



Grundlagen für die klimaangepasste Stadtplanung schaffen

Methoden und Werkzeuge der Klimaanalyse
im besiedelten Bereich



klima



Grundlagen für die klimaangepasste Stadtplanung schaffen

**Methoden und Werkzeuge der Klimaanalyse
im besiedelten Bereich**

Impressum

Grundlagen für die klimaangepasste Stadtplanung schaffen

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de/

Konzept/Text:

LfU: Lara Möllney, Michael Außendorf

Redaktion:

LfU: Lara Möllney, Michael Außendorf, Christina Schön, Dr. Michael Joneck

Bildnachweis:

Alle LfU außer:

Deutscher Wetterdienst (DWD), Frankfurter Str. 135, 63067 Offenbach: Abb. 1, S. 8, Abb. 3, S. 13, Abb. 7, S. 21, Abb. 8, S. 23

Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abteilung Stadtklimatologie, Gaisburgstr. 4, 70182 Stuttgart: Abb. 2, S. 11

Burghardt und Partner, Ingenieure (BPI), Am Sonnenhang 4, 34128 Kassel: Abb. 4, S. 15, Abb. 10, S. 29

Stadt Nürnberg, Umweltamt, Bauhof 2, 90407 Nürnberg: Abb. 6, S. 19

Stadt Regensburg, Katharina Schätz, Bruderwöhrdstraße 15b, 93055 Regensburg: Abb. 9, S. 27

GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Große Pfahlstraße 5a, 30161 Hannover: Abb. 11, S. 32

Stand:

Februar 2023

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbem oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Analyse des Stadtklimas – Grundlage für die Anpassung an den Klimawandel	5
2	Checkliste Stadtklimaanalyse	6
3	Das Klima im besiedelten Bereich – typische Merkmale	8
4	Methoden der Stadtklimaanalyse – so gelangt man zu aussagekräftigen Daten	10
4.1	Landnutzungsdaten	10
4.2	Messungen: In-situ und Fernerkundung	10
4.3	Stadtklimamodellierung	12
4.3.1	Kaltluftmodellierung	12
4.3.1.1	Praxisbeispiel Kaltluftmodellierung: KLAM_21 in bayerischen Städten	14
4.3.2	Mesoskalige Modellierung	16
4.3.2.1	Praxisbeispiele mesoskalige Modellierung: Regional- und Stadtklimauntersuchungen in Bayern	17
4.3.3	Mikroskalige Modellierung	20
4.3.3.1	Praxisbeispiele mikroskalige Modellierung: Stadtklimamodellierung in bayerischen Städten	21
4.3.4	Weitere Werkzeuge	24
5	Bewertung und Umsetzung in der Planung – von der Klimaanalyse zur Raumplanung	26
5.1	Klimatopkarte	26
5.1.1	Praxisbeispiel Klimatopkarten	26
5.2	Klimaanalyse-/Klimafunktionskarte	28
5.2.1	Praxisbeispiele Klimaanalysekarten	28
5.3	Planungshinweiskarte	30
5.3.1	Praxisbeispiele Planungshinweiskarten	31
6	Zusammenfassung	33

1 Analyse des Stadtklimas – Grundlage für die Anpassung an den Klimawandel

Städte sind besonders **vulnerabel gegenüber dem voranschreitenden Klimawandel**. Häufigere und intensivere Extremwetterereignisse wirken sich erheblich auf die Grundversorgung der Städte, die Infrastruktur und Wohnverhältnisse aus. Wetterextreme wie Hitzewellen, Trockenheit, Starkregen, Hochwasser und Stürme erhöhen die Gefahr von Schäden an der städtischen Infrastruktur, beeinflussen die Versorgungssicherheit und können die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen massiv beeinträchtigen. In extremen Fällen kann sogar Gefahr für Leib und Leben bestehen. All diese Klimawandelfolgen fokussieren sich in dicht besiedelten Städten und Gemeinden ganz besonders.

Gleichzeitig kommt gerade den Kommunen mit der Pflicht zur Daseinsvorsorge und der Bereitstellung von Infrastruktur eine Schlüsselstellung bei der Anpassung an die **Folgen des Klimawandels** zu. Mit planerischen Instrumenten wie dem Flächennutzungsplan mit integriertem Landschaftsplan und dem Bebauungsplan/Grünordnungsplan können Kommunen klimatische und lufthygienische Belange berücksichtigen und über die Flächennutzung die Klimaresilienz erhöhen.

Für die systematische Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen ist es essentiell, dass die kommunalen Akteure die **klimatischen Besonderheiten ihrer Stadt** kennen. Die städtische Wärmeinsel (siehe Kapitel 3) beispielsweise betrifft nicht alle Quartiere gleichermaßen, sondern kann innerhalb der Stadt lokal große Unterschiede zeigen.

Eine **Stadtklimaanalyse** bietet die Grundlage für die fundierte Anpassung an steigende Temperaturen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können in Form von Klimaanalyse- oder Planungshinweiskarten aufgearbeitet werden, um das Schutzgut Klima/Luft in der formellen und informellen räumlichen Planung zu berücksichtigen. Durch die Erarbeitung stadtklimatischer Grundlagen und die Einbindung in informelle Instrumente wie strategische Leitbilder oder Klimaanpassungskonzepte erhalten darauf aufbauende formelle Instrumente wie der Bebauungsplan eine bessere Verankerung in der Sachmaterie und damit eine höhere Rechtssicherheit. [1]

Diese Publikation bietet Städten und Gemeinden eine Hilfestellung, mit welchen **stadtklimatischen Werkzeugen und Methoden** sie die eigene Betroffenheit hinsichtlich Hitzehotspots räumlich abschätzen und somit Prioritäten bei der Anpassung an den Klimawandel setzen kann. Viele kleinere Städte haben nicht die nötigen Personalkapazitäten, um stadtklimatische Untersuchungen selber durchzuführen und sind daher auf eine Auftragsvergabe an ein geeignetes Ingenieurbüro angewiesen. Diese Publikation erleichtert die Abschätzung, welche stadtklimatischen Grundlagen die Kommune für ihre individuellen Fragestellungen benötigt und kann daher als Grundlage einer Leistungsbeschreibung für eine Auftragsvergabe dienen.

Herzstück dieser Broschüre ist die Übersicht über verschiedene Werkzeuge der Stadtklimaanalyse (siehe Kapitel 4) und deren Nutzung in der räumlichen Planung (siehe Kapitel 5), die durch zahlreiche Praxisbeispiele aus bayerischen Kommunen veranschaulicht wird. Die vielfältigen stadtklimatischen Werkzeuge reichen dabei von meteorologischen Messungen und vereinfachenden Online-Anwendungen bis hin zu komplexen mikroskaligen Modellen. Die folgende **Checkliste** soll den Einstieg in diese fachlichen Inhalte erleichtern. Sie stellt zentrale Fragestellungen vor, die man im Rahmen einer Stadtklimaanalyse beantworten kann, und gibt Hinweise zu der geeigneten Methodenwahl. Die Checkliste kann auch als Ausgangspunkt genutzt werden, um direkt zu dem Analysewerkzeug zu springen, das für die eigene Fragestellung besonders relevant ist.

2 Checkliste Stadtklimaanalyse

Welche Methode für die geplante stadtklimatische Untersuchung sinnvoll ist, hängt von der zugrundeliegenden Fragestellung, aber auch von den zur Verfügung stehenden zeitlichen und finanziellen Ressourcen ab. Tab. 1 bietet eine **Entscheidungshilfe**, um abhängig vom Sachverhalt das geeignete Analysewerkzeug zu wählen.

Tab. 1: Checkliste Stadtklimatische Analysewerkzeuge.

Fragestellung	Geeignetes Werkzeug
<i>Aktuelle Stadtklimatische Situation</i>	
Es werden meteorologische Informationen zu einzelnen Standorten im Stadtgebiet benötigt.	→ Stationäre Messungen (s. 4.2)
Es werden meteorologische Informationen zu mehreren Standorten im Stadtgebiet benötigt.	→ Städtisches Messnetz, mobile Messfahrten (s. 4.2)
Das Verhalten von Kaltluftabflüssen an einem Standort soll untersucht werden.	→ Rauchgas- bzw. Tracer-Experimente (s. 4.2)
Die Ausgleichsfunktion von städtischen Flächen bei Hitzebelastung soll grob abgeschätzt werden.	→ Auf Landnutzungsdaten (s. 4.1) basierende Klimatopkarte (s. 5.1)
Im Stadtgebiet sollen Kaltluftproduktion, Fließwege und -geschwindigkeiten untersucht werden. Daten zur Lufttemperatur werden nicht benötigt.	→ Kaltluftabflussmodell (s. 4.3.1)
Flächendeckende Informationen über das gesamte Stadtgebiet zu Parametern wie Lufttemperatur, gefühlte Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit werden benötigt. Einflüsse einzelner Gebäude oder Bäume müssen dabei nicht berücksichtigt werden.	→ Mesoskaliges Stadtklimamodell (s. 4.3.2)
Stadtquartiere sollen möglichst detailliert abgebildet und der Effekt von einzelnen Gebäuden und kleinräumiger Vegetation soll berücksichtigt werden.	→ Mikroskaliges Stadtklimamodell (s. 4.3.3)
<i>Bewertung von Planungsvorhaben/Anpassungsmaßnahmen</i>	
Der Einfluss konkreter Planungsvorhaben auf das Stadtklima soll untersucht werden. Das Planungsvorhaben ist großräumig (z. B. Anlegen eines großen Parks, Bebauung eines ganzen Häuserblocks oder Entsiegelung einer großen Parkplatzfläche). a. Dabei sind nur die Auswirkungen auf Kaltluftproduktion und -abflüsse von Interesse. b. Es soll ebenfalls ermittelt werden, wie sich dadurch z. B. Lufttemperatur und gefühlte Temperatur verändern.	→ Kaltluftabflussmodell (s. 4.3.1) → Mesoskaliges Stadtklimamodell (s. 4.3.2)
Das Planungsvorhaben ist kleinräumig (z. B. Errichtung einzelner Gebäude, Anlegen von Straßenbegleitgrün).	→ Mikroskaliges Stadtklimamodell (s. 4.3.3)
Es wird eine erste Einschätzung typischer Anpassungsmaßnahmen (grün-blaue Infrastruktur) in vereinfachten Siedlungstypen benötigt.	→ INKAS, Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern (s. 4.3.4)
Der Effekt möglicher konkreter Anpassungsmaßnahmen (z. B. Dach- und Fassadenbegrünung, Anlegen kleiner Parks oder Gewässerflächen) soll untersucht werden.	→ Mikroskaliges Stadtklimamodell (s. 4.3.3)

Die Checkliste beinhaltet sowohl Werkzeuge, die Kommunen selbst anwenden können als auch Methoden, die eine Hinzuziehung externer Expertise erfordern. Bei begrenzten personellen, finanziellen und zeitlichen Ressourcen kann bereits eine rein auf Landnutzungsdaten basierende Klimatopanalyse (siehe Kapitel 5.1) eine wichtige Grundlage für die Planung sein. Um darüber hinaus dynamische Prozesse zu berücksichtigen, kann diese Analyse durch kostengünstige Methoden ergänzt werden, wie beispielsweise mobile Messfahrten an wenigen ausgewählten Tagen, oder eine grobe Einschätzung der Kaltluftströmungen basierend auf Topographie und lokaler Expertise. Flächendeckende Erkenntnisse zu dynamischen Prozessen in der Stadtatmosphäre können jedoch nur durch Modellierung des Stadtgebietes und des angrenzenden Umlandes gewonnen werden.

3 Das Klima im besiedelten Bereich – typische Merkmale

Städte zeichnen sich durch dichte Bebauung, hohe Versiegelung sowie begrenzte Grün- oder Freiflächen aus. Diese Besonderheiten urbaner Siedlungen beeinflussen wichtige meteorologische Parameter wie Strahlung, Temperatur, Feuchtigkeit und Wind. Die Veränderungen der klimatischen und lufthygienischen Bedingungen in einer Stadt im Vergleich zum unbebauten Umland werden als **Stadtklima** bezeichnet [2].

Zu den wichtigsten **Eigenschaften des städtischen Klimas** gehören höhere Luft- und Oberflächentemperaturen, eine veränderte Strahlungsbilanz, niedrigere Luftfeuchtigkeit, geringere Windgeschwindigkeiten und die erhöhte Konzentration von Luftverunreinigungen [3]. Diese Unterschiede sind größtenteils auf die Veränderung des natürlichen Geländes durch neue Flächennutzungen und künstliche Strukturen sowie auf neue städtische Quellen und Senken für Wärme und Wasserdampf zurückzuführen. Gebäude, gepflasterte Straßen und Parkplätze verändern die Windströmung, den Wasserabfluss und die Energiebilanz.

Das wohl bekannteste stadtklimatische Phänomen in diesem Zusammenhang ist die Ausprägung der sogenannten **städtischen Wärmeinsel** (siehe Abb. 1): Städte weisen höhere Temperaturen auf als ihre ländliche, unbebaute Umgebung [3]. Dunkle Asphaltflächen und Gebäude heizen sich tagsüber stärker auf und geben die Wärme nachts wieder ab. In Verbindung mit niedrigen Windgeschwindigkeiten und einem geringen Luftaustausch mit dem kühleren Umland können sich so Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland von bis zu 8 °C ergeben [3]. Die intensivste Ausprägung städtischer Wärmeinseln tritt dabei in windschwachen Sommernächten auf, da keine Kaltluft in die Stadt transportiert wird und der Luftaustausch innerhalb der Stadt eingeschränkt ist. Insbesondere Risikogruppen, wie Säuglinge, Kleinkinder, ältere Menschen und chronisch Kranke, kann die städtische Überhitzung und erhöhte Luftverschmutzung gesundheitlich stark belasten [4].

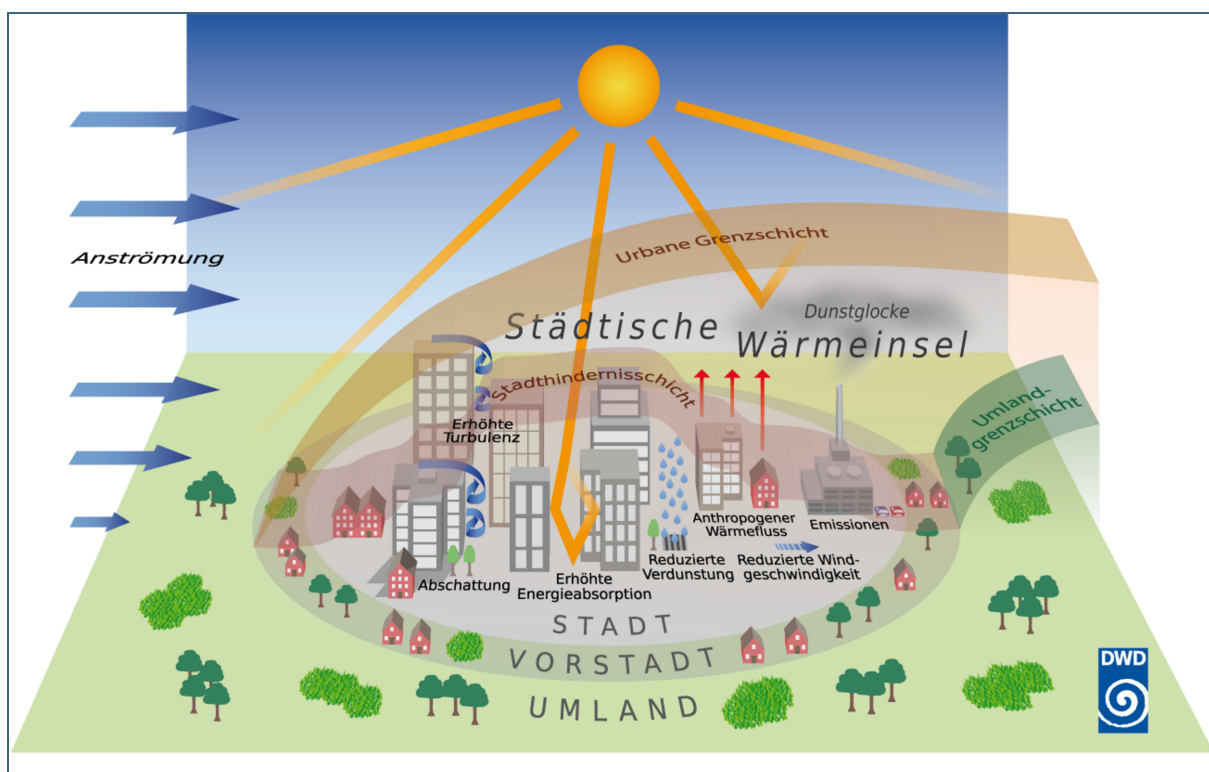


Abb. 1: Die städtische Wärmeinsel wird beeinflusst durch eine höhere Versiegelung, anthropogene Wärmeemissionen sowie verminderten Luftaustausch aufgrund zu dichter Bebauung.

