

4/3/2016



Klimaplanatlas der Stadt Würzburg  
Stadtklimatische Analyse mit Planungsempfehlungen



Burghardt und Partner, Ingenieure

Burghardt und Partner, Ingenieure

Erstellung eines Klimaplanatlas für die Stadt Würzburg mit Klimafunktions-, Planungs- und Themenkarten sowie erläuternden Bericht

Auftraggeber

Stadt Würzburg

Stabsstelle Klimaschutz

Karmelitenstraße 20

97070 Würzburg

Ansprechpartner

Christian Göpfert, M.Sc.

[christian.goepfert@stadt.wuerzburg.de](mailto:christian.goepfert@stadt.wuerzburg.de)



Auftragnehmer

Burghardt und Partner, Ingenieure

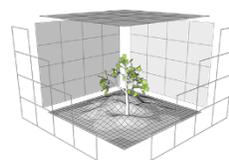
Am Sonnenhang 4

34128 Kassel

Ansprechpartner

René Burghardt, Dr.-Ing.

[info@lp-kassel.de](mailto:info@lp-kassel.de)



**BPI**

Burghardt und Partner, Ingenieure

# Klimaplanatlas der Stadt Würzburg

## *Stadtklimatische Analyse mit Planungsempfehlungen*

### Inhalt

1	Aufgabenstellung.....	3
2	Bestehende Voruntersuchungen.....	4
3	Naturräumliche, klimatische und administrative Einordnung .....	8
4	Methodik .....	9
4.1	Herleitung.....	9
4.2	Erstellung der Klimafunktionskarte.....	13
4.3	Technische Umsetzung.....	15
4.3.1	Thermische Analyse.....	16
4.3.2	Dynamische Analyse .....	17
4.3.3	Bewertungsverfahren.....	18
5	Ergebnisse .....	21
5.1	Klimafunktionskarte.....	21
5.2	Planungshinweiskarte .....	25
5.3	Themenkarten.....	32
5.3.1	Thermischer Aspekt.....	32
5.3.2	Städtische Dynamik .....	43
6	Abschließende Gesamtbewertung .....	56
7	Literatur .....	58
8	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....	60

## 1 Aufgabenstellung

---

Der politische Wille, stadtklimatische Aspekte bei zukünftigen Planungsentscheidungen stärker zu berücksichtigen und die zuverlässige Umsetzung des rechtlichen Ziels, Klimaschutz und Klimaanpassung durch die Stadtentwicklung (§ 1 BauGB), den Stadtumbau (§ 136 BauGB) und die Stadtsanierung (§ 171 BauGB) zu fördern, erfordern detaillierte Planungsgrundlagen unterschiedlicher Aggregationsgrade. Aus diesem Grund ist schon heute eine Stadtentwicklung im Sinne eines nachhaltigen Flächenmanagements und einer stadtklimaökologischen Ausrichtung wünschenswert. Zur Berücksichtigung der stadtklimatischen Belange im Planungsprozess und unter dem Gesichtspunkt einer nachhaltigen Stadtentwicklung, sind detaillierte stadtklimatische Informationen sowie angepasste Planungsinstrumente notwendig.

Um für die Stadtentwicklung ein adäquates und nutzbares Planungshilfsmittel bereitzustellen, wurde für den Verwaltungsraum der Stadt Würzburg ein Klimaplanatlas in Auftrag gegeben. Die Ergebnisse des Atlas gliedern sich in Themenkarten, Klimafunktionskarte (KFK) sowie Planungshinweiskarten (PHK).

In Abstimmung mit dem Auftraggeber bildet die Bewertung des Bioklimas auf Basis der Aspekte der Überwärmung und Durchlüftung den zentralen Untersuchungsgegenstand. Insbesondere die Durchlüftungssituation hat allerdings auch einen wichtigen Einfluss auf die städtische Luftqualität; abgeleitete Schlussfolgerungen und Empfehlungen sind daher an den entsprechenden Stellen angegeben.

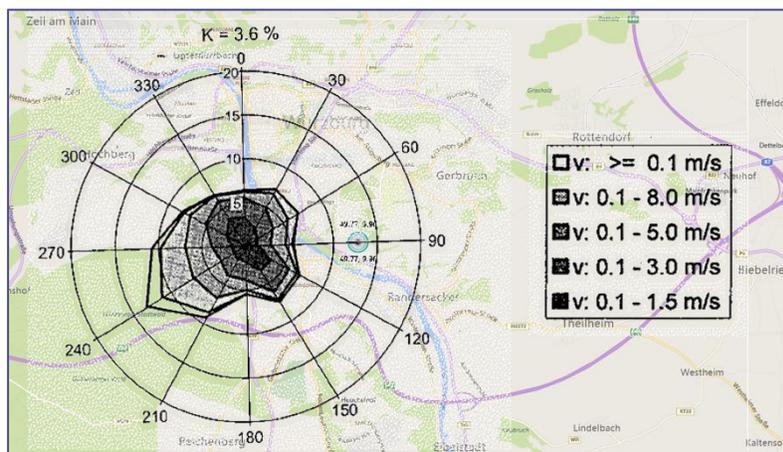
## 2 Bestehende Voruntersuchungen

Für das Stadtgebiet Würzburg liegen seit Anfang der 1980er Jahre mehrere klimatisch und lufthygienisch fokussierte Untersuchungen vor. Tabelle 1 bildet die zeitliche Abfolge in Kombination mit den dazugehörigen thematischen Schwerpunkten ab.

**Tabelle 1 Bestehende klimatische Voruntersuchungen**

Jahr	Titel	Thematischer Schwerpunkt / Autor /Hrsg.
1980	Landschaftsplan	Stadt Würzburg
1985	Landsat Befliegungen	Satellitengestützte Thermalerschfassung Stadtplanungsamt Würzburg
2004	Luftreinhalteplan für die Stadt Würzburg	Lufthygiene / Luftreinhaltung Dr. Chistina Wyrwich Regierung von Unterfranken
2009	Stadtklimatische Untersuchungen in Würzburg	Städtische Wärmeinsel Robert Künstler (Diplomarbeit) Julius-Maximilians-Universität Würzburg
2010	Luftreinhalteplan für die Stadt Würzburg (1.Fortschreibung)	Lufthygiene / Luftreinhaltung Dr. Chistina Wyrwich Regierung von Unterfranken
2012	Erstellung einer Klimafunktionskarte	Städtische Wärmeinsel FG Umweltmeteorologie Universität Kassel
2014	Feinstaubgutachten	Lufthygiene / Luftreinhaltung Prof. Dr. Wermuth Stadt Würzburg

Zusätzlich ist eine meteorologische Messstation des Deutschen Wetterdienstes vorhanden, welche im südlichen Bereich des Stadtteils „Frauenland“ bei den Koordinaten: nördliche Breite: 49.77°, östliche Länge: 9.96°, Höhe: 272 m über NN verortet werden kann (Abbildung 1). Die jährliche Windverteilung zeigt die regionale Hauptanströmung aus Südwest.



**Abbildung 1 Windrose zu Würzburg Verortung Meteorologische Messstation des DWD (verändert nach BayFORKLIM, 1996 u. Bing Maps, 2016)**

Neben den klimatisch orientierten Untersuchungen liegen mehrere „Integrierte Städtebauliche Entwicklungskonzepte“ (ISEK) aus den Jahren 2012 bis 2015 für die Gesamtstadt ebenso für die Einzelgebiete „Innenstadt“, „Heidingsfeld“, „Versbach“ und „Lengfeld“ vor.

Die in 2009 entstandene Diplomarbeit „Stadtklimatische Untersuchungen in Würzburg“ bietet eine gute Grundlage für das Verständnis der thermischen Situation in Würzburg. Speziell die in der Arbeit in Kapitel 5.2 aufgezeigte Transpirationsleistung der Grünflächen im Stadtgebiet und der damit verbundenen verminderten Lufttemperatur von durchschnittlich 1.0 K gegenüber vegetationsloser Flächen im Innenstadtbereich sind sehr aufschlussreich. Besonders während Strahlungsnächten konnte dort nachgewiesen werden, dass sich die Differenz auf bis zu 2.0 K erhöht, was unter anderem durch die zusätzliche Wärmespeicherkapazität der stark bebauten Flächen zurückzuführen ist (vgl. Künstler, 2009).

Die im Jahre 2012 von die Universität Kassel durchgeführten thermischen und dynamischen Untersuchungen des Stadtgebietes Würzburg (vgl. Katzschner et al., 2012) konnten als Grundlagen für die weitere Analyse genutzt werden. Die in diesem Zusammenhang entwickelte Klimafunktionskarte wurde allerdings relativ grob aufgelöst (100 m) (Abbildung 2). Im Rahmen des „Integrierten Klimaschutzkonzept für die Stadt Würzburg“ (iKSK) konnte diese Klimafunktionskarte für gesamtstädtische klimatische Beschreibung herangezogen werden, um darüber hinaus erste großräumige Planungsaussagen zu treffen

(vgl. iKSK, 2012), und erlaubte somit eine erste grobe Einschätzung der Klimafunktionen der Flächen. Abweichungen zu der nun hier vorgelegten Klimafunktionskarte sind im Wesentlichen auf die systematische Verwendung einer deutlich breiteren Datengrundlage mit einer höheren räumlichen Auflösung zurückzuführen. Final wurde die Karte auf ein 25 m Raster verfeinert.

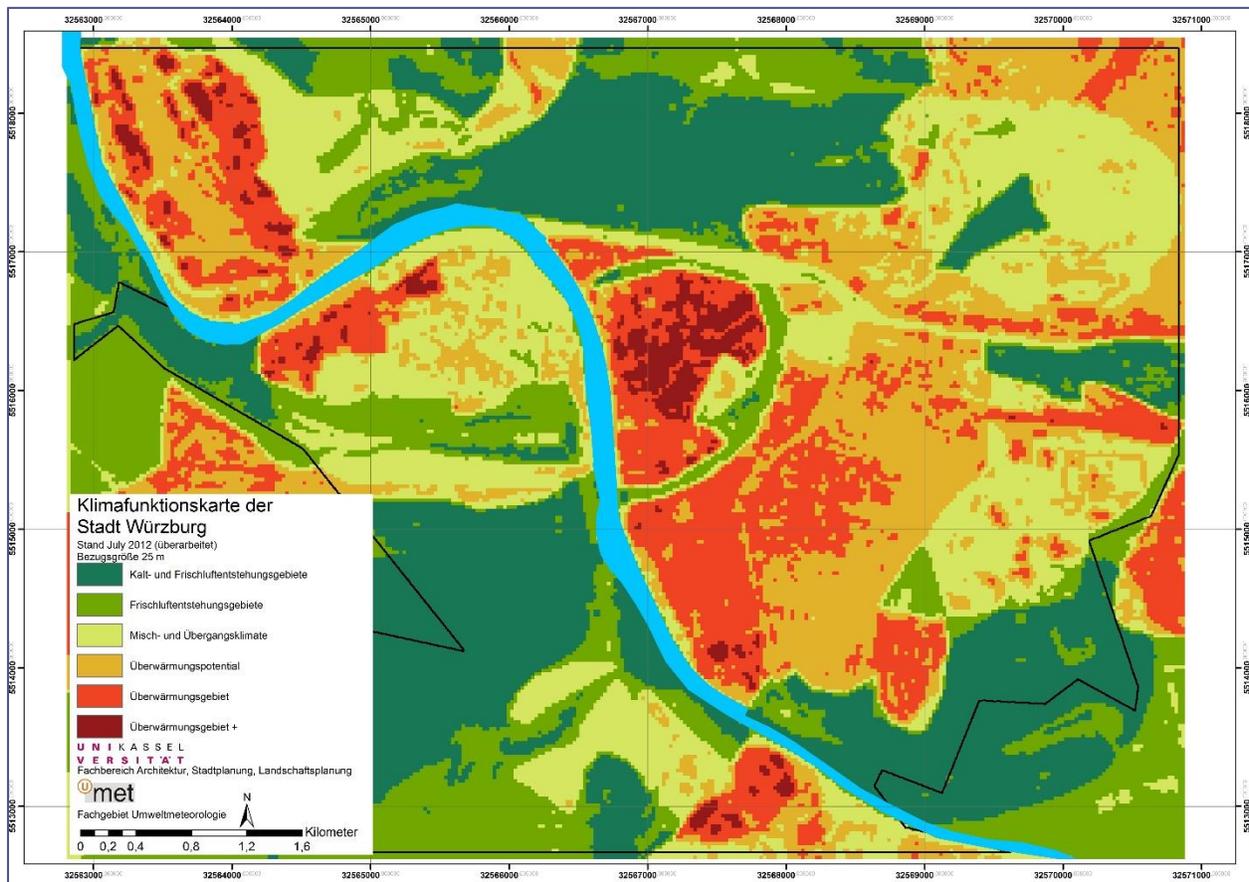


Abbildung 2 Klimafunktionskarte des studentischen Projektes "Stadtklima Würzburg" (2012)

Ergänzend wurde durch die studentischen Bearbeiter die lokale Windsituation untersucht (siehe Abbildung 3). Die hier erfassten Daten zeigen die Windstärke und Windrichtungsverteilung an einem typischen Frühlings- / Sommertag im Tagesgang an unterschiedlich geographisch verteilten Messpunkten. Die Untersuchung der Windverteilung spiegelt im Großteil die regionale Windrichtung aus Südwest wieder. Abweichende Messungen im Bereich der nördlichen „Altstadt“ sind auf die geringe Rauigkeiten (Rauigkeit beschreibt die Eigenschaft einer Fläche / eines Einzelobjektes, wie sehr diese(s) reduzierend auf die

Windgeschwindigkeit auswirkt) und durch die Beeinflussung mittels einer dort verorteten Luftleitbahn zurückzuführen, wodurch sich eine lokale Windfeldveränderung Richtung Ost-südost einstellt. Dies entspricht der dominanten Windrichtung innerhalb der Luftleitbahn Richtung Osten. Die in 2012 durchgeführten Messungen decken sich größtenteils mit den aktuell in dieser Arbeit berechneten Luftleit- und Durchlüftungsbahnen.

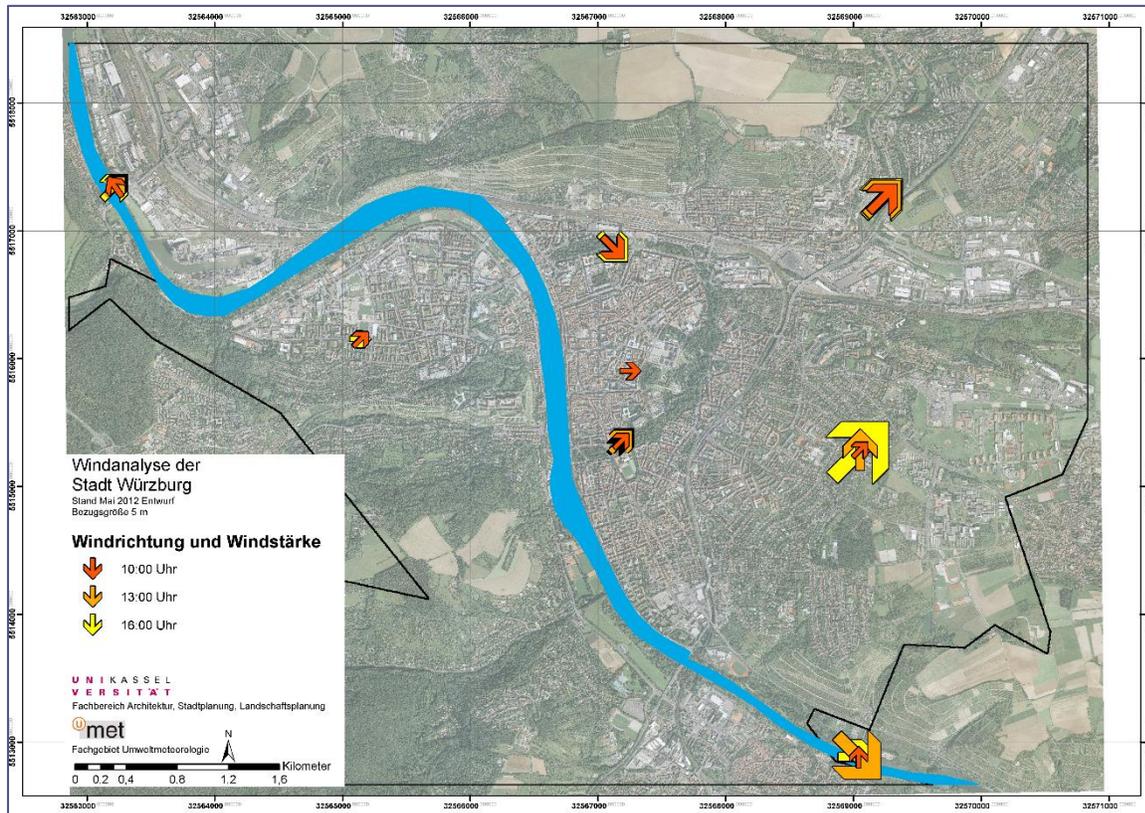


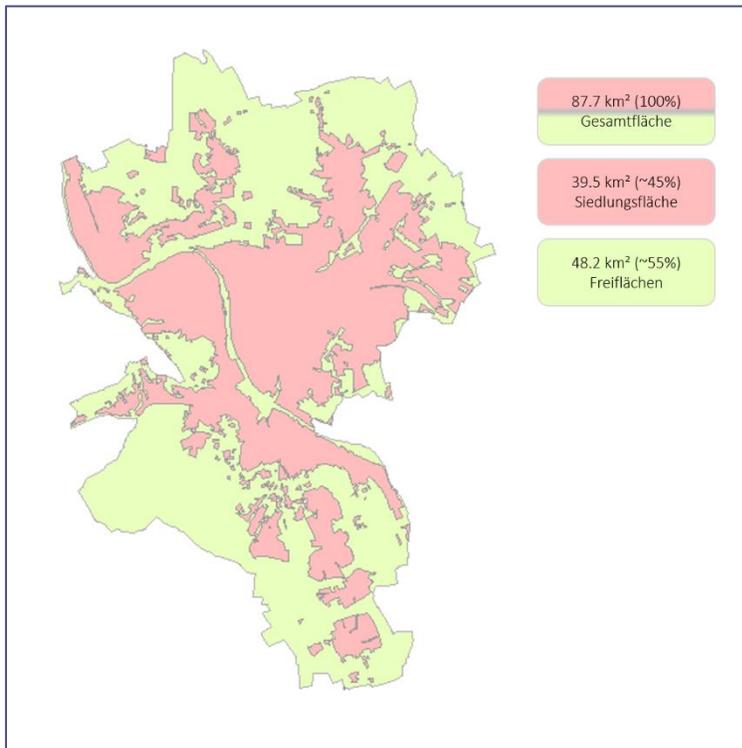
Abbildung 3 Windanalyse des studentischen Projektes „Stadtklima Würzburg“ (2012)

### 3 Naturräumliche, klimatische und administrative Einordnung

---

#### 3.1 Natur- und Siedlungsraum

Die Stadt Würzburg ist ein Oberzentrum im Regierungsbezirk Unterfranken. Mit einer Einwohnerzahl von 124.219 (Stand 31.12.2014) ist sie die fünftgrößte Stadt Bayerns. Das Stadtgebiet umfasst eine Fläche von rund 87,78 km<sup>2</sup>. Diese setzt sich aus 39,5 km<sup>2</sup> (ca. 45 %) Siedlungs- und 48,2 km<sup>2</sup> (ca. 55 %) Freiflächen zusammen (Abbildung 4).



**Abbildung 4 Flächenverteilung Stadt Würzburg (eigene Darstellung auf Grundlage des Basis-DLM)**

#### 3.2 Topographie und Klima

Mit seiner flach gewellten Oberfläche liegt Würzburgs Siedlungsraum eingebettet im Mainfränkischen Becken. *"Dieses wird eingerahmt von den Höhenzügen des Odenwalds und Spessarts im Westen, der Rhön und dem Thüringer Wald im Norden sowie den Schichtstufen der Haßberge, des Steigerwaldes und der Frankenhöhe im Osten. Das*

*Mainfränkische Becken wird durch den Main und seinen Nebenflüssen in einzelne Platten [...] gegliedert und in [...] tiefe Täler zerschnitten.*“ (Künstler 2009).

