

Stadtklimaanalyse Bayreuth

Auftraggeber:
Stadtplanungsamt der Stadt Bayreuth

Auftragnehmer:
Büro für Umweltmeteorologie
Ahdener Weg 10a
33100 Paderborn

Bearbeiter:
Dipl. Met. Helmut Bangert
Dipl. Ing. Rita Heider

Paderborn, Dezember 2000

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....	1
2.	KLIMA DER REGION.....	2
2.1	Lufttemperatur.....	2
2.2	Niederschlag.....	2
2.3	Wind.....	3
2.4	Strahlung/Sonnenscheindauer.....	3
3.	WITTERUNGSVERLAUF WÄHREND DES MESSZEITRAUMES.....	5
4.	INHALTE UND METHODEN DER ANGEWANDTEN STADTKLIMATOLOGIE.....	7
5.	ERGEBNISSE DES FESTSTATIONSNETZES.....	10
5.1	Stationsnetz.....	10
5.2	Thermische Verhältnisse.....	11
5.2.1	Mittelwerte, Extremwerte und Schwellwerte.....	11
5.2.2	Zeitlicher Verlauf.....	12
5.3	Strömungsverhältnisse.....	14
5.3.1	Ergebnisse für den Gesamtzeitraum.....	15
5.3.2	Ergebnisse für antizyklonale und zyklonale Wetterlagen.....	17
5.3.3	Spezialauswertungen.....	19
6.	AUSWERTUNG VON EINZELEPISODEN.....	21
6.1	Zeitraum 17.06. - 21.06.2000.....	21
6.2	Zeitraum.....	23
6.3	Ergebnisse für den Termin der Meßfahrten am 19./20.08.2000.....	25
6.4	Ergebnisse der Rauchgasuntersuchungen.....	28
7.	KLIMAFUNKTIONSKARTE.....	32
7.1	Auswertung der topographischen Informationen.....	32
7.2	Entwicklung der Potentialkarten.....	34
7.3	Entwicklung der Klimafunktionskarte.....	35
7.3.1	Stadtklimatope.....	35
7.3.2	Freilandklimatope.....	38
7.3.3	Besondere Klimaeigenschaften.....	41
8.	PLANUNGSHINWEISE FÜR TEILRÄUME.....	42
8.1	Teilraum Oberpreuschwitz.....	42
8.2	Teilraum Altstadt/Saas.....	42
8.3	Teilraum Thiergarten.....	43
8.4	Teilraum Pfaffenleck/Bühlersmühle/Oberkonnersreuth.....	44
8.5	Teilraum Aichig.....	45
8.6	Teilraum St. Johannis.....	45
9.	ZUSAMMENFASSUNG.....	46

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Mit Datum vom 31.03.2000 wurde das Büro für Umweltmeteorologie, Paderborn von der Stadt Bayreuth vertreten durch das Stadtplanungsamt beauftragt, ein gesamtstädtisches Klimagutachten Für das Stadtgebiet von Bayreuth liegen bisher keinerlei planungsrelevante stadtmeteorologische Messungen vor, die sich für den Bereich der vorbereitenden und verbindlichen Bauleitplanung verwenden lassen. Insofern betritt dieses Fachgutachten im Stadtgebiet von Bayreuth Neuland. Allerdings konnten aufgrund der zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen nur ein dreimonatiges Meßprogramm durchgeführt. Sein Leistungsumfang orientiert sich an den Anforderungen der modernen Stadtklimatologie, die u.a. in den Merkblättern der UVP-Gesellschaft e.V. (1998/1999) zusammenfassend dargestellt sind.

Auf der Grundlage einer Bestandsaufnahme sollte die lokalklimatischen Funktionen des Raumes ermittelt werden. Somit erfolgte in einem ersten Arbeitsschritt die Auswahl von 8 Standorten, an denen für mehrere Monate im Sommer 2000 ein temporäres meteorologisches Meßnetz errichtet wurde. Ergänzend zu den kontinuierlichen Messungen erfolgten bei einer hochsommerlichen Wetterlage Temperaturmeßfahrten, mit deren Hilfe die thermische Struktur des Stadtgebietes zeitlich und räumlich während der Abkühlungsphase zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang hochauflösend untersucht wurde. Darüber hinaus wurde an drei Standorten das lokale Strömungsverhalten mit künstlichem Rauch sichtbar gemacht, um kleinräumige, thermische induzierte Luftbewegungen dokumentieren zu können.

Neben den meßtechnisch erfaßten Klimatelementen wurden die planungsrelevanten Klimafaktoren des Raumes auf der Basis digitaler Kartengrundlagen ermittelt. Diese Informationen wurde mit Hilfe des Geographischen Informationssystemes ArcView GIS erstellt.

Neben der Präsentation und Erläuterung der Ergebnisse in Text und Graphik ist die Klimafunktionskarte ein wesentliches Ergebnis der Untersuchung. In ihr sind die wichtigsten Aussagen zusammengefaßt dargestellt. In ihr sind alle Ergebnisse des sommerlichen Meßprogrammes sowie die GIS-technische Auswertung der digitalen Kartengrundlagen enthalten. Auf ihrer Basis werden exemplarisch für sechs Teilräume fachlich begründete Planungsempfehlungen gegeben.

Einschränkend wird darauf hingewiesen, daß Aussagen für winterliche Besonderheiten des Bayreuther Stadtklima aus dem hier vorgelegten Gutachten nicht und nur sehr allgemein möglich sind. Damit fehlen insbesondere Aspekte zur Bedeutung winterlicher Inversionswetterlagen für den Raum. Sind für konkrete Planungsabsichten diese Themen von großem Interesse, lassen sich entsprechende Untersuchungen in Form von Fallstudien nachholen und in das Gesamtgutachten integrieren.

2. KLIMA DER REGION

Die Informationen zum Klima der Region wurden dem Klimaatlas von Bayern entnommen, der 1996 vom Bayerischen Klimaforschungsverbund herausgegeben wurde. Sofern für einzelne Klimaparameter Informationen von Amtlichen Meßstationen vorliegen, wurden stets die Stationen Bamberg, Bayreuth und Fichtelberg verwendet. Die geographischen Angaben für diese 3 Standorte lauten:

Bamberg	49° 53' nördl. Breite	10° 55' östl. Länge	239m ü.NN
Bayreuth	49° 58' nördl. Breite	11° 33' östl. Länge	330m ü.NN
Fichtelberg	50° 00' nördl. Breite	11° 52' östl. Länge	705m ü.NN

2.1 Lufttemperatur

Für die Lufttemperatur liegen an diesen Stationen Werte der mittleren monatlichen und jährlichen Lufttemperatur vor. Die Klimamittelwerte stammen aus dem Zeitraum 1951 bis 1980. Für Bamberg wurde eine Jahresmitteltemperatur von 8,4°C errechnet. Der entsprechende Wert für Bayreuth liegt bei 7,8°C. Dieser niedrigere Wert ist eine Folge der natürlichen, höhenbedingten Temperaturabnahme von ca. 0,6°C pro 100m Höhenzunahme. Entsprechend liegt die Jahresmitteltemperatur auf dem Fichtelberg nur bei 5,6°C. Wärmster Monat ist an allen Stationen der Juli (Bamberg 17,7°C, Bayreuth 17,0°C, Fichtelberg 14,3°C). Übereinstimmend am kältesten ist es im Januar (Bamberg -1,0°C, Bayreuth -1,6°C, Fichtelberg -3,6°C).

Neben den Mittelwerten der Lufttemperatur ist die mittlere Anzahl von Tagen mit definierten Temperaturschwellwerten für die thermische Charakterisierung von großem Interesse. Die 4 in der Klimatologie am häufigsten verwendeten Schwellwerte sind folgender Maßen definiert:

Eistag:	Maximum der Lufttemperatur kleiner 0°C
Frosttag:	Minimum der Lufttemperatur kleiner 0°C
Sommertag:	Maximum der Lufttemperatur mindestens 25°C
Heißer Tag:	Maximum der Lufttemperatur mindestens 30°C

An den Stationen Bamberg und Bayreuth liegen die exakten Mittelwerte für die mittlere jährliche Zahl von Heißen Tagen und Eistagen vor. An der Wetterstation Bamberg wurden durchschnittlich 7,1 Heiße Tage und 22,0 Eistage ermittelt, an der Station Bayreuth liegen die Werte für Heiße Tage bei 5,5 und für Eistage bei 26,8 Tagen. Die Anzahl der Frosttage und der Sommertage muß aus den entsprechenden Klimakarten abgeleitet werden. Danach befindet sich Bamberg in der Kategorie 80 bis 90 Frosttage, während Bayreuth in der Kategorie 100 bis 110 Frosttage liegt und für den Fichtelberg 140 bis 160 Frosttage ermittelt wurden. Bei den Sommertagen wurde für Bamberg eine mittlere Häufigkeit von 35 bis 40 Tagen ermittelt, während Bayreuth in der Kategorie 25 bis 30 Sommertage liegt. Für den Fichtelberg liegt ihre Häufigkeit unter 10 Tagen pro Jahr.

Mit Hilfe dieser Daten werden die für die Region typischen thermischen Verhältnisse beschrieben. Vor diesem Hintergrund werden später im Rahmen der stadtmeteorologischen Untersuchung die Messungen aus dem Stadtgebiet von Bayreuth diskutiert.

2.2 Niederschlag

Obwohl die Niederschlagsverhältnisse im Zusammenhang mit der Stadtklimatologie selbst nur eine untergeordnete Rolle spielt, dient die mittlere jährliche Niederschlagshöhe sowie die jahreszeitliche Verteilung wesentlich der geländeklimatischen Einordnung der Region.

Für die Standorte Bamberg, Bayreuth und Fichtelberg liegen aus dem Zeitraum 1961 bis 1990 die mittleren Monats- und Jahressummen des Niederschlages vor. Während in Bamberg nur 634mm Niederschlag fallen, sind es in Bayreuth 709mm und an der Station Fichtelberg sogar 1108mm. In erster Linie ist das Fichtelgebirge mit seinem Steigungsregen für diese unterschiedlichen Niederschlagsmengen verantwortlich. Auch bei den Monatssummen wird der Einfluß des Mittelgebirges deutlich. Der niederschlagsreichste Monat ist an der Station Fichtelberg mit durchschnittlich 126mm der Dezember. Nach dem Januar mit 106mm wird die dritthöchste Monatssumme mit 100mm im Juni erreicht. Deutlich niederschlagsärmer sind hier das Frühjahr und der Herbst. Für Bamberg ergibt sich ein eindeutiges Niederschlagsmaximum im Sommer. Regenreichster Monat ist hier der Juni mit 77mm. Der Monat mit den geringsten Niederschlagsmengen ist der Februar mit 39mm. Weniger eindeutig ist die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge an der Station Bayreuth. Trotz der im Vergleich zu Bamberg größeren Jahressumme fallen im Juni hier nur 76mm Niederschlag. Dafür sind die Wintermonate deutlich niederschlagsreicher, wobei im Dezember mit 69mm fast der Wert aus dem Sommer erreicht wird. Somit stellt Bayreuth bezüglich der Niederschlagsverteilung die Übergangssituation zwischen den Flachlandstationen und dem Bergland dar.

Die unterschiedlichen Niederschlagsmengen an den 3 Standorten korrelieren mit der Anzahl der Tage mit Niederschlag. Regenmengen von mindestens 1mm fallen in Bamberg an 114 Tagen, in Bayreuth sind es bereits 123 Tage und an der Station Fichtelberg sind es 145 Tage.

2.3 Wind

Im Gegensatz zu Temperatur und Niederschlag ist das Meßnetz für den Windvektor sehr weitmaschig, so daß aus der unmittelbaren Umgebung von Bayreuth keine langjährigen Windstatistiken im Klimaatlas enthalten sind. In erster Näherung können die Daten von Weiden verwendet werden, wobei die Station als flachgelegene Talstation charakterisiert wird. Für diese Station wurde aus den Jahren 1981 bis 1990 ein mittleres Jahresmittel der Windgeschwindigkeit von 2,0m/s bei einer Meßhöhe von 10m ü. Grund ermittelt. Monatsmittel von mindestens 2m/s werden zwischen November und Mai gemessen. Im August und September liegen die Werte nur bei jeweils 1,6m/s. An Flachlandstationen verfügt die Windgeschwindigkeit über einen ausgeprägten Tagesgang. Tagsüber sorgt die Thermik für eine Zunahme der Luftbewegung, nachts beruhigt sich bei häufig stabiler Luftschichtung das bodennahe Windfeld. Die dreistündig gemittelten Windgeschwindigkeitswerte erreichen in Weiden für die Periode 03-06 Uhr mit 1,4m/s ihren Minimalwert, während für den Zeitraum 12-18 Uhr mit 2,8m/s das Maximum beobachtet wird. In den Hochlagen der Mittelgebirge (z.B. auf dem Wendelstein) und der Alpen (z.B. Zugspitze) kehrt sich dieses Verhältnis um. Da die Windrichtung sehr stark durch die örtliche Reliefsituation geprägt wird, wird auf die stationsbezogene Beschreibung dieses Parameters verzichtet. Die Tatsache, daß auch die Windrichtung starken tages- und jahreszeitenabhängigen Schwankungen unterworfen ist, wird bei der Auswertung des Bayreuther Meßprogrammes umfassend diskutiert.

2.4 Strahlung/Sonnenscheindauer

Eine wichtige Randbedingung für die Ausprägung stadtklimatischer Besonderheiten ist auch das Strahlungsangebot. Messungen und daraus abgeleitete Kartendarstellungen existieren allerdings nur für die Sonnenscheindauer. Da die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer weltweit identisch ist, wird die tatsächliche Sonnenscheindauer aus-

schließlich durch die Bewölkung beeinflusst. Als Maßzahlen für die Bewölkung gelten die monatliche und jährliche Anzahl von Trüben Tagen (Tagesmittel der Bewölkungsmenge mindestens 6 Achtel) und Heiteren Tagen (Tagesmittel der Bewölkung höchstens 2 Achtel). Für die Wetterstation Hof-Hohensaas beträgt die mittlere jährliche Anzahl von Trüben Tagen 162 Tage, Heitere Tage gibt es hier nur in 32 Fällen. Während die Häufigkeit von Trüben Tagen während des Winterhalbjahres besonders hoch ist, haben die Heiteren Tage keinen ausgeprägten Jahresgang. Anschaulicher und für die angewandte Stadtmeteorologie mindestens so wichtig ist die Jahressumme der Sonnenscheindauer. Ihre Werte sind im Klimaatlas Bayern nur in Kartenform veröffentlicht. In der Region Bayreuth gibt es demnach im Jahresmittel zwischen 1400 und 1500 Stunden Sonnenschein. Damit gehört diese Region in Bayern zu den Bereichen mit unterdurchschnittlichen Werten. Verantwortlich dafür sind neben der Luvlage zum Fichtelgebirge die morgendlichen Talnebel in den Niederungsbereichen.

Diese Daten dienen lediglich der regionalklimatischen Gliederung, stellen aber wichtige Hintergrundinformationen für die Ausbildung stadtklimatischer Besonderheiten dar.

Die folgende Kurzbeschreibung der Witterung während der stadtklimatischen Messungen dient ebenfalls der Einordnung der Meßergebnisse in den allgemeinen Wetterablauf der Region.

3. WITTERUNGSVERLAUF WÄHREND DES MESSZEITRAUMES

Das stadtklimatische Meßprogramm umfaßte auftragsgemäß einen Zeitraum von 3 Monaten. Das temporäre Sondermeßnetz wurde im Zeitraum Anfang Juni bis Mitte September 2000 betrieben. Das Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes "Die Großwetterlagen Europas" sowie der ebenfalls vom Deutschen Wetterdienst publizierte "Witterungsreport" mit ihren Ausgaben Juni 2000 bis September 2000 liefern die notwendigen Hintergrundinformationen über den Witterungsverlauf.

Der **Juni 2000** war bundesweit im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt zu warm und zu trocken. Im südöstlichen Teil Deutschlands war es sogar deutlich zu warm sowie erheblich zu trocken. Gleichzeitig war die Monatssumme der Sonnenscheindauer überdurchschnittlich hoch. Die Wetterstation Bayreuth meldete eine aktuelle Monatsmitteltemperatur von 18,0°C, was einer Abweichung vom langjährigen Durchschnitt um +2,6K entspricht. Es gab 14 Sommertage, wobei an 6 Tagen die Temperatur mindestens auf 30°C anstieg. Das absolute Maximum der Lufttemperatur von 34,0°C wurde am 21. Juni gemessen. In der Nacht zum 28. Juni sank die Temperatur auf 4°C ab und in der Nacht zuvor wurde ein Minimum am Erdboden von 0,9°C gemessen. In diesem Monat schien die Sonne in Bayreuth 290 Stunden, was 146% vom langjährigen Durchschnitt entspricht. Gleichzeitig fielen nur 49mm Niederschlag, womit nur 64% vom Normalwert erreicht wurden. Meßbarer Niederschlag (mindestens 0,1mm) fiel an 9 Tagen.

Das zu warme und zu trockene Wetter wurde durch überwiegend antizyklonale Wetterlagen hervorgerufen. Nur vom 22. bis 25. Juni stellte sich vorübergehend eine Schlechtwetterperiode ein. Die Lage der Hochdruckgebiete hatte mehrheitlich eine westliche Luftzufuhr zur Folge. Eine typische Ostwindwetterlage konnte sich während des ganzen Monats nicht entwickeln.

Im Gegensatz zum Vormonat war der **Juli 2000** bundesweit zu kühl. Vor allem im Südwesten war es dabei auch zu naß. Die Normalwerte der Sonnenscheindauer wurden nirgendwo erreicht. Die Monatsmitteltemperatur lag an der Wetterstation Bayreuth bei 15,7°C, womit der langjährige Durchschnitt um 1,2K unterschritten wurde. Die Höchsttemperatur von 28°C (gemessen am 2. Juli) signalisiert, daß es in diesem Monat keinen heißen Tag gegeben hat. Lediglich an 5 Tagen wurde die Schwelle für den Sommertag (mindestens 25°C) überschritten. Das tiefste Minimum wurde mit 6,1°C (am Boden 3,8°C) in der Nacht zum 13. Juli gemessen. 155 Stunden Sonne bedeuten lediglich 74% vom Normalwert, mit 119mm Niederschlag wurde dieses Soll allerdings um 63% übertroffen. Meßbarer Niederschlag fiel an 19 Tagen, wobei es an 5 Tagen Starkniederschläge von mehr als 10mm gab. Am 27. und 28. Juli lag die Niederschlagssumme insgesamt bei 30mm. Eine längere trockene Periode stellte sich nur zwischen dem 16. und 22. Juli ein. Zu dieser Zeit bestimmte ein Hochdruckgebiet mit Zentrum über den Britischen Inseln den Witterungsablauf. Ansonsten dominierten zyklonale Wetterlagen, die mehrheitlich mit westlicher Luftzufuhr verbunden waren.