Wie stark sich die Stadt im Vergleich zum Umland aufheizt, kann durch **Klimaanpassung** beeinflusst werden. Die Intensität der Wärmeinsel hängt nicht nur von Stadtgröße, regionalen Wettermustern und lokaler Geographie, wie Nähe zu Gewässern und Topographie, ab. Ebenso haben Besiedlungsdichte, Bebauungsstruktur, z. B. Gebäudehöhe oder verwendete Materialien, sowie der Anteil blauer und grüner Infrastruktur einen Einfluss auf die städtische Überhitzung [3]. Indem Kommunen Kaltluftschneisen erhalten und schaffen, Flächen entsiegeln und Grün- und Wasserflächen sowie Fassaden- und Dachbegrünung schaffen, stärken sie ihre Klimaresilienz.

4 Methoden der Stadtklimaanalyse – so gelangt man zu aussagekräftigen Daten

Um Aussagen über das städtische Klima treffen zu können, stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Einen ersten Anhaltspunkt für die lokalklimatischen Bedingungen bieten Landnutzungsdaten. Messungen vor Ort liefern meteorologische Daten zu ausgewählten Standorten; Fernerkundungsdaten erlauben die Betrachtung ganzer Städte, allerdings in geringerer räumlicher und zeitlicher Auflösung. Im Gegensatz zu punktförmigen Messungen können numerische Modellierungen das Stadtgebiet und dessen Umland umfassen und relevante physikalische Prozesse, wie Kaltluftproduktion und -abfluss, abbilden.

4.1 Landnutzungsdaten

Die **urbane Landnutzung** ist ein bestimmender Faktor des städtischen Klimas. Flächennutzung, Bebauungsdichte, Versiegelungsgrad, Oberflächenstruktur und Vegetationsart und -struktur wirken sich klimatisch aus [5]. Stadtnahe Wälder beispielsweise filtern nicht nur Schadstoffe und speichern Kohlenstoffdioxid, sie haben auch ausgleichende Wirkungen auf das Stadtklima: dank schattenspendender Baumkronen und erhöhter Verdunstung ist der Wald insbesondere an heißen Sommertagen kühler als das Umland. Ausgleichsströmungen transportieren diese Luft in die Stadt und sorgen für Abkühlung. Das **Antliche Liegenschaftskataster-Informationssystem** (ALKIS) der Bayerischen Vermessungsverwaltung beinhaltet flächendeckende und überschneidungsfreie Daten zur tatsächlichen Nutzung gemäß ALKIS-Objektartenkatalog im Erfassungsmaßstab 1:1.000 (→ [Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung \(bayern.de\)](https://www.landesamt.bayern.de/)). Dabei wird zwischen den Objektartengruppen Siedlung, Verkehr, Vegetation und Gewässer unterschieden, denen wiederum verschiedene Objektarten zugeordnet werden, wie z. B. Wohnbaufläche, Sport-/Freizeit-/Erholungsfläche, Wald und Fließgewässer. Auf dieser Grundlage können die Landnutzungsstrukturen identifiziert und im Rahmen der Klimatopkarte (siehe Kapitel 5.1) in ihrer stadtklimatischen Funktion bewertet werden. Objektarten wie Sport-/Freizeit-/Erholungsfläche lassen jedoch leider keine Rückschlüsse zu, ob es sich bei der betrachteten Fläche um einen versiegelten Sportplatz oder eine begrünte Parkanlage handelt.

Für größere urbane Agglomerationen (Großraum um Städte mit mehr als 50.000 Einwohnenden) bietet der **Urban Atlas** von Copernicus verlässliche, europaweit vergleichbare, hochaufgelöste Daten über Landnutzung und Bodenbedeckung (→ [Copernicus Urban Atlas \(copernicus.eu\)](https://data.copernicus.eu/)). Der aktuellste Datensatz von 2018 hat eine Auflösung von 0,25 ha und ist online kostenfrei verfügbar. Die Ausweisung der Landnutzung basiert auf einer Kombination aus statistischer Bildklassifikation und visueller Interpretation sehr hoch aufgelöster Satellitendaten. Die urbane Nutzungsklassifikation umfasst 17 Klassen, von dichter städtischer Bebauung bis zu urbanen Grünflächen.

4.2 Messungen: In-situ und Fernerkundung

Meteorologische Messgrößen, wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Windrichtung können durch *in-situ* Verfahren, das heißt unmittelbar vor Ort, sowie Fernerkundung erfasst werden. Vor-Ort-Messungen liefern dabei standortspezifische Messwerte in bis zu minutlicher Auflösung. Die satellitengestützte Fernerkundung operiert auf größeren Raum- und Zeitskalen.

Existierende **stationäre Messsysteme** des Deutschen Wetterdienstes (DWD) oder des bayerischen Lufthygienischen Landesüberwachungssystems (LÜB) wurden nicht für stadtklimatologische Fragestellungen konzipiert. Um die Besonderheiten des städtischen Klimas abzubilden, baut der DWD deshalb ein eigenes Netzwerk von Stadtklimastationen auf, das für ausgewählte Großstädte jeweils aus einer Innenstadt- und der zugehörigen Umlandstation besteht (→ [DWD Stadtklimastationen \(dwd.de\)](https://www.dwd.de/)).

Diese Stationspaare ermöglichen den direkten Vergleich zwischen Stadt und Umland, z. B. zur Berechnung der städtischen Wärmeinsel als Temperaturdifferenz zwischen Innenstadt und nicht bebauter Umgebung. Das Stationsnetzwerk soll um weitere Städte ergänzt werden; bis jetzt umfasst es sieben Standorte in Deutschland, darunter mit München auch einen bayerischen Standort.

Für stadtklimatische Fragestellungen ist allerdings nicht nur die Differenz zwischen Innenstadt und Umland interessant. Ebenso relevant ist die Erfassung lokaler Unterschiede innerhalb der Stadt: Eine Grünfläche weist andere meteorologische Eigenschaften auf als ein dicht bebautes und stark versiegeltes Innenstadtquartier. Zur Untersuchung dieser kleinskaligen Differenzen eignen sich **städtische Messnetze** mit mehreren Stationen an unterschiedlichen klimatischen Standorten, wie sie beispielsweise in Augsburg (Universität Augsburg [6]), Bayreuth (→ [MiSKOR-Projekt, Universität Bayreuth \(uni-bayreuth.de\)](https://www.uni-bayreuth.de)), finanziert im Rahmen des [Verbundprojektes „Klimawandel und Gesundheit“ \(VKG\) \(vkg.bayern.de\)](https://www.vkg.bayern.de) und Würzburg (→ [Projekt Klimaerlebnis Würzburg, Universität Würzburg und TU München \(tum.de\)](https://www.klimaerlebnis-wuerzburg.de)), ein Teilprojekt des [Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung \(ZSK\) \(tum.de\)](https://www.zentrum-stadtnatur.de)) betrieben werden. Der Aufbau und die Pflege eines solchen Messnetzes sind zwar aufwendig, es liefert jedoch Erkenntnisse, die ein einzelnes Stationspaar nicht erbringen kann. Darüber hinaus können damit Anpassungsmaßnahmen direkt messtechnisch erfasst und bewertet werden. Wird beispielsweise blaue und grüne Infrastruktur an einem hitzebelasteten Messstandort geschaffen, so lässt sich der Erfolg der Maßnahme durch einen Vorher-Nachher-Vergleich der Messwerte evaluieren.

Eine weniger aufwendige Möglichkeit, das Lokalklima innerhalb einer Stadt zu erfassen, sind **mobile Messfahrten**. Die Messinstrumente werden dazu auf einem Kraftfahrzeug oder Fahrrad angebracht, das eine festgelegte Route mehrmals abfährt. Um thermisch besonders belastende Situationen zu erfassen, können die Fahrten an windschwachen Sommertagen oder -nächten durchgeführt werden. Solche Messfahrten nutzte beispielsweise die Stadt Bayreuth für ihre Stadtklimaanalyse (→ [Stadt-klimaanalyse Bayreuth \(bayreuth.de\)](https://www.stadtklimaanalyse-bayreuth.de)).

Wenn man jedoch eine direkte Auskunft der Kaltluftverteilung an einzelnen Standorten benötigt, sind **Rauchgas- bzw. Tracer-Experimente** das Mittel der Wahl. Sie bilden solche Phänomene messtechnisch ab. Das Verfolgen eines Tracers, in der Regel farbiger Rauch, ermöglicht es, Kaltluftströmungen zu visualisieren (siehe Abb. 2). Der Rauch mischt sich mit der kalten Luft und wird mit dieser transportiert. Das Verhalten der Strömung kann fotografisch festgehalten und ausgewertet werden (→ [Stadt-klimaanalyse Bayreuth \(bayreuth.de\)](https://www.stadtklimaanalyse-bayreuth.de)). Für eine stadtumfassende Analyse der Kaltluftströmungen ist die numerische Modellierung ein geeigneteres Instrument (siehe Kapitel 4.3).



Abb. 2: Rauchgasexperimente geben Aufschluss über die Kaltluftströmung am Messort.

Die vorgestellten Methoden der in-situ Messungen besitzen zwar eine hohe zeitliche Auflösung und große Messgenauigkeit, sie liefern jedoch nur Werte für einzelne Standorte. Flächenhafte Informationen können mit Hilfe satellitenbasierter **Fernerkundung** erfasst werden. Aus Fernerkundungsdaten lassen sich beispielsweise Wolkenbedeckung, Konzentration von atmosphärischen Spurengasen, Landnutzung (siehe Kapitel 4.1) und Landoberflächentemperaturen ableiten [7]. Flächendeckende

Oberflächentemperaturen können das heterogene Mikroklima innerhalb einer Stadt sichtbar machen und so beispielsweise Hotspots der Überhitzung identifizieren (Kostenfrei verfügbar → [Copernicus Landoberflächentemperaturen \(copernicus.de\)](https://www.copernicus.de/land-surface-temperature) in ca. 5 km Auflösung, → [Landsat Landoberflächentemperaturen \(usgs.gov\)](https://www.usgs.gov/land-cover/land-surface-temperature) in 120 Meter Auflösung).

Messmethoden in der Praxis – Stadtklimamessungen in bayerischen Städten

- **Städtische Messnetze** mit mehreren Stationen an unterschiedlichen klimatischen Standorten:
 - Augsburg → Universität Augsburg [6]
 - Bayreuth → [MiSKOR-Projekt, Universität Bayreuth \(uni-bayreuth.de\)](https://www.uni-bayreuth.de/miskor) finanziert im Rahmen des [Verbundprojektes „Klimawandel und Gesundheit“ \(VKG\) \(vkg.bayern.de\)](https://www.vkg.bayern.de)
 - Würzburg → [Projekt Klimaerlebnis Würzburg, Universität Würzburg und TU München \(tum.de\)](https://www.klimaerlebnis.uni-wuerzburg.de), ein Teilprojekt des [Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung \(ZSK\) \(tum.de\)](https://www.zentrum-stadtnatur.de)
- **Mobile Messfahrten** durch verschiedene Stadtquartiere:
 - Bayreuth → [Stadtklimaanalyse Bayreuth \(bayreuth.de\)](https://www.stadtklimaanalyse-bayreuth.de)
- **Tracer-Experimente** zur Visualisierung von Kaltluftflüssen:
 - Bayreuth → [Stadtklimaanalyse Bayreuth \(bayreuth.de\)](https://www.stadtklimaanalyse-bayreuth.de)

4.3 Stadtklimamodellierung

Ergänzend zu den beschriebenen Untersuchungsmethoden können **Simulationen mit Stadtklimamodellen** durchgeführt werden, um entweder meteorologische Parameter und Prozesse im Ist-Zustand flächendeckend zu simulieren oder die Auswirkung von Planungsvorhaben zu analysieren. Landnutzungsdaten und meteorologische Messungen stellen dabei eine essentielle Grundlage für die Modellierung des Stadtklimas dar.

Klimamodelle sind eine mathematische Darstellung des Klimasystems, die auf physikalischen, biologischen und chemischen Prinzipien, wie Masse- und Energieerhaltung, beruhen. Je nach Komplexität des Modells werden einzelne Prozesse betrachtet (siehe Kapitel 4.3.1 Kaltluftmodellierung) oder die Wechselwirkungen zwischen den physikalischen und biogeochemischen Vorgängen berücksichtigt. Darüber hinaus unterscheiden sich Stadtklimamodelle hinsichtlich ihrer Auflösung. Mesoskalige Modelle (siehe Kapitel 4.3.2) haben eine räumliche Auflösung zwischen einigen Dekametern und mehreren Kilometern, mikroskalige Modelle (siehe Kapitel 4.3.3) bis zu etwa einem Meter. Die Auflösung bestimmt, ob einzelne Prozesse – z. B. Auswirkungen einzelner Gebäude, Bäume oder kleinräumiger Vegetation – direkt oder indirekt über Parametrisierungen in das Modell integriert werden.

4.3.1 Kaltluftmodellierung

Dicht besiedelte Räume heizen sich aufgrund des hohen Versiegelungsgrades und der zusätzlichen Abwärme der Gebäude stärker auf als das weniger dicht besiedelte Umland (siehe Kapitel 3 → Städtische Wärmeinsel). Tal- oder Kessellagen können diesen Effekt noch verstärken. Insbesondere bei sommerlichen wolkenarmen und windschwachen Wetterlagen kommt es so zu einer Überhitzung von Siedlungsräumen, die jedoch durch **regionale Kaltluftströmungen** gelindert werden kann. Nach Sonnenuntergang kühlen die Grün- und Freiflächen im Umland schneller ab als die städtischen Gebiete und werden so zu lokalen Kaltluftproduzenten. Die sich hier bildende kalte Luft wird über regionale Ausgleichsströmungen in die überhitzten Siedlungsgebiete befördert und kann dort für Abkühlung sorgen. Diese lindernde Wirkung tritt jedoch nur ein, wenn die Luft ungehindert in die hitzebelasteten Räume strömen kann und auf ihrem Weg nicht durch Gebäude oder Infrastruktur ausgebremst wird.

Zur Ermittlung relevanter Kaltluftproduktionsflächen und Transportschneisen können vereinfachte physikalische **Kaltluftabflussmodelle** zu Rate gezogen werden. Die vereinfachte Modellphysik erlaubt

große, hoch aufgelöste Modellgebiete bei geringem Rechenaufwand sowie eine simplere Modellhandhabung. Mit reinen Kaltluftabflussmodellen ist jedoch keine Simulation der Temperatur oder der zeitlichen Änderungen der Kältebildung möglich. Die Modelle sind dennoch hervorragend geeignet, um stadtrelevante Kaltluftentstehungsgebiete, nächtliche thermische Windsysteme sowie die Auswirkungen von Planungsvorhaben auf das Kaltluftprozessgeschehen zu untersuchen.

Das Kaltluftabflussmodell des Deutschen Wetterdienstes **KLAM_21** simuliert die Entwicklung von Kaltluftflüssen und die Ansammlung von Kaltluft in hügeligem Gelände [8]. Typische Modellgitterweiten sind 20 bis 50 Meter. KLAM_21 ermöglicht somit die kleinräumige Untersuchung von Kaltluftprozessen. Dazu gibt man dem Modell die Landnutzung vor, woraus sich die Kälteproduktion errechnet.

KLAM_21 simuliert die nächtliche Durchlüftung in autochthonen Wetterlagen¹, unter denen es in Städten zu einer besonders ausgeprägten Überhitzung kommen kann (siehe Kapitel 1). Benötigt werden dazu neben Informationen zur Lage des Modellgebietes und der gewünschten Gitterauflösung (üblicherweise 20 bis 50 Meter), **Raster-Eingabedateien** für orographische Höhe sowie Flächennutzung. Im Ergebnis erhält man dann die Kaltluftschichthöhe, ihre mittlere Fließgeschwindigkeit sowie den Kaltluftvolumenstrom innerhalb des Modellgebietes (siehe Abb. 3).

