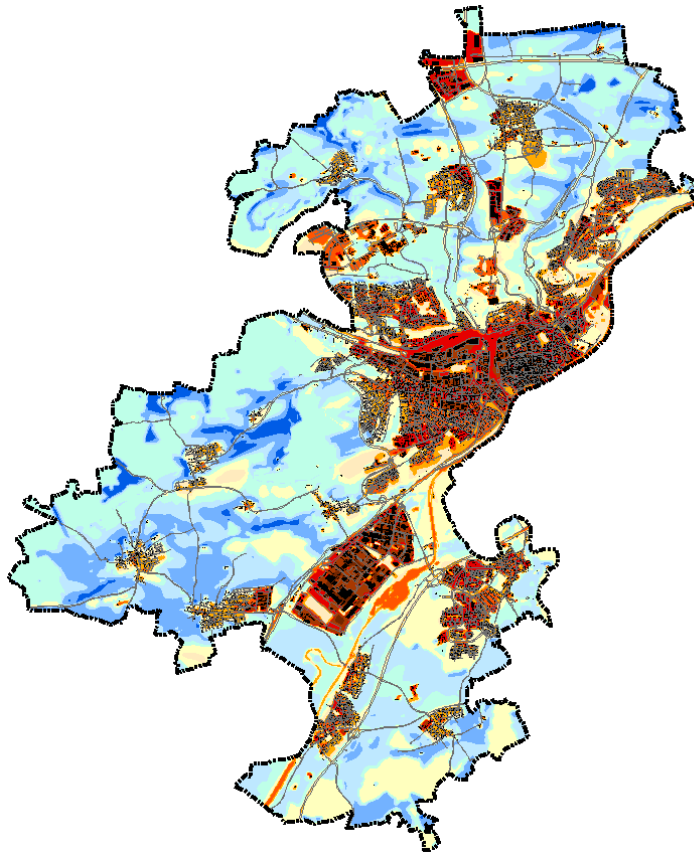


Stadt Ulm

ulm

Stadtklimaanalyse Ulm 2018



Stadt Ulm
Hauptabteilung Stadtplanung, Umwelt und Baurecht
Abteilung Strategische Planung

Erstellt von:
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover

Veröffentlichung:
Oktober 2018





Inhaltsverzeichnis

Glossar	IV
1 Einleitung	1
2 Fachliche Grundlagen	4
2.1 Der Stadtklimaeffekt	4
2.2 Meteorologische und geographische Bedingungen im Untersuchungsraum	5
2.2.1 Geographische Lage des Untersuchungsgebiets	5
2.2.2 Klimatische Bedingungen	6
2.3 Bisherige Klimauntersuchungen	9
2.4 Exkurs: Planungsrechtliche Grundlagen	10
3 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse	12
3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH 3D	12
3.2 Betrachtete Wetterlage	14
3.3 Eingangsdaten	14
4 Modellergebnisse ausgewählter Parameter	17
4.1 Vorgehensweise	17
4.2 Nächtliches Temperaturfeld	17
4.3 Kaltluftströmungsfeld	19
4.4 Kaltluftvolumenstrom	22
4.5 Thermische Belastung am Tage	24
5 Klimaanalysekarte	27
5.1 Vorgehensweise	27
5.2 Ergebnisse	27
6 Planungshinweiskarten	31
6.1 Vorgehensweise	31
6.1.2 Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen (Wirkungsraum)	32
6.1.3 Bewertung der Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum)	33
6.2 Ergebnisse	36
7 Betroffenheitsanalyse	43
8 Maßnahmenkatalog Klimaanpassung	46
9 Zusammenfassung und Ausblick	52
Quellenverzeichnis	54
Anhang	56



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: MAXIMALE WÄRMEINSELINTENSITÄTEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER EINWOHNERZAHL FÜR AUSGEWÄHLTE STÄDTE (KUTTLER 2011A; MODIFIZIERT VON GEO-NET)	2
Abb. 2: PRINZIPIKIZZE FLURWIND.....	4
Abb. 3: GELÄNDEHÖHEN IM UNTERSUCHUNGSGEBIET (DGM 25 M)	6
Abb. 4: KLIMADIAGRAMM ULM BASIEREND AUF DEN WERTEN DER LUBW-STATION 1995-2017	7
Abb. 5: JAHRESMITTELTEMPERATUR FÜR DEN ZEITRAUM 1995 - 2017 IN ULM-WESTSTADT (LUBW 2018).....	8
Abb. 6: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG FÜR DEN ZEITRAUM 1995 - 2017 FÜR DIE MESSSTATION ULM BASIEREND AUF 30-MINUTEN-MITTELWERTEN (LUBW 2018)	8
Abb. 7: HÄUFIGKEITEN VON WINDGESCHWINDIGKEITEN IN DEN SOMMERMONATEN JUNI, JULI UND AUGUST FÜR DEN ZEITRAUM 1995 BIS 2017 AN DER MESSSTATION IN ULM (LUBW 2018)	9
Abb. 8: AUSSCHNITT AUS DER ANALYSEKARTE DER REGIONALEN KLIMAAANALYSE DONAU – ILLER (REGIONALVERBAND DONAU – ILLER, 2015)	10
Abb. 9: TEMPERATURVERLAUF UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT VERSCHIEDENER LANDNUTZUNGEN	13
Abb. 10: FLÄCHENKULISSE "IST-ZUSTAND" MIT LUFTBILD UND ERGÄNZENDEN FNP-FLÄCHEN/INNENENTWICKLUNGSGEBIETEN	15
Abb. 11: SCHEMA DER WERTEZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION	16
Abb. 12: NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD (2 M Ü. GRUND) IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS ULM MIT BEISPIELHAFTEN WERTEN FÜR VERSCHIEDENE NUTZUNGSSTRUKTUREN	19
Abb. 13: NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS ULM (WINDPFEILE AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 100 M)	21
Abb. 14: PRINZIPIKIZZE KALTLUFTVOLUMENSTROM	22
Abb. 15: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS ULM (WINDPFEILE AUS Abb. 13 ÜBERNOMMEN)	24
Abb. 16: WÄRMEBELASTUNG AM TAGE IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS ULM MIT BEISPIELHAFTEN WERTEN VERSCHIEDENER NUTZUNGSSTRUKTUREN	26
Abb. 17: KLIMAAANALYSEKARTE FÜR EINEN AUSSCHNITT DES ULMER STADTGEBIETS (GESAMTSTÄDTISCHE DARSTELLUNG IM A3-FORMAT IM ANHANG)	29
Abb. 18: VERANSCHAULICHUNG DER STANDARDISIERUNG ZUR VERGLEICHENDEN BEWERTUNG VON PARAMETERN (Z-TRANSFORMATION) ...	31
Abb. 19: PLANUNGSHINWEISKARTE NACHTSITUATION FÜR EINEN AUSSCHNITT DES ULMER STADTGEBIETS (GESAMTSTÄDTISCHE DARSTELLUNG IM A3-FORMAT IM ANHANG)	41
Abb. 20: PLANUNGSHINWEISKARTE TAGSITUATION FÜR EINEN AUSSCHNITT DES ULMER STADTGEBIETS (GESAMTSTÄDTISCHE DARSTELLUNG IM A3-FORMAT IM ANHANG).....	42
Abb. 21: VULNERABILITÄTSANALYSE NACHTSITUATION FÜR EINEN AUSSCHNITT DES ULMER STADTGEBIETS (FARBSHEMA ZUR BEWERTUNG VON GRÜN-, SIEDLUNGS- UND VERKEHRSLÄCHEN AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE NACHTSITUATION ENTNOMMEN)	44
Abb. 22: VULNERABILITÄTSANALYSE TAGSITUATION FÜR EINEN AUSSCHNITT DES ULMER STADTGEBIETS (FARBSHEMA ZUR BEWERTUNG VON GRÜN- UND SIEDLUNGSFLÄCHEN AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE TAGSITUATION ENTNOMMEN)	45
Abb. 23: FLÄCHENKULISSE – EMPFEHLUNGEN FÜR DIE MAßNAHME „BAUKÖRPERSTELLUNG UND ABSTANDSFLÄCHEN BEACHTEN“	47
Abb. 24: FLÄCHENKULISSE – EMPFEHLUNGEN FÜR DIE MAßNAHME „ERHÖHUNG DER OBERFLÄCHENALBEDO“	48
Abb. 25: STADTHAUS ULM ALS BEISPIEL FÜR EIN GEBÄUDE MIT HOHER OBERFLÄCHENALBEDO.....	48
Abb. 26: FLÄCHENKULISSE – EMPFEHLUNGEN FÜR DIE MAßNAHME „VERSCHATTUNG VON GEBÄUDEN DURCH BÄUME ODER BAUTECHNISCHE MAßNAHMEN“	49
Abb. 27: VERSCHATTUNGSMAßNAHMEN (HIER: SONNENSCHIRME UND BÄUME) SCHÜTZEN VOR DER SOMMERLICHEN WÄRMEBELASTUNG IN DER ULMER INNENSTADT.....	50
Abb. 28: AUSFÜHRUNGSBEISPIELE FÜR FASSADENBEGRÜNUNG IN DER ULMER INNENSTADT	50
Abb. 29: KÜNSTLICHE WASSERFLÄCHEN: BRUNNEN IN ULM.....	51
Abb. 30: MIKROKLIMATISCHE VIELFALT ENTLANG DER DONAU.....	51



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN FÜR DEN BEWERTUNGSINDEX PET WÄHREND DER TAGESSTUNDEN (NACH VDI 2004)...	25
TABELLE 2: FLÄCHENANTEILE DER NÄCHTLICHEN ÜBERWÄRMUNG IM SIEDLUNGS- UND GEWERBERAUM	28
TABELLE 3: EINORDNUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG IM WIRKUNGSRAUM IN DER NACHT (LUFTTEMPERATUR T_a) SOWIE AM TAGE (PET) UND FLÄCHENMITTELWERT SOWIE STANDARDABWEICHUNG (SD) DER METEOROLOGISCHEN PARAMETER FÜR DIE ENTSPRECHENDEN FLÄCHEN IM STADTGEBIET ULMs	32
TABELLE 4: EINORDNUNG DES KALTLUFTVOLUMENSTROMS (z-TRANSFORMATION)	34
TABELLE 5: EINORDNUNG DER PET FÜR DIE BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN AM TAG	35
TABELLE 6: FLÄCHENANTEILE BIOKLIMATISCH BELASTETER SIEDLUNGSGBIETE IN DER NACHT UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE	37
TABELLE 7: FLÄCHENANTEILE BIOKLIMATISCH BEDEUTENDER GRÜNAREALE IN DER NACHT UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.....	38
TABELLE 8: FLÄCHENANTEILE BIOKLIMATISCH BELASTETER SIEDLUNGSGBIETE AM TAGE UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.....	39
TABELLE 9: FLÄCHENANTEILE BIOKLIMATISCH BEDEUTENDER GRÜNAREALE AM TAGE UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE	40
TABELLE 10: BEISPIELE FÜR MAßNAHMEN ZUR KLIMAAANPASSUNG	46



Glossar

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

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

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

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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

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

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

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

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



Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung (Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen \rightarrow Kaltluftvolumenstrom $> 105 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durchflossen werden; Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Flächen im Stadtgebiet).

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

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

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der \rightarrow Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an \rightarrow Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer \rightarrow Kaltluftleitbahn fließt. Anders als das \rightarrow Strömungsfeld berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

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

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

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

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

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

Strahlungswetterlage \rightarrow Autochthone Wetterlage

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

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

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

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



1 Einleitung

ZIELE UND ANALYSEANSATZ

Das Schutzgut *Klima* ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung (vgl. Kapitel 2.4) und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Angesichts des weiterhin anhaltenden Bevölkerungswachstums in Ulm einerseits als auch der im Zuge des Klimawandels erwarteten lang anhaltenden Hitzeperioden und zunehmenden Temperaturen andererseits besteht hier Handlungsbedarf. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse und auch die Unterstützung gesundheitlich unbedenklicher Luftqualität ab.

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

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

Aus dieser Untergliederung in Wirk- und Ausgleichsräume sowie verbindende Strukturen ergibt sich ein komplexes Bild vom Prozesssystem der Luftaustauschströmungen des Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüges, welches kartographisch in Form der **Klimaanalysekarte** abgebildet ist. Anschließend wurden in einem weiteren Schritt die Empfindlichkeiten dieser Funktionen/Räume gegenüber strukturellen Veränderungen bewertet und in Form von **Planungshinweiskarten** dargestellt. Die Umsetzung in raumspezifische klimaökologische Qualitätsziele mündet in der Forderung nach Handlungsempfehlungen. Durch konkrete Zuordnung planungsrelevanter Aussagen zu den wichtigen, das klimaökologische Prozessgeschehen steuernden Strukturelementen wie z. B. Kaltluftentstehungsflächen können Flächen benannt werden, die in ihrem Bestand gesichert und vor negativen Einflüssen geschützt werden sollen. Andererseits werden Belastungsräume mit einem Mangel an Durchlüftung identifiziert, welche mithin sanierungsbedürftig sind. Dieses Vorgehen unterscheidet sich damit von der früher verbreiteten - und sich im Wesentlichen auf die VDI Richtlinie 3787 Blatt 1 stützenden - statischen Betrachtung auf der Basis von Klimatopen, in welchen ein, den unterschiedlichen Nutzungen entsprechendes, einheitliches Mikroklima unabhängig von der Lage des Klimatops angenommen wird (VDI 2015). Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung eingesetzte Methode bietet den Vorteil, dass das Luftaustauschgeschehen und die Verhältnisse der bodennahen Atmosphäre umfassend abgebildet werden. Somit liegt eine räumlich hochauflösende Information und Bewertung der klimaökologischen Gegebenheiten für die Nacht- und Tagsituation vor, welche für die verschiedenen Planungsebenen/-träger bereitgestellt werden. Die Klimaanalysekarte sowie die Planungshinweiskarten sind im Format DIN A0 jeweils für das gesamte Stadtgebiet (Maßstab 1: 25.000) als auch für den zentralen Bereich von Ulm (Maßstab 1: 10.000) in der Auflösung 300 dpi erstellt worden. Außerdem sind sie im Anhang im verkleinerten Format DIN A3 zu finden.



EINORDNUNG DER ULMER STADTKLIMAS

In Ulm liegt ein verhältnismäßig günstiges Stadtklima vor. Das Stadtzentrum befindet sich in Tallage im Bereich der Donau und Blau und das Relief ist allgemein abfallend von West nach Ost. Aufgrund der guten Reliefbedingungen (keine Kessellage wie beispielsweise in Stuttgart) können Luftbelastungen (u.a. Feinstaub und Stickoxide) auch bei austauscharmen Wetterlagen leichter abgebaut werden, jedoch sind bei Inversionswetterlagen dicht bebaute Siedlungsbereiche im Blautal anfälliger für Schadstoffanreicherungen als die übrigen Stadtteile. In Bezug auf den Kaltlufthaushalt sorgen die Hangabwinde der Schwäbischen Alb insbesondere in der Nacht für eine kühlende Wirkung und stellen der Stadt Frischluft bereit.

Das Temperaturniveau der Stadt fällt im Vergleich zu anderen Städten Baden-Württembergs (z.B. Freiburg mit 11,1 °C Jahresdurchschnittstemperatur) relativ niedrig aus. Die Ulmer Jahresmitteltemperatur von ca. 9 °C entspricht in etwa der Jahresmitteltemperatur von Hamburg (vgl. Kapitel 2.2.2). Da das Klima in Ulm kontinental und in Hamburg vorwiegend maritim geprägt ist, sind jedoch die Winter in Ulm insgesamt kühler und die Sommermonate wärmer als in Hamburg. Das Temperaturniveau Ulms wird außerdem durch seine Höhe über dem Meeresspiegel (zwischen 459 m bis 646 m, vgl. Kapitel 2.2.1) herabgesetzt.

Unabhängig von der geographischen Lage (geographische Breite, Höhenlage und Lage zum Meer) der Stadt nimmt vor allem die Einwohnerzahl einen starken Einfluss auf das städtische Klima (Oke 1973). Gründe hierfür sind bspw. der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenüber steht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (vgl. Kapitel 2.1). Der städtische Wärmeinseleffekt bzw. die Wärmeinselintensität bezieht sich auf horizontale Temperaturunterschiede zwischen städtischen Baukörpern und dem umgebenden unbebautem Umland (Abb. 1).

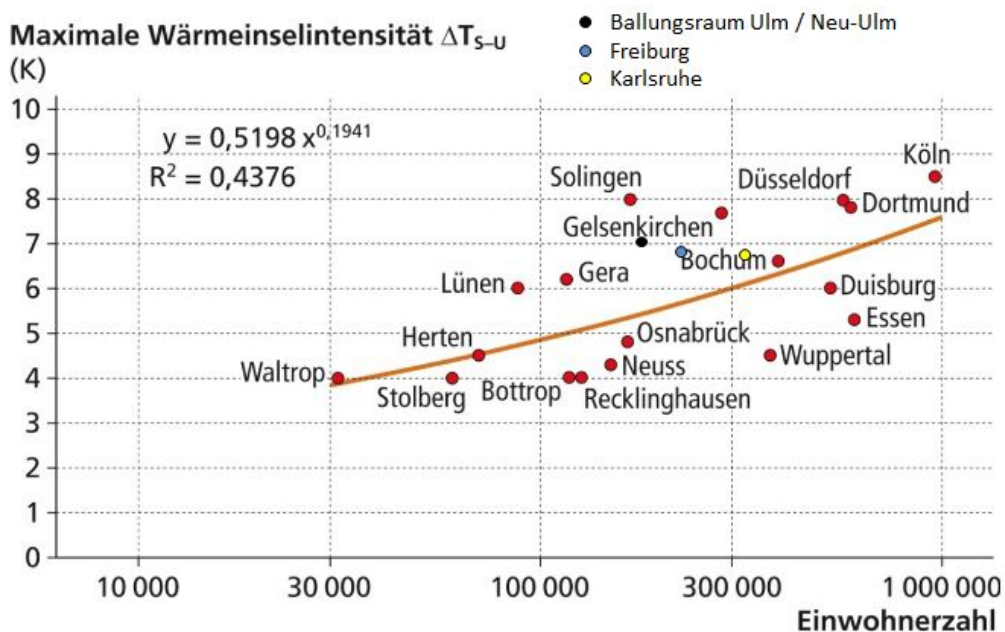


Abb. 1: Maximale Wärmeinselintensitäten in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl für ausgewählte Städte (Kuttler 2011a; modifiziert von GEO-NET)

Für das Verständnis des Wärmeinseleffektes muss aufgrund der unmittelbaren Angrenzung Neu-Ulms der gesamte polyzentrische Ballungsraum Ulm/Neu-Ulm betrachtet werden. Im Ballungsraum Ulm/Neu-Ulm wohnen aktuell fast 200 000 Menschen (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2018). Vergleichbar große Städte sind Solingen (Wärmeinselintensität von 8 K), Osnabrück (Wärmeinselintensität von knapp



5 K) und Neuss (Wärmeinselintensität von knapp über 4 K). Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Klimaanalysekarte zeigt, dass in Ulm Wärmeinselintensitäten im Bereich von 7 K (sehr kleinräumig sogar bis zu 8,3 K auftreten; vgl. Kapitel 5). Gemäß der Abb. 1 ist die Wärmeinselintensität des Ballungsraums Ulm/Neu-Ulm somit in etwa vergleichbar mit den Städten Freiburg, Karlsruhe und Bochum. Ursache für den in Bezug zur Einwohnerzahl relativ hohen Wärmeinseleffekt im (Neu-)Ulmer Ballungsraum sind zum einen die großflächigen, stark versiegelten Gewerbeflächen, welche vor allem in Neu-Ulm einen Großteil der Siedlungsflächen ausmachen. Diese Flächen stellen in der Nacht die wärmsten Bereiche dar (vgl. Kapitel 4.2) und heben den Wärmeinseleffekt des Gebietes an. Zum anderen ist das Umland mit einer durchschnittlichen Temperatur von 12,2 °C um 4 Uhr nachts (vgl. Kapitel 5.2) verhältnismäßig kühl. Dies kann einerseits auf die Höhenlage über NN und andererseits darauf zurückgeführt werden, dass es sich dabei größtenteils um Ackerflächen (welche sich nachts stärker abkühlen als Gehölzflächen und Wälder) handelt. Dementsprechend ist der Temperaturunterschied zwischen den kühlen Grünflächen und der stark versiegelten Siedlungsflächen entsprechend hoch. Dennoch treten Tropennächte (Tagesminimumtemperatur ≥ 20 °C) nur punktuell in der Innenstadt in der Nähe des Ulmer Münsters sowie auf unbewohnten Gewerbeflächen auf, sodass der nächtliche Schlaf bei sommerlichen, austauscharmen Strahlungswetterlagen nur bedingt beeinträchtigt wird. In der Nacht erreichen die meisten bewohnten Siedlungsflächen eine Temperaturspanne von 16 bis 18 °C, was den optimalen Schlaftemperaturen entspricht (vgl. Kapitel 4.2 und 6.1).

Das derzeit bestehende, angenehme Klima der Stadt Ulm sollte im Zuge des Klimawandels und der geplanten Bautätigkeiten möglichst erhalten bleiben. Insofern ist es wichtig, die Ausprägung des Stadtklimas zu untersuchen und potenzielle Missstände frühzeitig zu erkennen, um die richtigen Maßnahmen zum Erhalt (z.B. durch das Freihalten von Kaltluftleitbahnen) bzw. sogar Verbesserung des Klimas (z.B. Pflanzung von Straßenbäumen) treffen zu können.

2 Fachliche Grundlagen

2.1 DER STADTKLIMAEFFEKT

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

Solch belastenden Situationen entstehen vornehmlich bei Hochdruckwetterlagen und sind durch einen ausgeprägten Tagesgang der Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind und Bewölkung bestimmt (autochthone Wetterlagen). Durch lokal unterschiedliche Abkühlungsraten entstehen Temperatur- und damit Dichteunterschiede, die Ausgleichsströmungen hervorrufen (Flurwinde; Abb. 2).

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

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

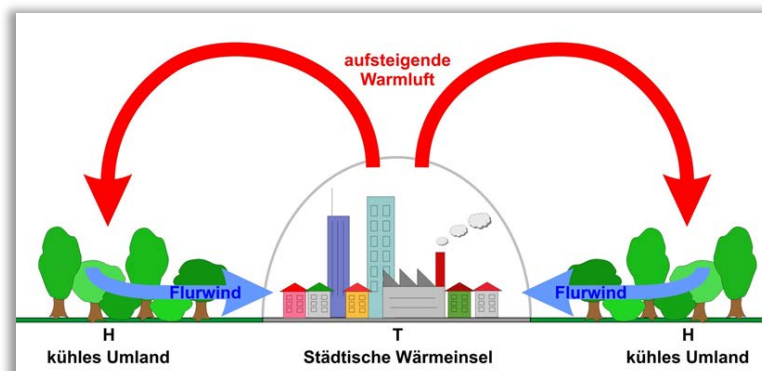


Abb. 2: Prinzipskizze Flurwind



Neben der vom Menschen freigesetzten Abwärme, kommt es durch den hohen Versiegelungsgrad zu einer Erwärmung des Stadtgebietes. Während unbebaute Flächen im Umland schnell auskühlen, erfolgt der Prozess des Abkühlens bei städtischen, versiegelten Flächen über einen längeren Zeitraum. Beton und Asphalt besitzen eine geringe Albedo¹, sodass viel Strahlung absorbiert wird und sich die Flächen am Tag stark aufwärmen. In der Nacht kann die gespeicherte Wärme als langwellige Ausstrahlung an die Atmosphäre abgegeben werden (Häckel 2012, Malberg 2002). Aufgrund der starken Versiegelung und geringeren Wasserverfügbarkeit ist der Energieverbrauch zur Verdunstung herabgesetzt, sodass der latente Wärmestrom in der Stadt geringer, der fühlbare Wärmetransport dagegen höher ausfällt. Beide Aspekte haben höhere Temperaturen des Stadtgebiets im Vergleich zum Umland zur Folge (Schönwiese 2008), sodass deren Bevölkerung einer größeren thermischen Belastung ausgesetzt ist.

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

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

2.2 METEOROLOGISCHE UND GEOGRAPHISCHE BEDINGUNGEN IM UNTERSUCHUNGSRAUM

2.2.1 GEOGRAPHISCHE LAGE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS

Ulm befindet sich am südöstlichen Rand der Schwäbischen Alb und wird im Osten von der Donau und dem Freistaat Bayern begrenzt. Die etwa 118,7 km² große Stadt ist in 18 Stadtteile gegliedert und hat 125.596 Einwohner (Stand 31.12.2017; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 2018). Ulm ist die größte Stadt in der Region Donau-Iller und im Regierungsbezirk Tübingen. Die Stadt liegt auf einer Höhe von etwa 479 m ü. NN (Höhenlage des Rathauses). Das Gebiet ist durch größere Reliefunterschiede geprägt, die von 459 m (Donauufer) bis 646 m ü. NN (Klingensteiner Wald) reichen. Für die Klimaanalyse der Stadt Ulm wurde nicht nur das Stadtgebiet selbst, sondern auch das nähere Umland betrachtet. Insgesamt hat das Untersuchungsgebiet eine Größe von etwa 465 km² bei einer Ausdehnung von ca. 23 x 20 km (Abb. 3). Das Modellgebiet schließt auch die gesamte Fläche (81,1 km²) der Stadt Neu-Ulm mit ein. Die Reliefunterschiede im Untersuchungsgebiet reichen von 450 m (Elchingen an der Donau) bis 676,6 m (Schwäbische Alb). Die meisten Siedlungsbereiche liegen in den niedrigeren Lagen, insbesondere in den Tälern der Donau, der Blau und der Iller.

¹ Rückstrahlvermögen einer Oberfläche

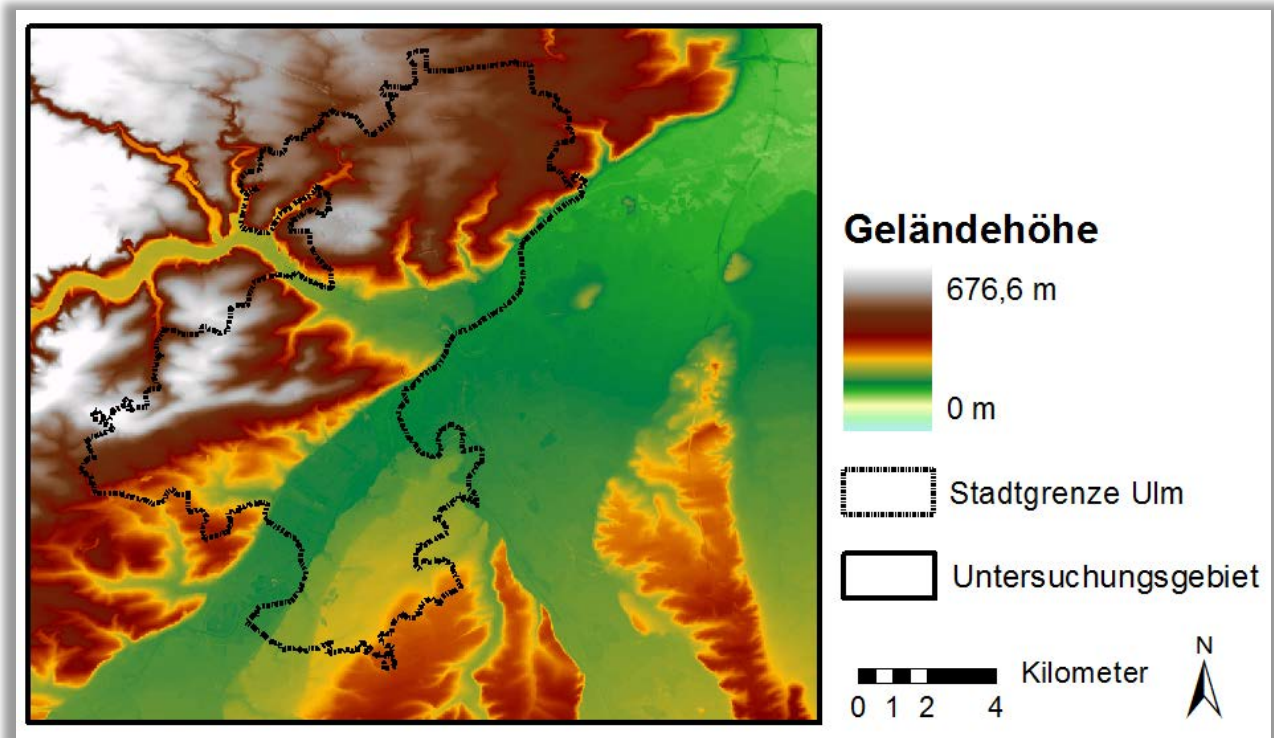


Abb. 3: Geländehöhen im Untersuchungsgebiet (DGM 25 m)

2.2.2 KLIMATISCHE BEDINGUNGEN

Das Klima charakterisiert gemäß Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort bzw. Gebiet und wird durch die statistischen Gesamteigenschaften über einen genügend langen Zeitraum repräsentiert (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, etc.). Im Allgemeinen werden Zeiträume von 30 Jahren zugrunde gelegt – so wurde z.B. die aktuell gültige internationale klimatologische Referenzperiode auf den Zeitraum 1961-1990 festgelegt (DWD 2017a).

