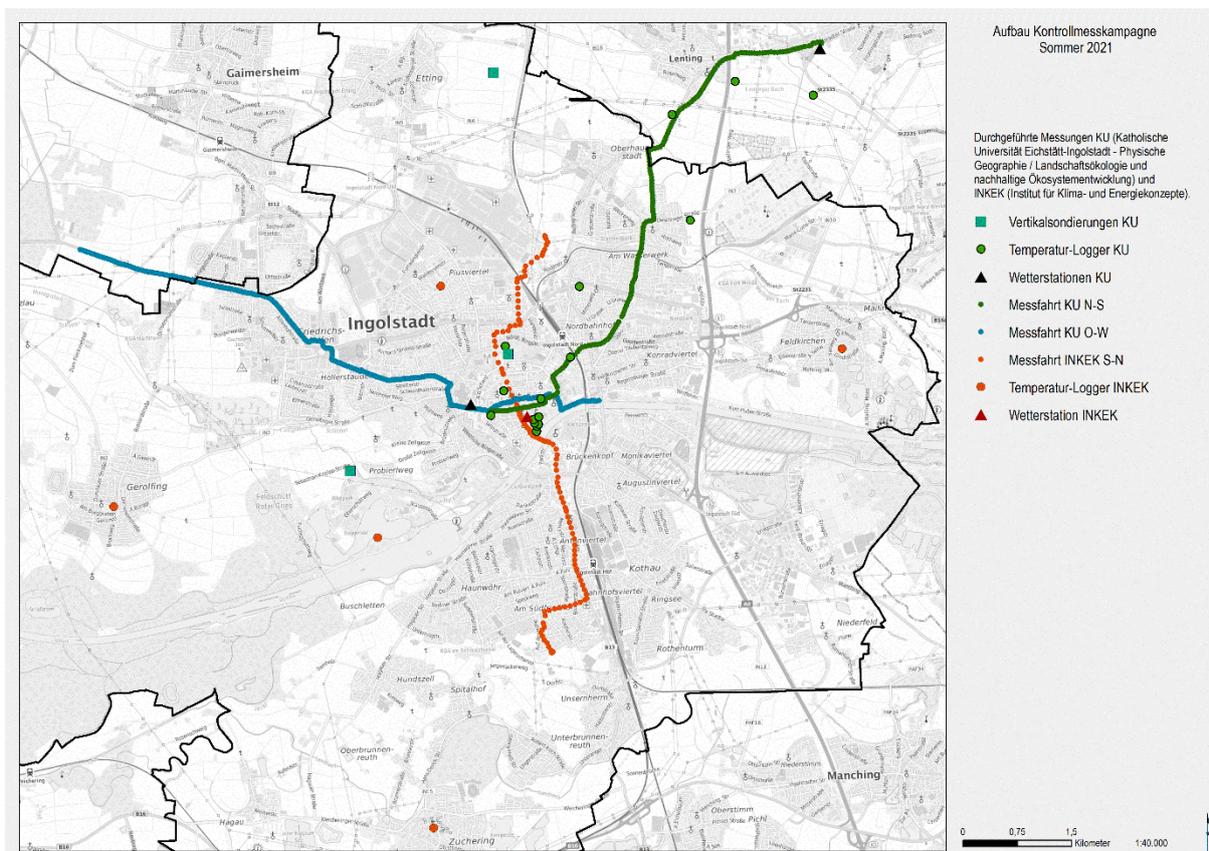


Abbildung 8: Aufbau der Kontrollmesskampagne im Sommer 2021 Ingolstadt (Original im Anhang).

## 7.1 Stationäre Messung

Onset HOBO MicroStation Rathaus

Messzeitraum:

- 17.06.2021 – 23.08.2021

Ort:

- Messung auf dem Dach  
Neues Rathaus  
48°46'46.15"N  
11°25'32.50"O

Parameter:

- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit
- Lufttemperatur
- Relative Feuchte
- Globalstrahlung



Onset HOBO Pendant Temp-Logger

Messzeitraum:

- 17.06.2021 – 23.08.2021

Ort:

- Insgesamt 10 +(6) Messstandorte KU  
(s. Abbildung 8)
- Insgesamt 5 Messstandorte INKEK  
(s. Abbildung 8)

Parameter:

- Lufttemperatur



*Auswertung Windrose Rathaus*

## WINDROSE INGOLSTADT RATHAUS HOBO-MICROSTATION 17. - 22.06.2021

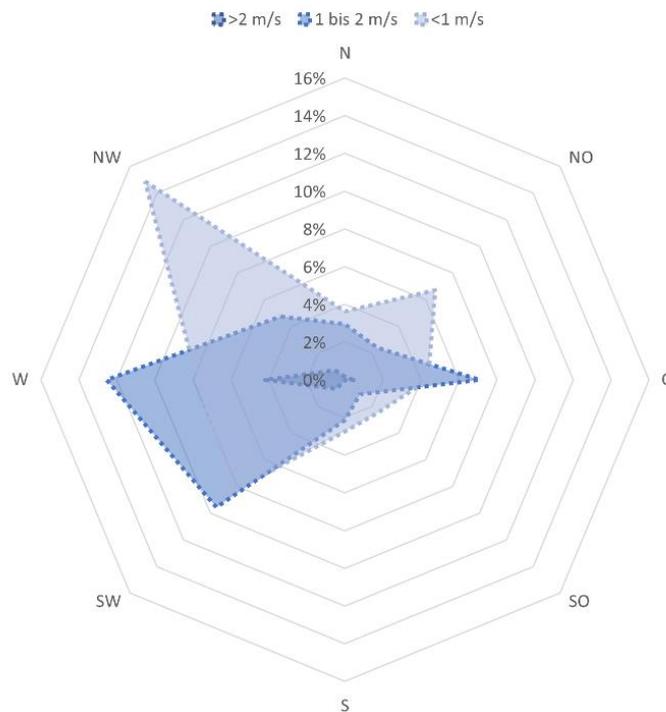


Abbildung 9: Windrose Rathaus, Auswertung der Windverteilung während der Messkampagne.

*Nächtliche Abkühlung*

Unterschiedliche Bodenoberflächenarten erwärmen sich bei windschwachem Wetter an wolkenlosen Sommertagen unterschiedlich. Dies hängt vom Absorptionsvermögen, aber auch von der Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und der Verdunstungsfähigkeit des Untergrundes ab.

Während beispielsweise Asphalt 80% bis 90% der einfallenden Strahlung absorbiert, beträgt dieser Anteil bei einer weißen Mauer nur 20% bis 35%. Ergebnisse von Temperaturmessungen schwanken zwischen weniger als 30 und fast 50 Grad Celsius (Lorenz, 1973).

Außer den Materialeigenschaften der Oberflächen ist für die Temperaturverhältnisse in einer Stadt die Gebäudeanordnung und Gebäudehöhe, bzw. die Flächennutzung allgemein von Bedeutung.

Das Zusammenspiel der genannten Faktoren führt innerhalb der Stadt mit ihren unterschiedlichen Strukturen und Bebauungsdichten zu einem Mosaik unterschiedlicher thermischer Mikroklimata, die sich gegenüber dem Umland zu einer deutlich abgegrenzten Wärmeinsel bzw. einem Wärmearchipel zusammenfügen. Vor allem Grünflächen haben einen positiven Einfluss auf die thermischen Bedingungen am Tag, als auch in den Nachtstunden und können einen großen Beitrag zur nächtlichen Abkühlung leisten. Dabei ist es entscheidend in welchem stadtklimatischen Umfeld sich diese Flächen befinden, wie sie ausgestattet sind und welche Größe sie einnehmen. Das darüber beeinflusste Abkühlverhalten wurde an den Messorten untersucht.

Deutlich ist der Unterschied zwischen den Messorten erkennbar (Grünflächen in einer dicht bebauten Umgebung, bzw. Grünflächen im ländlichen Kontext mit direktem Bezug zum Außenraum).

Die Gegenüberstellung aller relevanten Untersuchungsflächen ist in Abbildung 10 ersichtlich und zur Kalibrierung in die Klimaanalyse eingegangen.

21 Uhr – 4 Uhr	1. Hobo Pius-Viertel	2. Hobo Gerolfing	3. Hobo Baggersee	4. Hobo Zuchering	5. Hobo Mailing	6. Micro Station Rathaus
Datum	Mittlere nächtliche Abkühlung in °C					
17.6.-18.6.21	0,92	1,57	1,27	1,68	1,23	1,18
18.6.-19.6.21	1,30	1,50	1,17	1,40	1,25	1,40
19.6.-20.6.21	0,98	1,15	0,96	1,15	1,02	0,97
20.6.-21.6.21	1,38	1,47	1,17	1,35	1,13	1,31
21.6.-22.6.21	0,78	1,08	0,65	0,86	0,88	0,95
<b>Durchschnitt</b>	<b>1,07</b>	<b>1,35</b>	<b>1,05</b>	<b>1,27</b>	<b>1,10</b>	<b>1,16</b>

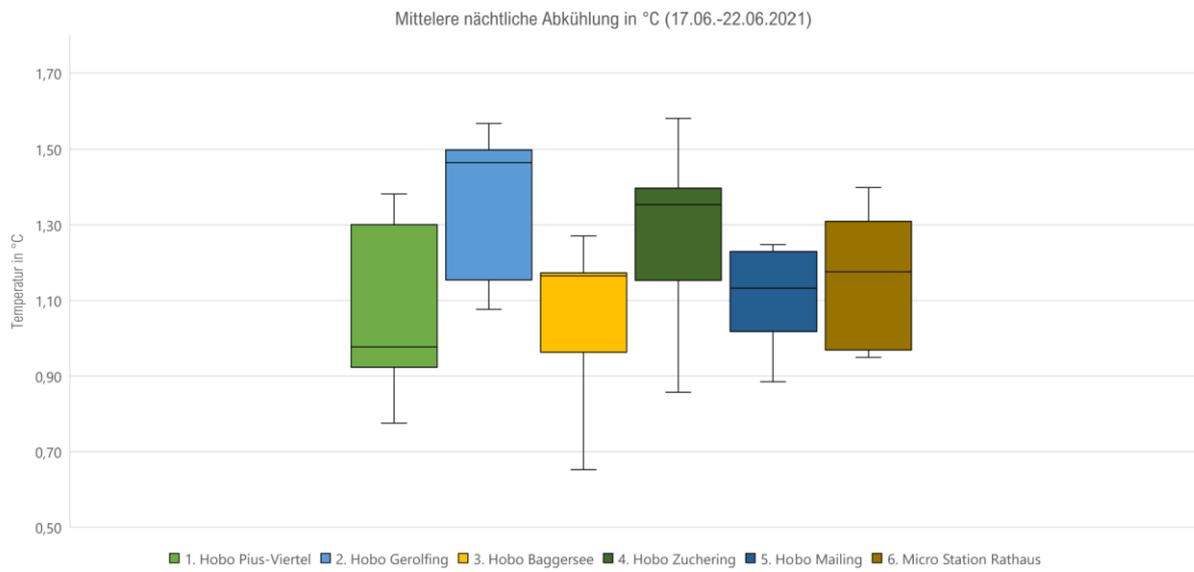


Abbildung 10: Auswertung der Messergebnisse "Mittlere nächtliche Abkühlung" der 6 Vergleichsstandorte.