Im **August 2000** kehrte der Hochsommer nach Deutschland zurück. Nach den Monatswerten war es bei einer meist überdurchschnittlichen Sonnenscheindauer zu warm und überwiegend zu trocken. Mit 18,3°C lag die Monatsmitteltemperatur an der Wetterstation Bayreuth um 1,9K über dem langjährigen Durchschnitt. Am 20. August stieg die Lufttemperatur hier auf 32,2°C. Darüber hinaus wurde noch ein weiterer heißer Tag registriert. 13 Sommertage mit Temperaturen von mindestens 25°C verdeutlichen den sommerlichen Charakter dieses Monats. Die Monatssumme von 261 Sonnenstunden bedeutet, daß der langjährige Durchschnittswert um 34% übertroffen wurde. Mit nur 47mm blieb die Niederschlagssumme unterdurchschnittlich (80% vom Normalwert). 18 Tage blieben völlig

trocken und nur einmal fielen mehr als 10mm Niederschlag. An insgesamt 21 Tagen wurde die Wetterlage als Hochdruckbrücke Mitteleuropa klassifiziert, die übrige Zeit herrschte zyklonal geprägtes Westwindwetter. Die jeweilige Lage des Hochdruckkernes führte im Südosten Deutschlands mehrheitlich zu einer südwestlichen Höhenströmung, nur an wenigen Tagen (05., 06., 13., 14. und 26. August) sorgte die großräumige Luftdruckverteilung für eine östliche Strömungskomponente.

Der Herbstmonat **September 2000** war zwar geringfügig zu warm, hatte jedoch eine unterdurchschnittliche Sonnenscheindauer und zuviel Niederschlag. An der Wetterstation Bamberg (Daten der Stationen Bayreuth lagen nicht rechtzeitig vor) wurde mit 13,9°C eine leicht überdurchschnittliche Monatsmitteltemperatur (+0,4K) gemessen. Hier stieg die Lufttemperatur an insgesamt 4 Tagen auf mindestens 25°C, am 11. und 12. September wurden mit jeweils 26,6°C die höchsten Temperaturen gemessen. Die Nächte blieben im Flachland noch frostfrei, am kältesten wurde es mit 3,6°C (am Boden 1,2°C) in der Nacht zum 24. September. 143 Stunden Sonne bedeuteten 92% vom Normalwert, mit 72mm Niederschlag war es an der Wetterstation Bamberg jedoch erheblich zu naß. Allerdings fiel dieser Niederschlag nur an 12 Tagen, wobei 2 Tage Regenmengen von mehr als 10mm brachten. Der Meßzeitraum umfaßte neben 5 zyklonal geprägten Tagen zum Monatsanfang vom 6. bis 15. September eine überwiegend antizyklonal geprägte Westwetterlage, die im Südosten eine zu Frühnebel neigende Schönwetterperiode auslöste.

4. INHALTE UND METHODEN DER ANGEWANDTEN STADTKLIMATOLOGIE

Eine ausreichende Würdigung des Schutzgutes Klima gehört zum Grundbestand der modernen Stadt- und Regionalplanung. Das Schutzgut Klima gehört wie Boden, Luft und Wasser zu den abiotischen Schutzgütern und erhält neben den biotischen Elementen (Fauna, Flora, Biotope) einen immer höheren Stellenwert in der Planung. In der Vergangenheit wurden solche Inhalte nur unzureichend berücksichtigt, wofür insbesondere inhaltliche und methodische Defizite verantwortlich sind. Heute bieten sowohl die rechtlichen Grundlagen als auch die meteorologischen Untersuchungsmethoden gute Voraussetzungen für eine zunehmend klimagerechte Stadtplanung.

Aus dem großen Spektrum der meteorologischen Parameter spielen innerhalb der Stadtplanung die Lufttemperatur und der Windvektor eine entscheidende Rolle. Einerseits sind sie die wichtigsten Kenngrößen in der Humanbiometeorologie, andererseits beeinflussen Flächennutzungsänderungen diese beiden Meßgrößen besonders stark.

Die Lufttemperatur in der bodennahen Luftschicht ist eine Folge der Energieumsätze am Erdboden. Dazu gehören kurz- und langwellige Strahlungsflüsse, fühlbare und latente Wärmeströme sowie der Wärmeleitungsstrom und die Wärmespeicherung.

Kurzwellige Strahlung wird ausschließlich von der Sonne emittiert. Sie erreicht die Erdoberfläche als Globalstrahlung (Summe von direkter und diffuser Strahlung) und wird hier in Abhängigkeit von der Albedo (Reflexionsverhalten) teilweise reflektiert. Die Differenz aus Globalstrahlung und Reflexstrahlung, die tagsüber stets positiv ist, wird als kurzwellige Strahlungsbilanz bezeichnet. Dieser Energieüberschuß führt u.a. zur Erwärmung des Erdbodens und zur Abgabe langwelliger Strahlung vom Erdboden aus in die Atmosphäre. Diese gibt selbst Energie ab, da die atmosphärischen Gase, Aerosole und Wolken entsprechend ihrer Temperatur langwellige Strahlung emittieren. Die langwellige Strahlungsbilanz errechnet sich aus der Differenz der Abstrahlung vom Erdboden und der Gegenstrahlung aus der Atmosphäre. Diese ist im Gegensatz zur kurzwelligen Strahlungsbilanz ganztägig wirksam. In der Regel hat der Differenzbetrag ein negatives Vorzeichen, das heißt die langwelligen Strahlungsflüsse haben für den Erdboden eine Abkühlung zur Folge.

Neben den Energietransporten durch Strahlung und molekularer Wärmeleitung im Boden wirken die mit dem turbulenten vertikalen Luftaustausch verbundenen fühlbaren und latenten Wärmeströme. Die Wärmestromdichte des fühlbaren Wärmestromes ist proportional zum vertikalen Temperaturgradienten und bewirkt allein die im Tagesgang feststellbaren Änderungen der Temperaturen innerhalb der bodennahen Luftschicht. Durch den latenten Wärmestrom wird das vertikale Profil der spezifischen Feuchte gesteuert. Die transportierte latente Energie ist dabei die Umwandlungswärme des Wassers beim Phasenübergang flüssig-gasförmig (Verdunstung) an der Erdoberfläche. Die Verdunstung setzt sich aus der Transpiration und der Evaporation zusammen. Zum latenten Wärmestrom gehören alle Phasenwechsel des Wassers, also auch Taubildung und das Schmelzen von Schnee.

Alle genannten Energieformen unterliegen im Stadtbereich einer anthropogenen Modifikation. Zusätzliche Aerosole (Stäube, Wasser) beeinflussen die Globalstrahlung, die Farbe der Oberfläche bestimmt die Größenordnung Reflexstrahlung. Vom Menschen gestaltete Oberflächen wie Asphaltstraßen und Teerdächer haben Albedowerte zwischen 0,05 und 0,08, d.h. sie reflektieren nur 5% bis 8% der ankommenden Sonnenstrahlung. Für natürliche Oberflächen wie Wiesen, landwirtschaftliche Nutzflächen und Wälder hingegen liegen die Albedowerte zwischen 0,15 und 0,25. Somit wird in Städten mehr kurz-

wellige Strahlung absorbiert als im Freiland, d.h. es steht mehr Energie für die anderen Komponenten des Energiehaushaltes zur Verfügung als im Außenbereich.

Das vorhandene Oberflächenmaterial (Baumaterial) hat ebenfalls Auswirkungen auf die molekulare Wärmeleitung im Boden. Typische Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit in Städten liegen zwischen $1,7$ und $4,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, während im Freiland nur Beträge zwischen $0,21$ und $2,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ erreicht werden. Tagsüber werden in Städten somit durch Wärmeleitung große Energiemengen in das Baumaterial hinein transportiert. In den Nachtstunden geben die Baumaterialien zusätzliche Energie an die Erdoberfläche ab. Hinzu kommt, daß dieser Wärmestrom nicht nur in der Fläche (also am Erdboden), sondern auch im Volumen (also an Gebäuden) wirksam ist.

Der geringe Grünflächenanteil führt in Stadtgebieten zu einer Reduzierung der Transpiration durch die Pflanzen. Die kanalisierte Wasserabfuhr von versiegelten Flächen sowie die wenigen offenen Wasserflächen tragen dazu bei, daß auch die Evaporation niedriger ist als im Freiland.

In der Summe haben die Veränderungen des Energiehaushaltes eine Steigerung des fühlbaren Wärmestromes zur Folge, was sich in erhöhten Lufttemperaturen äußert. Ein bekanntes Phänomen ist daher die innerstädtische Wärmeinsel. Sie ist sogar bei der äußerst trägen Jahresmitteltemperatur meßtechnisch nachzuweisen, wobei je nach Standort und Stadtgröße Beträge von $0,5$ bis 2°C erreicht werden. Bei Episodenmessungen treten kurzfristige Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umwelt von mehr als 10°C auf. Solche Größenordnungen haben für die humanbiometeorologische Bewertung eine erhebliche Bedeutung, insbesondere dann, wenn es sich um wärmebelastende sommerliche Hochdruckwetterlagen handelt.

Der Windvektor wird in Städten auf unterschiedliche Art und Weise beeinflusst. Ein Windvektor setzt sich grundsätzlich aus den Komponenten Richtung und Geschwindigkeit zusammen. Beide Größen sind abhängig von den jeweils herrschenden horizontalen Luftdruckunterschieden. Solche Druckunterschiede können makroskalige, mesoskalige und mikroskalige Ursachen haben.

Unsere hemisphärenweite allgemeine Zirkulation hat ihre Ursachen in den großräumigen Luftdruckunterschieden. Hoch- und Tiefdruckgebiete der gemäßigten Klimazone sind verantwortlich für die Windverhältnisse in Mitteleuropa. Die Lage der wetterbestimmenden Druckgebilde und ihre Intensität bestimmen in der Regel Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Großräumige Hoch- und Tiefdruckgebiete ändern ihre Lage und Intensität relativ langsam, so daß die daraus resultierenden Strömungsverhältnisse keinen Tagesgang aufweisen. Die tagsüber und nachts unterschiedlichen thermischen Schichtungen innerhalb der bodennahen Luftschicht erlauben lediglich eine Variation der Windgeschwindigkeit. Tagsüber kommt es bei guter Durchmischung zu höheren Windgeschwindigkeiten, nachts flaut der Wind insbesondere bei thermisch stabiler Schichtung ab.

Bei schwachen überregionalen Luftdruckgegensätzen besteht die Möglichkeit, daß sich regionale und/oder sogar lokale Strömungssysteme entwickeln. Die bekanntesten Regionalwindssysteme sind die Land-See-Winde in den Küstenregionen sowie die Berg-Tal-Winde im Mittel- und Hochgebirge. In beiden Fällen trägt die unterschiedliche Erwärmung bzw. Abkühlung verschiedener Oberflächen dazu bei, daß sich Luftdichte- und somit auch Luftdruckanomalien ausbilden. Solche Windsysteme bilden sich auch zwischen Großstädten und ihrem Umland aus und werden hier Flurwindssysteme genannt. Mikroskalig bilden sich zwischen benachbarten Flächen Strömungen aus, die allein durch Temperaturunterschiede induziert werden. Solche Phänomene entwickeln sich allerdings nur,

wenn durch Strahlungswetterlagen und schwachen Gradientwind die Rahmenbedingungen geschaffen werden.

5. ERGEBNISSE DES FESTSTATIONSNETZES

5.1 Stationsnetz

Im Stadtgebiet von Bayreuth wurden im Zeitraum Anfang Juni bis Mitte September 2000 an insgesamt 8 Standorten kontinuierlich meteorologische Sondermessungen durchgeführt. Karte 1 gibt einen Überblick über das Untersuchungsprogramm. Sie enthält auch die 8 Stationsstandorte. An allen Standorten wurden die Parameter Lufttemperatur und Luftfeuchte gemessen. An 5 Stellen wurde zusätzlich der Windvektor, d.h. die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung erfaßt.

Die Stationen verteilten sich wie folgt auf das Stadtgebiet:

Station Hohe Warte: Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in ca. 1,5m über Grund; kleine, überwiegend durch Bäume und das benachbarte Schwesternwohnheim beschattete Wiesenfläche; parkartiger Standort im oberen südexponierten Hangbereich der Hohen Warte

Station Innenstadt: Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in ca. 1,5m über Grund; kleine baum- und strauchbestandene Grünanlage im ganztägig besonnten Innenhof der Regierung von Oberfranken innerhalb der Bayreuther Innenstadt

Station Roter Hügel: Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in ca. 1,5m über Grund; baumbestandene Wiesenfläche in unmittelbarer Nachbarschaft zum Altenwohnheim am Geschwister-Scholl-Platz; zeitweilig beschattete Plateaulage im Stadtteil Roter Hügel

Standort Gewerbegebiet St. Georgen: Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit sowie des Windvektors in ca. 4m über Grund; weitgehend versiegelter Standort (Parkplatz) in unmittelbarer Nähe des Kindergartens an der Weiherstraße; weitgehend unbeschattete Lage; Störung des Windfeldes durch das unmittelbar angrenzende, eingeschossige Kindergartengebäude; in weiterer Entfernung zahlreiche höhere Gebäude

Standort Roter Main: Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit sowie des Windvektors in ca. 4m über Grund; kleiner Platz inmitten einer Kleingartenanlage im Stadtteil Hammerstatt nahe des Roten Mains; keine nennenswerte Horizonteinschränkung, Beeinflussung des Windfeldes durch die Gehölze (Hecken, Obstbäume, Sträucher) der Kleingartenanlage

Standort Mistelbachtal: Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in ca. 1,5m sowie des Windvektors in ca. 4m über Grund; Wiesenfläche (Wassergewinnungsgelände) im Niederungsbereich zwischen St. Nikolausstr. und Scheffelstraße; sehr windgeschützt und kurzzeitig beschattet durch hohe, bachbegleitende Laubbäume

Standort Hohlmühle: Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in ca. 1,5m sowie des Windvektors in ca. 4m über Grund; landwirtschaftliche Nutzfläche im unteren, nach Osten exponierten Hangbereich des Tappertales zwischen Fürsetzer Straße und Hohlmühle; unmittelbare Umgebung frei von größeren Hindernissen, keine nennenswerte Horizonteinschränkung, Störung des Windfeldes durch hohe, bachbegleitende Laubbäume (Meßbeginn 05.07.2000)

Standort Kläranlage: Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in ca. 1,5m sowie des Windvektors in ca. 4m über Grund; weitgehend unversiegelter Standort (mit Rindenmulch abgedeckte, frischgepflanzte Staudenfläche) auf dem Gelände der Hauptkläranlage im Tal des Roten Mains unterhalb der Stadt; windoffener Standort, Beeinflussung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit sowohl durch die trockene Mulchfläche, aber auch durch die großen Klärbecken möglich.

5.2 Thermische Verhältnisse

Für den Gesamtzeitraum liegen aus dem Stadtgebiet die Meßergebnisse der 8 Feststationen als 10min Mittelwerte vor. Aus den Einzelwerten wurden in einem ersten Arbeitsschritt die Tagesmittelwerte sowie die täglichen Minima und Maxima der Lufttemperatur errechnet. Entsprechende Auswertungen liegen auch von den 4 Amtlichen Stationen der Umgebung vor, die vom Deutschen Wetterdienst betrieben werden. Die Angaben zur Stationslage beschränken sich auf die Höhenlage über NN. Da sich Amtliche Stationen in der Regel an für die Umgebung repräsentativen Standorten befinden, besteht die Möglichkeit der klimatischen Einordnung der Ergebnisse aus dem Sondermeßnetz in das Routinemeßnetz. Im einzelnen wurden die Stationen Bamberg (239m), Fichtelberg (659m), Hof (567m) und Würzburg (268m) verwendet.

5.2.1 Mittelwerte, Extremwerte und Schwellwerte

Die absolut höchsten Werte wurden mit jeweils knapp 36°C an den Stationen Roter Hügel und Bayreuth-Innenstadt gemessen. Im Gewerbegebiet St. Georgen kletterte die Lufttemperatur ebenfalls über 35°C. An den Wetterdienststationen lagen die Extremwerte in Bamberg bei 34,4°C und in Würzburg bei 33,9°C, während die Temperatur in Hof nur 31,5°C und an der Station Fichtelberg höhenbedingt nur 25,3°C erreichten. Mit jeweils knapp 32°C lagen die Maxima im Bayreuther Stadtgebiet an den beiden Freilandstationen Mistelbachtal und Hohlmühle relativ am niedrigsten. Neben dem absoluten Höchstwert wurde aus den täglichen Maxima auch ein Mittelwert errechnet. Für die Station St. Georgen wurden dabei 27°C errechnet. Für die Wetterdienststation Würzburg wurden 36,8°C ermittelt.

Neben den Mittelwerten werden in der Klimatologie bei den Maxima 2 Schwellwerte verwendet. Für Heiße Tage muß die Temperatur auf mindestens 30°C steigen, von Sommertagen spricht man bei Maximalwerten von mindestens 25°C. In der Bayreuther Innenstadt wurde an 15 Tagen der Schwellwert für Heiße Tage erreicht bzw. auch überschritten. 14 Heiße Tage wurden im Gewerbegebiet St. Georgen registriert und 12 Tage waren es im Stadtteil Roter Hügel. Jeweils 8 Heiße Tagen wurden an den Standorten Roter Main und Kläranlage ermittelt. Noch seltener stieg die Temperatur im Außenbereich auf 30°C. Im Mistelbachtal geschah dies an 4 Tagen, im Standort Hohlmühle waren es 3 Tage und an der Station Hohe Warte trat das Phänomen nur zweimal auf. In Bamberg registrierte der Deutsche Wetterdienst 8 Heiße Tage, in Würzburg 7 Tage. An der Station Hof-Hohensaas waren es 2 Tage und in Fichtelberg wurde kein Heißer Tag erreicht. Die große Überwärmung in der Bayreuther Innenstadt wird durch die Auswertung der Sommertage besonders deutlich. An 46 Tagen wurde die 25°C Marke zwischen Anfang Juni und Mitte September überschritten. Auch an der Station im Stadtteil Roter Hügel wurde mit 37 Sommertagen ein überdurchschnittlich hoher Wert erreicht. Zwischen 31 und 34 Sommertagen wurden an den Standorten St. Georgen, Kläranlage und Roter Main gemessen. Deutlich reduziert war die Häufigkeit von Sommertagen am Standort Hohe Warte mit nur 17 Tagen. Die Anzahl der Sommertage an den Wetterdienststationen schwankte zwischen 29 Fällen in Bamberg und Würzburg, 15 Tagen in Hof und nur 2 Tagen in Fichtelberg.