Würzburgs höchster Punkt liegt mit 360 m über NN auf der Frankenwarte, der tiefste Punkt mit 166 m über NN am Neuen Hafen. Würzburg wird klimatisch stark durch topographische Gegebenheiten definiert. Die ausgeprägte Kessellage begünstigt das Risiko von Inversionswetterlagen, welche im Raum Würzburg vornehmlich im Winter auftreten. Die Innenstadt verfügt innerhalb des Ringparks, der die Innenstadt als Grüngürtel umschließt, kaum über öffentliche Frei- und Grünflächen. Die dominierenden / hervorstechendsten Freiraumelemente im Stadtgebiet sind der Main, der Ringpark, der Botanische Garten sowie die umliegenden Weinberge.

Entsprechend der Daten des Luftreinhalteplans von 2004 treten an 70 % bis 80 % aller Tage im Jahr Inversionswetterlagen bis 1000 m über NN auf.

*„Diese lösen sich in den Sommermonaten meist am Vormittag wieder auf, im Winter dagegen bleiben ca. 70 % aller Inversionen bis zum Mittag bestehen. Von den in den Herbst- und Wintermonaten auftretenden Inversionen sind ca. 20 % bis 30 % aller in der Nacht festgestellten Inversionen bis 500 m über Grund noch am Mittag des Folgetages erhalten“* (Wywrich, 2004 (Luftreinhalteplan Stadt Würzburg).

## 4 Methodik

---

### 4.1 Herleitung

Die zunehmende Temperaturverschiebung und insbesondere die Zunahme der Sommertage ( $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ) sowie Tropennächte ( $\geq 20^{\circ}\text{C}$ ) rücken immer stärker in den Fokus der Stadtplanung. Insbesondere durch die Akkumulation der Wärme innerhalb des urbanen Umfelds kann es bereits in mittelgroßen Städten zur Ausprägung der städtischen Wärmeinsel kommen, was zu einer verstärkten thermischen Beeinflussung von Baustrukturen (und Infrastruktur) sowie bioklimatischen Belastung für Menschen, Tiere und Pflanzen führt. In Anbetracht der weiter voranschreitenden Klimaveränderung ist es daher eine wichtige Aufgabe der Kommunen, klimatische Aspekte bei der Stadtentwicklung systematisch zu

berücksichtigen und Belastungen durch eine vorausschauende Stadtplanung und die Umsetzungen von Maßnahmen zur Umfeldverbesserung abzubauen.

Die angewandte Stadtklimatologie befasst sich seit geraumer Zeit mit Analysemethoden (vgl. Burghardt 2015; Burghardt et al. 2014), die direkte Grundlagen für eine Vielzahl planerischer Fragestellungen bietet. Das Stadtklima setzt sich dabei aus zwei Komponenten zusammen, den thermischen und den dynamischen Aspekten. *„Ein ideales Stadtklima zeichnet sich durch eine möglichst große Inhomogenität mit einer charakteristischen Weglänge von 150 m und einem thermisch und lufthygienisch belastungsfreiem Raum aus. Es soll die planerischen Absichten im Außenraum unterstützen“* (Mayer 1989). Dementsprechend bietet ein heterogenes Mikroklima mehr Freiraum für die individuelle Anpassung von Menschen, Tieren und Pflanzen an ihre städtische Umwelt, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, stadtklimatische Belange mit planerischen Zielen in Einklang zu bringen.

Im stadtplanerischen Kontext wird zwischen mehreren Planungsebenen unterschieden. In Abhängigkeit der gewählten Planungsebene finden sich wiederum unterschiedliche klimatische Einordnungen (klimatische Planungsebenen, siehe Abbildung 5), die es zu beachten gilt. So bewegt sich ein Flächennutzungsplan im mesoklimatischen Bereich, wohingegen Einzelgebäude oder Gebäudegruppen sich auf der Ebene des Mikroklimas befinden. Bebauungspläne liegen -je nach Flächenumgriff- zwischen diesen beiden Ebenen und werden dem Lokalklima zugeordnet

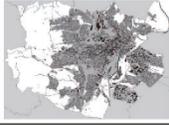
administrativer Bezug	Planungsebene	klimatische Einordnung	klimatische Fragestellung	Auflösung
 Region	Regionalplan > M 1: 100.000	Mesoklima	regionale Luftaustauschprozesse und Klimafunktionen	Rastergröße 100 m
 Stadt	Flächennutzungsplan > M 1: 10.000	Mesoklima	Wärmeineleffekt, Belüftungsstrukturen (Rauhigkeiten)	Rastergröße 25 - 50 m
 Ortsteil	Bebauungsplan M 1: 5.000	Lokalklima	Übergang von Klimatop- zu Mikroklimaanalyse	Rastergröße 10 m
 Block	Bebauungsplan M 1: 1.000	Mikroklima	Mikroklimatische Untersuchungen, thermischer Komfort	Rastergröße 2 - 5 m
 Gebäude	Bauplan/ Objekt M 1: 200	Mikroklima/ Gebäudeklima	Strahlungs- und Gebäudeumströmungen	Rastergröße > 0 - 2 m

Abbildung 5 Klimatische Einordnung von regionalen und städtischen Planungsebenen

Trotz der direkten und indirekten Wechselbeziehungen der einzelnen stadtklimatischen Ebenen muss eine strikte fachliche Trennung erfolgen. So kann z.B. eine gesamtstädtische mesoklimatische Analyse nicht auf einen Objektplan gezoomt und angewendet werden. Dies ergibt sich zum einen aus den unterschiedlichen Auflösungen (Rastergrößen) und zum anderen aus den unterschiedlichen klimatischen Fragestellungen unter deren Aspekten die jeweiligen Klimaanalysen durchgeführt werden (vgl. Abbildung 5). Ebenso kann die erforderliche Datenbasis in Abhängigkeit der klimatischen Planungsebene variieren.

Um ein Gesamtbild der stadtklimatischen Situation darstellen zu können, ist eine mesoskalige Analyse notwendig. Die Ergebnisse der Analyse werden als Klimafunktionskarte dargestellt, und geben Aufschluss über die Verteilung verschiedener Klimatope (Flächen die sich durch bestimmte klimatische Eigenschaften charakterisieren lassen) sowie über den Einfluss der regionalen Belüftungssituation, auch können für die Stadtentwicklung wichtige Empfehlungen erarbeitet werden. Sollten sich hierbei bereits einzelne „Hotspots“

herauskristallisieren, so können diese nachfolgend, unter Zuhilfenahme mikroklimatischer numerischer Simulationen, genauer untersucht werden, um detaillierte Maßnahmen zu erarbeiten (vgl. nächster Absatz)

Stadtklimatische Bewertungen, die den Außenraum und somit den direkten Lebens- und Aufenthaltsraum der Menschen betreffen, finden im Maßstab der Mikroklimata (< M 1:1000) statt. Die Gestaltung der Umwelt hat direkten Einfluss auf die thermische Situation in diesem Bereich und beeinflusst dadurch auch indirekt das Wohlbefinden der Bewohner. In diesem Maßstab, in dem kleinräumige nachbarschaftliche Einflüsse eine größere Rolle spielen, zeigt sich, ob ein schattenspendender Baum am richtigen Ort gepflanzt wurde oder ob er durch die Baumkrone vielleicht ein Belüftungshindernis darstellt. Auf den Menschen wirken permanent eine Vielzahl von unterschiedlichen Umwelteinflüssen ein, mit denen sich der Organismus auseinandersetzen muss. Um nun das Behaglichkeitsempfinden, (bestehend aus einem komplexen Zusammenspiel unterschiedlichster Einflußgrößen) eines Individuums erfassen zu können, müssen alle relevanten Einflüsse berücksichtigt werden (vgl. Frank 1975). Durch die Komplexität und Dynamik der mikroskaligen Energieflüsse ist eine gesamtstädtische Darstellung (Simulation) des vorherrschenden Mikroklimas mit einer Auflösung von ca. 1 m aus technischer Sicht heute noch nicht möglich.

## 4.2 Erstellung der Klimafunktionskarte

Ziel der Erstellung einer Klimafunktionskarte ist es, Flächen und deren Verbindungen miteinander hinsichtlich ihrer Klimafunktionen zu bewerten und daraus Empfehlungen abzuleiten. Hierfür sind drei Aspekte grundlegend:

- 1) die Wärmebelastung, diese ist abhängig von der Einstrahlung, dem umgebenden Gebäudevolumen und der vorhanden Vegetation,
- 2) das übergeordnete Strömungsfeld (Luftleitbahnen): für die Durchlüftung der Stadt sorgen häufig großräumige (synoptische) Winde. Die Winde in der Stadt hängen dabei von der Anströmrichtung, sowie der baulichen und topographischen Struktur der Stadt ab. Für die Durchlüftung der Stadt sind daher Luftleitbahnen (zusammenhängende, windoffene Flächen mit geringer Oberflächenrauigkeit) von entscheidender Bedeutung.
- 3) das autochthone Windfeld: ergänzend zu den großräumigen Winden bilden sich auch lokale (autochthone, eigenbürtige) Strömungen aus. Häufig werden diese durch lokale Temperaturdifferenzen angetrieben (z.B. nächtliche kühle Hangwinde von den Weinberglagen). Ihnen kommt in der stadtklimatischen Bewertung eine besondere Bedeutung zu, da sie an (windstillen) Hitzetagen die einzig wesentlichen kühlenden Windströmungen darstellen.

Für die Beurteilung der bioklimatischen Situation ist eine absolute Bewertung wenig sinnvoll. Im Einklang mit der grundlegenden VDI-Richtlinie 3785 (Blatt 1) wird daher mittels einer statistischen Analyse die Abweichung der Klimaparameter vom Mittelwert im Untersuchungsraum bewertet. Hierfür ist somit eine flächendeckende Bestimmung von Parametern, die die o.g. Aspekte (Wärmebelastung, synoptisches Windfeld, autochthones Windfeld) beschreiben erforderlich, welche grundsätzlich über drei Herangehensweisen erreicht werden kann:

- (a) messtechnische Bestimmung

Entsprechende Messungen wurden auch in Würzburg durchgeführt. Sie geben aber immer nur ein punktuelles Bild. Zur Ableitung flächendeckender Aussagen müssen sie mit einer der beiden anderen Methoden ergänzt werden.

(b) heuristische Klassifizierung

Der Grad der fühlbaren Hitzebelastung und die lokale Ausprägung autochthoner Winde hängen entscheidend von lokalen Bedingungen wie der Topographie, der Vegetation, der Versiegelung und der Art der Bebauung ab. Somit können durch eine gewichtete Kombination unterschiedlicher Eingangsgrößen (Details dazu s.u.) verlässliche Strukturen (Cluster) abgeleitet werden, die dann wiederum Klimatopen zugeordnet werden können (vgl. Burghardt et al. 2014).

(c) Strömungssimulationen mit prognostischen Modellen

Auf Grundlage aufbereiteter Eingangsdaten, mit einer räumlichen Auflösung, die eine gesamtstädtische Berechnung erlaubt, können Klimaparameter modelliert werden. Die Einteilung der Klimatope erfolgt dann durch statistische Auswertung der resultierenden Werteverteilung.

Für die vorliegende Arbeit wurde eine Kombination aus den Varianten (a) und (b) gewählt.

Die Zuordnung der Klimatope und die Ableitung der Empfehlungen erfolgen daher auf Basis einer thermischen Analyse, in die alle räumlichen Aspekte einfließen, die die gefühlte Hitzebelastung (gemessen durch die physiologisch äquivalente Temperatur) beeinflussen und einer dynamischen Analyse, in der die Luftleitbahnen und das autochthone Windfeld ermittelt werden.

### 4.3 Technische Umsetzung

Die Technik der Erstellung einer Klimafunktionskarte hat sich seit Anfang der 1970er dahingehend verändert, dass durch den Einsatz moderner Geoinformationssysteme wesentliche Verbesserungen in der Erfassung der klimatischen Wechselbeziehungen möglich wurden. Obwohl es national wie auch international keinen einheitlichen Standard zur Herleitung einer Klimafunktionskarte gibt, ist die Verschneidung zuvor erfasster stadtklimatischer Einflussgrößen mit dem Ziel der Klimatopausweisung und –evaluierung anerkannte wissenschaftliche Praxis (vgl. Katzschner, et al., 2009; Lohmeyer, 2008; Burghardt, 2015; Oke, 1987 & 2006; Gartland, 2008). Insbesondere Ng & Ren haben 2015 mit ihrem umfassenden Werk die (inter)nationale Verbreitung und Erstellung moderner Klimafunktionskarten thematisiert.

Die Analyse einzelner klimatisch relevanter Größen (Themenkarten), die Berechnung der Klimafunktionskarte sowie die Entwicklung der Planungshinweiskarte geschehen innerhalb eines Geoinformationssystems.

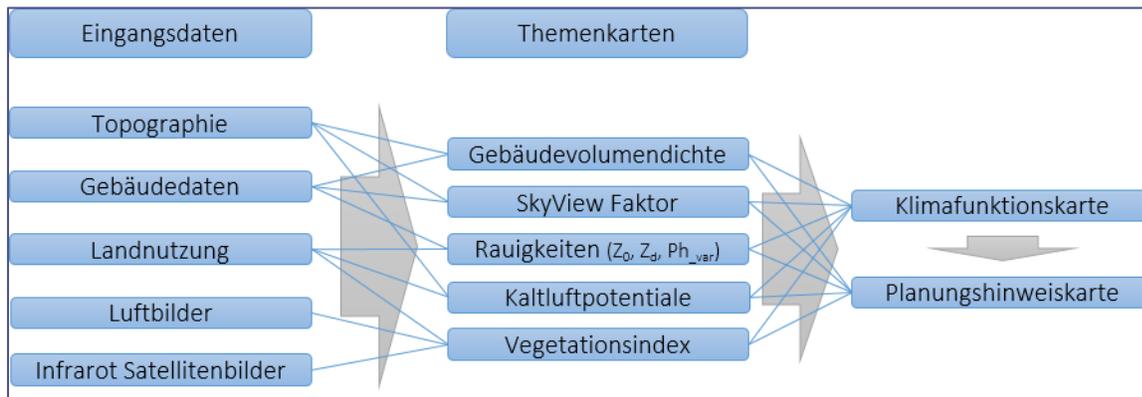


Abbildung 6 Schematische Darstellung der Herleitung der KFK und PHK

Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, basieren die einzelnen Themenkarten auf mehreren jeweils unterschiedlichen Eingangsdatensätzen. Entgegen der Eingangsdaten, welche diskrete stadt- und landschaftsplanerische Informationen abbilden, repräsentieren die Themenkarten klimarelevante räumliche Ableitungen. Auf Grundlage der Themenkarten wird die Klimafunktionskarte (KFK) abgeleitet. Dies geschieht unter Zuhilfenahme einer line-

aren Wertungsmatrix, welche auf den geolokalen Besonderheiten der Stadt, sowie der wissenschaftlichen klimatischen Expertise beruht. Als Derivat der KFK wird die Planungshinweiskarte (PHK) für den schnellen und übersichtlichen Planungseinsatz entwickelt.

Die Entwicklung der Themenkarten basiert auf physikalisch korrekten Berechnungen innerhalb des Geoinformationssystems. Die Methodik zu ihrer Herleitung wurde unter anderem im Rahmen unterschiedlicher Arbeiten entwickelt und geprüft (siehe Burghardt, 2015).

#### 4.3.1 Thermische Analyse

Im Rahmen der thermischen Analyse werden für das Stadtgebiet Würzburg die vorherrschenden thermischen Charakteristika bzw. Grundmuster differenziert herausgearbeitet, die sich während autochthoner Wetterlagen einstellen. D.h. es erfolgt eine Abgrenzung von Klimaräumen mit jeweils ähnlichen klimatischen Eigenschaften bzw. einem spezifischen thermischen Tagesgang. Die nutzungsbedingte Flächenausstattung sowie deren topografische Lage im Raum stellen diesbezüglich wichtige Kriterien dar, ebenso die Wechselwirkungen mit dynamischen Prozessen.

Die Analyse bezieht die jeweiligen thermischen Aspekte schrittweise ein, so dass sich stufenweise die thermischen Charakteristika des Gesamtraumes ergeben. Im Folgenden werden die Analyseschritte überblickartig vorgestellt. Im Rahmen der thermischen Analyse kommt Wechselwirkungsprozessen mit dynamischen Funktionen eine wichtige Rolle zu, weshalb es inhaltliche Überschneidungen zur dynamischen Analyse gibt.

Einzelkriterien:

- Vegetationsbedeckung / Versiegelung der Oberflächen
- SkyView Faktor
- Gebäudemasse und Speicherkapazität/Gebäudevolumen
- Nutzungstypisierung (Zwischenberechnung, nicht als Themenkarte dargestellt)

Basis der thermischen Analyse ist die thermische Nutzungstypisierung. Diese beschreibt, ausgehend von der Realnutzung, die thermische Grundbedeutung, d.h. es ergibt sich eine

flächenbezogene Differenzierung in die potentiellen Klimatope Kalt-/Frischluftentstehungsgebiete, Misch-/ Übergangsklimate, Überwärmungsgebiete unterschiedlicher Ausprägung.

Zusätzliche flächenbezogene Faktoren sind der Versiegelungsgrad und die Vegetationsbedeckung. Da versiegelte Oberflächen großen Einfluss auf die thermische Situation haben, ist durch die erhöhte Wärmespeicherkapazität und der schnelleren Abfuhr von potentieller Wasserkühlung aus Niederschlägen, das Kriterium der versiegelten Oberflächen unbedingt zu berücksichtigen. Vegetationsflächen und Einzelelemente (z.B. Bäume) fungieren als Retentionsflächen. Sie können die Wassermenge, welche zur Abkühlung der Stadt beitragen kann (Verdunstungskühle) signifikant erhöhen. Den Grad der Versiegelung / Vegetationsbedeckung anhand der Landnutzungskartierung (bspw. Basis-DLM) zu bestimmen ist für die stadtklimatische Analyse nicht ausreichend, da hierbei vielerlei Einzelelemente (Bäume, kleinere Grünflächen, etc.) nicht berücksichtigt werden können, weshalb die Landnutzungskartierungen unter Zuhilfenahme von Satellitenbildern ergänzt werden muss.

Neben der zweidimensionalen Betrachtung ist die vertikale Ausrichtung thermisch relevanter Flächen, gerade im verdichteten Raum, enorm wichtig. Diese Beeinflussung konnte durch die Gebäudemasse/ Speicherkapazität herausgearbeitet werden. Durch diese feingliedrige Informationsebene konnten räumlich sehr genaue zusätzliche Überwärmungsfaktoren herausgestellt werden.

#### 4.3.2 Dynamische Analyse

Im Rahmen der dynamischen Analyse wurden für das Stadtgebiet Würzburg die vorherrschenden dynamischen Charakteristika herausgearbeitet. Hierunter sind im Wesentlichen die Funktionen des Lufttransportes bzw. -austausches und alle in diesem Zusammenhang relevanten Phänomene, wie z.B. Luftleitbahnen unterschiedlicher Art, Strömungsbarrieren, Kaltluftabfluss bzw. -stau etc. zu verstehen.

Schwerpunktmäßig bezieht sich die dynamische Analyse auf die während autochthoner Wetterlagen auftretenden Prozesse, da diese die klimatischen Problemwetterlagen darstellen. Ergänzend werden die bei Windwetterlagen relevanten (inner-)städtischen Durchlüftungs- und Ventilationsbahnen in die Betrachtung integriert.