## 7.2 Profilmessfahrten

Unterschiedliche Routen der Profilmessfahrten wurden von der KU und INKEK durchgeführt (s. Abbildung 8), morgens und spät abends, um das Abkühlungsverhalten der unterschiedlichen Oberflächen zu erfassen und die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel aufzuzeichnen. In die weiterführende Auswertung wurden die Ergebnisse der folgenden Messfahrten einbezogen:

Bei geeigneter Wetterlage wurden räumlich und zeitlich hochaufgelöste Messfahrten durchgeführt.

Entlang der drei Profile wurde die Lufttemperatur in einer Höhe von ca. 1,5 m erfasst. Gekoppelt mit einem präzisen GPS-Empfänger konnten die Temperaturprofile gemessen und anschließend in Abbildung 11 visualisiert werden.



- Messfahrt KU Nord -> Süd (Länge 8,16 Km)
- Messfahrt KU Ost -> West (Länge 8,46 Km)
- Messfahrt INKEK Süd -> Nord (Länge 7,00 Km)

Aufgrund des Messaufbaus war es nicht möglich eine abgestimmte Messfahrt während einer Uhrzeit zu realisieren. Dies ist für die bestehende Forschungsfrage nicht unbedingt erforderlich, da Messungen stets dem Wettergeschehen unterliegen und somit nie exakt einer idealisierten Simulation entsprechen können. Zudem ist die Auflösung einer solchen Messfahrt im mikroklimatischen Maßstab nur bedingt auf den mesoklimatischen Betrachtungsraum zu übertragen.

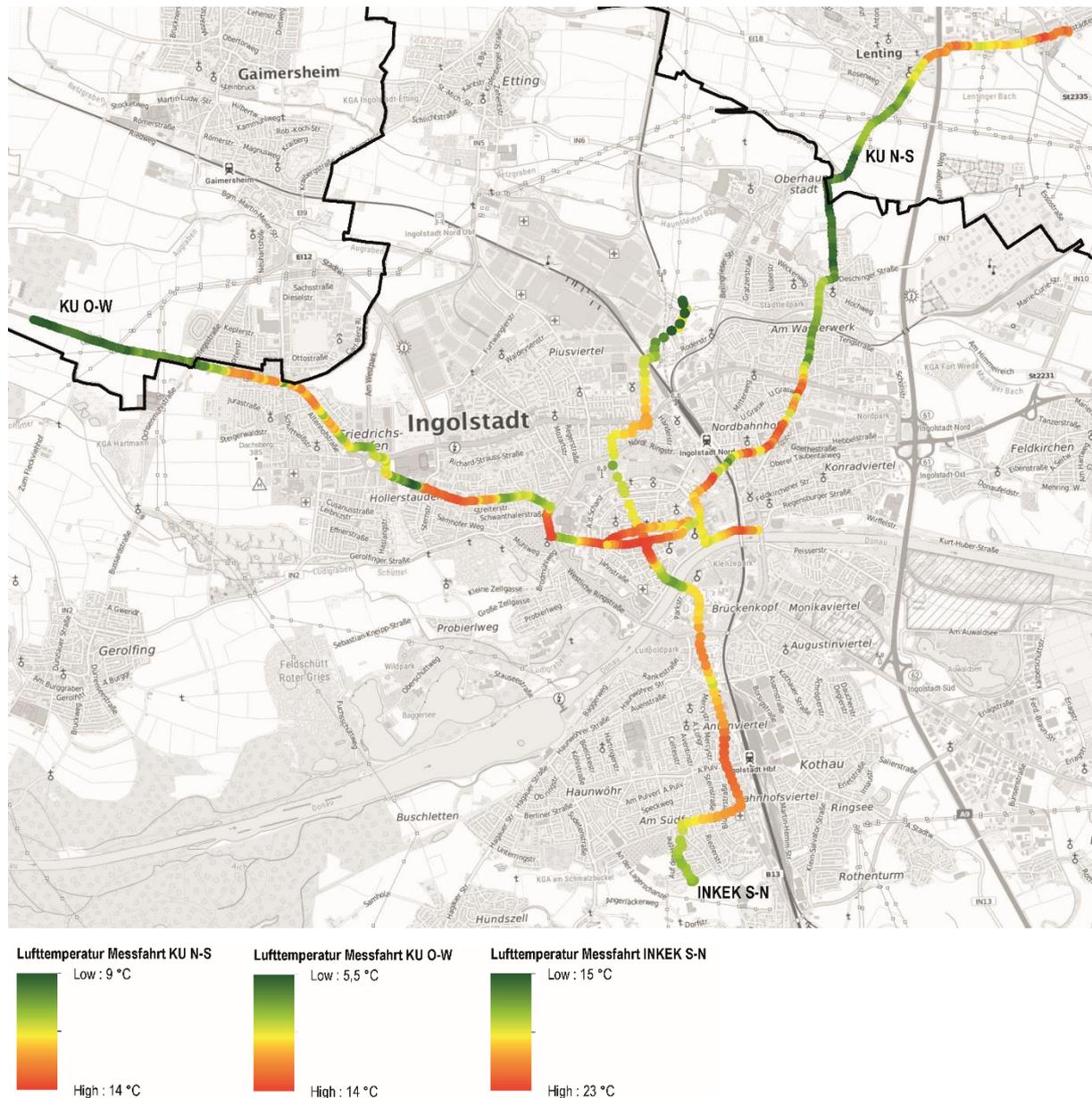


Abbildung 11: Auswertung Profilmessfahrten während einer Strahlungsnacht (Original im Anhang).

Bedeutend ist die Wetterlage, die bei allen Messfahrten geeignet war und die Vergleichbarkeit der Messmethodik versprach (installierte Geräte auf einem Fahrrad in vergleichbarer Messhöhe und einer GPS-Aufzeichnung). Dadurch ist sichergestellt, dass die jeweiligen Verhältnisse, bzw. Relationen der thermischen Bedingungen innerhalb des Ortes vergleichbar sind. Es ist also weniger entscheidend, wie hoch, bzw. tief die jeweiligen absoluten Lufttemperaturen sind, sondern wie das Abkühl- bzw. Aufwärmverhalten auf der Strecke und der entsprechenden Fläche ist.

Signifikante Unterschiede sind zwischen den landwirtschaftlich geprägten Flächen im Außenbereich und den Überwärmungsgebieten in der Altstadt zu erkennen. Aber auch kleinere Grünzäsuren wie der Grüngürtel oder die Fahrt über die Donau sind deutlich erkennbar.

### 7.3 Vertikalsondierung

Die Vertikalsondierung wurde unter der fachlichen Leitung von Prof. Dr. Susanne Jochner-Oette der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt durchgeführt. Auf die daraus entstandenen Ergebnisse wird sich im Folgenden bezogen. In dem Zuge danken wir Prof. Dr. Susanne Jochner-Oette (Physische Geographie / Landschaftsökologie und nachhaltige Ökosystementwicklung, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt) für die Unterstützung sowie die Erlaubnis die Messdaten in diesem Projekt verwenden zu dürfen.

Mittels Drohnenbefliegung (UAV) wurden an drei unterschiedlichen Standorten (s. Abbildung 8) vertikale Temperaturprofile ermittelt. Dies geschah jeweils bei geeigneter Wetterlage und zu unterschiedlichen Uhrzeiten. Hierdurch konnte die vertikale Temperaturschichtung, bzw. die Kaltluftschichthöhe ermittelt werden.

#### Vertikale Temperaturmessungen Ingolstadt

Standort ID	Standort	Koordinaten	Datum und Uhrzeit der Messungen
VFP	Volksfestplatz – Ingolstadt Mitte	48°46'16.2"N 11°25'22.4"E	14.06.2021 21:20 Uhr bis 21:29 Uhr 15.06.2021 04:40 Uhr bis 04:48 Uhr
BS	Baggersee – Ingolstadt Süd	48°45'25.5"N 11°23'33.1"E	20.07.2021 20:58 Uhr bis 21:05 Uhr 21.07.2021 05:09 Uhr bis 05:15 Uhr
AU	Audi – Ingolstadt Nord	48°48'23.1"N 11°25'25.2"E	20.07.2021 21:28 Uhr bis 21:35 Uhr 21.07.2021 05:37 Uhr bis 05:45 Uhr

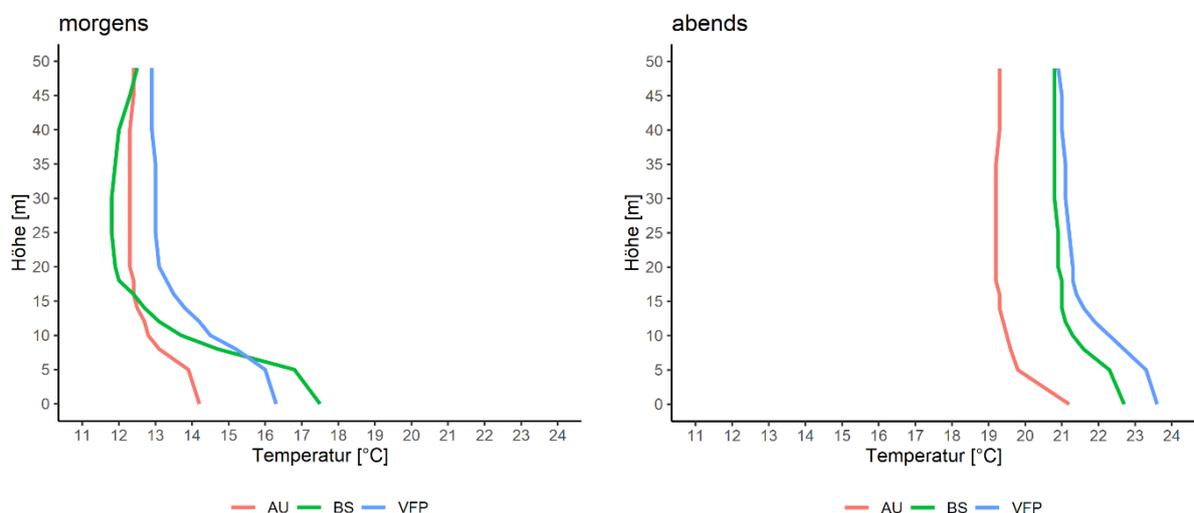


Abbildung 12: Vertikale Temperaturprofile der drei Messorte (links: morgens, rechts: abends).

Am Standort Volksfestplatz (VFP) wurde am 14./15.6.2021 eine vertikale Temperaturmessung mittels Drohnenbefliegung durchgeführt, die Temperaturunterschiede sowohl im zeitlichen als auch im räumlichen Verlauf an den unterschiedlichen Messzeitpunkten (nach Sonnenuntergang und bevor Sonnenaufgang) zeigen konnte. Die Messungen fanden in einer Höhe zwischen 0 m und 49 m über dem Boden statt. Die Temperatur zum Messzeitpunkt nach Sonnenuntergang betrug am Boden 23,60 °C, in 49 m Höhe betrug sie 20,90 °C

und war somit um 2,70 °C geringer. Zum Messzeitpunkt nach Sonnenuntergang lag die Temperatur am Boden 16,30 °C, die niedrigste Temperatur konnte zwischen 40 m und 49 m gemessen werden (12,90 °C).