Da sich der Wärmeinseleffekt nicht auf tagsüber beschränkt, werden im folgenden auch die Minimumtemperaturen untersucht. Als stadtklimatisch im Hochsommer interessante Schwellwerte wurden 10°C und 15°C festgelegt. Sinkt die Temperatur während der Nacht nicht unter 15°C ab, kann es in Innenräumen zu humanbioklimatischen Belastungen kommen, insbesondere dann, wenn am Vortag bei großer Einstrahlung und hohen Luft-

temperatur ein Überangebot an fühlbarer Wärme entstanden ist. Bei Minima unterhalb von 10°C ist von einer ausreichenden nächtlichen Abkühlungsleistung auszugehen. Am häufigsten, nämlich in 14 Nächten wurde der Schwellwert von 15°C am Standort Roter Hügel überschritten. Immerhin 13 Nächte waren es am tagsüber selten wärmebelasteten Standort Hohe Warte. Erwartungsgemäß kühlen sich auch die tagsüber überdurchschnittlich warmen Standorte in der Nacht schlecht ab. 12 warme Nächte am Standort St. Georgen und 11 warme Nächte in der Bayreuther Innenstadt bestätigen dies. Sehr selten sind Minima oberhalb von 15°C in den Außenbereichen. Jeweils nur ein Fall wurde für die Freilandstandorte Hohlmühle und Mistelbachtal verzeichnet, 2 Nächte waren es am Standort Kläranlage und 3 Nächte am Standort Roter Main. Absoluter Spitzenreiter bei den warmen Nächten ist der Wetterdienststandort Würzburg mit 17 Nächten oberhalb von 15°C. In Bamberg waren es während des Untersuchungszeitraumes 9 Nächte, in Hof nur eine Nacht, in Fichtelberg jedoch immerhin 4 Nächte. Es wird deutlich, daß das nächtliche Minimum durch eine Vielzahl von Klimafaktoren beeinflusst wird. Die Station Hohe Warte sowie auch der Meßpunkt im Stadtteil Roter Hügel liegen in vielen Fällen oberhalb der nächtlichen Temperaturinversionsschicht, so daß die Abkühlungsleistung hier schlechter ist als im innerstädtischen Niederungsbereich. Dementsprechend sind die Häufigkeiten von relativ kalten Nächten mit Minima unterhalb von 10°C verteilt. Lediglich in 27 Nächten sank die Temperatur an den Standorten Hohe Warte und Roter Hügel unter diesen Schwellwert. An den Standorten Innenstadt und St. Georgen waren es jeweils 3 Nächte mehr. Mit Abstand die größte Häufigkeit von kalten Nächten wurde mit 48 Fällen am Standort Kläranlage registriert. Die Freilandstandorte oberhalb der Stadt wiesen deutlich niedrige Häufigkeiten auf. Am Standort Roter Main waren es insgesamt nur 38 Nächte mit Minima unterhalb von 10°C. Wie schon bei den warmen Nächten bestätigt sich die Überwärmung des Wetterdienststandortes Würzburg auch bei den kalten Nächten. Minima unterhalb von 10°C gab er nur 12 mal. Auch die 26 kalten Nächte am Standort Bamberg werden von allen Bayreuther Stationen übertroffen. Mit 68 kalten Nächten liegt der Mittelgebirgsstandort Fichtelberg mit Abstand auf dem ersten Platz.

5.2.2 Zeitlicher Verlauf

Neben den Mittelwerten und Häufigkeiten einzelner Kenngrößen ist der zeitliche Verlauf der thermischen Verhältnisse von großem Interesse. In der Regel entwickelt sich eine thermisch belastende Wetterlage während einer mehrtägigen hochsommerlichen Schönwetterperiode. Die Abbildungen 1a bis 1l zeigen die täglichen Minima und Maxima der Lufttemperatur sowie die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur. Abb. 1a bis 1d enthalten die Ergebnisse der Wetterdienststationen, in Abb. 1e bis 1l sind die Temperaturdaten aus dem Bayreuther Sondermeßnetz dargestellt. Wie schon aus der allgemeinen Beschreibung des Witterungsverlaufes zu entnehmen war, fehlten im Sommer 2000 trockenwarme, stabile Hochdruckwetterlagen. Im Juni und August entwickelten sich zwar hochsommerliche Temperaturen, wobei die Andauer von Tagen über jedoch 25°C gering blieb. Der Vergleich der beiden Wetterdienststationen Hof-Hohensaas und Würzburg verdeutlicht das thermisch unterschiedliche Niveau dieser beiden Standorte. Insbesondere während der zweiten Augustdekade zeigt sich in Würzburg das Innenstadtklima von seiner negativen Seite, da hier eine nächtliche Abkühlung kaum unter 15°C stattfindet. Die Wetterstation Bamberg hingegen fällt durch große Amplituden der Lufttemperatur auf. An den Temperaturen der Station Fichtelberg wird deutlich, daß von Bayreuth aus bioklimatisch günstige Regionen in kurzer Zeit erreichbar sind. Tagsüber lagen die Temperaturen hier mehrheitlich unter 20°C, was einer Temperaturreduktion im Vergleich zu Bayreuth von

fast 10°C entspricht. Die kleinen Temperaturamplituden am Standort Fichtelberg sprechen für eine weitgehend inversionsfreie Lage.

Im Stadtgebiet von Bayreuth werden die gemessenen Temperaturunterschiede einerseits durch natürliche Gegebenheiten hervorgerufen, andererseits aber auch durch vom Menschen geschaffene Strukturen beeinflusst. Die thermischen Verhältnisse am Standort Hohe Warte sind typisch für eine obere, teilweise bewaldete Hanglage. Daraus resultieren die mit Abstand geringsten Temperaturschwankungen zwischen tagsüber und nachts. Tagsüber dämpft die Transpiration der Pflanzen hier wesentlich den Temperaturanstieg. Darüber hinaus spielt sich ein Großteil der Energieumsätze im Kronenraum des Waldes ab, so daß nur verhältnismäßig wenig Energie zur Erwärmung der bodennahen Luftschicht zur Verfügung steht. Nur während der 2. Junidekade stieg die Temperatur hier an 2 Tagen über 30°C an. Die nächtliche Abkühlung ist an solchen Hangstandorten stark gedämpft. Waldgebiete in Kuppenlagen gehören in Strahlungsnächten stets zu den wärmsten Bereichen einer Region. Wie tagsüber spielen sich auch nachts die Energieumsätze vorzugsweise im Kronenraum ab. Die kleine Wiese am Meßstandort ist nicht in der Lage, in nennenswertem Umfang Kaltluft zu bilden. Zahlreiche Nächte blieben hier milder als in der dicht versiegelten Innenstadt.

Auch am Standort Roter Hügel sprechen die natürlichen Klimafaktoren für einen eher gedämpften Tagesgang der Lufttemperatur. Die leichte Kuppenlage sorgt tagsüber für eine gute Durchlüftung und wirkt somit einer stärkeren Erwärmung entgegen. Nachts sorgt der selten einschlafende Wind für eine gute Durchmischung der bodennahen Luftschicht, wodurch ein Inversionsaufbau, der für eine nächtliche Kaltluftbildung entscheidend ist, selten oder gar nicht stattfindet. Die verhältnismäßig dichte und gleichzeitig großräumige Blockbebauung erhöht das Temperaturniveau ganztägig. Daraus resultieren tagsüber erhöhte Maxima, insbesondere aber ein hohes Temperaturniveau während der nächtlichen Abkühlungsphase. Am 19. und 20. Juni wurde es hier tagsüber mit Werten über 35°C genauso tropisch heiß wie in der Innenstadt, nachts lagen die Minima bei dieser Wetterlage 3 Nächte in Folge oberhalb von 15°C, um den 20. August sank die Temperatur sogar 6 Nächte nacheinander nicht unter diesen Wert, so daß die bioklimatische Lastsituation hier am längsten andauerte.

Die durch die Mainniederung geprägte Reliefsituation am Standort Innenstadt stellt optimale Randbedingungen für einen ausgeprägten Tagesgang der Lufttemperatur dar. Tagsüber erwärmen sich Tal- und Niederungsbereiche am stärksten, nachts verfügen sie über die stärksten Abkühlungsraten. Die fast vollständige Versiegelung mit überwiegend mehrgeschossiger Bebauung weiter Teile der Innenstadt verändern das natürliche thermische Milieu erheblich. Tagsüber fehlt die Transpiration der Pflanzen als thermisches Regulationssystem fast völlig, auch offene Wasserflächen existieren kaum. Ein Teil des Energieüberschusses wird allerdings von den Bauvolumina absorbiert und gespeichert. Außerdem erzeugen Gebäude künstliche Schattenbereiche, die bei identischer Lufttemperatur bioklimatisch als angenehmer empfunden werden als besonnte Zonen. Die teilweise begrünte, teilweise asphaltierte Innenhoffläche, aber tagsüber voll besonnte Situation des Innenstadt-Meßstandortes führte an Strahlungstagen zu den höchsten Lufttemperaturen im Bayreuther Sondermeßnetz. Sie lagen in der Regel etwa 1°C über den Werten der Station am Roten Hügel. Trotz des hohen Versiegelungsgrades stellten sich in Strahlungsnächten hohe Abkühlungsleistungen ein. Dies führt zu nächtlichen Temperaturminima, die zwar erheblich über den Freilandstandorten im Niederungsbereich liegen, aber in der Regel unter das thermische Niveau der Station Roter Hügel absinken. Diese günstigen nächtlichen Temperaturverhältnisse werden durch unterschiedliche Phänomene begünstigt. Die relativ großflächige Innenhofsituation hat eine verhältnismäßig

kleine Horizontabschirmung zur Folge, wodurch die langwellige Ausstrahlung begünstigt wird. Andererseits sorgt der komplett abgeschlossene Innenhof für eine große Windruhe, wodurch der Aufbau einer stabilen Luftschicht begünstigt wird. Nicht zuletzt begünstigt der Grünbereich in der unmittelbaren Stationsumgebung mit seiner isolierend wirkenden Krautschicht die nächtliche Abkühlung. Weite Teile der Kernstadt dürften in den Nachtstunden über ein etwas höheres Temperaturniveau verfügen.

Ebenfalls im Niederungsbereich liegt der durch Industrie und Gewerbe geprägte Standort St. Georgen. Im Vergleich zum windgeschützten Innenstadtstandort kommt es an diesem sehr heterogen geprägten Standort tagsüber zu turbulentem Luftaustausch, der sich leicht temperatursenkend auf die Maxima auswirkt. Nachts entspricht das Temperaturniveau weitgehend den Werten der beiden übrigen hochversiegelten Standorte. Zumindest beim nächtlichen Minimum ist keine thermische Ausgleichswirkung durch Luftzufuhr aus kühleren Ausgleichsräumen erkennbar.

Die Freilandstandorte befanden sich ausschließlich in Niederungs- oder Talbereichen. Während die Station Kläranlage unterhalb der Kernstadt lag, lagen die Stationen Hohlmühle und Roter Main in Kaltluftleitbahnen, die vom Relief in Richtung Kernstadt orientiert sind. Die Station Mistelbachtal befand sich zwar auch innerhalb einer potentiellen Kaltluftleitbahn, allerdings ist dieser Standort bereits eingerahmt von lockeren bis mäßig verdichteten Bebauungsstrukturen. Im Vergleich zu den Standorten im bebauten Raum wiesen diese Stationen hinsichtlich der Extremwerte ein 2°C bis 3°C niedrigeres Temperaturniveau auf. Wider Erwarten wurden die nächtlichen Minima am Standort Kläranlage gar nicht oder nur in sehr geringem Maße durch die Abwärme aus der Innenstadt beeinflusst. Keine der vorhandenen Freilandstationen verfügte kontinuierlich über die niedrigsten Temperaturminima, eine unmittelbare Wetterlagenabhängigkeit konnte dabei nicht festgestellt werden.

Die Tagesgänge der Lufttemperatur werden anhand von 2 Beispielperioden detailliert erläutert (s. Kap.6).

5.3 Strömungsverhältnisse

Im engen Zusammenhang mit den thermischen Besonderheiten sind die Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverhältnisse im Bayreuther Stadtgebiet zu sehen. Der gemessene Windvektor ist das Ergebnis unterschiedlicher Strömungsphänomene. Sie setzen sich aus makroskaligen, mesoskaligen und mikroskaligen Einflüssen zusammen. Ist der großräumige Luftdruckgradient hoch, werden die kleineren, thermisch induzierten Windsysteme in den Hintergrund gedrängt. Es dominiert ganztäglich die allgemeine Zirkulation, die aus der Lage der Hoch- und Tiefdruckgebiete resultiert. In Niederungsbereichen treten dann tagsüber die höchsten Windgeschwindigkeiten auf, nachts reduziert sie sich etwas. Die Windrichtung unterliegt dann keinen oder geringen, reibungsbedingten Unterschieden. In Gebieten wechselnder Bodenrauigkeit, also auch in Siedlungsräumen, wird ein Teil der Windenergie der horizontalen Strömung entzogen und in Turbulenzen umgewandelt. Dadurch erhöht sich vor allem die Böigkeit des Windes. Bei geringen überregionalen Luftdruckgegensätzen wird der ansonsten makroskalig geprägte Windvektor durch kleinräumigere Phänomene bestimmt. Meso- und mikroskalige Strömungsverhältnisse haben ihre Ursache ausschließlich in thermischen Gegensätzen innerhalb der bodennahen Luftschicht. Ihre vertikale Mächtigkeit ist in der Regel auf Werte unter 100m beschränkt. Als natürliche Strömungsphänomene sind aufgrund der Reliefstruktur kleinräumige Hangwindssysteme zu erwarten, die ihrerseits die etwas größerskaligen Berg- und Talwinde induzieren. Tagsüber rufen die unterschiedlichen Energieflüsse in der Atmosphäre

hangaufwärts bzw. talaufwärts gerichtete Strömungen hervor. Nachts fließt die sich abkühlende Luft bergab, das heißt es bilden sich zunächst Hangwinde, die ihrerseits Talabwinde (=Bergwinde) hervorrufen.

Tagsüber ist es wegen des meist turbulenten Zustandes der bodennahen Atmosphäre schwierig, solche Windsysteme mit Hilfe von punktuellen Messungen zu erkennen. Nachts stabilisiert sich insbesondere in wolkenarmen Situationen die bodennahe Luftschicht schnell und im reliefierten Gelände setzen schon zur Zeit des Sonnenuntergangs die ersten kleinräumigen Zirkulationen ein. Bei ausreichender Reliefenergie funktionieren diese Strömungssysteme die ganze Nacht hindurch, ansonsten kommt es schnell zur Luftruhe, wobei in diesen Fällen Niederungsbereiche zu Kaltluftammelgebieten werden.

Als sicheres Indiz für solche Zirkulationen gelten tageszeitenabhängige Windrichtungsanomalien, die sich in Form von Windrosen grafisch darstellen lassen.

5.3.1 Ergebnisse für den Gesamtzeitraum

In einem ersten Arbeitsschritt wurden für die 5 Meßstandorte im Bayreuther Stadtgebiet die als 10min Mittelwerte vorliegenden Daten der Windrichtung nach Tageszeiten ausgewertet. Da im Laufe des Meßzeitraumes Sonnenunter- und Sonnenaufgangszeiten variierten, wurden für jeden Tag die astronomischen Termine bestimmt und in den Windrichtungsstatistiken berücksichtigt.

Die Windrichtungsverteilung wird in zwölfteiligen Windrosen dargestellt, wobei jeder Sektor ein 30° Spektrum der insgesamt 360° umfassenden Einteilung enthält. Der Windrichtungssektor Ost enthält somit beispielsweise Anströmungen zwischen 75° und 105° . Bei völliger Windruhe kann keine Richtung angegeben werden. Sie sind als Calmenzeiten zusätzlich zur Windrichtungsverteilung angegeben.

Für 3 Stationen (St. Georgen, Kläranlage, Roter Main) liegen die Daten aus dem Zeitraum 08. Juni bis 14. September vor, für 2 weitere Stationen (Hohlmühle, Mistelbach) nur für die Periode 05. Juli bis 14. September. Um die Aussagekraft des kürzeren Zeitraumes zu stärken, werden für die 3 verfügbaren Standorte beide Zeitkollektive ausgewertet und miteinander verglichen. In allen Windrosen wurde zur besseren Vergleichbarkeit eine einheitliche Skalierung verwendet. Im Fall der Gesamtbetrachtung reichte eine Skala bis 25% aus. Die Ergebnisse sind in Abb. 2a bis 2h grafisch dargestellt.

An allen Standorten spiegelt sich die jeweilige topografische Situation wieder. An der Station Kläranlage (Abb. 2a) wird eine leicht kanalisierte Anströmung aus Nordwesten beobachtet, die durch den Verlauf des Maintales hervorgerufen wird. Tagsüber haben die 3 Sektoren West, WNW (mit 20% relativer Häufigkeit Hauptwindrichtung) und NNW einen Anteil von fast 55% an der Gesamtstatistik. Der Häufigkeitsanteil von knapp 11% im Sektor WSW bestätigt, daß eine Anströmung aus westlichen bis nordwestlichen Richtungen während des Untersuchungszeitraumes dominant war. Dies wurde durch die großräumige Luftdruckverteilung hervorgerufen. Nahezu alle Großwetterlagen (vgl. Kap. 3) standen mit einer Westwindzirkulation in Verbindung. Alle anderen Windrichtungen blieben mit relativen Häufigkeiten unterhalb von 5% relativ bedeutungslos. Der Vergleich mit der nächtlichen Windrichtungsverteilung fällt vergleichsweise unspektakulär aus. Bei genauer Analyse der Einzelsektoren prägen sich aber in den Nachtstunden doch thermisch induzierte Strömungen aus. Einerseits wird ein Rückgang der relativen Häufigkeit der Einzelrichtungen WSW und West von tagsüber 26% auf nachts 9% registriert. Andererseits ereignen sich bei vielen anderen Windrichtungen Häufigkeitszunahmen. Der Sektor NNW wird mit 21% zur häufigsten Anströmrichtung. Dabei steigt der Häufigkeitsanteil aller Sektoren zwischen NNW über Nord bis OSO. Dies ereignet sich, vor dem Hintergrund,

daß die Calmenhäufigkeit von tagsüber unbedeutenden 0,3% nachts auf immerhin 5% zunimmt. Für diese Phänomene gibt es eine Reihe unterschiedlicher Erklärungen. Die Anströmrichtung NNW ist unmittelbar talaufwärts orientiert und kann somit als Flurwindphänomen interpretiert werden. In diesem Fall wäre die überwärmte Innenstadt verantwortlich für diese Besonderheit. Die Häufigkeitszunahmen in den Sektoren Nord bis ONO können als Hangabwinde aus dem Bereich Hohe Wart gedeutet werden. Der Sektor OSO, in dem die Häufigkeitsanteile von tagsüber 5% auf nachts 7% ansteigen, entspricht dem Talverlauf des Roten Mains flußaufwärts. Damit ist diese Strömung als Bergwind zu verstehen. Sie würde ohne eine vorhandene Stadtstruktur als nachts dominierende Zirkulationsform auftreten. Dieses insgesamt sehr komplexe Strömungsverhalten wird noch im Rahmen von Fallstudienauswertungen weiteruntersucht. Sämtliche im Langzeitraum registrierten Strömungsanomalien werden in nahezu identischer Form auch in der um 4 Wochen verkürzten Untersuchungsperiode beobachtet (Abb. 2b).