Einzelkriterien:

- Offenheit der Bebauungsdichte / Rauigkeit / Porosität
- Topographisches Einzugsgebiet
- Abflussbahnen / Abflussrichtungen

Die inhaltliche Grundlage für die Analyse dynamischer Aspekte bildet vor allem die Reliefstypisierung mit ihren unterschiedlichen Facetten (Hangneigungsklassifizierung, Luftleitpotentialbestimmung etc.) sowie die im Rahmen der Nutzungstypisierung vorgenommene strukturelle Charakterisierung der Oberflächen.

Durch die erweiterte Datengrundlage konnten gebäudespezifische Barrieren genauer analysiert werden und in die Betrachtung der Luftleitbahnen integriert werden. Hierzu wurde der Kriterienkatalog um das Kriterium des Gebäudevolumens erweitert. Diese vertikale Ausdehnung ermöglicht, in Kombination mit dem digitalen Höhenmodell, eine realistische Betrachtungsweise.

Diverse andere Klimainformationen (wie z.B. vorliegende klimaökologische Messergebnisse) liefern ergänzende Detailspekte.

#### 4.3.3 Bewertungsverfahren

Die Bewertung bezieht die klimaökologischen Funktionen, ihre Wertigkeit und die Wechselwirkungen zwischen klimatischen Gunst- und Belastungsräumen ein. Die Freilandbereiche sind auf ihre Ausgleichspotentiale (Luftmassentransport / -austausch, Kalt- / Frischluftentstehung etc.) untersucht und unter Einbeziehung ihrer Wirkungszusammenhänge zu klimatischen Konfliktbereichen bewertet. Im bebauten Bereich sind die unterschiedlich stark ausgeprägten Überwärmungspotentiale sowie die Aspekte der generellen Lufthygiene und der Belüftung die bedeutenden Bewertungskriterien, um die Vorbelastungen für klimatischen Wirkungsausgleich zu beschreiben.

Eine Zusammenführung dieser Ergebnisse mit geländestrukturellen Charakteristika und damit verbundenem dynamischen Einflusspotential ist insbesondere für die Ermittlung des tatsächlichen Überwärmungsgrades, wie auch von ausgeprägten Kaltluftansammlungen, notwendig.

Die Aufgabe einer planungsbezogenen Stadtklimatologie (VDI, 2008) ist die Verbesserung der lufthygienischen und thermischen Bedingungen. Dies kann durch unterschiedliche Maßnahmen und Handlungsstrategien erreicht werden.

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

Auf Grundlage dieser Erhebungen kann eine räumliche Festlegung in einer verbindlichen Planungsebene erfolgen. Die thermische Bewertung und auch damit die Klassifikationen der Klimafunktionskarte wurden von der „Physiologisch Äquivalenten Temperatur“ (PET) abgeleitet was den Vorteil hat, dass dieser Index als eine Komplexgröße aus Windbewegung, Strahlung, Lufttemperatur und Feuchte direkt die Wärmebelastung als „Hitzebelastung“ wiedergibt. Die Klimafunktionskarte drückt dies in einer Legende in Farbzonierungen aus.

Um aus der komplexen thematischen Darstellung der Klimafunktionskarte einen möglichst schnell zugänglichen anwendungs- und planungsorientierten Mehrwert zu generieren, wird in einem abschließenden Verfahren eine klimatische Planungshinweiskarte entwickelt. Da diese Karte auf der Grundlage der Klimafunktions- sowie der dazugehörigen Themenkarten basiert, sind die planerisch getroffenen Aussagen auch auf den mesoklimatischen gesamtstädtischen Kontext anzuwenden und nicht für mikroklimatische Fragestellungen unmittelbar nutzbar. Die Herleitung der Planungshinweiskarte geschieht durch die statistische und räumliche Gruppierung der Themenkarten in jeweils drei klimatische planerische Bewertungsklassen (positiv, neutral, negativ). Diese werden dann auf die Klimatopenteilung des Untersuchungsraums projiziert und miteinander ver-

schnitten. Die Planungshinweiskarte zeigt als Ergebnis die thematische orientierte Verortung von Risiko- und Potentialbereichen, sowie planungsorientierte Handlungshinweise für die zukünftige Stadtentwicklung.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Klimafunktionskarte

Die Klimafunktionskarte stellt die fachliche Verschneidung der erarbeiteten Themenkarten dar, welche durch die GIS gestützte Verarbeitungsmatrix unter Berücksichtigung der Lokalisation des Untersuchungsraums die stadtklimatischen Zusammenhänge als sechs definierte Klimatope beschreibt. In Anlehnung an die VDI Richtlinie 3787 können diese 6 Klimatopklassen mit unterschiedlichen Klimaeigenschaften assoziiert werden. Jedes Klimatop besitzt zudem eine Beschreibung, welche die wichtigsten klimatischen Eigenschaften des jeweiligen Klimatops charakterisiert.

Kategorie	Beschreibung
Kaltluft- und Frischluftentstehungsgebiet	<p>Diese klimatisch hochaktiven Flächen sind wichtige Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete. Sie sind meist durch niedrigen Bewuchs geprägt, womit eine geringe Oberflächenrauigkeit gegeben ist. Dementsprechend können sie in Abhängigkeit ihrer Exposition und Verteilung im Raum die Belüftungssituation und den Kaltluftabfluss beeinflussen.</p> <p>Zu den Gunstklimate gehören Flächen mit hoher nächtlicher Abkühlungsrate (vornehmlich Grünland sowie landwirtschaftliche Flächen und Brachen). Zudem sind diese Gunstklimate nur gering emissionsbelastet, wodurch ihnen eine wichtige Funktion in Zusammenhang mit dem regionalen und lokalen Belüftungs- und Zirkulationssystem zukommen.</p>
Frischluftentstehungsgebiet	<p>Insbesondere die Frischluftentstehungsgebiete sind lufthygienisch bedeutende Flächen mit starker Filterwirkung für Luftschadstoffe sowie charakterisierende Frischluftproduktion. Größtenteils durch dichten Gehölzbestand gekennzeichnet.</p>

<p>Misch- und Übergangsklimate</p>	<p>Diese vegetationsgeprägten Gebiete haben ausreichende Größe um ein lokales klimatisches Ausgleichspotential zu generieren. Sie besitzen damit eine hohe klimaökologische Wertigkeit als Puffer- und Ausgleichsgebiete.</p> <p>Misch- und Übergangsklimate können als Pufferbereiche in der Stadt dienen. Auf diesen Flächen findet eine ausreichende lokale Belüftung und Evapotranspiration statt, wodurch sie besonders in den Sommermonaten mit ihrer Ausgleichsfunktion dem idealen Stadtklima entsprechen.</p>
<p>Überwärmungspotential</p>	<p>Baulich geprägte Gebiete mit hohem Vegetationsanteil oder Offenheit, sowie moderatem nächtlichen Abkühlungspotential. Belüftung kann durch Bebauung eingeschränkt sein.</p>
<p>Moderate Überwärmung</p>	<p>Verdichtete Gebiete mit großen Baumassen. Freiräume meist vegetationsfrei und mit eingeschränkter Belüftung. Überwärmungsrisiko erhöht.</p>
<p>Starke Überwärmung</p>	<p>Stark verdichtete Gebiete, geprägt durch fehlende Vegetation und geringen Retentionseigenschaften. Stark eingeschränkte Belüftung. In Kombination mit großen Baumassen entsteht ein hohes Überwärmungsrisiko.</p>

Kategorie		Beschreibung
	Luftleitbahn (hohe Bedeutung)	Luftmassenaustausch zwischen Umland und Stadt in Abhängigkeit der Windverteilung. Klimatisch und lufthygienisch von großer Bedeutung, insbesondere bei regionalen Schwachwindlagen.
	Luftleitbahn (neutral)	Luftmassenaustausch zwischen Umland und Stadt in Abhängigkeit der Windverteilung. Durch Überströmung industrieller Anlagen in ihrer lokalen stadtklimatischen Bedeutung herabgesetzt.
	Kaltluftbahn / Kaltluftabflussrichtung (hohe Bedeutung)	Thermisch induziertes, bei regionalen Schwachwindlagen, nächtliches Windsystem. Produzierte Kaltluft auf / über unversiegelten Flächen fließt reliefbedingt hangabwärts.

Kategorie		Beschreibung
	Luftleitbahn	Flächen geringer Rauigkeit (flaches Gelände, keine Gebäude, etc.), mit besonderer Eignung zum bodennahen Transport von Luftmassen mit regionaler / lokaler Bedeutung.
	Luftleitbahn / Kaltlufttransport	Flächen mit ausreichender Hangneigung und günstiger Hangrichtung zur Aufnahme und Abtransport von nächtlich produzierter Kaltluft bei Schwachwindsituationen.
	Durchlüftungsbahn (hohe Bedeutung)	Lokale Flächen, welche neben den übergeordneten Luftleitbahnen zur Belüftung beitragen können. Meistens Flächen mit geringer Oberflächenrauigkeit wie Straßen, Gleiskörper, Flussläufe etc.. Planerisch für die lokale Belüftungssituation von hoher Bedeutung.

In baulich geprägten Bereichen führen verschiedene nutzungsbedingte "Ausstattungsfaktoren" je nach Ausprägungen zu mehr oder weniger starken Überwärmungstendenzen wie auch zu einer Einschränkung der Durchlüftung und Reduzierung / Verzögerung nächtlicher Abkühlung. Zu diesen Faktoren zählen z.B. Versiegelung, Gebäudestrukturen bzw. -kubaturen oder Durchgrünung, aber auch Aspekte wie Topografie, Lage, Größe etc. der entsprechenden Flächen sowie der ggfs. vorhandene kompensatorische Einfluss von benachbarten Ausgleichsflächen. Hieraus können im Zusammenspiel mit Emissionen je nach Wetterlage teilweise hohe Luftbelastungen resultieren, die in Abhängigkeit der Wetterlage und der Geländestruktur auch auf benachbarte Räume negativ einwirken.

Baustrukturell bedingte Barrierewirkungen gegenüber abfließenden Luftmassen sind besonders in Flusslagen von Relevanz, da hieraus erhebliche Auswirkungen gegenüber der Funktionsfähigkeit von Luftleitbahnen entstehen können.

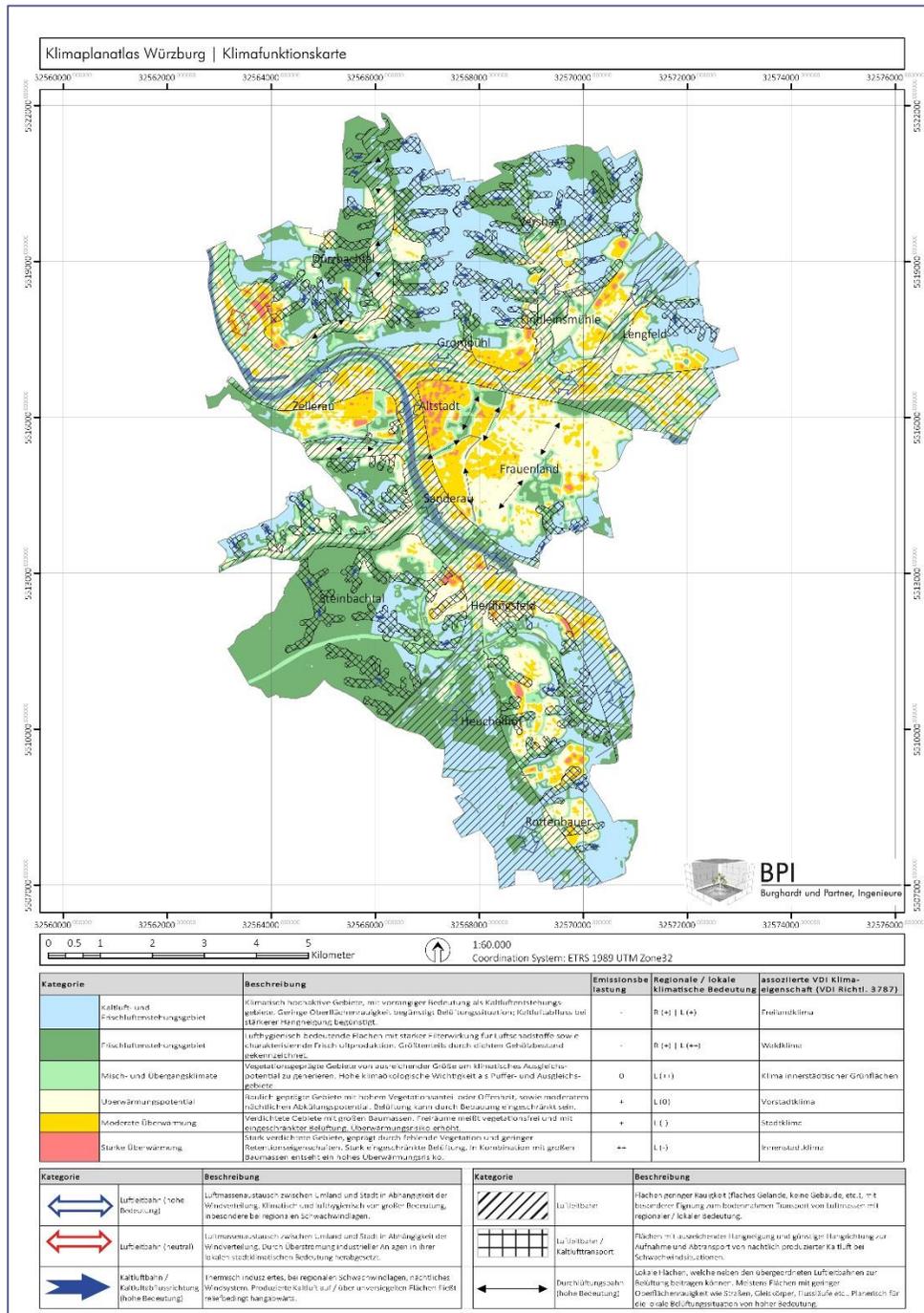


Abbildung 7 Klimafunktionskarte der Stadt Würzburg (2015/2016)

## 5.2 Planungshinweiskarte

Ergänzend zur Klimafunktionskarte und den erstellten klimatischen Themenkarten, kann die Planungshinweiskarte im mesoklimatischen Maßstab Hinweise für die Stadtverwaltung, Stadterneuerung und den Stadtbau liefern. Die statistische Überlagerung aller Themenlayer wird in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Über die statistische Verteilung der stadtklimatisch relevanten Einflussgrößen (Themenkarten) lassen sich Stadtteilcharakteristika ablesen. Diese können für eine individuelle klimatische Beschreibung der einzelnen Stadtteile herangezogen werden.

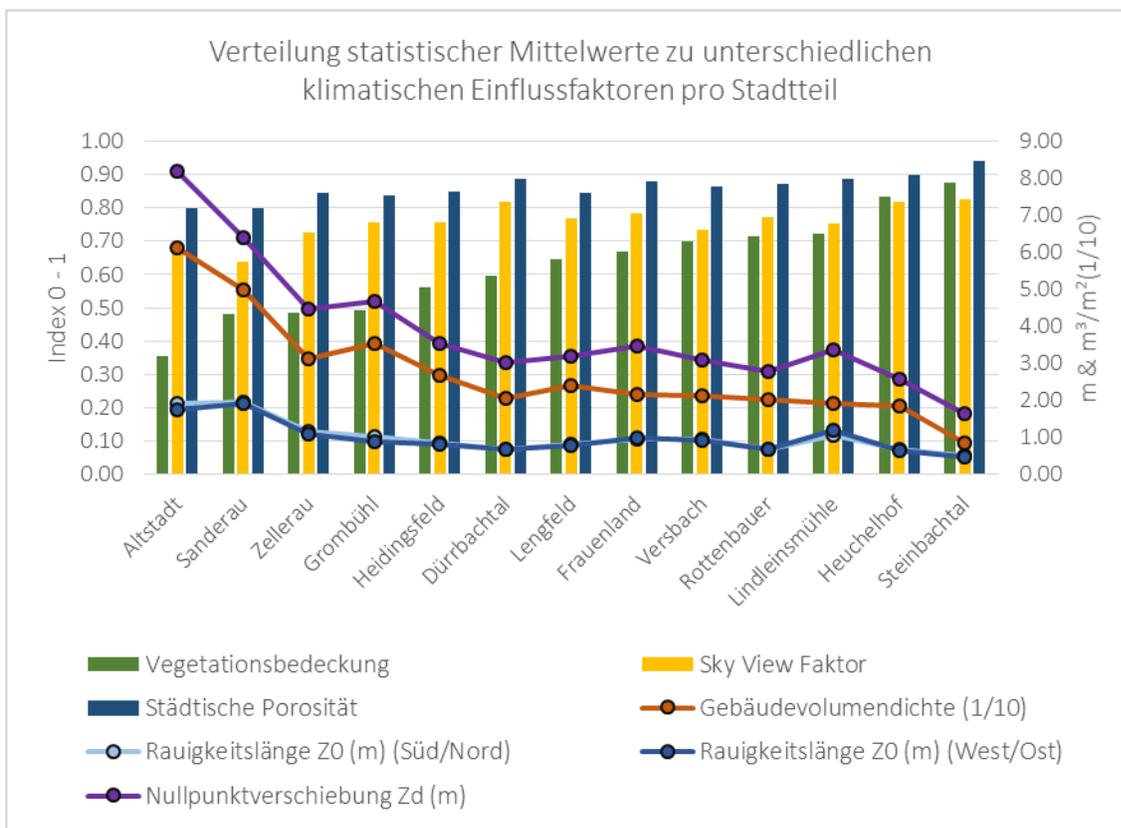


Abbildung 8 Verteilung statistischer Mittelwerte pro Stadtteil

Die Planungshinweiskarte besitzt 2 hierarchisch verknüpfte Informationsebenen. Diese Ebenen basieren auf statisch aggregierten Mittelwerten der unterschiedlichen Themenkarten mit einer räumlichen Auflösung von 200 m x 200 m. Ergänzend werden diese statistischen Ebenen mit den unterschiedlichen Klimatopen der Klimafunktionskarte verschnitten. Die 1. (oberste) Ebene (Abbildung 9) teilt den geographischen Raum in drei

Planungshinweisklassen, die entsprechend als „Städtebauliche Entwicklungsgebiete“, „Übergangszonen“ und „Sanierungszonen“ für die Stadtplanung von Relevanz sind (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2 Detailbeschreibung Planungshinweiskarte Stadt Würzburg Ebene 1**

Kategorie	Beschreibung
Städtebauliche Entwicklungsgebiete	<p>In Abhängigkeit zu vorhandenen Luftleitbahnen, topographischen Einzugsgebieten und Klimatopzuordnung der KFK können diese Flächen beplant sowie zur Stadterweiterung genutzt werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Luftleit- und Durchlüftungsbahnen sollten freigehalten bzw. porös (<math>Ph_{var} &gt; 0.8</math>) gestaltet werden. Die Gebäudeausrichtung sollte parallel zu der vorherrschenden Windrichtung gewählt werden.</li> <li>- Topographisch bedeutenden Kaltluftentstehungs- und Versorgungsgebiete sollten freigehalten oder nur locker bebaut werden. Die Porosität sollte <math>Ph_{var} &gt; 0.7</math> sein, die Längsausrichtung der Gebäude sollte orthogonal zur vorherrschenden topographischen Hangrichtung gewählt werden.</li> </ul>
Übergangszonen	<p>Entsprechend der unterschiedlichen Klimatopcharakteristika können diese Flächen im Sinne einer klimatisch nachhaltigen Stadtentwicklung genutzt werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Flächen der Klimatopkategorie 5 ("Moderate Überwärmung") &amp; 6 ("Starke Überwärmung"): Für diese Bereiche gelten im Wesentlichen die Empfehlungen für die „Sanierungszone“ (s.u.). Umnutzungen sollten immer dazu genutzt werden, die Durchlüftung zu verbessern. Bei Nachverdichtungen müssen klimatische Ausgleichsräume geschaffen werden.</li> <li>- Flächen der Klimatopkategorie 3 („Misch- und Übergangsklimatope“) &amp; 4 („Überwärmungspotential“) stellen im eingeschränkten Maße Stadtentwicklungspotentialflächen dar. Bei geplanter Stadtentwicklung innerhalb dieser Bereiche sollte eine klimatische Aufwertung (vgl. Sanierungszone) erreicht werden, mit dem Ziel einer Reduktion der Klimatop-4-Flächen ("Überwärmungspotential") zu Gunsten der Klimatop-3- Flächen (Misch- und Übergangsklimate).</li> <li>- Klimatopflächen der Kategorien 1 ("Kalt- und Frischluftentstehungsgebiete") und 2 ("Frischluftentstehungsgebiete"), sollten als wichtige Ausgleichflächen erhalten bleiben, und vor allem innerhalb des Stadtgebietes gestärkt und erweitert werden. Durch die Schaffung mehrerer heterogen verteilter Patches (&gt; 1 ha) dieser Kategorien im Stadtgebiet, wird das lokale stadtklimatische Ausgleichspotential gestärkt.</li> </ul>

Sanierungszonen

Flächen dieser Kategorie sind ungeachtet der verknüpften Klimatopklassifizierung der KFK durch gravierende stadtklimatische Funktionsverluste geprägt und sollten im Fokus der städtebaulichen Umbau- und Sanierungsmaßnahmen stehen.  
Wesentliches Ziel sollte es dabei sein, die thermische Belastung zu reduzieren (Verschattung, Albedo, Durchlüftung, Schaffung klimatischer Ausgleichsräume, Erhöhung des Grünanteils).