An den Standorten Baggersee – Ingolstadt Süd (BS) sowie Audi – Ingolstadt Nord (AU) wurden die Temperaturprofile am 20./21.7.2021 ermittelt. Die Drohnenbefliegungen fanden wie beim Standort VFP in einer Höhe zwischen 0 m und 49 m über dem Boden statt. Die Temperatur zum Messzeitpunkt nach Sonnenuntergang betrug am Standort BS am Boden 22,70 °C (21,20 °C AU), in 49 m Höhe betrug sie 20,80 °C (19,30 °C AU). Zum Messzeitpunkt nach Sonnenuntergang lag die Temperatur am Boden 17,50 °C (BS) bzw. 14,20 °C (AU), die niedrigste Temperatur konnte zwischen 25 m und 30 m gemessen werden (11,80 °C BS) bzw. zwischen 20 m und 40 m (12,30 °C AU).

### 7.4 Mobile Bioklima-Messungen

Zur Klassifizierung der thermischen Belastung während der Tagstunden wurden zusätzliche human-biometeorologische Messungen durchgeführt. Dies diente der Validierung der Modellergebnisse und der Klassifizierung der Klimatopeinteilung der Klimaanalysekarte unter Verwendung des thermischen Indizes PET (Kapitel 2.2).

Messzeitraum:

- 20.07.2021

Ort:

- Rathausplatz  
48°46'46.32"N  
11°25'30.50"O

Parameter:

- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit
- Lufttemperatur
- relative Feuchte
- Luftdruck
- kurz- und langwellige Strahlung aus 6 Richtungen
- GPS Koordinaten
- Berechnung stadtklimatischer Bewertungsindex „PET“



Uhrzeit am 20.07.2021	PET [in °C]	Lufttemperatur [in °C]
12 Uhr	38,0	24,8
14 Uhr	43,0	27,0
16 Uhr	41,0	28,1
18 Uhr	35,0	27,2
20 Uhr	26,0	25,1

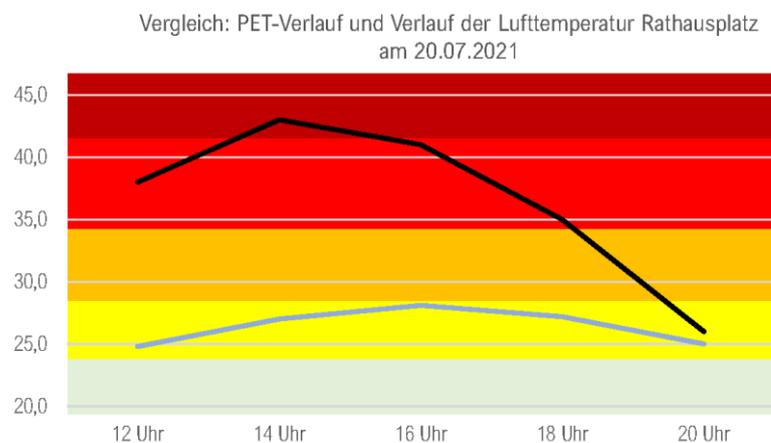


Abbildung 13: Auswertung PET-Verlauf Rathausplatz am 20.07.2021.

## 7.5 Evaluation der Kontrollmesskampagne

Die Kontrollmesskampagne diente zur Validierung und zur Kalibrierung der Modellergebnisse, bedarf aber auch der Einordnung in bereits erfolgte Modellierungen, die im Rahmen der Klimaanalyse Ingolstadt aus dem Jahr 2020 simuliert wurden und vor dieser Untersuchung stattfanden. Insofern ist auch eine Einbeziehung der Modellergebnisse u.a. zum nächtlichen Temperaturfeld (GEO-NET 2020) nötig.

Die generelle Vergleichbarkeit unter Beachtung der methodischen und maßstäblichen Unterschiede ist gegeben und wird häufig in der angewandten Stadtklimatologie in dieser Form durchgeführt. Dabei kommt der Interpretation der Ergebnisse und der Zusammenführung der Daten eine besondere Bedeutung zu.

Die in Kapitel 7 aufgeführten Untersuchungen in Form der beschriebenen Auswertung der stationären Messungen, der Vertikalsondierungen und der Profilmessfahrten fanden bei geeigneter Wetterlage statt und zu den ungefähren Zeitfenstern, zu denen auch die Modellergebnisse vorliegen. Ebenfalls wurde beachtet, dass sich die Messhöhe im Bereich der entsprechenden Z-Höhe im Modell befand, so dass die ähnlichen technischen Rahmenbedingungen auch eine inhaltliche Vergleichbarkeit der Werte ermöglichen.

Insgesamt zeigen die durchgeführten Analysen eine sehr hohe Übereinstimmung mit den Modellergebnissen. Wobei naturgemäß die ortsgebundenen Messungen im Rahmen der Messkampagne den Vorteil einer genauen Beschreibung der mikroklimatischen Bedingungen vor Ort haben, aber nur eine begrenzte Aussagekraft in der Fläche besitzen. Dies ist die Stärke der Modelle, die es erlauben eine flächendeckende räumliche Aussage zu generieren, dies aber unter den kleinräumigen Unsicherheiten bzw. Schwankungen im mikroklimatischen Maßstab.

Die Messungen haben zudem eine Schwäche der numerischen Simulationen gezeigt, die bei der Auswertung der Daten entsprechend berücksichtigt werden muss. Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser, die dem Modell zugrunde gelegt ist, berücksichtigt nicht den Unterschied zwischen Still- und Fließgewässern. Dadurch sind sowohl die Baggerseen als auch die Donau vom gleichen Temperaturniveau gekennzeichnet. Die kühlende Wirkung der Donau wird dabei allerdings unterschätzt, so dass die Wirkung auf das bodennahe Temperaturfeld deutlich größer einzuordnen ist. Dies zeigt Abbildung 14 deutlich auf der Messroute INKEK S-N bei der Überquerung der Konrad-Adenauer-Brücke.

Die durchgeführten Vertikalsondierungen haben zum weiteren Verständnis der nächtlichen Abkühlung der unterschiedlichen Standorte beigetragen. Es herrschten neutrale Schichtungen in den unteren 10 m vor und keine Inversionswetterlage während der frühen Morgenstunden.



Abbildung 14: Ausschnitt der Temperaturprofile Messfahrten und der modellierten nächtlichen Lufttemperatur mit Markierung der Konrad-Adenauer-Brücke.

## 8 Planungshinweiskarte

Auf der Basis der Klimaanalysekarte, sowie relevanten Themenkarten der Stadt Ingolstadt werden im Folgenden Kapitel Planungsempfehlungen für das gesamte Stadtgebiet abgeleitet und in der Planungshinweiskarte dargestellt (Abbildung 18: Planungshinweiskarte Stadt Ingolstadt 2022).

Die Bewertung der im Analyseprozess gewonnenen Erkenntnisse werden dabei so formuliert, dass sie für die Regional-, Flächennutzungs- und Bauleitplanung unmittelbar Eingang finden können in stadtklimatische Planungsprozesse.

Die Karte fokussiert dabei eine möglichst optimale Raumlagerung der relevanten Bereiche im Kontext von Planungsaufgaben unter Klimagesichtspunkten. Dabei werden die Klimatope der Klimaanalysekarte zusammengefasst, in Planungsbezug gesetzt und mit einer scharfen Abgrenzung dargestellt. Dadurch ergibt sich eine einfachere Darstellung im Vergleich zur kleinräumigen und sehr detaillierten Analysekarte. So ist sichergestellt, dass Planungshinweise für Flächen eindeutig zugeordnet werden können und somit im ersten Schritt der Anwendung die Einschätzung der Planungsrelevanz je Fläche schnell identifiziert werden kann.

Damit können diese Karten im Planungsprozess Verwendung finden, ohne besondere intensive Fachkenntnisse hinsichtlich lokalklimatischer Belange vorauszusetzen. Sollten diese Informationen für die jeweilige Fragestellung nicht ausreichend sein, ist stets der vertiefende Blick in die Klimaanalysekarte empfehlenswert. Die in der Klimaanalysekarte dargestellten Informationen geben Rückschluss auf die Zuordnung der Planungshinweise. Sollte im Spezialfall eine weitere Vertiefung der Informationen notwendig sein, empfiehlt sich die Anwendung der Themenkarten. Die hier dargestellten Phänomene fließen in die übergeordneten Klimakarten ein und geben bei Detailfragen Hinweise auf die lokale nächtliche Windrichtung oder die Wirkung innerstädtischer Grünflächen und deren Wirkungsbereich (siehe Abbildung 15).



Abbildung 15: Empfohlene Anwendungsreihenfolge bei der Verwendung von Stadtklimakarten.

Die Umsetzung folgt den Vorgaben der VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 und sieht grundsätzlich zwei übergeordnete Hinweistypen vor: „Ausgleichsräume“ in Form von Grün- und Freiräumen sowie „Lasträume“ in Form von Siedlungsräumen (bebaute Gebiete).

Die bewertenden Stufen der Planungshinweiskarte beinhalten Hinweise bezüglich der klimatischen Empfindlichkeit von Flächen gegenüber nutzungsändernden Eingriffen oder Bebauungsänderungen.

## 8.1 Beschreibung der räumlichen Planungshinweise

### Ausgleichsräume, Grün- und Freiräume

#### *Ausgleichsraum mit hoher Bedeutung*

Dies sind vor allem klimaaktive Freiflächen mit direktem Bezug zum Siedlungsraum, wie innerstädtische und siedlungsnahe Grünflächen oder solche, die im Einzugsgebiet eines Berg-/Talwindsystems bzw. der lokalen oder regionalen Belüftung liegen.

Diese Gruppe umfasst des Weiteren nicht bebaute Täler, insbesondere deren Talsohlen und Geländeeinschnitte, in denen ein Kaltluftabfluss auftritt. **Diese Gebiete sind mit hohen Restriktionen gegenüber Bebauung belegt.** Außerdem sind große zusammenhängende Freiflächen aus klimatisch-lufthygienischen Gründen für den Ballungsraum von großer Wichtigkeit.

Die genannten Flächentypen sind mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen bewertet; das heißt **bauliche und zur Versiegelung beitragende Nutzungen führen zu bedenklichen klimatischen Beeinträchtigungen.** Dasselbe gilt für Maßnahmen, die den Luftaustausch behindern.

Sollten trotz klimatischer Bedenken in solchen Gebieten Planungen in Erwägung gezogen werden, sind dafür klimatisch-lufthygienische Sondergutachten unbedingt notwendig.

#### *Ausgleichsraum mit mittlerer Bedeutung*

Die auf diesen Freiflächen entstehende Kalt- und Frischluft fließt entweder nicht direkt in Richtung bebauter Gebiete oder es liegt nur eine geringe Kaltluftproduktion aufgrund der Ausstattung vor.