Völlig andere Windverhältnisse wurden am Standort Roter Main (Abb. 2c, d) oberhalb des Kernstadtgebietes gemessen. Hier ist die Talachse des Roten Mains von Nordosten nach Südwesten ausgerichtet. Daran orientiert sich das Windfeld massiv. Wie am Standort Kläranlage dominiert tagsüber aufgrund der überregionalen Druckverteilung eine westliche Anströmung. Als Folge der stadteinwärts rasch schmaler werdenden Luftschneise konzentriert sich die Luftzufuhr auf die Sektoren WSW (Hauptwindrichtung mit 27,5%) und West (zweihäufigster Sektor mit 20,5%). Alle anderen Sektoren verfügen über relative Häufigkeiten von unter 10%. Ein sekundäres Richtungsmaximum im Sektor Ost ist mit 8% nur sehr schwach ausgeprägt. In den Nachtstunden reduziert sich die westliche Anströmung erheblich; ihr Anteil sinkt allein für die Sektoren West und WSW von tagsüber 48% auf nachts 18%. Unter Berücksichtigung der angrenzenden Sektoren fällt die Bilanz mit -37% von tagsüber 62% auf nachts 25% noch eindrucksvoller aus. Eine entgegengesetzte Entwicklung spielt sich im Sektor zwischen Nord und Ost ab. Aus einer relativen Häufigkeit von tagsüber 18% werden in den Nachtstunden 57%. Dabei liegt die Anzahl der Calmen nachts bei niedrigen 4%. Diese sehr markante Windrichtungsveränderung resultiert allein daraus, daß in den Nachtstunden die thermisch induzierten Strömungen die Oberhand in der örtlichen Zirkulationsstruktur übernehmen. Dabei ist von einem Zusammenwirken von kleinräumigen Flurwinden, lokalen Kaltluftabflüssen und regionalem Bergwind auszugehen. Die größten Einzugsgebiete stellen ohne Frage die Niederungsbereiche des Roten Mains und der Warmen Steinach dar. Ob und in welchem Umfang ein Regionalwindssystem aus dem Fichtelgebirge an der nächtlichen Zirkulation an diesem Standort beteiligt ist, läßt sich ohne weitere Untersuchungen nicht klären. Wie schon beim Standort Kläranlage, sind die gemessenen Unterschiede zwischen den beiden Zeiträumen vernachlässigbar gering.

Die dritte Meßstation befand sich im Industrie- und Gewerbegebiet St. Georgen-West (Abb. 2e, f). Die relativ große, windoffene Parkplatzfläche bot für das mit großen Blöcken bebaute Gewerbegebiet optimale Meßbedingungen. Nur nach Nordosten trat eine markante Windverschattung ein. Auch diese Meßergebnisse bestätigen, daß während des Untersuchungszeitraumes tagsüber große Teile des Bayreuther Stadtgebietes von den überregional hervorgerufenen Westwinden überströmt wurden. Dabei ähnelt die Windrose tagsüber stärker den Verhältnissen an der Kläranlage als denen am Standort Roter Main. Aus den Sektoren WSW, West und WNW errechnet sich eine relative Häufigkeit von 64%. Nur schwach ausgeprägt ist mit 9% Anteil das sekundäre Richtungsmaximum im Sektor OSO. Die Nachtwindstatistik weist wie an den beiden anderen Standorten erhebliche Unterschiede im Vergleich zu tagsüber auf. Die Bedeutung der westlichen Komponente läßt auch hier nach und reduziert sich auf 48%. Gleichzeitig nimmt die relative Häufigkeit

östlicher Winde zu, und zwar für die Sektoren Ost, OSO und SSO von tagsüber 17% auf 23% nachts. Sehr markant ist auch die Häufigkeitszunahme im Sektor NNW; hier steigt die relative Häufigkeit von tagsüber 6,5% auf nächtliche 14% an. Alle nächtlichen Richtungszunahmen haben ihre Ursache in thermisch induzierten Strömungen. Einerseits strömen Hangabwinde aus dem Forst St. Georgen über nahezu unversiegelte Freiflächen (Schupfenschlag) aus NNW heran, andererseits erfolgt eine Luftzufuhr aus den Niederungsbereichen der Steinach und des Roten Mains aus östlichen bis südöstlichen Richtungen. Da diese Luftmassen auf ihrem Weg vom Kaltluftentstehungsgebiet bis zur Meßstation zahlreiche Hindernisse über- bzw. umströmt haben, müssen sie einen erheblichen Massenfluß besitzen. Auch hier kann daher wie am Standort Roter Main ein regionales Windsystem aus dem Fichtelgebirge (Steinachtalwind) nicht ausgeschlossen werden. Abschließend sei darauf hingewiesen, daß die beiden Zeiträume keine signifikanten Unterschiede in ihrer Windrichtungsverteilung aufweisen. Somit können die Meßergebnisse der beiden Stationen Mistelbach und Hohlmühle, die nur über die kürzeren Datenaufzeichnungen verfügen, unmittelbar mit den längeren und somit repräsentativen Meßreihen der Standorte Roter Main, Kläranlage und St. Georgen verglichen werden.

Auch an der Station Mistelbach (Abb. 2g) herrschten tagsüber westliche Winde vor. Die Sektoren zwischen NNW und WSW waren tagsüber mit fast 60% relativer Häufigkeit an der Windstatistik beteiligt. Auch hier gab es mit knapp 8% Anteil ein schwach ausgeprägtes Nebenmaximum mit Osten. Für die Nachtstunden ergaben sich keine auswertbaren Daten, da es in mehr als 60% der Fälle keine meßbaren Windgeschwindigkeitswerte gab. Bei den restlichen Daten verbleibt das Richtungsmaximum bei den westlichen Anströmrichtungen. Im Sektor WSW reduzierte sich die Häufigkeit im Vergleich zu tagsüber nur um 50% und somit am wenigsten. Allerdings darf daraus keinesfalls eine Bergwindströmung abgeleitet werden, da WSW schon tagsüber der Sektor mit höchsten mittleren Windgeschwindigkeit war.

Auch am Standort Hohlmühle im Tapperttal (Abb. 2h) stieg die Calmenhäufigkeit in den Nachtstunden auf knapp 20%, dennoch ist eine tageszeitenabhängige Windrichtungsverteilung hier gut erkennbar. Die Summe der Anströmhäufigkeit aus den 4 Sektoren WSW bis NNW beträgt tagsüber 58%, in den Nachtstunden reduziert sie sich auf 22%. Wegen des von SSO nach NNW verlaufenden Tapperttales tritt hier während der Nachtstunden keine Richtungsumkehr auf, sondern vielmehr bündelt sich das Strömungsfeld zu einer talabwärtsgerichteten Komponente. Die relative Häufigkeit der Sektoren Süd bis Ost beträgt nachts 41%, während tagsüber ihr Anteil bei 22% lag. Häufigster Einzelsektor in der Nacht ist SSO, das heißt neben den Einflüssen von Hangabwinden dominiert der nächtliche Bergwind.

5.3.2 Ergebnisse für antizyklonale und zyklonale Wetterlagen

Die im folgenden vorgenommene Aufteilung der Meßreihen in antizyklonal und zyklonal geprägte Wetterlagen verfolgt das Ziel, die bereits im Gesamtkollektiv festgestellten tageszeitlichen Windrichtungsveränderungen zu verifizieren. Grundlage für die Differenzierung ist der Katalog der Großwetterlagen Mitteleuropas. Zwar sind nicht alle dort als antizyklonal ausgewiesenen Wetterlagen zwingend Schönwetterperioden, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit auf windarmes und strahlungsreiches Wetter deutlich erhöht. Bei zyklonal beeinflussten Wetterlagen ist vor allem der Luftdruckgradient über Mitteleuropa erhöht, so daß hierbei stets die überregionale Zirkulation einen größeren Einfluß auf das örtliche Windfeld hat.

Die Ergebnisse für die antizyklonalen Wetterlagen sind in Abb. 3a bis 3h dargestellt. In der Regel haben sich die Unterschiede zwischen Tag und Nacht noch verstärkt. Am Standort Kläranlage konzentriert sich die nächtliche Anströmung noch mehr als beim Gesamtzeitraum auf den Sektor NNW. Dieser ist nachts mit mehr als 26% relativer Häufigkeit Hauptwindrichtung. Hierbei ergänzen sich die Antriebskräfte von Flurwinden und Hangabwinden. Nicht erkennbar ist bei den antizyklonalen Wetterlagen eine nächtliche Zunahme von maintalabwärts gerichteten Strömungen. Östliche Anströmungen, wie sie im Osten der Stadt beobachtet werden, kommen hier nicht an. Weiterhin gut ausgeprägt sind hingegen die Hangabwinde aus dem Bereich Hohe Wart.

Am Standort Roter Main bringt die Betrachtung der antizyklonalen Wetterlagen eine weitere Verschärfung der Strömungsgegensätze zwischen Tag und Nacht. Zwar nimmt der Anteil der östlichen Anströmung tagsüber hier wetterlagenbedingt einen etwas größeren Anteil ein als im Gesamtzeitraum, aber das eigentliche tageszeitliche Strömungsphänomen spielt sich in den Sektoren Nord bis Ost ab. Liegt ihr Anteil tagsüber bei 24% schnellert er nachts aber auf fast unvorstellbare 68% hinauf. 3000m weiter westlich, d.h. maintalabwärts, ist von dieser Anströmung nichts mehr zu erkennen. Dies gilt zumindest für die Meßhöhe 4m ü. Grund am Standort Kläranlage. Es stellt sich die Frage, was mit diesen Luftmassen über dem Kernstadtgebiet passiert. Nächtliche Anströmungen zwischen Nord und Ost fehlen auch an der Station im Industriegebiet St. Georgen-West völlig. Hier konzentriert sich die nächtliche Anströmung erneut auf die Sektoren WNW (Hauptwindrichtung mit 28%) und NNW. Für diesen Sektor verdoppelt sich die relative Häufigkeit von tagsüber 9% auf nachts 18%. Hierfür sind allein Hangabwinde aus den unbewaldeten Freiflächen unterhalb des Forstes Sankt Georgen verantwortlich. Tagsüber und nachts sorgen überregionale Strömungen wie am Standort Roter Main für eine zeitweilige östliche bis südöstliche Luftzufuhr. Am Standort Hohlmühle deutet die hohe nächtliche Anzahl von Calmen darauf hin, daß bei antizyklonalen Wetterlagen das überregionale Windfeld schwächer ausgeprägt ist. Trotz der 28% Calmen bleibt es wie bei der Gesamtstatistik, die nur knapp 19% Calmen aufwies, in 40% aller Nachtstunden bei Anströmungen aus Ost bis Süd. Das heißt, die thermisch induzierten Hangab- und Bergwinde entwickeln sich trotz des erhöhten Calmenhäufigkeit mit großer Beständigkeit. Am Standort Mistelbachtal schläft der Wind bei den antizyklonalen Wetterlagen nachts in mehr als 78% aller Fälle ein, tagsüber bleibt die Durchlüftungssachse WNW-OSO erhalten.

Abschließend werden die Windrosen für die zyklonal geprägten Wetterlagen präsentiert. Sie sind in den Sommermonaten in der Regel durch südwestliche, westliche oder nordwestliche Anströmungen geprägt. Verantwortlich ist meist hoher Luftdruck über den Azoren und tiefer Luftdruck über Island. Da die Frontalzone im Sommerhalbjahr weiter nördlich als während der Wintermonate verläuft und die Luftdruckgegensätze zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten schwächer sind als im Winter, bedeuten solche Wetterlagen im Südosten Deutschlands nicht unbedingt Sturm und Regen. Vielmehr ist es häufig schwülwarm mit Schauern und Gewittern. Insgesamt sind die Voraussetzungen für die Entstehung von thermischen Windsystemen erheblich schlechter als bei antizyklonal eingestufteten Wetterlagen. Die Ergebnisse für das Bayreuther Windfeld sind in Abb. 4a bis 4h grafisch dargestellt. Um für alle Stationen einen gleichen Maßstab verwenden zu können, mußte die Spannweite der relativen Häufigkeit auf 35% erhöht werden. Damit sind die Windrosen optisch nicht mit den Abbildungen vom Gesamtzeitraum und von den antizyklonalen Wetterlagen vergleichbar.

Am Standort Kläranlage sind tagsüber erneut die westlichen Anströmungen dominant. Nachts findet im Gegensatz zu den antizyklonalen Situationen im Sektor NNW keine Zunahme der Häufigkeit statt. Vielmehr gibt es hier jetzt nachts Zunahmen um jeweils

etwa 5% in den Sektoren zwischen Nord und SSO. Dies ist auf die geringere Überwärmung der Stadt gegenüber dem Umland zurückzuführen. Flurwinde reagieren auf überregionale Störungen sehr viel empfindlicher als das großskalige Phänomen Bergwind. Somit haben es diese bei zyklonalen Wetterlagen leichter, sich von Osten her über die Kernstadt hinweg durchzusetzen.

Am Standort Roter Main ist die Kanalisierung der Strömung bei zyklonalen Wetterlagen am stärksten ausgeprägt. Die Einzelwindrichtung WSW ist tagsüber allein mit fast 40% relativer Häufigkeit an der Windstatistik beteiligt. Die Summe der 4 Richtungen SSW bis WNW beträgt fast 75%. Dem stehen nur 10% Anteile aus den Richtungen Nord bis Ost entgegen. Nachts bleibt zwar die WSW-Komponente mit 20% mit Abstand häufigste Windrichtung, insgesamt sinkt aber die Häufigkeit der 4 Sektoren zwischen SSW und WNW auf 40% ab. Gleichgewichtig mit ebenfalls 40% sind nachts die Sektoren Nord bis Ost an der Windstatistik der zyklonalen Wetterlagen beteiligt. Das bedeutet, thermisch bedingte Windsysteme existieren hier auch bei ungünstigeren meteorologischen Randbedingungen, allerdings wesentlich seltener als bei antizyklonalen Wetterlagen, bei denen sie in fast dreiviertel aller Nachtstunden auftraten. Die Frage bleibt offen, ob die nächtlichen Winde eine Kombination von Flurwinden sowie von lokalen und regionalen Kaltluftabflüssen ist.

Anhand der Windrosen der Meßstation im Industriegebiet St. Georgen-West bestätigt sich, daß zyklonale Wetterlagen in erster Linie die Entstehung nächtlicher Hangabwinde behindern. Auch hier nahm nachts die Häufigkeit von östlichen bis südöstlichen Anströmungen deutlicher zu als bei den anderen Wetterbedingungen. Konkret bedeutet dies einen Rückgang der westlichen Anströmung um 11% von tagsüber 67% auf nächtliche 56%, wovon die entgegengesetzte Komponente in vollem Umfang profitierte. Ihre relative Häufigkeit steigt von 11% tagsüber auf 21% nachts.

Ziemlich ungestört entwickelte sich auch bei diesen Wetterlagen das Bergwindssystem im Tapperttal. Mit 62% relativer Häufigkeit war die Anströmung aus den Sektoren zwischen WSW und NNW häufiger als bei den anderen Randbedingungen, nachts sank ihr Anteil auf 30% ab. Gleichzeitig stieg die relative Häufigkeit der Windrichtungen zwischen Ost und Süd von tagsüber 19% auf nachts 41% an. Da gleichzeitig die nächtliche Calmenhäufigkeit unter 10% lag konnten die nächtlichen Bergwinde dieselbe relative Häufigkeit erzielen wie bei antizyklonalen Wetterlagen.

Wie bei allen anderen Stationen erreichte tagsüber der Anteil westlicher Anströmungen am Standort Mistelbach bei zyklonalem Wetter seine größte Häufigkeit. Die 4 Sektoren zwischen WSW und NNW brachten es insgesamt auf 67%. Nachts blieb diese Anströmrichtung dominant, wenn auch erneut 44% aller Werte als Calmen definiert waren.

5.3.3 Spezialauswertungen

Desweiteren wurden die Windrichtungsverteilungen für die Nachtstunden unter dem Kriterium Windstille an der Station Mistelbachtal untersucht. Somit wurden ausschließlich Zeiträume erfaßt, in denen es im Untersuchungsraum äußerst windschwach war. Die Auswertung erfolgte einerseits für den Gesamtzeitraum (nächtliche Windstillen 62,4%), andererseits wurden die Situationen bei antizyklonalen Hochdruckwetterlagen (nächtliche Windstillen (78,1%) selektiert. In Abb. 5a sind die Ergebnisse für die verbleibenden 4 Meßstationen eingetragen. Wie die Windrosen zeigen, dominieren stadteinwärtsgerichtete Strömungen. In 40% aller Fälle weht der Wind am Standort Kläranlage aus den Sektoren WNW und NNW. Das Windfeld am Standort St. Georgen konzentriert sich in fast 55% aller Fälle auf die Richtungen West, WNW und NNW. Gleichzeitig kommt der Wind am

Standort Roter Main vorzugsweise aus Richtungen zwischen Nord und Ost. Häufigste Einzelwindrichtungen sind hier NNO (23%) und ONO (24%). Obwohl die Calmen an der Station Hohlmühle mit 27% sehr häufig sind, ist auch die stadteinwärtsgerichtete Strömungskomponente gut erkennbar. Das Tappertal kanalisiert den Wind auf die Sektoren Süd und SSO. In Abb. 5b sind die Windrosen für den entgegengesetzten Fall dargestellt, das heißt für die Situationen, in denen im Mistelbachtal meßbarer Wind vorhanden war. Besonders deutlich fällt die Veränderung am Standort Roter Main aus. Wurden hier in den windschwachen Nächten fast ausschließlich Anströmungen zwischen Nord und Ost registriert, sind in den austauschreicheren Situationen mehrheitlich westliche bis südwestliche Richtungen dominant.

Die Ergebnisse für die antizyklonalen Großwetterlagen bestätigt dieses Strömungsverhalten. Immerhin gilt die Windrichtungsverteilung in Abb. 5c für über 78% aller Nachtstunden. Allerdings nehmen die Windstillen am Standort Hohlmühle hierbei einen Anteil von fast einem Drittel der Gesamtwerte ein. Die lokalen Belüftungskorridore sind trotzdem gut erkennbar. Für die Situationen von meßbaren Windgeschwindigkeiten ist das Strömungsbild nicht so einheitlich wie im Gesamtzeitraum (Abb. 5d). Am Standort Roter Main gibt es nahezu ein Gleichgewicht zwischen stadteinwärts gerichteten und entgegengesetzt orientierten Strömungen.

Exemplarisch für das Stationsnetz wurden die tageszeitliche Entwicklung des Strömungsfeldes an der Station Kläranlage untersucht. Abb. 6a zeigt für diesen Standort die jeweilige Windrichtungsverteilung in 7 Stundenschritten ab Sonnenuntergang. Begonnen wird mit dem Kollektiv 0,5 Stunden vor Sonnenuntergang bis 0,5 Stunden nach Sonnenuntergang. Zu diesem Termin ist die talaufwärts gerichtete Komponente, d.h. die Anströmung aus den Sektoren WNW und NNW am besten entwickelt. Innerhalb einer Stunde verliert dieses Phänomen erheblich an Bedeutung. Der Anteil der Sektoren WNW und NNW verringert sich innerhalb einer Stunde von knapp 60% auf unter 40%. Wiederum eine Stunde später liegt ihr Anteil erneut über 50%. Im Laufe der Nacht bleiben diese Fluktuationen erhalten. Gegenläufig verhält sich die Anströmung aus dem Kernstadtgebiet heraus. Ihr Anteil gewinnt allerdings im Laufe der Nacht allmählich an Bedeutung. Die Auswertung zeigt eindeutig, daß mehrere Phänomene an der Entstehung des nächtlichen Strömungsfeldes beteiligt sind. Sowohl ein durch die Überwärmung der Kernstadt ausgelöster nächtlicher Flurwind als auch ein nächtlicher Bergwind entlang des Maintales lassen sich erkennen. Somit kommt diesem Talraum eine sehr hohe Bedeutung für die Be- und Entlüftung der Kernstadt zu.