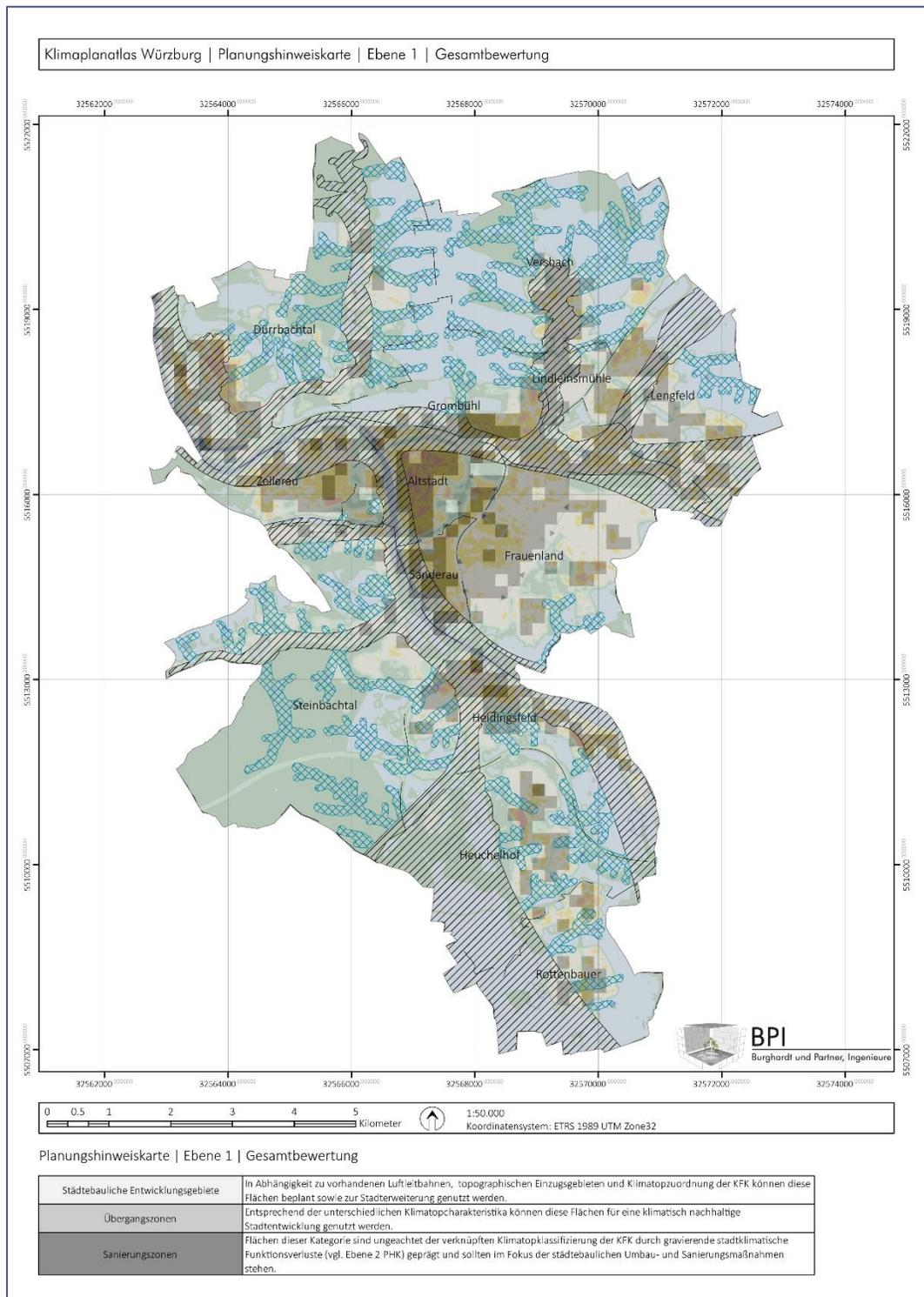


Abbildung 9 Planungshinweiskarte Stadt Würzburg | Ebene 1

Die Ebene 2 der Planungshinweiskarten untergliedert sich in die thematischen Bereiche der thermischen und dynamischen Aspekte (Abbildung 10 & Abbildung 11). Die visuelle Ausgabe der planungsrelevanten Aussagengrößen geschieht über einen einheitlichen Zahlencode. Dieser Code setzt sich aus einer Zahlenreihe mit jeweils 3 (thermische Aspekte) bzw. 4 (dynamische Aspekte) Einzelwerten zusammen. Jeder Einzelwert kann innerhalb des Wertebereichs 1 bis 3 liegen. Der Wertebereich beschreibt den klimatischen Einfluss von 1 (gut) bis 3 (schlecht) im jeweiligen Kontext zum assoziierten thermischen oder dynamischen Aspekt.

Die Reihenfolge der innerhalb der thermischen Aspekte lautet:

Prozentuale Vegetationsbedeckung | Gebäudevolumendichte | SkyView Faktor

Die Reihenfolge der innerhalb der dynamischen Aspekte lautet:

$Z_o$  (Süd/Nord |  $Z_o$  (West/Ost) | Städtische Porosität  $Ph_{var}$  |  $Z_d$

Exemplarisch beschreibt der Zahlencode „111“ auf der thermischen Ebene eine Rasterzelle...

- ... mit sehr guter Vegetationsausstattung,
- ... mit einer sehr geringen Gebäudevolumendichte
- ... und einem hohen SkyView Faktor.

Durch die Bewertung und Transformation der Analyseergebnisse der unterschiedlichen Themenkarten, können in Abhängigkeit der vorhandenen Klimatopklassifizierungen der Klimafunktionskarte für zukünftige Stadtentwicklung-, Stadtumbau- und Stadtsanierungsmaßnahmen (entsprechend Abbildung 9) Aspekte besonderer Bedeutung lokal berücksichtigt werden.

Unter Zuhilfenahme der verschiedenen Themenkarten bietet sich mit den Planungshinweiskarten die Möglichkeit fallbezogene Handlungsmaßnahmen aus dem gesamtstadtklimatischen Kontext (Mesoklimaebene) abzuleiten.

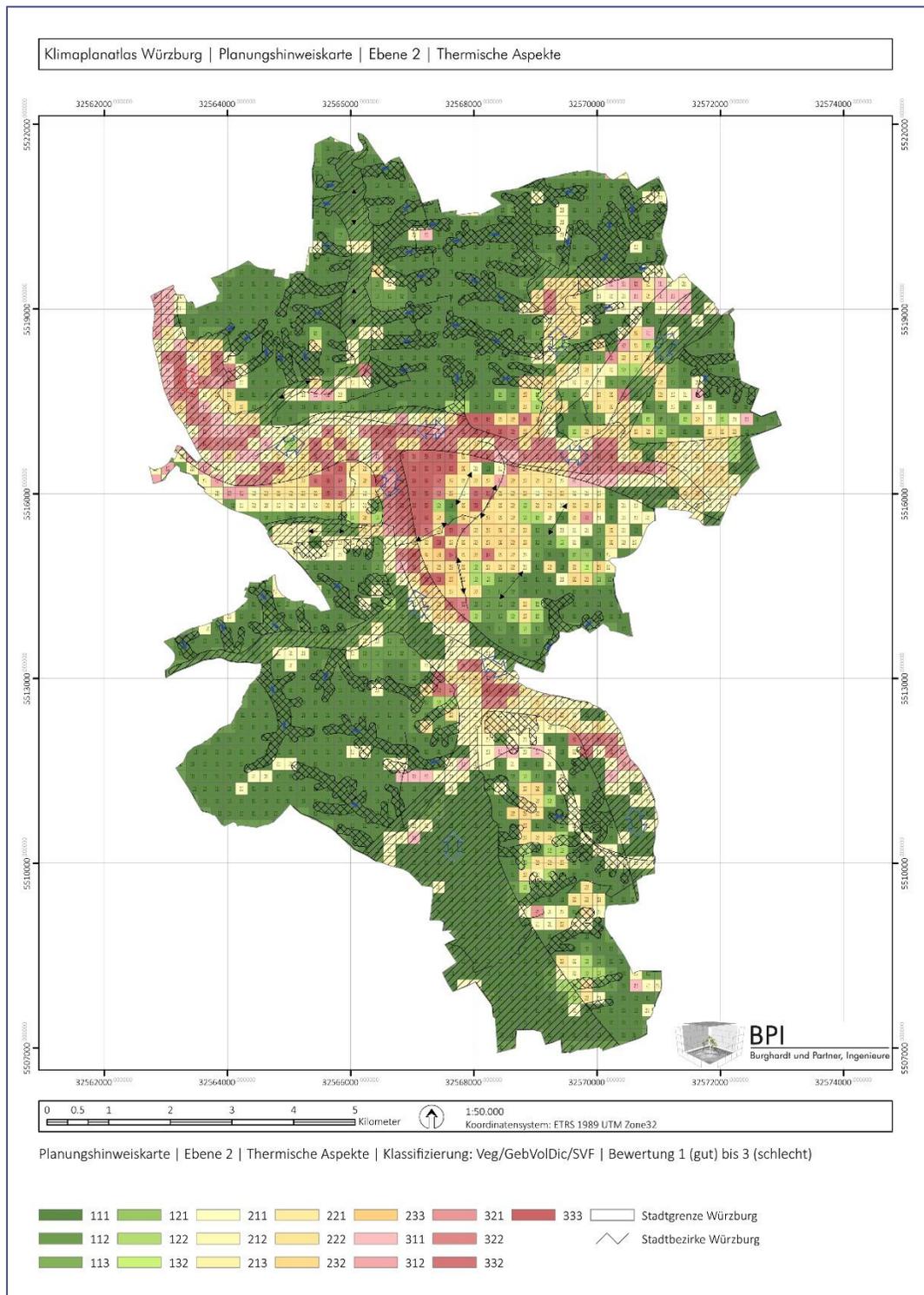


Abbildung 10 Planungshinweiskarte Stadt Würzburg | Ebene 2 | Thermische Aspekte

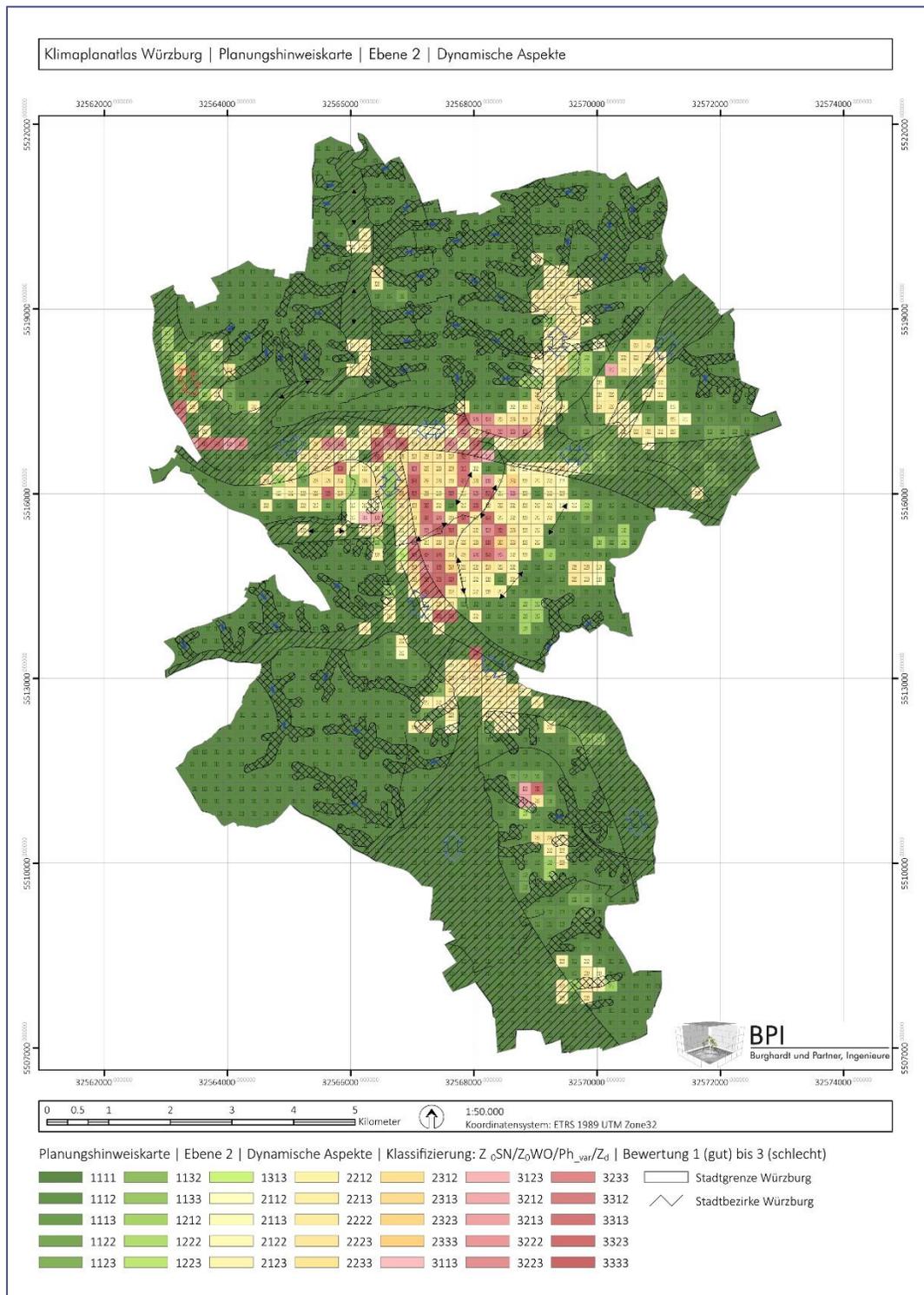


Abbildung 11 Planungshinweiskarte Stadt Würzburg | Ebene 2 | Dynamische Aspekte

## 5.3 Themenkarten

### 5.3.1 Thermischer Aspekt

#### 5.3.1.1 Vegetationsstrukturen

Vegetation im urbanen Raum ist aus unterschiedlichen Gründen von klimatischer Relevanz. Zum einen ist Vegetation durch ihre sehr positive lufthygienische Funktion als Filterungselement sowie zur Produktion von Frischluft bekannt. Zum anderen bedeutet ein höherer Vegetationsanteil auch eine erweiterte Retentionsfähigkeit des Gebietes, wodurch es verstärkt zu Verdunstungskühle durch andauernde Evapotranspiration kommen kann.

Die Erfassung der vorhandenen Vegetationsstrukturen für den Untersuchungsraum Würzburg setzt sich aus dem Komplex der Infrarot Bildanalyse (NDVI) sowie der Sichtbildanalyse (sichtbares Licht) zusammen. Für die NDVI Analyse wurden aktuelle Satellitendaten des „Sentinel 2“ Programms mit einer räumlichen Auflösung von 10 m genutzt. Das Ergebnis der NDVI Analyse basiert auf einer Verschneidung dreier Momentaufnahmen aus der 2. Jahreshälfte 2015 (Juli, August, September). Um ergänzend auch kleinere Vegetationsstrukturen erfassen zu können, welche besonders im urbanen Raum unzusammenhängend oft vorkommen, wurde eine 3-Band Luftbildanalyse auf Basis einer 0.5 m Auflösung durchgeführt. Die hierfür genutzten Luftbilder entstammen der Luftbildbefliegung der Stadt Würzburg aus dem Jahr 2012, sowie extrahierten Luftbildern der Onlineportale GoogleEarth und BingMaps. Die visuelle Analyse geschah GIS gestützt unter Zuhilfenahme eines angepassten „Image Classification Toolsets“. Hierbei handelt es sich um eine ArcGis Funktionalität zur Erfassung unterschiedlicher Farbtypen anhand einer zuvor erstellten Farbsignaturdatei. Durch die Nutzung grob aufgelöster Infrarot- mit hoch aufgelösten 3-Band Luftbilddaten wird eine flächendeckende Kartierung nahezu aller vorhandenen Vegetationsstrukturen ermöglicht.

Um einen aussagekräftigen und vergleichbaren stadtteilbezogenen statischen Vergleich herstellen zu können, wurde die vegetationsbedeckte Fläche in den prozentualen Kontext zur Siedlungsfläche gestellt, wodurch Stadtteile unabhängig von ihrem zusätzlichen Freiflächenanteil (Wälder, Landwirtschaft, Grünland, etc.) hinsichtlich ihres Vegetationsanteils innerhalb der Siedlungsfläche vergleichbar sind.