Auf derartigen Flächen ist aus klimatischer Sicht eine **maßvolle Bebauung, die den regionalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigt,** möglich. Klimatisch bedeutsame lokale Gegebenheiten wie Talsohlen, Schneisen, Bachläufe usw. sind jedoch bei der Planung zu berücksichtigen. Für eine möglichst geringe klimatische Beeinträchtigung sind die **Erhaltung von Grünflächen und Grünzügen, die Schaffung von Dach- und Fassadenbegrünungen und möglichst geringe Gebäudehöhen sowie windoffene Gebäudeanordnungen zu empfehlen.**

#### *Ausgleichsraum mit geringer Bedeutung*

Diese Freiflächen haben entweder keine direkte Zuordnung zum Siedlungsraum, das heißt, dort entstehende Kalt- und Frischluft fließt nicht direkt in Richtung bebauter Gebiete, oder es liegt nur eine geringe Kaltluftproduktion vor. Für eine möglichst geringe klimatische Beeinträchtigung ist die Erhaltung von Grünflächen und Grünzügen zu empfehlen.

Sie sind mit geringerer Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernden Eingriffen bewertet. Auf derartigen Flächen ist aus klimatischer Sicht **eine maßvolle Bebauung, die den regionalen Luftaustausch nicht wesentlich beeinträchtigt, möglich.**

## Lasträume, Siedlungsräume (bebaute Gebiete)

### *Bebautes Gebiet mit geringer Belastung und geringer klimarelevanter Funktion*

Bebaute Gebiete mit geringen klimatischen Funktionen, die aufgrund ihrer Lage keine hohen thermisch-lufthygienischen Belastungen aufweisen und benachbarte Siedlungsbereiche nicht wesentlich beeinträchtigen.

Es handelt es sich um bebaute, gut durchlüftete Kuppenlagen oder um bebaute Gebiete, deren thermisch-lufthygienische Emissionen nicht zu Verschlechterungen in nahegelegenen Siedlungsbereichen führen. Bei einer zusätzlichen Verdichtung ist keine nennenswerte klimatisch-lufthygienische Auswirkung zu erwarten.

Allerdings ist darauf zu achten, dass bestehende Belüftungsmöglichkeiten erhalten werden und zusätzliche Emissionen keine nachteilige Wirkung auf Siedlungsräume nach sich ziehen. Durch Dach- und Fassadenbegrünung und Beibehaltung von Grünflächen kann einer thermischen Belastung vorgebeugt werden.

### *Bebautes Gebiet mit klimarelevanter Funktion*

Hierbei handelt es sich um bebaute Gebiete, die aufgrund ihrer Lage und ihrer Bebauungsart klimarelevante Funktionen übernehmen. Darunter fallen z. B. locker bebaute und durchgrünte Siedlungen oder Siedlungsränder, die nachts entsprechend abkühlen und relativ windoffen sind oder gut durchlüftete verdichtete Siedlungsbereiche (z. B. Kuppenlagen).

Diese Gebiete führen weder zu intensiver thermisch-lufthygienischer Belastung noch zu Beeinträchtigungen des Luftaustauschs und weisen im Allgemeinen geringe klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeiten gegenüber Nutzungsintensivierungen auf.

Damit sind z. B. Arrondierungen an den Siedlungsrändern und das Schließen von Baulücken gemeint, wobei die in diesem Gebiet vorhandene Dimension der Bebauung beibehalten werden sollte. Solche relativ geringfügigen und der Umgebung angemessenen Nutzungsänderungen ziehen keine wesentlichen klimatisch-lufthygienischen Änderungen nach sich.

Allerdings ist bei Planungen von Baumaßnahmen in diesen ausgewiesenen Flächen eine Beurteilung eines klimatisch-lufthygienischen Sachverständigen bezüglich der Dimensionierung und Anordnung von Bauwerken sowie der Erhaltung und Schaffung von Grün- und Ventilationsschneisen von Vorteil. Eine zusätzliche Versiegelung ist minimal zu halten und durch Schaffung von Vegetationsflächen sowie Dach- und Fassadenbegrünung auszugleichen.

### *Bebautes Gebiet mit bedeutender klimarelevanter Funktion*

Diese ausgewiesenen bebauten Bereiche übernehmen für sich und angrenzende Siedlungen bedeutende klimarelevante Funktionen, wobei Art und Dimension der vorhandenen Bebauung sehr unterschiedlich sein können.

Die genannten Gebiete weisen allesamt eine erhebliche klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen auf. Weitere Bau und Versiegelungsmaßnahmen führen zu negativen Auswirkungen auf die klimatische Situation. Für diese Gebiete wird eine Vergrößerung des Vegetationsanteils und eine Betonung oder Erweiterung der Belüftungsflächen empfohlen. Bei nutzungsändernden Planungen in diesen ausgewiesenen Flächen sind klimatisch-lufthygienische Gutachten notwendig.

### *Bebautes Gebiet mit klimatischen Nachteilen*

Diese Ausweisung umfasst vornehmlich verdichtete Siedlungsräume, die klimatisch-lufthygienisch stark belastet sind; dazu zählen auch diejenigen bebauten Bereiche, in denen der Luftaustausch maßgeblich durch Bauwerke behindert ist.

Diese Gebiete sind unter stadtklimatischen Gesichtspunkten sanierungsbedürftig.

Als Aufwertungs- oder Sanierungsmaßnahmen kommen infrage:

Erhöhungen des Vegetationsanteils, Verringerungen des Versiegelungsgrads und Verringerungen des Emissionsaufkommens, insbesondere des Verkehrs und der Feuerungsanlagen. Zudem wird eine Schaffung oder Erweiterung von möglichst begrünten Durchlüftungsbahnen empfohlen; damit ist u. U. die Entfernung oder Verlagerung störender Bauwerke verbunden.

Bei allen Planungen innerhalb dieser Flächenausweisungen sind klimatisch-lufthygienische Gutachten notwendig.

## 8.2 Legende der Planungshinweiskarte

Die Legende der Planungshinweiskarte mit zugeordneten Planungshinweisen unterteilt die zusammengefassten Klimatope der Klimaanalysekarte in Hinblick auf den Umgang der entsprechenden Flächen aus stadtklimatischer Sicht.

**Ausgleichsräume, Grün- und Freiflächen**

Kategorie	Name	Planungshinweise
schützen und vernetzen	<b>Ausgleichsraum mit hoher Bedeutung</b>	<p><b>Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen.</b></p> <p>Großflächige, klimaaktive Freiflächen mit direktem, positiv wirksamen Bezug zum Siedlungsraum. Hoher Einfluss für das aktive Kaltluftsystem, das die Siedlungsräume mit Kalt- und oder Frischluft versorgt. Hohe klimaökologische Wertigkeit.</p> <p><i>Schützen und Funktionsfähigkeit aufrechterhalten, nach Möglichkeiten weitere Vernetzungen anstreben. Innerstädtische Potentiellflächen über Schneisen und Vegetationsflächen verbinden.</i></p>
	<b>Ausgleichsraum mit mittlerer Bedeutung</b>	<p><b>Empfindlich gegenüber Nutzungsänderungen.</b></p> <p>Flächen im indirekten und selten direkten Wirkungszusammenhang mit Siedlungsflächen. Hohe klimaökologische Wertigkeit der landwirtschaftlichen Flächen im Westen der Stadt. Dadurch wichtige Ausgleichsfunktion zur thermischen Entlastung.</p> <p><i>Schützen und Funktionsfähigkeit aufrechterhalten. Bei Planungen von Baumaßnahmen ist eine Beurteilung eines klimatisch-lufthygienischen Sachverständigen bezüglich der Dimensionierung und Anordnung von Bauwerken sowie der Schaffung von Grün- und Ventilationsschneisen von Vorteil.</i></p>
schützen	<b>Ausgleichsraum mit geringer Bedeutung</b>	<p><b>Geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen.</b></p> <p>Flächen mit geringem klimatischen Einfluss auf Siedlungsgebiete. Von Siedlungsgebieten abgewandt oder wenig bedeutend für die Kalt- und Frischluftproduktion.</p> <p><i>Klimabewusste Entwicklungen sind unter Beachtung des „Bodenverbrauchs“ / Klimaschutz durchführbar. Eine möglichst geringe Gebäudehöhe sowie windoffene Gebäudeanordnungen sind zu empfehlen (Ausrichtung beachten!).</i></p>

Abbildung 16: Teil 1 der Legende der Planungshinweiskarte Ingolstadt (Ausgleichsräume).

## Lasträume, Siedlungsflächen

	Kategorie	Name	Planungshinweise
Klimasensible Entwicklung		<b>Bebautes Gebiet mit geringer Belastung und geringer klimarelevanter Funktion</b>	Gebiete im Siedlungs- oder Stadtgebiet mit <b>geringer klimatisch-lufthygienischer Empfindlichkeit</b> aufgrund ihrer Lage und der geringen thermischen Belastungen. Diese Flächen haben keine nennenswerte klimatische Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen und baulicher Nachverdichtung. <i>Entwicklungen können stadtklimatologische Auswirkungen haben, sofern ein Einfluss auf die Durchlüftung der Stadt oder die Abkühlung in der Nacht besteht. Siedlungsränder offenhalten. Nachverdichtungen im Sinne des Klimaschutzes sind stadtklimasensibel durchzuführen.</i>
		<b>Bebautes Gebiet mit klimarelevanter Funktion</b>	<b>Klimatisch-lufthygienische Empfindlichkeiten</b> gegenüber Nutzungsintensivierung. Bestehende Belüftungsmöglichkeiten sollten erhalten und ausgebaut werden. <i>Bauliche Maßnahmen und Stadtentwicklungsaktivitäten auf diesen Flächen sollen klimasensibel unter Beachtung der Durchlüftung des Gebiets und des Einflusses auf das Stadtgebiet betrieben werden und durch ein stadtklimatisches Gutachten begleitet werden.</i>
		<b>Bebautes Gebiet mit bedeutender klimarelevanter Funktion</b>	<b>Erhebliche Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung</b> . Bautätigkeit oder weiterer Versiegelung. Diese Faktoren können zu erheblichen negativen Auswirkungen der klimatischen Situation führen und sollten stets durch Mikroklimateundersuchungen begleitet werden. <i>Für diese Gebiete wird eine Vergrößerung des Vegetationsanteils und eine Betonung oder Erweiterung der Belüftungsflächen empfohlen.</i>
sanieren		<b>Bebautes Gebiet mit klimatischen Nachteilen</b>	Diese Gebiete sind unter stadtklimatischen Gesichtspunkten <b>sanierungsbedürftig</b> . Erhöhungen des Vegetationsanteils, Verringerungen des Versiegelungsgrads. Zudem wird eine <i>Schaffung oder Erweiterung von möglichst begrünten Ventilationsbahnen</i> empfohlen, damit das lokale Belüftungssystem entlastend wirken kann. Human-Biometeorologische Empfehlung: <i>Schaffung und Erhalt lokaler Gunsträume</i> (Freiräume mit Vegetation und Schatten), vor allem in Hinblick auf „Auswirkungen des Klimawandels“ und bei unzureichender Belüftung.