Das Zusammenwirken der unterschiedlichen Kräfte bei der Entstehung des örtlichen Windfeldes wird auch in Abb. 6b deutlich, in der die Strömungsverhältnisse am Standort Kläranlage für die Zeiten zwischen 3,5 Std. bis 11,5 Std nach Sonnenaufgang in stündlicher Abfolge dargestellt sind.

Diese Spezialauswertungen lassen sich für alle Windmeßstationen durchführen, wodurch allerdings der Rahmen dieser gesamtstädtischen Klimaanalyse gesprengt würde.

6. AUSWERTUNG VON EINZELEPISODEN

Neben der Auswertung und Interpretation eines längeren Datenkollektivs sind in der angewandten Stadtmeteorologie die kleinklimatischen Situationen bei Extremwetterlagen von besonderem Interesse. Der Meßzeitraum von 3 Monaten bietet allerdings ausschließlich sommerliche Episoden an.

6.1 Zeitraum 17.06. - 21.06.2000

Im Sommer 2000 stellte sich bereits im Juni eine mehrtägige Schönwetterperiode ein. Vom 17. bis 21. Juni gab es an 5 Tagen in Folge strahlungsreiches Hochsommerwetter. Bei nahezu wolkenlosem Himmel konnte die Sonne täglich die astronomisch mögliche Zeit von ca. 16 Stunden scheinen. Entsprechend kurz ist die nächtliche Abkühlungszeit. In Abb. 7a ist der Tagesgang der Lufttemperatur für die 6 verfügbaren Meßstationen auf der Basis der 10min Mittelwerte dargestellt. Aus der ebenfalls gemessenen relativen Luftfeuchte läßt sich zusammen mit der Lufttemperatur der Dampfdruck der Luft ermitteln. Im Gegensatz zur relativen Luftfeuchte ist der Dampfdruck ein absolutes Feuchtemaß, das den tatsächlichen Wasserdampfgehalt der Luft angibt. Sein Verlauf ist in Abb. 7b eingetragen.

Am 16. Juni war es tagsüber noch stärker wolkig und in der eingeflossenen maritimen Polarluft arktischen Ursprungs lagen die Temperaturmaxima unter 20°C. In den Abendstunden ging die Bewölkung zurück und es konnte sich eine erste Strahlungsnacht entwickeln. Aufgrund der wenig sonnenscheinreichen Witterung tagsüber waren die Temperaturunterschiede zwischen bebauten Bereichen und Freiland relativ gering. Nach Mitternacht wurde im Außenbereich die Temperatur von 5°C unterschritten, während die Temperatur an den städtisch beeinflussten Standorten noch bei 8°C lag. Die Entwicklung der nächtlichen Temperaturinversion wird anhand des thermischen Verhaltens am Standort Hohe Warte deutlich. Hier liegt die Temperatur am Ende der Nacht am höchsten.

Die Verläufe der Dampfdruckkurven geben einen Einblick in die nächtlichen Energievorgänge. An den beiden Freilandstandorten im Maintal steigt der Feuchtegehalt bis gegen Mitternacht an. Dies geschieht in erster Linie durch die Stabilisierung der Luftschichtung, aber auch durch die Advektion von wasserdampfreicher, aber kühler Luft aus den angrenzenden Kaltluftentstehungsgebieten. Nach Mitternacht setzt hier dann Taubildung ein, nachdem die relative Feuchte auf 100% angestiegen war. Die dabei freiwerdende Kondensationswärme bremst den ausstrahlungsbedingten Temperaturrückgang in der zweiten Nachthälfte. An den übrigen Standorten bleibt während der gesamten Nacht eine geringe Wasserdampfzunahme erhalten. Mit Sonnenaufgang bekommt die Strahlungsbilanz wieder ein positives Vorzeichen. In erster Linie hat dies eine Erwärmung der bodennahen Luftschicht zur Folge. An den Stationen Kläranlage und Roter Main verdunstet zunächst der nachts gebildete Tau. Dies reichert die noch stabil geschichtete Luft kurzfristig mit Wasserdampf an, so daß hier der Dampfdruck kräftig ansteigt. Im weiteren Tagesverlauf wird diese feuchte Luft schnell vertikal und horizontal vermischt. Die Erwärmungsphase verläuft ohne stärkere Standortunterschiede. Mit Sonnenhöchststand ist die Zeit der stärksten Erwärmung zuende. Je nach Exposition und Schattenwurf werden die Temperaturmaxima im Laufe des Nachmittags erreicht. Die längste Zeit auf hohem Niveau bleibt die Temperatur an den Standorten Innenstadt und Gewerbegebiet St. Georgen. Am Standort Roter Hügel liegt der Meßstandort am Nachmittag zunehmend im Gebäudeschatten. Die Hanglage oberhalb der Stadt in Verbindung mit Abschattung lassen die Temperaturen am Standort Hohe Warte mit Abstand am wenigsten ansteigen. Das Maximum lag hier deutlich unter,

an den anderen Standorten deutlich über 20°C. Beim Dampfdruck kommt dem Standort Kläranlage eine Sonderrolle zu. Die großflächig vorgenommene Bodenmulchung verhindert eine Verdunstung fast völlig, so daß der Wasserdampfgehalt hier tagsüber deutlich absinkt.

Die Abkühlungsphase vom Temperaturmaximum bis zum Sonnenuntergang verläuft mit Ausnahme der Hangstation Hohe Warte nahezu synchron. Gegen 22 Uhr liegen die Temperaturen dicht zusammen, danach bauen sich schnell die standortbedingten thermischen Unterschiede auf. Wie in der Vornacht kühlte es sich an den Standorten Kläranlage und Roter Main nochmals unter 5°C ab. Von den Stadtstandorten verfügte die Station Innenstadt über das beste Abkühlungsverhalten, am wärmsten blieb die Nacht am Standort Hohe Warte. Im Außenbereich steigt mit der Inversionsbildung, die einen Vertikalaustausch völlig unterbindet, der Wasserdampfgehalt abends schnell an, später geht er in Folge der Taubildung allmählich wieder zurück. An den Stadtstationen setzt die Inversionsbildung und die damit verbundene Feuchtezunahme verspätet ein. Folglich kommt es hier auch erst später zur Wasserdampfkondensation.

In den Folgetagen und -nächten steigt das Temperaturniveau wegen des hohen Strahlungsangebotes rasch weiter an. Am 19. Juni wird mit Ausnahme des Standortes Hohe Warte schon ein Heißer Tag registiert, am 20. und 21. Juni liegen die Maxima dann auch hier über 30°C. Gleichzeitig treten an den Stationen Innenstadt, Gewerbegebiet St. Georgen und Roter Hügel Höchsttemperaturen über 35°C auf. Gleichzeitig werden die Nächte deutlich milder. An den 3 Stadtstationen sinkt die Temperatur in den Nächten zum 21. und 22. Juni nicht mehr unter 15°C. Stets am kältesten wurde es nachts am Standort Kläranlage.

Beim Dampfdruck spielen sich an diesen Tagen unterschiedliche Phänomene ab. Großräumig kam es ab dem 19. Juni advektiv zu einer kräftigen Feuchtezunahme, das heißt, die Schwüle nahm zu. Am Nachmittag des 21. Juni wurden verbreitet Dampfdruckwerte von knapp 20hPa gemessen. Bei einer Lufttemperatur von 35°C bedeutet dies ein Äquivalentzuschlag von 30 Kelvin, woraus sich eine Äquivalenttemperatur von 65°C errechnet. Oberhalb einer Äquivalenttemperatur von 49°C fühlt sich die Mehrheit der Mitteleuropäer thermisch belastet. Ein Überschreiten dieses Schwellwertes um mehr als 15 Kelvin bedeutet, daß es zu dieser Zeit nahezu unerträglich heiß und schwül war.

Abweichend von den übrigen Stationen sind die Tagesgänge des Dampfdruckes am Standort Kläranlage. Die fast völlig unterbundene Verdunstung führt an diesem Standort tagsüber zu einer besonders heftigen konvektiven Strömung, die die Luft stark austrocknet. Abends bricht dieses System schnell zusammen und die Stabilisierung der Luftschichten führt hier sowie am Standort Roter Main zur raschen Feuchtigkeitszunahme innerhalb der Bodeninversion.

Einen Überblick über die Intensität der thermischen Unterschiede im Bayreuther Stadtgebiet gibt Abb. 7c. Hier sind die jeweils höchsten und niedrigsten Temperaturwerte als Spannweitendiagramm dargestellt. Die größten Standortunterschiede werden jeweils am frühen Nachmittag sowie zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang registriert. Die Differenzbeträge überschreiten teilweise 5K. Tagsüber stammen die Höchstwerte meist von der Station Innenstadt, während zu dieser Zeit die niedrigsten Werte am Standort Hohe Warte gemessen wurden. Nachts gehören die tiefsten Werte zum Freilandstandort Kläranlage, am wärmsten blieb es am Standort Hohe Warte. Da die Feststationen nicht an den thermisch extremsten Standorten im Bayreuther Stadtgebiet

installiert waren, dürften die tatsächlichen Temperaturunterschiede noch über den gemessenen Werten liegen.

An allen Standorten stehen die thermischen-hygrischen Vorgänge in unmittelbarem Zusammenhang mit dem jeweiligen örtlichen Windfeld. Andererseits rufen Temperaturgegensätze ihrerseits lokale Strömungen aus. Die Tagesgänge von Windrichtung und -geschwindigkeit wurde stationsweise graphisch aufbereitet. Während die 10min-Mittelwerte der Windrichtung jeweils als "blaue Punktwolke" dargestellt wurden, wird der Verlauf der Windgeschwindigkeit in Form von Liniengraphiken präsentiert. Während die Windrichtung in Grad angegeben wird (linke Skala: 90°= Ost, 180°=Süd, 270°=West, 360°=Nord, 0°=Windstille), erfolgt die Klassifizierung der Windgeschwindigkeit in m/s (rechte Skala) (Abb. 8a-c). Die einzelnen Tagesgänge bestätigen die Ergebnisse der Windrichtungsauswertungen für den Gesamtzeitraum. Die markanten Tagesgänge der Windrichtung haben ihre Ursache nicht in großräumigen Luftdruckgegensätzen, sondern beruhen vielmehr auf kleinräumigen, thermisch induzierten Phänomenen. Windrichtungsänderungen korrespondieren mit besonders niedrigen Windgeschwindigkeiten. Diese treten regelmäßig fast zeitgleich mit den Terminen von Sonnenuntergang und Sonnenaufgang auf. Am Standort Kläranlage (Abb. 8a) werden für den ausgewählten Zeitraum mehrheitlich Windrichtungen zwischen Südwest und Nordwest registriert. Insbesondere während der Abendstunden und am frühen Vormittag dreht der Wind kurzfristig auf die entgegengesetzten Richtungen. Völlige Windstille herrschte während der Nacht vom 19. zum 20. Juni. Ansonsten konzentrieren sich die Punktwellen der Windrichtung während der Nachtstunden meist auf nordwestliche Richtungen.

Ein völlig anderes Windrichtungsverhalten wurde am Standort Roter Main registriert. Vom späten Vormittag bis zum Sonnenuntergang wehte der Wind vorzugsweise aus West bis Südwest. Mit Sonnenuntergang kommt es zu einer spontanen Richtungsänderung auf Nordost. Meist liegen die Geschwindigkeitswerte nachts zwischen 0,5m/s und 1m/s. Die gleichzeitig stattfindende intensive Abkühlung bestätigt, daß es sich hierbei ausschließlich um bodennahe Kaltluftabflüsse handelt. In der Nacht vom 20. zum 21. Juni frischte der Wind nach Mitternacht überregional beeinflußt etwas auf, wodurch sofort die nächtliche Abkühlung gebremst wurde. Die Station Kläranlage lag windgeschützt, so daß sich hier die Abkühlung ungestört bis zum Morgen fortsetzen konnte.

Das Windfeld am Standort St. Georgen scheint durch unterschiedliche Phänomene beeinflußt zu werden. Während in der ersten Nachthälfte lokale Kaltluftabflüsse mit nordwestlicher Anströmung dominieren, setzen sich ab Mitternacht bis zum frühen Vormittag östliche Winde durch. Ihr abruptes Ende gegen 10 Uhr spricht ebenfalls für ein thermisch induziertes Windsystem, dessen Ursache in einem Bergwindsystem aus dem Steinachtal vermutet wird. Der verzögerte Einsatz erst gegen Mitternacht (vorher setzen sich die kleinräumigeren Hangabwinde durch) und die über den Sonnenaufgang hinaus andauernde Luftströmung sprechen sehr für diese These, die selbstverständlich durch weitere Messungen untermauert werden müßte.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß bei dieser Wetterlage sich alle kleinklimatischen Besonderheiten optimal entwickelt haben.

6.2 Zeitraum 19.08 bis 25.08.2000

Im klassischen Hochsommermonat August kam es nicht zu einer mehrtägigen störungsfreien Schönwetterperiode. Wie bereits im Rahmen der Witterungsbeschreibung gezeigt wurde, wurde das Wetter zwar durch warme bis sehr warme Luftmassen geprägt,

die aber aufgrund ihrer maritimen Herkunft (Mittelmeer bzw. Atlantik) wasserdampfreich waren. Diese führte verstärkt zu Schauern und Gewittern.

In der 2. Augushälfte stellte sich eine mehrtägige, allerdings nicht störungsfreie hochsommerliche Witterungsperiode ein, die dazu genutzt wurde, das geplante Intensivmeßprogramm in Form von Temperaturmeßfahrten und Rauchpatronenversuchen durchzuführen. Da die Meßfahrten in der Nacht vom 19. zum 20. August durchgeführt wurden, die Rauchgasversuche wetterbedingt auf die Abendstunden des 24. gelegt wurden, werden die Tagesgänge von Lufttemperatur und Dampfdruck (Abb. 9a-e) sowie des Windvektors (Abb. 10a-e) für den Zeitraum 19. bis 25. August als zweite Einzelepisode betrachtet.

Die Tagesgänge von Temperatur und Luftfeuchte verdeutlichen, daß es während der 7 Tage zu einem markanten Luftmassenwechsel kam. Während sich Süddeutschland am 19. und 20. August noch im Einflußbereich tropisch heißer und schwüler Luftmassen befand, überquerte in der Nacht vom 21. zum 22. August von Norden her eine schwach ausgeprägte Kaltfront das Untersuchungsgebiet. Auf ihrer Rückseite strömte weniger warme und vor allem auch trockenere Luft ein. Da für diese Einzelepisode für die Parameter Lufttemperatur und Luftfeuchte die Ergebnisse aller acht Meßstationen zur Verfügung stehen, wurden die Ergebnisse aus Gründen der Übersichtlichkeit in jeweils 2 Graphiken dargestellt. Abb. 9a enthält die Meßwerte der Stationen Innenstadt, Roter Hügel, St. Georgen und Hohe Warte, in Abb. 9b sind die Daten der Stationen Kläranlage, Roter Main sowie Mistelbachtal und Hohlmühle enthalten.

Die Ergebnisse für die Lufttemperatur ähneln sehr den Resultaten aus der Juniepisode. Tagsüber am wärmsten wurde es an den städtisch geprägten Standorten, wobei die Maxima im Gewerbegebiet St. Georgen meist etwas unter den Beträgen der Stationen Innenstadt und Roter Hügel lagen. Am Standort Hohe Warte gab es wie erwartet erneut die niedrigsten Maxima. Hinsichtlich der Maxima sind die standortbedingten Unterschiede bei den Freilandstationen gering. Bei den Temperaturminima erweist sich unter den 3 städtischen Stationen der Standort Innenstadt als bioklimatisch günstigster. Am mildesten bleiben die Nächte an der Hangstation Hohe Warte, wobei der nächtliche Temperaturüberschuß hier geringer ausfällt als bei der Juniepisode. Vermutlich bildete sich die nächtliche Temperaturinversion insbesondere nach dem Kaltfrontdurchgang nicht so stark aus wie bei der Juniwetterlage. Die große Schwüle zu Beginn der zweiten Episode verhinderte eine stärkere Abkühlung an den Freilandstandorten. Die Temperatur ging zwar bis Sonnenuntergang schnell auf Werte unter 20°C zurück, dann reduzierte sich die Abkühlungsleistung drastisch. Grund dafür war der hohe Wasserdampfgehalt.

Wie die Tagesgänge des Dampfdruckes in der Nacht vom 19. zum 20. zeigten, setzte die Taubildung quasi mit Sonnenuntergang ein (Abb. 9c,d). Verbreitet reduzierte sich der Wasserdampfgehalt an den Freilandstationen während dieser Nacht um bis 5hPa. An den städtischen Standorten läßt sich dieses Verhalten erst nach Mitternacht und nur in stark abgeschwächter Form beobachten.

Eine Zusammenfassung der thermischen Verhältnisse enthält Abb. 9e. Das Spannweitendiagramm macht deutlich, daß die thermischen Unterschiede im Untersuchungsraum etwas geringer waren als während der Juniepisode. Dies gilt insbesondere für die nächtliche Abkühlungsphase. In allen Nächten kam es im Außenbereich zu erheblichen Taubildungen. Dies wird am markanten Rückgang der Dampfdruckwerte zu dieser Zeit deutlich. Mit diesem Prozeß verbunden ist die Freisetzung erheblicher Mengen von Kondensationswärme, die die weitere Abkühlung der Luft stark bremst. An der Station Mistelbachtal fällt dieser Vorgang vergleichsweise am schwächsten aus. Dafür ist die Bebauung in der Umgebung des Grünzuges

verantwortlich. An den komplett städtisch geprägten Stationen ist dieses Phänomen nur ansatzweise zu erkennen. Kein nächtlicher Rückgang des Dampfdruckes wird allein am Standort Hohe Warte registriert. Bei solchen Wetterlagen ist die thermische Ausgleichsleistung der kaltluftproduzierenden Freiflächen für die thermische belastete Innenstadt geringer als bei einer wasserärmeren Atmosphäre.

Detaillierter werden die Temperaturverhältnisse der 8 Feststationen im Zusammenhang mit den Temperaturmeßfahrten diskutiert. Im folgenden werden die Ergebnisse der Windmessungen im Überblick vorgestellt. Aufgrund der großräumigen Luftdruckverteilung waren bis zum 22.08. südwestliche Winde, anschließend nordwestliche Winde zu erwarten. Die Luftdruckgegensätze über Mitteleuropa blieben aber relativ schwach.

Da am Standort Kläranlage die Anströmrichtung Nordwest auch aufgrund der kleinräumigen Voraussetzung bevorzugt ist, dominierten ab dem 22.08. Winde aus dem Sektor zwischen West und Nord (Abb. 10a). Dennoch drehte der Winde zeitweilig, insbesondere in der Nacht vom 24. zum 25. August zeitweilig auf Nordost. An den Vortagen gab es im Tagesverlauf markantere Windrichtungsmodifikationen. In den Mittags- und Nachmittagsstunden setzte sich der Südwestwind durch. Mit dem abendlichen Abflauen des Windes drehte er schnell auf Nordwest, nach Mitternacht und in den Morgenstunden mischten sich südöstliche Anteile unter die Windstatistik. Somit ist mit Sicherheit davon auszugehen, daß auch bei dieser Einzelepisode kleinräumige Strömungssysteme an der Windstatistik beteiligt waren.