Im Folgenden werden die wichtigsten meteorologischen Parameter für die Periode 1995-2017 und damit einen aktuelleren Bezugszeitraum dargestellt. Sie beziehen sich auf den Standort der LUBW-Station in Ulm-Weststadt, für welche Messwerte seit 1995 vorliegen. Innerhalb des Stadtgebiets kann es nutzungs- und reliefbedingt deutliche Abweichungen von den Messwerten an dieser Wetterstation geben.

Ulm liegt in einer gemäßigten Klimazone im Übergangsbereich zwischen ozeanisch und kontinental geprägten Einfluss. Die Witterung wird vornehmlich von Tiefdruckgebieten mit eingelagerten Zwischenhochs bestimmt, sodass wechselnde Wetterlagen auftreten und längere Hochdruckperioden mit beständigem Wetter eher selten sind. Die Lufttemperatur zeigt einen ausgeprägten Jahresgang, auch für den **Niederschlag** ist ein charakteristischer Jahresverlauf zu erkennen (Abb. 4). Im Mittel treten die höchsten Werte, bedingt durch Schauer und Gewitter, in den Sommermonaten Juni bis August auf. Über das ganze Jahr fallen durchschnittlich 744 mm Niederschlag.

Die Lufttemperatur geht tendenziell mit zunehmender geographischer Breite sowie Höhe über dem Meeresspiegel zurück. In Ulm liegt die **Jahresmitteltemperatur** bei knapp über 9 °C (Abb. 5) und damit innerhalb Deutschlands in einem niedrigen Bereich, welcher vergleichbar mit Hamburg ist. Andere Städte wie Frankfurt a.M. (10,1 °C) sowie Freiburg (11,1 °C) weisen dagegen deutlich höhere Werte auf (ohne Abb.; Steinicke & Streifeneder 2012). Auch allgemein im Vergleich zu anderen Städten Baden-Württembergs ist das Klima in Ulm relativ kalt. Mit Blick auf die Entwicklung der Jahresmitteltemperatur



zwischen 1995 und 2017 wird deutlich, dass diese nach 2010 in Ulm überdurchschnittlich hoch ausfällt. Hervorzuheben ist das Jahr 2014 mit einer Jahresmitteltemperatur von über 11,6 °C. Dagegen war das Jahr 2003 trotz des Hitzesommers im August im Jahresmittel verhältnismäßig kühl.

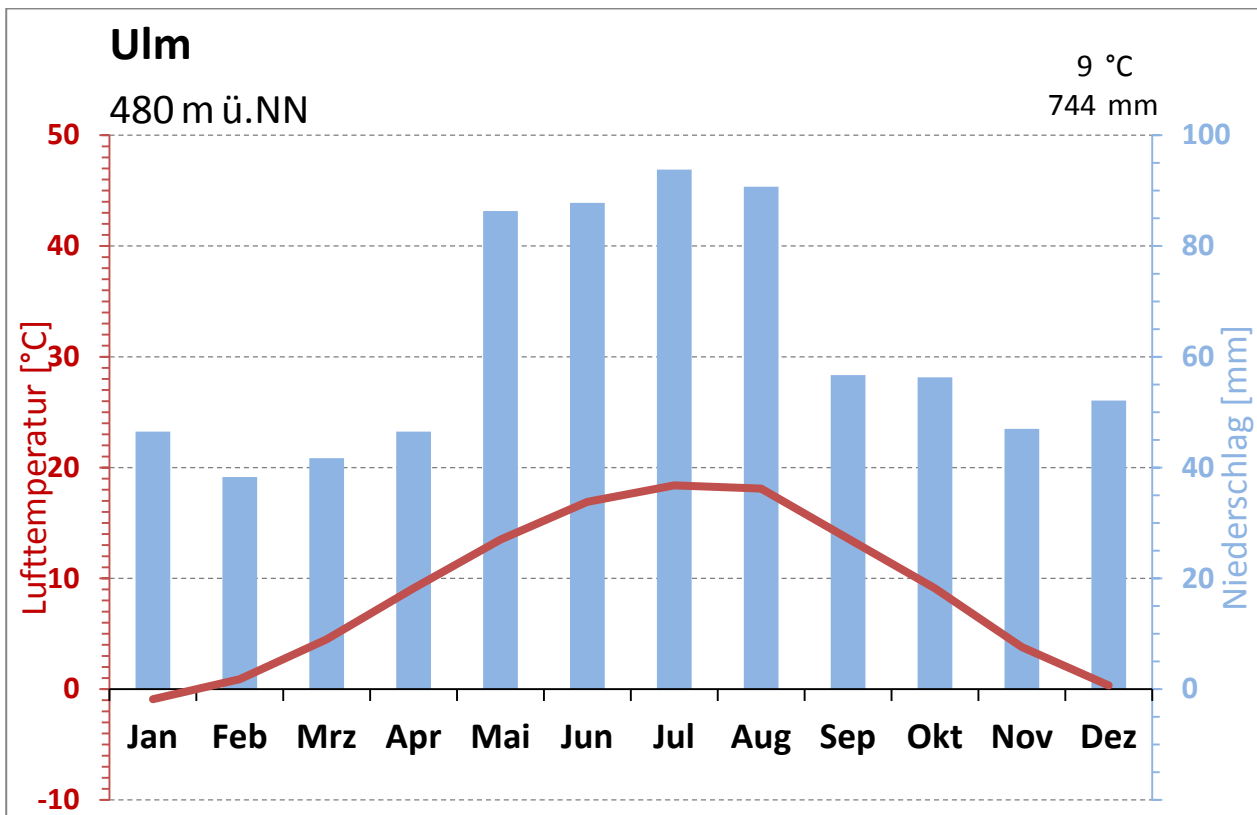


Abb. 4: Klimadiagramm Ulm basierend auf den Werten der LUBW-Station 1995-2017

Die Ulmer LUBW-Station weist im langjährigen Mittel Hauptanströmungsrichtungen aus Westsüdwest bis West auf (Abb. 6). Ein deutlich geringeres sekundäres Maximum verzeichnen westnordwestliche, südsüdwestliche und ostnordöstliche Windrichtungen (Auftreten jeweils ca. 10 % im Messzeitraum), während Strömungen aus dem nördlichen und südlichen Sektor vergleichsweise selten vorkommen. Bedingt durch die Hinderniswirkung insbesondere von Gebäuden, herrschen im Stadtgebiet modifizierte Strömungsverhältnisse vor.

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

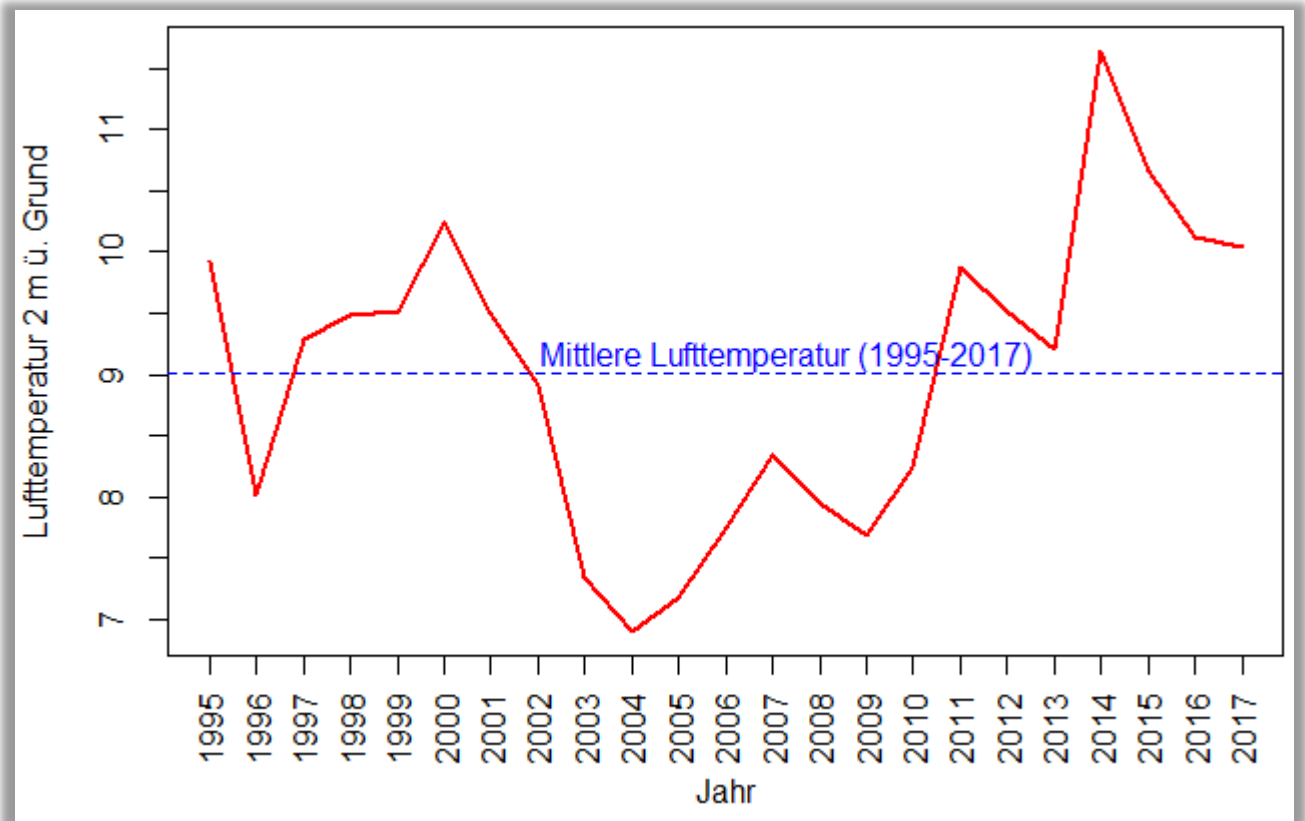


Abb. 5: Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 1995 - 2017 in Ulm-Weststadt (LUBW 2018)

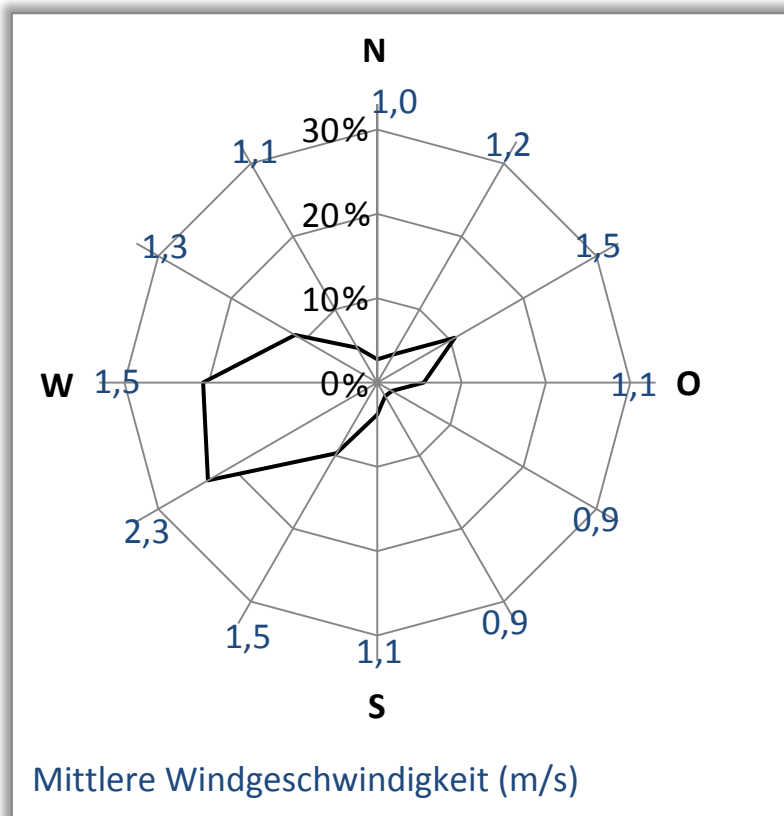


Abb. 6: Windrichtungsverteilung für den Zeitraum 1995 - 2017 für die Messtation Ulm basierend auf 30-Minuten-Mittelwerten (LUBW 2018)



Da vor dem Hintergrund der Hitzebelastung in Städten insbesondere die Sommersituation von Relevanz ist, wurde in der Abb. 7 die Windsituation in den Monaten Juni, Juli und August untersucht. Extreme Schwachwindlagen ($< 0,5 \text{ m s}^{-1}$) kommen während der Sommermonate in Ulm-Weststadt an ca. 14,7 % der Jahresstunden vor. Davon treten 4,6 % der sommerlichen Schwachwindlagen in Form von Kalmen (Windgeschwindigkeit $\leq 0,3 \text{ m s}^{-1}$; nach DWD 2017b) auf. Windgeschwindigkeiten zwischen $0,5 \text{ m s}^{-1}$ und 1 m s^{-1} sind in etwa 35 % der Jahresstunden vorherrschend, wogegen Starkwindereignisse mit über 4 m s^{-1} eher selten sind. Allgemein sind die Winde im Winter stärker und im Sommer schwächer ausgeprägt.

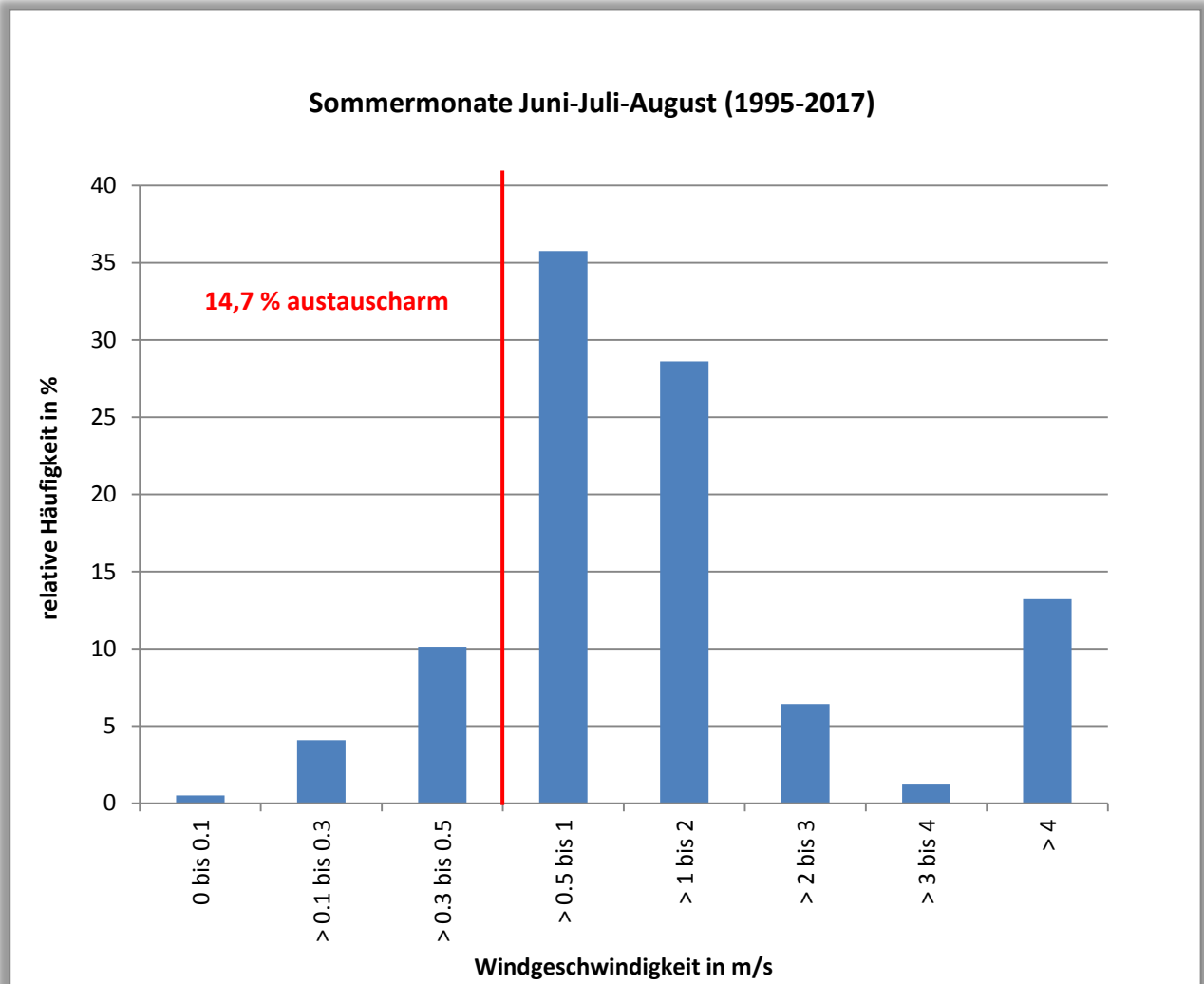


Abb. 7: Häufigkeiten von Windgeschwindigkeiten in den Sommermonaten Juni, Juli und August für den Zeitraum 1995 bis 2017 an der Messtation in Ulm (LUBW 2018)

2.3 BISHERIGE KLIMAUNTERSUCHUNGEN

Mit der Grundlagenkarte Klima/Luft des Nachbarschaftsverbandes Ulm aus dem Jahre 1997, welche im Rahmen des Landschaftsplanes erstellt wurde, war ein erster Grundstein für die Analyse des Ulmer Stadtklimas gelegt. In dieser Karte sind bereits die wesentlichen Bereiche nächtlicher Kaltluftabflüsse dargestellt, welche noch heute (also nach über 20 Jahren) von Bedeutung sind. Ebenso wurden Kaltluftentstehungsgebiete abgegrenzt und Austauschbarrieren identifiziert. Ein weiterer Schwerpunkt sind lufthygienische Aspekte, wie etwa Verkehrsemissionen und Luftschadstoffbelastung.



Die Regionale Klimaanalyse Donau – Iller aus dem Jahre 2015 wurde als Bewertungsgrundlage für den Regionalplan und die kommunale Bauleitplanung erstellt (Regionalverband Donau – Iller, 2015). Mit Hilfe des Kaltluftabflussmodells KLAM_21 wurde unter Einbeziehung des Reliefs und der Landnutzung die Durchlüftungssituation der gesamten Region analysiert. Abb. 8 zeigt den Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den Bereich Ulm. Leitbahnen und Strömungsmuster stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung überein (vgl. Kapitel 5).

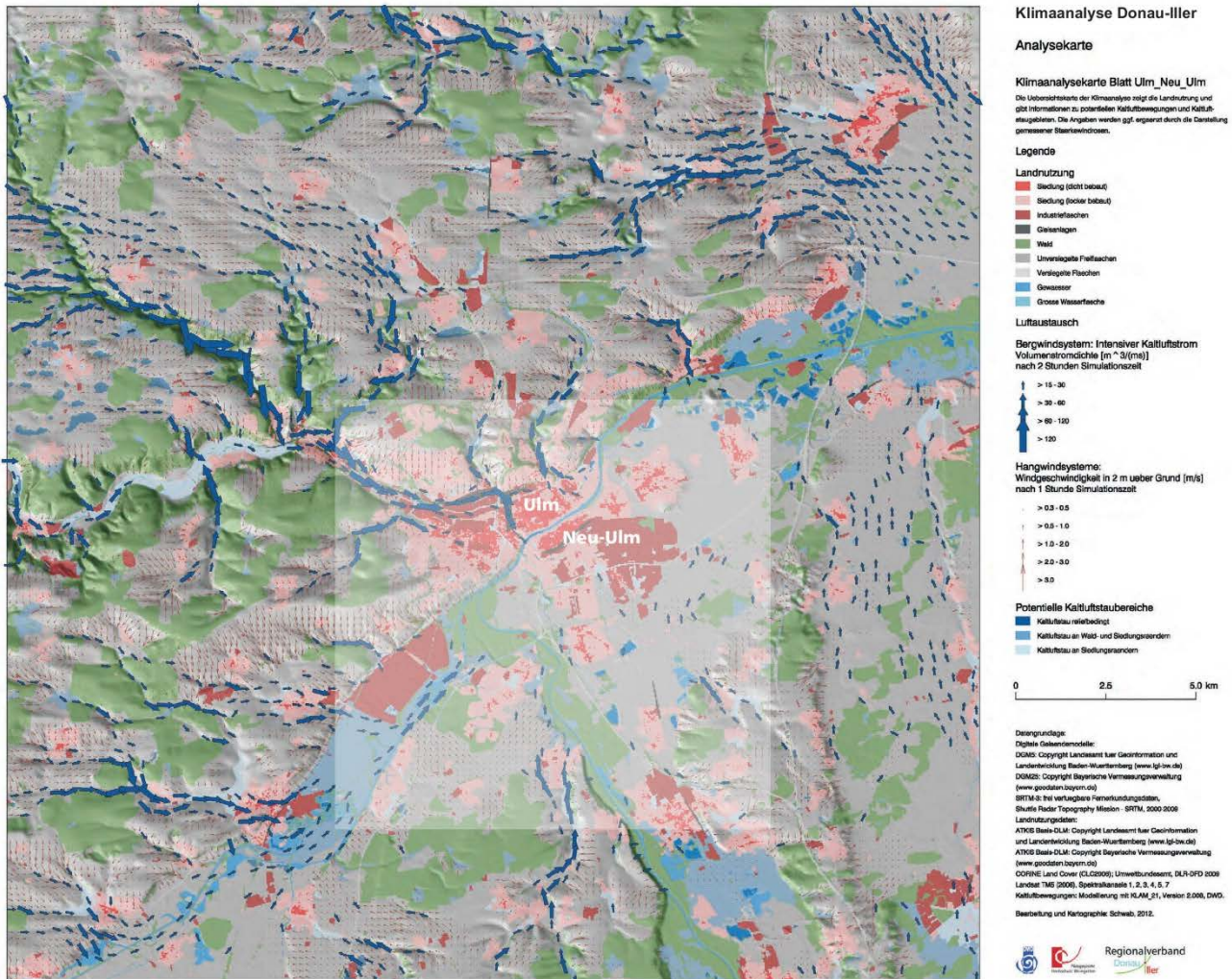


Abb. 8: Ausschnitt aus der Analysekarte der Regionalen Klimaanalyse Donau – Iller (Regionalverband Donau – Iller, 2015)

2.4 EXKURS: PLANUNGSRECHTLICHE GRUNDLAGEN

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



In **Flächennutzungsplänen** (FNP; vorbereitende Bauleitplanung) können z.B. Anlagen, Einrichtungen und sonstige Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, dargestellt werden (§ 5 (2) S. 2c BauGB). So bietet sich durch den FNP bspw. die Möglichkeit der Sicherung von Freiflächen, die der Kaltluftproduktion dienen, sowie von Frischluftbahnen und Ventilationsbahnen (Belüftungsachsen; vgl. Stadt Karlsruhe 2014). In FNP wird vor allem das mesoskalige Klima betrachtet (räumliche Auflösung der Karten ca. 25 m bis 100 m), während in **Bebauungsplänen** (B-Plan; verbindlichen Bauleitplanung) das Mikroklima in den Vordergrund rückt (ca. 2 m bis 10 m; VDI 2014). Nach § 8 (2) sind B-Pläne aus dem FNP zu entwickeln, sodass die dort getroffenen Regelungen berücksichtigt werden müssen. B-Pläne bieten u.a. über folgende Festsetzungen die Möglichkeit stadtklimatischen Anforderungen zu begegnen (vgl. § 9 (1) BauGB):

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

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

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

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



3 Methode der modellgestützten Stadtklimaanalyse

3.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH 3D

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

Der Großteil praxisnaher umweltmeteorologischer Fragestellungen behandelt einen Raum von der Größenordnung einer Stadt bzw. Region. Die bestimmenden Skalen für die hier relevanten meteorologischen Phänomene haben eine räumliche Erstreckung von Metern bis hin zu einigen Kilometern und eine Zeitdauer von Minuten bis Stunden. Unter Verwendung des üblichen Einteilungsschemas meteorologischer Phänomene werden diese in die Meso- und Mikroskala eingeordnet. Beispiele für mesoskalige Phänomene sind Land-See-Winde, Flurwinde oder die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel, wobei der Übergang zur Mikroskala fließend ist (bspw. der Einfluss von Hindernissen auf den Wind wie Kanalisierung, Umströmung bzw. Düseneffekte, aber auch die klimaökologischen Auswirkungen von Begrünungsmaßnahmen).

Obwohl die allgemeine Struktur und physikalischen Ursachen dieser lokalklimatischen Phänomene im Wesentlichen bekannt sind, gibt es nach wie vor offene Fragen hinsichtlich der räumlichen Übertragbarkeit auf andere Standorte oder der Sensitivität bezüglich der Wechselwirkungen einzelner Strömungssysteme untereinander. Ein Grund hierfür sind die relativ kleinen und kurzen Skalen dieser Phänomene und deren unterschiedliches Erscheinungsbild in komplexem Gelände. Entsprechend ist es schwierig aus einer beschränkten Anzahl von Beobachtungen eine umfassende Charakterisierung zu erhalten, jedoch kann dieser Nachteil mit Hilfe ergänzender Modelluntersuchungen überwunden werden.

Beginnend mit einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden in Deutschland eine Reihe mesoskaliger Modelle konzipiert und realisiert (DFG 1988). Der heutige Entwicklungsstand dieser Modelle ist extrem hoch und zusammen mit den über die letzten Dekaden gewonnenen Erfahrungen im Umgang mit diesen Modellen steht neben Messungen vor Ort und Windkanalstudien ein weiteres leistungsfähiges und universell einsetzbares Werkzeug zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen in stadt- und landschaftsplanerisch relevanten Landschaftsausschnitten zur Verfügung.

Sofern ausreichend detaillierte Eingangsdaten zur Verfügung stehen, ist das Modell FITNAH 3D in der Lage, räumlich hoch aufgelöste Berechnungen in einem 10 x 10 m-Raster durchzuführen und ermöglicht damit mikroskalige Stadtklimaanalysen.

GRUNDLAGEN MESO- UND MIKROSKALIGER MODELLE

Die Verteilung lokalklimatisch relevanter Größen wie Wind und Temperatur können mit Hilfe von Messungen ermittelt werden. Aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Variation der meteorologischen Felder im Bereich einer komplexen Umgebung sind Messungen allerdings nur punktuell repräsentativ und eine Übertragung in benachbarte Räume selten möglich. Stadtklimamodelle wie FITNAH 3D können zu entscheidenden Verbesserungen dieser Nachteile herangezogen werden, indem sie physikalisch fundiert die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken zwischen den Messungen schließen, weitere meteorologische Größen berechnen und Wind- bzw. Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden



Struktur ermitteln. Die Modellrechnungen bieten darüber hinaus den Vorteil, dass Planungsvarianten und Ausgleichsmaßnahmen in ihrer Wirkung und Effizienz studiert und auf diese Art und Weise optimierte Lösungen gefunden werden können.

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

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

Allerdings steigen mit feiner werdender Rasterweite die Anforderungen an Rechenzeit und die benötigten Eingangsdaten. Hier muss ein Kompromiss zwischen Notwendigkeit und Machbarkeit gefunden werden. In der vorliegenden Untersuchung beträgt die für die Modellierung mit FITNAH 3D verwendete horizontale räumliche Maschenweite 25 m. Die vertikale Gitterweite ist dagegen nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen z.B. in Höhen von 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind.

Die Auswertungen der FITNAH-Modellierung beziehen sich auf das bodennahe Niveau der Modellrechnung (2 m ü. Gr. = Aufenthaltsbereich der Menschen).