Abbildung 17: Teil 2 der Legende der Planungshinweiskarte Ingolstadt (Lasträume).

### 8.3 Planungshinweiskarte

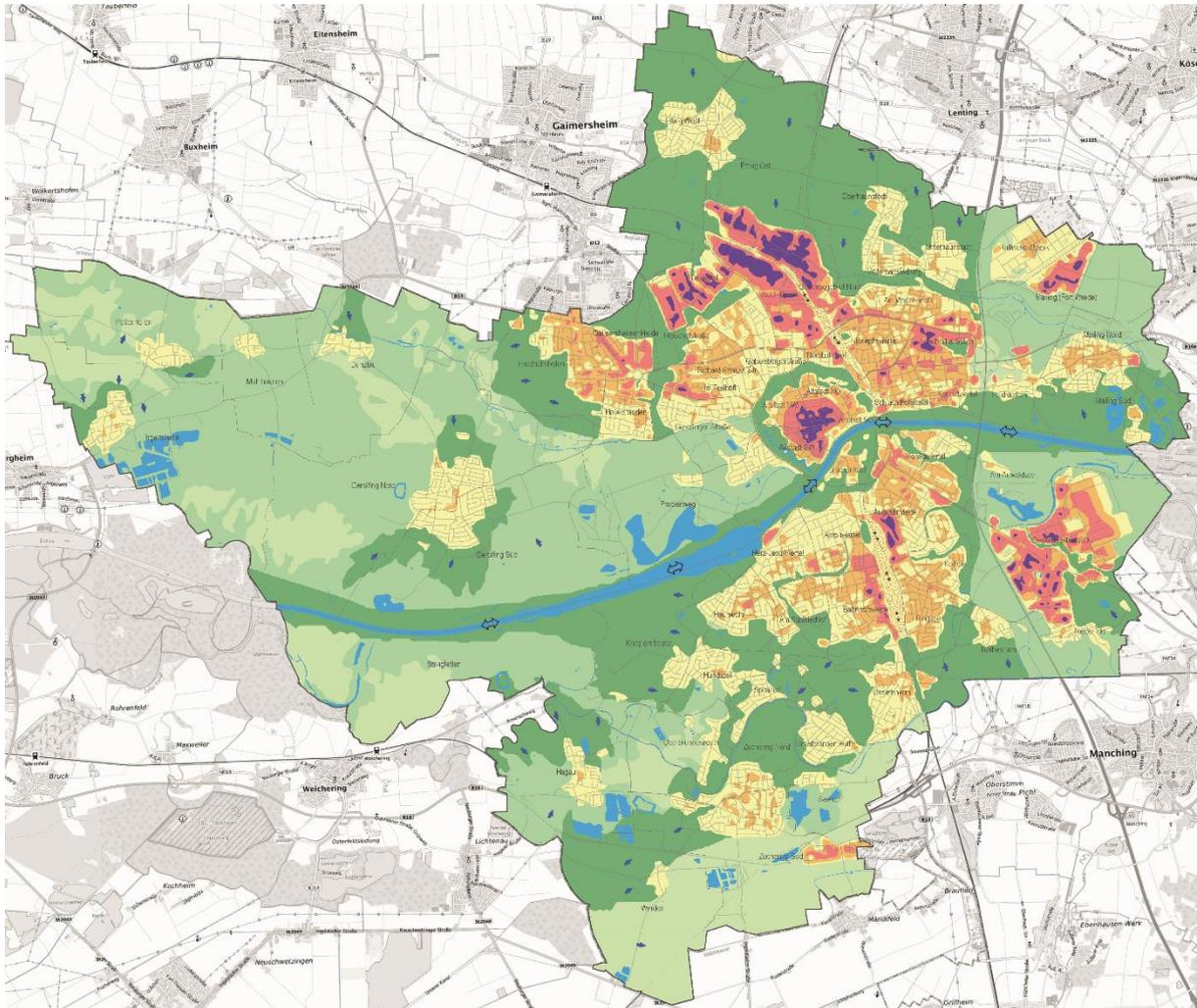


Abbildung 18: Planungshinweiskarte Stadt Ingolstadt 2022 (ohne Maßstab, Original im Anhang).

## 9 Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse

Die Deutsche Anpassungsstrategie zielt darauf ab, die Vulnerabilität (Verwundbarkeit) relevanter Sektoren gegenüber den Folgen des Klimawandels zu mindern beziehungsweise die Anpassungsfähigkeit natürlicher, ökonomischer und gesellschaftlicher Systeme zu erhalten oder zu steigern (Umweltbundesamt 2017).

In diesem Zusammenhang soll die durchgeführte Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse dabei helfen im Diskurs (1.) stadtklimatisches Wissen zu erzeugen, (2.) das Bewusstsein und die Notwendigkeit von Anpassung steigern um (3.) Handlungsschwerpunkte zu priorisieren und zu verorten.

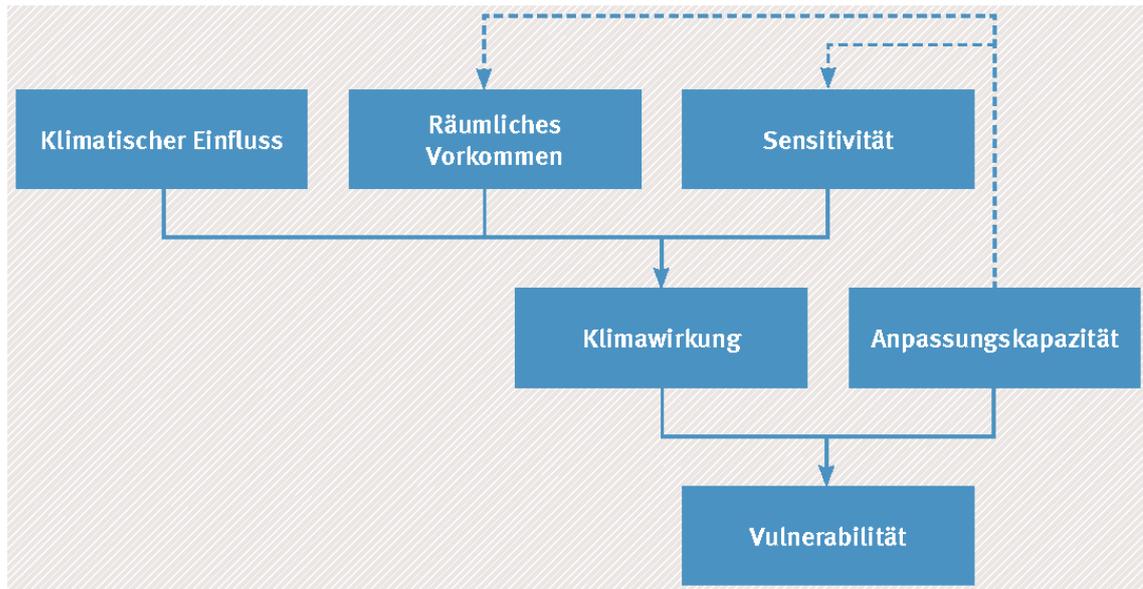


Abbildung 19: Klimawirkungs- und Vulnerabilitätskonzept (Umweltbundesamt 2017).

Um die tatsächlich klimabedingten Auswirkungen auf die gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse abzubilden, wurde im Rahmen der Klimaanalyse Ingolstadt eine weitere Ebene erarbeitet, in der sowohl soziodemografische Daten (vgl. StMUV 2021: „Klimaanpassung in Bayern – Handbuch zur Umsetzung“) auf Unterbezirksebene (siehe

Abbildung 20) als auch die Flächenausstattung der Gebiete mit in die Betrachtung genommen wurden. Somit können Aussagen bezogen auf die jeweilige Sensitivität der Stadtbewohner und deren gesundheitliche Disposition getroffen werden, denn vor allem hitzeassoziierte Gesundheitsschäden werden im Zuge des Klimawandels zunehmen.

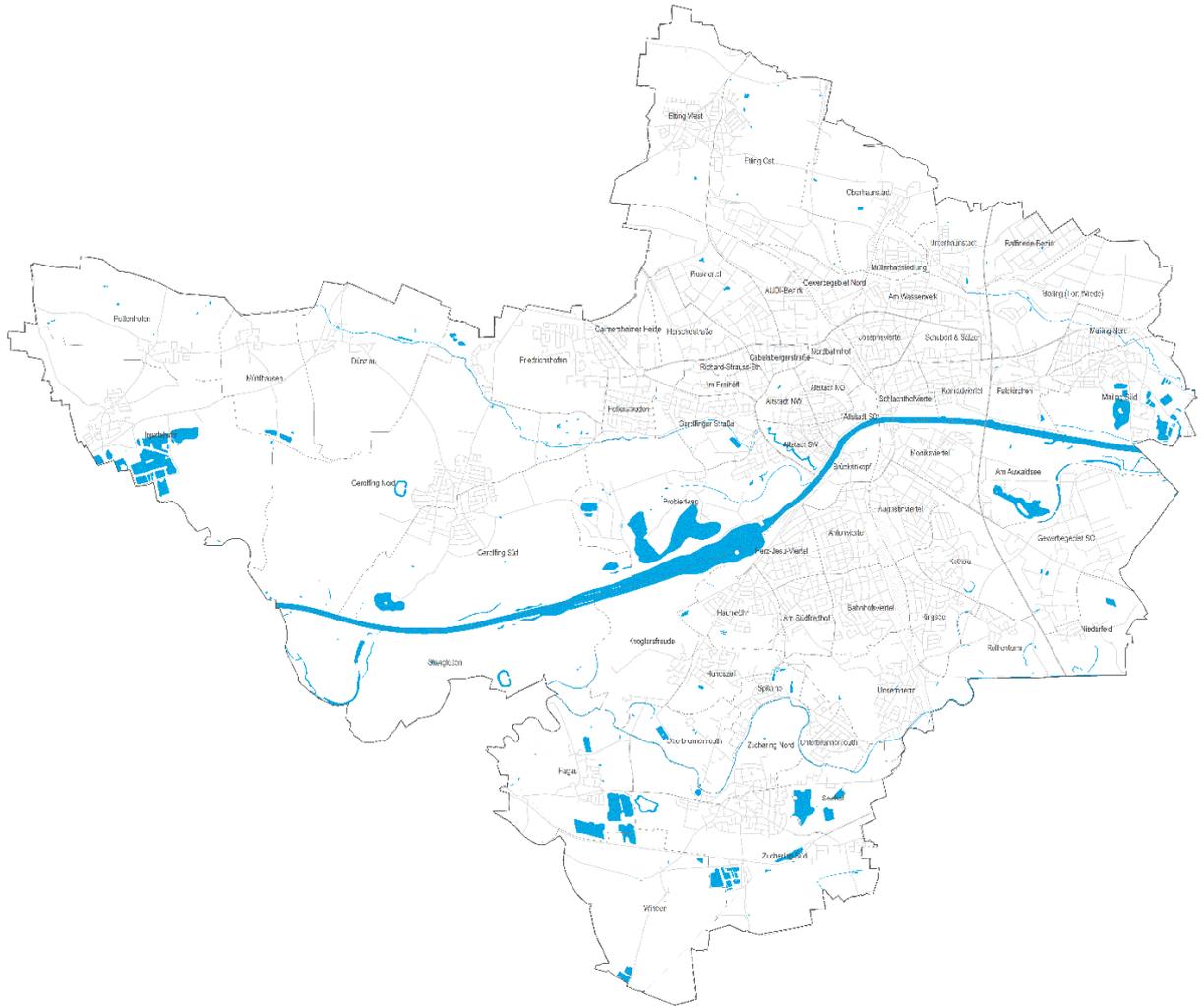


Abbildung 20: Übersicht der statistischen Unterbezirke / Stadtbezirke Ingolstadt.