Ganz ähnlich wie am Standort Kläranlage sah das Windfeld an der Meßstation im Gewerbegebiet St. Georgen aus (Abb. 10b). Zwar fehlen hier die nächtlichen Nordostwinde in der zweiten Hälfte der Episode fast völlig, während in den ersten Nächten sowie in den Morgenstunden auch hier südöstliche bis östliche Winde auftreten.

Sehr gut entwickelten sich die tageszeitlichen Windsysteme erneut am Standort Roter Main. Hier konnte sich mit Ausnahme der Nacht 21./22.08. regelmäßig der nächtliche Bergwind, das heißt eine nordöstliche Anströmung durchsetzen. Tagsüber kam der Wind mehr oder weniger regelmäßig aus westlichen Richtungen (Abb. 10c).

Am Standort Hohlmühle kam der Wind während der ersten 3 Tage aus sehr unterschiedlichen Richtungen. Nach dem Kaltfrontdurchgang konnten sich die nächtlichen Bergwinde aus südlichen Richtungen gegen das allgemeine Strömungsfeld durchsetzen. Tagsüber wird das Windfeld durch das Relief nur wenig von seiner überregionalen Richtung abgelenkt (Abb. 10d).

Aufgrund der windgeschützten Lage konnten im Mistelbachtal keine tageszeitlichen Strömungsphänomene beobachtet werden (Abb. 10e).

6.3 Ergebnisse für den Termin der Meßfahrten am 19./20.08.2000

Während der Nacht vom 19. zum 20.08.2000 wurden in der Zeit zwischen 20 Uhr und 06 Uhr insgesamt 4 Temperaturmeßfahrten durchgeführt. Dabei wurden an mehr als 120 Punkten bei langsamer Autofahrt die thermischen Verhältnisse gemessen. Der Ausgangspunkt lag im Gewerbegebiet St. Georgen. Von dort führte die Route zunächst auf den Hohe Wart, dann durch die Innenstadt bis zum westlichsten Punkt in Oberpreuschwitz. Von dort verlief sie weiter durch den Stadtteil Roter Hügel nach Süden. Hier wurden die großen Freiflächen als potentielle Kaltluftentstehungsgebiete durchfahren. Im Stadtteil Thiergarten wurde der südlichste Punkt erreicht. Meßpunkt 80 befand sich im höher gelegenen Bühlholz. Von dort führte die Route zurück in Richtung Innenstadt und von da konsequent durch offene Freiflächen nach Osten. Über die Warmensteinacher Straße endete die Tour im Gewerbegebiet St. Georgen. Die genaue Route ist in Karte 1 eingetragen. Die

Meßergebnisse wurden ebenfalls in kartografischer Form aufbereitet. Karte 2 zeigt die Absolutwerte der Lufttemperatur während der 4 Meßfahrten. Dadurch wird das reale Abkühlungsverhalten in den Nachtstunden besonders gut deutlich. In Karte 3 sind die Abweichungen der Lufttemperatur vom Basispunkt eingetragen. Somit werden die überwärmten Flächen sowie die Kaltluftentstehungsgebiete gut sichtbar. Die Abkühlungsleistung in dieser Nacht war allerdings sehr gering, wodurch großflächig bioklimatische Belastungen auftraten. Karte 4 stellt eine Synthese der beiden vorherigen Karten dar. Hier wird die Mitteltemperatur aus der ersten und letzten Meßfahrt sowie der Temperaturrückgang in der Zeit zwischen der ersten und letzten Meßfahrt in einer Bewertungsmatrix dargestellt.

Um die Ergebnisse der Meßfahrten mit den Daten des Stationsnetzes vergleichen zu können, werden im folgenden zunächst diese Meßwerte detailliert ausgewertet und interpretiert. Am 19. und 20. August lagen die Maxima verbreitet bei oder sogar über 30°C und nachts kühlte es sich nur auf 17°C bis 15°C ab. Die absolut höchsten Temperaturen wurden an beiden Tagen am Standort Innenstadt gemessen. Da hier aber bereits deutlich vor dem astronomischen Sonnenuntergang eine Beschattung durch die umgebenden Häuser vorhanden ist, setzt eine rasche Abkühlung ein, die sogar kurzzeitig zu den niedrigsten Temperaturen im Meßnetz führt. Ab Sonnenuntergang verläuft der Temperaturrückgang dann gedämpfter. Aufgrund der Innenhofsituation ist die langwellige Ausstrahlung stark behindert, hinzu kommt die Abwärme von den Gebäudefassaden. Einflüsse von außen, die den nächtlichen Temperaturgang beeinflussen könnten, sind nicht erkennbar. Die völlige Windruhe trägt dazu bei, daß die Temperatur während der ganzen Nacht aber unter den Werten der anderen Stadtstationen bleibt.

Sehr nahe an den Maxima der Station Innenstadt lagen die Temperaturen am Standort Roter Hügel. Am frühen Nachmittag wird dieser Standort durch das mehrgeschossige Gebäude des Altenwohnheimes beschattet, wodurch noch früher als am Standort Innenstadt ein markanter Temperaturrückgang einsetzt. Primär ist dafür die fehlende direkte Bestrahlung des Erdbodens verantwortlich, der seinerseits weniger warm wird. Daraus resultiert schließlich eine reduzierte Wärmeabgabe an die Luft. Ab Sonnenuntergang dominieren die langwelligen Energieströme den Wärmehaushalt. Die windoffene Plateaulage verhindert den Aufbau einer Bodeninversion, so daß die Lufttemperatur zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang nur stark gedämpft zurückgeht. Das Temperaturminimum lag in dieser Nacht etwa 1,5°C über dem Wert der Station Innenstadt.

Im Gegensatz zu diesen beiden Stationen liegt der Standort St. Georgen bis zum Abend in der Sonne. Die versiegelten Parkplatzflächen geben entsprechend viel Wärme an die Luft ab, so daß die Abkühlungsleistung zwischen dem Zeitpunkt des Temperaturmaximum und Sonnenuntergang gedämpft wird. Zu dieser Zeit ist diese Station die wärmste des gesamten Bayreuther Meßnetzes. Ihre Werte liegen die ganze Nacht über etwas über den Werten der Station Roter Hügel. Erst ganz zum Ende der Abkühlungsphase erreicht sie ihr hohes Niveau.

Die schattige Hanglage der Station Hohe Wart führt dazu, daß hier tagsüber das mit Abstand niedrigste Temperaturniveau herrscht. Das Maximum lag 4°C unter dem der Innenstadt, am Folgetag betrug die Differenz bei der Tageshöchsttemperatur sogar mehr als 5°C. Noch vor Sonnenuntergang wird das Temperaturniveau von sich schneller abkühlenden Stationen erreicht, so daß sie anschließend zusammen mit der Station St. Georgen zu den wärmsten Standorten gehört. Zum Ende der Strahlungsnacht ist sie der wärmste Standort, folglich weist sie das höchste Minimum dieser Nacht auf.

Tagsüber wie nachts wiesen die 3 Freilandstandorte ein relativ einheitliches Temperaturniveau auf. Ihre Maxima erreichen fast die Werte der innenstädtischen Stationen, in der Abkühlungsphase kühlt es hier aber sehr viel schneller ab. Der nach Osten exponierte Standort profitiert in der Zeit vor Sonnenuntergang von der frühzeitigen Kaltluftbildung. Folglich ist er zu dieser Zeit der kälteste Standort. Nach Sonnenaufgang holen die übrigen Freilandstandorte auf und ab Mitternacht geht die Abkühlungsleistung an allen Standorten zurück. Die hohe Luftfeuchtigkeit bremst nachhaltig den weiteren Temperaturrückgang. Die 15°C-Schwelle wird erst spät in der Nacht erreicht und auch von allen Standorten nur geringfügig unterschritten. Die niedrigste Temperatur wurde schließlich am Standort Kläranlage gemessen.

Vor diesem thermischen Hintergrund sind die Ergebnisse der 4 Meßfahrten zu sehen. Die jeweilige Basistemperatur wurde für den Start-/Zielpunkt aller Fahrten im Industriegebiet St. Georgen ermittelt. Sie ist der Mittelwert aus der Anfangs- und Endtemperatur. Für alle entlang der Meßfahrten ermittelten Temperaturen werden die Ergebnisse entsprechend linear korrigiert. Da alle Meßfahrten während der Abkühlungsphase stattgefunden haben, ist dieses Verfahren relativ genau. Rein rechnerisch gelten die gemessenen Temperaturen für die mittlere Uhrzeit zwischen Beginn und Ende jeder Fahrt. Die Basistemperatur von 23,8°C gilt somit für den Zeitpunkt 90min nach Beginn/vor Ende der Fahrt, also für 21.20 Uhr MESZ. Wie Karte 2 zu entnehmen ist, war es am Abend des 19. August in der Kernstadt mit Werten über 24°C am wärmsten, die Freiflächen im Südwesten des Stadtgebietes waren zu dieser Zeit bis zu 5°C kälter. Da in den Differenzkarten das gesamte Farbspektrum für jede Fahrt ausgenutzt wird, werden hier durch die 0,5°C Auflösung die lokalen Unterschiede besser deutlich. Die beiden höchsten Punkte im Forst St. Georgen sowie der weitere Höhenmeßpunkt Bühl verfügten bei dieser Fahrt noch über deutlich negative Abweichungen vom Basiswert. Die stärkste Überwärmung konzentriert sich in der Altstadt. In bebauten Gebieten wird die 20°C Marke noch nicht unterschritten. Auf hohem Temperaturniveau (>21°C) sind auch die Hanglagen zwischen Seulbitz und Laineck. Diese nach Westen exponierten Flächen lagen am längsten in der Sonne, außerdem verlief die Meßroute hier durch die warme Hangzone, das heißt durch den Bereich oberhalb der Kaltluftbildung im Niederungsbereich. Auf den Freiflächen im Niederungsbereich hat die Kaltluftbildung in vollem Umfang eingesetzt.

Bis zum Termin der 2ten Meßfahrt war das Temperaturniveau großflächig um bis zu 4°C gesunken. Für den Mitternachtstermin wurden für den Basispunkt 20°C errechnet. Die Wärmeinsel mit Temperaturen immer noch oberhalb von 20°C liegt weiterhin in der Bayreuther Altstadt. Ähnlich warm ist es im Stadtteil Roter Hügel. Entlang des Mistelbachtals hat sich, wie schon bei der ersten Meßfahrt, eine Schneise relativ kühler Luft stadteinwärts ausgeweitet. Meßtechnisch nachgewiesen wurde sie bis zur Scheffelstraße. Kleinere Siedlungsbereiche wie die Stadtteil Meyernberg und der Stadtteil Saas hatten sich bereits in der ersten Nachthälfte relativ gut abgekühlt. Die niedrigsten Temperaturen wurden entlang der Thiergärtner Straße gemessen. Bei der Querung der flachen Bachtälchen sank die Temperatur lokal nochmals ab. Weniger abgekühlt zeigten sich die etwas höher gelegenen Flächen östlich der Autobahn, die im Gegensatz zu den Flächen im Westen auch über einen höheren Waldanteil verfügen. Daß sich auch hier eine Temperaturinversion ausgebildet hatte, zeigen die Meßwerte bei der Auffahrt vom Tal des Roten Mains in Bühlholz. Oberhalb der Inversionsschicht lag der Hangbereich zwischen Seulbitz und Laineck. Markant kälter war es, wie bei der ersten Meßfahrt, im Steinachtal, das im Stadtteil Laineck überquert wird.

Absolut gesehen machte die Abkühlung während der 2ten Nachthälfte nur noch geringe Fortschritte. Dies hatte sich bereits aufgrund der Auswertung des Meßstationsnetzes

angedeutet. Für den Basispunkt wurde bei der dritten Meßfahrt für 2 Uhr MESZ eine Temperatur von 18,7°C, für 4.30 Uhr MESZ von 18,0°C ermittelt.

Bei der dritten Meßfahrt wurden noch an 4 Meßpunkten innerhalb der Kernstadt Temperaturen über 19°C ermittelt. Zum Termin der letzten Fahrt wird die eigentliche städtische Wärmeinsel durch die Temperaturklasse über 18°C charakterisiert. Der wärmste gemessene Punkt lag jedoch zu diesen Zeiten inversionsbedingt im Bühler Holz. Besonders gut mit Kaltluft versorgt wird der Stadtteil Meyernberg. Im Kaltlufteinzugsgebiet des Mistelbachtals und seinen Seitentälern werden bis zum Ende der Nacht die niedrigsten Temperaturen gemessen. Das Mistelbachtal stellt auch innerstädtisch weiterhin einen relativ kühlen Bereich dar.

Mit Hilfe der thermalen Charakteristik (Karte 4) lassen sich die Ergebnisse der Meßnacht zusammenfassen. Die Kategorie "hohe Mitteltemperatur" wurde nur für verhältnismäßig kleine Bereiche vergeben. Dazu gehören die Innenstadtquartiere (Stadtteil St. Georgen, Citybereich), die zur Hohe Wart ansteigenden Wohnbereiche sowie der Stadtteil Roter Hügel. Auch der autobahnahe Bereich des Industriegebietes St. Georgen-West gehört dazu. Dabei ist die Abkühlungsleistung in den Niederungsbereichen größer (dunkelrot) als in den Hang- und Plateaulagen. Der übrige bebaute Bereich liegt fast völlig in der mittleren Kategorie (grüne Farbstufen). Die Freiflächenbereiche, die aufgrund der Meßfahtergebnisse in die Klasse "niedrige Mitteltemperatur" gehören und in der Kategorie Abkühlungsleistung mit "mäßig" oder "stark" bewertet wurden, gehören zu den besonders klimaaktiven Flächen. Hier wird in Strahlungsnächten in großem Umfang Kaltluft gebildet. Bei geeigneter Reliefstruktur fließt die Kaltluft auf diesen Flächen talabwärts. Liegen solche Flächen oberhalb von thermischen Lasträumen, erhalten sie in der Klimafunktionskarte das Prädikat "klimatische Ausgleichsfläche". Meßtechnisch nachgewiesen wurde dies für große Teile der Freiräume im Südwesten und Süden des Stadtgebietes. Im Osten des Stadtgebietes wurden beim Überqueren des Roten Mains (Grunauer Mühle) und der Steinach (Rodersberg) entsprechende thermische Qualitäten festgestellt.

Um die Dynamik von Kaltluftflüssen nicht nur mit Hilfe der 5 Windmeßstationen nachzuweisen, wurden zusätzlich Rauchgasversuche durchgeführt.

6.4 Ergebnisse der Rauchgasuntersuchungen

Aufgrund einer unerwarteten Wetterverschlechterung (Gewitterstörung) konnten diese Rauchgasversuche nicht wie beabsichtigt während der Folgenacht durchgeführt werden, sondern mußten auf den Abend des 24.08. verlegt werden. Zu diesem Termin hatte sich erneut eine windschwache und gleichzeitig wolkenfreie Wetterlage eingestellt. Die Zündbereiche sind in Karte 1 eingezeichnet. Die Untersuchungen wurden unmittelbar nach Sonnenuntergang im Mistelbachtal begonnen und anschließend zeitgleich in den Talräumen Sendelbach/Tappert sowie Roter Main (unterhalb der City) fortgesetzt. Die Ergebnisse sind in den Karten 5a bis 5c dargestellt.

Der stärkste Kaltluftabfluß wurde im Mistelbachtal festgestellt (Karte 5a). Hier sind topografisch gesehen auch die besten Voraussetzungen für einen kräftigen nächtlichen Kaltluftabfluß gegeben. Neben dem Haupttal selbst münden stadtnah weitere Seitentäler ein (Talmühlbach, Teufelsgraben). Die Talachsen mäandrieren wenig, so daß der Kaltluftabfluß wenigen oder gar keinen Richtungswechseln ausgesetzt ist. Die Niederungsbereiche sind großflächig nicht bewaldet. Lediglich bachbegleitend sind einige großkronige Bäume vorhanden. Als größeres Hindernis ist stadtnah südlich der Straßenbrücke (Bamberger Straße) ein Gehölz vorhanden. Stadteinwärts dominieren dann erneut Wiesenflächen mit

bachbegleitenden Bäumen. Noch weiter unterhalb befinden sich unterschiedliche Sportanlagen (Tennisplätze, Großspielfelder) im Niederungsbereich.

An insgesamt 3 Zündpunkten wurde hier Rauch emittiert. Oberhalb des südlichsten Zündpunktes stagnierte die Luft im Talraum des Mistelbaches weitestgehend noch. Zeitgleich strömten bereits bodennah Luftmassen aus dem Talmühlbachtal über die Bamberger Straße hinweg in das Haupttal ein. Der Rauch breitete sich von südlichsten Zündpunkt aus bodennah etwa mit Schrittgeschwindigkeit talabwärts aus. Die bachbegleitenden Bäume wurden nahezu ohne Zeit- und Intensitätsverlust durchströmt. Etwa 300m talabwärts wurde an einem 2ten Zündpunkt erneut Rauchgas emittiert, um die talabwärts fließende Kaltluft weiter verfolgen zu können. Unterhalb der Einmündung des Teufelsgrabens beschleunigte sich der bodennahe Abfluß weiter. Dieser zusätzliche Impuls führte dazu, daß die Strömung den untersten Talgrund verließ, über einen flachen Rücken strömte und etwas östlich vom eigentlichen Mistelbachtal stadteinwärts weiterfloß. Im Mistelbachtal selbst, wo an einem dritten Zündpunkt nochmals Rauch emittiert wurde, war der talabwärtsgerichtete Impuls wesentlich geringer. Schließlich staute der dichte Gehölzbereich die Kaltluft fast vollständig auf. Im Bereich der Straßenbrücke (B22) über den Mistelbach war bis zur Abzweigung Fantasiestraße noch eine leichte Trübung der Luft sowie Brandgeruch als Folge des künstlichen Rauches wahrnehmbar. Einige Minuten später war das Rauchgas an der Brücke der St. Nikolaus-Straße über den Mistelbach nur noch am Geruch erkennbar. Eine nennenswerte talabwärts gerichtete Luftbewegung war selbst mit Seifenblasen nicht nachweisbar. Gleichzeitig stand das Schalenkreuzanemometer auf dem Wassergewinnungsgelände still.

Obwohl das Mistelbachtal mit seinen Seitentälern optimal für einen nächtlichen Kaltluftabfluß geeignet ist, profitiert die Bayreuther Innenstadt kaum von diesem Strömungssystem. Größtes stadtnahes Hindernis ist der dichte und hohe Gehölzbestand oberhalb der Straßenbrücke (B22). Dieses Gehölz verkorkt das Mistelbachtal vollständig. Als Folge davon staut sich die Kaltluft oberhalb auf. Die östlich vorbei fließenden Luftmassen werden ebenfalls durch den dichten Gehölzstreifen aufgehalten, so daß das Mistelbachtal unterhalb der Straßenbrücke der B22 praktisch vollständig von der Luftzufuhr aus dem oberen Talraum abgeschnitten ist. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wäre zu überprüfen, ob und gegebenenfalls wie weit die Kaltluft ohne Hindernis durch das unterhalb gelegene Mistelbachtal stadteinwärts fließen kann. Darauf aufbauend können konkrete Planungshinweise für diesen Teilraum erstellt werden.