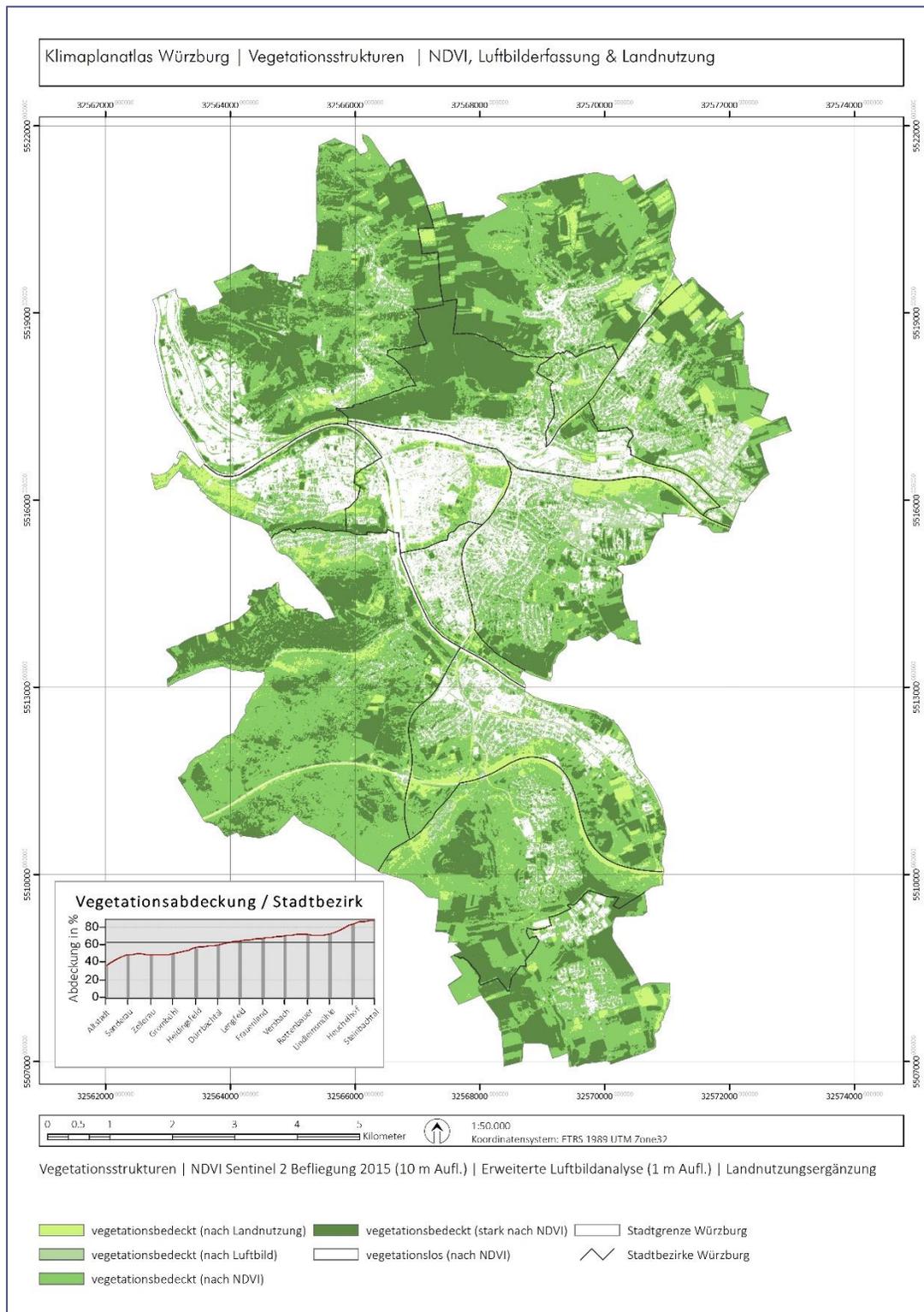


Abbildung 12 Vegetationsstrukturen aus 4-Band „Sentinel 2“ und 3-Band Luftbildanalyse

### Planungshinweise

Nach der Vegetationsstrukturanalyse zeigen die Stadteile „Altstadt“ sowie „Sanderau“ erwartungsgemäß den geringsten Vegetationsanteil auf. Positiv zeigen sich die Stadteile „Frauenland“ und „Lengfeld“. Insgesamt liegt der Vegetationsbedeckungsgrad innerhalb der Siedlungsflächen bei einem Durchschnittswert von 62%, das meridiane Mittel zeigt mit 65% einen leicht höheren Wert, da die hohe Unterversorgung mit Vegetation in der Altstadt im gesamtstädtischen Kontext nivelliert wird. Zur Steigerung des Vegetationsanteils innerhalb des Stadtgebietes gibt es mehrere Möglichkeiten. Bäume zeichnen sich durch ihre große Blattoberfläche aus, wodurch sie Schadstoffe filtern und über die Transpiration Verdunstungskühle erzeugen können. Dennoch muss der Standort für einen Stadtbaum geeignet sein. So können Bäume mit einem dichten Blätterdach eine Akkumulation von Luftschadstoffen im Straßenraum begünstigen, sofern das geschlossene Kronendach eine vertikale Luftdurchmischung verhindert, und der Straßenzug orthogonal zur vorherrschenden Windrichtung ausgerichtet ist.

Alternativ haben funktionsfähige Grün- und parkähnliche Flächen oder auch Staudenanlagen ein sehr gutes nächtliches Abkühlungspotential, weshalb besonders innerstädtische Grün- und auch Friedhofsflächen klimatisch hoch schützenswert sind.

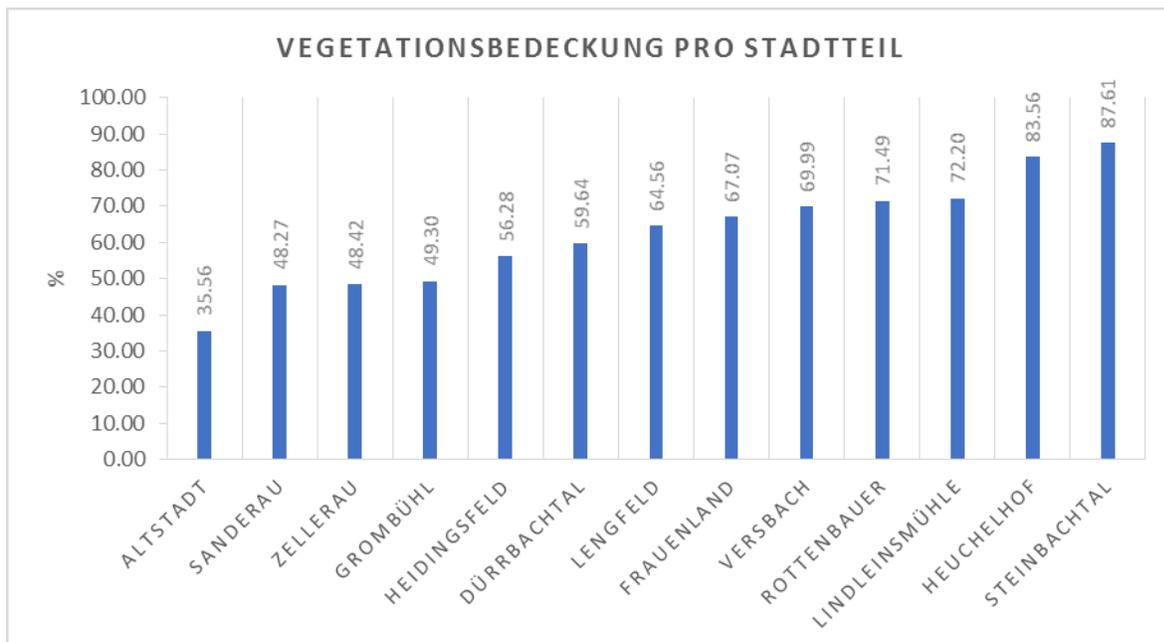
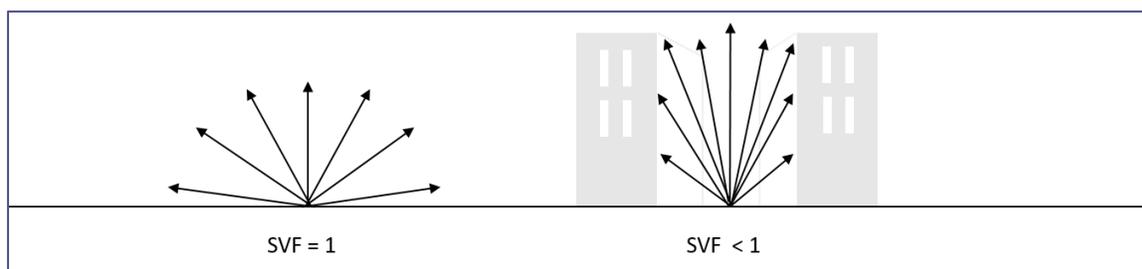


Abbildung 13 Vegetationsbedeckung pro Stadtteil in %

### 5.3.1.2 SkyView Faktor

Der SkyView Faktor (SVF) beschreibt die horizontale und vertikale Offenheit. Ausgehend von der Bodenoberfläche wird untersucht, wieviel Prozent des Horizontes sichtbar ist. Ausgedrückt wird dieses prozentuale Verhältnis mit einer numerischen Skala von 0 bis 1. Je kleiner der Wert, desto weniger ist vom Horizont sichtbar, und wird somit durch Hindernisse blockiert. Unter Berücksichtigung der vorherrschenden Topographie des Würzburger Raums wurde die gesamte Bebauungsstruktur für die Analyse herangezogen. Jeder Berechnungspunkt ist in einem regelmäßigen Abstand von 1 m zu seinem direkten Nachbarn angeordnet. Daraus ergibt sich eine Gesamtauflösung von 1 m für das Untersuchungsgebiet.



**Abbildung 14** Schematische Darstellung der Herleitung des SkyView Faktors

Mit Hilfe des SkyView Faktors können Rückschlüsse auf Wärmespeicherung („Heat Trap Effect“) innerhalb der Straßenschluchten gezogen werden. Obwohl bei einem SVF von 1 die solare Exposition bei 100 % liegt, ergibt sich durch das Fehlen von Körpern eine geringere Umwandlung der eintreffenden solaren kurzwelligen Strahlung in langwellige Wärmestrahlung und der damit verbundenen Wärmespeicherung. Demensprechend besteht die Gefahr der zusätzlichen Überwärmung unterhalb eines SVF von 0,5 – 0,15. Unterhalb von 0,15 ist kann es durch die fast komplett fehlende solare Einstrahlung zu einer Abkühlung innerhalb der Häuserschlucht kommen. Dieser Effekt ist oft bei kleineren Fußwegen und Gassen zu beobachten, welche meist für den Autoverkehr eine zu geringe Durchgangsbreite haben.

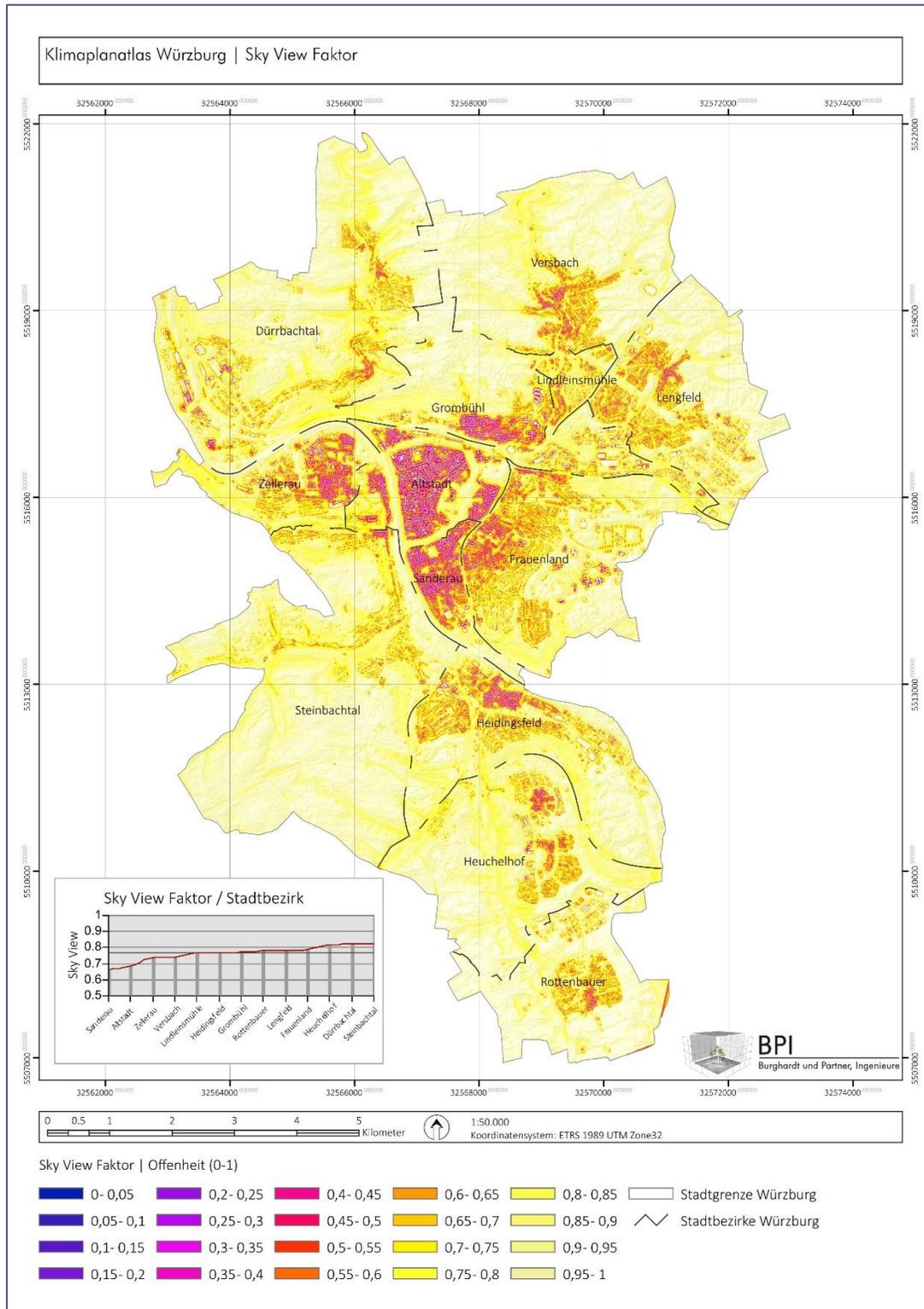


Abbildung 15 SkyView Faktor

*Planungshinweise*

*Die Anwendung des SkyView Faktors im Planungsalltag fokussiert die Situation der solaren Einstrahlung. So können mit Hilfe des SVF Bereiche erfasst werden, welche beispielsweise durch temporäre und/oder mobile Verschattungsmaßnahmen (Abbildung 16) entlastet werden können.*



**Abbildung 16 Temporäre Verschattungsmaßnahmen (Malaga, Spanien; Südausrichtung)**

*Neben der Bedeutung des SVF als wichtige Berechnungsinformation für die KFK und PHK, können die Ergebnisse der SVF Analyse dank ihrer hohen Auflösung (<1 m) für ergänzende mikroklimatische Fragestellungen herangezogen und genutzt werden.*

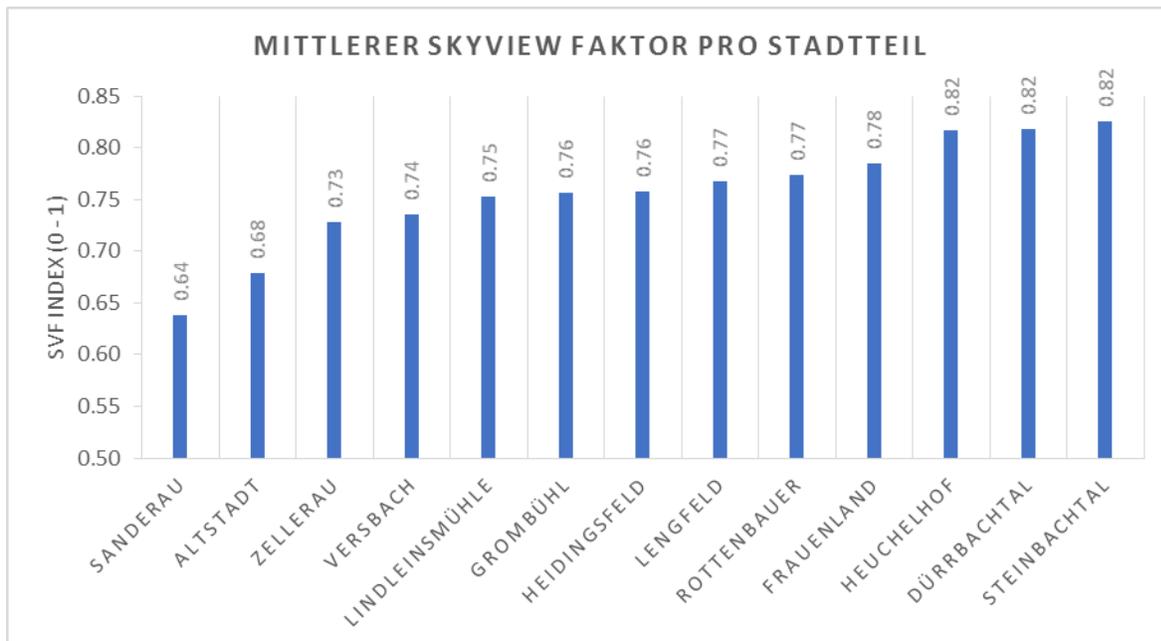


Abbildung 17 Mittlerer SkyView Faktor pro Stadtteil

### 5.3.1.3 Gebäudevolumendichte

Entsprechend des physikalischen Grundgesetzes der Energieerhaltung wird kurzwellige Sonnenstrahlung beim Auftreffen auf ein Objekt in Wärmeenergie umgewandelt. Das Objekt wird so erwärmt und gibt einen Teil der aufgenommenen Energie als langwellige Wärmestrahlung an die umgebende Atmosphäre ab. Dieser Prozess unterstützt die Ausprägung des städtischen Wärmeinseleffekts, da es zu einer verstärkten Speicherung von Energie in der bebauten Substanz, gefolgt von einer zeitlich verzögerten Abgabe (in der Nacht) kommen kann, wodurch sich die nächtliche Abkühlung des urbanen Raumes vermindert. Obwohl die Beschaffenheit der Fassaden (Albedo, Dämmung, Material) ebenso wie die Umgebungsparameter einen großen Einfluss auf die realistische Energieabsorption eines Gebäudes haben, hilft die Analyse der Gebäudevolumendichte bei der generellen Einschätzung zur verfügbaren beeinflussten Masse und dessen Nachbarschaftswirkung.

Bei der Berechnung der Gebäudevolumendichte handelt es sich um eine 3-dimensionale statistische Dichteanalyse, welche für einen vordefinierten Radius vom 5 m bei einer Auflösung von 1 m berechnet wird. Im Zuge der technischen Umsetzung werden die Gebäude in 2-dimensionalen attribuierten Punktwolken gemäß der Gebäudeflächen und den Gebäudehöhen konvertiert und dann mittels einer statischen Nachbarschaftsanalyse untersucht. Durch die Berücksichtigung der Gebäudehöhen innerhalb des Punktdatenbestandes wird eine planare 2-dimensionale Analyse mit 3-dimensionalen Bezug ermöglicht. Das Ergebnis zeigt die statische Verteilung von  $\text{m}^3$  Bauvolumen pro  $\text{m}^2$  Flächeneinheit.

Die Analyse zeigt für die Stadtteile „Altstadt“ und „Sanderau“ mit einem statistischen Mittelwert zwischen 40 und 50  $\text{m}^3/\text{m}^2$ , die mit Abstand höchsten Werte im direkten Vergleich aller Stadtgebiete, welche sich im Durchschnitt im Bereich bis zu 20  $\text{m}^3/\text{m}^2$  befinden.

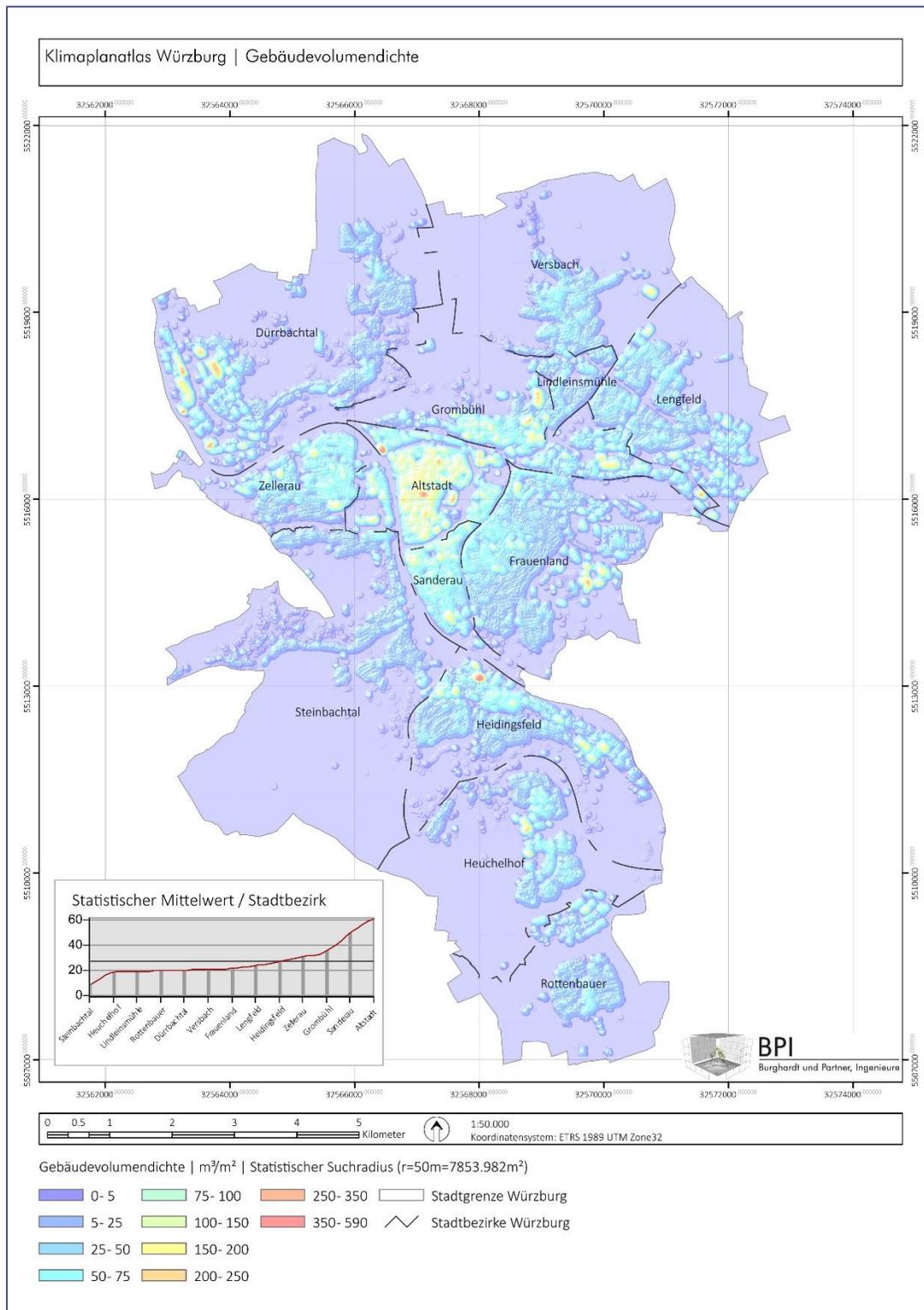


Abbildung 18 Gebäudevolumendichte in m³/m²/r 50 m

### Planungshinweise

In Bereichen mit einer hohen Gebäudevolumendichte ( $>100 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ) ist zu prüfen, ob Dach- und Fassadenflächen entsprechend städtebaulicher Sanierungsmaßnahmen eine Erhöhung ihrer Albedo (bspw. White Coating) erfahren können, sofern nicht bereits geschehen. Ebenso ist zu überprüfen ob eine weitere Reduktion der Energieaufnahme durch die Gebäude mit Hilfe anderer Oberflächenmaterialien (bspw. Dämmung) möglich ist.