## 9.1 Tabellarische Auswertung

Als besonders gefährdete Bevölkerungsgruppen wurden bei diesem Analyseschritt kleine Kinder (0-6 Jahre) und ältere Menschen (über 65 Jahre) gewählt, da diese besonders sensibel auf klimatische Extreme reagieren. Die zugrundeliegenden Daten sind tabellarisch im Anhang aufgeführt.

Dabei bildet die Klimaanalysekarte die Ausgangslage der folgenden Analyseschritte. Der klimatische Einfluss wird durch die Klimawirkung der Klimatope beschrieben. Das räumliche Vorkommen klimatischer Extreme (Klimatop „Moderate Überwärmung“ und „Starke Überwärmung“) beschreibt die Anwesenheit besonders belasteter Stadtgebiete.

Mittels einer Flächenbilanzierung bezogen auf die Gesamtstadt, lässt sich die spezifische Verteilung der unterschiedlichen Klimatope in den jeweiligen Unterbezirken gut ablesen und gegenüberstellen (siehe Abbildung 21). Darin ist unabhängig von der jeweiligen Flächenausdehnung eines Bezirkes der prozentuale Anteil klimatischer Gunst- und Lasträume abzulesen. Daraus können sowohl gegenüberstellende Vergleiche gezogen als auch Gewichtungen für weitere Handlungsschritte vorgenommen werden.

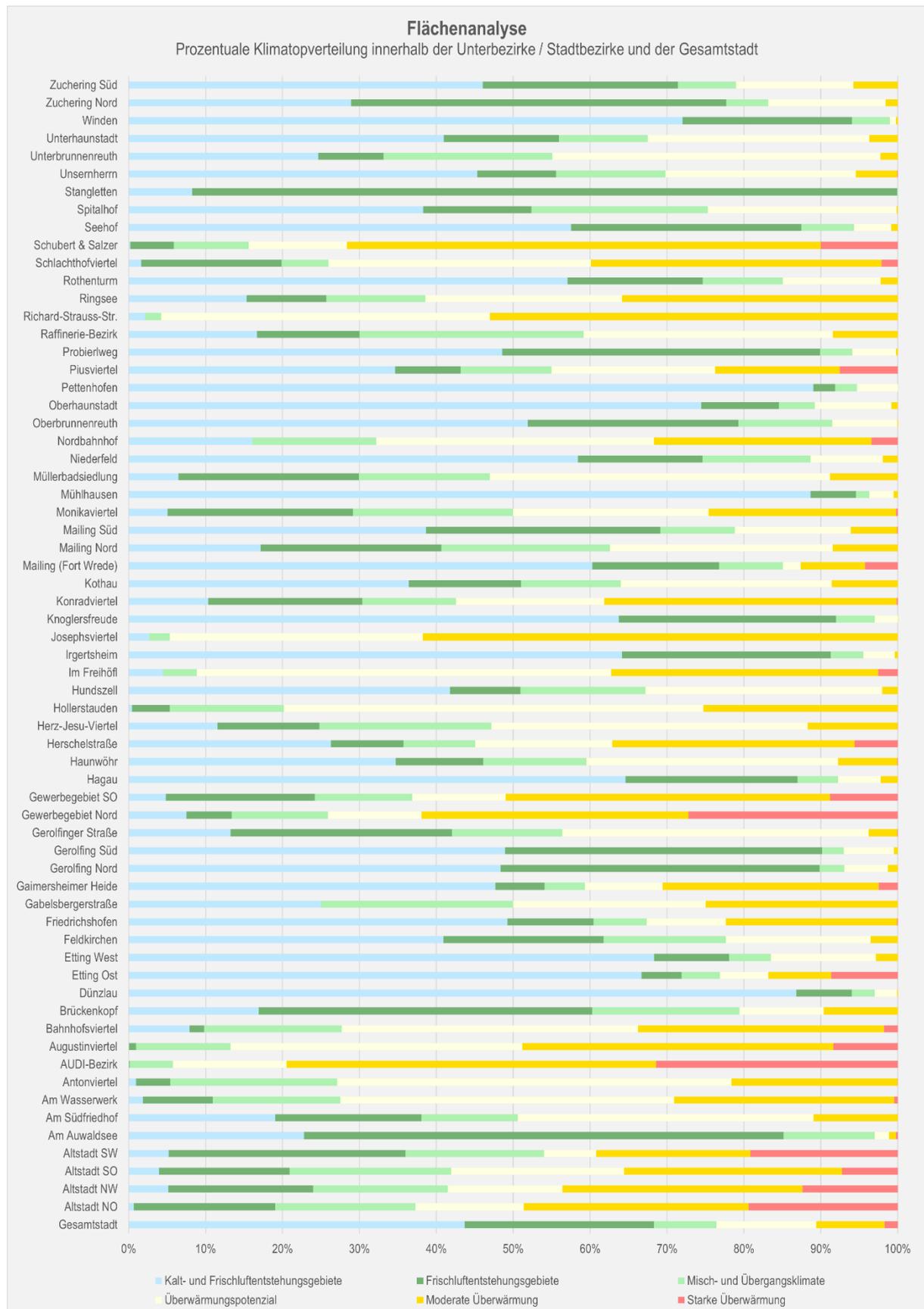


Abbildung 21: Flächenanalyse (prozentuale Klimatopverteilung innerhalb der Unterbezirke / Stadtbezirke und der Gesamtstadt), Original im Anhang.

In einem ersten Schritt wurden die vulnerablen Bewohner der oben beschriebenen Altersgruppen den jeweiligen Unterbezirken zugeordnet und anschließend auf die potenziell vorhandene Wohnfläche des jeweiligen Gebietes projiziert. Diese Vorgehensweise, nach der die kleinräumige Zuordnung der Überwärmungsbereiche als Grundlage dient, erhöht die Genauigkeit der Aussagen um ein Vielfaches. Verfügt der Bezirk beispielsweise über große Wald- oder Industrieflächen, werden diese nicht in die Betrachtung eingeschlossen, um ein realistisches Bild der spezifischen Wohnverteilung zu erzeugen. Dabei wird bereits aufgezeigt, wie großzügig oder kleinräumig die jeweilig zur Verfügung stehenden Flächen pro Kopf ausfallen und wie die direkt angrenzenden Freiflächen dimensioniert sind.

Im Anschluss konnten diese räumlich zugeordneten Bevölkerungsdaten mit den analysierten Klimatopen der Klimaanalysekarte verschnitten werden, so dass eine statistische Verteilung durchgeführt werden konnte. In Abbildung 22 wurden jeweils diese verfeinerten Daten für die beiden Belastungsklimatope „Moderate Überwärmung“ und „Starke Überwärmung“ tabellarisch zusammengetragen. Es ist aufgeführt, welche Gesamtbevölkerung im Bezirk gemeldet ist (Gesamtzahl), wie hoch der prozentuale Anteil der vulnerablen Menschen innerhalb dieser Bevölkerung ist (grau) und schlussendlich, wieviel Prozent dieser vulnerablen Menschen zusätzlich in den beiden definierten Überwärmungsgebieten lebt (gelb bzw rot). Mithilfe dieser Betroffenheitsanalyse lässt sich ein Vergleich zwischen den einzelnen Stadtteilen treffen.

Zum Schutz der besonders sensiblen Bevölkerung sollten die Gebiete priorisiert werden, um gezielte Planungs- und Umsetzungsstrategien zu definieren. Dabei sind solche Bezirke als besonders relevant zu bewerten, die neben einem hohen Anteil der vulnerablen Gruppen zugleich einen hohen Anteil dieser Menschen in potenziellen Überwärmungsgebieten statistisch aufweisen. Die so identifizierten Gebiete sollten zum Schutz der Bevölkerung besonders hoch priorisiert werden, um Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zu ergreifen.

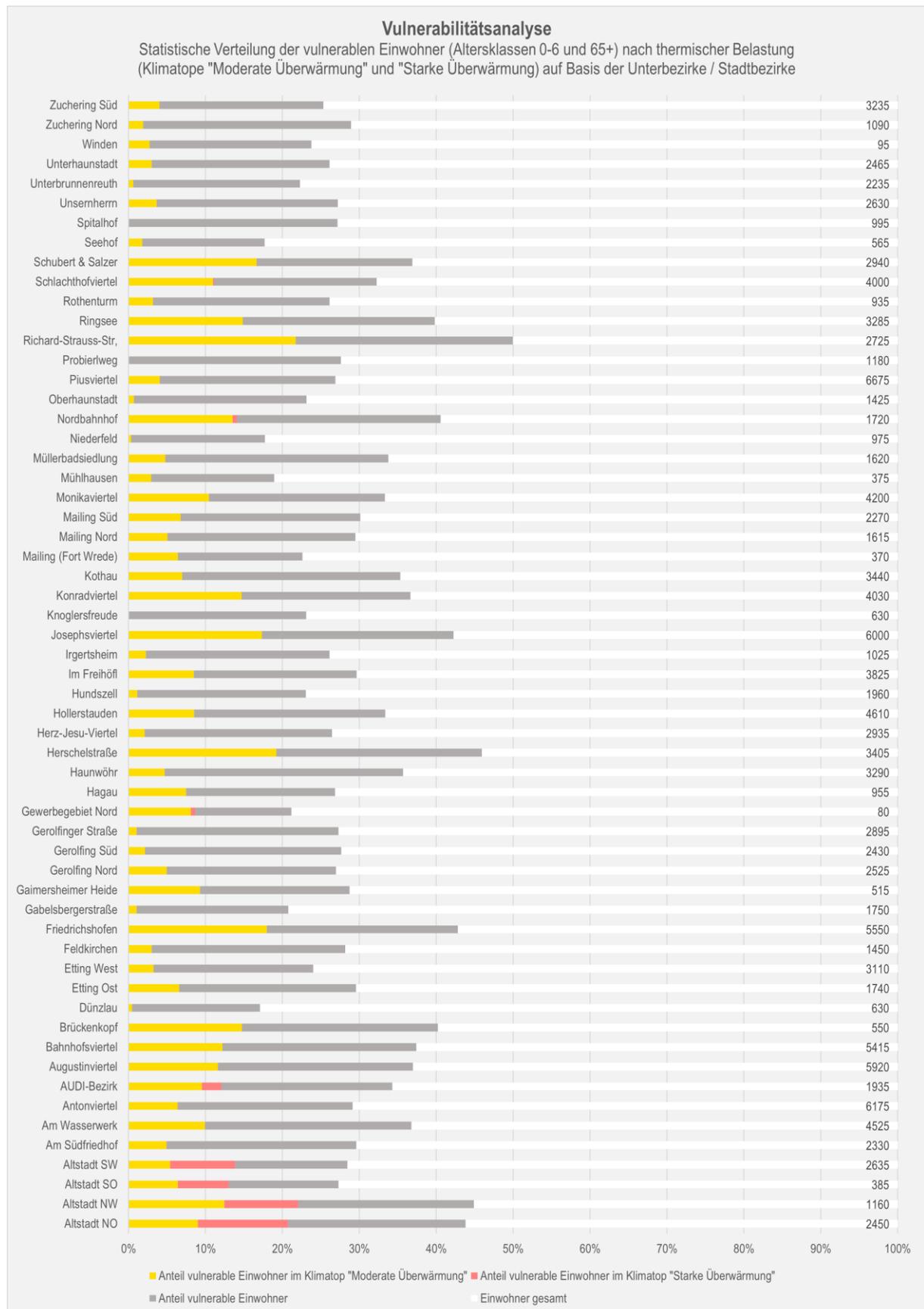


Abbildung 22: Vulnerabilitätsanalyse - Vulnerable Gruppen in Belastungsklimatopen, Original im Anhang.