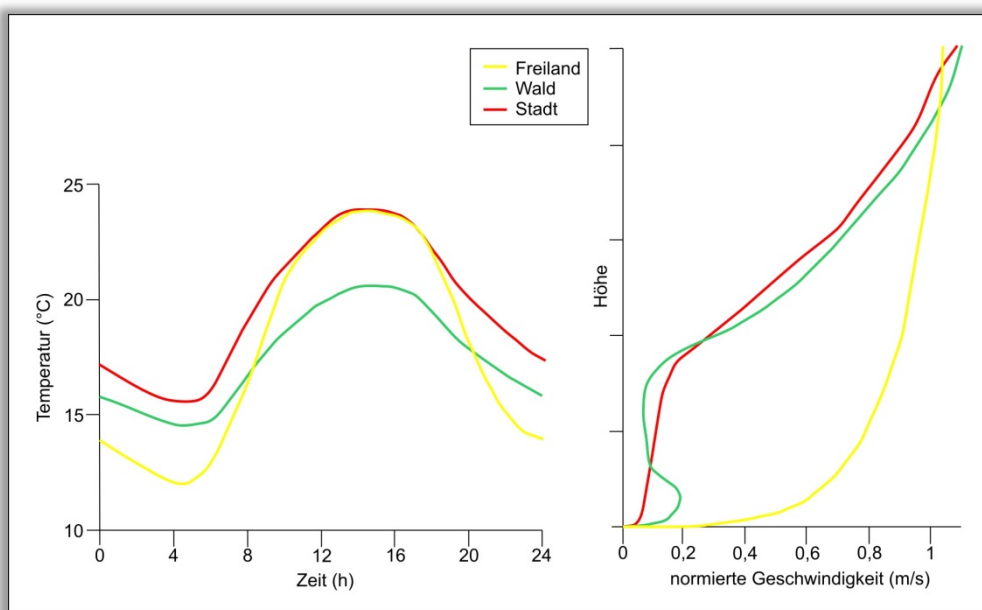


Abb. 9: Temperaturverlauf und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit verschiedener Landnutzungen



3.2 BETRACHTETE WETTERLAGE

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

- ◆ Relative Feuchte der Luftmasse 50 %
- ◆ Bedeckungsgrad 0/8
- ◆ Kein überlagernder geostrophischer Wind

Die vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten während der austauscharmen Wetterlage bedingen einen herabgesetzten Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht. Bei gleichzeitig hoher Ein- und Ausstrahlung können sich somit lokal bioklimatische Belastungsräume ausbilden (Darstellung eines *worst case*-Szenariums). Charakteristisch für diese (Hochdruck-)Wetterlage ist die Entstehung eigenbürtiger Kaltluftströmungen (Flurwinde), die durch den Temperaturgradienten zwischen kühlen Freiflächen und wärmeren Siedlungsräumen angetrieben werden.

In Abb. 9 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage simulierten tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen vor allem durch die Wärme speichernden Materialien deutlich geringer ist. Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

3.3 EINGANGSDATEN

Bei einem numerischen Modell wie FITNAH 3D werden zur Festlegung und Bearbeitung einer Aufgabenstellung eine Reihe von Eingangsdaten benötigt, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind und die größerskaligen meteorologischen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Klimaszenario definieren. Für jede Rasterzelle müssen jeweils als repräsentativer Wert folgende Daten vorliegen:

- ◆ Geländedaten (z.B. Geländehöhe, Neigung, Orientierung)
- ◆ Nutzungsstruktur (Verteilung der Landnutzung, Digitales Landschaftsmodell)

Um flächendeckende Informationen für das gesamte Rechengebiet zu erhalten, wurden verschiedene Digitale Geländemodelle (DGM) verwendet, nämlich ein DGM1 (2017) für Ulm und Umgebung, ein DGM5 für Neu-Ulm, ein DGM50 für Bayern außerhalb Neu-Ulms und das EU-DEM25 für einen kleinen Bereich in Baden-Württemberg, der noch durch kein anderes Höhenmodell abgedeckt war.

Die Landnutzung wurde anhand aktueller Luftbilder (Bezugsjahr 2016 für Ulm; 2017 für Neu-Ulm) abgeglichen und auf Plausibilität geprüft.

Weiterhin wurde ein LOD1-Stadtmodell (2017) zur individuellen Ermittlung von Gebäudehöhen verwendet. Die Strukturhöhe von Grünstrukturen wurde in Abhängigkeit der Landnutzung (z.B. Acker, Wald) parametrisiert. Ebenfalls berücksichtigt wurden die Strukturhöhen linienhafter Lärmschutzwände als Strömungshindernisse. Einzelne Bäume konnten in dem 25 m x 25 m breiten Rechengitter jedoch nicht separat ausgewiesen werden. Neben der Strukturhöhe ging auch der Versiegelungsgrad der verschiedenen

Oberflächen in die Modellrechnung mit ein, welcher in Abhängigkeit der Landnutzung parametrisiert wurde.

Die Ulmer Flächenkulisse, welche für die Klimasimulation als „Ist-Zustand“ angenommen wurde, basiert zum einen auf den Orthophotos 2016 (2017) von Ulm (Neu-Ulm), zum anderen aber auch auf den FNP-Gebieten Ulms, welche bereits realisiert oder begonnen wurden oder zur Zeit im Bebauungsplanverfahren sind (Abb. 10). Außerdem werden auch vier Innenentwicklungsgebiete (Dichterviertel, Safranberg, Egginger Weg und Weinberg) berücksichtigt. Die neuen FNP-Flächen auf Neu-Ulmer Seite bleiben hingegen unberücksichtigt; es wird angenommen, dass diese keinerlei Auswirkung auf das Stadtklima Ulms nehmen.

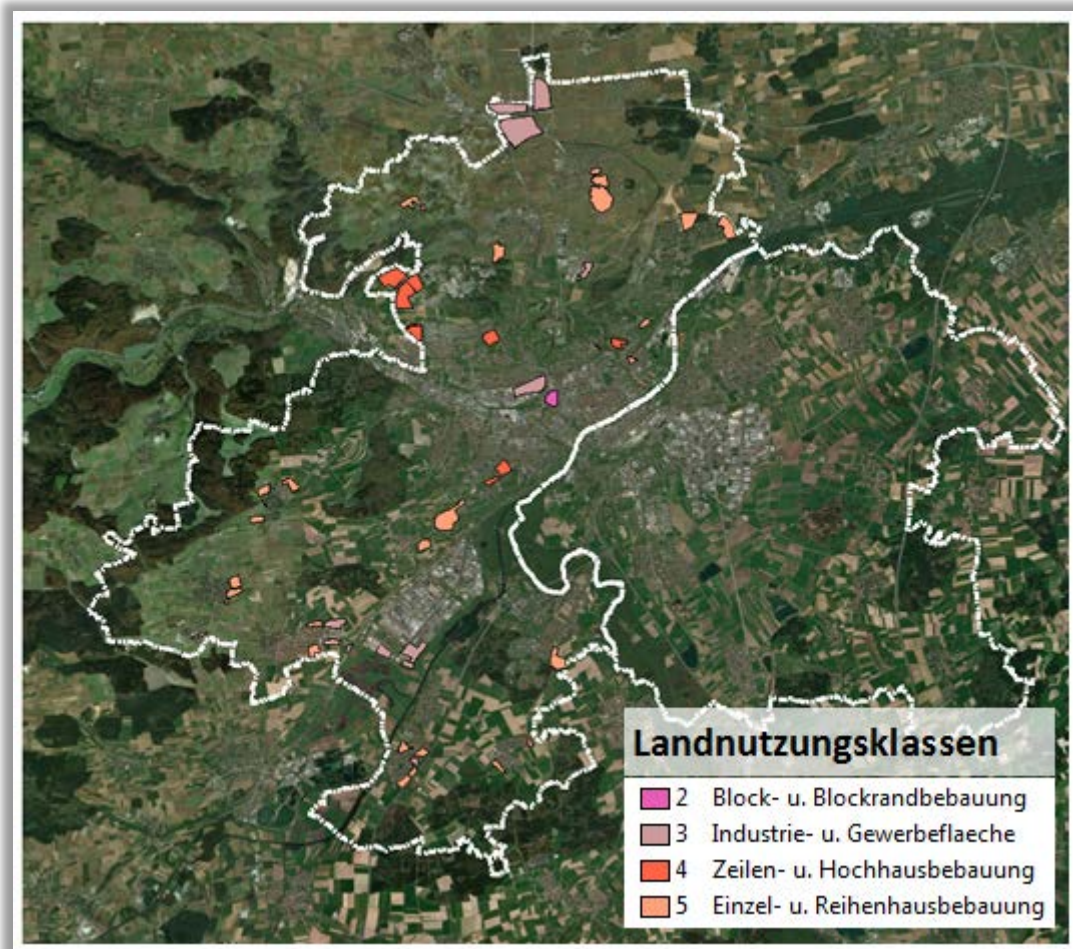


Abb. 10: Flächenkulisse "Ist-Zustand" mit Luftbild und ergänzenden FNP-Flächen/Innenentwicklungsgebieten

ABGRENZUNG UND BEWERTUNG DER KLIMAÖKOLOGISCH WIRKSAMEN NUTZUNGSSTRUKTUREN

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den flächenhaft vorliegenden Nutzungsinformationen punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Maschenweite von 25 m zu erzeugen. Aus diesen punkthaften Repräsentationen der Eingangsvariablen ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten Modellergebnisse in Form feldhaft berechneter Klimaparameter (Abb. 11). Qualifizierende Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Um die Ausprägung der Klimaparameter auf planungsrelevante und maßstabsgerechte Einheiten zu übertragen, wurden den Referenzflächen der verwendeten digitalen Nutzungsinformationen die relevanten



Klimaparameter wie z.B. Lufttemperatur oder Kaltluftvolumenstrom zugeordnet. Dafür wurden alle Rasterzellen, die von einer bestimmten Fläche überdeckt werden, mit Hilfe zonaler Analysen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Auf diese Weise erhält jede Fläche eine umfassende Statistik aller zugehörigen Klimaparameter, die u.a. den Mittelwert der flächenspezifischen Werteausprägungen umfasst.

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

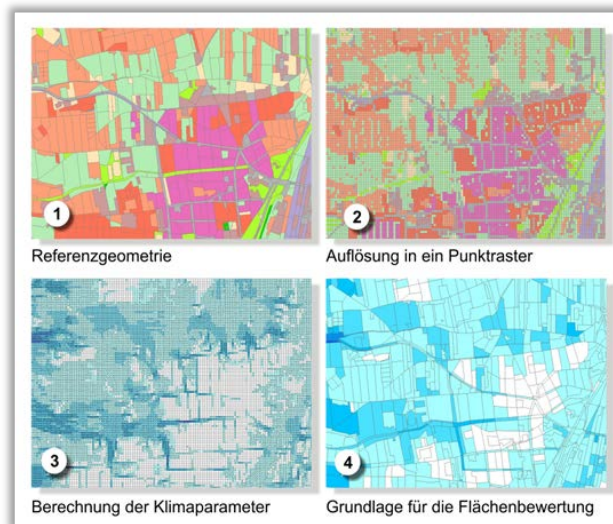


Abb. 11: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation



4 Modellergebnisse ausgewählter Parameter

4.1 VORGEHENSWEISE

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) beschrieben. Sie basieren auf einer räumlichen Auflösung von 25 m (pro Rasterzelle ein Wert) und gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen (in 2 m ü. Gr.) sowie eine autochthone Sommerwetterlage (vgl. Kapitel 3.2). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Flächenbezogene Analysen werden im anschließenden Kapitel zu den Klimaanalysekarten vorgenommen (z.B. die Ableitung von Kaltluftleitbahnen).

4.2 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

ALLGEMEINES

Der Tagesgang der Lufttemperatur ist direkt an die Strahlungsbilanz eines Standortes gekoppelt und zeigt daher i.d.R. einen ausgeprägten Rückgang während der Abend- und Nachtstunden. Kurz vor Sonnenaufgang des nächsten Tages wird das Temperaturminimum erreicht. Das Ausmaß der Abkühlung kann, je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage des Standorts und landnutzungsabhängigen physikalischen Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften, große Unterschiede aufweisen. Besonders auffällig ist das thermische Sonderklima der Siedlungsräume mit seinen gegenüber dem Umland modifizierten klimatischen Verhältnissen.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im **Siedlungsbereich** ist vor allem von der Größe der Stadt und der Dichte der Überbauung abhängig. Doch auch über **grünbestimmten Flächen** weisen Luftvolumina keinen einheitlichen Wärmezustand auf. Die Abkühlungsrate natürlicher Oberflächen wird insb. von ihren thermischen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) sowie eventuell vorhandenen Oberflächenbedeckungen bestimmt (Bewuchs, Laubstreu, etc.). Dynamische Luftaustauschprozesse zwischen den Flächen, das Relief in Form von Geländehöhe, Exposition sowie Geländeneigung und die Lage im Mosaik der Landnutzungen üben weiteren Einfluss aus (bspw. macht es einen Unterschied, ob sich eine Freifläche neben einem Gewässer, Waldgebiet oder dicht versiegelten Bereich befindet).

Eine Sonderstellung nehmen Wald- und Gewässerflächen ein. Der gedämpfte, insgesamt vermittelnde Tagesgang der Temperatur im **Wald** beruht zu einem großen Teil auf dem zweischichtigen Strahlungsumsatz zwischen Atmosphäre und Kronendach sowie zwischen Kronendach und Stammraum. Größere Waldgebiete sind wichtige Frischluftproduktionsgebiete, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Während im Stammraum tagsüber durch Verschattung und Verdunstung relativ geringe Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit vorherrschen, treten nachts durch die abschirmende Wirkung des Kronendachs vergleichsweise milde Temperaturen auf. Stadtnahe Wälder können demnach auch am Tage Kaltluft zugunsten des Siedlungsraumes erzeugen, nachts fällt deren Kaltluftproduktion dagegen geringer aus als über unversiegelten Freiflächen – außerdem können sie ein Strömungshindernis darstellen. Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wassern, seine besondere Art der Strahlungsabsorption und die im Wasserkörper stattfindenden turbulenten Durchmischungsvorgänge sorgen für eine (von hohen Absolutwerten ausgehend) deutlich verringerte diurnale Temperaturamplitude über größeren Gewässern. Da hier die Lufttemperaturen im Sommer tagsüber niedriger und nachts höher als in der



Umgebung sind, wirken größere **Gewässer** auf bebaute Flächen am Tage klimatisch ausgleichend, während sie in der Nacht deren Abkühlung verringern.

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

ERGEBNISSE TEMPERATURFELD

Das sich um 04:00 Uhr in der Nacht einstellende Lufttemperaturfeld im Untersuchungsraum umfasst bei Minimalwerten von 9,6 °C über stadtfernen Freiflächen und Maximalwerten von 20,7 °C im Stadtkern eine Spannweite von 11,1 K. Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 13,8 °C.

Das Temperaturfeld ist auch innerhalb der bebauten Gebiete räumlich differenziert, weil Areale mit Einzelhaus- oder Zentrumsbebauung und Verkehrsanlagen unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen (Abb. 12).

Die höchsten Temperaturen treten kleinräumig mit > 20 °C in den Kernbereichen der Innenstadt sowie in größeren Industrie- und Gewerbegebieten auf. Sie resultieren aus dem hohen Bauvolumen und Oberflächenversiegelungsgrad. Der Großteil des mittelalterlichen Stadtkerns und die meisten Industrie- und Gewerbeflächen sind durch ein erhöhtes Temperaturniveau zwischen 19 und 20 °C gekennzeichnet. Dazu zählen unter anderem die Gewerbeflächen *Donautal*, *Blaubeurer Straße*, *Wörthstraße/Sedanstraße* und *Einsingen*. Große Teile der Richtung Stadtrand gelegenen Siedlungsflächen sind durch eine ausgedehnte Einzel- und Reihenhausbauung geprägt (u.a. *Michelsberg*, *Söflingen* oder *Jungingen*). Diese weisen unter den bebauten Flächen mit durchschnittlich 16,4 °C das geringste Temperaturniveau auf, Werte über 18 °C werden nur in wenigen Ausnahmefällen erreicht. Die durch Abstandsflächen geprägte Zeilen- und Hochhausbebauung, wie sie z.B. am *Weinberg* auftritt, liegt mit durchschnittlich 17,7 °C zwischen den übrigen Strukturtypen.

Im Temperaturfeld treten unbebaute, vegetationsgeprägte Freiflächen mit deutlich geringeren Werten hervor. Die niedrigsten Temperaturen im Untersuchungsgebiet sind mit weniger als 11 °C über ausgedehnten landwirtschaftlich genutzten Arealen im Außenbereich Ulms und im Umland zu verzeichnen. Ähnlich geringe Werte können in Senkenbereichen auftreten, in denen sich Kaltluft aufgrund ihrer – im Vergleich zu wärmeren Luftmassen – höheren Dichte sammelt. In Wäldern dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit auch ein stärkeres Absinken der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. Temperaturwerte um 13 bis 14 °C erreicht werden (z.B. *Maienwald*, *Klingensteiner Wald*). Verglichen mit den weitläufigen Freiräumen des Umlandes weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 15 - 17 °C ein höheres Wertespektrum auf (z.B. *Blaupark*, *Karlsplatz*, *Alter Friedhof*), wobei eine Abhängigkeit von ihrer Größe und Grünstruktur besteht. So sinkt die Temperatur über kleineren Grünflächen nur selten unter 16 °C, da sie in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet sind (z.B. *Karlsplatz*). Größere vegetationsgeprägte Areale treten dagegen im Stadtgebiet mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen deutlich hervor und stellen demnach potentielle Entlastungsräume für die umliegenden Siedlungsflächen dar.

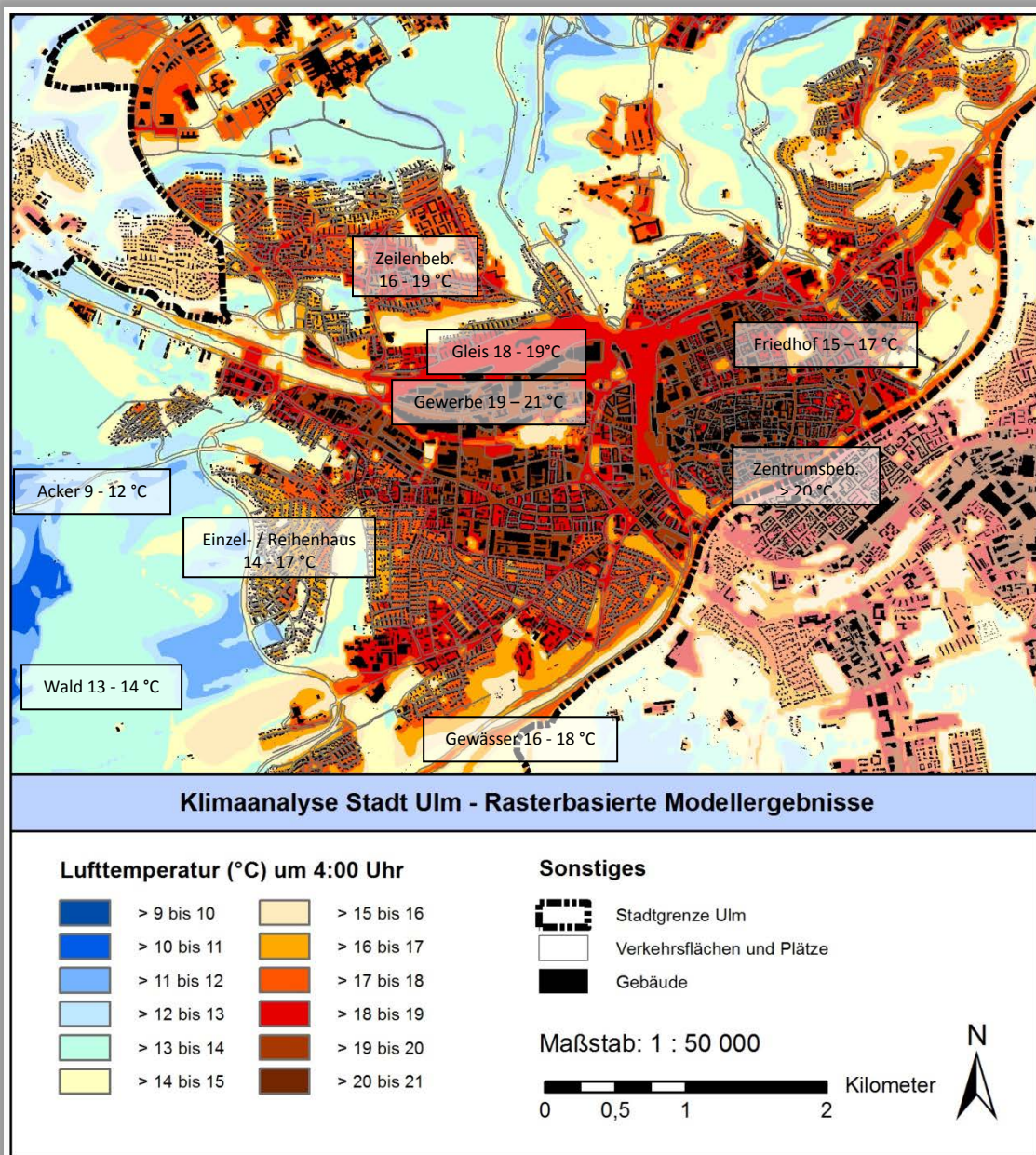


Abb. 12: Nächtliches Temperaturfeld (2 m ü. Grund) in einem Ausschnitt des Stadtgebiets Ulm mit beispielhaften Werten für verschiedene Nutzungsstrukturen

4.3 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

ALLGEMEINES

Die variable bodennahe Lufttemperaturverteilung bedingt horizontale und vertikale Luftdruckunterschiede, welche wiederum Auslöser für lokale thermische Windsysteme sind. In Ulm sind die wichtigsten nächtlichen Luftströmungen dieser Art Hangabwinde (reliefbedingte Ausgleichsströmung) und Flurwinde (thermisch bedingte Ausgleichsströmung).

Ab einer Geländeneigung von ein bis zwei Grad setzen nach Sonnenuntergang über natürlichen Oberflächen abwärts gerichtete Strömungen ein, weil die hangnahe Luft durch nächtliche Ausstrahlung stärker abkühlt als die freie Luft in gleicher Höhe. Aufgrund ihrer höheren Dichte fließt die kühlere Bodenluft hangabwärts. Die Ausprägung dieses kleinräumigen Phänomens wird in erster Linie durch das



Temperaturdefizit zur umgebenden Luft und durch die Neigung des Geländes bestimmt (Mosimann et al. 1999). **Hangabwinde** erreichen maximale Abflussgeschwindigkeiten von etwa 3 m s^{-1} , ihre vertikale Mächtigkeit liegt zumeist unterhalb von 10 m (Hergert 1991). In ebenen Lagen bilden sich unter günstigen Bedingungen sogenannte **Flurwinde** aus, die radial auf einen überwärmten Raum ausgerichtet sind. Flurwinde entstehen, wenn sich infolge der Überwärmung von überbauten oder versiegelten Gebieten gegenüber dem Umland ein lokales thermisches Tief aufbaut. Der resultierende Druckgradient kann daraufhin durch einströmende kühlere Luftmassen aus dem Umland ausgeglichen werden (Kiese et al. 1988). Flurwinde sind eng begrenzte, oftmals nur gering ausgeprägte Strömungsphänomene (Geschwindigkeit i.d.R. deutlich $< 2 \text{ m s}^{-1}$), die bereits durch einen schwachen überlagernden Wind überdeckt werden können. Kleinräumige Strömungsphänomene, die zwischen einzelnen strukturellen Elementen innerhalb der Stadt auftreten, werden **Strukturwinde** genannt.

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

ERGEBNISSE KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Die Kaltluftströmung ist in der vorliegenden Untersuchung ein wichtiger Parameter zur Beurteilung des Kaltlufthaushaltes, wobei sich vor allem die Luftaustauschprozesse am Stadtrand erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickeln.

Abb. 13 zeigt das für den Zeitpunkt 04:00 Uhr modellierte Strömungsfeld für einen Ausschnitt des Ulmer Stadtgebiets, das sich während einer sommerlichen austauscharmen Strahlungswetternacht herausgebildet hat. Die momentane Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit wird über die Pfeilrichtung und Pfeillänge in Form von Vektoren dargestellt. Im Strömungsfeld sind die Hinderniswirkung der Gebäude und die daraus resultierende Umlenkung oder Abschwächung der Strömung gut zu erkennen.

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

Die für das 2 m-Niveau wiedergegebenen Strömungsgeschwindigkeiten reichen von vollkommener Windstille bis zu reliefbedingten Maximalwerten von ca. 3 m s^{-1} südwestlich von *Eggingen*. Insgesamt liegen die Werte relativ hoch, da während der angenommenen autochthonen Wetterlage die thermisch induzierten Flurwinde durch die Reliefenergie der Schwäbischen Alb verstärkt werden. Im Kernbereich Ulms treten hohe Werte von bis zu 2 m s^{-1} insb. in unbebauten Abschnitten auf (u.a. entlang der Gleisanlagen nördlich des *Hauptbahnhofs*, auf dem *Hauptfriedhof*, im *Blautal*, auf dem Friedhof *Söflingen* und in der Kleingartenkolonie *Unterer Kuhberg*). In Richtung des dicht bebauten Zentrums nimmt die Strömungsgeschwindigkeit ab, vornehmlich aufgelockerte Siedlungsbereiche werden noch wirksam durchlüftet ($> 0,1 \text{ m s}^{-1}$), während in weiten Teilen der Stadtmitte und der Weststadt keine wirksame Strömung mehr erreicht wird. Ausnahmen bilden größere städtische Grün- und Freiflächen, deren Ausgleichsströmungen die umliegenden Siedlungsgebiete erreichen (z.B. *Alter Friedhof* und die *Donauwiese*).



Breite Straßenzüge, wie z.B. die *Frauenstraße* und *Olgastraße* begünstigen den Luftaustausch zwischen innerstädtischen Grünflächen und den angrenzenden bebauten Arealen.

Mit Blick auf das gesamte Untersuchungsgebiet (vgl. Abb. 3 in Kapitel. 2.2.1) fällt auf, dass die Winde in der westlichen Hälfte deutlich stärker ausgeprägt sind als in der östlichen Hälfte. Dies ist auf das Relief zurückzuführen, welches auf der bayrischen Seite deutlich niedriger ist. Dementsprechend sind in Neu-Ulm die Hangabwinde schwächer ausgeprägt, während Flurwinde überwiegen.

Während allochthoner Wetterlagen (mit der für Ulm geltenden westlichen bis westsüdwestlichen Hauptanströmungsrichtung) nimmt das Donautal eine wichtige Durchlüftungsfunktion für das Ulmer Stadtgebiet ein. Wie dem Strömungsfeld in Abb. 13 zu entnehmen ist, spielt die Donau bei austauscharmen Wetterlagen jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

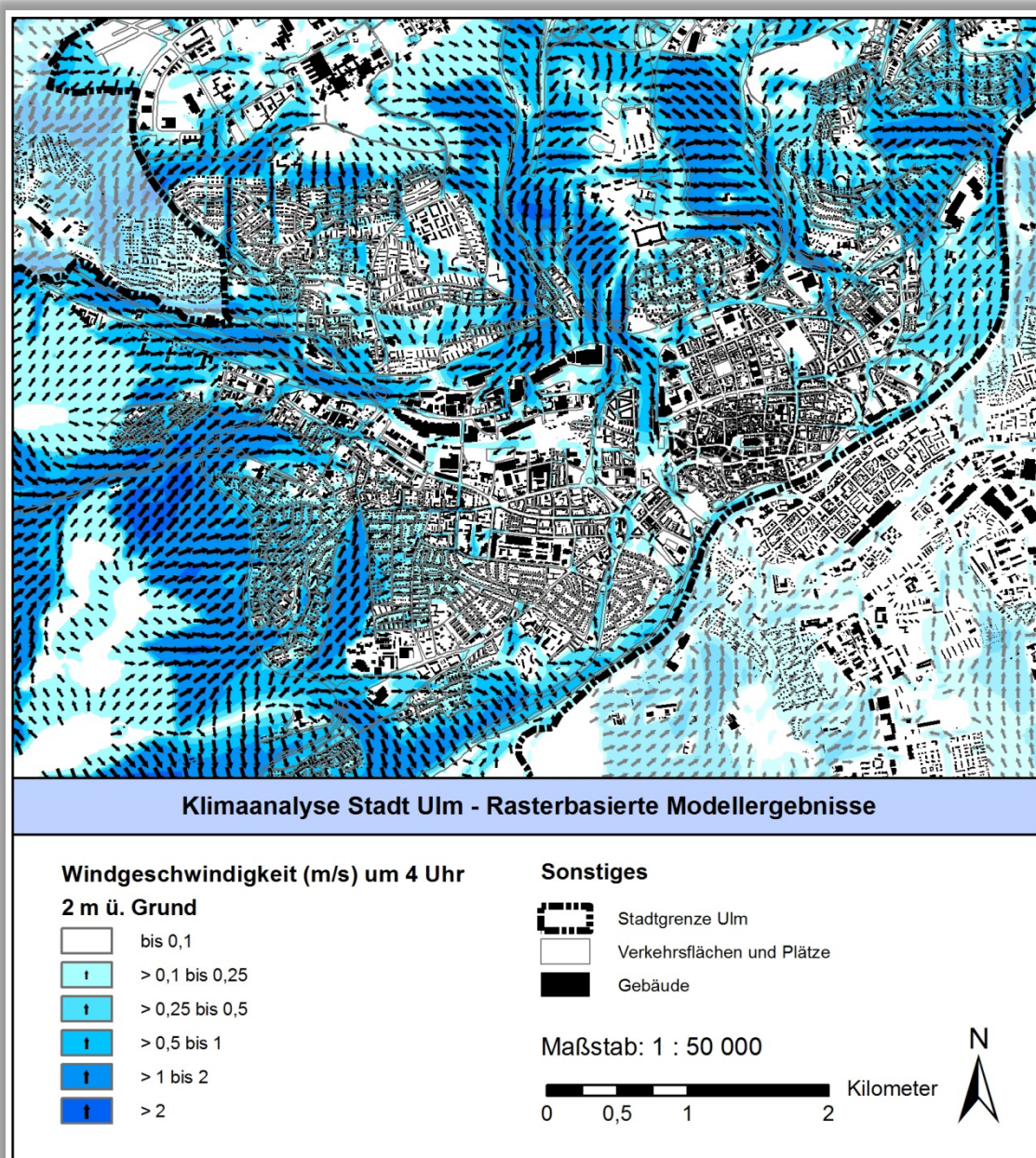


Abb. 13: Nächtliches Strömungsfeld in einem Ausschnitt des Stadtgebiets Ulm (Windpfeile aggregiert auf eine Auflösung von 100 m)

4.4 KALTLUFTVOLUMENSTROM

ALLGEMEINES

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

Vereinfacht ausgedrückt stellt der Kaltluftvolumenstrom das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite) dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abb. 14). Da die Modellergebnisse nicht die Durchströmung eines natürlichen Querschnitts widerspiegeln, sondern den Strömungsdurchgang der gleichbleibenden Rasterzellenbreite (hier 1 m), ist der resultierende Parameter streng genommen nicht als Volumenstrom, sondern als Volumenstrom-Dichte aufzufassen.