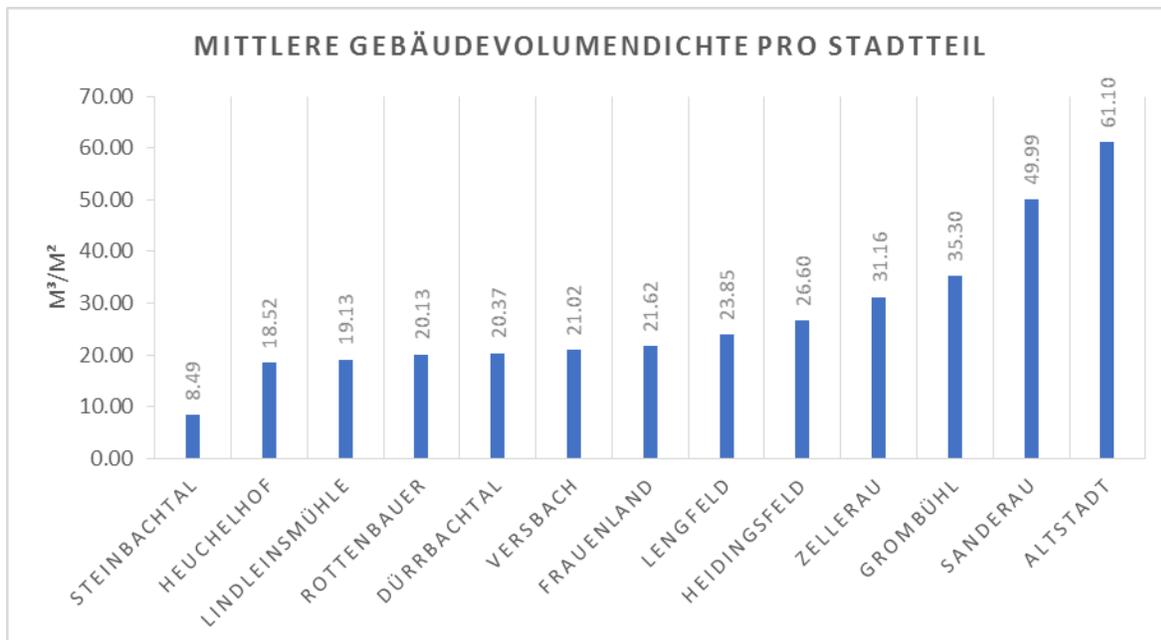
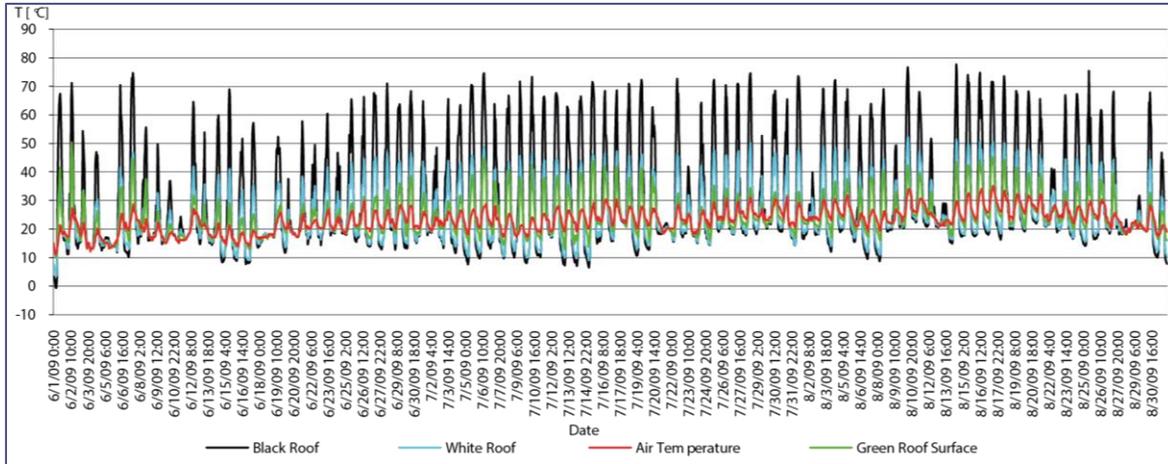


Abbildung 19 Mittlere Gebäudevolumendichte pro Stadtteil

Die größte Reduktion der Oberflächentemperatur kann über eine funktionierende Dachbegrünung gewährleistet werden (Abbildung 20). Da die Dachbegrünung ein lebendes System darstellt, wird ihre Funktionsleistung maßgeblich durch die Vitalität des Systems definiert. So sollte die Vegetationsschicht mindestens 20 cm bis 30 cm betragen, damit ausreichend Wasserspeicherkapazitäten zur Verfügung stehen. Dies kann jedoch eine erhebliche Gewichtsmehrbelastung für die Dachkonstruktion von Gebäuden darstellen. Bereits bei einer Schichtdicke von nur 17 cm kann das zusätzliche Gewicht (bei 100 % Wassersättigung) von  $220 \text{ kg}/\text{m}^2$  entstehen.

Alternative Dachabdeckungen wie „Cool Roofs“ (kühle Dächer) sind konventionelle Dachsysteme, jedoch vereinen sie zwei wichtige klimatische Eigenschaften. Zum einen weisen sie hohe Albedowerte auf, zum anderen zeichnen sich „Cool Roofs“ durch ein hohes thermisches Emissionsvermögen aus. Bei einem direkten Temperaturvergleich unterschiedlicher Dachabdeckungen (Abbildung 20) über einen längeren Messzeitraum zeigen sich klare Differenzen zwischen einer dunklen Dachfläche und einer weißen

„Cool Roof“ Fläche. Jedoch fällt der Temperaturunterschied zwischen dem „Cool Roof“ und dem Gründach wesentlich geringer aus. Hier wird eine durchschnittliche Differenz von  $-1^{\circ}\text{C}$  bis  $+5^{\circ}\text{C}$  erreicht.

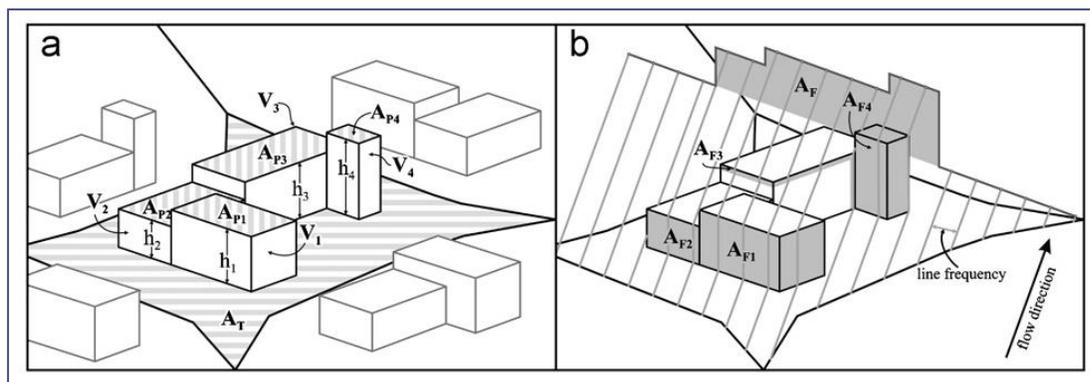


**Abbildung 20 Temperaturverlauf unterschiedlicher Dachabdeckungen; Versuchsanordnung in New York (Susca, 2011)**

Durch Wassermangel bei längeren Wärmeperioden kann die klimatische Funktionsfähigkeit von Gründächern jedoch teils so stark reduziert werden, dass sie sich klimatisch auf dem gleichen oder einem geringeren Niveau wie die „Cool Roofs“ befinden.

### 5.3.2 Städtische Dynamik

Zur Berechnung der Belüftungspotentiale der Stadt Würzburg wird auf das mesoklimatisch validierte Prinzip der Frontal Area Analyse (Unger, 2009; Burghardt, 2015) zurückgegriffen (Abbildung 21). Durch die Erfassung unterschiedlicher Rauigkeitsparameter ( $Z_0$  = Rauiglängen;  $Z_d$  = Nullpunktverschiebung;  $Ph_{var}$  = städtische Porosität) und deren abschließende Verschneidung können die in der Klimafunktionskarte dargestellten Luftleitbahnen sowie Durchlüftungspotentiale dargestellt werden.



**Abbildung 21 Darstellung der Frontal Area Variablen (Unger, 2009)**

Dier Herleitung der drei oben genannten Rauigkeitsparameter erfolgt durch Ermittlung unterschiedlicher morphologischer Parameter, wobei die Rauigkeitsparameter  $Z_0$ ,  $Z_d$  und  $Ph_{var}$  in kausaler Abhängigkeit zu den morphologischen Parametern stehen. Alle berechneten Einflussgrößen und deren logischer Zusammenhang sind in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3 Aufistung aller berechneten Rauigkeitsparameter (Burghardt, 2015)**

Beschreibung	Variablen und Berechnungsformel
Gesamtfläche horizontal (Patch)	$A_T$
Summe der Gebäudegrundflächen pro Patch	$A_P$
Gesamtfläche vertikal pro Patch in Abhängigkeit der Windrichtung	$A_F$
Höhe der Straßenschlucht pro Patch	$h_{UCL}$
Gebäudevolumen	$V$
Verhältnis Gesamtflächen (vertikal zu horizontal)	$\lambda_F = \frac{A_F}{A_T}$
Plan area ratio	$\lambda_P = \frac{A_P}{A_T}$

Volumetrisch durchschnittliche Gebäudehöhe	$h = \frac{\sum_{i=1}^n V_i h_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$
Nullpunktverschiebung ( $Z_d$ )	$Z_d = h(\lambda_p)^{0.6}$
Rauigkeitslängen ( $Z_o$ )	$Z_o = (h - Z_d) \exp\left(-\sqrt{\frac{0.4}{\lambda_F}}\right)$
Städtische Porosität ( $Ph_{var}$ )	$Ph_{var} = \frac{A_T h_{UCL} - V}{A_T h_{UCL}}$

### 5.3.2.1 Städtische Rauigkeit $Z_o$

Die Rauigkeitslängen  $Z_o$  werden in Meter angegeben und beziehen sich immer auf ein Patch, welches ein Gebäude bzw. eine Gebäudegruppe von benachbarten Einzelgebäuden oder Gruppen abgrenzt. Gebäudegruppe liegen vor, wenn der Abstand der Gebäude zueinander  $< 3$  m ist. Durch die Relation von Patch zu den darauf befindlichen Gebäuden können für unterschiedliche Windrichtungen die Rauigkeitslänge  $Z_o$  für jedes einzelne im Stadtgebiet befindliche Patch berechnet werden. Für die Analyse für die Stadt Würzburg wurde entsprechend der Windrichtungen aus Süden (Abbildung 22) sowie aus Westen (Abbildung 23) kommend berechnet. Durch die Berücksichtigung beider Windrichtungen (Süd und West) konnte in der Berechnung auch die in Würzburg vorherrschende Hauptwindrichtung Südwest automatisch inkludiert werden.

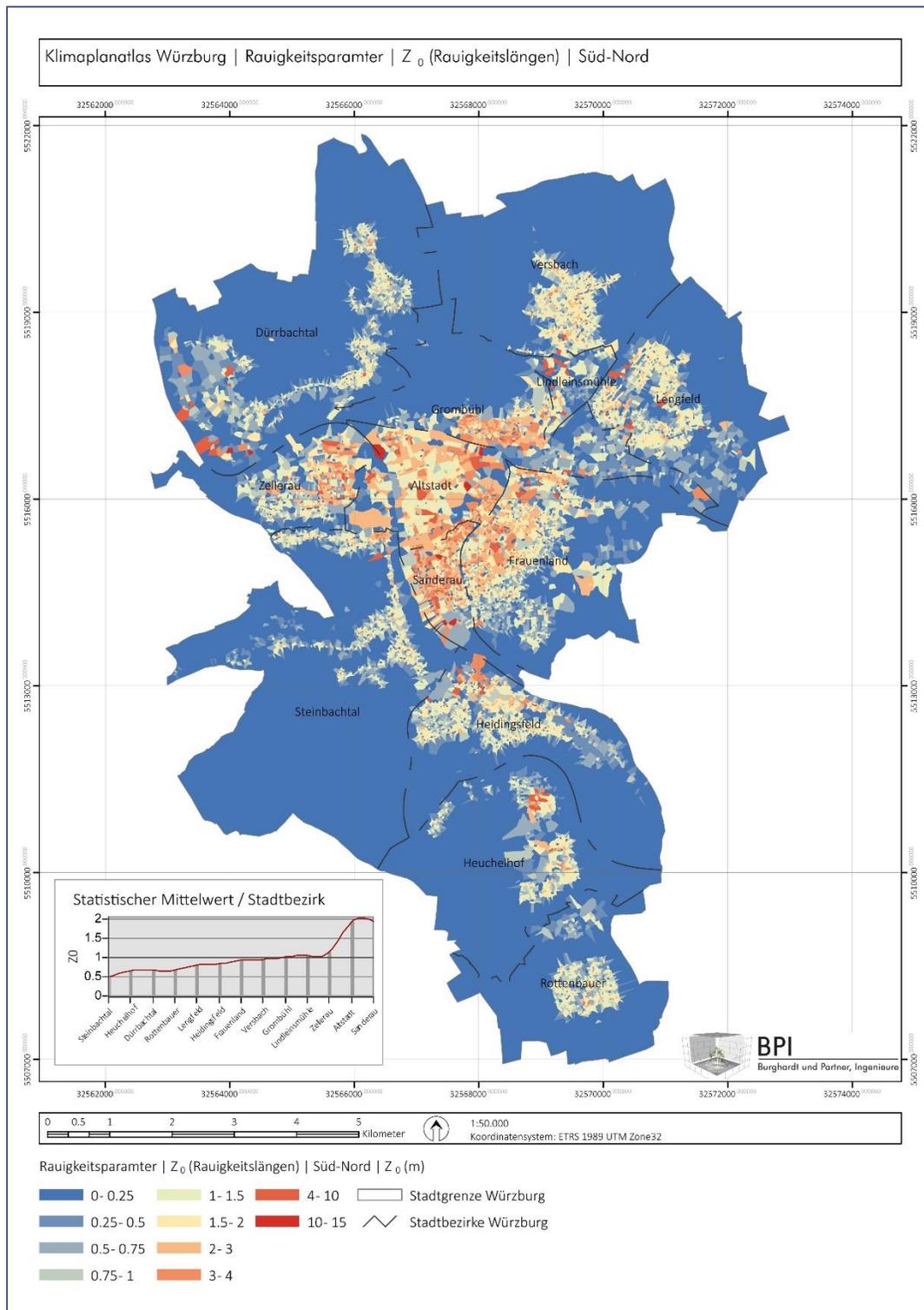


Abbildung 22 Städtische Rauigkeit  $Z_0$  in S/N Richtung

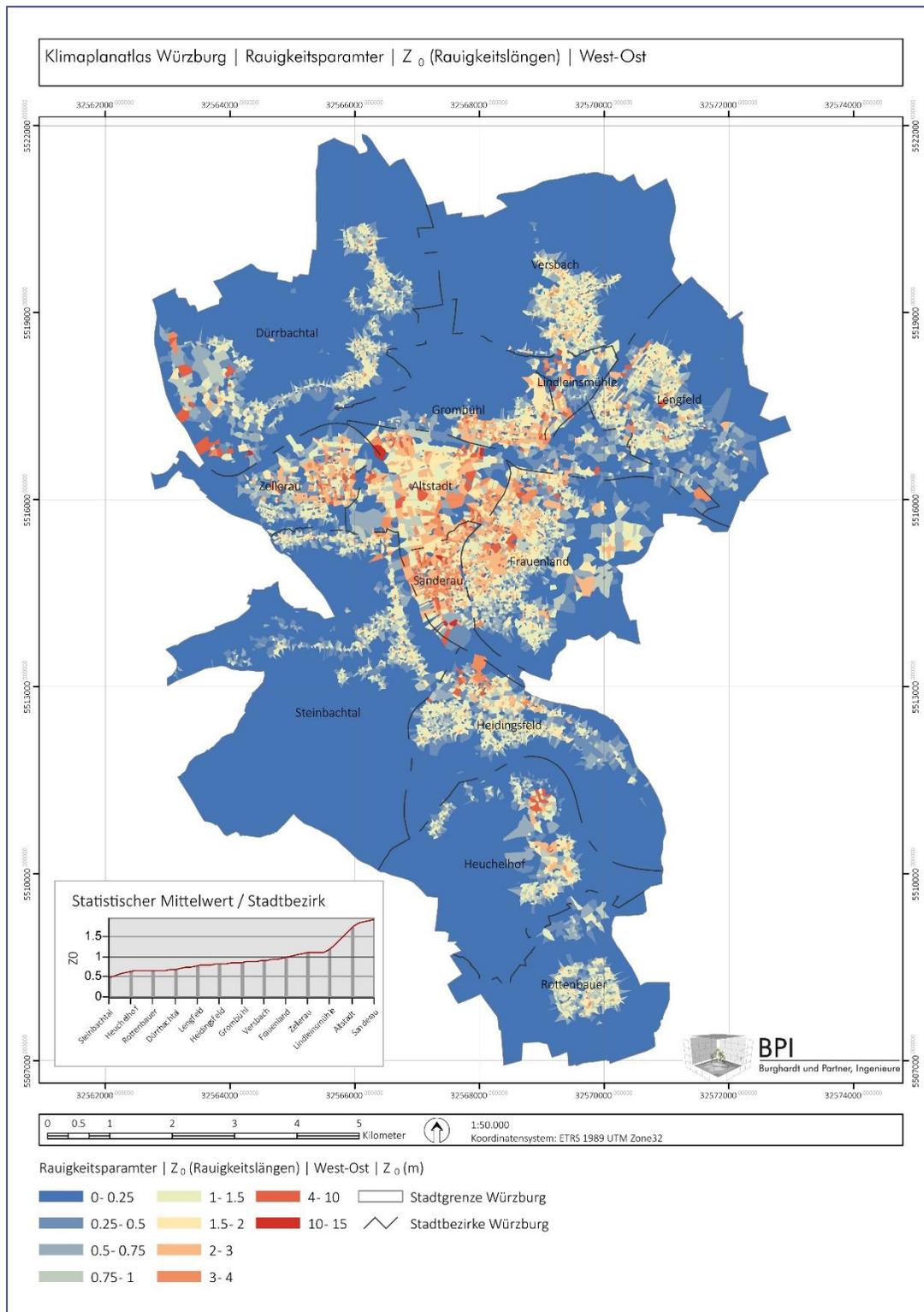


Abbildung 23 Städtische Rauigkeit  $Z_0$  in W/O Richtung

*Planungshinweise*

Über den Rauigkeitsparameter  $Z_0$  werden primär die Luftleitbahnen abgeleitet. Eine geringe Rauigkeit bedeutet eine geringe Abschwächung der Windgeschwindigkeit, da wenig Reibung zwischen der Luft / dem Wind und den Objekten bzw. dem Untergrund entsteht.