## 9.2 Kartografische Auswertung (Ampelkarte)

Allerdings beinhaltet diese Betrachtung nicht das Flächenangebot des jeweiligen Gebietes. Da sich der Anteil an Freiflächen positiv auf die Anpassungsfähigkeit der Menschen auswirkt, wurde ein weiterer Indikator aufgenommen, der die Klimaanpassungskapazität (Quelle Forschungsprojekt KLIWIPRAKO KS) widerspiegelt. Analog zu dem Beispiel der positiven Wirkung von viel Freifläche pro Bewohner tritt das Gegenteil ein, wenn viele Menschen mit wenig Freiraumangebot (eigener Garten oder sonstige Freiflächen) in einem Bezirk wohnen und somit nur über eher reduzierte Anpassungskapazitäten verfügen.

Die statistische Auswertung des Flächenangebots des jeweiligen Bezirks (Verweis Anhang) wurde somit in der weiterführenden Betrachtung aufgenommen und mit den vulnerablen Bevölkerungsgruppen ins Verhältnis gesetzt.

Für eine flächenbezogene Darstellung, welche die bisher genannten Vulnerabilitätsfaktoren berücksichtigt, wurde auch hier eine Verschneidung der Daten vorgenommen. Daraus resultiert eine stadtspezifische Analyse, die eine Spanne von Handlungsbereichen abdeckt. Die Bandbreite reicht dabei von Räumen, die keinen stadtklimatischen Aufwertungsbedarf aufweisen bis hin zu Räumen mit einem hohen stadtklimatischen Aufwertungsbedarf (siehe Abbildung 23). Anhand der Farbstaffelung sind dabei die besonders kritischen Bereiche / Bezirke leicht ablesbar.

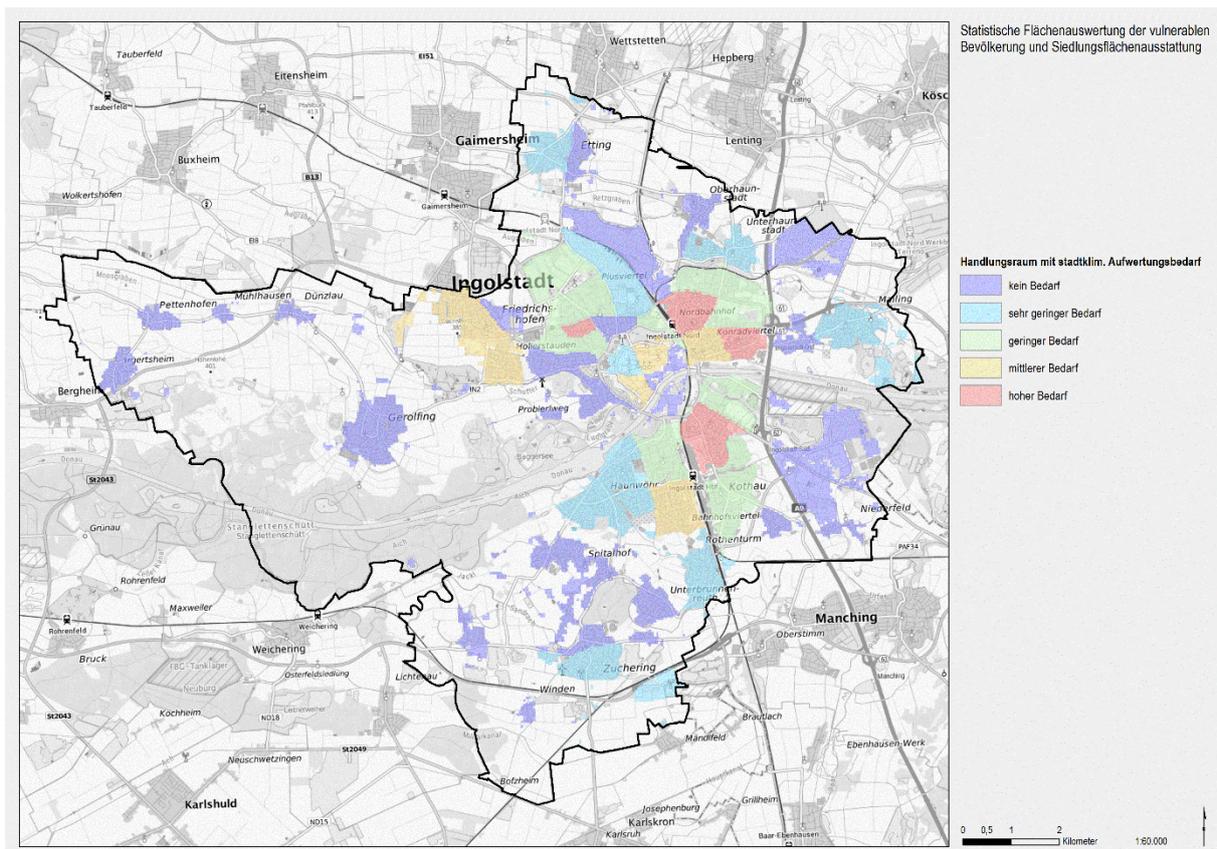


Abbildung 23: Stadtkarte mit stadtklimatischem Handlungsbedarf bezogen auf die vulnerable Bevölkerung (ohne Maßstab, Original im Anhang).

## 10 Schlussbetrachtung

Laut der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS, Fortschrittsbericht 2020) nimmt die Stadt- und Raumplanung eine „Schlüsselrolle im Bereich der Klimaanpassung“ ein. Da sich die steigende Hitzebelastung negativ auf die menschliche Gesundheit auswirkt, ist im Themenbereich „Stadtklima und Luftqualität“ ein großer Handlungsbedarf gegeben.

Die Ergebnisse der Klimaanalyse der Stadt Ingolstadt und die weitere Betrachtung der Vulnerabilität hinsichtlich hitzesensibler Bevölkerungsgruppen haben gezeigt, dass vor allem den human-biometeorologischen Faktoren der (innerstädtischen) Vegetation ein hohes Maß an Ausgleichsleistung zukommen. Neben der Verdunstungskühlung, der Luftfilterung und dem Schattenwurf aus klimaökologischer Sicht sind weitere positive ökologische und soziale Funktionen von Vegetation aufzuführen, etwa Artenvielfalt, Wasserspeicherung, Ästhetik und Erholung. Durch die stadtklimatische Lage und dem direkten Bezug zu den überwärmten Gebieten der Altstadt kommt dem historischen Grüngürtel eine besonders hohe Bedeutung zu, was auch in der Planungshinweiskarte in Form der Kategorisierung „Ausgleichsraum mit hoher Bedeutung“ unterstrichen wird. Aus diesem Grund ist es auch für die stadtklimatische Situation der Stadt Ingolstadt äußerst förderlich, bestehende Vegetationsstrukturen gezielt zu schützen und weitere Vegetation (Baumgruppen, einzelne Straßenbäume oder andere entsiegelte Freiräume mit entsprechendem Vegetationsvolumen) einzuplanen und zu realisieren.

Das vorhandene Kartenmaterial (hier vor allem die thematischen Karten der modellierten Klimaparameter aus der GEO-NET Studie) bietet die Voraussetzung dafür, auf klimatische Belastungssituationen planerisch zu reagieren und zukünftige Planungsprozesse im Sinne einer klimabewussten Ausrichtung zu begleiten. Die hier vorgestellte Klimaanalysekarte kann Fragestellungen zu klimatischen Wechselwirkungen im mesoklimatischen Maßstab beantworten. Somit sind Informationen über die real vorhandenen Gegebenheiten in der Ist-Situation abrufbar. Diese werden zur Bewertung der Belüftungsverhältnisse und der thermischen Bedingungen zusammengeführt.

Daraus abgeleitet wurde die Planungshinweiskarte als bewertende und vereinfachte Karte, die für den Planungsprozess mit konkreten Hinweisen zum Erhalt bzw. zur Verbesserung der klimatischen Bedingungen in der Stadt Ingolstadt entwickelt wurde.

### *Informationsgewinn aus der Klimaanalysekarte:*

Flächig dargestellte Potenzial- und Defizitbereiche können aufgrund der feinen Auflösung sehr gut räumlich verortet werden. Vor allem die intensiv genutzten Gewerbegebiete und die stark verdichtete Altstadt mit wenig Vegetation, hoher Versiegelung und dichten Gebäuden werden in hohe Belastungskategorien eingestuft. Wohnviertel und Stadtbereiche mit abnehmender Dichte und mehr Grünflächen erreichen ebenfalls die städtischen Klimatope „Moderate Überwärmung“ bis hin zu „Starke Überwärmung“. Weniger hohe Werte wurden in den äußeren Stadtteilen im ländlichen Bereich mit stärkerer Durchgrünung, weniger Baumassen und einer besseren Belüftung ermittelt. Dennoch sind auch in den kleineren Siedlungsgebieten Bereiche mit kleinräumiger thermischer Belastung zu finden. Dabei spielt die absolute Flächengröße eine untergeordnete Rolle. Überwärmungsgebiete, vor allem mit Wohnnutzung in der Nähe, sollten stadtklimatisch aufgewertet werden.

Die Stadt profitiert vom nördlichen und westlichen Kaltlufteintrag und den dort gelegenen klimaaktiven Flächen, die in den Nachtstunden entlang der Korridore eine kühlende Wirkung in den Siedlungsraum haben.

### *Planerische Empfehlungen aus der Planungshinweiskarte:*

Die Planungshinweiskarte wurde nach der VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 von der Klimaanalysekarte abgeleitet. Die fließenden Übergänge sind den scharfen Grenzen der Kategorien gewichen, eine Reduktion auf vier Kategorien soll die Planungspraxis mit diesem Instrument anwendungsfreundlicher machen.