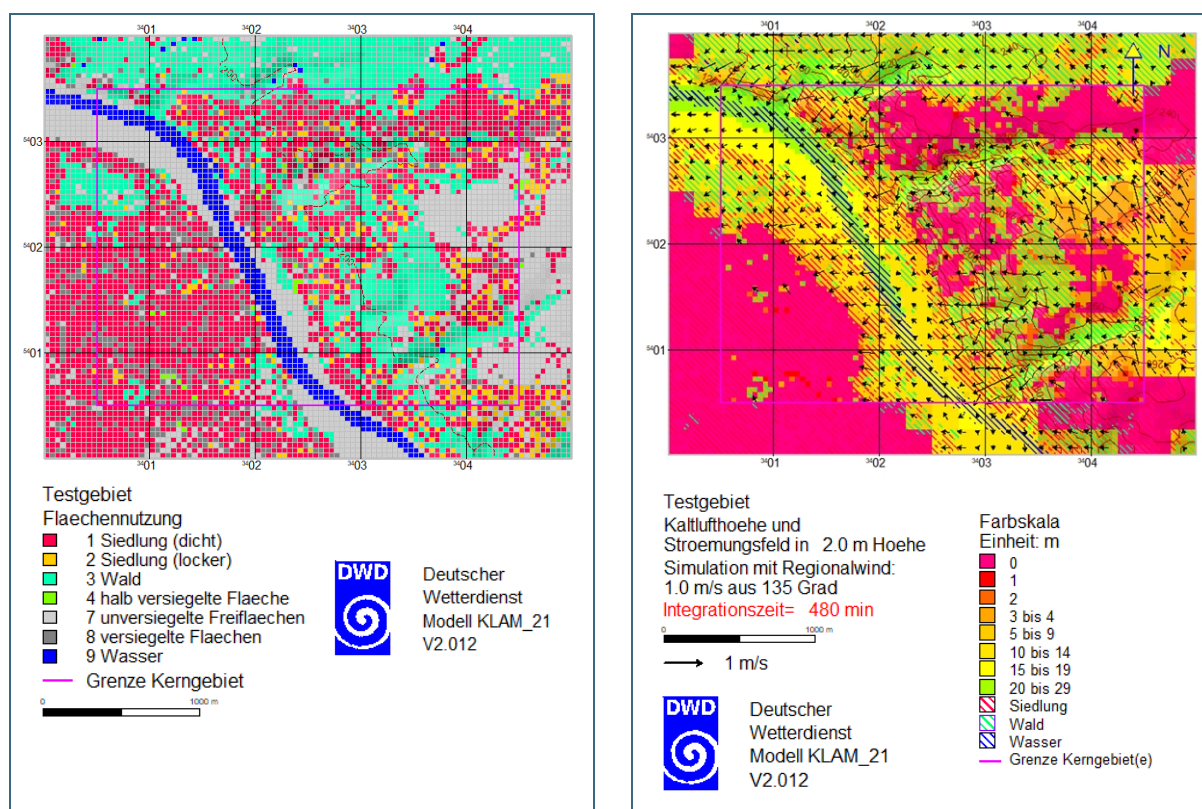


Abb. 3: Idealisertes Testgebiet (links) mit Flusslauf, besiedeltem Tal und teilweise besiedelter, teilweise bewaldeter Anhöhe. Modellsimulation (rechts) über idealisiertem Testgebiet mit Kaltluftschichthöhe (Farbskala) und Wind in 2 m Höhe (Pfeile). Grafiken erzeugt mit KLAM_21 V2.012 des DWD.

Der DWD gibt das Modell entgeltfrei ab, wenn es ausschließlich für nicht-kommerzielle Anwendungen eingesetzt wird (z. B. Verwaltungsaufgaben von Landkreisen und Kommunen). Weitere Informationen sowie Kontaktdaten finden sich auf der [Website des DWD](#). Die Nutzung des Modells ist gut dokumentiert und erfolgt über eine graphische Bedienoberfläche. Für die Bedienung sind dementsprechend

¹ Autochthone Wetterlagen sind durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden Höhenwind gekennzeichnet.

keine Programmierkenntnisse erforderlich. Die Raster-Eingabedateien müssen jedoch im geeigneten Format vorliegen. Kommunen, die über diese Expertise in der Arbeit mit Geodaten verfügen, können das Modell nach einer kurzen Einarbeitung selbstständig nutzen.

4.3.1.1 Praxisbeispiel Kaltluftmodellierung: KLAM_21 in bayerischen Städten

Beispiel: Stadtklimaanalyse Kempten (Allgäu)

Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 wurde in der Stadtklimaanalyse der Stadt Kempten im Allgäu verwendet, um Kaltluftentstehung und Kaltlufttransport während einer austauscharmen Strahlungsnacht zu berechnen. Aus der Karte zum lokalen Kaltluftgeschehen wurden im Anschluss zusammen mit weiteren Themenkarten (Topographie, Landnutzung, Gebäudevolumendichte, etc.) eine Klimafunktionskarte (siehe Kapitel 5.2) sowie eine Planungshinweiskarte (siehe Kapitel 5.3) für die Stadt Kempten abgeleitet.

Auf Grundlage der Eingangsdaten zu Landnutzung, Bebauungsstruktur und Topographie simuliert KLAM_21 die Kaltluftschichtdicke sowie das bodennahe Windfeld (2 Meter über Grund). Da sich Kaltluftabflüsse nachts, insbesondere bei wolkenlosen Hochdruckwetterlagen entwickeln, wurde die Kaltluftproduktion für eine austauscharme Strahlungsnacht berechnet. Acht Stunden nach Sonnenuntergang ist die topographisch bedingte Kaltluftverteilung im Talraum deutlich ausgeprägt (siehe Abb. 4). Der Kaltluftabfluss wirkt radial auf das Stadtgebiet und kann dort besonders gut in den städtischen Raum vordringen, wo die Bebauung weniger dicht ist oder die bauliche Anordnung der Gebäude eine Kanalisierung begünstigt [9].

- Weitere Informationen zum Vorgehen: [Stadtklimaanalyse Kempten \(Allgäu\)](#) [9]
- Kontakt: Stadt Kempten (Allgäu), Rathausplatz 22, 87435 Kempten (Allgäu). E-Mail: poststelle@kempten.de, Telefon: 0831 115.

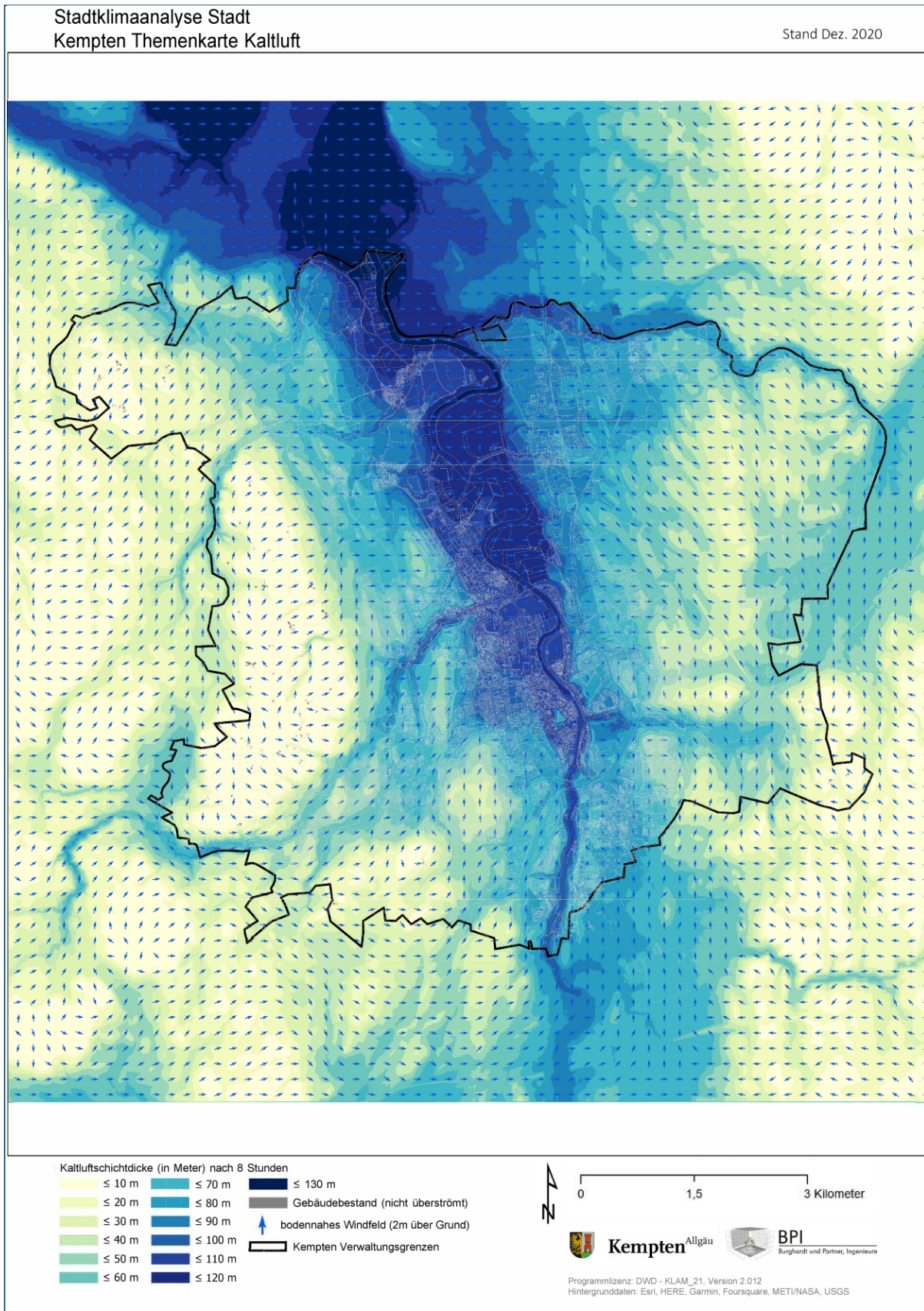


Abb. 4: Darstellung der Kaltluftschichtdicken sowie des vorherrschenden bodennahen Windfeldes (2 m ü. G.) für den Verwaltungsbereich der Stadt Kempten in einer austauscharmen Strahlungswetternacht, acht Stunden nach Sonnenuntergang. Grafik erzeugt mit Kaltluftabflussmodell KLAM_21.

4.3.2 Mesoskalige Modellierung

Mesoskalige Modelle haben eine **räumliche Auflösung** von einigen Dekametern bis zu mehreren Kilometern. Wie Wettervorhersage- und Klimamodelle beruhen sie auf einem Satz von Bilanz- und Erhaltungsgleichungen (Impulserhaltung, Massenerhaltung, Energieerhaltung). Es gibt mittlerweile eine Vielzahl mesoskaliger Stadtklimamodelle, die konfiguriert wurden, um physikalische Phänomene auf Stadtebene darzustellen. Die größten Unterschiede zwischen den Modellen liegen in der Komplexität der Anfangs- und Randbedingungen sowie den gewählten Parametrisierungen [10].

Prozesse, die kleiner als die Modellgitterweite sind, müssen **parametrisiert** werden [11]. Sie können nicht direkt im Modell abgebildet und ihre zugrundeliegenden physikalischen oder biogeochemischen Gleichungen nicht auf Gitterebene gelöst werden, sondern müssen durch andere Parameter ausgedrückt werden. Gebäude und andere Hindernisse beeinflussen beispielsweise das lokale Windfeld, erzeugen Turbulenzen und lenken Strömungen um. Die übliche Auflösung von einigen Dekametern erlaubt jedoch nicht, die Wirkung einzelner Gebäude zu simulieren. Stattdessen wird der Einfluss der Stadtbebauung auf Ebene einer Gitterzelle aggregiert und dessen bremsende Wirkung z. B. durch einen sogenannten „Porositätsansatz“ parametrisiert: Je dichter und höher die Bebauung in der Gitterzelle, desto geringer die Durchlässigkeit bzw. Porosität. Weitere subskalige Prozesse sind beispielsweise der Einfluss von Gebäuden auf die Energiebilanz durch Speicherung und Abgabe von Wärme oder der Beitrag von Stadtverkehr zur Wolkenmikrophysik. Ob und wie solche und weitere Prozesse parametrisiert werden, hängt von dem mesoskaligen Modell ab.

Wie bereits erwähnt, existiert eine **Vielzahl mesoskaliger Modelle**. Eine Auflistung gängiger Modelle findet sich in Groß [10] und unter http://www.stadtklima.de/EN/E_1tools.htm. Für einige Modelle gibt es eine nutzungsfreundliche, anwendungsbezogene Version, die kostenfrei angefragt werden kann (z. B. [METRAS-PCL](#)). Die Nutzung eines solchen Modells ist jedoch nicht ohne Programmiererfahrung möglich. METRAS-PCL verfügt über keine graphische Bedienoberfläche. Eingabeparameter und Modellkonfiguration müssen im FORTRAN Programmcode festgelegt werden. In der mesoskaligen Modellierung greifen Kommunen daher auf Planungs- oder Ingenieurbüros zurück, die über jahrelange Erfahrung in der Modellentwicklung und Anwendung verfügen. Häufig nutzen Ingenieurbüros weiterentwickelte oder eigene mesoskalige Modelle, wie beispielsweise [FITNAH-3D](#). Auf FITNAH beruht die bayernweite Schutzgutkarte Klima/Luft [12] sowie die Stadtklimaanalyse Nürnberg (s. u.).

Der **Einfluss des Klimawandels** auf das Stadtklima kann in der meso- und mikroskaligen Modellierung auf unterschiedliche Weise berücksichtigt werden. Vereinfachend können beispielsweise durch den Delta-Change-Ansatz zukünftige Klimaänderungen einbezogen werden. In diesem Verfahren wird eine einheitliche Temperaturerhöhung (Delta) auf das Anfangsfeld der Lufttemperatur addiert. Ein solcher Ansatz wurde im Rahmen des Projektes Landesweite Schutzgutkarte Klima/Luft gewählt (s. u.). In der stadtklimatischen Untersuchung München wurden zukünftige Änderungen mit Hilfe von statistischer Interpolation berücksichtigt (siehe Kapitel 4.3.3). Aufwendiger ist das Nesting des Stadtklimamodells in ein Regionalklimamodell. Dabei wird das meso- oder mikroskalige Modellgebiet in das größere, vom Regionalklimamodell vorgegebene Gebiet eingebettet und die benötigten Modellparameter an den Rändern vom regionalen Klimamodell an das Stadtklimamodell übergeben. Dieses Verfahren ist sehr rechen- und zeitintensiv. Daher sollte geprüft werden, ob zur Berücksichtigung zukünftiger Klimaänderungen auf andere Methoden zurückgegriffen werden kann. Grundsätzlich wird erwartet, dass der Klimawandel urbane Hitzebelastung und Extremwetterereignisse weiter verschärft und Wärmeinseleffekte auch in Städten und Quartieren auftreten, die derzeit noch nicht belastet sind [13].

4.3.2.1 Praxisbeispiele mesoskalige Modellierung: Regional- und Stadtklimauntersuchungen in Bayern

Beispiel: Landesweite Schutzgutkarte Klima/Luft der Landschaftsrahmenplanung

Die Hitzebelastung durch erhöhte Temperaturen und verringerten Luftaustausch kann negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben. Die landesweiten Schutzgutkarten zeigen erstmals für den gesamten Freistaat in hoher Auflösung die thermische Belastung in besiedelten Gebieten (sogenannte Wirkräume) sowie die Entlastungsfunktion von Kaltluft produzierenden Grün- und Freiflächen (sogenannte Ausgleichsräume) auf. Sie liefern Anhaltspunkte, wo die Überhitzung von besiedelten Strukturen derzeit durch regionale Ausgleichsströmungen von kalter Luft verringert wird und wo relevante Kaltluftschneisen verlaufen, die im Zuge des Klimawandels weiter an Bedeutung gewinnen werden. Darüber hinaus weisen die Karten regional Gebiete aus, in denen es durch ungünstige Belüftung zu einer Einschränkung der Luftqualität kommen kann. Die landesweiten Karten bieten damit insbesondere kleineren Städten und Kommunen, die nicht über eine eigene Stadtklimaanalyse verfügen, eine erste Einschätzung der Überhitzungspotenziale sowie relevanter Kaltluftprozesse auf regionaler Ebene. Für kleinräumigere Aussagen innerhalb des Stadtgebietes oder zu einzelnen Quartieren sind die Schutzgutkarten aufgrund der gewählten Modellauflösung jedoch nicht geeignet. Eigene Stadtklimaanalysen empfehlen sich insbesondere für Kommunen, in denen in der landesweiten Karte Wirkräume mit einer ungünstigen humanbioklimatischen Situation bereits in der Bestandssituation ermittelt wurden und/oder für deren Gebiet Ausgleichsräume mit einer erhöhten bis sehr hohen Bedeutung identifiziert wurden.

Die landesweiten Schutzgutkarten basieren auf Modellierungen mit dem mesoskaligen Modell FITNAH-3D. Modellanwendungen benötigen meteorologische Rand- und Startbedingungen sowie spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebietes sind. Im Falle von FITNAH-3D umfassen die Rand- und Startbedingungen die zugrundeliegende Wetterlage, die Abhängigkeit der Temperatur von der Höhe (Höhengradient) sowie die Vorgabe typischer Luft- und Gewässertemperaturen bei Simulationsbeginn. Die Simulation wurde für den Fall einer besonders ausgeprägten thermischen Belastung, d. h. einer windschwachen sommerlichen Strahlungsnacht, durchgeführt. Als Eingangsdaten flossen überdies Rasterdaten zu Gelände und Orographie, Landnutzung, Versiegelungsgrad sowie Strukturhöhe in das Modell ein.