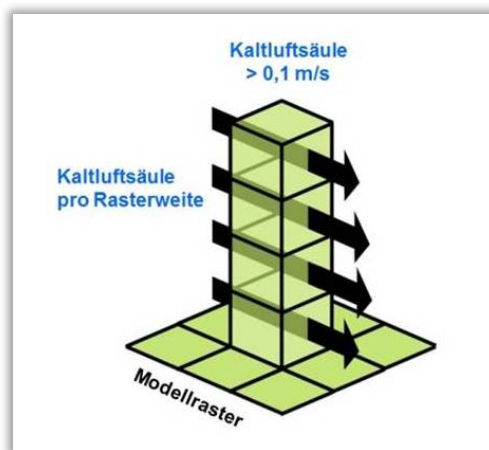


Abb. 14: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom

Dieser Wert kann über ein 1 m breites, quer zur Luftströmung hängendes Netz veranschaulicht werden, das ausgehend von der Obergrenze der Kaltluftschicht bis hinab auf die Erdoberfläche reicht. Wird nun die Volumenstrom-Dichte mit 25 multipliziert, erhält man den rasterbasierten Kaltluftvolumenstrom der 25 m x 25 m breiten Rasterzelle. Um Modellergebnisse verschiedener Gitterauflösungen (z.B. 10, 25 und 50 m) direkt miteinander vergleichen zu können, empfiehlt es sich, die Kaltluftvolumenstromdichte (in $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$) anstelle des Kaltluftvolumenstroms (in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) als Größe zu verwenden².

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Der jeweilige Beitrag beschleunigender und bremsender Faktoren zur Dynamik der Strömung wird unter anderem stark von der bisherigen zeitlichen Entwicklung des Abflusses beeinflusst. So können sich beispielsweise die Kaltluftströmungen über einer Fläche im Laufe der Nacht dadurch ändern, dass die Fläche zunächst in einem Kaltluftabflussgebiet und später in einem Kaltluftammelgebiet liegt. Letzteres kann als Hindernis auf nachfolgende Luftmassen

² Im nachstehenden Text ist mit Kaltluftvolumenstrom streng genommen immer die Kaltluftvolumenstromdichte in $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$ gemeint.



wirken und von diesen über- oder umströmt werden. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab – wobei die Kaltluft selber auf alle diese Parameter modifizierend einwirken kann.

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

ERGEBNISSE KALTLUFTVOLUMENSTROM

Die räumliche Ausprägung des Kaltluftvolumenstroms im Untersuchungsraum folgt im Wesentlichen dem Muster des Kaltluftströmungsfeldes, weicht an einigen Stellen jedoch von diesem ab.

Die geringsten Werte finden sich abermals im Stadtkern, der aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung nur beschränkt durchlüftet wird und in dem nur wenige Grünflächen hohen Kaltluftentstehungspotenzials vorhanden sind (Abb. 15). Die über Freiflächen mit Siedlungsbezug entstehende Kaltluft strömt als Ausgleichsleistung in Richtung der Siedlungsgebiete und sorgt für die höchsten Werte. Insbesondere entlang von Grünachsen dringt die Kaltluft auch in die Bebauung ein und kann dort die thermische Belastung senken. Im Laufe einer (autochthonen) Sommernacht steigt die Kaltluftmächtigkeit i.d.R. an, sodass geringe Hindernisse überwunden werden können. Beispielsweise können einzelne Grünflächen, die zwar nicht zusammen hängen, aber räumlich nahe liegen und durch nur wenige Hindernisse getrennt sind, als Trittsteine für Kaltluft dienen. Folglich sind die in das Siedlungsgebiet reichenden Kaltluftvolumenströme ausgeprägter als die Windgeschwindigkeiten in der Darstellung des Kaltluftströmungsfeldes.

Über Waldarealen treten geringere Kaltluftvolumenströme auf, doch können diese in Siedlungsnähe ebenfalls Ausgleichsleistungen bereitstellen, wenngleich weniger stark ausgeprägt als über Freiflächen. Analog zu den Ergebnissen des Strömungsfeldes ist der Kaltluftvolumenstrom im Westen stärker (bedingt durch die Schwäbische Alb) ausgeprägt als im Osten des Untersuchungsgebiets (überwiegend flach).

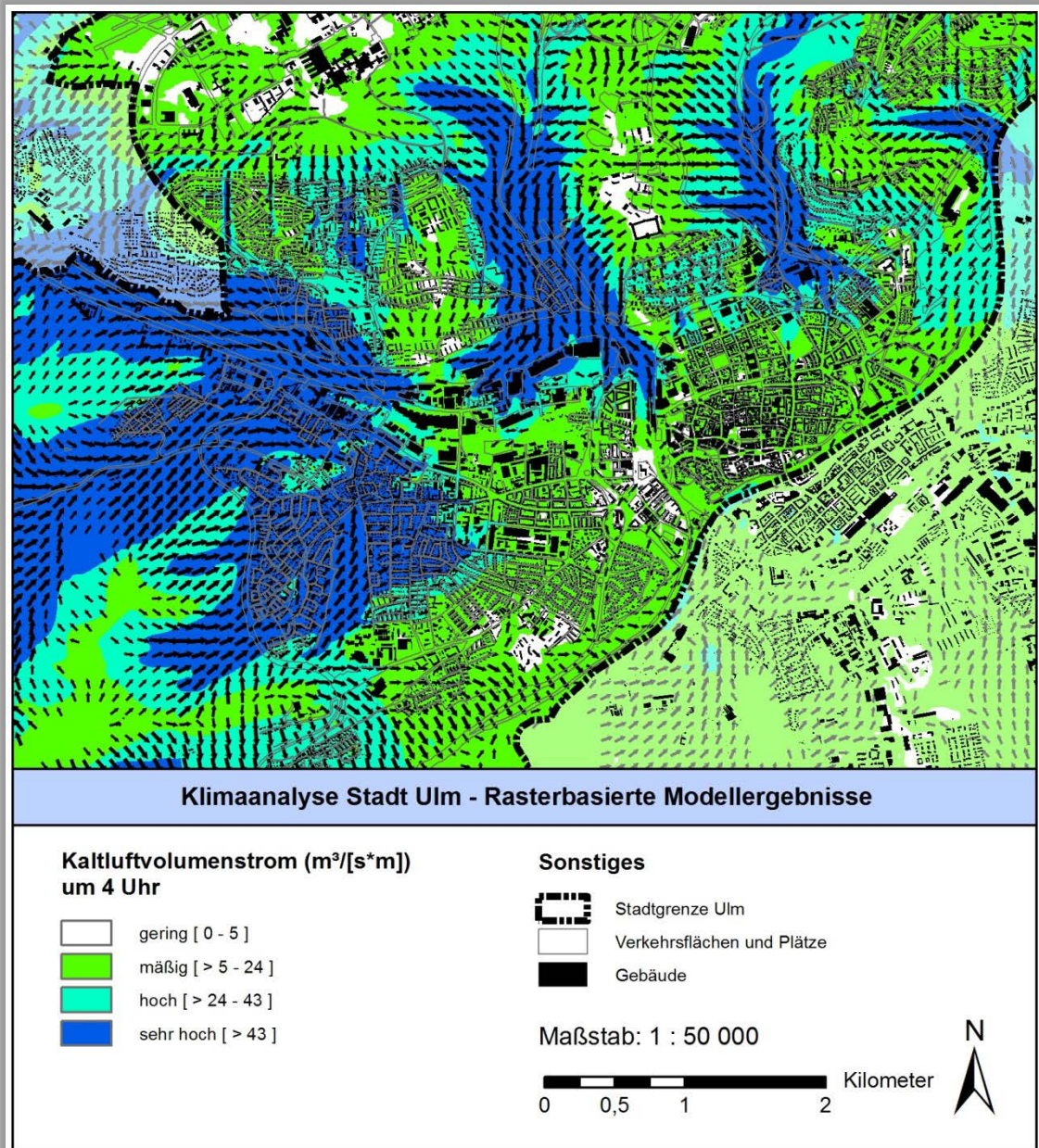


Abb. 15: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in einem Ausschnitt des Stadtgebiets Ulm (Windpfeile aus Abb. 13 übernommen)

4.5 THERMISCHE BELASTUNG AM TAGE

ALLGEMEINES

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines



Menschen abschätzen³. Beispiele für solche Kenngrößen sind der PMV-Wert (*Predicted Mean Vote*) und der UTCI (*Universal Thermal Climate Index*).

In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (*Physiologisch Äquivalente Temperatur*; vgl. Höppe und Mayer 1987). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Größe, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die Ergebnisse aus Ulm mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar. Im Gegensatz zur Lufttemperatur bezieht sich die PET auf die Höhe des mittleren Körperschwerpunktes des Menschen, nämlich auf 1,1 m ü. Grund.

Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. *Starke Wärmebelastung* ab PET 35 °C; Tabelle 1; VDI 2004).

Tabelle 1: Zuordnung von Schwellenwerten für den Bewertungsindex PET während der Tagesstunden (nach VDI 2004).

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

ERGEBNISSE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. PET-Werte ≤ 23 °C (*keine Wärmebelastung*) sind nur in Waldbereichen zu finden, z.B. *Maienwald*, *Klingensteiner Wald* (Abb. 16). Ebenso sind die Waldabschnitte am Donauufer zum Großteil unbelastet, da das Gewässer tagsüber eine kühlende Wirkung entfaltet. Auch die übrigen Waldgebiete heben sich mit einer *schwachen Wärmebelastung* (PET ≤ 29 °C) von den anderen Grünflächen ab. Der mittlere Körperschwerpunkt des Menschen in 1,1 m ü. Gr. liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können.

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine *mäßige Wärmebelastung* auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer *starken Wärmebelastung* betroffen ist. Die höchsten Werte werden über großen Gleisanlagen, im Straßenraum und auf hoch versiegelten Gewerbeflächen erreicht (bis zu

³ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky 1990).



mehr als 41 °C PET; extreme Wärmebelastung). Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen fast ähnlich hohe Werte. Im Gegensatz zur Situation in der Nacht fällt die thermische Belastung in der Zentrumsbebauung weniger stark aus, da die dichte und zumeist hohe Bebauung für eine gewisse Verschattung sorgt. Innerhalb des Stadtkerns zeichnen sich Parkareale wie der *Blaupark* und die Grünflächen entlang der *Donau* mit einer vergleichsweise geringen Wärmebelastung aus.

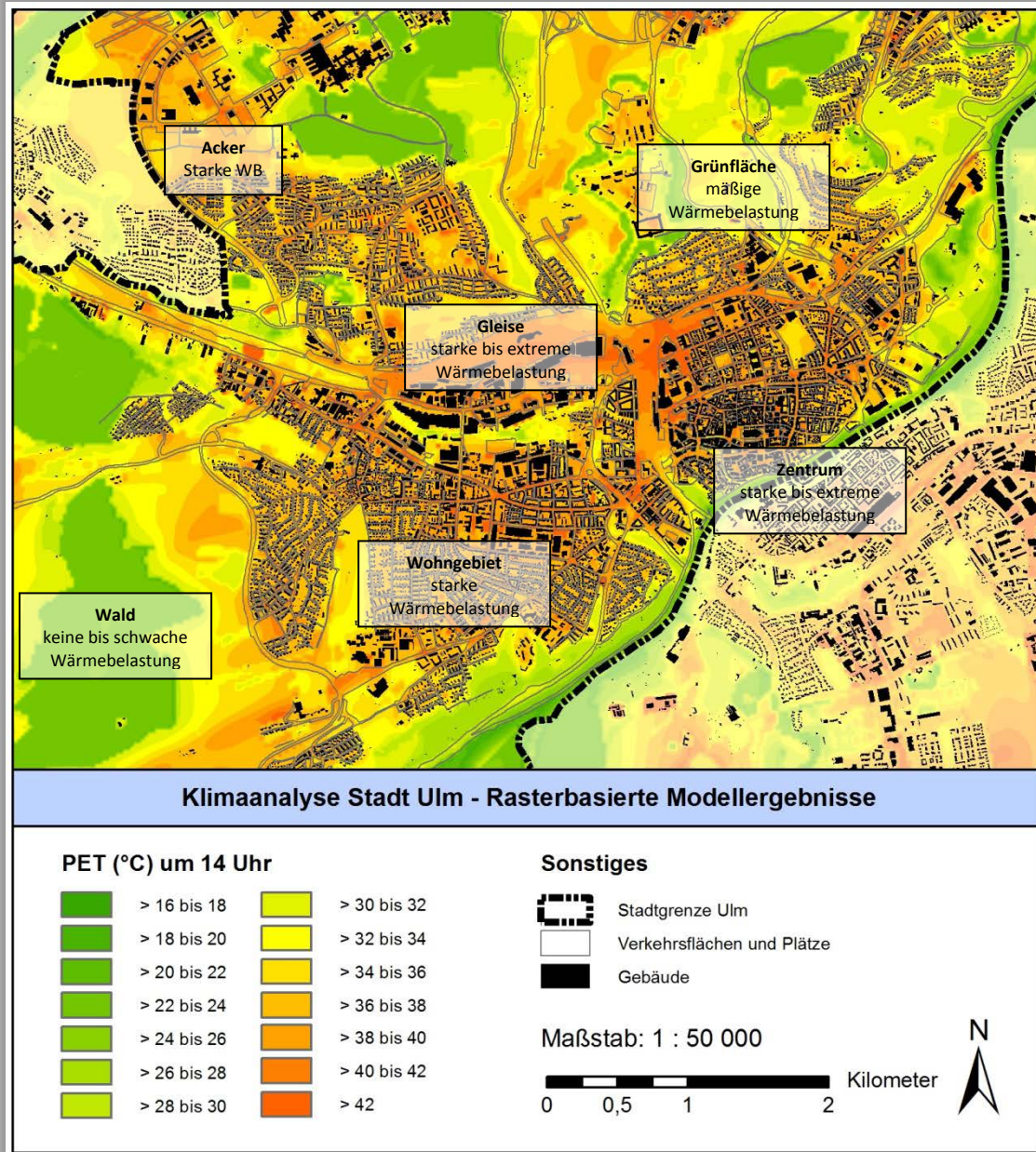


Abb. 16: Wärmebelastung am Tage in einem Ausschnitt des Stadtgebiets Ulm mit beispielhaften Werten verschiedener Nutzungsstrukturen



5 Klimaanalysekarte

5.1 VORGEHENSWEISE

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

Die Klimaanalysekarte⁴ bildet die Funktionen und Prozesse des nächtlichen Luftaustausches im gesamten Untersuchungsraum ab (Strömungsfeld, Kaltluftleitbahnen). Für Siedlungs- und Gewerbeflächen stellt sie die nächtliche Überwärmung dar, basierend auf der bodennahen Lufttemperatur in einer autochthonen Sommernacht um 04:00 Uhr morgens. Außerhalb des Stadtgebiets erlauben die Ergebnisse der Modellrechnung aufgrund der geringeren räumlichen und qualitativen Auflösung der Eingangsdaten zwar eine Darstellung des Prozessgeschehens, lassen jedoch keine tiefergehende Analyse bzw. Ableitung flächenkonkreter Maßnahmen zu (insb. am Rand des Untersuchungsgebiets).

5.2 ERGEBNISSE

BIOKLIMATISCHE BELASTUNG IN DEN SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN

Die nächtliche Überwärmung beruht auf dem Temperaturunterschied zu den Grünflächen der Stadt Ulm, die unter den angenommenen Bedingungen eine mittlere Lufttemperatur von 12,2 °C aufweisen. Der **Wärmeinseleffekt** ergibt sich als Abweichung von diesem Bezugswert und stellt somit eine geeignetere Kenngröße zur Erfassung des Stadtklimaeffekts dar als absolute Temperaturwerte.

Die mittlere nächtliche Lufttemperatur über allen Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet liegt bei 16,5 °C. Bei Betrachtung der Flächenanteile zeigt sich, dass nahezu alle bebauten Flächen eine Überwärmung > 2 K aufweisen, darunter der Großteil Werte von > 4 K (82,7 %) und mehr als ein Drittel sogar > 6 K (Tabelle 2). Die Anteile beziehen sich auf Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets, wobei aufgelockerte Areale mit Einzel- und Reihenhausbau tendenziell durch eine geringere und Gewerbeflächen sowie Zentrums- und Hochhausbebauung durch eine stärkere Überwärmung geprägt sind.

KALTLUFTEINWIRKBEREICH

Siedlungsräume lassen sich in ausreichend durchlüftete Areale und damit meist klimatisch günstige Siedlungsstrukturen sowie klimatische Belastungsbereiche untergliedern. Der **Kaltlufteinwirkungsbereich** kennzeichnet das bodennahe Ausströmen der Kaltluft aus den Grünflächen in die angrenzende Bebauung während einer autochthonen Sommernacht. Damit geht einher, dass die im Einwirkungsbereich befindliche Bebauung in der Nacht vergleichsweise günstigere Verhältnisse aufweist. Als Kaltlufteinwirkungsbereich sind Siedlungs- und Gewerbeflächen innerhalb des Stadtgebiets gekennzeichnet, die von einem überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstrom von mindestens $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ durchflossen werden (Mittelwert des Kaltluftvolumenstroms über alle Grünflächen im Stadtgebiet) oder durch eine Windgeschwindigkeit von mind. $0,2 \text{ m s}^{-1}$ gekennzeichnet sind. Dabei erfolgt die Darstellung rastergenau

⁴ Die Klimaanalysekarte ersetzt nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 die ehemalige synthetische Klimafunktionskarte (VDI 2014).



auf Ebene der Modellergebnisse, d.h. ggf. werden nur Teile einer Blockfläche als Kaltlufteinwirkungsbereich ausgewiesen.

Tabelle 2: Flächenanteile der nächtlichen Überwärmung im Siedlungs- und Gewerbebaum

Nächtlicher Wärmeineffekt [K]	Flächenanteil im Stadtgebiet [%]
bis 2	1,7
> 2 bis 3	3,8
> 3 bis 4	11,8
> 4 bis 5	25,9
> 5 bis 6	22,5
> 6 bis 7	16,9
> 7	17,4

Innerhalb des Stadtgebiets gelten mit 44,5 % fast die Hälfte der Siedlungs- und Gewerbeflächen als Kaltlufteinwirkungsbereich. Mehrheitlich handelt es sich dabei um Flächen in den Randbereichen – in der Innenstadt treten sie nur vereinzelt auf.

KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN ÜBER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

In der Klimaanalysekarte werden Grün- und Freiflächen hinsichtlich ihres Kaltluftliefervermögens charakterisiert. Als Kaltluft produzierende Bereiche gelten insb. unversiegelte Freiflächen (z.B. Ackerflächen) sowie durch aufgelockerten Vegetationsbestand geprägte Grünflächen wie z.B. Parkareale, Kleingärten und Friedhofsanlagen (sowohl innerhalb als auch außerhalb der Siedlungsräume), doch auch Wälder können als Kaltluftentstehungsgebiete fungieren. Für die Charakterisierung der Ausgleichsleistung wird in der Klimaanalysekarte der Kaltluftvolumenstrom herangezogen. Er drückt den Zustrom von Kaltluft aus den benachbarten Rasterzellen aus (vgl. Kapitel 4.4).

In der Klimaanalysekarte wird das Prozessgeschehen des Kaltlufthaushalts dargestellt, d.h. der Kaltluftvolumenstrom wird in Form quantitativer Angaben in abgestufter Flächenfarbe abgebildet, ohne eine Bewertung vorzunehmen (Abb. 17). Zudem werden **Flurwinde** ab einer (als wirksam angesehenen) Windgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ durch Pfeilsignatur in Hauptströmungsrichtung gezeigt, sofern sie eine bedeutende Rolle für das Kaltluftprozessgeschehen spielen. Der Übersichtlichkeit halber wurde das Windfeld in eine Auflösung von 200 m aggregiert.

Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche (Wirkungsräume) miteinander und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche orientiert sich am autochthonen Strömungsfeld der FITNAH-Simulation. Als geeignete Oberflächenstrukturen innerhalb von Siedlungsräumen, die ein Eindringen von Kaltluft in die Bebauung erleichtern, dienen sowohl gering bebaute vegetationsgeprägte Freiflächen, Kleingärten und Friedhöfe als auch Gleisareale, Wasserflächen und breite Straßenräume. Da Leitbahnen selbst ebenfalls Kaltluft produzieren können, lassen sich Freiflächen, von denen Kaltluft direkt in die Bebauung strömt, nicht immer trennscharf abgrenzen von Leitbahnen, die als mehr oder weniger reine „Transportwege“ fungieren. Kaltluftleitbahnen sind vorwiegend thermisch induzierte und auf das Siedlungsgebiet ausgerichtete linienhafte Strukturen, die Flurwinde in das Stadtgebiet hineinragen. Zusätzlich werden die thermisch induzierten Winde durch das Relief im Ulmer Stadtgebiet verstärkt: So befinden sich viele Leitbahnen in Talbereichen und sind durch besonders hohe Kaltluftvolumenströme gekennzeichnet. Im Gegensatz zu den



Kaltluftleitbahnen, die in ihrer Breite auf wenige 100 m begrenzt sind, treten **Kaltluftabflüsse** flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auf.

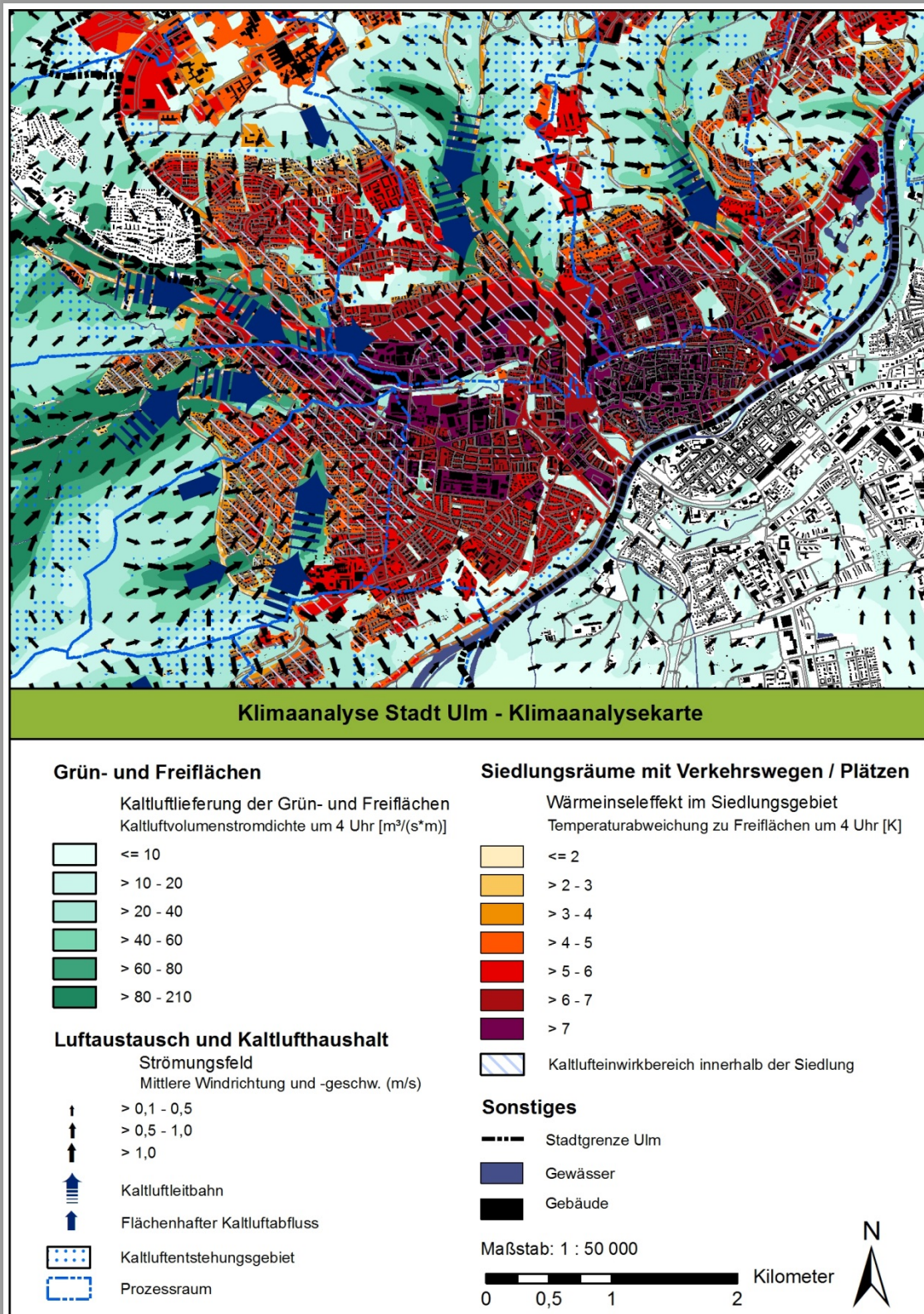


Abb. 17: Klimaanalysekarte für einen Ausschnitt des Ulmer Stadtgebiets (gesamstädtische Darstellung im A3-Format im Anhang)



Insgesamt sind fünf Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftleitbahnbereiche ausgewiesen, die aufgrund ihrer Lage und Charakteristika als besonders wichtig für die großräumige Durchlüftung des Ulmer Stadtgebiets gesehen werden. Sie verteilen sich rund um die Kernstadt (Stadtteile *Stadtmitte*, *Oststadt*, *Weststadt*, *Söflingen*, *Eselsberg*) und sind an Fluss- und Bachläufe bzw. Täler (*Örlinger Tal*, *Lehrer Tal*, *Blautal*, *Roter Bach*) oder an eine weitläufige Grünfläche (Friedhof *Söflingen* und die daran südlich angrenzende Kleingartenkolonie) gebunden. Daneben gibt es viele Bereiche, die zwar nicht als übergeordnete Kaltluftleitbahn ausgewiesen wurden, in denen die Flurwinde lokal dennoch eine wichtige Durchlüftungsfunktion erfüllen (siehe Strömungsfeld in Abb. 13).

Für das Stadtgebiet Ulms spielen flächenhafte Kaltluftabflüsse aufgrund der größeren Reliefunterschiede eine wichtige Rolle. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Flurwinde, die sich aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Flächenhafte Kaltluftabflüsse treten vor allem in der südlichen Hälfte der Stadt auf, insbesondere an den Ausläufern der Schwäbischen Alb (z.B. *Einsingen*, *Eggingen*).