Die Potenzialbereiche wurden auf ihre Wirksamkeit hin unterteilt. Ausgleichsräume mit hoher Bedeutung sind im direkten Wirkzusammenhang mit Belastungsbereichen zu finden, während andere Ausgleichsräume / Naturräume, die keinen unmittelbaren Bezug zur Bebauung haben, andere Planungshinweise enthalten. Allgemein gibt es Hinweise in der Abstufung von „sichern und schützen“ (sensible Bereiche mit direktem Bezug zu Defizitbereichen, die in ihrer Funktion geschützt werden sollten) und „klimabewusste Entwicklungen möglich“ (Bereiche, die zwar in der Fläche eine hohe klimaökologische Wertigkeit haben, aber klimasensible Entwicklungsmöglichkeiten bieten).

Analog zu den Potenzialbereichen/ Ausgleichsräumen wurden die bebauten Gebiete in insgesamt vier Kategorien unterteilt. Dabei wurde zwischen bebautem Gebiet mit geringer Belastung bis zu bebauten Gebieten mit klimatischen Nachteilen unterschieden. Unter bestimmten Aspekten können Bereiche nutzungsintensiviert werden, wobei stets der Zusammenhang zu benachbarten Arealen berücksichtigt werden muss und vertiefende Betrachtungen empfohlen werden. Für andere Bereiche sind aus Sicht der Klimawandelanpassung kleinräumige Aufwertungen (Freiräume mit Vegetation und Schatten) zu empfehlen. Eine Vernetzung von Belüftungsstrukturen im bebauten Raum ist anzustreben.

Grundsätzlich wird empfohlen, auch im Hinblick auf zukünftige weitere Planungen, den Flächenverbrauch so gering wie möglich zu halten, um eine Überwärmung der Gebiete zu unterbinden und die Möglichkeit der Versickerung von Niederschlag zu erhalten.

### *Vulnerabilitätsuntersuchung*

Die Vulnerabilitätsuntersuchung zeigt auf, welche Klimatope zu ihrer ohnehin als moderat oder stark eingeschätztes Überwärmungsgebiet, zusätzlich vulnerable Bevölkerungsgruppen beherbergen. Besonders junge sowie ältere Menschen bedürfen des Schutzes was Hitze angeht. Die Verortung solcher Gebiete, in denen diese vulnerablen Bevölkerungsgruppen leben, bietet die Möglichkeit gezielt Maßnahmen zu ergreifen, wie zum Beispiel die Ausweitung von beschatteten Sitzmöglichkeiten, Spielplätzen oder barrierefreien Zugängen zu Grünanlagen.

### *Allgemeine Planungshinweise:*

- Die Einbringung von Vegetation kann mehrere klimawandelbedingte Probleme gleichzeitig lindern: Durch die Wasserverdunstung an der Blattoberfläche entsteht ein Kühlungseffekt. Dieser kann je nach Pflanzenart (besonders bei großkronigen Bäumen) durch Schattenwurf auf Freiflächen oder Gebäudefassaden eine große Erleichterung bringen. Zudem leistet die Kohlenstoffspeicherung in der Biomasse einen Beitrag zum Klimaschutz, während gleichzeitig die Pflanzen durch ihre Filterleistung die Luftqualität verbessern.

Eine solche Begrünung kann auf unterschiedlichste Weisen erfolgen: Durch das Anlegen von Grünflächen, Fassaden- oder Dachbegrünungen oder Baumpflanzungen. Bei der Auswahl der Pflanzenarten ist auf eine Anpasstheit an die regionalen Klimaprojektionen sowie die Sicherstellung ausreichender Bewässerung zu achten.

- Ein weiterer wichtiger Aspekt klimasensibler Bebauung ist die Vermeidung von Bodenversiegelung. Dies minimiert zum einen den Effekt der „Speicherheizung“ künstlicher Baumaterialien, die sich durch Absorption von Strahlung stark aufheizen und diese Hitze in den Nachtstunden wieder abgeben. Zum anderen kann durch Entsiegelung der Oberflächenabfluss verringert und die Wasserspeicherkapazität natürlicher Böden genutzt werden, was bei Starkregenereignissen für eine zeitliche Entspannung der Belastungsspitzen sorgen kann. Verdunstet das Wasser aus den natürlichen Böden später, ergibt sich ein zusätzlicher Kühlungseffekt.
- Sowohl die Begrünung als auch die Entsiegelung begünstigen neben Klimaanpassung und Klimaschutz auch die Biodiversität und sind deswegen Maßnahmen erster Wahl. Sollten sie aufgrund von Standortbedingungen nicht möglich sein, sollte eine künstliche Beschattung von Freiflächen und Fassaden, etwa durch Sonnensegel, in Betracht gezogen werden.

Weiterführende Informationen zu diesen Punkten können der Städtebaulichen Klimafibel (2012) entnommen werden und sollten bei der weiterführenden Planung dringend beachtet werden. Damit sich im Plangebiet keine unangenehmen bioklimatischen Situationen einstellen (Aufenthaltsqualität auf einem Stadtplatz o.Ä.) sollten Detailstudien angefertigt werden, um eine Optimierung des Außenraums hinsichtlich Hitze und Klimawandel zu erzielen.

## 11 Quellen

- StMUV (2021):  
Klimaanpassung in Bayern – Handbuch zur Umsetzung“, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Oktober 2021
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2020):  
TopPlusOpen. Datenquellen: [http://sg.geodatenzentrum.de/web\\_public/Datenquellen\\_TopPlus\\_Open\\_15.12.2020.pdf](http://sg.geodatenzentrum.de/web_public/Datenquellen_TopPlus_Open_15.12.2020.pdf)
- Bundesregierung Deutschland (2020):  
Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). Online abrufbar: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimawandel\\_das\\_2\\_fortschrittsbericht\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_2_fortschrittsbericht_bf.pdf)
- GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2020):  
Klimaanalyse Ingolstadt, Zwischenbericht – Methodik und Ergebnisse 2020, Auftraggeber Stadt Ingolstadt.
- Städtebauliche Klimafibel (2012):  
Ministerium für Verkehr und Infrastruktur (VM) Baden-Württemberg (Hrsg., 2012):  
Stuttgart, S. 7-248. Online abrufbar: <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/>
- VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 (2015):  
Umweltmeteorologie – Klima- und Lüfthygienekarten für Städte und Regionen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- Luftreinhalte-/Aktionsplan für die Stadt Ingolstadt (2007):  
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV), Erarbeitet von der Regierung von Oberbayern.
- Baugesetzbuch (BauGB):  
Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), zuletzt geändert durch Artikel 9 des Gesetzes vom 10. September 2021 (BGBl. I S. 4147).
- Baumüller, J.; Hoffmann, U.; Reuter, U. 1995:  
Städtebauliche Klimafibel, Hinweise für die Bauleitplanung Folge 2. Stuttgart: Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg.
- Brandenburg C., Matzarakis, A., 2007:  
Das thermische Empfinden von Touristen und Einwohnern der Region Neusiedler See. In: Matzarakis, A., Mayer, H. (Eds.), Proceedings zur 6. Fachtagung BIOMET. Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg Nr. 16, 67-72.
- Häckel H. 1985:  
Meteorologie. UTB – Ulmer, Stuttgart.
- Hupfer P., Kuttler, W. 1998:  
Witterung und Klima B.G. Teubner Stuttgart.
- Höppe, P. 1999:  
The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. Int. J. Biometeorol. 43, 71-75.
- Katzschner, L. 2004:  
Beitrag der Stadtklimatologie zu den Zielen einer neuen Urbanität UVP Report, Nr. 1/2004, Hamm.
- Katzschner, L.; Katzschner, A.; Kupski, S. 2010:  
Abschlussbericht des BMBF Verbundprojekts KLIMES. Teilvorhaben Planerische Bewertung der kleinräumigen Stadtklimaanalyse zur Umsetzung der Maßnahmen „Anpassung an Klimaextreme“, Universität Ingolstadt.
- Katzschner, L. 2011:  
Urban Climate Strategies Against Future Heat Stress Conditions. Resilient Cities: Cities and Adaptation to Climate Change. Proceedings of the Global Forum 2010. K. Otto-Zimmermann. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer: 79-89.
- Kirchhof, W., Kupski, S. 2019:  
Stadtklimaanalysen zur Förderung von Klimaschutz und Klimaanpassung. Schwerpunktbeitrag UVP-report 32(4)|2018. UVP-Gesellschaft e.V., Paderborn, Juni 2019.

- Kupski S. 2017:  
Klimagerechte Materialien – Hitze Hotspot Stadt. Natürlich Technik: Mit neuen Materialien dem Klimawandel trotzen. In Garten + Landschaft 07/2017, Georg D.W. Callwey GmbH & Co. KG, München.
- Kuttler, W. 2011:  
Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen; Climate change in urban areas, Part 1, Effects. In: Environmental Sciences Europe (ESEU), Springer open, DOI: 10.1186/2190-4715-23-11, S. 1-12.
- Lohmeyer, A. 2008:  
Klimafunktions- und Klimaplanungskarten, Lohmeyer Aktuell, 20/2008, Karlsruhe.
- Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (ehem. MUNLV NRW) 2010:  
Handbuch Stadtklima– Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Balungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Düsseldorf.
- Lorenz D. (1973):  
Meteorologische Probleme bei der Stadtplanung; FBW Blätter, Folge 5, Stuttgart
- OKE, T. R. 2006:  
Boundary layer climates. Routledge. London. New York.
- Robel F., Hoffmann U., Riekert A., 1978:  
Daten und Aussagen zum Stadtklima von Stuttgart auf der Grundlage der Infrarot Thermographie Beiträge zur Stadtentwicklung Nr. 15, Landeshauptstadt Stuttgart.
- Umweltbundesamt 2015:  
Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel, Climate Change 24/2015, Dessau-Roßlau.
- VDI 2008:  
Richtlinie 3785 Blatt 1 Umweltmeteorologie – Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI 2015:  
Richtlinie 3787 Blatt 1 Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- VDI 2008:  
Richtlinie 3787 Blatt 2 Umweltmeteorologie – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Luft-hygiene für die Stadt- und Regionalplanung – Teil I: Klima. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- Umweltbundesamt (2017):  
Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen – Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau, 2017. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fur-klimawirkungs> (zuletzt abgerufen am 28.01.2022)

## 12 Anhang

### Klimakarten:

- Klimaanalysekarte Stadt Ingolstadt 2022
- Planungshinweiskarte Stadt Ingolstadt 2022

### Messkampagne

- Aufbau der Kontrollmesskampagne im Sommer 2021 Ingolstadt
- Kontrollmesskampagne, Beschreibung Messstandorte INKEK
- Auswertung Profilmessfahrten während einer Strahlungsnacht

### Statistische Analyse / soziale Vulnerabilität

- Flächenanalyse (prozentuale Klimatopverteilung innerhalb der Unterbezirke / Stadtbezirke und der Gesamtstadt)
- Vulnerabilität, Tabelle: Bevölkerung der Unterbezirke
- Vulnerabilität, Tabelle: Flächennutzung und Besiedlungsdichte 2020
- Vulnerabilitätsanalyse - Vulnerable Gruppen in Belastungsklimatopen
- Stadtkarte mit stadtklimatischem Handlungsbedarf bezogen auf die vulnerable Bevölkerung