Neben der Bestandssituation wurden zukünftige Klimaentwicklungen basierend auf zwei Szenarien (Ensembleminimum RCP4.5, Ensemblemaximum RCP8.5) berücksichtigt. Als ausschlaggebende Größe wurde die langjährige mittlere Änderung der Sommertemperaturen in den Klimaprojektionen des Bayern-Ensembles betrachtet. Im Rahmen der Delta-Methode wurde die Differenz (das Delta) aus dem 30-jährigen Mittel der Sommertemperatur 1985–2015 und dem 30-jährigen Mittel der Sommertemperatur 2021–2050 gebildet und über den gesamten Freistaat gemittelt. Dabei ergab sich ein mittlerer Temperaturanstieg von 0,8 K unter dem Ensembleminimum von RCP4.5 und von 2,1 K unter dem Ensemblemaximum von RCP8.5 für den Zeitraum von 2021–2050 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1985–2015. Diese Mittelwerte wurden dann in einem zweiten Schritt in die Modellsimulation eingespeist: die mittlere Temperaturänderung wurde flächendeckend auf das Anfangsfeld der Lufttemperatur auf allen Höhenstufen addiert, sodass die Modellsimulationen für die Szenarien „schwacher“ sowie „starker Klimawandel“ mit +0,8 K sowie +2,1 K im Vergleich zur Simulation des Ist-Zustandes starten.

Die Modellergebnisse wurden in Form von Karten zu folgenden Parametern aufbereitet: nächtliche bodennahe Lufttemperatur, Physiologisch Äquivalente Temperatur² (PET) am Tage sowie Parameter des Kaltluftgeschehens (Kaltluftproduktionsrate, Kaltluftvolumenstrom, Vorwärtstrajektorien der Kaltluft, siehe Abb. 5) sowie zur Luftqualität. Auf Grundlage dieser meteorologischen Karten wurden dann eine landesweite Klimaanalysekarte (siehe Kapitel 5.2) sowie eine landesweite Planungshinweiskarte (siehe Kapitel 5.3) erstellt.

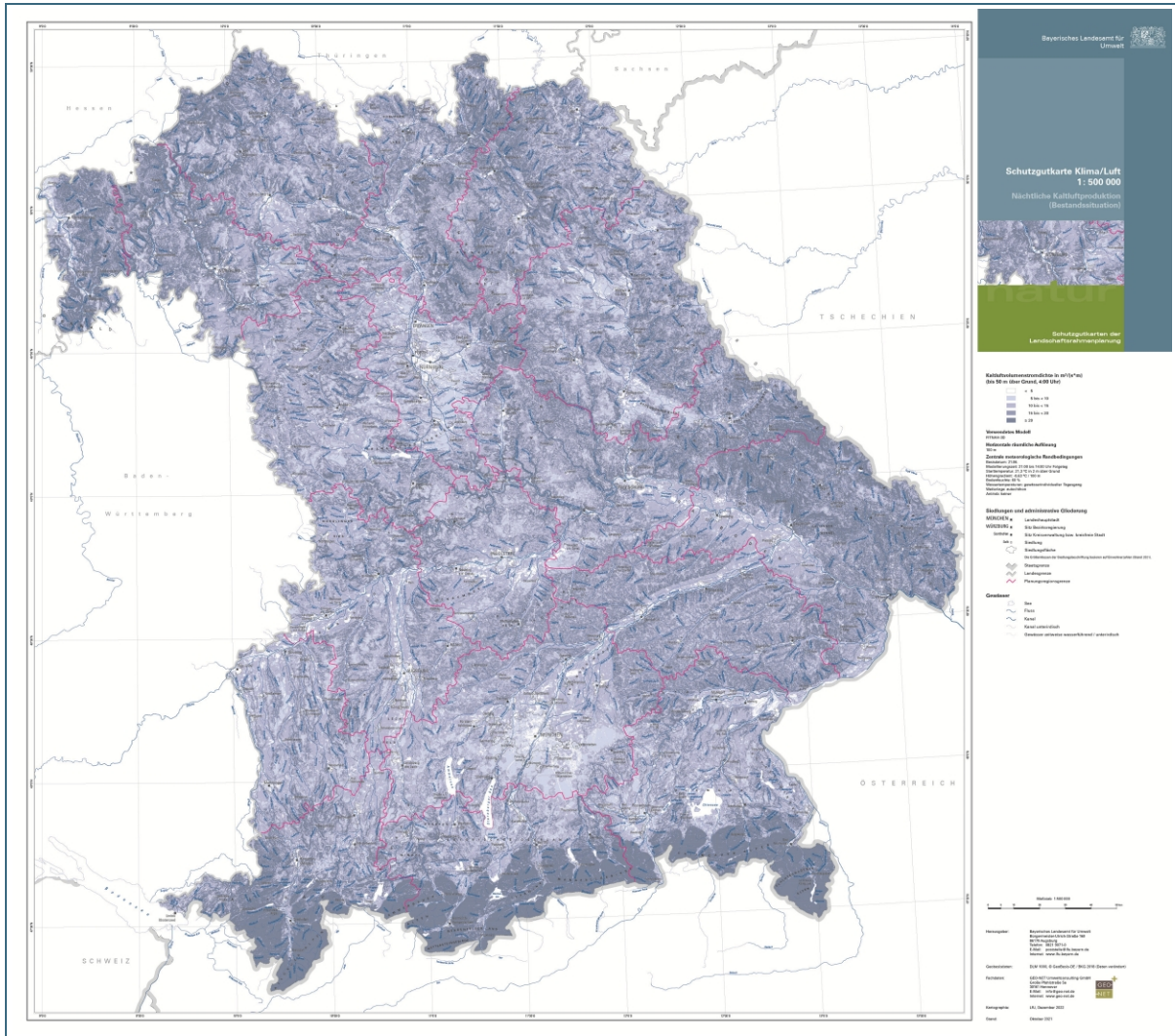


Abb. 5: Bayernkarte der bodennahen nächtlichen Kaltluftproduktion um 4 Uhr nachts in 2 m über Grund in einer windschwachen Strahlungsnacht.

- Weitere Informationen zum Vorgehen: [Schutzgutkarte Klima/Luft \(bayern.de\)](http://www.bayern.de) [12]
- Kontakt: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg. E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de, Telefon: 0821 9071-0.

² Die Physiologisch Äquivalente Temperatur entspricht der Lufttemperatur, die erforderlich ist, um in einem standardisierten Innenraum und bei einer standardisierten Person die Kern- und Hauttemperaturen zu reproduzieren, die unter den Bedingungen im Freien beobachtet werden. Auf diese Weise ermöglicht die PET einem Laien, die ganzheitlichen Auswirkungen komplexer thermischer Bedingungen im Freien mit seinen eigenen Erfahrungen in Innenräumen zu vergleichen.

Beispiel: Stadtklimagutachten Nürnberg

Das von der Stadt Nürnberg in Auftrag gegebene Stadtklimagutachten beruht ebenfalls auf Modellierungen mit FITNAH-3D. Die horizontale Maschenweite des Modellgitters beträgt 50 m. Durch den oben erwähnten Porositätsansatz werden Gebäude, die kleiner als die Gitterweite sind, indirekt im Modell abgebildet. Die Porosität einer Gitterzelle ergibt sich aus Bebauungsstruktur und -höhe sowie dem Baumbestand innerhalb der Zelle.

Wie bei den landesweiten Schutzgutkarten wurde das Modell mit Eingangsdaten zu Geländehöhe und Nutzungsstruktur gespeist. Da lokalklimatische Besonderheiten, insbesondere der städtische Wärmeineffekt, während windschwacher Hochdruckwetterlagen besonders stark ausgeprägt ist (siehe Kapitel 1), wurden die meteorologischen Rahmenbedingungen einer solchen Wetterlage entsprechend gewählt. Ergebnisse der Modellrechnung waren auch hier das bodennahe Lufttemperaturfeld sowie Parameter zum Kaltluftprozessgeschehen (Kaltluftproduktionsrate und Kaltluftentstehungsgebiete, das nächtliche Strömungsfeld sowie der Kaltluftvolumenstrom, siehe Abb. 6). Die so gewonnenen stadtklimatischen Erkenntnisse wurden zudem in Form einer Klimafunktionskarte (siehe Kapitel 5.2) sowie einer Planungshinweiskarte (siehe Kapitel 5.3) für die Stadtplanung qualitativ eingeordnet.

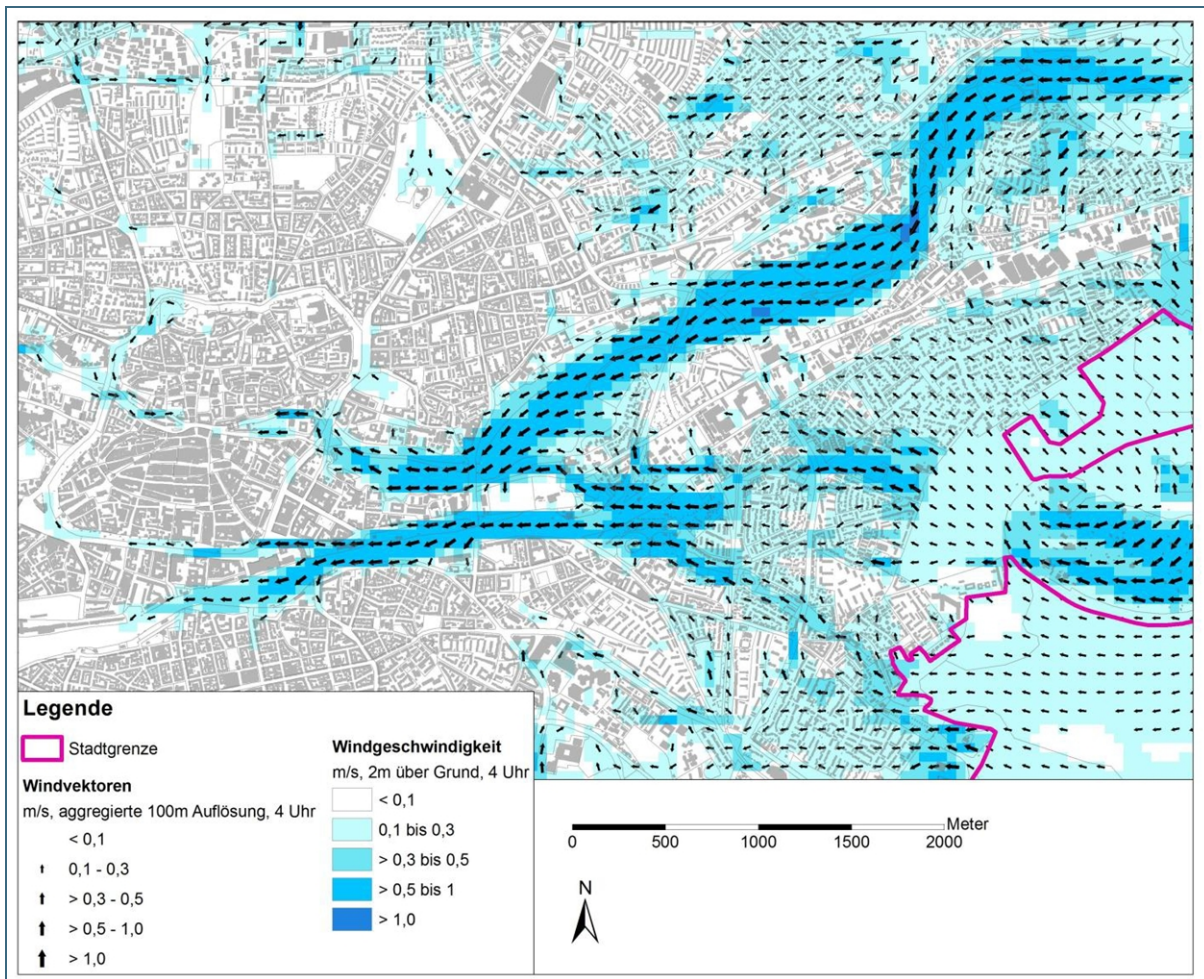


Abb. 6: Kaltluftströmungsfeld und Windgeschwindigkeit im Stadtgebiet Nürnberg-Mitte/-Ost in einer windschwachen, sommerlichen Strahlungsnacht. Karte erstellt durch GEO-NET Umweltconsulting GmbH.

- Weitere Informationen zum Vorgehen: [Stadtklimagutachten. Analyse der klimaökologischen Funktionen für das Stadtgebiet von Nürnberg](#) [14]
- Kontakt: Umweltamt der Stadt Nürnberg, Lina-Ammon Straße 28, 90471 Nürnberg. [Kontaktformular](#), Telefon: 0911 2313647.

4.3.3 Mikroskalige Modellierung

Mikroskalige Modelle operieren auf **räumlichen Skalen** zwischen wenigen Metern bis Kilometern. Dank dieser feinen Auflösung können mikroskalige Modelle im Gegensatz zu mesoskaligen Modellen kleinstskalige Prozesse abbilden. So können beispielsweise einzelne Gebäude oder schmales Begleitgrün dargestellt und deren Interaktion mit der städtischen Atmosphäre in das Modell integriert werden. Dies erhöht jedoch den Rechenaufwand mikroskaliger Modelle und macht sie damit zeit- und kostenintensiv.

Die **Wahl eines geeigneten Modells** (Meso- oder Mikroskala) hängt deshalb zentral von der Fragestellung ab: Interessieren mich einzelne Bauvorhaben in einem Quartier oder die Wirkung kleinräumiger Vegetation, so lässt sich dies am besten mit Hilfe eines mikroskaligen Stadtklimamodells untersuchen. Möchte ich einen Überblick über das Klima in der gesamten Stadt erhalten und muss aus Kosten- oder Zeitgründen auf die Rechenkapazität achten, so kann ich auch auf ein mesoskaliges Modell zurückgreifen (siehe auch Checkliste Stadtklimaanalyse).

Das mikroskalige Stadtklimamodell des Deutschen Wetterdienstes, [MUKLIMO 3](#) [15, 16], dient der Untersuchung stadtklimatologischer und geländeklimatologischer Fragestellungen. Mit einer typischen Auflösung zwischen wenigen Metern und mehreren hundert Metern können Klimaanalysen über das gesamte Stadtgebiet ebenso durchgeführt werden wie Untersuchungen zu Flächennutzungsänderungen auf kleineren Skalen. Als Eingangsdaten werden Informationen zur Landnutzung inkl. Geländehöhe, Eigenschaften der Bebauung (Gebäudegrundfläche, Gebäudehöhe, Gebäudeform) und Versiegelungsgrad benötigt. Darüber hinaus sind meteorologische Parameter wie Lufttemperatur, Bodenfeuchte, Gewässertemperatur und überlagerender Regionalwind zur Initialisierung des Modells nötig. Mit MUKLIMO_3 wurden nicht nur konkrete Fallstudien (z. B. München oder Aschaffenburg, s. u.) untersucht. Auf Simulationen einer virtuellen Stadt mit MUKLIMO_3 basiert das Informationsportal Klimaanpassung in Städten (INKAS). INKAS dient als Beratungswerkzeug für die Stadt- und Regionalplanung, um Maßnahmen zur Minderung der städtischen Überhitzung zu beurteilen (siehe Kapitel 4.3.4).

MUKLIMO_3 gibt es in zwei Versionen. Die [PC-Basisversion](#) läuft auf Windows-Rechnern und verfügt über eine grafische Bedienoberfläche. Sie ist geeignet für die Berechnung stationärer Wind- und Schadstofffelder, z. B. im Bereich von Bebauungsplänen. Zeitlich dynamische Veränderungen des Windfeldes werden nicht simuliert. Die Basisversion läuft unter der Annahme einer neutralen atmosphärischen Schichtung, dem Idealbild einer gut durchmischten Atmosphäre. Bei einer neutralen Schichtung wird der vertikale Luftaustausch weder behindert noch verstärkt. Strömungshindernisse wie Gebäude, Brücken oder Wände können direkt aufgelöst oder bei größeren Modellgebieten im Rahmen des bereits beschriebenen Porositätsansatzes berücksichtigt werden. Der DWD gibt die Lizenz für die Basisversion entgeltfrei, wenn das Modell ausschließlich für nicht-kommerzielle Anwendungen eingesetzt werden soll (z. B. Verwaltungsaufgaben bei Bund, Ländern und Kommunen). Ähnlich wie bei KLAM_21 (siehe Kapitel 4.3.1) werden Eingabedateien im geeigneten Format benötigt. Diese umfassen Daten zu Orographie, Bebauung, Strömungseigenschaften der Oberflächen sowie Belaubung von im Modellgebiet befindlichen Bäumen. Damit ist die Vorbereitung der Eingabedateien ein deutlich komplexeres Unterfangen als bei KLAM_21. Kommunen werden dieses Modell nur mit entsprechendem Personal nach umfangreicher Einarbeitung selbst durchführen können. Darüber hinaus ist in der Basisversion keine Simulation der Lufttemperatur oder Luftfeuchtigkeit im Tagesgang möglich, die zur genauen Beurteilung der städtischen Wärmebelastung notwendig wäre. Die volle Funktionalität urbaner Klimaanalysen bietet die erweiterte [Thermodynamikversion](#) von MUKLIMO_3, die jedoch nicht für die Selbstanwendung in Kommunen geeignet ist. Darüber hinaus wird derzeit an einer Weiterentwicklung des hochauflösenden Stadtklimamodells [PALM-4U](#) gearbeitet, um es zukünftig sowohl für wissenschaftliche wie auch stadtplanerische Fragestellungen einsetzen zu können.