Das in der Klimaanalysekarte beschriebene Kaltluftprozessgeschehen und damit auch die ausgewiesenen Kaltluftleitbahnen basieren auf der Annahme einer autochthonen Wetterlage. Während allochthoner Wetterlagen mit übergeordneten Windfeldern treten stadtklimatische Belastungssituationen i.d.R. weniger häufig in Erscheinung, doch gibt es auch unter diesen Bedingungen Bereiche, die als wichtige Strömungsachsen für das Stadtgebiet fungieren (Ventilationsbahnen) – zuvorderst ist hier das in Richtung der südwestlichen bis westlichen Hauptanströmungsrichtung orientierte Donautal zu nennen.

Kaltluftentstehungsgebiete kennzeichnen Grünflächen mit einer deutlich überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate und speisen die Kaltluftleitbahnen (Flurwinde zeigen in Richtung der Kaltluftleitbahnen) bzw. reichen auch über diese hinaus. Die Kaltluftproduktionsrate der Ulmer Kaltluftentstehungsgebiete beträgt mindestens $16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Die **Prozessräume** wurden auf der Basis einer Einzugsgebietsanalyse nach King ausgewiesen. Als klimaökologische Prozessräume werden größere zusammenhängende Gebiete mit einem einheitlichen übergeordneten Strömungsmuster definiert. Das Strömungsgeschehen in der Stadt Ulm wird bei austauscharmen Wetterlagen vorrangig durch das Relief bestimmt. In der Klimaanalysekarte wurden die Prozessräume flächendeckend für das gesamte Stadtgebiet definiert.



6 Planungshinweiskarten

6.1 VORGEHENSWEISE

Neben der Klimaanalysekarte wurde jeweils eine separate Planungshinweiskarte (PHK) für die Nacht- und Tagsituation erstellt, die sich jeweils nur auf das Stadtgebiet Ulms beziehen. In Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 erfolgte eine Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen als **Wirkungsraum** bzw. der Bedeutung von Grünflächen als **Ausgleichsraum** (VDI 2008a, VDI 2014). Ausgehend von ihren Bewertungen werden den Flächen allgemeine Planungshinweise zugeschrieben.

STANDARDISIERUNG DER PARAMETER (Z-TRANSFORMATION)

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

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

Erstrebenswert wäre zudem, die Beurteilungskriterien sowohl mit der Ausprägung zusätzlich modellierter Variablen als auch mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichen zu können. Um eine solche Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Parameter über eine **z-Transformation** standardisiert. Rechnerisch bedeutet diese, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Hieraus ergeben sich Bewertungskategorien, deren Abgrenzung durch den Mittelwert (= 0) und positive sowie negative Standardabweichungen (S_i) von diesem Mittelwert festgelegt sind (standardmäßig vier Bewertungskategorien durch Mittelwert, obere und untere S_1 -Schranke; Abb. 18).

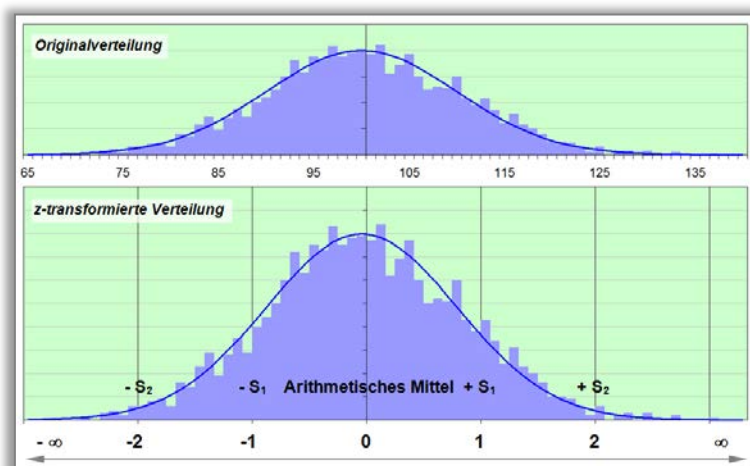


Abb. 18: Veranschaulichung der Standardisierung zur vergleichenden Bewertung von Parametern (z-Transformation)



Tabelle 3: Einordnung der bioklimatischen Belastung im Wirkungsraum in der Nacht (Lufttemperatur T_a) sowie am Tage (PET) und Flächenmittelwert sowie Standardabweichung (sd) der meteorologischen Parameter für die entsprechenden Flächen im Stadtgebiet Ulms

Mittlerer z-Wert		T_a [°C]	PET [°C]	Qualitative Einordnung
T_a	PET	(04:00 Uhr)	(14:00 Uhr)	
bis -0,33	bis -1	bis 16	bis 34,7	1 = Sehr günstig
> -0,33 bis 1	> -1 bis -0,3	> 16 bis 18	> 34,7 bis 36,45	2 = Günstig
> 1 bis 1,66	> -0,3 bis 0,3	> 18 bis 19	> 36,45 bis 37,95	3 = Mittel
> 1,66	> 0,3 bis 1	> 19	> 37,95 bis 39,7	4 = Ungünstig
	> 1		> 39,7	5 = Sehr ungünstig
Mittelwert (\pm sd)		16,5 (\pm 1,5)	37,2 (\pm 2,5)	

6.1.2 BEWERTUNG DER SIEDLUNGS- UND GEWERBEFLÄCHEN (WIRKUNGSRAUM)

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

BEWERTUNG DER NACHTSITUATION

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

Für die Planungshinweiskarte erfolgte die räumlich differenzierte Bewertung der Nachtsituation daher über die nächtliche Überwärmung. Abweichend zur Klimaanalysekarte liegt der Bewertung eine z-Transformation zugrunde, um die relativen Unterschiede im Stadtgebiet zu erfassen. Dabei wurde die bioklimatische Belastung der Siedlungsflächen zur besseren Differenzierung in vier Klassen von *Sehr günstig* bis *Ungünstig* eingeteilt (Tabelle 3). Auch Gewerbeflächen⁵ wurden hinsichtlich ihrer bioklimatischen Situation klassifiziert, doch spielt deren Belastungssituation aufgrund der geringen Betroffenenzahlen in der Nacht eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu Wohnbauflächen. Da einige Fenster auch zur Straßenseite ausgerichtet sind, wurde zusätzlich der Straßenraum mitbewertet. Für den Straßenraum gilt in der Nachtsituation das gleiche Bewertungsschema wie für die Siedlungs- und Gewerbeflächen. Ein (sehr) günstiges Siedlungsklima besteht, wenn die optimale Schlaftemperatur von 18 °C nicht überschritten wird. Eine mittlere Bewertung liegt bei Temperaturen zwischen 18 und 19 °C vor. Ab 19 °C besteht ein erhöhtes Risiko für Tropennächte, sodass in dem Falle von einer ungünstigen bioklimatischen Situation ausgegangen wird.

BEWERTUNG DER TAGSITUATION

Zur Bewertung der Tagsituation wurde der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische

⁵ Als Gewerbeflächen zählen alle Blöcke mit einer Bevölkerungsdichte unter 5 Einwohnern pro Hektar. Datengrundlage sind die Statistischen Blöcke Ulms (Stand: 30.6.2017).



Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (vgl. Tabelle 1 Tabelle 1 auf S. 25; VDI 2004). Die Bewertung der thermischen Belastung im Stadtgebiet Ulms orientiert sich daran, basiert jedoch letztlich auf einer z-Transformation, um das Verhältnis zwischen den Flächen im Stadtgebiet darstellen zu können (hier in fünf Klassen von *Sehr günstig* bis *Sehr ungünstig*; Tabelle 3) – fast alle Siedlungs- und Gewerbeflächen sind mit PET-Werten zwischen 35 und 41 °C stark wärmebelastet.

Am Tage ist die Aufenthaltsqualität auf Straßen, Wegen und Plätzen (kurz: Straßenraum) von Bedeutung, jedoch ist eine Bewertung des Straßenraumes anhand der PET in diesem Fall nicht aussagekräftig. Dies ist auf die verwendete Gitterauflösung von 25 m zurückzuführen, bei der Straßenbäume aufgrund ihres geringen Kronendurchmessers und ihres punktuellen Auftretens (im Gegensatz zum Wald) nicht erfasst werden können. Da Straßenbäume bzw. die daraus resultierende Verschattung aber einen starken Einfluss auf die PET am Tage nehmen, sind die Modellergebnisse der PET für den Straßenraum mit Unsicherheiten behaftet. Um dennoch Aussagen über den Straßenraum treffen zu können, wurde statt der PET-Modellergebnisse in 25 m Auflösung die Verschattungssituation näher betrachtet.

Die Verschattung beruht auf dem LOD1-Stadtmodell (Gebäude mit Höheninformation) und dem Straßenbaumkataster (Bäume auf öffentlichem Grün mit Informationen zu Höhe und Kronendurchmesser). Die Gebäude- und Bauminformationen mitsamt ihrer Höhenangabe wurden in eine 1m-Auflösung gerastert. Anschließend wurde in ESRI ArcGIS die Verschattung über das *Hillshade*-Werkzeug berechnet ("Schummerung"). Die in der Planungshinweiskarte dargestellte Verschattung beruht auf einem exemplarischen Sommertag (21.6.) um 14 Uhr. Gegenüber den PET-Modellergebnissen, in die die Verschattung zu einem gewissen Grad ebenfalls einfließt, hat die auf diese Weise bestimmte Verschattung den Vorteil, auch den Schattenwurf einzelner (kleinkroniger) Bäume zu erfassen und damit genauere Ergebnisse (und zwar in 1 m Auflösung) zu liefern.

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

6.1.3 BEWERTUNG DER GRÜN- UND FREIFLÄCHEN (AUSGLEICHSPRAUM)

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

Die Grünflächen wurden für die Tag- und Nacht-Situation getrennt bewertet und in vier Stufen von *Geringe* bis *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* eingeteilt. Die Bewertung ist anthropozentrisch ausgerichtet, d.h. Flächen, die für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion erfüllen bzw. keinen Ausgleichsraum darstellen, wurden gering bewertet⁶. Im Falle zusätzlicher Bebauung im Bereich dieser Flächen kann sich deren Funktion ändern und muss ggf. neu bewertet werden.

⁶ Selbst ohne Siedlungsbezug bzw. Funktion für das Kaltluftprozessgeschehen sind Grünflächen aus stadtklimatischer Sicht bebauten Flächen zu bevorzugen, sodass die Klasse *Sehr geringe Bedeutung* nicht vergeben wurde.



BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHT

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten Kaltluftentstehungsgebiete bzw. Grünflächen als Teil einer Kaltluftleitbahn die höchste Bedeutung. Auch die Menge der über einer Fläche strömenden Kaltluft spielt eine Rolle. Dazu wurde der Kaltluftvolumenstrom via z-Transformation in vier Klassen von *Gering* bis *Sehr hoch* eingeteilt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Einordnung des Kaltluftvolumenstroms (z-Transformation)

Mittlerer z-Wert	Kaltluftvolumenstrom (04:00 Uhr) [m ³ s ⁻¹ m ⁻¹]	Qualitative Einordnung
bis -0,5	bis 19	Gering
> -0,5 bis 0	> 19 bis 31	Mittel
> 0 bis 1	> 31 bis 55	Hoch
> 1	> 55	Sehr hoch

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

Im Einzelnen wurde folgender Bewertungsschlüssel verwendet:

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung (4)

- a) Grünflächen, die Teil einer *Leitbahn* bzw. *Kaltluftentstehungsgebiet* sind.
Leitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (Ausgleichsräume) und Belastungsbereiche und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die Ausweisung der Leitbahnbereiche erfolgte manuell und orientierte sich an der Ausprägung des autochthonen Strömungsfeldes der FITNAH-Simulation. Auch Grünflächen, die als Kaltluftentstehungsgebiete auf das Stadtgebiet ausgerichtete Leitbahnen speisen, sind von besonderer Bedeutung.
- b) Freiflächen bzw. ≥ 1 ha große Grünflächen im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittlerer Situation* (bis 100 m).
Grünflächen im Umfeld belasteter Siedlungsräume kommt grundsätzlich eine hohe Bedeutung zu. Zusätzlich zu ihrem Kaltluftliefervermögen wirken sie ausgleichend auf das thermische Sonderklima im meist dicht bebauten Umfeld. Je stärker der Siedlungsraum belastet ist, desto wichtiger sind Grünflächen als Ausgleichsräume, sodass die tolerierbare Entfernung zu diesen gewichtet wurde. Umso größer eine Grünfläche ist, desto weiter reichen ihre ausgleichenden Effekte in das angrenzende Siedlungsgebiet (vgl. Kuttler 2011b).

Hohe bioklimatische Bedeutung (3)

- c) Grünflächen, die direkt an Leitbahnen angrenzen.
- d) Grünflächen < 1 ha mit mindestens *Mittlerem Kaltluftvolumenstrom (KVS)* im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 100 m).
- e) Mindestens 1 ha große Grünflächen im Umfeld von Siedlungsflächen mit *Ungünstiger* (bis 500 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 250 m).
- f) Jeweils ≥ 1 ha große Grünflächen mit *Sehr hohem* bzw. Freiflächen mit mindestens *Hohem KVS* und Siedlungsbezug (außerhalb des in e) genannten Entfernungsbereichs, jedoch in maximal 1 km Entfernung zu Siedlungsgebieten).



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

Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)

- g) Grünflächen < 1 ha mit *Geringem KVS* im Nahbereich von Siedlungsflächen mit *Ungünstiger* (bis 250 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 100 m).
Innerhalb vom Belastungsräumen sind auch Grünflächen ohne Funktion für den Kaltlufthaushalt wertvoll, da sie sich am Tage weniger stark aufheizen und entsprechend in der Nacht weniger Wärme abgeben.
- h) Grünflächen < 1 ha mit mindestens *Mittleren KVS* im Umfeld von Siedlungsflächen mit *Ungünstiger* (bis 500 m Entfernung) bzw. *Mittleren bioklimatischen Situation* (bis 250 m).
- i) Jeweils ≥ 1 ha große Grünflächen mit mindestens *Hohem KVS* bzw. übrige Freiflächen mit Siedlungsbezug (vgl. f)).
- j) Übrige Grünflächen mit mindestens *Hohem Kaltluftvolumenstrom*.

Geringe bioklimatische Bedeutung (1)

- k) Übrige Grünflächen, die keine der genannten Kriterien erfüllen.

BEWERTUNG DER GRÜNFLÄCHEN AM TAGE

Für den Tag basiert die Bewertung der Grünflächen hauptsächlich auf der Entfernung zu belasteten Siedlungs- und Gewerberäumen sowie der PET am Tag. Im Unterschied zur Nachtsituation ist eine möglichst hohe Aufenthaltsqualität auch im Umfeld von Gewerbeflächen relevant, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten. Das Klima der Grünflächen wurde anhand der PET in vier Klassen entsprechend der Wärmebelastungsstufen (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9; VDI 2004) von *Günstig* bis *Ungünstig* eingeteilt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Einordnung der PET für die Bewertung der Grünflächen am Tag

PET [°C]	Qualitative Einordnung	Physiologische Belastungsstufe
bis 29	Günstiges Grünflächenklima	Max. schwache Wärmebelastung
> 29 bis 35	Mittleres Grünflächenklima	Mäßige Wärmebelastung
> 35 bis 41	Weniger Günstiges Grünflächenklima	Starke Wärmebelastung
> 41	Ungünstiges Grünflächenklima	Extreme Wärmebelastung

Der Einstufung liegt folgender Bewertungsschlüssel zugrunde:

Sehr hohe bioklimatische Bedeutung (4)

- a) Grünfläche mit *Günstigem* oder *Mittlerem Klima* aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger bioklimatischer Situation* fußläufig sehr gut erreichbar⁷ (300 m).
Je stärker die bioklimatische Belastung im Siedlungsgebiet, desto wichtiger ist eine für alle Bevölkerungsgruppen fußläufige Erreichbarkeit schattenspendender Grünflächen als Rückzugsorte, sodass die

⁷ Eine *sehr gute* bzw. *gute* fußläufige Erreichbarkeit wird über eine maximale Wegstrecke von 5 bzw. 10 min definiert. Bei einer angenommenen Gehgeschwindigkeit von 1 m s^{-1} ($3,6 \text{ km h}^{-1}$) entspricht dies einer Entfernung von 300 bzw. 600 m. Vereinfachend bezieht sich diese auf die Luftlinie ohne die tatsächliche Wegeführung zu berücksichtigen (Ampeln, kein Durchgang, etc.).



tolerierbare Entfernung zu diesen gewichtet wurde. Maßgeblich für die Aufenthaltsqualität ist die Existenz ausreichend beschatteter Flächen, d.h. ein angenehmes Grünflächenklima sollte vorhanden sein.

- b) Grünfläche mit *Günstigem Klima* aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* bzw. *Mittlerer bioklimatischer Situation* fußläufig gut bzw. sehr gut erreichbar (600 m bzw. 300 m).

Hohe bioklimatische Bedeutung (3)

- c) Grünfläche mit *Mittlerem Klima* aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger* oder *Ungünstiger* bzw. *Mittlerer bioklimatischer Situation* fußläufig gut bzw. sehr gut erreichbar (600 m bzw. 300 m).

- d) Grünfläche mit *Günstigem Klima* aus Siedlungsflächen *Mittlerer* bzw. *Günstiger bioklimatischer Situation* fußläufig mindestens gut bzw. sehr gut erreichbar (600 m bzw. 300 m).

- e) Übrige Grünflächen mit *Günstigem Klima*.

Mit einer hohen Verschattung können auch Grünflächen ohne direkten Siedlungsbezug bzw. im Umfeld von Siedlungsflächen günstigen Bioklimas wichtige Rückzugsorte darstellen (z.B. Wälder als Naherholungsgebiete).

Mittlere bioklimatische Bedeutung (2)

- f) Grünflächen mit *weniger Günstigem Klima* aus Siedlungsflächen *Sehr ungünstiger*, *Ungünstiger* oder *Mittlerer* bzw. *Günstiger bioklimatischer Situation* fußläufig mindestens gut bzw. sehr gut erreichbar (600 m bzw. 300 m).

- g) Übrige Grünflächen mit *Mittlerem Klima*

Geringe bioklimatische Bedeutung (1)

- h) Übrige Grünflächen mit *Weniger Günstigem* oder *Ungünstigem* Klima.

Neben der Bewertung der Grünflächen am Tag in den vier Stufen wurden öffentliche Grünflächen mit sehr guter Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsflächen ausgewiesen. Dazu zählen alle Bereiche von öffentlichen Grünflächen, die sich im Nahbereich von Wohn- und Gewerbeflächen mit ungünstiger oder sehr ungünstiger bioklimatischer Situation befinden (Entfernung von max. 300 m). Aufgrund ihrer guten fußläufigen Erreichbarkeit sind diese Grünflächen besonders schützenswert und sollten nach Möglichkeit von Bebauung freigehalten werden. Bei einer geringen oder mittleren bioklimatischen Bedeutung der gut erreichbaren Grünfläche wird eine klimaökologische Aufwertung mit Verschattungselementen empfohlen.

6.2 ERGEBNISSE

NACHTSITUATION

Flächen mit einer *Ungünstigen bioklimatischen Situation* machen unter reinen (Wohn-)Siedlungen den geringsten Anteil von 9 % aus, betreffen allerdings große Bereiche der Innenstadt (Abb. 19, Tabelle 6). In den Gebieten nahe der Innenstadt ist ebenfalls eine erhöhte nächtliche Überwärmung vorzufinden (gesamstädtisch 15,7 % Anteil *Mittel* bewerteter Flächen), während sich die bioklimatische Situation mit zunehmender Entfernung zum Kernbereich tendenziell verbessert (mehr als die Hälfte der Wohnflächen weist eine *Günstige bioklimatische Situation* auf). Im gering besiedelten und durch einen höheren Grünanteil geprägten Rand- und Außenbereich herrschen überwiegend *Sehr günstige* Verhältnisse vor (16 % der Gesamtfläche).



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

Bewertung der Siedlungsflächen	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Wohnen	Gewerbe	
1 = Sehr günstig	16,0	10,3	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
2 = Günstig	59,3	29,8	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
3 = Mittel	15,7	23,3	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
4 = Ungünstig	9,0	36,6	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).

Bei den Gewerbeflächen verschieben sich die Flächenanteile deutlich. Der typischerweise hohe Versiegelungsgrad und geringe Grünanteil sorgen nachts für eine starke Überwärmung, sodass knapp 60 % der Gewerbeflächen eine *Mittlere* oder *Ungünstige* und nur 10,3 % eine *Sehr günstige bioklimatische Situation* aufweisen (Tabelle 6). Wie bereits erwähnt, steht nachts die Belastung in Wohnsiedlungsflächen im Vordergrund und Maßnahmen sind vor allem für den Erhalt bzw. möglichst die Verbesserung der Situation in belasteten Flächen nötig. Doch sollten aufgrund der hohen Belastungen Gewerbeflächen nicht außer Acht gelassen werden, insb. wenn sie einen räumlichen Bezug zu Wohnbebauungen aufweisen.

Den Grünflächen im Ulmer Stadtgebiet kommt mehr als die Hälfte eine *Hohe* bis *Sehr hohe bioklimatische Bedeutung* zuteil (knapp 18,7 % bzw. 39 %; Tabelle 7). Diese gilt in Bezug auf das derzeit vorhandene Siedlungsgebiet. 18,4 % der Grünflächen weisen eine *Geringe Bedeutung* auf, d.h. sie erfüllen für den derzeitigen Siedlungsraum keine Funktion bzw. stellen für diesen keinen Ausgleichsraum dar – mehrheitlich handelt es sich dabei um siedlungsferne Wald- und Ackerflächen bzw. Straßenbegleitgrün. Generell gilt, dass im Falle einer Bebauung der Flächen selbst bzw. in ihrer Umgebung die Bewertung neu vorgenommen werden muss.

TAGSITUATION

Auch am Tage sind deutliche Unterschiede zwischen der Aufenthaltsqualität im Freien in Wohnsiedlungsflächen und Gewerbegebieten zu erkennen. Wohngebiete zeigen mehrheitlich eine *Mittlere bioklimatische Belastung* (51,2 %) und der Anteil (*Sehr*) *Günstiger* Flächen überwiegt leicht gegenüber *Ungünstigen* (25,5 % gegenüber 23,3 %, *Sehr ungünstig* bewertete Flächen sind zu vernachlässigen; Abb. 20;



Tabelle 8). Dies liegt daran, dass die meisten Wohnflächentypen Grünflächen mit schattenspendenden Grünstrukturen aufweisen bzw. die dichte sowie hohe Zentrumsbebauung für Schattenwurf zwischen den Gebäuden sorgt. Gewerbeflächen beinhalten dagegen oftmals große versiegelte Freiflächen, in der Regel wenige Grünflächen und eher niedrigere Gebäude, sodass die Einstrahlung und entsprechend die thermische Belastung am Tage höher ausfällt (46 % *Ungünstige* bzw. *Sehr ungünstige Flächen*).

Straßen, Wege und Plätze weisen aufgrund ihrer nahezu vollständigen Versiegelung insgesamt die höchsten thermischen Belastungen auf, konnten aber aufgrund der groben Gitterauflösung von 25 m anhand der PET nicht ausreichend beschrieben werden. In der Regel sind Nord-Süd ausgerichtete Straßen tagsüber anfälliger für Hitzebelastungen, da sie am Mittag und Nachmittag am wenigsten beschattet werden. Ost-West ausgerichtete Straßenzüge profitieren dagegen stärker vom Schattenwurf der Gebäude und Straßenbäume und sind daher weniger hitzeanfällig. Allgemein besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Temperatur im angrenzenden Wohn- und Gewerberaum und dem Straßenklima. Belastete Straßenabschnitte sind vor allem diejenigen Bereiche, die von tagsüber überwärmten Wohnquartieren (mindestens *Ungünstige bioklimatische* Situation) begrenzt werden und kaum oder gar nicht verschattet werden (z.B. westlichster Teil der *Keltergasse*). Demgegenüber gibt es andere Straßenbereiche, die zwar von überwärmten Wohnquartieren begrenzt werden, aber eine gute Verschattungssituation aufweisen (z.B. Baumallee in der *Heimstraße*). Insbesondere bei größeren, sonnexponierten Plätzen ist darauf zu achten, dass ausreichend Bäume vorhanden sind; dies ist beispielweise auf dem *Münsterplatz* gegeben, auf dem sich mehrere Baumgruppen befinden.

Über die Hälfte der Grünflächen wird eine mindestens *Hohe Bedeutung* zugeschrieben, d.h. sie bieten an Sommertagen eine relativ hohe Aufenthaltsqualität und eignen sich als (erreichbare) Rückzugsorte für die Bevölkerung (Tabelle 9). Die vielen und weitläufigen landwirtschaftlichen Flächen im Stadtgebiet Ulms erlauben aufgrund der meist ungehinderten Einstrahlung (unabhängig von der ohnehin fehlenden Zugänglichkeit) keinen Rückzug und sorgen für einen hohen Anteil an Grünflächen *Geringer* oder *Mittlerer Bedeutung* (46,6 %).

Tabelle 7: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale in der Nacht und abgeleitete Planungshinweise

Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
1 = Geringe	18,4	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen
2 = Mittlere	23,9	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
3 = Hohe	18,7	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
4 = Sehr hohe	39,0	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/ Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).



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

Bewertung der Siedlungsflächen	Flächenanteil [%]		Allgemeine Planungshinweise
	Wohnen	Gewerbe	
1 = Sehr günstig	6,5	4,7	Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich..
2 = Günstig	19,0	17,6	Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich.
3 = Mittel	51,2	31,7	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein.
4 = Ungünstig	21,5	37,4	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
5 = Sehr ungünstig	1,8	8,6	Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse zeigen, dass es in Ulm trotz des (im Vergleich zu anderen baden-württembergischen Städten) relativ kühlen Klimas (vgl. Kapitel 2.2.2) thermisch belastete Siedlungsbereiche gibt. Deren bioklimatische Situation sollte mindestens erhalten, möglichst durch geeignete Maßnahmen verbessert werden. Weite Teile des Stadtgebiets werden über die aufgezeigten Kaltluftleitbahnen bzw. kleinräumige Ausgleichsströmungen durchströmt, doch nimmt die Durchlüftung in Richtung des Stadtkerns ab und fällt in der Innenstadt nur noch gering aus bzw. ist teilweise nicht mehr gegeben. Eine ausreichende Belüftung kann nicht nur die thermische Belastung mildern, sondern sich auch positiv auf, die in diesem Gutachten nicht näher betrachtete, Luftqualität auswirken. Entsprechend sollte der Erhalt bzw. die Verbesserung der Durchlüftung durch geeignete Maßnahmen im Fokus stehen und insb. die Funktion der Kaltluftleitbahnen erhalten, d.h. auf deren Bebauung verzichtet werden.

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



Tabelle 9: Flächenanteile bioklimatisch bedeutender Grünareale am Tage und abgeleitete Planungshinweise

Bedeutung der Grünflächen	Flächenanteil [%]	Allgemeine Planungshinweise
1 = Geringe	6,5	Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
2 = Mittlere	40,1	Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsräumen (nicht als Rückzugsort geeignet). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
3 = Hohe	25,8	Siedlungsnaher Grünflächen mit einem durchschnittlichen Maß an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und schützen (ggf. Bewässerung) bzw. ggf. auszubauen. Siedlungsferne Grünflächen mit hoher Verschattung, die nicht in fußläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Rückzugsort dienen können.
4 = Sehr hohe	27,6	Grünflächen mit einem hohen Maß an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten.