Im Rahmen der Planungshinweise ist darauf zu achten, dass sich möglichst viele Flächen geringer Rauigkeit ( $< 1$ ) aneinander reihen. Ab einer Länge von  $> 750$  m ( $> 1000$  m) mit geringer Rauigkeit kann die lokale Belüftungssituation positiv stark beeinflusst werden (vgl. Unger, 2009 & Matzarakis, 1992). Durch die Identifizierung und Aufwertung einzelner „rauer“ Patches (Gebiete) kann eine Verbesserung der städtischen Belüftungssituation unterstützt werden.

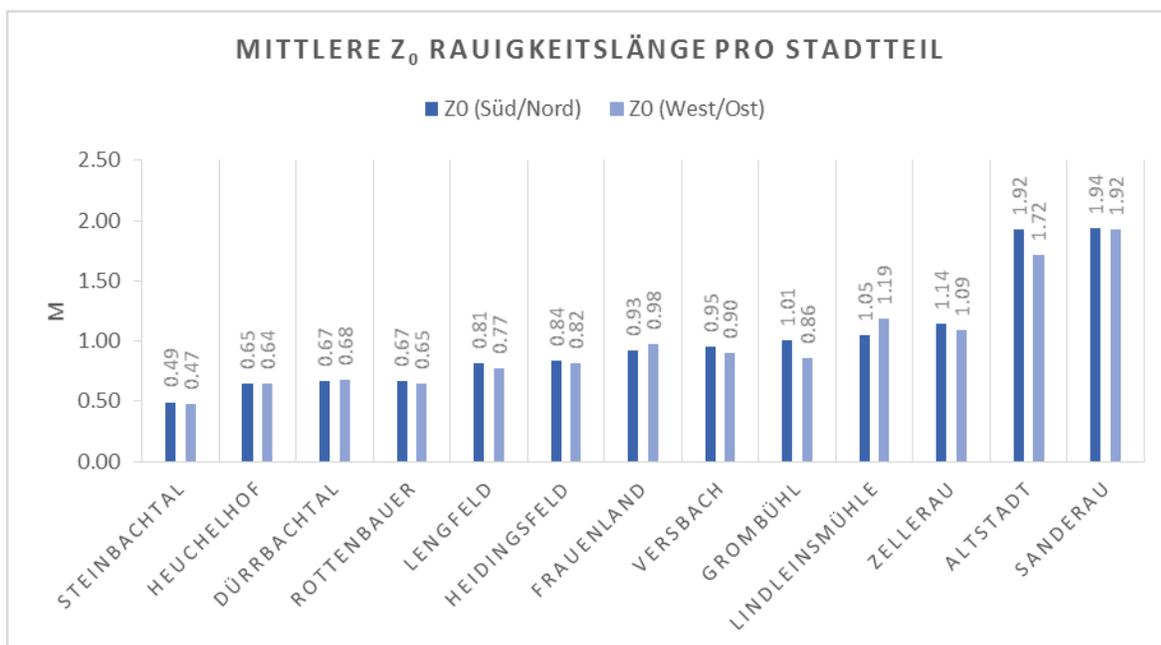


Abbildung 24 Mittlere  $Z_0$  Rauigkeitslängen pro Stadtteil

### 5.3.2.2 Städtische Porosität

Die städtische Porosität beschreibt den Zustand des offenen 3-dimensionalen Raums im Verhältnis zum bebauten Volumen. Die städtische Porosität ( $Ph_{var}$ ) wird parallel zu den Rauigkeitslängen und der Nullpunktverschiebung berechnet und basiert auf dem Ansatz der „Frontal Area“. Für die Berechnung der Porosität ist die vorherrschende Windrichtung nicht von Relevanz, da hierbei der 3-dimensionale Raum und die in ihm enthaltenen Baumassen untersucht werden.

Ergänzend zu den dynamischen Faktoren  $Z_o$  und  $Z_d$ , welche eine direkte Aussage über die Rauigkeit bzw. den Reibungsverlust treffen, zeigt die urbane Porosität ( $Ph_{var}$ ) das Potential einer möglichen Durchlüftung an. Damit ist  $Ph_{var}$  alleinstehend von größerer planarischer Relevanz als einzelnen Rauigkeitsparameter  $Z_o$  und  $Z_d$ . Die Einteilung der städtischen Porosität geschieht im Wertemaßstab von 0 bis 1, wobei 1 die höchste Porosität und 0 die niedrigste Porosität des 3-dimensionalen Raums darstellt. Umso höher der Wert, desto geringer ist der Windwiderstand des jeweiligen 3-dimensionalen Patches.

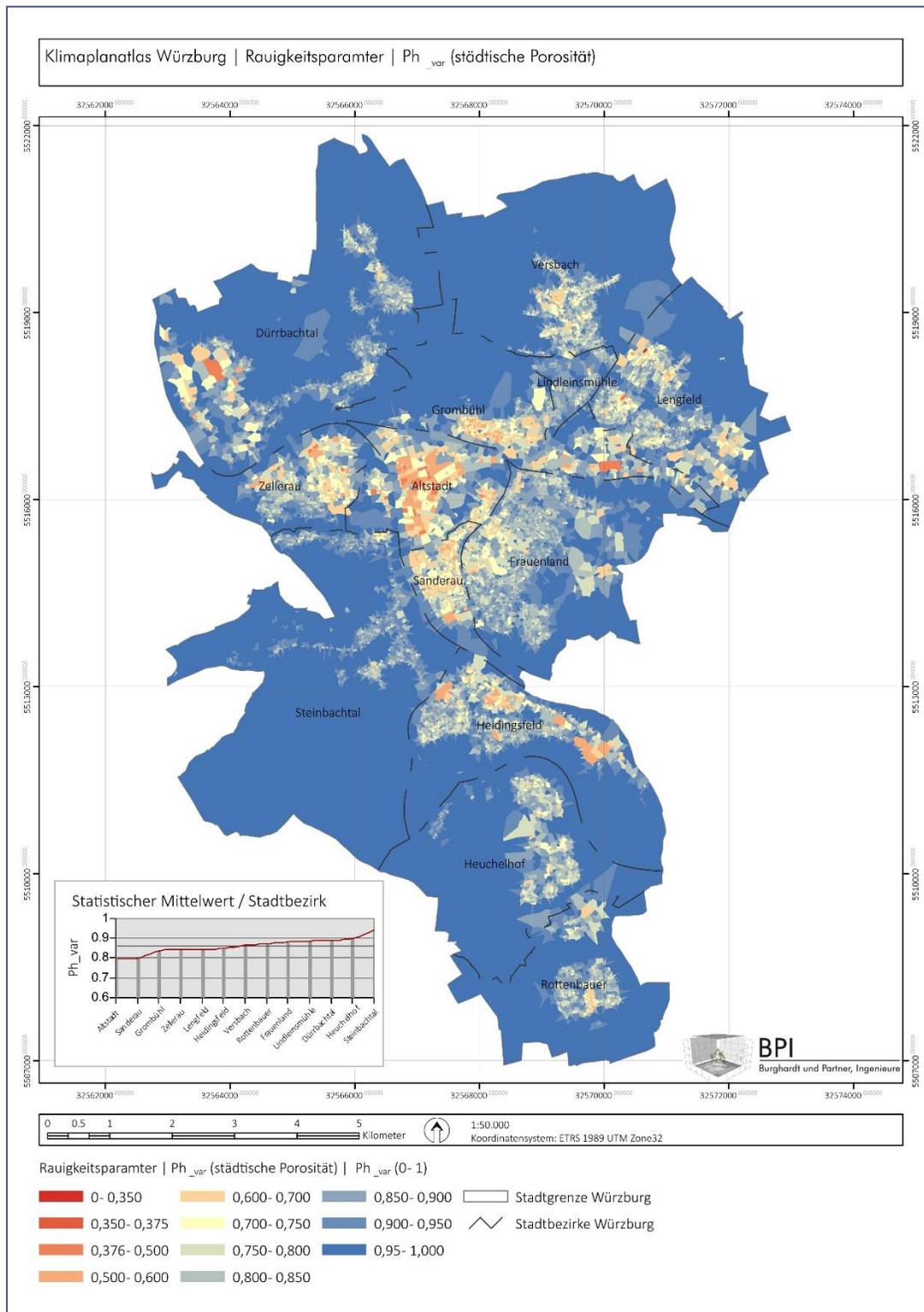
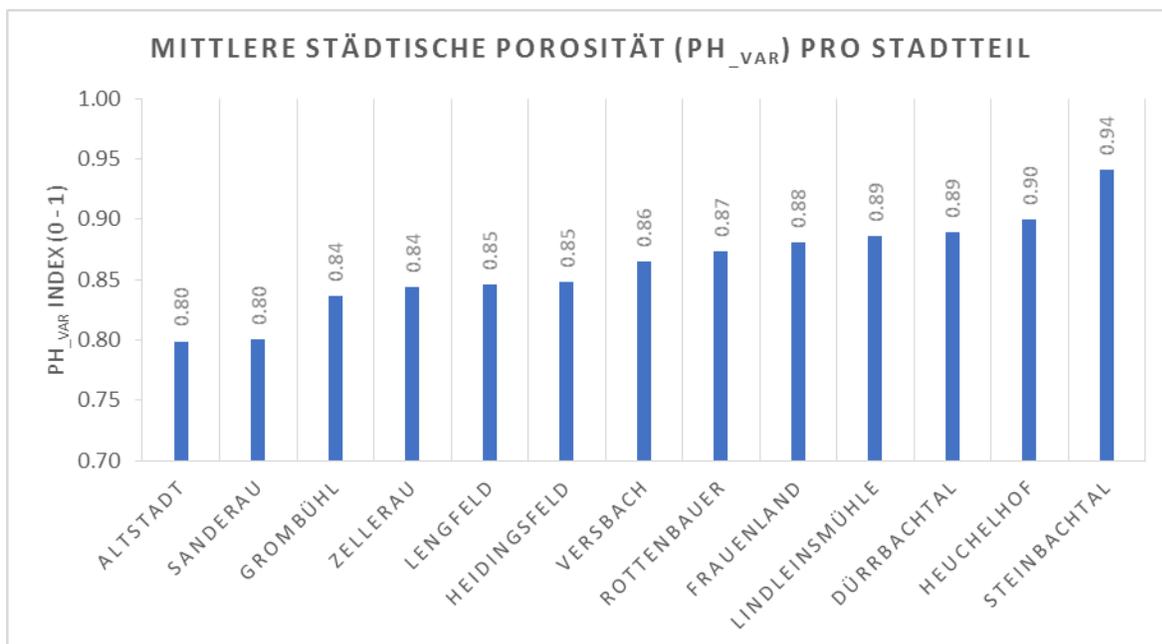


Abbildung 25 Städtische Porosität  $Ph_{var}$

*Planungshinweise*

Über die städtische Porosität können klare Planungshinweise abgeleitet werden. Durch die Erfassung mehrerer Patches mit einer hohen Porosität können Durchlüftungspotentiale definiert werden, wie sie in der Klimafunktionskarte dargestellt werden (vgl. Abbildung 7). Zusätzlich können die Informationen der Karte dafür herangezogen werden, Potentiale und Möglichkeiten zur Schaffung einer besseren Durchlüftung in der Stadtentwicklung zu berücksichtigen. Werte < 0,6 sollten vermieden werden. Hier bietet sich Handlungsbedarf zur Reduktion der Gebäudemassen. > 0,6 bis < 0,8 beschreiben Bereiche mit geringen bis mäßigen Belüftungspotentialen. Weitere vertikale Nachverdichtung sollte vermieden werden. Bereiche > 0,8 zeichnen sich durch hohe Porosität und ein hohes Durchlüftungspotential aus. Nachverdichtung und Stadtentwicklung möglich, unter Berücksichtigung der Vermeidung von Clusterbildung.



**Abbildung 26 Mittlere städtische Porosität Ph<sub>var</sub> pro Stadtteil**

### 5.3.2.3 Städtische Rauigkeit $Z_d$

Die Nullpunktverschiebung oder „Zero Displacement Height“ beschreibt den vertikalen Versatz der Rauigkeitslängen  $Z_o$  um den Wert  $Z_d$ , welcher in Meter ausgedrückt wird. Eine vertikale Nullpunktverschiebung tritt in der Regel bei Anhäufung von Elementen mit homogener vertikaler Ausdehnung auf (Abbildung 27). Dabei kommt es zu einer vertikalen Isolierung des logarithmischen Windprofils von der Erdoberfläche. Dies kann beispielsweise bei einer Clusterung von Gebäuden mit gleicher Höhe und Dachausprägung auftreten. Eine großflächige zusammenhängende Verteilung des Rauigkeitsparameter  $Z_d >$  als 3-4 m sollte im städtischen Kontext vermieden werden.  $Z_d$  trifft jedoch keine Aussagen über kleinräumige oder lokale Belüftungssituationen, wie beispielweise Kanalisierungseffekte etc. Vielmehr kann der alleinstehende Parameter  $Z_d$  dazu genutzt werden, das Risiko der vertikalen Isolation der Belüftungsschichten im mesoklimatischen Kontext zu beschreiben.

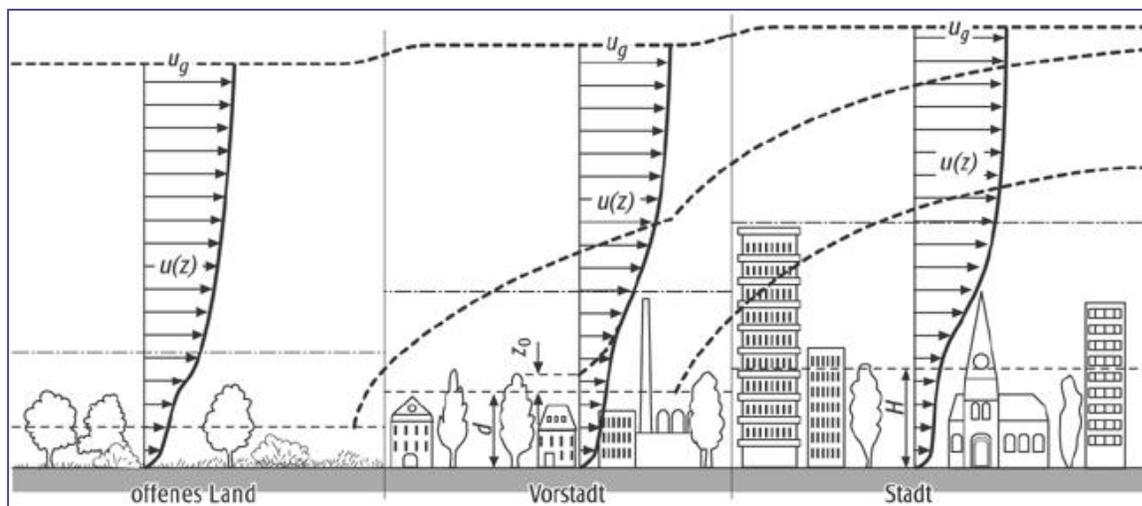


Abbildung 27 Das Logarithmische Windprofil im ländlichen und städtischen Vergleich (verä. nach Lexikon der Geographie, 2014)

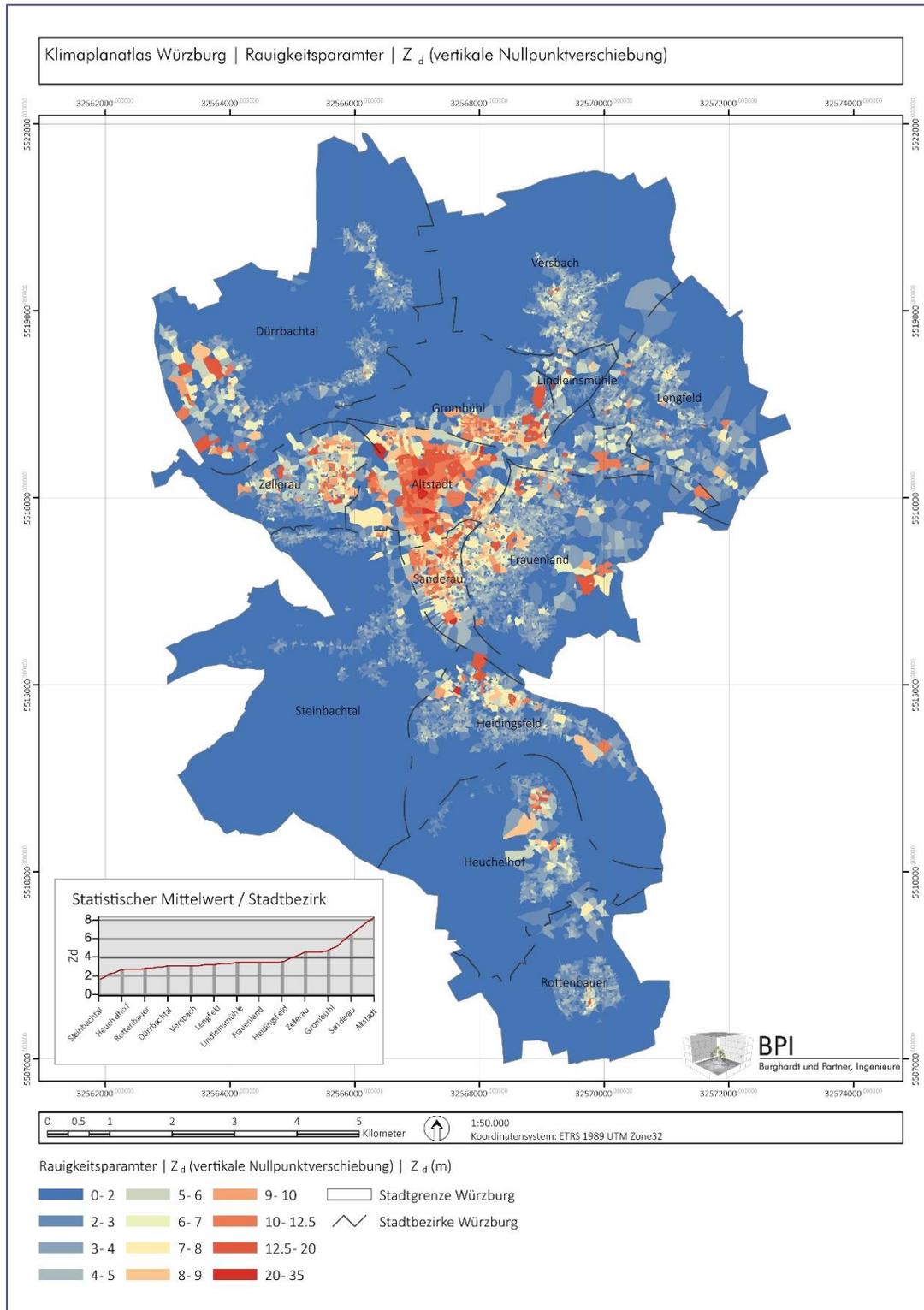
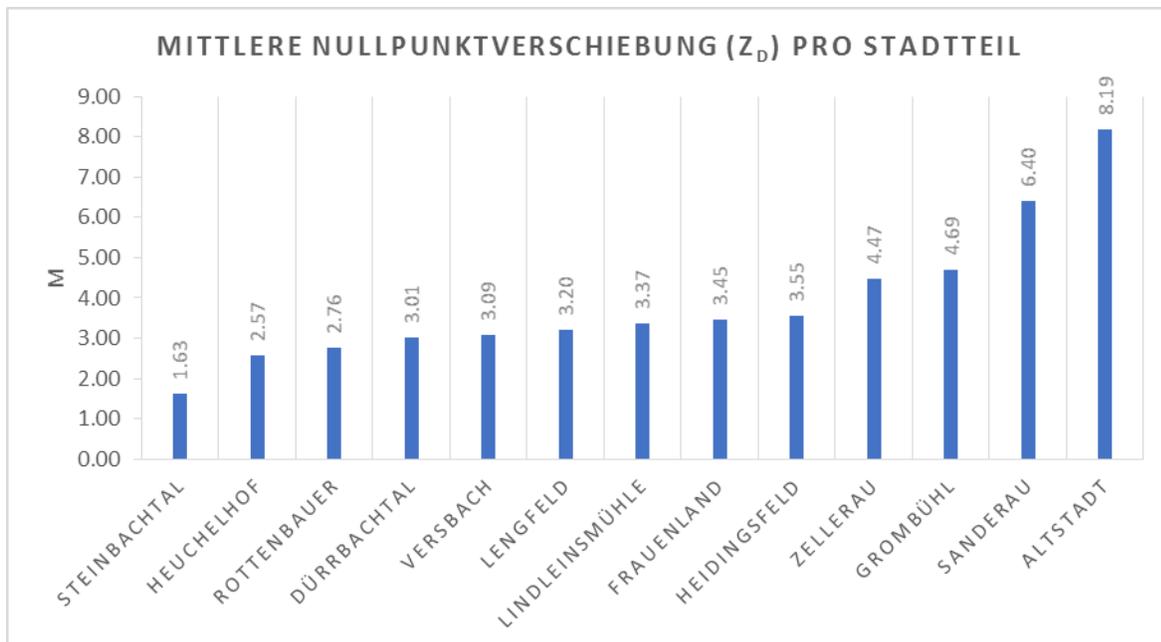