Nach Abschluss des Projektes sollen das Modell sowie die Werkzeuge zur Evaluierung und Darstellung der Ergebnisse der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Eine grafische Nutzeroberfläche soll es Städten und Kommunen ermöglichen, nach einer Schulung eigene Simulationen durchzuführen, um so geplante Klimaanpassungsmaßnahmen zu evaluieren [17].

Das mikroskalige Modell **ENVI-met** simuliert die Wechselwirkungen zwischen Oberflächen, Vegetation und Luft im städtischen Mikroklima. Die Auflösung umfasst typischerweise bis zu 0,5 m im Raum und 1 bis 5 Sekunden in der Zeit. Dadurch eignet sich ENVI-met insbesondere für Untersuchungen in einzelnen Stadtteilen, Quartieren oder Blocks. So beruht z. B. der Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern (siehe Kapitel 4.3.4) auf Simulationen idealisierter Stadtquartiere mit ENVI-met. Für die Siedlungstypen Blockbebauung, Zeilenbebauung und historischer Stadtkern werden in hoher Auflösung die Effekte von grüner Infrastruktur auf die Wärmebelastung im Quartier analysiert. Die Lizenz für die ENVI-met Software kostet im öffentlichen Sektor jährlich 1.900,- €. Die Software läuft auf Windows-Rechnern und verfügt über eine grafische Bedienoberfläche. Die Ausführung des Modells wird durch eine schriftliche Dokumentation, Videotutorials sowie technischen Support erleichtert. Kommunen mit entsprechendem Personal können das Modell selbst anwenden. Die Einarbeitung in die Software ist jedoch zeitintensiv.

4.3.3.1 Praxisbeispiele mikroskalige Modellierung: Stadtklimamodellierung in bayerischen Städten

Beispiel: Stadtklimatische Untersuchungen in München

Das Stadtklimamodell MUKLIMO_3 wurde in der Untersuchung des Deutschen Wetterdienstes zum städtischen Klima in München angewandt [18]. Die Modellierung der sommerlichen Temperaturverhältnisse im gesamten Stadtgebiet und Umland ergänzte dabei die Informationen aus dem bestehenden Stationsmessnetz. Die Kombination der Ergebnisse der Stadtklimasimulationen mit dem statistischen Interpolationsverfahren der Quadermethode ermöglichte es, neben dem Ist-Zustand auch die in Zukunft zu erwartenden Stadtklimaänderungen abzuschätzen (siehe Abb. 7).

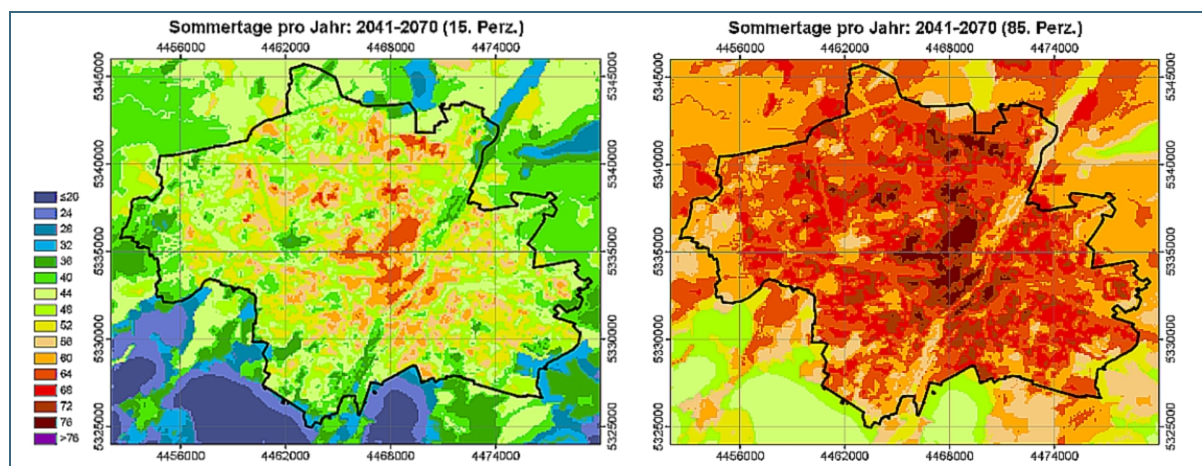


Abb. 7: Karten der in Zukunft unter Emissionsszenario SRES A1B zu erwartenden Sommertage im Stadtgebiet von München (Stadtgrenzen schwarz) im 30-jährigen klimatologischen Mittel 2041-2070; basierend auf dem 15. (links) und 85. Perzentil (rechts) des Modell-Ensembles [18].

Um darüber hinaus den Einfluss eines besonderen regionalen Windsystems, des Alpenen Pumpens, auf München zu untersuchen, wurde MUKLIMO_3 im Rahmen der Untersuchung mit einem regionalen Klimamodell (COSMO-CLM) gekoppelt. So wurde die hohe stadtklimatische Relevanz des Alpenen Pumpens für München sichtbar: nachts geht das Alpine Pumpen mit kühleren Strömungen aus den Alpen in Richtung Stadtgebiet einher, und tagsüber mit nördlicher oder östlicher Strömung von kühlerer Luft aus dem Umland in Richtung Stadt.

- Weitere Informationen zum Vorgehen: [Projektbericht Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes \(„Alpines Pumpen“\) in München](#) [18]
- Kontakt: Regionales Klimabüro München, Deutscher Wetterdienst. Postfach 20 06 20, 80006 München. E-Mail: klima.muenchen@dwd.de, Telefon: 069 8062 9225.

Beispiel: Stadtklimaanalyse für die klimaangepasste Stadtplanung in Aschaffenburg

Als Grundlage für die Erstellung eines Anpassungskonzeptes der Stadt Aschaffenburg wurden mit MUKLIMO_3 Simulationen der Lufttemperatur- und Windverhältnisse für einen heißen Sommertag mit windschwacher und wolkenfreier Hochdruckwetterlage durchgeführt. Die Eingangsdaten zur Landnutzung wurden aus dem Copernicus Urban Atlas abgeleitet (siehe Kapitel 4.1), die Gebäudedaten beruhen auf den Gebäudemodelldaten des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. Die meteorologischen Anfangsparameter entsprechen den Gegebenheiten eines wolkenarmen und windschwachen Sommertages.

Die Modellergebnisse zu Lufttemperatur- und Windverhältnissen im Stadtgebiet wurden in Form von Karten visualisiert und hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Kaltluftprozessgeschehen analysiert (siehe Abb. 8). Dadurch lassen sich Flächen mit einem hohen Potenzial zur Kaltluftbildung ebenso lokalisieren wie Gebiete, die besonders stark zu nächtlicher Überwärmung neigen. Durch die Berechnung von Kaltlufttrajektorien ist es überdies möglich, den Luftaustausch zwischen Kaltluftentstehungs- und Überhitzungsgebieten zu modellieren und somit relevante Kaltflutleitbahnen zu identifizieren.

- Weitere Informationen zum Vorgehen: [Schlussbericht Simulation der Temperaturverhältnisse und der nächtlichen Kaltluft in Aschaffenburg](#) [19]
- Kontakt: Regionales Klimabüro München, Deutscher Wetterdienst. Postfach 20 06 20, 80006 München. E-Mail: klima.muenchen@dwd.de, Telefon: 069 8062 9225.

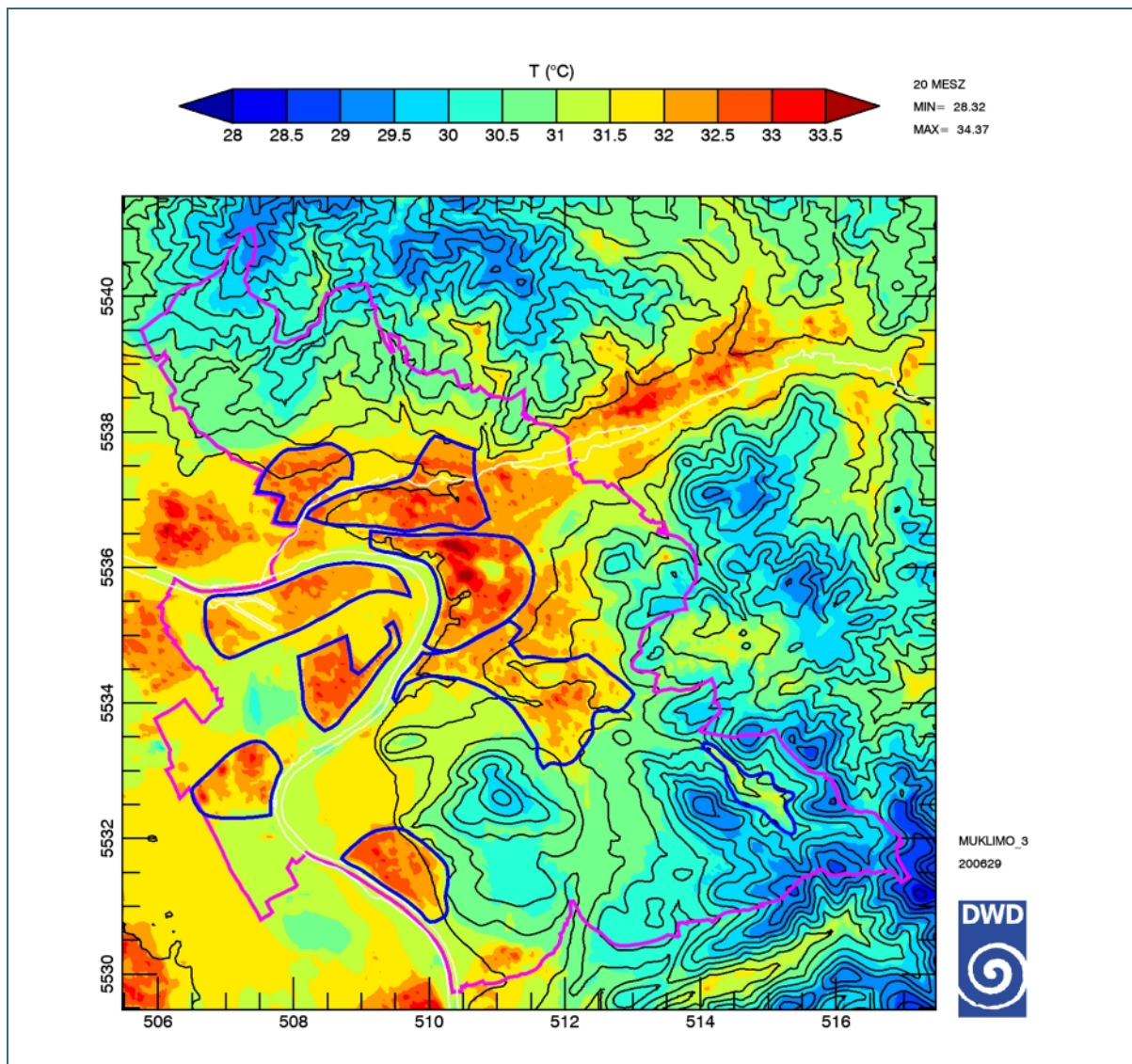


Abb. 8: Abbildung der bodennahen Lufttemperatur um 20:00 MESZ im Stadtgebiet Aschaffenburg mit Umrissen der Überwärmungsgebiete (blau), Stadtgrenze (magenta) sowie Konturlinien der Geländehöhe. Abbildung erstellt mit KLAM 21.

Hinweise zur Anwendbarkeit der Modelle durch Kommunen

Grundsätzlich existieren für jeden der genannten Modelltypen Anwendungen mit grafischer Bedienoberfläche, die Modellsimulationen auch ohne Programmierkenntnisse ermöglichen, oder zumindest vereinfachte Modellanwendungen für die praxisnahe Nutzung. Bereits vorgestellt wurden das Kaltluftabflussmodell KLAM_21, das mesoskalige Stadtklimamodell METRAS-PCL sowie die mikroskalige Stadtklimamodelle MUKLIMO_3 und ENVI-met. Ob diese Modelle in einer Kommune selbst anwendbar sind, hängt jedoch stark vom verfügbaren Personal und Zeitbudget ab. Die Einarbeitung in alle genannten Modelle umfasst je nach Komplexität mehrere Wochen; die Aufbereitung der Eingabedateien erfordert teilweise umfangreiche Erfahrungen im Umgang mit Geodaten.

4.3.4 Weitere Werkzeuge

Neben Messungen und Modellsimulationen existieren **weitere Werkzeuge** für Kommunen, um stadtklimatische Fragestellungen, wie beispielsweise den Einfluss von Anpassungsmaßnahmen auf die städtische Überwärmung, zu beurteilen. Diese Werkzeuge können aufgrund ihres Allgemeingültigkeitsanspruches keine individuellen Aussagen zu einer lokalspezifischen Situation treffen. Sie bieten Kommunen jedoch eine Entscheidungsunterstützung zu Auswahl und Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen.

Informationsportal Klimaanpassung in Städten (INKAS)

Das Informationsportal Klimaanpassung in Städten (INKAS) ist ein webbasiertes, interaktives Beratungswerkzeug zur hitzeangepassten Quartiersplanung für Städte und Kommunen. Mit Hilfe von INKAS können die Auswirkungen unterschiedlicher städtebaulicher Maßnahmen (z. B. Dachbegrünung, Entsiegelung, Anlegen von Parks oder Wasserflächen) zur Minderung der städtischen Überwärmung für typische Bebauungsstrukturen analysiert und verglichen werden. INKAS unterstützt damit insbesondere kleine und mittelgroße Kommunen, die eine klimaangepasste Stadtentwicklung vorantreiben wollen, jedoch nicht über eine eigene Stadtklimauntersuchung verfügen. Mit dem Werkzeug „Flächenanalyse“ kann die Anfälligkeit des ausgewählten Bebauungstypen für sommerliche Hitzebelastung untersucht werden. Die „Wirkungsanalyse“ quantifiziert die Effektivität einer Klimaanpassungsmaßnahme je nach Bebauungstyp und Bebauungsumgebung. Die Ergebnisse können der Priorisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen und der Ableitung von konkreten Handlungsoptionen dienen.

INKAS basiert auf systematischen Modellsimulationen virtueller Städte mit MUKLIMO_3 (siehe Kapitel 4.3.3). Um allgemeine Aussagen für typische Stadtbebauungen treffen zu können, wurden die Simulationen für idealisierte (virtuelle) Städte gerechnet, die mit einer Größe von 25 km² quadratisch in der Umgebung liegen. In zahlreichen Modellläufen wurden die Landnutzungen des Stadtgebietes und des Umlandes variiert, um die Hitzebelastung in Abhängigkeit von der Stadtbebauung zu evaluieren und die Auswirkungen einzelner Anpassungsmaßnahmen je nach zugrundeliegender Landnutzung zu analysieren. Die aufwendigen Modellsimulationen schaffen so eine fundierte Grundlage für die Bewertung von städtebaulichen Anpassungsmaßnahmen. Sie berücksichtigen jedoch keine lokalen Besonderheiten, wie beispielsweise den Einfluss der Topographie (z. B. Tal- oder Berglage, Nähe zu größeren Gewässern) auf das Stadtklima.

- Weitere Informationen und Auswahl der Werkzeuge (Flächenanalyse/Wirkungsanalyse) unter: [INKAS - Informationsportal Klimaanpassung in Städten \(dwd.de\)](https://www.dwd.de/INKAS)

Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern

Der Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern fasst Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung zusammen. In dem Projekt wurden unter anderem die Auswirkungen grüner Infrastruktur auf verschiedene Siedlungstypen untersucht. Mit Hilfe des mikroskaligen Stadtklimamodells ENVI-met (siehe Kapitel 4.3.3) wurde analysiert, inwiefern Klimaanpassungsmaßnahmen wie Fassaden- und Dachbegrünungen oder Verschattung die Hitzebelastung in den idealisierten Siedlungsformen Blockbebauung, Zeilenbebauung und historischer Stadtkern reduzieren. Für jeden Siedlungstyp werden darüber hinaus Umsetzungsmöglichkeiten diskutiert und detaillierte Handlungsempfehlungen vorgestellt.