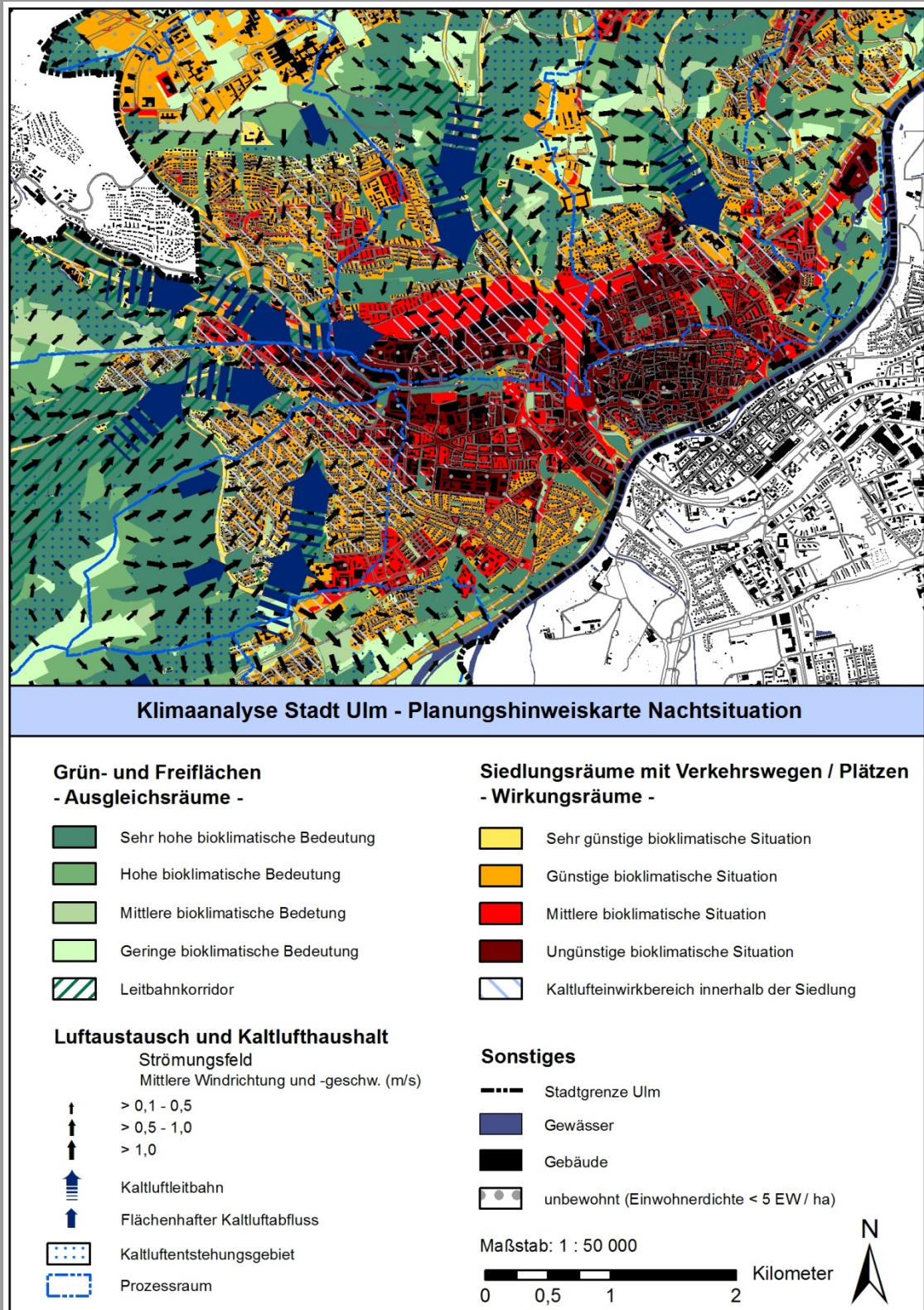


Abb. 19: Planungshinweiskarte Nachtsituation für einen Ausschnitt des Ulmer Stadtgebiets (gesamstädtische Darstellung im A3-Format im Anhang)

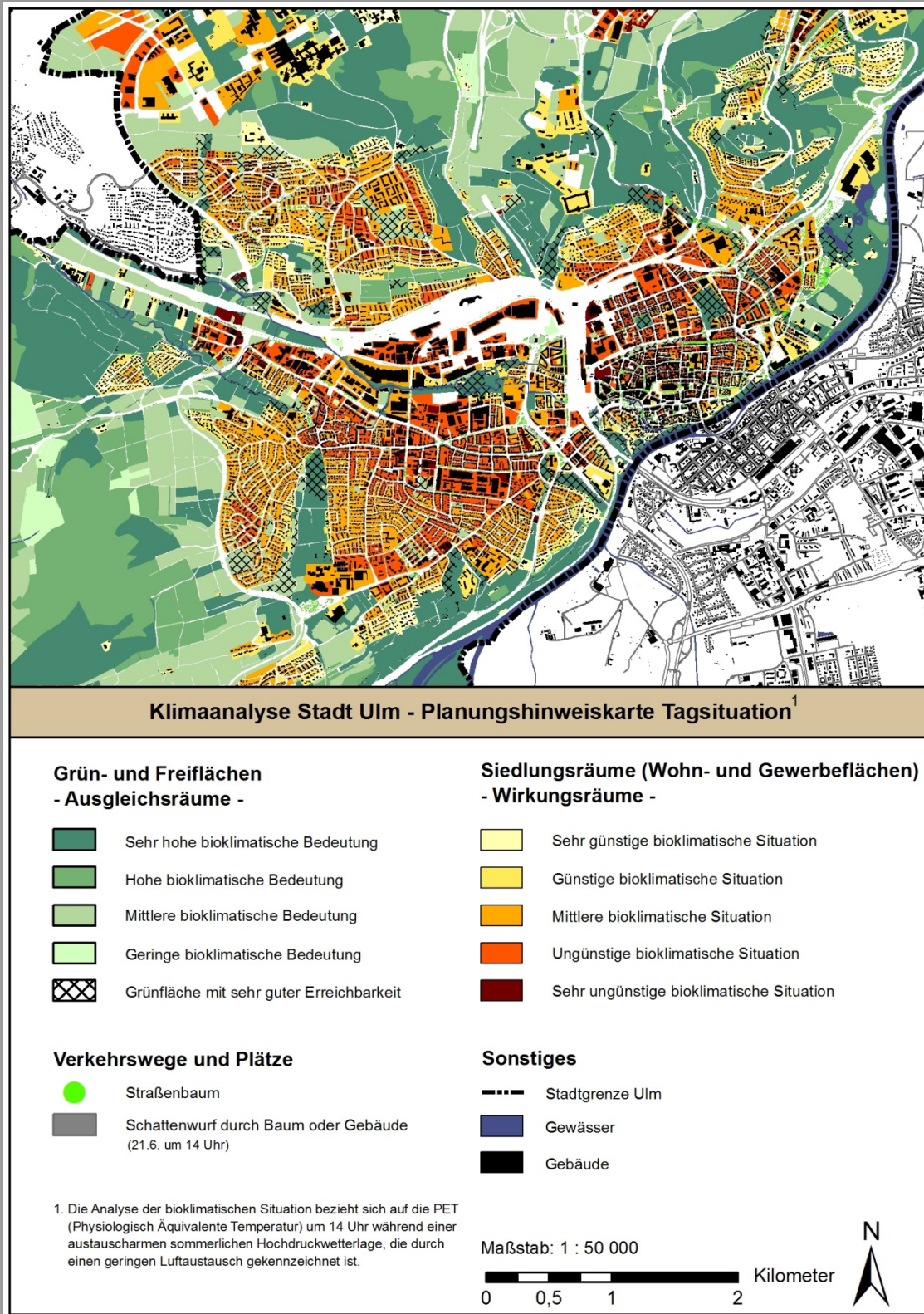


Abb. 20: Planungshinweiskarte Tagsituation für einen Ausschnitt des Ulmer Stadtgebiets (gesamtstädtische Darstellung im A3-Format im Anhang)



7 Betroffenheitsanalyse

Es existiert ein Zusammenhang zwischen thermischem Stress und Morbidität bzw. Mortalität sowie der Leistungsfähigkeit und dem Wohlbefinden einer Stadtbevölkerung. Neben kranken bzw. verletzten Menschen (mit bedingt durch ihre geringere Mobilität) gelten Kleinkinder (unter 6 Jahren) sowie Seniorinnen und Senioren (vor allem ab 80 Jahren) als besonders verletzlich. In Ulm gehören gegenwärtig ca. 13.900 Menschen einer dieser beiden altersbedingten Hauptrisikogruppen an – dies entspricht rund 11 % der Stadtbevölkerung. Werden Kleinkinder und Senioren ab 65 Jahren betrachtet, ist es sogar knapp ein Viertel der gesamtstädtischen Bevölkerung (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2018)).

Die – absolut betrachtet – meisten Kleinkinder haben ihren Wohnsitz in den Bereichen des *Staufenrings*, der *Wagnerstraße*, an der südlichen Grenze des Stadtteils *Eselsberg* und in *Wiblingen*. In diesen Stadtteilen lebt gleichermaßen eine große Zahl älterer Menschen. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass es sich um besonders einwohnerstarke Stadtteile handelt, in denen die Risikogruppen entsprechend größer ausfallen (vgl. Abb. 21 und Abb. 22). Weiterhin lebt eine große Zahl älterer Menschen in den Seniorenresidenzen *Friedrichsau*, *Elisa Ulm*, im *St.-Anna-Stift* und im *Elisabethenhaus*.

In Abb. 21 sind die Einwohnerzahlen pro Blockfläche (visualisiert über Kreise) mit der thermischen Belastung in der Nacht kombiniert (Farbgebung von gelb bis rotbraun; vgl. Kapitel 6.2) sowie sensible Einrichtungen wie Krankenhäuser und Pflegeheime verortet. Diese Form der Darstellung verdeutlicht, dass im Stadtkern viele Menschen von einer mittleren bis ungünstigen bioklimatischen Situation betroffen sind. Mit steigender Entfernung zum Stadtkern nehmen tendenziell sowohl die Einwohnerdichte als auch die bioklimatische Belastung ab. In den zumeist stark belasteten Gewerbegebieten sind die Einwohnerzahlen sehr gering, sodass hier in der Nacht wenige Konflikte auftreten.

In der Abb. 22 wurden die Einwohnerzahlen der Gesamtbevölkerung und der sensiblen Bevölkerung mit der thermischen Belastung am Tag kombiniert. Neben den Krankenhäusern und Pflegeheimen werden weitere Einrichtungen wie Kindertagesstätten und Schulen berücksichtigt. Auffällig ist, dass einige Bereiche sowohl am Tag als auch in der Nacht wärmebelastet sind und gleichzeitig dicht besiedelt sind (z.B. *Staufenring* und *Wagnerstraße*). Andere Gebiete sind dagegen nur in der Nacht wärmebelastet, weisen am Tag jedoch relativ günstige thermische Bedingungen auf (z.B. Krankenhaus in der *Eythstraße*).

Die Ergebnisse beziehen sich auf die derzeitige bioklimatische Belastung in Ulm. Infolge des Klimawandels muss in Zukunft mit einem höheren Belastungsniveau gerechnet werden, auf das sich hitzesensible Bevölkerungsgruppen weniger gut einzustellen vermögen. Entsprechend ist die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen zur stadtklimatischen Optimierung in belasteten Gebieten, die einen hohen Anteil der Hauptrisikogruppen beherbergen (oder generell hohe Einwohnerzahlen aufweisen) als noch wichtiger anzusehen – gerade vor dem Hintergrund des demographischen Wandels, der bereits innerhalb der nächsten zwanzig Jahre zu einem Anstieg von Seniorinnen und Senioren (65 und älter) um ca. 4 % führt, was in absoluten Zahlen einem Zuwachs von ca. 5.000 Personen entspricht (Betrachtungszeitraum 2015-2035; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2018)).

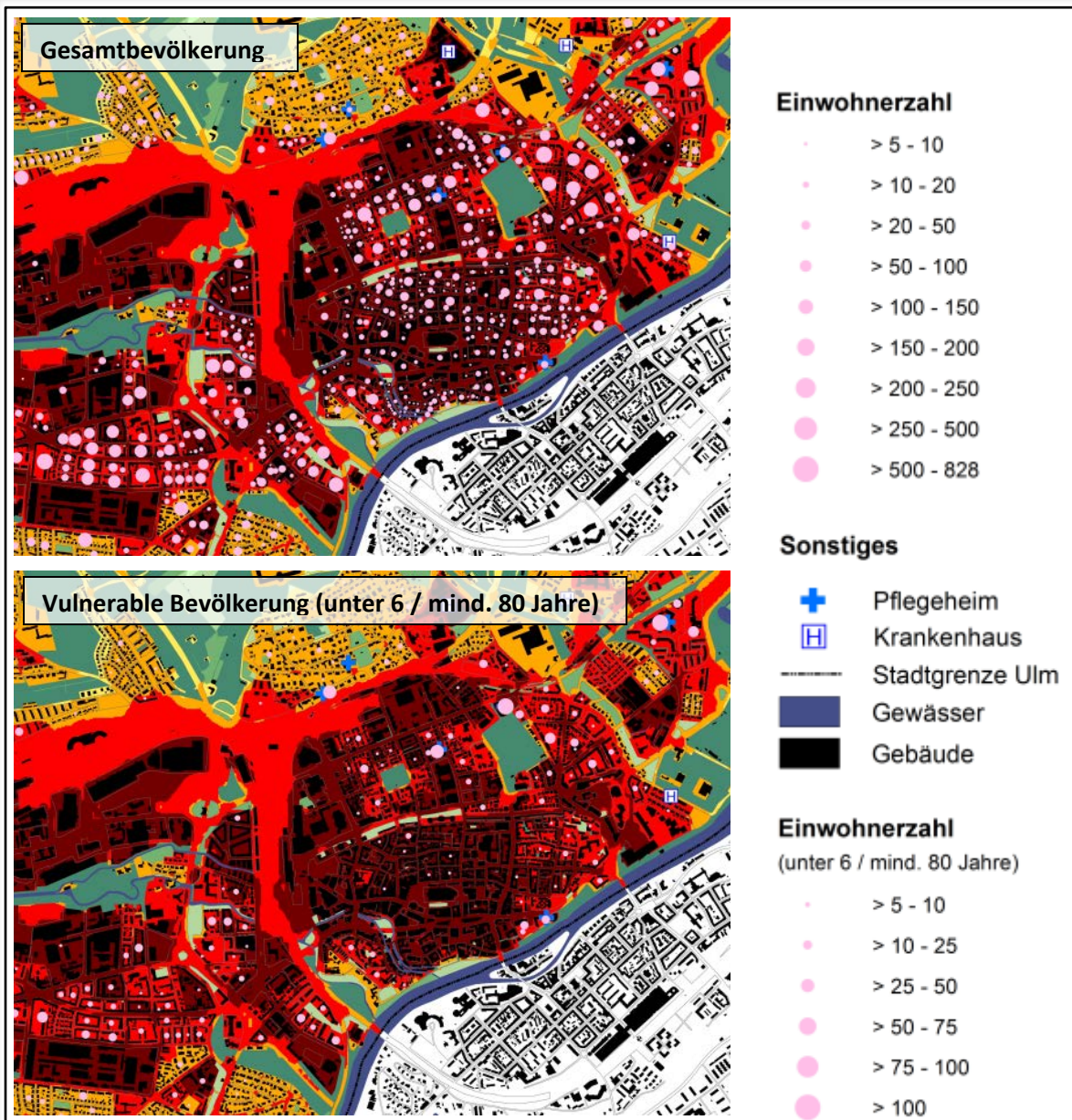


Abb. 21: Vulnerabilitätsanalyse Nachtsituation für einen Ausschnitt des Ulmer Stadtgebiets (Farbschema zur Bewertung von Grün-, Siedlungs- und Verkehrsflächen aus der Planungshinweiskarte Nachtsituation entnommen)

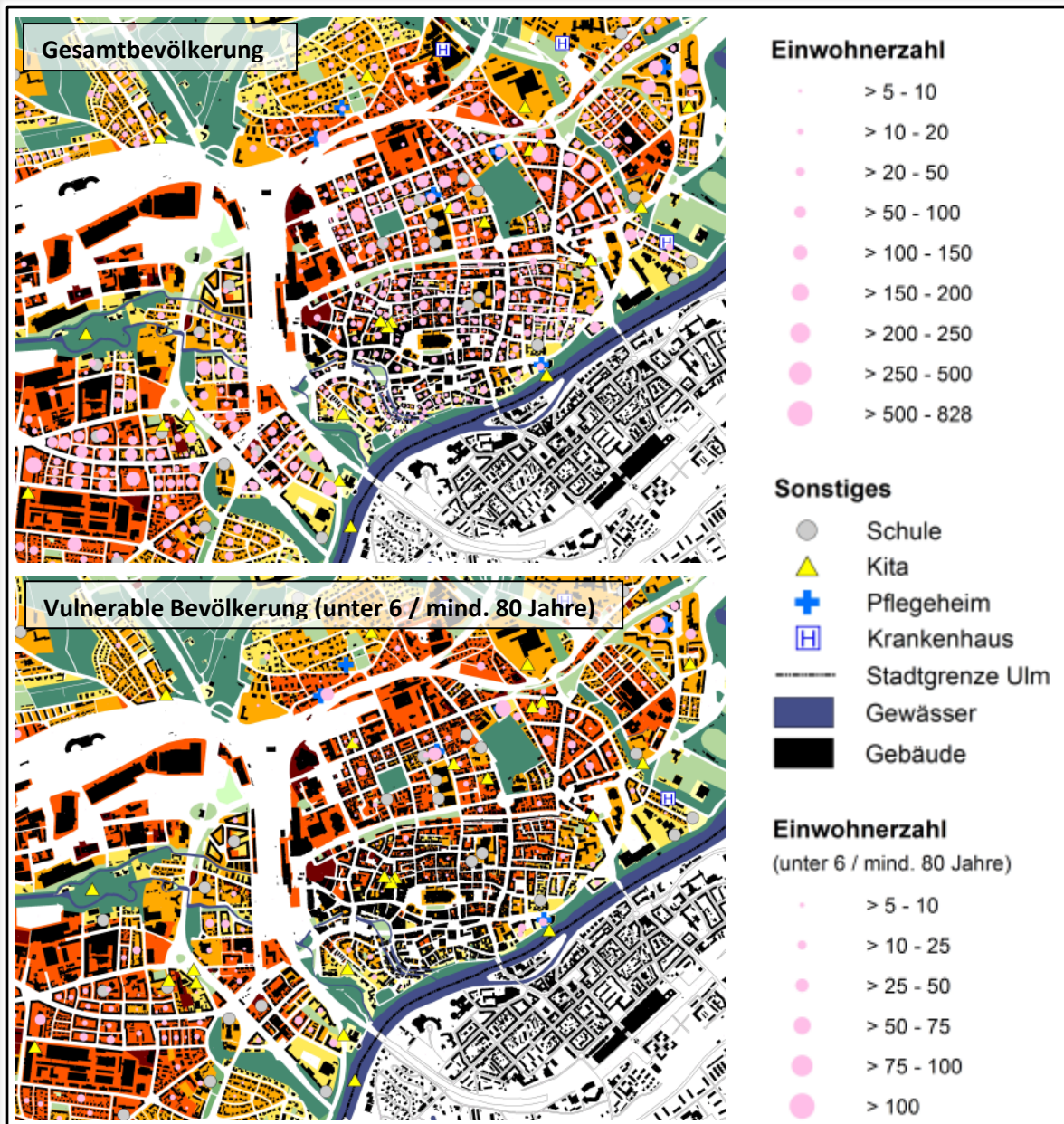


Abb. 22: Vulnerabilitätsanalyse Tagsituation für einen Ausschnitt des Ulmer Stadtgebiets (Farbschema zur Bewertung von Grün- und Siedlungsflächen aus der Planungshinweiskarte Tagsituation entnommen)



8 Maßnahmenkatalog Klimaanpassung

Für Ulm wurde ein Katalog aus einer Reihe klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert, die einzelnen Blockflächen räumlich zugeordnet werden können. Dieser Katalog ergänzt die Planungshinweis-karten als GIS-gestützter „Aktionsplan Anpassung“ um eine weitere Informationsebene. Die Auswahl der Maßnahmen sowie deren Übertragung auf konkrete Flächen erfolgten durch fachgutachterliche Einschätzung und basierend auf einer Literaturlauswertung sowie den Erkenntnissen anderer Klimaanalysen (vgl. Berlin 2015, MUNLV 2010, MVI 2012).

Die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in den Planungshinweis-karten unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt). Zusätzlich fließen die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse (z.B. Einwohnerzahlen) sowie weitere Sach- und Geoinformationen ein. Die Ergebnisse sind jeweils als Planungsempfehlungen zu verstehen, die bei Betrachtung einer konkreten Fläche oder spezifischen Maßnahme einer Überprüfung bedürfen (z.B. beruht die Empfehlung *Dachbegrünung* auf der stadtklimatischen Situation, ohne zu berücksichtigen, ob eine Dachbegrünung bereits vorhanden ist oder ob deren bauliche Umsetzung tatsächlich möglich wäre, da keine Informationen über den Dachtyp der Gebäude auf der Blockfläche vorlagen). Die Maßnahmen sind in Tabelle 10 zusammengefasst und in vier verschiedene Cluster aufgeteilt.

Tabelle 10: Beispiele für Maßnahmen zur Klimaanpassung

Verbesserung der Durchlüftung	Thermisches Wohlbefinden	Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum	Sonstige Maßnahmen
Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten (vgl. Abb. 22)	Verschattung von Straßen und Gehwegen	Dachbegrünung	Schutz von offenen Wasserflächen
Rückbau	Begrünung und Verschattung von Parkplätzen	Fassadenbegrünung	Anpassung des Raumnutzungskonzeptes
Vermeidung von Austauschbarrieren	wenig versiegelte Flächen und Entsiegelung	Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen (vgl. Abb. 25)	Reduktion anthropogener Wärmeemissionen aus dem Verkehr
Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	Erhöhung der Oberflächenalbedo (vgl. Abb. 23)	Technische Gebäudekühlung	Ausbau sozialer Infrastruktur und Netzwerke
	Innen-/Hinterhofbegrünung	(Energetische) Gebäudesanierung	
	Schaffung von Pocket Parks		
	Wasserflächen im öffentlichen Raum schaffen		
	Erhöhung der mikroklimatischen Vielfalt		
	Schutz bestehender großflächiger Parks / Grünflächen		
	Schutz von Waldflächen		



Die Maßnahme „Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten“ verfolgt beispielsweise das Ziel, vorhandene Kaltluftströme und -abflüsse optimal zu nutzen und damit die Versorgung sowohl der neuen Quartiere als auch der Bestände im Umfeld zu sichern. Um dies zu gewährleisten, sollten die Gebäude parallel zur Fließrichtung der Kaltluft angeordnet und nicht zu hoch sein sowie ausreichend (grüne) Freifläche zwischen ihnen erhalten bleiben. Die Baukörperstellung und Abstandsflächen sollten insbesondere im Kaltlufteinwirkungsbereich der Siedlungsflächen und auf den für den Kaltlufthaushalt relevanten Grünflächen (z.B. Kaltluftleitbahnen, Kaltluftentstehungsgebiete) beachtet werden (Abb. 23).

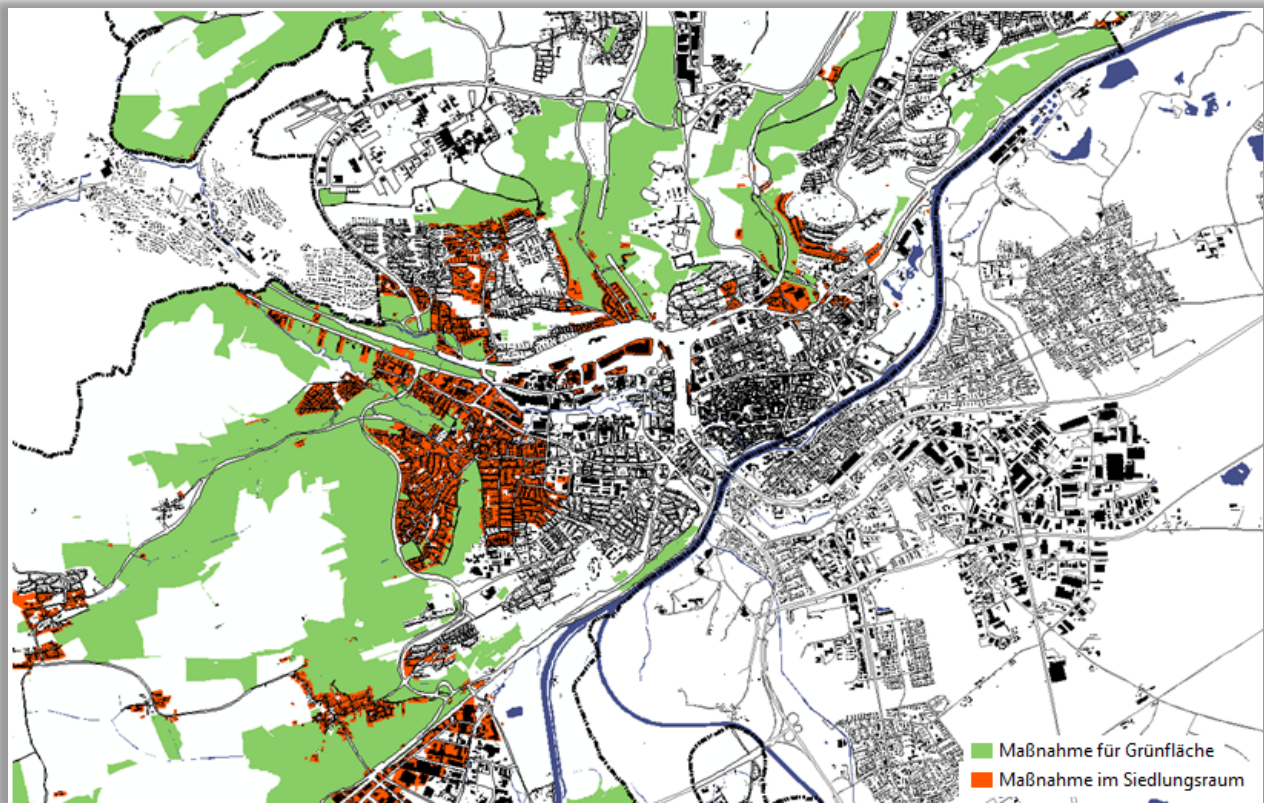


Abb. 23: Flächenkulisse – Empfehlungen für die Maßnahme „Baukörperstellung und Abstandsflächen beachten“

Die Maßnahme „Erhöhung der Oberflächenalbedo“ verbessert das thermische Wohlbefinden im Siedlungsraum. Die Albedo gibt das Verhältnis von einfallender zu reflektierter Strahlung an und wird in Werten von null bis eins angegeben. Eine hohe Albedo hat aus thermischer Perspektive sowohl eine positive Auswirkung auf die Wärmeleitung als auch auf die Lufterwärmung. Je höher also die Albedo der Baumaterialien oder der Fassadenanstriche („cool colors“) ist, desto mehr einfallende Sonnenstrahlung wird von ihnen reflektiert und desto geringer fällt die Erwärmung der Oberfläche und der angrenzenden Luftmassen aus. Die Albedo von Gebäuden sollte nach Möglichkeit dort besonders hoch sein, wo am Tag hohe Lufttemperatur- bzw. PET-Werte auftreten (*Ungünstige* oder *Sehr ungünstige* bioklimatische Situation am Tag, s. Planungshinweiskarte in Kapitel 6.2). Dies ist u.a. auf den in Abb. 24 dargestellten Flächen der Fall, weshalb für diese Bereiche helle Gebäudeanstriche empfohlen werden. Ein Beispiel für ein Gebäude mit hoher Oberflächenalbedo ist das Stadthaus Ulm, welches in Abb. 25 zu sehen ist.



Abb. 24: Flächenkulisse – Empfehlungen für die Maßnahme „Erhöhung der Oberflächenalbedo“



Abb. 25: Stadthaus Ulm als Beispiel für ein Gebäude mit hoher Oberflächenalbedo

In der Abb. 26 sind die Bereiche Ulms dargestellt, für die die Maßnahme der Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen empfohlen wird. Gebäude können durch Bäume oder Gebäudebegrünung oder auch durch bautechnische Maßnahmen wie Markisen verschattet werden. Das primäre Ziel ist es, die direkte Aufheizung sowie die Wärmespeicherung der Gebäude über die Gebäudehülle (Dach, Fassade, Fenster) zu verringern. Sonnenexponierte Gebäudeseiten sind dabei von besonderer Bedeutung. Großkronige Laubbäume sind gegenüber Nadelbäumen zu bevorzugen, da sie im Winter einen vergleichsweise geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Die meisten architektonischen Möglichkeiten bieten Neubauten, viele bautechnische Elemente lassen sich aber auch nachrüsten. Ausführungsbeispiele hierfür sind Vordächer, Vertikallamellen, Markisen und Sonnensegel. Die Verschattung von Gebäuden ist in fast allen Flächentypen möglich und sinnvoll.