Im Anschluß an die Untersuchungen im Mistelbachtal wurde im Bereich Sendelbachtal/Tappert künstliches Rauchgas freigesetzt (Karte 5b). Dieses Tal führt von Süden her in Richtung Kernstadt. Die geringere Reliefenergie und die längere abendliche Besonnung dieses Talraumes ließen einen späteren Beginn der nächtlichen Kaltluftabflußsysteme erwarten. Die beiden Zündpunkte lagen unterhalb des Böttgerweges. Zuerst wurde der Rauch am südlicheren Zündpunkt emittiert, der unmittelbar im Grabenbereich lag. Zuvor wurde mit einem mobilen Thermofühler überprüft, ob sich bodennah bereits eine Temperaturinversion aufgebaut hatte. Da dies der Fall war, breitete sich der Rauch trotz seiner Eigenwärme nur wenig nach oben aus. Seine talabwärts gerichtete Fließgeschwindigkeit war allerdings sehr langsam. Der künstliche Nebel füllte den Talraum unterhalb des Zündpunktes zwischen der steilen Hangkante im Osten sowie dem nach Westen allmählich ansteigenden Hangbereich völlig aus. Mit Hilfe von Seifenblasen konnte ein zusätzlicher Hangabwind aus südwestlichen Richtungen nachgewiesen werden. Daher wurde ein weiterer Zündpunkt näher am Dammbauwerk der Dr. Konrad Pöhler Straße gewählt. Hier bekam der Bergwind durch die Hangabwinde einen leichten Zusatzimpuls. Ein Teil des künstlichen Rauches sammelte sich am Dammfuß, eine

zunächst nur geringere Menge konnte den verbuschten Dammbereich überqueren. Der stagnierende Rauch konnte noch über eine halbe Stunde nach seiner Zündung oberhalb des Dammes beobachtet werden. Somit handelt es sich bei dieser Fläche um einen klassischen Luftstagnationsbereich, in dem sich die kalten und gleichzeitig schwereren Luftmassen sammeln. Nördlich der Dr. Konrad Pöhler Straße konnte der Rauch nur noch am Geruch wahrgenommen werden. Vermutlich kann der Damm im weiteren Verlauf der Nacht von den nachfolgenden Luftmassen langsam überströmt werden. Dabei dürfte sich der etwa 500m weiter nördliche gelegene Bahndamm als neues Hindernis für den Kaltluftabfluß erweisen. Mit meßbaren thermischen Ausgleichsleistungen für die Kernstadt ist bei windschwachen Hochdruckwetterlagen nicht zu rechnen. Mit Computersimulationen ließe sich die Situation für eine leichte, überregional induzierte Südanströmung untersuchen.

Als dritter Teilraum für Rauchgasversuche wurde der Niederungsbereich des Roten Mains unterhalb der Kernstadt ausgewählt (Karte 5c). Aus den Meßergebnissen am Standort Kläranlage war zu entnehmen, daß hier während der Nachtstunden unterschiedliche Windrichtungen auftreten, die nicht mit nur einem thermisch induzierten Windsystem in Verbindung zu bringen sind. Vor diesem Hintergrund wurde die Lage der Zündpunkte ausgewählt. Ein Zündpunkt lag auf der Fußgängerbrücke (am Bayerischen Roten Kreuz) über den Roten Main. Hier fließt der Rote Main kanalisiert in einem etwa 50m breiten Niederungsbereich, der beidseitig mit hohen Bäumen bestanden ist. Der 2te Zündpunkt befand sich im breiten Niederungsbereich unterhalb der Nordringbrücke.

Am Zündpunkt Fußgängerbrücke wurde eine stadteinwärts gerichtete Luftströmung beobachtet, wobei sich der Rauch bodennah etwa mit Schrittgeschwindigkeit ausbreitete. Der künstliche Nebel konnte mehrere 100m flußaufwärts beobachtet werden. Sein Geruch war noch bis in Höhe des Neuen Rathauses wahrnehmbar.

Nahezu zeitgleich wurde auch am unterhalb gelegenen Punkt gezündet. Der Rauch breitete sich hier großflächig aus. Mit sehr geringer Fließgeschwindigkeit orientierte er sich zwischen dem Flußlauf und den Gebäuden der Kläranlage talabwärts. Auch nach einer halben Stunde hatte der Rauch sich noch nicht über den nordwestlichen Bereich der Kläranlage hinaus talabwärts ausgebreitet.

Mit diesen Versuchen konnte eindeutig nachgewiesen werden, daß in den Abendstunden dieser Meßnacht ein stadteinwärts gerichteter Flurwind im Maintal existierte. Sein Einzugsgebiet reichte während der Untersuchung nicht bis zum 2ten Zündpunkt talabwärts. Dies wird auch durch die Meßergebnisse am Standort Kläranlage bestätigt. Hier herrschte zu dieser Zeit fast völlige Windruhe. Ab Mitternacht wurden dann auch hier nordwestliche Winde registriert, die für eine Luftzufuhr in Richtung Innenstadt sprechen. Ein talabwärts gerichteter Bergwind, wie er gleichzeitig im Maintal oberhalb der Kernstadt gemessen wurde, existierte hier nicht.

Dem Phänomen des Flurwindes unterhalb der Kernstadt wurde schon bei der Auswertung der Windmessungen vom Standort Kläranlage eine besondere Bedeutung beigemessen. Die Ergebnisse zeigten ein sehr variables Windfeld, wobei zumindest für einige Nachtstunden flurwindartige Erscheinungen erkennbar waren. Da dieses Belüftungssystem eine große Bedeutung für die Kernstadt hat, sollten hier weitere Untersuchungen angestrebt werden.

Zusammenfassend betrachtet erbrachten die Rauchgasversuche weitere Erkenntnisse über die Belüftungsverhältnisse zwischen Außenbereich und Kernstadt. Das Mistelbachtal verfügt zusammen mit seinen Seitentälern über das größte Kaltlufteinzugsgebiet. Darüber hinaus sind die Reliefunterschiede hier so groß, daß sich eine gute Abflußdynamik ent-

wickeln kann. Stadtnah stellen vorhandene Baum- und Strauchbereiche ein wirkungsvolles Strömungshindernis dar. Im Rahmen der Stadt- und Umweltplanung muß abgewogen werden, welchen Stellenwert man der Kalt- und Frischluftzufuhr in diesem Teilraum geben möchte. Stellvertretend für andere aus Süden einmündende Talräume, die über eine geringere Reliefenergie verfügen, wurde das Sendelbachtal/Tappert untersucht. Um wirksame thermische Ausgleichleistungen erfüllen zu können, bedarf es hier möglichst hindernisfreier Abflußbedingungen. Quer zum Talraum verlaufende Straßen- und Bahndämme führen zum Kaltluftstau, wodurch zumindest eine zeitliche Verzögerung der nächtlichen Kaltluftabflüsse verbunden ist. Darüber hinaus ist die Eindringtiefe solcher schwach entwickelter Systeme in bebaute Gebiet hinein gering. Die im Süden des Bayerischer Stadtgebietes entwickeln ihre thermische Ausgleichsfunktion dann am besten, wenn der bodennahe Kaltluftabfluß durch eine südlicher Oberströmung unterstützt wird.

7. KLIMAFUNKTIONSKARTE

7.1 Auswertung der topographischen Informationen

Neben den gemessenen Klimaelementen spielen die örtlichen Klimafaktoren bei der Ausprägung lokaler Klimabesonderheiten eine entscheidende Rolle. Wichtige Klimafaktoren sind die reale Flächennutzung sowie das Relief. Dies wurde bereits bei der Auswertung der Windmeßergebnisse deutlich.

Von Seiten des Auftraggebers wurde ein digitales Höhenmodell bereitgestellt, welches auf den Höhenangaben der topographischen Karte 1:25.000 beruht. Die Maschenweite dieses Modells beträgt 50m, seiner Höhengenaugigkeit liegt bei +/- 5m. Außerdem stand die topograpische Karte im Maßstab 1:25.000 eine digitale Rasterkarte zur Verfügung. Sie dient als Hintergrundinformationen für sämtliche fachspezifischen Themenkarten. Da die TK 25 in mehreren Layern bereitgestellt wurde, konnten der Kartenhintergrund individuell für die unterschiedlichen Karten aufbereitet werden. Die Flächennutzung wurde aus den verfügbaren Stadtplanwerken übernommen; aktuelle Ergänzungen erfolgen in Abstimmung mit dem Auftraggeber. Aus diesen Unterlagen wurde eine Karte der Realnutzungsstrukturen entwickelt (Karte 6). In ihr wird nach 7 Flächennutzungsklassen unterschieden. Dazu kommt als achte Klasse die Autobahn als flächeninanspruchnehmender Verkehrsweg. Für alle Flächenstrukturen gilt, daß in diesem Arbeitsschritt noch nicht nach ihrer klimatischen Funktion klassifiziert wurde. Somit gibt es auch keine Mindestflächengrößen. Somit wurden alle zusammenhängenden, flächig mit Bäumen bestandenen Bereiche als "Waldgebiete" bezeichnet. Nicht enthalten sind ein- oder zweireihige Baumstrukturen entlang von linienhaften Elementen. Auch bachbegleitende Gehölze wurden nicht als Waldgebiet klassifiziert. Solche Teilräume gehören mehrheitlich zur Nutzungsstruktur "offene Freiflächen". Sie enthält außerdem sämtliche Acker- und Wiesenbereiche im Außenbereich. Als weiteren, weitgehend unversiegelte Flächeneinheit wurde der Strukturtyp "Parkanlagen/Kleingärten/öffentliche Grünflächen" gebildet. Dazu gehören auch Spiel- und Sportplätze, sofern sie räumlich im Zusammenhang mit anderen Freiflächen stehen. Als weiterer unversiegelten Flächentyp wurden "Gewässer" ausgewiesen. Dazu gehören alle, den genannten Kartengrundlagen zu entnehmenden Stehgewässer sowie der Rote Main.

Die vom Menschen versiegelten Flächen wurden nach 3 Klassen unterschieden. Als Raum höchster Verdichtung und gleichzeitig hohem Nutzen durch den Menschen wurde ein Kernstadtbereich abgegrenzt. Alle anderen, mehrheitlich zum Wohnen genutzten Gebiete wurden als Strukturtyp "Siedlungsbereiche" zusammengefaßt. Entsprechend wurde die Areale festgelegt, in denen gewerbliche oder industrielle Nutzungen dominieren. Sie werden als Gewerbe- und Industrieflächen bezeichnet.

Diese Arbeitskarte dient ausschließlich als Informationsgrundlage für weitere klimatologisch begründbare Abgrenzungen. Sie ersetzt weder eine parzellenscharfe Realnutzungskartierung noch können aus ihr ohne weitere Informationsquellen Klimatopklassen abgeleitet werden. Das Gleiche gilt für Karte 7, in der das digitale Geländemodell in 9 Höhenstufen aufgelöst wurde. Die Spannweiten der einzelnen Klassen beträgt jeweils 25m. Die größten Höhen werden im Osten des Stadtgebietes erreicht. Hier werden im Fichtelgebirgsvorland Höhen bis 550m erreicht. Den niedrigsten Punkt im Stadtgebiet stellt der Rote Main beim Verlassen des Stadtgebietes im Nordwesten dar. Die Klasse 325m bis 350m umfaßt den gesamten, fast ebenen Bereich der Kernstadt. Zu dieser Höhenstufe gehören auch das Steinachtal und das Tal des Roten Mains oberhalb der Kernstadt. Auch nach Süden reicht diese Höhenstufe beispielsweise ins oberhalb der Kernstadt verlaufende Mistelbachtal. Auch die nächste Höhenstufe bis 375m hat im Bay-

reuther Stadtgebiet einen hohen Flächenanteil. Diese Niederungsbereiche werden aber vielfach von größeren Höhen eingerahmt. Neben dem Fichtelgebirgsvorland im Osten erreicht auch der Forst St. Georgen im Norden, der Ranggen und der Spitzigerstein im Süden Höhen von mehr als 450m. Daraus resultiert für weite Teile des Stadtgebietes eine relativ windgeschützte Kessellage.

Ein direktes Folgeprodukt aus dem digitalen Geländemodell ist der Karte der Hangneigungsklassen (Karte 8). Mit Hilfe der Erweiterung "Spatial Analyst" lassen sich aus den Höhendaten Hangneigungsklassen nach einem fest vorgegebenen Algorithmus ermitteln. Für eine sowohl plakative als auch für stadtklimatologische Fragestellungen sinnvolle Abstufung wurde eine Klassenbreite von 2% gewählt. Die Klasse bis 2% umfaßt somit alle nahe ebenen Bereiche des Stadtgebietes. Die größten Teile dieser Areale sind bebaut. Ebene Niederungsbereiche ohne Bebauung befinden sich nur im Tal des Roten Mains oberhalb und unterhalb der Stadt sowie im Mistelbachtal. Die Bebauung erstreckt sich aber auch in stärker geneigte Flächen hinein. Dies gilt einerseits für die vorwiegend südexponierten Wohngebiete nördlich der Hofer Straße, andererseits für ganze Stadtteile wie Roter Hügel und Meyernberg. Durch die steileren Hangneigungsklassen >6% werden natürliche Geländekanten gut sichtbar. Vom Mistelbachtal steigt das Gelände nach Nordwesten schroff zum Stadtteil Kreuz an. Zwischen Thurnauer Weg und Cottenbacherstraße hat sich der Rote Main tief in das Relief eingegraben. Dies führt zu einer markanten Belüftungsschneise, die anhand der Windstatistik des Standortes Kläranlage belegt wird. Auch nach Südwesten ist eine markante Geländekante vorhanden, die aus dem Niederungsbereich heraus auf die Große und die Kleine Ebene hinaufführt. Im äußersten Süden hat sich der Tappert tief und steil in das Gelände eingeschnitten. Auch der Verlauf des Roten Mains läßt sich oberhalb der Kernstadt bis zur Stadtgrenze an der Schlehenmühle gut an der Hangneigungskarte verfolgen. Das Steinachtal mündet unterhalb der Walkmühle in den Roten Main. Das Steinachtal bildet zusammen mit dem Talraum des Roten Mains von der Pudermühle bis zur Friedrich-Ebert-Straße eine breite, geradeaus laufende Ventilationsbahn. Das Ergebnis wird durch die Windmeßstation Roter Main dokumentiert. Nachts weht mehrheitlich der Wind entlang dieser Luftleitbahn der Wind stadteinwärts. Oberhalb des zum Markt Weidenberg gehörenden Stadtteil Döhlau hat das Tal der Warmen Steinach bereits Mittelgebirgscharakter. Somit sind alle orographischen Voraussetzungen für ein mächtiges nächtliches Bergwindssystem in diesem Talraum gegeben. Darüber hinaus bietet der Übergang vom Fichtelgebirge zur Mainniederung ideale Voraussetzungen für fallwindartige Zirkulationsformen. Auch diese konnten an den Stationen im Gewerbegebiet St. Georgen sowie Roter Main beobachtet werden. Die Hangneigungsklassen auf der Basis des Digitalen Geländemodells im 50m-Raster stellt für die zu entwickelnde Klimatopkarte eine wichtige Arbeitsgrundlage dar. Aus dem Digitalen Höhenmodell wurde zusammen mit den Hangneigungsklassen eine generalisierte Karte der Reliefstrukturen entwickelt. Im Gegensatz zu den beiden Arbeitskarten, die ausschließlich computergestützt entstanden sind, fließen bei der Entwicklung der Reliefstrukturen eigene Geländekenntnisse mit ein. Es handelt sich im Gegensatz zu den Karte 7 und 8, die reine Rasterkarten sind, bei Karte 9 um eine Vektorkarte. Als Basis für die Klimatopklassifikation wurden 4 Strukturtypen differenziert. Diese Strukturtypen dürfen wie keine der Folgekarten keinesfalls als parzellengenau verstanden werden. Sie dienen der groben Übersicht und sollten daher maximal im Maßstab des Flächennutzungsplanes verwendet werden. Die Niederungsbereiche beinhalten nicht ausschließlich die niedrigste Höhenklasse des Digitalen Geländemodells, sondern orientieren sich auch am generellen, subjektiven Geländeeindruck. Das gilt im selben Maße für die übrigen Klassen. Die Hanglagen wurden gemäß ihrer vorwiegenden Neigungsintensitäten in 2 Qualitätstufen unterschieden.

Gering geneigte Flächen außerhalb des Niederungsbereiches wurden als Kuppenlagen klassifiziert. Dazu gehören auch höher gelegene Terrassenbereiche und Hochebenen. Die Abgrenzungen der Reliefstrukturen werden in die Klimatopkarte übernommen.

7.2 Entwicklung der Potentialkarten

In 2 weiteren Arbeitsschritten lassen sich unter Berücksichtigung der Meßergebnisse die für das Stadtgebiet von Bayreuth wichtigen Teilräume der potentiell ausgleichsrelevanten Flächen und der potentiell bioklimatisch belasteten Flächen ableiten. Karte 10 und 11 enthalten die entsprechenden flächenhaften Aussagen.