Abbildung 28 Städtische Rauigkeit  $Z_d$

*Planungshinweise*

*Entgegen der Rauigkeitsparameter  $Ph_{var}$  und  $Z_o$  lassen sich über die alleinige Verwendung der  $Z_d$  Nullpunktverschiebung (Zero Displacement Height) nur bedingt konkrete Planungshinweise ableiten. Das Risiko der vertikalen Isolation kann zu einer erhöhten Belastung durch Luftschadstoffen führen, sofern Emissionsquellen vorhanden sind und der Bereich außerhalb von vorhandenen Luftleitbahnen lokalisiert ist. Entfällt der horizontale Transport, können sich Luftschadstoffe in Bereichen mit hohen  $Z_d$  Werten ( $> 10$  m) dauerhaft akkumulieren. Neben der „Altstadt“ zählen Bereiche der Stadtteile „Sanderau“, und „Grombühl“ zu gefährdeten Gebieten.*



**Abbildung 29** Mittlere Nullpunktverschiebung  $Z_d$  pro Stadtteil

#### 5.3.2.4 Topographische Einzugsgebiete und Kaltluftproduktion

Die Kessellage des Stadtgebietes Würzburg ist durch die topographischen Gegebenheiten stark ausgeprägt. Trotz eines eher geringen Höhenunterschiedes von maximal 191 m, ist das topographische Einzugsgebiet sehr weitläufig. Hierbei handelt sich um ca. 82 % der administrativen Gesamtfläche der Stadt Würzburg. Über das topographische Einzugsgebiet können auch die Kaltluftentstehungsflächen erfasst werden, welche in ihrer Abflusssintensität und Abflussrichtung für den Stadtraum Würzburg von Relevanz sind. Kaltluft entsteht auf unversiegelten Flächen während strahlungsfreier Zeiten (nachts), wobei Landwirtschafts- und Grünflächen das höchste Abkühlungspotential ausweisen. Wälder stehen ebenfalls als Kaltluftproduzenten zur Verfügung, jedoch in ihrer Abkühlungsintensität reduziert. Physikalisch verhält sich Kaltluft wie eine Flüssigkeit (Wasser) und „fließt“ den topographischen Gegebenheiten folgend hangabwärts. Ein stabiles und funktionierendes Abflussregime kann sich jedoch nur bei einer windschwachen regionalen Gesamtsituation etablieren.

#### *Planungshinweise*

*Neben dem erhöhten Abkühlungspotential, welches mit Hilfe der Kaltluft entlang der Kaltluftabflussbahnen räumlich verteilt wird, kann Kaltluft im negativen Sinne auch als Transportmedium für Schadstoffe und Gerüche dienen. Daraus folgt, dass besonders Kaltluftabflussbahnen von dauerhaften Emissionen freizuhalten sind, da sonst negative Einflüsse weiter verbreitet werden können. Durch die topographische Gebundenheit und der daraus resultierenden Abhängigkeit, muss bei einer Bebauung innerhalb einer Kaltluftabflussbahn darauf geachtet werden, dass der Abfluss nur geringfügig beeinflusst wird, ansonsten besteht die Gefahr der Isolierung des Kaltluftentstehungsgebietes von tieferliegenden potentiellen Einzugsgebieten. Daraus folgt eine orthogonale Gebäudeausrichtung zum Hang anstatt einer Parallelverbauung.*

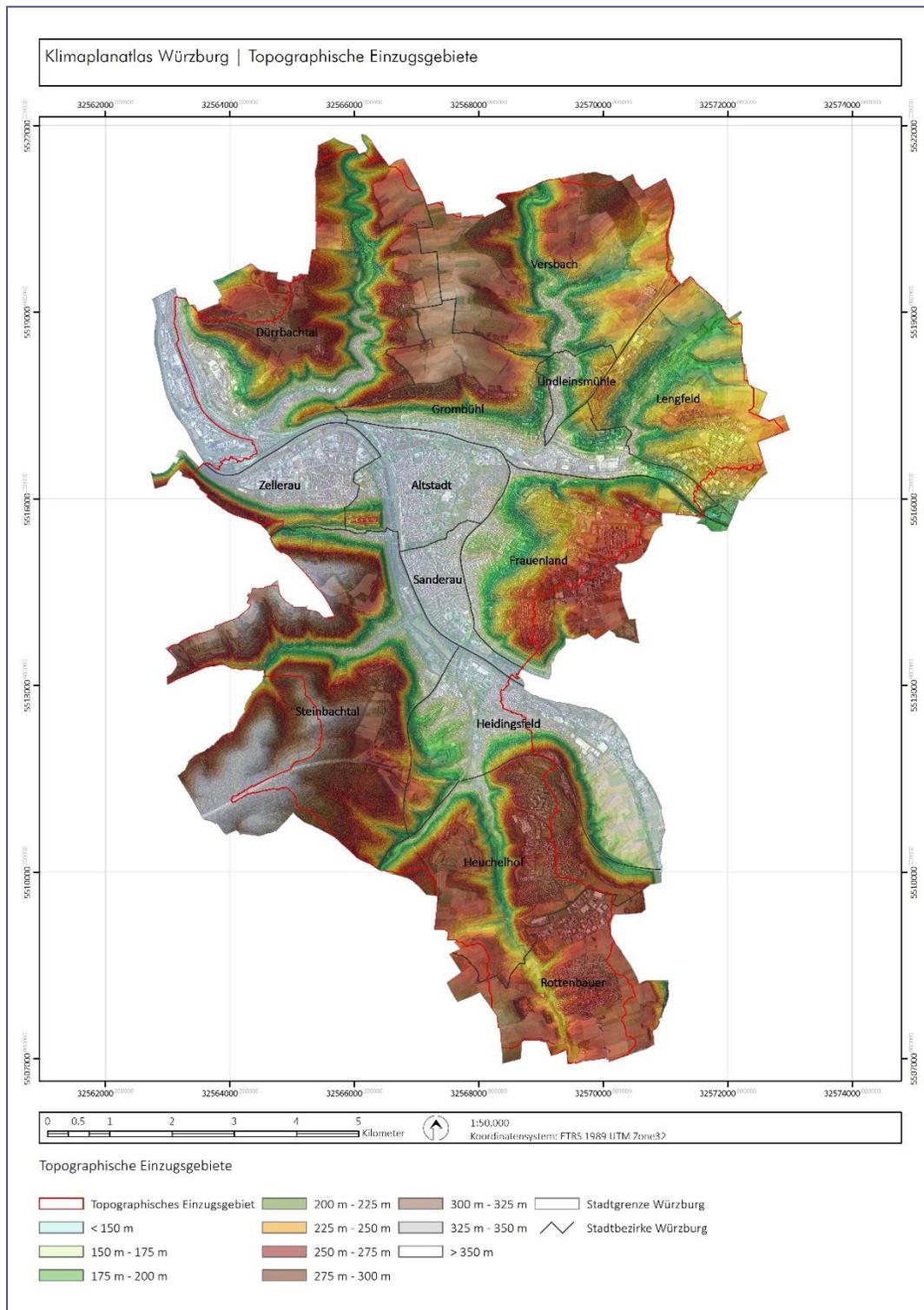


Abbildung 30 Topographisches Einzugsgebiet Stadt Würzburg

## 6 Abschließende Gesamtbewertung

---

Die klimatisch (thermische) städtische Gesamtsituation kann mit Einschränkungen als neutral beschrieben werden. Denn trotz der eingegengten topographischen Lage, welche unter anderem auch zu einer höheren lufthygienische Belastung im Stadtgebiet führen kann, hat das Würzburger Becken ein großes topographisches Einzugsgebiet, wodurch besonders während austauscharmer Sommernächte große Mengen an Kaltluft in den Außenbereichen produziert werden, und in das Würzburger Becken abfließen können, was sich stark positiv auf das Abkühlungsvermögen der Siedlungsstrukturen auswirkt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass den Kaltluftentstehungs- und Abflussgebieten eine sehr große klimatische Ausgleichsbedeutung zukommt, die es zu schützen und zu fördern gilt.

Neben den teils hohen Versiegelungsgraden, insbesondere im Innenstadtbereich, ist die teils geringe städtische Porosität in den Stadtgebieten „Altstadt“ und „Sanderau“ problematisch, da die Belüftung des städtischen Raums maßgeblich von der vorherrschenden Rauigkeitsparametern bestimmt wird. In diesem Zusammenhang ist das Stadtgebiet „Frauenland“ positiv zu nennen, und gleichzeitig in seiner Funktion als Durchlüftungsbahn zu fördern.

Lufthygienische Bedenken entsprechend der industriellen Standorte innerhalb der Luftleitbahnen sind bedingt durch

- a) die Art der industriellen und gewerblichen Nutzung sowie
- b) durch die mögliche Art der Emissionen

nur lokal begrenzt, und demensprechend im gesamtstädtischen Kontext untergeordnet. Detaillierte Untersuchungen für potentielle Risikobereiche liegen als externe Gutachten der Stabsstelle Klimaschutz der Stadt Würzburg vor.

Der vorliegende Klimaplanatlas bietet als zusammenfassendes Planwerk die Möglichkeit die meso- und teils lokalklimatischen Zusammenhänge flächendeckend zu erfassen, um für die zukünftige gesamtstädtische Entwicklung Planungsaussagen und Entwicklungsrahmenrichtlinien abzuleiten. Auf Basis der durchgeführten Untersuchung, ergeben sich

für das Stadtgebiet Würzburg weitere stadtentwicklungs- und planungsrelevante Anwendungsfälle.

- Für kleinräumigere Aussagen, bspw. die Neugestaltung von Plätzen, Design und Konzeption von einzelnen Bauvorhaben oder Bauensembles ist eine mikroklimatische Analyse notwendig. Im mikroklimatischen Bereich beziehen sich die klimatischen Fragestellungen (entsprechend Kap4.1, Abbildung 5) größtenteils auf den thermischen Komfort und die Belüftungsverhältnisse. Diese meist numerischen Simulationen oder GIS gestützten Feinmodellierungen bauen auf den Ergebnissen des Klimaplanatlas auf, wodurch Fehlinterpretationen weitestgehend vermieden werden können.
- Durch die teils hochaufgelösten Zwischenergebnisse der Themenkarten (z.B. der Vegetationsverteilung und des SkyView Faktors) können für größere Einzugsgebiete (Stadtteilebene) ergänzende GIS gestützte Modellierungen zu den Fragestellungen der solaren Einstrahlung, der bioklimatischen Komfort- und Diskomfortbereiche oder der Stadtteilbelüftung durchgeführt werden.
- Neben der mikro- und lokalklimatischen Analysen von „Hot Spots“ und Einzelfragestellungen ist eine weitergehende Verknüpfung der Analysedaten mit gesellschaftlichen (demographischen Daten) wünschenswert. Durch die im Zuge des Klimawandels immer öfters auftretenden Hitzewellen steigt die gesellschaftliche Bedeutung klimatischer Extremwetterereignisse. Allein während der Hitzewelle 2003 wurden europaweit ca. 70.000 Hitzetote verzeichnet, wovon 10 % in Deutschland verortet waren (vgl. Robine, et al. 2008). Im Zuge der präventiven gesellschaftlichen Vulnerabilitätsreduzierung im Themenbereich Hitzestress und Mortalität können gesellschaftliche Präventions- und Anpassungsmaßnahmen durch die Verschneidung der klimatischen Analyseergebnissen mit demographischen und Infrastrukturellen Bestandsdaten (Vulnerabilitäts-/Gefährdungsanalyse) zu einer Effizienz- und Effektivitätssteigerung führen.

## 7 Literatur

---

BAYFORKLIM (1996). Klimaatlas Bayern

BURGHARDT, R. (2015). Development of an ArcGIS extension to model urban climate factors. A method of automatic and interactive analysis to capture the influencing factors on urban climate. Kassel University Press

BURGHARDT, R., CAMPE, S., KUPSKI, S. (2014). Klimabewusste Stadtgestaltung. In: RaumPlanung, Fachzeitschrift für räumliche Planung und Forschung, Ausgabe 01/2014, Informationskreis für Raumordnung, Dortmund

FRANK, W. (1975). Raumklima und thermische Behaglichkeit. In: Berichte aus der Bau-forschung, Heft 104, Ernst und Sohn Berlin, 1975

GARTLAND, L. (2008). Heat Island. Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas. Earthscan, London

KATZSCHNER, L. et al. (2009). Spatial Urban Climate and Urban Planning, Report of the Hong Kong Institute of Planners, 30th anniversary, City Council Hong Kong

KATZSCHNER, L., et al. (2012). Stadtklimaexkursion Würzburg. Erstellung einer Klima-funktionskarte. Universität Kassel

KÜNSTLER, R. (2009). Stadtklimatische Untersuchungen in Würzburg. Institute für Ge-ographie. Julius-Maximilians-Universität Würzburg

LOHMEIER, (2008). Klimafunktions- und Planungshinweiskarte. In: Lohmeyer aktuell 20. Lohmeyer Ingenieure

MAYER, H., (1989): Workshop „Ideales Stadtklima“ am 26. Oktober 1988 in München. DMG Mittelteil. 3/89, 52-54

MATZARAKIS, A. & MAYER, H. (1992). Mapping of urban air paths for planning in Mün-chen. Wissenschaftliche Berichte Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Univ. Karlsruhe

NG, E. & REN, C. (2015). The Urban Climatic Map. Earthscan, London

OKE, TR. (1987). Boundary layer climates. London and New York. Routledge, London

OKE, TR. (2006). Towards better scientific communication in urban climate. In. Theoretical Applied Climatology

ROBINE, J.-M. et al. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. In. C. R. Biologies 331, 2008

UNGER, J. (2009). Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. In. Building and Environment. ScienceDirect.

SUSCA, T. et al. (2011): Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs, In. Environmental Pollution 159 2119 – 2126, Elsevier Ltd.

VDI 1000 (2010-06). VDI-Richtlinienarbeit; Grundsätze und Anleitungen. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie; Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Bioklima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung; Teil 1: Klima. Berlin: Beuth Verlag

VDI 3787 Blatt 3. Umweltmeteorologie; Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Bio-klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung; Teil 2: Luftqualität.

WYRWICH, C. (2004). Luftreinhalteplan Stadt Würzburg. Regierung von Unterfranken. Würzburg

## 8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

---

Abbildung 1 Windrose zu Würzburg Verortung Meteorologische Messstation des DWD (verändert nach BayFORKLIM, 1996 u. Bing Maps, 2016)	5
Abbildung 2 Klimafunktionskarte des studentischen Projektes "Stadtklima Würzburg" (2012)	6
Abbildung 3 Windanalyse des studentischen Projektes „Stadtklima Würzburg“ (2012)	7
Abbildung 4 Flächenverteilung Stadt Würzburg (eigene Darstellung auf Grundlage des Basis-DLM)	8
Abbildung 5 Klimatische Einordnung von regionalen und städtischen Planungsebenen	11
Abbildung 6 Schematische Darstellung der Herleitung der KFK und PHK	15
Abbildung 7 Klimafunktionskarte der Stadt Würzburg (2015/2016)	24
Abbildung 8 Verteilung statistischer Mittelwerte pro Stadtteil	25
Abbildung 9 Planungshinweiskarte Stadt Würzburg   Ebene 1	28
Abbildung 10 Planungshinweiskarte Stadt Würzburg   Ebene 2   Thermische Aspekte	30
Abbildung 11 Planungshinweiskarte Stadt Würzburg   Ebene 2   Dynamische Aspekte	31
Abbildung 12 Vegetationsstr. aus 4-Band „Sentinel 2“ und 3-Band Luftbildanalyse	33
Abbildung 13 Vegetationsbedeckung pro Stadtteil in %	34
Abbildung 14 Schematische Darstellung der Herleitung des SkyView Faktors	35
Abbildung 15 SkyView Faktor	36
Abbildung 16 Temp. Verschattungsmaßnahmen (Malaga, Spanien; Südausrichtung)	37
Abbildung 17 Mittlerer SkyView Faktor pro Stadtteil	38
Abbildung 18 Gebäudevolumendichte in $m^3/m^2/r$ 50 m	40
Abbildung 19 Mittlere Gebäudevolumendichte pro Stadtteil	41
Abbildung 20 Temperaturverlauf unterschiedlicher Dachabdeckungen; Versuchsanordnung in New York (Susca, 2011)	42
Abbildung 21 Darstellung der Frontal Area Variablen (Unger, 2009)	43
Abbildung 22 Städtische Rauigkeit $Z_o$ in S/N Richtung	45
Abbildung 23 Städtische Rauigkeit $Z_o$ in W/O Richtung	46
Abbildung 24 Mittlere $Z_o$ Rauigkeitslängen pro Stadtteil	47
Abbildung 25 Städtische Porosität $Ph_{var}$	49
Abbildung 26 Mittlere städtische Porosität $Ph_{var}$ pro Stadtteil	50

Abbildung 27 Das Logarithmische Windprofil im ländlichen und städtischen Vergleich (verä. nach Lexikon der Geographie, 2014) _____	51
Abbildung 28 Städtische Rauigkeit $Z_d$ _____	52
Abbildung 29 Mittlere Nullpunktverschiebung $Z_d$ pro Stadtteil _____	53
Abbildung 30 Topographisches Einzugsgebiet Stadt Würzburg _____	55
Tabelle 1 Bestehende klimatische Voruntersuchungen _____	4
Tabelle 2 Detailbeschreibung Planungshinweiskarte Stadt Würzburg Ebene 1 _____	26
Tabelle 3 Auflistung aller berechneten Rauigkeitsparameter (Burghardt, 2015) _____	43