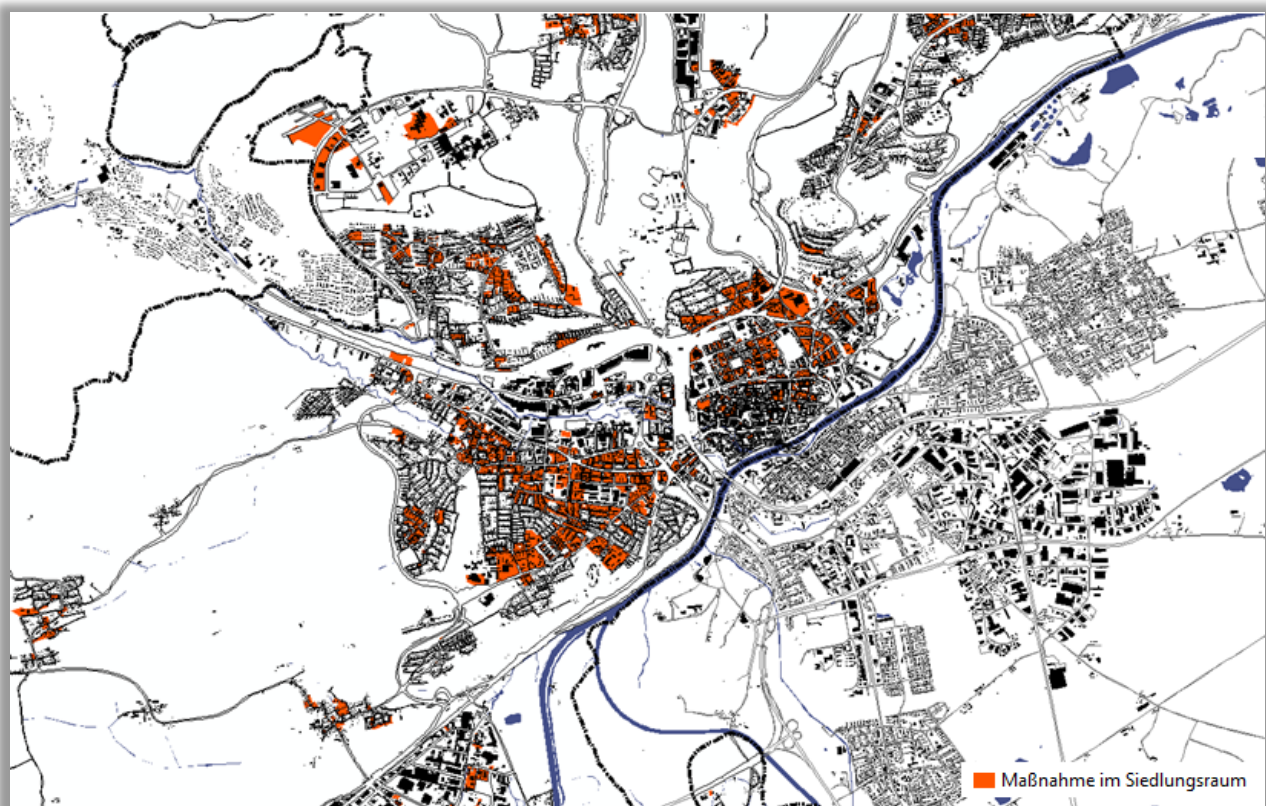


Abb. 26: Flächenkulisse – Empfehlungen für die Maßnahme „Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen“

Eine Verschattung ist außerdem auch für den öffentlichen Raum, insbesondere auf großen Plätzen, Straßen, Gehwegen oder auch Parkplätzen zu empfehlen. Die beschatteten Oberflächen speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten. Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden. Die Verschattung erfolgt gegenwärtig in aller Regel mittels Bäumen und Sträuchern, vereinzelt auch durch Gebäudeanbauten (z. B. Markisen in Fußgängerzonen) oder Kleinbauten (z. B. Wartehäuschen an ÖPNV-Haltestellen). Perspektivisch ist auch der großflächigere Einsatz künstlicher Materialien denkbar (z. B. Sonnensegel). Ausführungsbeispiele in Ulm sind in der Abb. 27 dargestellt.



Abb. 27: Verschattungsmaßnahmen (hier: Sonnenschirme und Bäume) schützen vor der sommerlichen Wärmebelastung in der Ulmer Innenstadt

Die Fassadenbegrünung ist eine weitere Klimaanpassungsmaßnahme, die in Ulm an einigen Häusern, insbesondere auch in der Innenstadt (Abb. 28), umgesetzt wird. Bei der Fassadenbegrünung wird zwischen erd- und fassadengebundenen Systemen unterschieden. In erster Linie wirkt die Grünfassade dämmend auf das Gebäude und führt zur Abmilderung der Innentemperaturextreme im Tages- und Jahresverlauf. Das schattenwerfende Blattwerk, die Luftschicht zwischen der Vegetation und der Hauswand sowie die Evaporation verringern die Wärmeaufnahme und die Oberflächentemperatur der Gebäudehülle und erhöhen den thermischen Komfort in allen Stockwerken des Gebäudeinneren sowie im unmittelbar angrenzenden Außenklima. Es gibt diverse Ausführungsmöglichkeiten einer Fassadenbegrünung. Die Entscheidung hängt hauptsächlich von den Bauwerkseigenschaften ab und sollte gut geplant werden, um eventuelle Schäden am Gebäude oder Begrünung zu vermeiden. Dabei ist sowohl der Aufbau (Pflanzenart, Befestigungsart und die entstehende Last) zu berücksichtigen als auch die späteren pflegerischen Maßnahmen (Bewässerung, Pflanzenschnitt) (FLL 2000).



Abb. 28: Ausführungsbeispiele für Fassadenbegrünung in der Ulmer Innenstadt

Neben der Fassadenbegrünung weisen auch offene Wasserflächen eine positive Wirkung auf die thermische Situation auf. Beispiele für diese Maßnahme sind Brunnen (Abb. 29), Wasserspielplätze, künstliche Wasserfälle, Regenrückhaltebecken oder Teiche. Dies gilt insbesondere für die Tagsituation. Hier findet Verdunstung statt, die Energie aus der umgebenden Luft benötigt und diese abkühlt



(„Verdunstungskühlung“). Je größer die Wasseroberfläche, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Bewegtes Wasser erzielt eine stärkere kühlende Wirkung als stehendes Gewässer, da die verdunstungsfähige Oberfläche bei der Bewegung vergrößert wird (Xue et al. 2014). In Sommernächten verbessern Wasserflächen aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherkapazität hingegen eher nicht den thermischen Komfort. Während langer Wärmeperioden können sie in den Nachtstunden sogar wärmer werden als die umgebende Luft und somit deren Abkühlung verringern (Kuttler 2013).

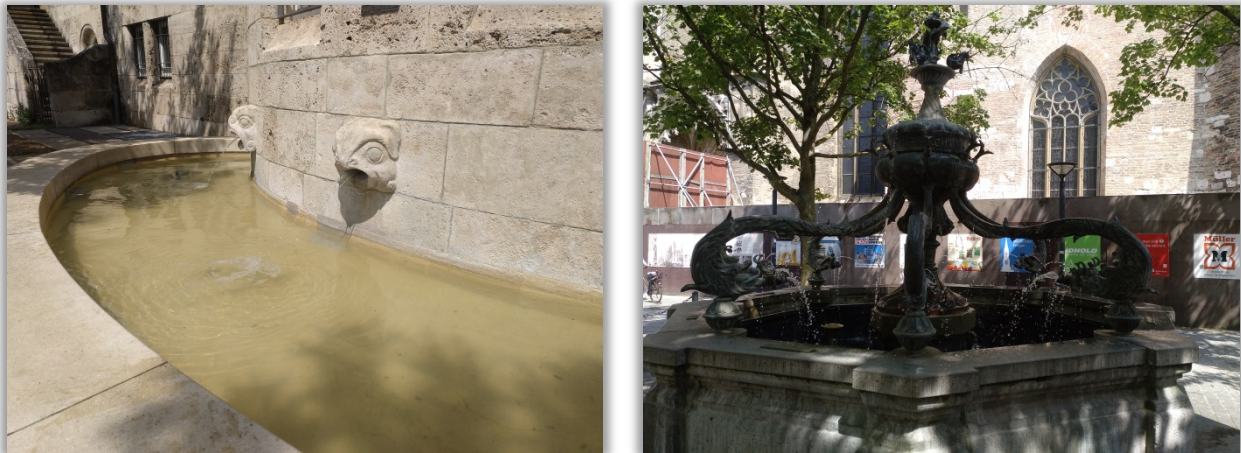


Abb. 29: Künstliche Wasserflächen: Brunnen in Ulm

Nicht nur im Straßen- und Siedlungsraum, sondern auch auf den innerstädtischen Grünflächen kommt es auf eine klimaökologisch sinnvolle Ausgestaltung an. Damit innerstädtische Grün- und Freiflächen ihr Potential an klimaökologischen Dienstleistungen sowohl für die Tag- als auch für die Nachtsituation umfänglich ausschöpfen können, sollten sie möglichst vielfältige Mikroklimata bereitstellen. Als Leitbild kann der erweiterbare, für jedermann kostenlos begehbbare „Savannentyp“ (Kuttler 2013) dienen. Er besteht zu einem großen Anteil aus gut wasserversorgten Rasenflächen und kleinen Baumgruppen, die mit offenen multifunktionalen Wasserflächen, Hügellandschaften, verschatteten Wegen und Sitzgelegenheiten sowie weiteren Strukturmerkmalen (Beete, Rabatten, Blumenwiesen, Sukzessionsflächen) angereichert sind. Unter der Prämisse einer angemessenen großen Fläche von mindestens 1-2 ha wird durch diese Konfiguration sichergestellt, dass sowohl die nächtliche Kaltluftproduktion und der -abfluss gewährleistet sind als auch der Aufenthalt am Tage für alle Ziel- und Risikogruppen optimiert ist (Beispiel in Abb. 30).



Abb. 30: Mikroklimatische Vielfalt entlang der Donau



9 Zusammenfassung und Ausblick

Die aktuelle Stadtklimaanalyse für Ulm schreibt die Untersuchungen der Jahre 1997 (Grundlagenkarte Klima/Luft) bzw. 2015 (Klimaanalyse Donau-Iller) in einer deutlich höheren räumlichen Auflösung fort (vgl. Kapitel 2.3). Das verwendete 25 m x 25 m-Raster entspricht einem mesoskaligen Ansatz. Für jede Rasterzelle des ca. 465 km² großen Untersuchungsgebietes lagen repräsentative Daten zu Landnutzung, Geländehöhe, Strukturhöhe und zum Versiegelungsgrad vor. Diese Informationen dienten als Eingangsdaten für die Klimamodellierung mit dem Modell FITNAH 3D (vgl. Kapitel 3.3).

Mittels des Stadtklimamodells FITNAH 3D wurden flächendeckende Ergebnisse der wichtigsten meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung und Kaltluftvolumenstrom für die Nachtsituation bzw. Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) für die Tagsituation berechnet (vgl. Kapitel 4). Der Simulation liegt eine autochthone sommerliche Wetterlage zugrunde (herabgesetzter Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht, hohe Ein- und Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel; vgl. Kapitel 3.2). Zur Innwertsetzung und Erstellung von Planungskarten wurden die rasterbasierten Ergebnisse auf die Flächen einzelner Nutzungsstrukturen übertragen.

Die Klimaanalysekarte (vgl. Kapitel 5) spiegelt die Überwärmung der Siedlungsflächen und das Kaltluftprozessgeschehen für das Untersuchungsgebiet wider. Sie veranschaulicht die strukturellen Unterschiede auf das Temperaturfeld sowie den städtischen Wärmeinseleffekt (bis zu 8,3 K höhere Temperaturen im Stadtkern verglichen mit den Grünflächen der Stadt). Außerdem bildet sie die in einer autochthonen Sommernacht entstehenden Ausgleichsströmungen ab (Flurwinde, Hangabwinde) und identifiziert fünf für die Durchströmung des Stadtgebiets besonders wichtige Kaltluftleitbahnbereiche sowie 14 Bereiche mit flächenhaftem Kaltluftabfluss.

Die zwei Planungshinweiskarten (vgl. Kapitel 6) quantifizieren die Belastung in den Siedlungsflächen (Wirkungsraum) sowie die Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsräume im Stadtgebiet Ulms. In der Nacht ist ein erholsamer Schlaf von besonderer Bedeutung, sodass in der Bewertung die reinen Wohngebiete im Vordergrund stehen. Am Tage ist die Aufenthaltsqualität im Freien der maßgebliche Parameter, welche nicht nur durch die Lufttemperatur, sondern vor allem auch durch die Verschattung maßgeblich beeinflusst wird.

In der Nacht belastete Siedlungsflächen treten insb. in der Innenstadt auf, während sich die bioklimatische Situation mit zunehmender Entfernung zum Kernbereich tendenziell verbessert. Eine Ausnahme bilden große Gewerbeflächen in den äußeren Bereichen, welche aufgrund ihres hohen Versiegelungsgrades ähnlich stark wie die Innenstadt belastet sind. Sowohl in der Nacht als auch am Tag sind deutliche Unterschiede zwischen der Aufenthaltsqualität im Freien in Wohnsiedlungsflächen und Gewerbegebieten zu erkennen. Wohngebiete zeigen tagsüber mehrheitlich eine mittlere Belastung, Gewerbeflächen dagegen oftmals ungünstige bioklimatische Bedingungen. An Sommertagen bietet etwa die Hälfte der Grünflächen im Ulmer Stadtgebiet eine relativ hohe Aufenthaltsqualität und eignet sich als (erreichbarer) Rückzugsort für die Bevölkerung. In der Nacht weisen knapp 58 % der Grünflächen eine hohe bis sehr hohe Bedeutung in Bezug auf das Kaltluftprozessgeschehen auf. Während insb. innerstädtische Parkareale sowohl in der Nacht als auch am Tage in der Regel eine positive Wirkung ausüben, steht bspw. die günstige Wirkung von unversiegelten Freiflächen in der Nacht (Abkühlung, Durchströmbarkeit) einer meist sehr geringen Aufenthaltsqualität am Tage gegenüber (hohe Einstrahlung). Folglich gilt es beide Planungshinweiskarten bei der Beurteilung von Flächen zu betrachten.



Neben der klimatischen Belastungssituation ist es wichtig, auch demographische Daten in stadtplanerische Überlegungen einzubeziehen, da u.a. ein Zusammenhang zwischen thermischen Stress und Morbidität bzw. Mortalität sowie der Leistungsfähigkeit und dem Wohlbefinden einer Stadtbevölkerung besteht. Wichtige Parameter stellen Einwohnerzahlen, die Anzahl an vulnerablen Bevölkerungsgruppen sowie die Lage von sensiblen Nutzungen wie Krankenhäusern, Pflegeheimen, Kindertagesstätten und Schulen dar. Mit Blick auf die vulnerable Bevölkerung gelten neben kranken bzw. verletzten Menschen Kleinkinder sowie Seniorinnen und Senioren als besonders verletzlich. Die Betroffenheits- bzw. Vulnerabilitätsanalyse (vgl. Kapitel 7) verdeutlicht, dass im Stadtkern viele Menschen sowohl am Tag als auch in der Nacht von einer mittleren bis ungünstigen bioklimatischen Situation betroffen sind. Mit steigender Entfernung zum Stadtkern nehmen tendenziell sowohl die Einwohnerdichte als auch die bioklimatische Belastung ab.

Die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen sollte sich also insbesondere auf die Bereiche konzentrieren, die nicht nur klimatisch belastet sind, sondern auch einen hohen Anteil an sensiblen Nutzungen, Hauptrisikogruppen und allgemein hohe Einwohnerzahlen aufweisen. Zu den Klimaanpassungsmaßnahmen werden alle Maßnahmen gezählt, die zur Verbesserung bzw. zum Erhalt des thermischen Komforts sowie zur Reduzierung von Hitzestress während hochsommerlicher Extremsituationen beitragen. Für Ulm wurde ein Katalog aus einer Reihe klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert, die einzelnen Blockflächen räumlich zugeordnet werden können (vgl. Kapitel 8). Dieser Katalog ergänzt die Planungshinweiskarten als GIS-gestützter „Aktionsplan Anpassung“ um eine weitere Informationsebene. Die Maßnahmen gliedern sich in die vier Cluster Verbesserung der Durchlüftung, thermisches Wohlbefinden, Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum und sonstige Maßnahmen.

Die vorliegende Arbeit hat den Status Quo der Stadt Ulm untersucht, d.h. die angenommene Flächenkulisse basiert auf den aktuellen Luftbildern und auf in absehbarer Zeit realisierbare FNP-Flächen (vgl. Kapitel 3.3). Für diese Landnutzung wurde das Klima von heute angenommen und mit FITNAH 3D simuliert. In der durchgeführten Klimaanalyse bleiben zukünftige Entwicklungen, wie z.B. der klimatische Zustand, die Bebauung und Einwohnersituation späterer Dekaden unberücksichtigt. Ebenso wurden keine Vertiefungsgebiete betrachtet, um genauere Aussagen zu bestimmten Stadtstrukturen treffen zu können. Bei einer mikroskaligen Untersuchung (Rasterauflösung von 5 oder 10 m) können einzelne Bäume und Gebäude im Modell berücksichtigt werden. Dies ermöglicht detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima, insbesondere das Strömungsfeld und die gefühlte Temperatur am Tage. Eine mikroskalige Modellrechnung lässt außerdem eine genauere Untersuchung des Straßenraumes zu, während das Straßenklima bei der hier vorliegenden mesokaligen Rechnung mit 25 m Rasterauflösung nicht ausreichend detailliert untersucht werden konnte (vgl. Kapitel 6.1.2).



Quellenverzeichnis

- Berlin (2015) – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Planungshinweiskarte Stadtklima 2015. Begleitdokument zur Online-Version. Online: www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/db411_01.htm
- DFG (1988) – Deutsche Forschungsgemeinschaft: Physikalische Grundlagen des Klimas und Klimamodelle. Abschlussbericht. Bonn.
- DWD (2017a) – Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon. Online: www.dwd.de/lexikon
- DWD (2017b) – Deutscher Wetterdienst: Climate Data Center (freier Online-Zugang zu Klimadaten). Online: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>
- FLL (=Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.) (2000): Fassadenbegrünungsrichtlinie – Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen von Kletterpflanzen.
- Häckel, H. (2012): Meteorologie. 7. Auflage. Stuttgart.
- Hergert (1991): Klimatische und lufthygienische Situation am Kronsberg und die Beeinträchtigung der klimaökologischen Ausgleichswirkung durch Bebauung. Diplomarbeit an der Universität Hannover.
- Höppe, P. und H. Mayer (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19 (1): S. 22-29.
- Jendritzky, G., et al. 1990. Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). *Beitr. Akad. Raumforsch. Landesplan.* Nr. 114.
- Kiese, O. (1988): Die Bedeutung verschiedenartiger Freiflächen für die Kaltluftproduktion und die Frischluftversorgung von Städten. *Landschaft + Stadt* 20, H.2: S. 67-71.
- Kuttler, W. (1999): Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In: *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig.* Band 13.
- Kuttler, W. (2009): *Klimatologie.* Paderborn.
- Kuttler, W. (2011a): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 1, Wirkungen. *Environmental Sciences Europe* 2011: 23:11.
- Kuttler, W. (2011b): Klimawandel im urbanen Bereich. Teil 2, Maßnahmen. *Environmental Sciences Europe* 2011: 23:21.
- Kuttler, W. (2013): *Klimatologie.* Kapitel: Lokale Maßnahmen gegen den globalen Klimawandel. Paderborn: Schöningh (2. Auflage).
- LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (2018): *Klimaatlas Baden-Württemberg.* Mannheim. Online-Version: www.lubw.baden-wuerttemberg.de
- Malberg, H. (2002): *Meteorologie und Klimatologie- Eine Einführung.* 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Mosimann et al. (1999): *Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung.* Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Heft 4/99: S. 202-275.
- MUNLV (2010) – Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: *Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel.*
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: *Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.*
- Oke, T. R. (1973): City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), Volume 7, Issue 8: S. 769-779.
- Regionalverband Donau – Iller (2015): *Regionale Klimaanalyse Donau – Iller, Wissenschaftlicher Abschlussbericht.* Ulm
- Schönwiese, C.- D. (2008): *Klimatologie.* 3. Auflage. Stuttgart.
- Stadt Karlsruhe (2014): *Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung für die Stadt Karlsruhe (Teil II).* Forschungsbericht KLIMOPASS.



Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2018): Bevölkerung nach Nationalität und Geschlecht am 31. Dezember 2017 / Demographie-Spiegel – Altersstruktur. Online: <https://www.statistik-bw.de/>

Steinicke & Streifeneder (2012) - Steinicke & Streifeneder Umweltuntersuchungen GbR und Richter & Röckle Immissionen Meteorologie Akustik: Stadtklimaanalyse Braunschweig. Gutachten im Auftrag der Stadt Braunschweig.

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

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

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

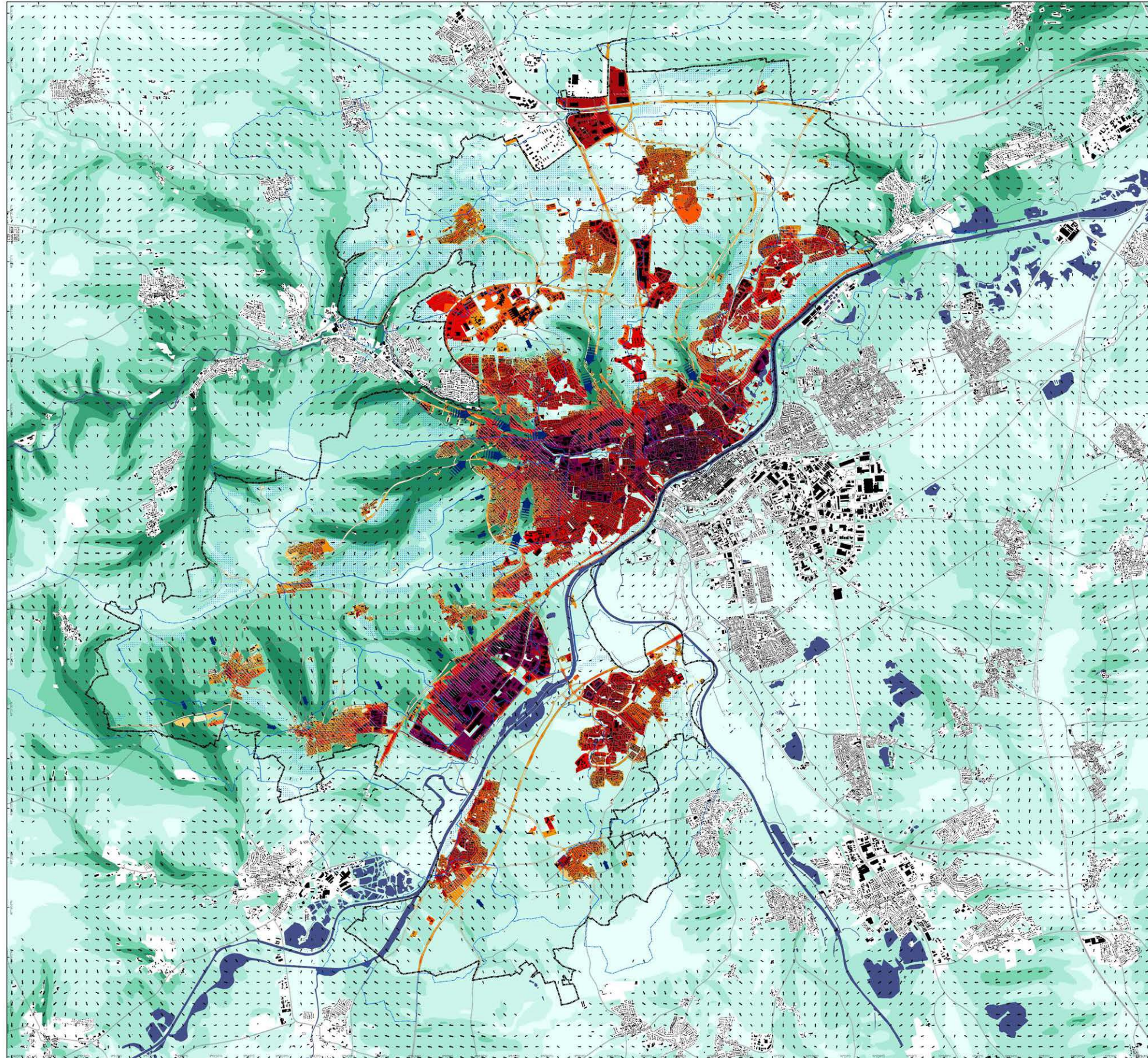
VDI (2008b): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima.

VDI (2014): VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1. Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Entwurf.

Xue, F., Xiaofeng Li, Zhiqin Zhang (2014): Numerical Study on Thermal Environment around the Fountain, Proceedings 7. Japanese-German Meeting, Hannover.



Anhang



Stadtklimaanalyse Ulm Klimaanalysekarte

Grün- und Freiflächen
Kaltluftlieferung der Grün- und Freiflächen^{1,2}
Kaltluftvolumenstromdichte um 4:00 Uhr [m³/(s*m)]

- ≤ 10
- > 10 - 20
- > 20 - 40
- > 40 - 60
- > 60 - 80
- > 80 - 210

Siedlungsräume mit Verkehrswegen und Plätzen
Wärmeeffekt im Siedlungsgebiet³
Temperaturabweichung zu Freiflächen um 4:00 Uhr [K]

- ≤ 2
- > 2 - 3
- > 3 - 4
- > 4 - 5
- > 5 - 6
- > 6 - 7
- > 7

Kaltlufteinwirkungsbereich innerhalb des Siedlungsgebietes⁴

Luftaustausch und Kaltluflhaushalt
Strömungsfeld⁵
Mittlere Windrichtung und -geschwindigkeit (m/s)

- > 0,1 - 0,5
- > 0,5 - 1,0
- > 1,0

Kaltluftleitbahn⁶

Flächenhafter Kaltluftabfluss⁷

Kaltluftentstehungsgebiet⁸

Prozessraum⁹

Sonstiges

- Stadtgrenze Ulm
- Gewässer
- Gebäude

1. Die Analyse der klimatischen Funktionen bezieht sich auf die Nachtsituation während einer ausbauchenden sommerlichen Hochdruckverdrängung, die durch einen geringen Luftaustausch gekennzeichnet ist. Dabei tritt häufig eine übersichtlich hohe Wärmebelastung in den Siedlungsräumen auf, die zugleich mit Luftgemischen belastet werden können. Unter diesen meteorologischen Rahmenbedingungen können nachts die Kalt- und Frischluftströmungen aus dem Umland und innerstädtischen Grünflächen zum Abbau der Belastungen beitragen.

2. Der Kaltluftproduktionscharakterist der Zentren von Kaltluft wird vor allem durch den Temperaturunterschied zwischen kalten Grünflächen und erwärmten Siedlungsarealen "angetrieben". Dabei bestimmt die Größe einer Kaltluftproduzierenden Fläche auch die Menge des insgesamt zur Verfügung stehenden Kaltluftvolumens. Darüber hinaus wird die Bildung von Kaltluft durch weitere Eigenschaften wie Bewuchs, Bodenfeuchte und Geländehöhe beeinflusst.

3. Der nächtliche Wärmeeffekt beruht auf dem Temperaturunterschied zwischen den Siedlungsflächen und den Grünflächen im Umland. Unter den angenommenen meteorologischen Bedingungen weisen letztere eine höhere Lufttemperatur von 12,2 °C auf (in 2 m über Grund). Dargestellt ist die Abweichung der Lufttemperatur in Siedlungsräumen von diesem Bezugswert nach VDI Richtlinie 5102. Statt 2 kann entsprechend eine andere Zuordnung zwischen Außen- und Innenraumluft unterstellt werden, sodass die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe für die Bewertung der Nachtsituation darstellt.

4. Wohn-, Gewerbe- und Verkehrsflächen innerhalb des Stadtgebietes, die von einem übersichtlich hohen Kaltluftvolumenstrom > 30 m³/s durchflossen werden oder Strömungsgeschwindigkeiten von über 0,2 m/s erreichen.

5. Fließende mit einer Windgeschwindigkeit größer als 0,1 m/s. Für eine vereinfachte Darstellung wurde das Windfeld in eine Zeilenaufteilung von 300 m gegliedert.

6. Kaltluftleitbahnen sind lineare Strukturen (vorwiegend Grünflächen teilweise aber auch Gassen, Straßen und Wasserflächen), die Fließende in das überwärmte Stadtgebiet hineintragen. Die in dieser Karte ausgewiesenen Leitbahnen sind in ihrer Breite durchgehend begrenzt, haben einen hohen Kaltluftvolumenstrom von mindestens 30 m³/s und sind vorwiegend durch eine Strömungsgeschwindigkeit von über 0,7 m/s gekennzeichnet.

7. Kaltluftflüsse, die flächenhaft über unbauten Hangweichen aufliegen und einen übersichtlich hohen Kaltluftvolumenstrom aufweisen. Sie begrenzen das Stadtgebiet und sind im Gegensatz zu den Kaltluftleitbahnen nicht in ihrer Breite begrenzt.