- Download des Leitfadens: https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Berichte/180207_Leitfaden_ONLINE.pdf

Weitere Werkzeuge

- Für eine erste Einordnung regionaler Betroffenheit auf Ebene der sieben Klimaregionen Bayerns kann auf die [Klima-Broschüren](#) des LfU sowie die [Klima-Faktenblätter](#) zurückgegriffen werden. Die [Klima-Steckbriefe](#) stellen Klimafolgen und Schwerpunkte der Betroffenheit in den einzelnen Regierungsbezirken dar und bieten somit die fachliche Grundlage für den Einstieg in die kommunale Klimaanpassung.
- Weitere Informationen zum Klimawandel in Bayern finden Sie im [Bayerischen Klimainformationssystem](#). Mit dem darin enthaltenen Klimatool kann man wahlweise in das Klima der Vergangenheit oder der Zukunft Bayerns eintauchen und dieses regional erkunden. Insgesamt stehen hier 67 Klimakennwerte (z. B. mittlere Jahrestemperatur, Hitzetage, Niederschlagstage) für unterschiedliche Raumeinheiten (Klimaregionen, Naturräume, Regierungsbezirke und Landkreise) zur Verfügung.
- Das [Handbuch Klimaanpassung](#) des Bayerischen Ministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz beinhaltet eine umfangreiche Sammlung an Werkzeugen, Informationen, Handlungsempfehlungen und Praxisbeispielen, die als Hilfestellung und Entscheidungsgrundlage bei der Umsetzung von Klimaanpassung dienen. Es führt dabei durch die einzelnen Schritte des Anpassungsprozesses, vom Anstoß zur Klimaanpassung bis zur Umsetzung von Maßnahmen. Für jeden Schritt vermittelt das Handbuch wichtige Grundlagen und verweist auf weiterführende Informationen und Werkzeuge (z. B. Arbeitshilfen, Wissensportale, Kartendienste). Herzstück des Handbuches sind die Maßnahmenblätter im Anhang. Sie listen 78 Anpassungsmaßnahmen detailliert auf und zeigen somit konkret, wie man Klimafolgen wie Hitzebelastung, Starkregen und Trockenheit begegnen kann. Darüber hinaus findet sich im Anhang eine Tabelle mit bayerischen und nationalen Förderprogrammen mit Bezug zum Thema Klimaanpassung.
- Der [Stadtklimalotse](#) unterstützt Kommunen bei der Auswahl und Umsetzung von Klimaanpassung in der Kommunal- und Stadtentwicklung. Kernstück ist der Maßnahmenkatalog mit über 130 detailliert aufbereiteten Vorschlägen für Klimaanpassungsmaßnahmen. Der Katalog kann je nach Fragestellung über die Filter Handlungsfelder, Wirkfolgen, Extremereignisse und Stadtbau eingesehen werden. Wird beispielsweise Unterstützung bei der Bearbeitung eines sektoralen oder teilräumlichen Projektes, oder hinsichtlich Stadtentwicklung- und Flächennutzungsplanung benötigt, so ist der Zugang über die „Handlungsfelder“ zu empfehlen. Besteht dagegen Interesse an der planerischen Vorsorge gegenüber bestimmten Wetterextremen, so ist der Zugang über „Extremereignisse“ sinnvoll. Ergänzt wird der Maßnahmenkatalog durch eine Übersicht mit „Gute-Praxis-Beispielen“ der klimagerechten Stadtentwicklung.
- Das Webtool [klimREG](#) dient als Ideensammlung zur Umsetzung klimawandelgerechter Regionalplanung. Es stellt gängige Praktiken und innovative Lösungen der Regionalplanung in ausgewählten Handlungsfeldern vor (z. B. Verminderung von Hochwassergefahren oder Schutz vor Hitze in Siedlungsbereichen), zeigt auf, wie Klimaanpassungsthemen bereits im Prozess der Regionalplanerstellung und -fortschreibung eingebunden werden können und gibt einen Überblick über die rechtlichen Anforderungen zur Berücksichtigung von Klimaanpassung.
- Eine ausführliche Sammlung weiterführender Literatur mit Informationen zum Klimawandel, zur Bestimmung der eigenen Betroffenheit gegenüber Klimaveränderungen und extremen Wetterereignissen sowie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels findet sich unter <http://www.klimawandelfit.de/quellensammlung/>
- Das Hessische Landesamt für Umwelt (HLNUG) hat verschiedene Handlungshilfen zum Thema Stadtklimaanalyse auf seiner Webseite zusammengefasst, darunter eine interaktive Entscheidungshilfe für die geeignete Methodenwahl sowie eine Ausschreibungshilfe zur Beauftragung von stadtklimatischen Gutachten: <https://www.hlnug.de/?id=21260>

5 Bewertung und Umsetzung in der Planung – von der Klimaanalyse zur Raumplanung

Die durch Messungen oder Modellierungen erlangten Erkenntnisse zu den lokalklimatischen Besonderheiten einer Kommune dienen als Grundlage für eine klimaangepasste Stadtentwicklung. Wie diese Klimainformationen in Karten dargestellt, bewertet und über daraus abgeleitete Hinweiskarten in der **räumlichen Planung** berücksichtigt werden können, beschreibt die Richtlinie 3787 Blatt 1 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) [5]. VDI Richtlinien dienen als praxisorientierte technisch-wissenschaftlichen Arbeitsunterlage und Entscheidungshilfe. Die Empfehlungen des VDI zum Thema Stadtklima und Lufthygiene (VDI Richtlinie 3787 Blatt 1, 5, 9; 3785 Blatt 1 [5, 20–22]) fassen den aktuellen Stand der Technik zur Erhebung und Nutzbarmachung von stadtklimatischen Informationen für die Planung zusammen und unterstützen somit die fundierte Berücksichtigung von planungsrelevanten Sachverhalten des Stadtklimas. Dabei unterscheidet VDI Richtlinie 3787-1 [5] in Klimaanalysekarten (siehe Kapitel 5.2), zu deren Erstellung im ersten Schritt das Ausweisen von Klimatopen zählt (siehe Kapitel 5.1), und Planungshinweiskarten (siehe Kapitel 5.3). Klimaanalysekarten stellen lokalklimatischen Gegebenheiten flächenhaft dar. In Planungshinweiskarten werden diese klimatischen Sachverhalte in Hinblick auf planungsrelevante Belange bewertet und daraus Hinweise zur Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen abgeleitet.

5.1 Klimatopkarte

Klimatope beschreiben Gebiete mit sehr ähnlichen mikroklimatischen Bedingungen [5]. In einer Klimatopkarte werden solche Flächen zu **repräsentativen Stadtstrukturtypen** (Innenstadtklima, Stadtrandklima, Freilandklima, Gewässerlima, etc.) zusammengefasst. Die Klassifizierung der Klimatope beruht hauptsächlich auf der Nutzungsform der Fläche, also auf Daten zu Flächennutzung, Bebauungsdichte, Versiegelungsgrad, Oberflächenstruktur, Relief, Vegetationsart und -struktur sowie Lage im Stadtgebiet. Im einfachsten Fall basiert die Erfassung städtischer Klimatope auf Landnutzungsdaten, beispielsweise aus dem Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem (siehe Kapitel 4.1), und Höheninformationen aus einem Digitalen Geländemodell, wie sie das Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung zur Verfügung stellt. Damit liegt der Vorteil einer Klimatopkarte darin, dass ihre Erstellung auch ohne zusätzliche Messungen oder Modellierungen möglich ist. Gleichzeitig kann sie deshalb keine lokalklimatischen Besonderheiten ausweisen, die über die Flächennutzung hinausgehen, und enthält keine Informationen über Wechselwirkungen zwischen den Flächen, wie z.B. Kaltluftaustausch. Die Ausweisung der Klimatope kann jedoch durch empirische Untersuchung des Stadtklimas verfeinert werden (wie beispielsweise im Stadtklimagutachten Regensburg s. u.).

Klimatopkarten stellen unterschiedliche klimatische Funktionsräume dar und liefern damit Anhaltspunkte, wo bioklimatisch belastete Siedlungsräume sowie entlastende Freiflächen liegen. Dieses Wissen kann bei der Planung von Nutzungsänderungen berücksichtigt werden. Mit Klimatopkarten werden jedoch keine lokalen Besonderheiten oder Austauschprozesse zwischen einzelnen Flächen abgebildet. Tiefere Informationen, insbesondere zu Kaltluftabflüssen und thermisch induzierten Windströmungen, werden erst in Klimafunktions-/Klimaanalysekarten sichtbar (siehe Kapitel 5.2).

5.1.1 Praxisbeispiel Klimatopkarten

Beispiel: Stadtklimagutachten Regensburg – Klimatopkarte

Ein Baustein des Klimagutachtens für die Stadt Regensburg war die Erstellung einer Klimatopkarte (siehe Abb. 9). Die Ausweisung der Klimatope beruht auf topographischen Karten, Stadtkarten zur Versiegelung, dem Flächennutzungsplan, Realnutzungskartierungen sowie Luftbildplänen der Stadt Regensburg [23]. Unterschieden werden Stadtklimatope (Dorfklimatop, Gewerbebebietsklimatop,

City-/Altstadt-Klimatop, Stadtrandklimatop und Stadtklimatop) und Offenlandklimatope (Offenland-/Freilandklimatop, Parkklimatop, Waldklimatop und Gewässerklimatop). Die Stadtklimatope wurden primär auf Basis des Versiegelungsgrades und der damit einhergehenden Überhitzung klassifiziert. Die Einteilung der Offenlandklimatope basiert auf der Funktion der Flächen sowie ihrer realen Nutzung.

In dem Klimagutachten der Stadt Regensburg stellt die Ausweisung der Klimatope den ersten Schritt hin zur Erstellung einer Planungshinweiskarte dar. Die Informationen aus dem Klimagutachten dienen als Grundlage für die klimagerechte Planung in Regensburg. Sie fließen beispielsweise in Bebauungspläne ein, um Ziele wie die Verbesserung der Aufenthaltsbedingungen und der Siedlungsdurchlüftung sowie die Förderung der Frischluftzufuhr in allen raumbedeutsamen Planungen zu berücksichtigen.

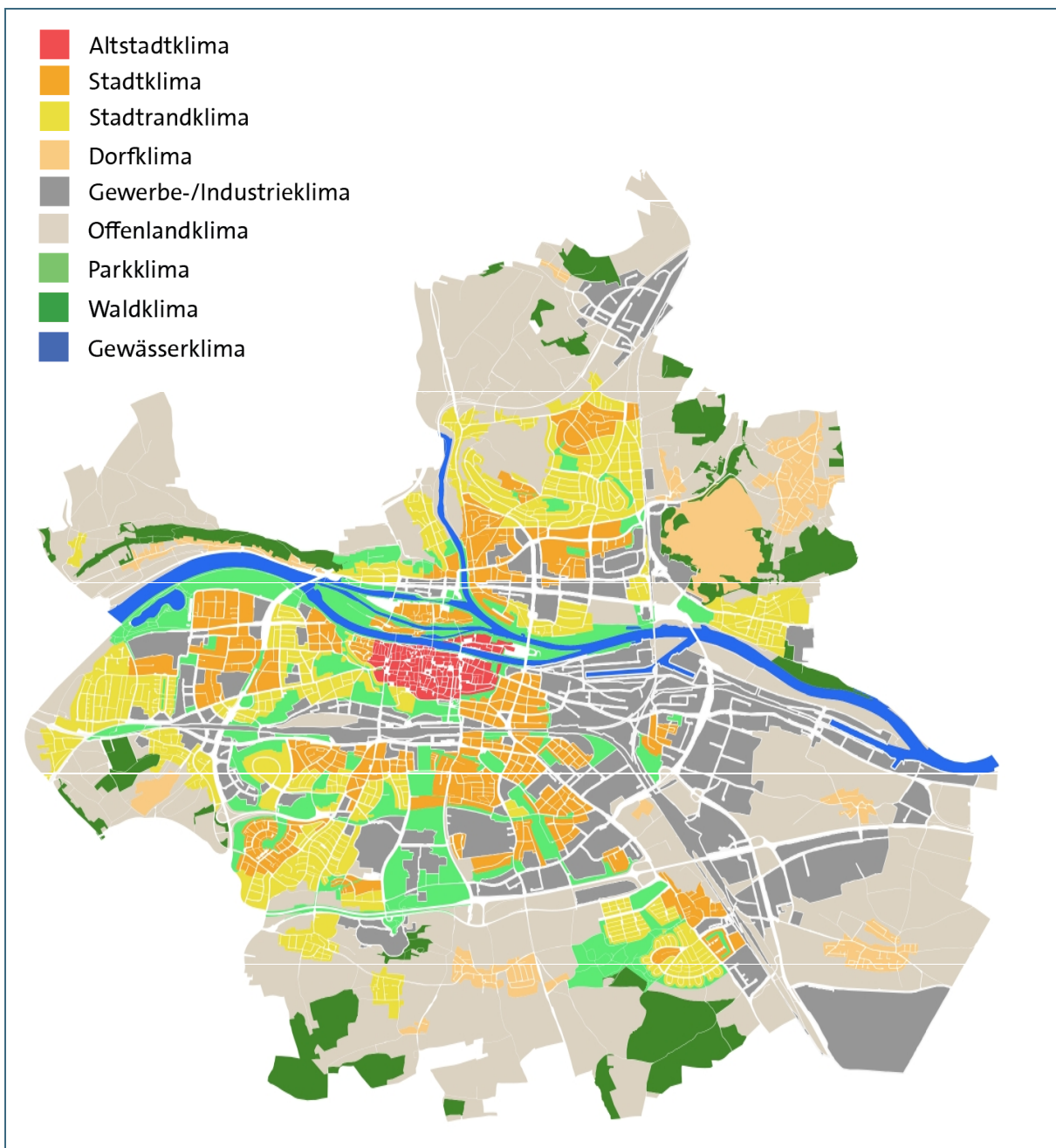


Abb. 9: Klimatopkarte der Stadt Regensburg mit Stadt- und Offenlandklimatopen.

- Weitere Informationen zum Vorgehen: [Stadtklimagutachten Regensburg](#) [23]
- Kontakt: Katharina Schätz, Klimaresilienzmanagerin, Stadt Regensburg – Direktorium 3, Bruderwöhrdstraße 15 b, 93055 Regensburg. E-Mail: schaetz.katharina@regensburg.de, Telefon: 0941 507 3025.

5.2 Klimaanalyse-/Klimafunktionskarte

Klimaanalysekarten, ehemals Klimafunktionskarten genannt, beschreiben **planungsrelevante lokalklimatische Eigenschaften** und Phänomene, die in der Regel über die Ausweisung von Klimatopen hinausgehen: im Rahmen der Klimaanalyse wird keine rein statische Einteilung von Gebieten basierend auf Landnutzungs- und Gebäudedaten vorgenommen. Messungen oder Modellierungen ergänzen diese Fachdaten um die Abbildung dynamischer Prozesse, wie beispielsweise von Kaltluftabflüssen oder thermischen Windsystemen [5]. Die Ausweisung von Klimatopen gibt erste Anhaltspunkte, wo sich im städtischen Raum hitzebelastete Stadtgebiete befinden. Es kann jedoch sein, dass regelmäßige Kaltluftzufuhr diese Gebiete entlastet oder andere, scheinbar weniger belastete Gebiete durch fehlenden Luftaustausch zu belasteten Gebieten werden. Solche Informationen lassen sich nur durch Messungen, oder für das gesamte Stadtgebiet nur durch Modellierung ermitteln.

Die Klimaanalysekarte stellt dabei nur die **stadtklimatischen Sachverhalte** dar: die Verteilung der meteorologischen Kenngrößen, wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, relevante Elemente des Kaltluftprozessgeschehens sowie human-biometeorologische Parameter, wie beispielsweise die gefühlte Temperatur. Die Bewertung dieser Sachverhalte für die planerische Anwendung, z. B. die Unterteilung in Wirkungs- und Ausgleichsräume sowie die Bestimmung der Höhe der be- bzw. entlastenden Funktion einzelner Gebiete, erfolgt erst bei der Erstellung der Planungshinweiskarte (siehe Kapitel 5.3).

5.2.1 Praxisbeispiele Klimaanalysekarten

Beispiel: Klimaplanatlas der Stadt Würzburg – Klimafunktionskarte basierend auf Messungen

Die Stadt Würzburg gab die Erstellung eines Klimaplanatlasses in Auftrag, um ein geeignetes und nutzbares Planungshilfsmittel zur Berücksichtigung stadtklimatischen Belange in der Stadtentwicklung zu erhalten [24]. Ergebnisse des Atlas sind verschiedene Themenkarten, eine Klimafunktionskarte sowie eine Planungshinweiskarte.

Die Klimafunktionskarte (siehe Abb. 10) liefert ein Gesamtbild der lokalklimatischen Situation in Würzburg. Sie gibt Aufschluss über die Verteilung der Klimatope sowie den Einfluss regionaler Windsysteme. Methodisch wurden hier stadtklimatische Messungen mit einer heuristischen Klassifizierung verschiedener Eingangsgrößen (Topographie, Gebäudedaten, Landnutzung, Luft- und Satellitenbilder) kombiniert. Dabei wurde die vorherrschende Temperaturverteilung im Stadtgebiet sowie die relevanten Prozesse des Lufttransportes und -austausches gutachterlich ermittelt. Im Ergebnis weist die Klimafunktionskarte die Klimatope Kaltluft- und Frischluftentstehungsgebiet, Frischluftentstehungsgebiet, Misch- und Übergangsklimate, Überwärmungspotenzial, Moderate sowie Starke Überwärmung aus. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Stadtklimamodellierung Luftleitbahnen und Kaltluftabflüsse berechnet, die jedoch in der Karte nicht abgebildet sind.

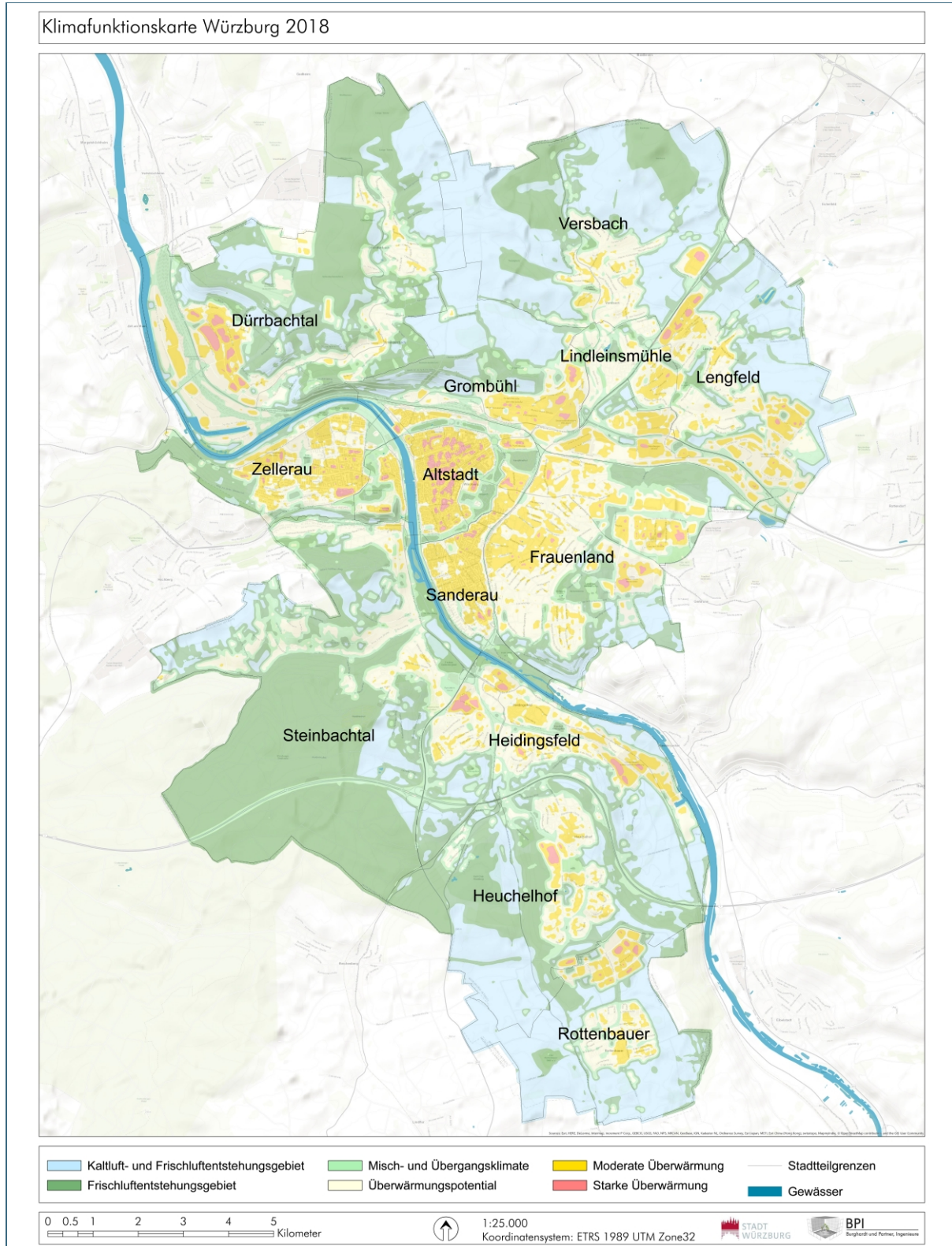


Abb. 10: Karte mit Darstellung der Klimafunktionen für das Stadtgebiet Würzburg.

- Weitere Informationen zum Vorgehen: [Klimaplanatlas der Stadt Würzburg \[24\]](#)
- Kontakt: Stadt Würzburg, Fachbereich Umwelt- und Klimaschutz, Karmelitenstraße 20, 97070 Würzburg. E-Mail: klimaschutz@stadt.wuerzburg.de, Telefon: 0931 37 2757.

Beispiel: Stadtklimaanalyse Ulm – Klimaanalysekarte basierend auf mesoskaliger Modellierung

Im Rahmen der Stadtklimaanalyse Ulm wurden eine Klimaanalyse- sowie eine Planungshinweiskarte basierend auf mesoskaliger Modellierung erstellt. Hierzu wurde das Modell FITNAH_3D (siehe Kapitel 4.3.2) mit den notwendigen Gelände- und Nutzungsstrukturdaten gespeist und die Parameter Lufttemperatur, Physiologisch Äquivalente Temperatur, Kaltluftströmungsfeld sowie Kaltluftvolumenstrom für eine typische austauscharme sommerliche Wetterlage berechnet. Die Modellergebnisse wurden in der Klimaanalysekarte (siehe Abb. 11) zusammengeführt: Die Karte weist die Kaltluftproduktion von Freiflächen, die thermische Belastung der Siedlungsräume als Differenz zum Umland (Wärmeinseleffekt) sowie relevante Kaltluftleitbahnen und flächenhaften Kaltluftabfluss aus.

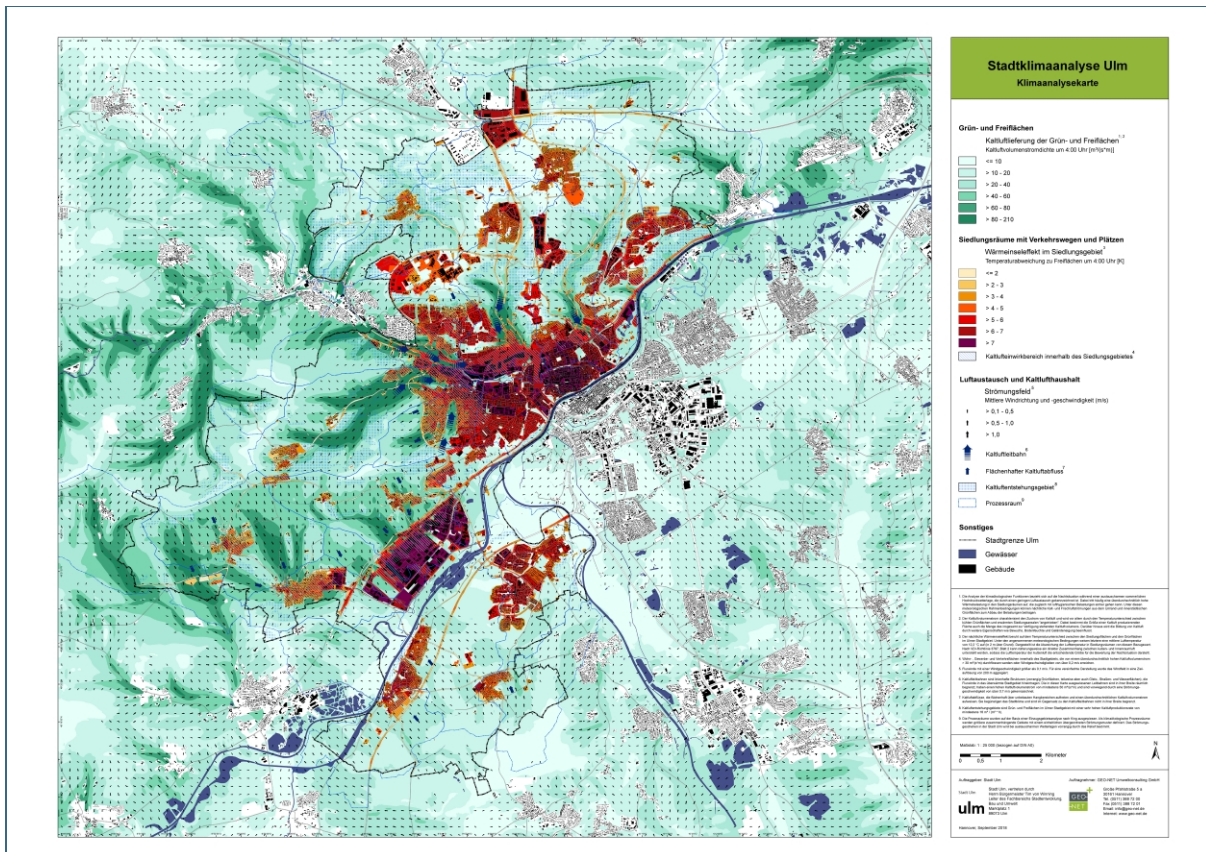


Abb. 11: Klimaanalysekarte der Stadt Ulm mit humanbioklimatischer Bewertung von Grün- und Freiflächen sowie Siedlungsräumen mit Verkehrswegen. Abbildung von Kaltluftentstehungsgebieten, Prozessräumen, Kaltluftleitbahnen und Kaltluftabflüssen.

- Weitere Informationen zum Vorgehen: [Stadtklimaanalyse Ulm](#) [25]
- Kontakt: Stadt Ulm, Stadtplanung, Umwelt, Baurecht - Strategische Planung, Münchner Straße 2, 89073 Ulm. Telefon: 0731 161-6110.

5.3 Planungshinweiskarte

Die Planungshinweiskarte bewertet die Informationen aus der Klimaanalyse, um sie **für die Regional-, Flächennutzungs- und Bauleitplanung nutzbar** zu machen. Sie weist schützenswerte Flächen ebenso aus wie derzeit humanbioklimatisch belastete Flächen, in denen Nutzungsänderungen zu einer Verbesserung des Mikroklimas beitragen könnten.

In der **Bewertung der klimaökologischen Funktion** einzelner Flächen wird dabei zwischen Siedlungsräumen (sogenannte Last- oder Wirkungsräume) und Freiflächen (sogenannte Ausgleichsräume)

unterschieden [5]. Gemäß VDI Richtlinie 3787-1 [5] sollen Siedlungsflächen in einer vierstufigen Matrix nach ihrer lokalklimatischen Belastung, Freiflächen in einer dreistufigen Matrix nach ihrer lokalklimatischen Entlastung eingeteilt werden. So weist die Karte die Spannbreite städtischer Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktion aus, von „bebauten Gebieten mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen“ bis zu „Ausgleichsräumen [mit] hoher Bedeutung“ [5]. Ausgehend von dieser Einteilung fasst die Richtlinie die zentralen Planungsempfehlungen je nach Flächentypisierung zusammen. Berücksichtigt wird die Empfindlichkeit der Flächen gegenüber Nutzungsänderungen, Möglichkeiten zur Verbesserung oder Erhalt der lokalklimatischen Funktion durch blaue und grüne Infrastruktur sowie der Umgang mit Bauvorhaben. Zusätzlich zu der Ausweisung von Wirkungs- und Ausgleichsräumen können in der Planungshinweiskarte Empfehlungen zur Begrünung sowie Hauptstraßen mit Potenzial für hohe bis extreme Schadstoffbelastungen markiert werden [5].

Im Ergebnis erhält man eine informelle Hinweiskarte, die als Grundlage dienen kann, um planungsrelevante klimatische und lufthygienische Phänomene in Planungsvorhaben zu berücksichtigen. Die Planungshinweiskarte „übersetzt“ die in der Klimaanalyse gewonnenen Erkenntnisse in stadtklimatische, raumspezifische Anforderungen an Planungsprozesse. Die **Empfehlungen** berücksichtigen dabei folgende Grundprinzipien zur klimaökologischen Planung: Erhalt von Vegetations- und Freiflächen, Schaffung von Vegetationsflächen am Siedlungsrand, keine Bebauung von Tal- oder Hanglagen [5]. Idealerweise bezieht die Planungshinweiskarte darüber hinaus auch die Folgen des noch zu erwartenden Klimawandels mit ein (mögliche Ansätze dazu siehe Kapitel 4.3.2).

5.3.1 Praxisbeispiele Planungshinweiskarten

Beispiel: Stadtklimaanalyse Bayreuth – Planungshinweise für Teilräume

Im Rahmen der Stadtklimaanalyse Bayreuth wurde keine Planungshinweiskarte für die gesamte Stadt erstellt, sondern Empfehlungen für einzelne Teilräume ausgearbeitet, in denen Nutzungsänderungen beabsichtigt waren [25]. Die Hinweise beruhen auf einer Analyse der Hangneigungsklassen, der Klimafunktionskarte sowie der Ergebnisse des städtischen Messnetzes.

- Weitere Informationen zum Vorgehen: [Stadtklimaanalyse Bayreuth](#) [26]
- Ansprechperson: Stadt Bayreuth, Neues Rathaus, Postfach 10 10 52, 95410 Bayreuth. E-Mail: Poststelle@stadt.bayreuth.de, Telefon: 0921 250.

Beispiel: Landesweite Schutzgutkarte Klima/Luft – Planungshinweiskarte

Ziel des Projektes „Landesweite Schutzgutkarte Klima/Luft“ war die Erarbeitung eines landesweit einheitlichen Moduls Klima/Luft als Grundlage für die Landschaftsrahmenplanung und Regionalplanung in Bayern [12]. Das zentrale Produkt stellt dabei die Planungshinweiskarte dar, die basierend auf mesoskaliger Modellierung des gesamten Freistaates (siehe Kapitel 4.3.2) erstellt wurde. Die Karte (siehe Abb. 12) weist Wirkräume sowie Ausgleichsräume aus und bewertet sie hinsichtlich ihrer bioklimatischen Funktion. Darüber hinaus bildet sie relevante Elemente des Kaltluftprozessgeschehens ab und gibt Hinweise zu durch den Straßenverkehr lufthygienisch belasteten Gebieten.

Aufgrund der gewählten Modellauflösung bieten die landesweiten Karten Aussagen zu Überhitzungspotenzialen sowie relevanter Kaltluftprozessen primär für Fragestellungen auf regionaler Ebene. Für Kommunen können die Karten eine erste Einschätzung liefern, für kleinräumigere Aussagen innerhalb einer Stadt oder zu einzelnen Quartieren sind sie jedoch nicht geeignet. Hauptzielgruppe ist daher die Landschaftsrahmenplanung und Regionalplanung.

Die flächendeckende Klimaanalyse simuliert nicht nur den Ist-Zustand, sondern bezieht durch den Delta-Change-Ansatz (siehe Kapitel 4.3.2) auch Klimaprojektionen mit ein: im Rahmen der Projektgruppe wurden dafür die Szenarien „schwacher Klimawandel“ (entspricht hier dem Ensembleminimum

des RCP4.5) sowie „starker Klimawandel“ (entspricht hier dem Ensemblemaximum des RCP8.5) verwendet. Die Ergebnisse aus den drei Modellrechnungen (Bestandssituation, schwacher Klimawandel, starker Klimawandel) wurden in der Bewertung der klimaökologischen Funktion für die Planungshinweiskarte berücksichtigt, indem die Einteilung der Wirkräume den Einfluss des Klimawandels miteinbezieht. So werden beispielsweise Flächen in die zweithöchste Belastungsstufe (Stufe 4) eingeordnet, wenn sie in der Bestandssituation zwar noch eine bessere Bewertung zeigen, unter Annahme eines „schwachen Klimawandels“ jedoch eine ungünstige Situation aufweisen werden.