8. Kaltluftentstehungsgebiete sind Grün- und Freiflächen im Umland/ Stadtgebiet mit einer sehr hohen Kaltluftproduktionsrate von mindestens 18 m³/s (je 1 ha).

9. Die Prozessräume werden auf der Basis einer Einzugsgebietanalyse nach King ausgemittelt. Als klimatologische Prozessräume werden größere zusammenhängende Gebiete mit einem einheitlichen übergeordneten Strömungsmuster definiert. Das Strömungsgeschehen in der Stadt Ulm wird bei ausbauchenden Wetterlagen vorrangig durch das Relief bestimmt.

Maßstab: 1 : 25 000 (bezogen auf DIN A0)

0 0,5 1 2 Kilometer

Auftraggeber: Stadt Ulm

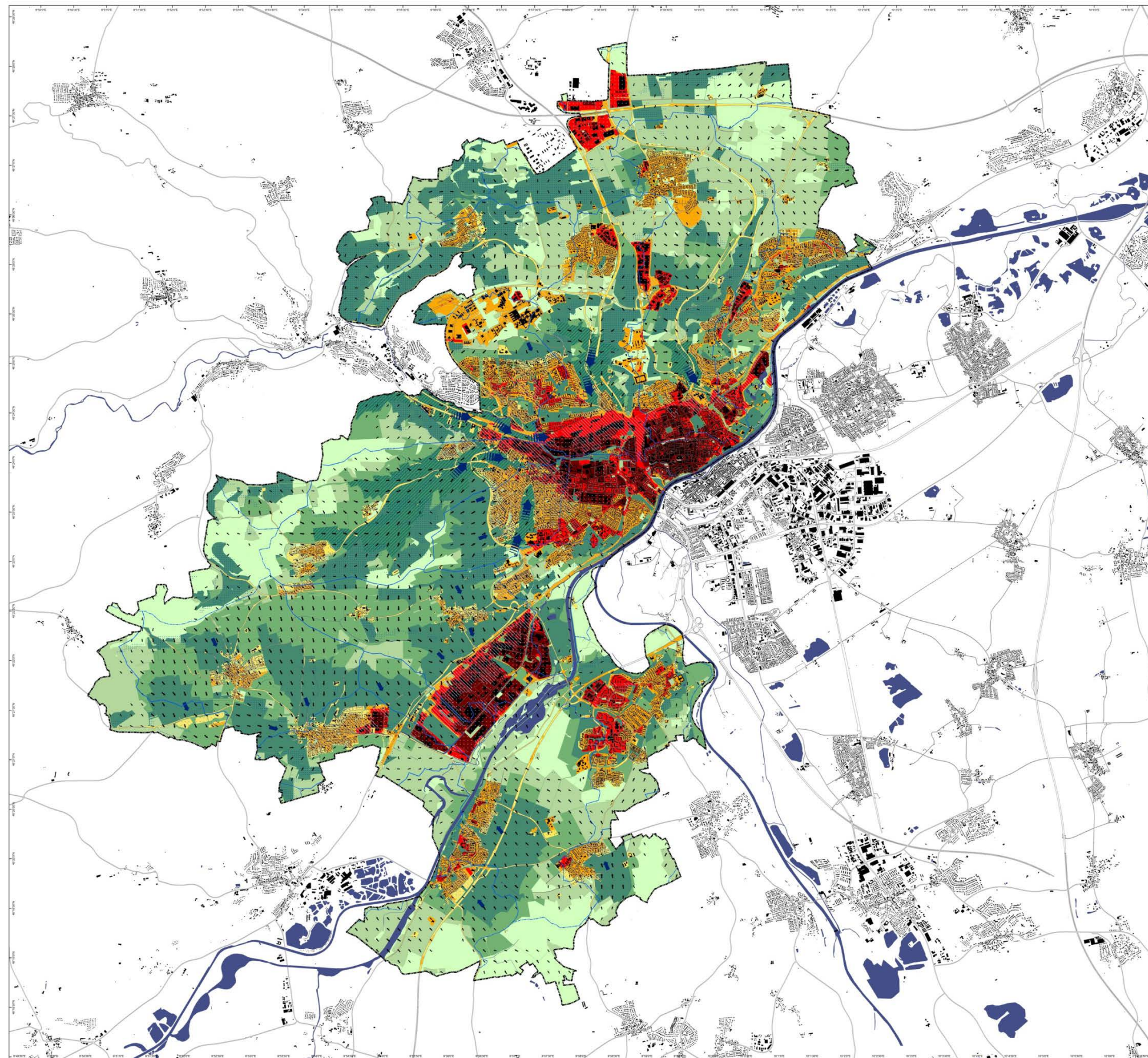
Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Stadt Ulm, vertreten durch
Herrn Bürgermeister Tim von Wissing
Leiter des Fachbereichs Stadtentwicklung,
Bau und Umwelt
Marktplatz 1
89073 Ulm

GEO-NET
Große Pfahlsäule 5 a
30161 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Fax (0511) 388 72 01
Email: info@geo-net.de
Internet: www.geo-net.de

Hannover, September 2018

Abbildung A1: Klimaanalysekarte Nachtsituation



Stadtklimaanalyse Ulm Planungshinweiskarte Nachtsituation

**Grün- und Freiflächen
- Ausgleichsräume -**

Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung ggf. neu vorgenommen werden.

- **Sehr hohe bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimakologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).
- **Hohe bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimakologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
- **Mittlere bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimakologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereitgestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
- **Geringe bioklimatische Bedeutung**
Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
- ▨ **Leitbahnkorridor (Grünfläche innerhalb einer Kaltluftleitbahn)**

**Siedlungsräume mit Verkehrswegen und Plätzen
- Wirkungsräume -**

Bauliche Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen.

- **Sehr günstige bioklimatische Situation**
Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung bei Beachtung klimakologischer Aspekte. Das sehr günstige Bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
- **Günstige bioklimatische Situation**
Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
- **Mittlere bioklimatische Situation**
Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
- **Ungünstige bioklimatische Situation**
Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entseelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z. B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).
- ▨ **Kaltluftwirkebereich innerhalb des Siedlungsbereichs**
(Kaltluftvolumenstrom > 30 m³/(s·m) oder Windgeschwindigkeit > 0,2 m/s)

Luftaustausch und Kaltlufthaushalt

Strömungsfeld
Mittlere Windrichtung und -geschwindigkeit (m/s)

- ↑ > 0,1 - 0,5
- ↑ > 0,5 - 1,0
- ↑ > 1,0
- ↑ **Kaltluftleitbahn**
- ↑ **Flächenhafter Kaltluftabfluss**
- Prozessraum**
- Kaltluftentstehungsgebiet**

Sonstiges

- Stadtgrenze Ulm**
- Gewässer**
- Gebäude**
- unbewohnt (Einwohnerdichte < 5 EW / ha)**

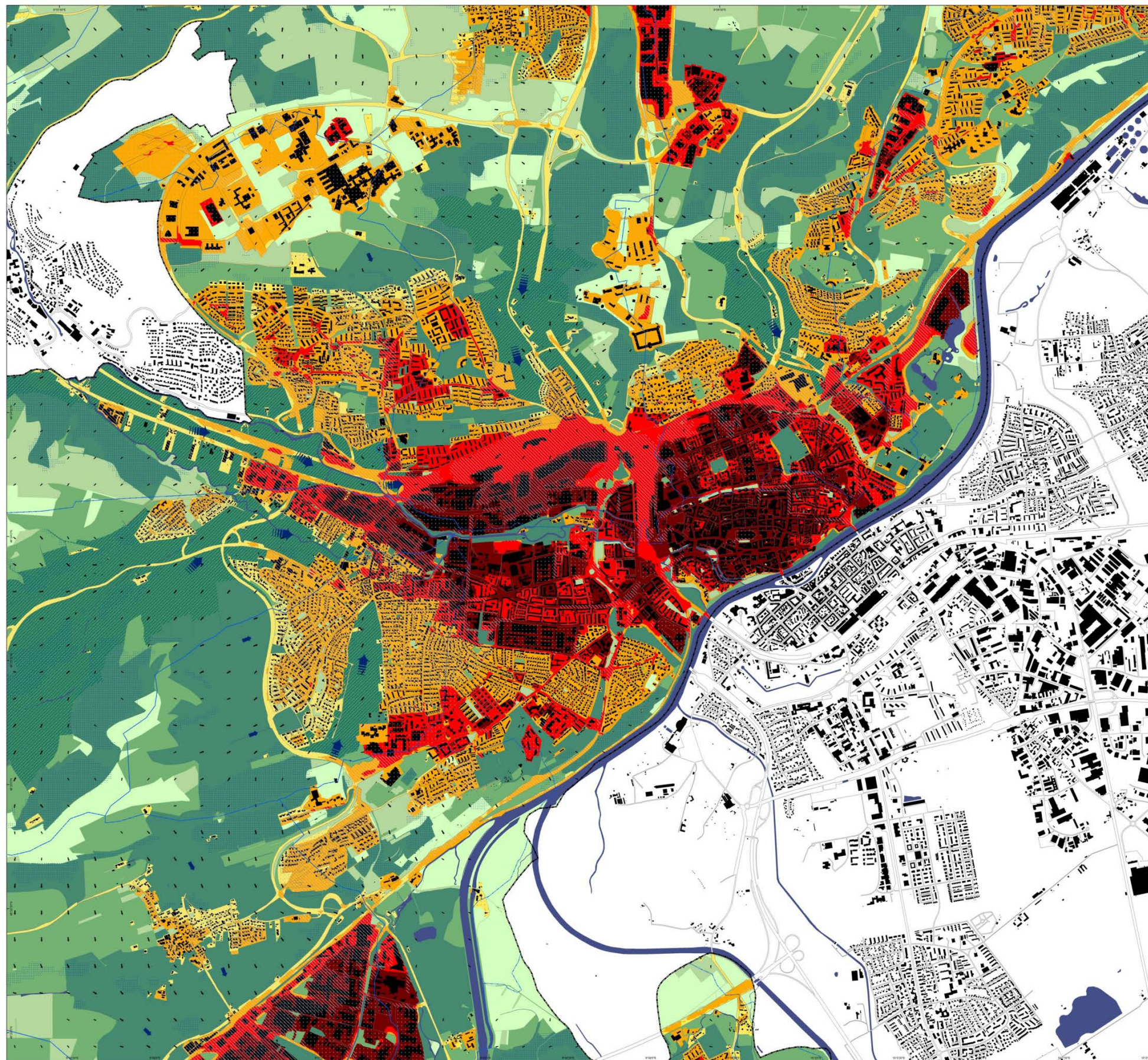
0 0,5 1 2 Kilometer
Maßstab: 1 : 25 000 (bezogen auf DIN A0)

Auftraggeber: Stadt Ulm
Stadt Ulm, vertreten durch
Herrn Bürgermeister Tim von Wönning
Leiter des Fachbereichs Stadtentwicklung,
Bau und Umwelt
Marktstraße 1
89073 Ulm

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH
GEO-NET
Große Pfahstraße 5 a
30181 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Fax (0511) 388 72 01
Email: info@geo-net.de
Internet: www.geo-net.de

ulm
Hannover, September 2018

Abbildung A2: Planungshinweiskarte Nachtsituation



Stadtklimaanalyse Ulm Planungshinweiskarte Nachtsituation

**Grün- und Freiflächen
- Ausgleichsräume -**

Im Falle einer Bebauung auf den Flächen selbst bzw. in ihrer näheren Umgebung muss die Bewertung ggf. neu vorgenommen werden.

- **Sehr hohe bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten gänzlich vermieden bzw. sofern bereits planungsrechtlich zulässig unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung ist anzustreben und zur Optimierung der Ökosystemdienstleistung sollte eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/Freiflächen erreicht werden (Grünverbindungen).
- **Hohe bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
- **Mittlere bioklimatische Bedeutung**
Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereitgestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
- **Geringe bioklimatische Bedeutung**
Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit und weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.
- Leitbahnkorridor (Grünfläche innerhalb einer Kaltluftleitbahn)**

**Siedlungsräume mit Verkehrswegen und Plätzen
- Wirkungsräume -**

Bauliche Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen.

- **Sehr günstige bioklimatische Situation**
Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen bei Beachtung klimaökologischer Aspekte. Das sehr günstige bioklima ist zu sichern. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich. Der Vegetationsanteil sollte möglichst erhalten bleiben.
- **Günstige bioklimatische Situation**
Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen. Die Baukörperstellung sollte beachtet, Freiflächen erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
- **Mittlere bioklimatische Situation**
Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden (ggf. Begrünung von Blockinnenhöfen).
- **Ungünstige bioklimatische Situation**
Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen und eine Verbesserung der Durchlüftung angestrebt werden. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden (z.B. Pocket-Parks, Begrünung von Blockinnenhöfen).
- Kaltlufteinwirkungsbereich innerhalb des Siedlungsbereichs**
(Kaltluftvolumenstrom > 30 m³/(s*m) oder Windgeschwindigkeit > 0,2 m/s)

Luftaustausch und Kaltlufthaushalt

Strömungsfeld
Mittlere Windrichtung und -geschwindigkeit (m/s)

- | > 0,1 - 0,5
- | > 0,5 - 1,0
- | > 1,0
- | Kaltluftleitbahn
- | Flächenhafter Kaltluftabfluss
- Prozessraum
- Kaltluftentstehungsgebiet

Sonstiges

- Stadtgrenze Ulm
- Gewässer
- Gebäude
- unbewohnt (Einwohnerdichte < 5 EW / ha)

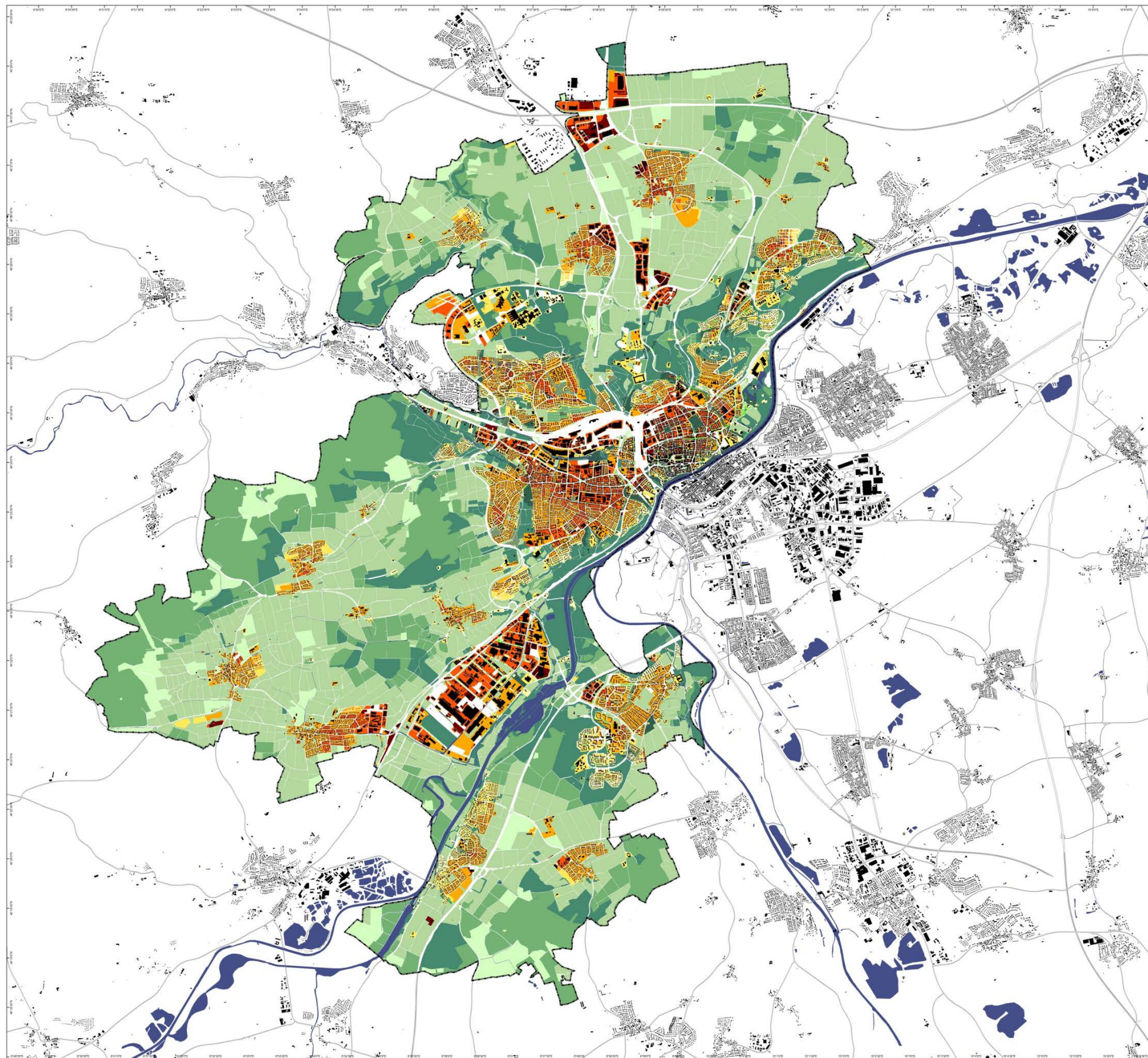
0 0,25 0,5 1 Kilometer
Maßstab: 1: 10 000 (bezogen auf DIN A4)

Auftraggeber: Stadt Ulm
Stadt Ulm, vertreten durch
Herrn Bürgermeister Tim von Winnig
Leiter des Fachbereichs Stadtentwicklung,
Bau und Umwelt
Marktplatz 1
89073 Ulm

Aufnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH
GEO-NET
Große Pfahstraße 5 a
30181 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Fax (0511) 388 72 01
Email: info@geo-net.de
Internet: www.geo-net.de

Hannover, September 2018

Abbildung A3: Planungshinweiskarte Nachtsituation (Zentrum)



Stadtklimaanalyse Ulm Planungshinweiskarte Tagsituation

Grün- und Freiflächen - Ausgleichsräume -

Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und sollten diese nicht einschränken.

- Sehr hohe bioklimatische Bedeutung**
Grünflächen mit einem hohen Maß an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten.
- Hohe bioklimatische Bedeutung**
Siedlungsnaher Grünflächen mit einem durchschnittlichen Maß an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung) bzw. ggf. auszubauen. Siedlungserne Grünflächen mit hoher Verschattung, die nicht in fußläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Rückzugsorte dienen können.
- Mittlere bioklimatische Bedeutung**
Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsgebieten (nicht als Rückzugsort geeignet). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
- Geringe bioklimatische Bedeutung**
Freiflächen bzw. siedlungserne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
- Grünfläche mit sehr guter Erreichbarkeit**
Öffentliche Grünflächen, die sich im Nahbereich von Wohn- und Gewerbeflächen mit ungünstiger oder sehr ungünstiger bioklimatischer Situation befinden (Entfernung von max. 300 m). Aufgrund ihrer guten fußläufigen Erreichbarkeit sind diese Grünflächen besonders schützenswert und sollten nach Möglichkeit von Bebauung freigehalten werden. Bei einer geringen oder mittleren bioklimatischen Bedeutung der Grünfläche wird eine klimakologische Aufwertung mit Verschattungselementen empfohlen.

Siedlungsräume (Wohn- und Gewerbeflächen) - Wirkungsräume -

- Sehr günstige bioklimatische Situation**
Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich.
- Günstige bioklimatische Situation**
Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich.
- Mittlere bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein.
- Ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entseigerung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entseigerung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

Verkehrswege und Plätze

- Straßenbaum
- Schattenwurf durch Baum oder Gebäude (21.6. um 14 Uhr)

Sonstiges

- Stadtgrenze Ulm
- Gewässer
- Gebäude

1 Die Analyse der bioklimatischen Situation bezieht sich auf die PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) um 14 Uhr während einer waldschattigen sommerlichen Hochdruckwetterlage, die durch einen geringen Luftdruckwert gekennzeichnet ist.

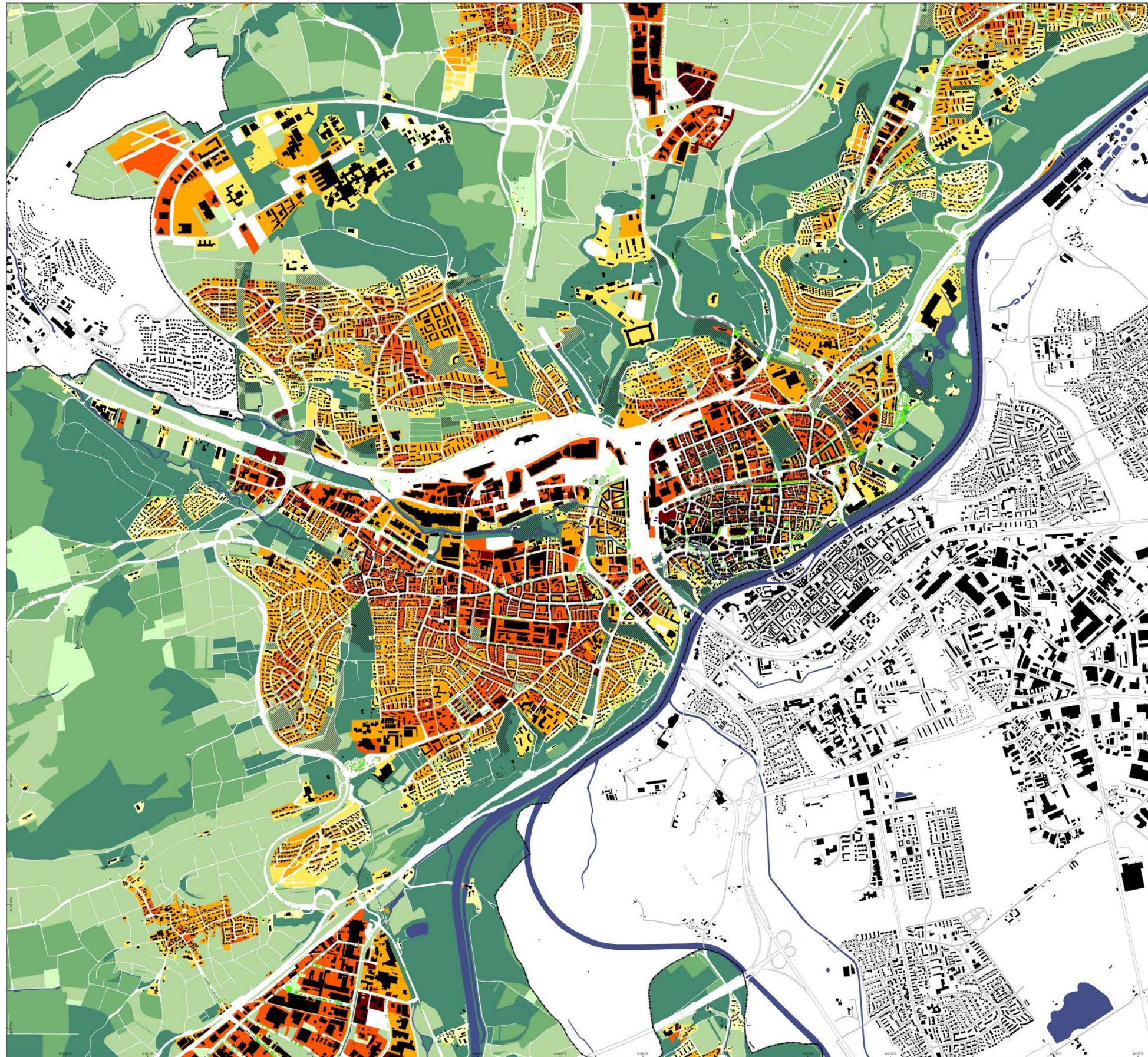


Auftraggeber: Stadt Ulm
 Stadt Ulm, vertreten durch
 Herrn Bürgermeister Tim von Winnig
 Leiter des Fachbereichs Stadtentwicklung,
 Bau und Umwelt
 Marktplatz 1
 89073 Ulm

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH
 Große Pfaffenstraße 5 a
 30161 Hannover
 Tel: (0511) 388 72 00
 Fax: (0511) 388 72 01
 Email: info@geo-net.de
 Internet: www.geo-net.de

Hannover, September 2018

Abbildung A4: Planungshinweiskarte Tagsituation



Stadtklimaanalyse Ulm Planungshinweiskarte Tagsituation¹

**Grün- und Freiflächen
- Ausgleichsräume -**

Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation sind auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die nächtliche Durchlüftung zu prüfen und sollten diese nicht einschränken.

- **Sehr hohe bioklimatische Bedeutung**
Grünflächen mit einem hohen Maß an Verschattung und damit einhergehender hoher Aufenthaltsqualität, die fußläufig aus den belasteten Siedlungsgebieten erreicht werden können. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung), die gute Erreichbarkeit ist weiterhin zu gewährleisten.
- **Hohe bioklimatische Bedeutung**
Siedlungsnaher Grünflächen mit einem durchschnittlichen Maß an Verschattung, bei denen der bioklimatisch positive Einfluss durch Vegetationselemente überwiegt. Verschattende Vegetationselemente sind zu erhalten und zu schützen (ggf. Bewässerung) bzw. ggf. auszubauen. Siedlungsferne Grünflächen mit hoher Verschattung, die nicht in fußläufiger Erreichbarkeit liegen, aber als Rückzugsorte dienen können.
- **Mittlere bioklimatische Bedeutung**
Frei- und Grünflächen mit einem Defizit an Verschattung (geringe Ausgleichsfunktion) bzw. unzureichender Erreichbarkeit aus belasteten Siedlungsgebieten (nicht als Rückzugsort geeignet). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
- **Geringe bioklimatische Bedeutung**
Freiflächen bzw. siedlungsferne Grünflächen mit wenig Schatten und intensiver solarer Einstrahlung (vorwiegend Rasen- bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen). Innerhalb des Siedlungsgebiets sind verschattende Vegetationselemente zu entwickeln bzw. auszubauen (Erhöhung der Mikroklimavielfalt).
- Grünfläche mit sehr guter Erreichbarkeit**
Öffentliche Grünflächen, die sich im Nahbereich von Wohn- und Gewerbeflächen mit ungünstiger oder sehr ungünstiger bioklimatischer Situation befinden (Entfernung von max. 300 m). Aufgrund ihrer guten fußläufigen Erreichbarkeit sind diese Grünflächen besonders schützenswert und sollten nach Möglichkeit von Bebauung freigehalten werden. Bei einer geringen oder mittleren bioklimatischen Bedeutung der Grünfläche wird eine klimaökologische Aufwertung mit Verschattungselementen empfohlen.

**Siedlungsräume (Wohn- und Gewerbeflächen)
- Wirkungsräume -**

- Sehr günstige bioklimatische Situation**
Es liegen bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein hoher Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich.
- Günstige bioklimatische Situation**
Es liegen überwiegend bioklimatisch günstige Bedingungen sowie ein ausreichender Grünanteil vor, die es jeweils zu erhalten gilt. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind nicht erforderlich.
- Mittlere bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation werden empfohlen, z.B. in Form von Verschattungselementen bzw. zusätzlicher Begrünung. Ausgleichsräume sollten fußläufig erreichbar und zugänglich sein.
- Ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung und Verschattung sowie ggf. Entsiegelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation**
Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär. Sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen wie zusätzlicher Begrünung (z.B. Pocket-Parks), Verschattung und Entsiegelung. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.

Verkehrswege und Plätze

- Straßenbaum
- Schattenwurf durch Baum oder Gebäude (21.6. um 14 Uhr)

Sonstiges

- Stadtgrenze Ulm
- Gewässer
- Gebäude

1. Die Analyse der bioklimatischen Situation bezieht sich auf die PET (Physiologische Äquivalente Temperatur) um 14 Uhr während einer austauschbaren sommerlichen Hochdruckverfälschung, die durch einen geringen Luftaustausch gekennzeichnet ist.

0 0,25 0,5 1 Kilometre
Maßstab: 1 : 10 000 (bezogen auf DIN A0)

Auftraggeber: Stadt Ulm
Stadt Ulm, vertreten durch
Herrn Bürgermeister Tim von Wenning
Leiter des Fachbereichs Stadtentwicklung,
Bau und Umwelt
Marktplatz 1
89073 Ulm

Auftragnehmer: GEO-NET Umweltconsulting GmbH
GEO-NET
Große Pfahlsstraße 5 a
30161 Hannover
Tel. (0511) 388 72 00
Fax (0511) 388 72 01
Email: info@geo-net.de
Internet: www.geo-net.de

ulm
Hannover, September 2018

Abbildung A5: Planungshinweiskarte Tagsituation (Zentrum)