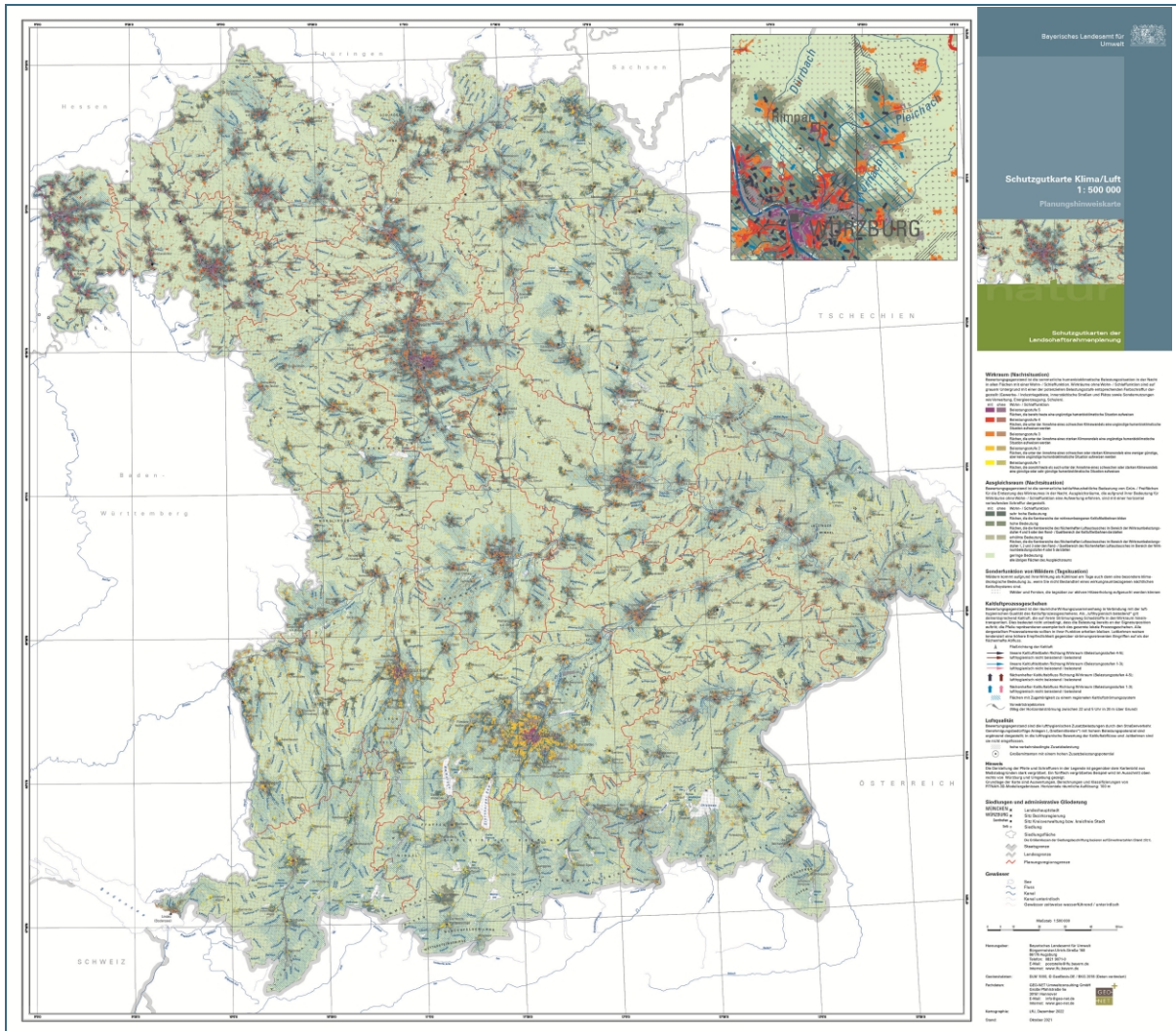


Abb. 12: Landesweite Planungshinweiskarte mit humanbioklimatischer Bewertung der Wirk- und Ausgleichsräume sowie Informationen zu Luftqualität und Kaltluftprozessgeschehen.

- Weitere Informationen zum Vorgehen: [Schutzgutkarte Klima/Luft \(bayern.de\)](https://www.bayern.de) [12]
- Kontakt: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg. E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de, Telefon: 0821 9071-0.

6 Zusammenfassung

Stadtklimaanalysen unterstützen eine maßgeschneiderte Klimaanpassung. Sie stellen ein zentrales Werkzeug dar, um lokalklimatische Besonderheiten in Siedlungsräumen zu untersuchen, Klimaanpassungsmaßnahmen zu priorisieren und lokale passgenaue Lösungen zu entwickeln.

Einen ersten Anhaltspunkt für die klimatische Funktion einzelner Flächen bietet der Blick auf **Landnutzung** und Gebäudestruktur. Umfassende Messnetze oder mobile Messfahrten gehen über diese statische Analyse hinaus und zeigen den Einfluss dynamischer Prozesse. Modellierungen ermöglichen die flächendeckende Untersuchung des heterogenen Stadtklimas und dessen dynamischer Elemente sowie die Analyse konkreter Planungsvorhaben.

Bei begrenzten personellen und finanziellen Ressourcen kann bereits eine rein landnutzungs-basierte Ausweisung von Klimatopen, eventuell im Verbund mit mobilen Messfahrten und einer Einschätzung der Kaltluftströmungen aufgrund von Topographie und lokalem Wissen, eine wichtige Planungsgrundlage sein. Eine detaillierte Analyse bieten mesoskalige Modelle in räumlicher Auflösung von 20-50 m sowie mikroskalige Stadtklimamodelle. Letztere sind insbesondere für kleinräumige Untersuchungen einzelner Stadtquartiere oder konkrete Bauvorhaben notwendig. Sie bilden jedoch auch das gesamte Stadtgebiet detaillierter ab als mesoskalige Modelle. Die **Entscheidung zur geeigneten Methodik** hängt von der zu untersuchenden Fragestellung (siehe dazu die Checkliste Stadtklimaanalyse) ebenso ab wie von den finanziellen, personellen und zeitlichen Kapazitäten. Aufwendigere Modellierungen wie meso- und mikroskalige Stadtklimaanalysen können in der Regel nicht von den Kommunen selbst durchgeführt werden, sondern müssen an Planungs- oder Ingenieurbüros vergeben werden. Dies sollte bei der Wahl der Methodik beachtet werden.

Auf diese Einschränkung, dass viele der Methoden aktuell nur von Fachleuten anwendbar sind, wird bei der **Weiterentwicklung von Stadtklimamodellen** vermehrt reagiert. Ein Beispiel ist das mikroskalige Stadtklimamodell PALM-4U, das atmosphärische Prozesse in der Stadt gebäudeauflösend simulieren kann. Mit Hilfe einer anwendungsfreundlichen graphischen Nutzeroberfläche sowie Schulungen für Städte und Gemeinden soll PALM-4U Kommunen in Zukunft ermöglichen, eigenständig Simulationen durchzuführen.

Um die Erkenntnisse aus der Stadtklimaanalyse **für die Raumplanung nutzbar** zu machen, sollten sie in einer Klimaanalysekarte zusammengefasst und für die Erstellung einer Planungshinweiskarte hinsichtlich ihrer humanbioklimatischen Funktion bewertet werden. Die Darstellung von Wirkungs- und Ausgleichsräumen sowie von zentralen Elementen des Kaltluftprozessgeschehens ermöglicht es, den Einfluss von Planungsvorhaben auf das Stadtklima zu beurteilen und zielgenaue Klimaanpassungsmaßnahmen zu entwickeln und gegebenenfalls zu priorisieren.

Die anschließende **Abschätzung des Anpassungsbedarfes** beruht dabei auf zwei Säulen: 1. dem Wissen um stadtklimatische Besonderheiten und 2. der Ermittlung von besonders vulnerablen Gruppen und Orten, also der individuellen Betroffenheit und Anfälligkeit für Überhitzung, Überschwemmungen und Luftverschmutzung. Die hier vorgestellten Instrumente geben ausschließlich über ersteres Aufschluss. Für die Einschätzung der individuellen Betroffenheit ist das Wissen über lokale Gegebenheiten und Besonderheiten vor Ort gefragt.

Städte spielen bei der Klimaanpassung eine zentrale Rolle. Im Rahmen ihrer kommunalen Planungshoheit ist die Bauleitplanung das wichtigste Instrument, um klimatische und lufthygienische Belange in der Planung zu berücksichtigen. Durch die systematische Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen profitieren Städte in zweifacher Hinsicht. Zum einen tragen sie dazu bei, die Resilienz gegenüber den Folgen des Klimawandels zu erhöhen. Darüber hinaus schaffen blaue und grüne

Infrastruktur, klimaangepasstes Bauen, urbane Gesundheitsförderung und soziale Vernetzungsmöglichkeiten **zukunftsfähige Städte mit einer hohen Lebensqualität**. Dort, wo Bewohnerinnen und Bewohner einer Stadt sich wohlfühlen, sich mit ihrem Quartier identifizieren und sozial vernetzt sind, sind sie resilienter gegenüber Belastungen.

Wie Städte Klimaanpassung systematisch umsetzen können und welche Möglichkeiten der finanziellen Förderung dazu existieren, ist im [Handbuch Klimaanpassung](#) detailliert dargestellt. Darüber hinaus zeigt die Arbeitshilfe [„Instrumente zur Klimaanpassung vor Ort – Eine Arbeitshilfe für Kommunen in Bayern“](#), über welche Steuerungsinstrumente im öffentlichen Baurecht und in Form informeller Instrumente wie Gutachten oder Leitbilder Kommunen bereits verfügen, um grüne und blaue Infrastrukturmaßnahmen bei Planungen berücksichtigen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV, Hrsg. 2021): Instrumente zur Klimaanpassung vor Ort – Eine Arbeitshilfe für Kommunen in Bayern. München, 40 S.
- [2] World Meteorological Organization (WMO) (1996): Climate and Urban Development. WMO-No. 844. ISBN 92-63-1 0844-7. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=8823.
- [3] Kuttler W. (2019): Stadtklima: Definition, Charakteristika. Nachweismöglichkeiten. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.). Warnsignal Klima: Die Städte. pp. 21-27. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.die-staedte.03
- [4] Heaviside C. (2020): Urban Heat Islands and Their Associated Impacts on Health. Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. <https://oxfordre.com/environmentalscience/view/10.1093/acrefore/9780199389414.001.0001/acrefore-9780199389414-e-332>
- [5] VDI 3787 Blatt 1: 2015-09 Umweltmeteorologie; Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen (Environmental meteorology; Climate and air pollution maps for cities and regions). Berlin: Beuth Verlag.
- [6] Beck C., A. Straub, S. Breitner, J. Cyrus, A. Philipp, J. Rathmann, A. Schneider, K. Wolf and J. Jacobeit (2018): Air temperature characteristics of Local Climate Zones in the Augsburg urban area (Bavaria, Southern Germany) under varying synoptic conditions. Urban Climate 25: 152-166. doi: 10.1016/j.uclim.2018.04.007.
- [7] Bittner M., F. Baier, T. Erbertseder, G. Gesell, K. Günther, T. Holzer-Popp, M. Schroedter-Homscheidt T. Trautmann, D. Loyola, & Mayer, B. (2005): Satellitenbasierte Fernerkundung klimarelevanter Parameter in der Atmosphäre im Deutschen Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR. DWD Klimastatusbericht 2004.
- [8] Sievers U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Theoretische Grundlagen, Anwendung und Handhabung des PC-Modells. Berichte des DWD 227.
- [9] Stadt Kempten (Allgäu) (Hrsg. 2021): Stadtklimaanalyse Kempten (Allgäu). 126 S. https://www.kempten.de/file/Stadtklimaanalyse_Kempten_0621.pdf
- [10] Groß G., C. Etling (2003): Numerische Simulationsmodelle. Promet, 30(1/2), 28-38. http://www.met.fu-berlin.de/%7Edmg/promet/30_12/3_Gross.pdf
- [11] Kubilay A., J. Allegrini, D. Strebel, Y. Zhao, D. Derome, J. & Carmeliet (2020): Advancement in urban climate modelling at local scale: Urban heat island mitigation and building cooling demand. Atmosphere, 11(12), 1313.
- [12] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU, Hrsg. 2022): Abschlussbericht Landesweite Schutzgutkarte Klima/Luft für die Landschaftsrahmenplanung. https://www.lfu.bayern.de/download/natur/schutzgutkarten/klimaluft_abschlussbericht.pdf
- [13] Emilsson T., Å. Ode Sang (2017): Impacts of Climate Change on Urban Areas and Nature-Based Solutions for Adaptation. In: Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (eds) Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_2

- [14] Stadt Nürnberg (Hrsg. 2014): Stadtklimagutachten. Analyse der klimaökologischen Funktionen für das Stadtgebiet von Nürnberg. 131 S. https://www.nuernberg.de/imperia/md/umweltamt/dokumente/klima_energie/klimaanalyse-nuernberg_gutachten_rev01_komp_ohnekarten.pdf
- [15] Sievers U. (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst) (2012): Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3. Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. Berichte des DWD 240. ISBN 978-3-88148-465-7
- [16] Sievers U. (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst) (2016): Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3. Teil 2: Thermodynamische Erweiterungen. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. Berichte des DWD 248.
- [17] Krüger A, A. Reinbold, M. Schubert-Frisius, J. Cortekar (2021): Innovatives Stadtklimamodell PALM-4U zur Unterstützung der kommunalen Anpassungsstrategien. Poster präsentiert bei: 12. Deutsche Klimatagung, Online-Tagung, 15. bis 18. März 2021. <https://doi.org/10.5194/dkt-12-24>
- [18] Mühlbacher G. et al. (2020): Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes („Alpines Pumpen“) in München. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 94 Seiten. Berichte des DWD 252.
- [19] Koßmann M. (2021): Simulation der Temperaturverhältnisse und der nächtlichen Kaltluft in Aschaffenburg.
- [20] VDI 3787 Blatt 5: 2003-12 Umweltmeteorologie; Lokale Kaltluft (Environmental meteorology; Local cold air). Berlin: Beuth Verlag.
- [21] VDI 3787 Blatt 9: 2004-12 Umweltmeteorologie; Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen (Environmental meteorology; Consideration of climate and air hygiene in physical planning). Berlin: Beuth Verlag.
- [22] VDI 3785 Blatt 1: 2008-12 Umweltmeteorologie; Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima (Environmental meteorology; Methods and presentation of investigations relevant for planning urban climate). Berlin: Beuth Verlag.
- [23] Stadt Regensburg (Hrsg. 2014): Stadtklimagutachten Regensburg. 136 S. <https://www.regensburg.de/fm/121/1-klimagutachten-gutachten-regensburg-2014b.pdf>
- [24] Stadt Würzburg (Hrsg. 2016): Klimaplanatlas der Stadt Würzburg. Stadtklimatische Analyse mit Planungsempfehlungen. 62 S. https://www.wuerzburg.de/themen/umwelt-verkehr/klimaundenergie/klimaanpassung-der-klimawandel-fordert-uns-heraus1/stadtentwicklung-bauleitplanung/m_574508
- [25] Stadt Ulm (Hrsg. 2018): Stadtklimaanalyse Ulm 2018. https://www.ulm.de/-/media/ulm/sub/sub-ii/downloads/stadtklima/klimaanalyse_endbericht.pdf
- [26] Stadt Bayreuth (Hrsg. 2000): Stadtklimaanalyse Bayreuth. 52 S. https://www.bayreuth.de/wp-content/uploads/2019/07/Klimagutachten-Bayreuth-Endbericht-M%C3%A4rz2001-Bangert_gesch.pdf

Glossar

Ausgleichsraum

Unbebaute Freifläche, die einem oder mehreren benachbarten → Wirkungsräumen zugeordnet ist und durch die Bildung kühlerer Luft zu einer Minderung deren Hitzebelastung beiträgt.

Blau-grüne Infrastruktur

Grüne Infrastruktur umfasst alle bepflanzten Bereiche einer Stadt, von großen Parks über Alleen, Straßenbegleitgrün, blühende Kreisverkehre, Spielplätze, Friedhöfe, Gärten bis hin zu Dach- und Fassadenbegrünung. Blaue Infrastruktur bezeichnet aquatische Ökosysteme wie Seen, Flüsse, Teiche oder Wasserspiele. Da blaue und grüne Infrastrukturelemente oft eng miteinander vernetzt sind, spricht man häufig von blau-grüner Infrastruktur.

Fernerkundung

Sammelbegriff für Erdbeobachtung aus dem Weltraum bzw. aus der Luft, d. h. Messungen, die berührungslos über größere Distanzen hinweg stattfinden.

Klimaanalysekarte

Karte mit planungsrelevanten lokalklimatischen Eigenschaften und Prozessen: Verteilung meteorologischer Kenngrößen wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit, relevante Elemente des Kaltluftprozessgeschehens sowie human-biometeorologische Parameter wie die gefühlte Temperatur.

Klimafunktionskarte

s. Klimaanalysekarte

Klimatopkarte

Karte mit zu repräsentativen Stadtstrukturtypen zusammengefassten Flächen, die sehr ähnliche mikroklimatische Bedingungen aufweisen.

Mesoskaliges Modell

(Stadt-)Klimamodell mit einer räumlichen Auflösung von einigen Dekametern bis zu mehreren Kilometern. Subskalige Prozesse und Hindernisse wie Gebäude werden parametrisiert, d. h. durch andere Parameter ausgedrückt, wie auf Gitterebene vorliegen.

Mikroskaliges Modell

(Stadt-)Klimamodell mit einer räumlichen Auflösung von wenigen Metern bis Kilometern. Je nach Gitterweite können einzelne Gebäude oder Vegetationselemente direkt abgebildet werden.

Lastraum

s. Wirkungsraum

Planungshinweiskarte

Bewertung der klimaökologischen Funktion von → Wirkungs- und → Ausgleichsräumen.

Wirkungsraum

Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum, der thermisch belastet sein kann.



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