In der Karte der potentiell ausgleichsrelevanten Flächen werden 4 Klassen differenziert. Entsprechend der Aussagen zu den klimarelevanten Strukturen sind in dieser Themenkarte nur noch die Strukturtypen Freiland und Grünland enthalten. Die Freiflächen in Hanglage entwickeln die am stärksten ausgeprägte, thermisch induzierte Aktivität. Die Nutzungsform erlaubt eine optimale Abkühlung der Oberfläche, woraus eine entsprechende Wärmeabgabe von der Luft an den Boden resultiert. Damit liegt die kälteste Luft unmittelbar an der Oberfläche, nach oben nimmt die Lufttemperatur schnell zu. Diese thermische Schichtung, die vertikal selten höher als einige Meter ist, begünstigt eine frühere Abkopplung der örtlichen Strömungsverhältnisse. Die Luft gleitet als Hangabwind in Richtung der jeweiligen Niederungsbereiche ab. Nach erfolgtem Abfluß folgt minuten-schnell eine Neubildung der bodennahen Kaltluft. Anschließend kommt es erneut zum Abflußvorgang. Dieser Prozeß wiederholt sich während der Nachtstunden immer wieder. Mit zeitlich hochauflösenden Meßwertgebern konnten diese pulsierenden Bewegungen eindeutig nachgewiesen werden. Ziel dieser nächtlichen Kaltluftabflüsse sind die jeweils tiefsten Geländebereiche, als der Talgrund sowie die angrenzenden Niederungsbereiche. Hier wird auf Freilandflächen im selben Umfang bodennah Luft abgekühlt wie in den Hangbereichen. Im direkten Vergleich mit den Hangbereichen beginnt die Kaltluftbildung hier noch früher am Abend. Daher sind die gemessenen Lufttemperatur hier in Bodennähe am niedrigsten. Aufgrund der Dichteunterschiede in verschieden temperierter Luft lagert die kälteste Luft immer direkt über dem Erdboden, es kommt zu einer Temperaturinversion. Die von den Hängen dazu kommenden Luftmassen sind etwas wärmer als die Talluft, so daß auf die unterste Luftschicht aufgleiten. Damit wird die ohnehin in Freiflächen geringe Bodenreibung weiter minimiert, so daß geringste Talsohlenneigungen zu Abflußprozessen führen, die bald die gesamte Breite der Talsohle erfassen. Je nach Luftnachschiebung von den Hängen erreichen solche Bergwinde im Stadtgebiet von Bayreuth vertikale Mächtigkeiten von einigen Metern, wobei die Fließgeschwindigkeit in der Regel unter 2m/s liegt. Trotz der hohen Abflußrate nimmt die vertikale Mächtigkeit der Kaltluftschicht im Laufe der Nacht zu und kann Mächtigkeiten von 10m und mehr erreichen. Quer zum Tal liegende Hindernisse stören den nächtlichen Bergwind. Neben Dammbauwerken sind dies dichte, flächenhafte Gehölzbestände und stadtnah insbesondere auch Baukörper. Bachbegleitende Gehölze (Baumreihen, Sträucher) werden je nach Struktur, um-, über- oder durchströmt. Selbst ein leichtes "Bergauffließen" bei der Umströmung von Hindernissen wird immer wieder beobachtet. Vor quer zur Talachse verlaufenden Hindernissen und bei Gehölzbeständen, die die Talachse flächig ausfüllen und die nicht durchblasbar sind, kommt der Luftstrom zum Erliegen. Anders als bei Wasser staut sich die Luft nicht gleichmäßig bis zur oberen Hindernisgrenze auf, sondern der Luftstau entwickelt sich oberhalb des Hindernisses linsenförmig talaufwärts. Im Laufe der Nacht beginnt später die Überströmung der meisten Hindernisse. Meist muß aber auf dem Weg stadteinwärts nicht nur ein Strömungshindernis überwunden werden, so daß die tatsächlich über Luftleitbahnen stadteinwärts strömenden Kaltluftmassen nur einen Bruchteil der

Menge enthalten, die in ihrem Einzugsgebiet entsteht. Der Luftstau oberhalb solcher Hindernisse führt hier zur weiteren Abkühlung der Luftmassen, wodurch sich dann nach Erreichen der Taupunkttemperatur zunächst Tau absetzt und später allmählich Bodennebel (Ausstrahlungsnebel) bildet.

Stärker mit Gehölzen durchsetzte Grünflächen (Parkanlagen, Kleingärten) verfügen über eine geringere Kaltluftproduktionsrate als offene Freiflächen. Sie werden unterteilt in Flächen mit gutem Abflußverhalten und Bereiche, die tendenziell zur Luftstagnation neigen. Im Bayreuther Stadtgebiet sind dies in erste Linie parkartig gestaltene Luftschneisen innerhalb der von Süden einmündenden Seitentäler des Roten Mains.

Neben den Ausgleichsflächen wurden die aufgrund von Flächennutzung und Reliefsituation bioklimatisch belasteten Teilräume ausgewiesen. Auch flossen die Meßergebnisse des Feststationsnetzes und der Temperaturmeßfahrten mit ein. Es wurden 2 Klassen unterschieden. Für die Kategorie mit der höchsten bioklimatischen Belastungsstufe wurden die Abgrenzungen für den Innenstadtbereich aus der Karte der klimarelevanten Strukturen übernommen. Dieser Teilraum deckt sich weitgehend mit den thermisch ungünstigen Bereichen, die aus den Meßfahrten entwickelt wurden. Höhere Grünflächenanteile, größere Flächenanteile von mit Ein- und Zweifamilienhäusern, der Übergangsbereich zur freien Landschaft in Verbindung mit einer besseren Durchlüftungssituation sowie die nachgewiesene bessere nächtliche Abkühlung führten zur Abgrenzung der zweiten Klasse, für die eine schwächere thermische Belastung angegeben wird. Für andere Siedlungsschwerpunkte wie den Stadtteil Meyernberg ergaben die Meßfahrten günstige Abkühlungswerte, so daß sie nicht zu den bioklimatisch belasteten Flächen gehören. Insgesamt sind die Übergänge zwischen den einzelnen Kategorien nicht als starre Grenzen zu verstehen. Wetterlagenabhängig werden sich die testierten Phänomene unterschiedlich stark entwickeln.

7.3 Entwicklung der Klimafunktionskarte

Der inhaltlich am weitesten gehende Schritt ist die Festsetzung von Klimatopen. Dieser Arbeitsschritt richtet sich nach den Vorgaben der VDI Richtlinie 3787, Blatt 2. Dementsprechend wird der gesamte Untersuchungsraum in Karte 12 hinsichtlich seiner flächenhaft auftretenden Klimafunktionen in Klimatope eingeteilt. Dabei stehen die thermischen Besonderheiten der einzelnen Teilräume im Vordergrund. Bei hochsommerlichen Wetterlagen können thermische Lasträume entstehen. Dabei handelt es sich um die Flächen, in denen insbesondere die nächtliche Abkühlung über mehrere Nächte hintereinander nicht ausreicht, innerhalb der betroffenen Siedlungsräume bioklimatisch komfortable Bedingungen zu schaffen. Als typisches Kennmaß wurde dafür die Äquivalenttemperatur verwendet. Da sie ausschließlich den Gesamtwärmegehalt der Luft als Bewertungskriterium enthält, wird diese Kenngröße vorzugsweise für Aussagen im nächtlichen Abkühlungsverhalten verwendet. Tagsüber muß darüber hinaus auch die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung in die bioklimatische Bewertung einfließen.

7.3.1 Stadtklimatope

Bei den Siedlungsbereichen wurde nach insgesamt 4 Klimatopklassen differenziert. Aufgrund der massiven Bebauung und seines geringen Grünflächenanteiles wurde der Innenstadtbereich als eigener Strukturtyp ausgewiesen. Der Innenstadtbereich weist die stärksten Abweichungen vom Freilandklima auf. Dies gilt für sämtliche, kleinräumig modifizierbaren Klimaelemente. Das Windfeld erfährt eine sehr starke Veränderung. Die kleinteilige Struktur unterschiedlich hoher und in verschiedene Richtungen orientierter Gebäude-

komplexe führt zu einem Strömungsfeld, das erst oberhalb des mittleren Dachniveau hinsichtlich Richtung und Geschwindigkeit wieder Freilandverhältnisse erreicht. Innerhalb der Häuserschluchten ergeben sich Kanalisierungen der Windrichtung. Dabei kann sich die Windgeschwindigkeit teilweise weit unter die Freilandverhältnisse verringern; allerdings sind auch Düseneffekte möglich, wodurch der Wind kleinräumig auffrischen kann. Insbesondere bei allgemein höheren Strömungsgeschwindigkeiten ist die Böigkeit des Windes auf Straßen und Plätzen im Innenstadtbereich stark erhöht. Unmittelbar angrenzende, kleine Innenhöfe können fast ganzjährig völlig windstill sein. Bei großräumig geringen Luftdruckgegensätzen sind die Windverhältnisse am meisten negativ verändert und die davon abhängige Be- und Entlüftung des Innenstadtbereiches ist stark eingeschränkt. Die wirkt sich ungünstig auf die abendliche Abkühlung, aber auch auf den Abtransport von Luftschadstoffen aus.

Auch das thermisch-hygrische Feld ist innerhalb der bodennahen Luftschicht im Innenstadtbereich im Vergleich zum Freiland stark modifiziert. Verantwortlich dafür ist der hohe Versiegelungsgrad in Verbindung mit großen Baukörpervolumina. Die Inhalte der Wasserhaushaltsgleichung beschränken sich fast vollständig auf Niederschlag und Abfluß. Fallende Niederschläge benetzen zwar zunächst die Oberflächen, bei länger anhaltenden und/oder stärkeren Niederschlagsereignissen fließt das Wasser weitestgehend in die Kanalisation ab. Als Verdunstungspotential steht nur das auf den versiegelten Flächen vorhandene Niederschlagswasser zur Verfügung. Nach Abtrocknung dieser Bereiche fällt der energieverbrauchende latente Wärmestrom aus. Zur Kompensation der überschüssigen Strahlungsenergie dient dann in der Luft vorwiegend der Strom fühlbarer Wärme; die jeweils besonnten Gebäudefassaden sind in der Lage einen Teil der ankommenden Sonnenstrahlen abzuleiten und in den Wänden zu speichern. Trotz der schattenspendenden Gebäude steigt die Lufttemperatur an Strahlungstagen auf das Niveau des Freilandes und darüber an. Die Wärmebelastung des Menschen liegt tagsüber in Schattenbereichen des Innenstadtbereiches niedriger als im vollbesonnten Freiland. Ab Sonnenuntergang baut sich im Innenstadtbereich rasch eine starke Überwärmung im Vergleich zum Freiland auf. Dies ist eine Folge der im Innenstadtdistrict stark gedämpften Abkühlungsleistung. Sie resultiert aus der teilweise erheblichen Horizont einschränkung, wodurch die effektiv wirksame langwellige Ausstrahlung im Vergleich zum Freiland gering ist. Gleichzeitig geben die Hauswände über ihre Außenfassaden die tagsüber gespeicherte Wärme über Nacht wieder ab. In solchen Fällen ist der Innenstadtbereich auf eine zusätzliche Abkühlung von außen angewiesen. Diese kann in Bayreuth durch 2 unterschiedliche Phänomene stattfinden, die jedoch beide thermisch induziert sind. Die Lage im Niederungsbereich des Roten Mains führt dazu, daß Bergwinde entlang des Maintales und seiner im Stadtgebiet einmündenden Seitentäler in der Lage sind, Luft von den kaltluftproduzierenden Freiflächen stadteinwärts zu transportieren. Außerdem können Flurwinde entstehen, die ohne Reliefunterstützung direkt wegen der wärmeren Innenstadtluft von außen angesaugt werden. Beide Phänomene wurden im Bayreuther Stadtgebiet beobachtet. Da aber der Innenstadtbereich zu allen Seiten großflächig von Siedlungsflächen eingerahmt ist, können solche Systeme erst zeitlich verzögert und in stark abgeschwächter Form für die Innenstadtbereiche wirksam werden.

Das Cityklimatop weist somit innerhalb des Bayreuther Stadtgebietes die ungünstigen bioklimatischen Eigenschaften auf. Die tagsüber als Strahlungsfalle wirksamen Gebäudekomplexe unterstützen das hohe nächtliche Temperaturniveau auf zweifache Weise. Sie behindern einerseits durch ihre Horizont einschränkung die nächtliche Ausstrahlung von den horizontalen Oberflächen in den oberen Halbraum. In engen Straßenschluchten reduziert sich der offene Flächenanteil des oberen Halbraumes auf weniger als 20% des

Freilandes. Andererseits stellen die Fassaden tagsüber wie nachts eigene Energieumsatzflächen dar. Entsprechend ihrer tagsüber gespeicherten Energie geben die Fassaden nachts aktiv Wärme an ihre Umgebung. Hinzu kommt noch, das Baumaterialien (Wände, Straßenbeläge) über ein Wärmeleitvermögen verfügen, daß bis zu 50 Mal höher ist als das von Freiflächen. Meßtechnisch wurde für die Station Innenstadt nur selten eine Wasserdampfsättigung der Luft festgestellt, was ein direktes Indiz dafür ist, daß die übrigen Wärmeströme keine Abkühlung unter den Taupunkt zugelassen haben.

Weitere Siedlungsschwerpunkte werden als Stadtklimatop klassifiziert. Hier wechseln größere Areale mit Blockbebauungsstrukturen und Gebiete mit vorwiegender Einzelhausbebauung ab. Hochhauskomplexe sind genauso die Ausnahme wie größere Grünbereiche. Bei ähnlicher Bauungsstruktur wurden im Stadtgebiet von Bayreuth 2 Typen des Stadtklimatopes unterschieden. Das Stadtklimatop in Niederungsbereichen schließt nahezu flächendeckend nach außen an das Cityklimatop an. Die Intensität der nächtlichen Überwärmung ist im Gebiet des Stadtklimatopes im Niederungsbereich geringer als im Cityklimatop. Dafür gibt es mehrere Ursachen. Der Anteil mit engen Straßenschluchten in Verbindung mit kleinen, meist versiegelten Hinterhöfen ist geringer als im Cityklimatop. Somit verbessern sich die nächtlichen Ausstrahlungsverhältnisse. Sportstätten sowie eingestreute Grünbereiche führen zu einem im Vergleich zum Cityklima reduzierten Versiegelungsgrad. Hauptmanko ist der mangelhafte Luftaustausch. Allerdings bestehen aus den Stadtklimatopen in Niederungsbereichen hinaus mehrheitlich Luftschneisen, über die eine kanalisierte Be- und Entlüftung möglich ist.

Tagsüber unterscheiden sich die Siedlungsflächen im Niederungsbereich kaum vom Innenstadtbereich. Zwar ist der Versiegelungsgrad geringer, gleichzeitig kann aber wegen der teilweise aufgelockerten Bebauung mehr Sonnenstrahlung direkt bis zum Boden gelangen, so daß die Luft hier stärker aufgeheizt wird. Außerdem existieren aus demselben Grund weniger Kernschattenbereiche. Nachts haben diese Siedlungsflächen allerdings größtenteils direkten Kontakt zu den nach außen angrenzenden Freiflächen. Somit können reliefunterstützt Hangabwinde und Bergwinde rascher und wirksamer eindringen. Das gilt in gleichem Maße auch für auftretende Flurwindssysteme.

Siedlungsbereiche außerhalb der Niederungsbereiche müssen meist auf eine zusätzliche nächtliche Abkühlung von außen verzichten. Dieses gilt insbesondere für höher gelegene Hangbereiche sowie für Kuppen- und Plateaulagen. Auch hier haben sich im Stadtgebiet von Bayreuth größere Siedlungsschwerpunkte gebildet, die über eine ähnliche Bauungsstruktur wie im Niederungsbereich verfügen. Durch das Relief entstehen allerdings natürliche Geländekanten, die nicht bebaubar sind. Im Norden des Stadtgebietes reicht der Siedlungsbereich weit den Hang hinauf, woraus sich ebenfalls eine Auflockerung der Bauungsstruktur ergibt. Außerdem erhöht sich die Möglichkeit einer ausreichenden Durchlüftung. Diese Siedlungsbereiche, die meist oberhalb der nächtlichen Luftleitbahnen liegen, profitieren wenig oder gar nicht von diesen thermischen Ausgleichsfunktionen. Somit sind sie in der Regel auf ihre eigene Abkühlungsleistung angewiesen. Wie insbesondere die Meßergebnisse vom Standort Roter Hügel gezeigt haben, sind die geringen nächtlichen Abkühlungsraten in windschwachen Strahlungsnächten eher orographisch als nutzungsbedingt. Wenn auch aus unterschiedlichen Gründen verfügen beide Stadtklimatoptypen über ähnlich starke bioklimatische Belastungsstufen.

Das Stadtgebiet von Bayreuth verfügt in den Außenbereichen über zahlreiche weitere Siedlungsräume. Teilweise sind sie aus ursprünglich kleinen landwirtschaftlich geprägten Ortsteilen entstanden, andererseits handelt es sich um typische, allein zu Wohnzwecken geschaffene Stadtteile. Hier sind auch zukünftig die größten Nutzungsveränderungen zu erwarten. Dabei ist darauf zu achten, daß weder bei der Ausdehnung vorhandener Wohn-

gebiete neue Lasträume entstehen noch durch die Neubebauung von Freiflächen wertvolle Ausgleichsflächen vernichtet werden. Im Status-quo wurden in den als Siedlungsklimatop bezeichneten Teilräumen keinerlei bioklimatische Belastungen gemessen. Das gilt insbesondere für das nächtliche Abkühlungsverhalten in sommerlichen Strahlungsnächten.

Gewerbe- und Industriegebiete ähneln bezüglich ihrer klimarelevanten Strukturen den Siedlungsflächen. Das mit Abstand größte Industrie- und Gewerbegebiet im Bayreuther Stadtgebiet befindet sich im Norden der Stadt beiderseits der Bundesstraße 2. Aufgrund des starken LKW-Verkehrs und der schadstoffemittierenden Betriebe haben lufthygienische Aspekte in diesen Teilräumen einen höheren Stellenwert. Innerhalb von Gewerbe- und Industriegebieten nimmt man thermische Belastungen bis zu einem gewissen Maß in Kauf. Wichtiger ist hier, daß von diesen bioklimatischen Lastflächen keine negativen Auswirkungen auf angrenzende Siedlungsräume ausgehen. Größere Industrie- und Gewerbeflächen verfügen in der Regel über einen breiten Branchenmix. Daraus folgt ein Wechsel von großflächigen Lager- und Parkplatzflächen (z.B. Einkaufszentren, Lagerbetriebe, Speditionen), Produktionshallen und Dienstleistungsgebäuden. Letzere verfügen in modernen Industrie- und Gewerbegebieten über größere Grünbereiche, um sich selbst den Charakter von Industrie- und Gewerbeparks zu geben. Außerdem führen großzügige Verkehrswege wie breite Erschließungsstraßen, Autobahn und Gleiskörper zu einer Auflockerung der Bebauungsstruktur. Daraus resultiert tagsüber zwar eine starke Aufheizung, in den Nachtstunden werden jedoch zufriedenstellende Abkühlungsraten beobachtet. Da im Rahmen dieser Analyse keine lufthygienischen Betrachtungen erfolgten, lassen sich die Schadstoffbelastungen aus der Quellgruppe Verkehr ableiten. Industrie- und Gewerbegebiete verfügen beim Ziel- und Quellverkehr über einen überdurchschnittlich hohen Anteil von LKW-Fahrten. Bei ansässigen Speditionen können zusätzliche Emissionen aus der Kaltstartphase von LKW's hinzu kommen. Da die größeren Industrie- und Gewerbegebiete im Bayreuther Stadtgebiet verkehrsgünstig an den Ausfallstraßen bzw. in der Nähe der beiden Autobahnabfahrten liegen, sollten die Wohnbereiche kaum durch diese Fahrzeugbewegungen betroffen sein. Bei der Neuanlage von Industrie- und Gewerbegebieten ist insbesondere auf ihre gute verkehrstechnische Anbindung zu achten. Auch sollten dabei keine neuen thermischen Lastflächen entstehen, die sich auf angrenzende Nutzungen negativ auswirken.

Ebenfalls im Rahmen der städtebaulichen Entwicklung entstanden sind die Bereiche, die innerhalb der Klimatoptypisierung als Parkklimatope ausgewiesen werden. In dieser Kategorie werden gestaltete, parkartige und in der Regel öffentlich zugängliche Bereiche zusammengefaßt, die innerhalb von Siedlungsräumen liegen oder direkt an sie angrenzen und somit unmittelbare Erholungsfunktionen übernehmen. Dabei handelt es sich im Bayreuther Stadtgebiet um mehrere größere baumbestandene Parks, um Friedhofsflächen sowie um diverse Kleingartengelände. Alle fallen im Vergleich zu Freiflächen durch ihr stark erhöhtes Grünvolumen auf, wodurch in der Regel auch natürliche Schattenbereiche erzielt werden. Ihre klimatischen Gunstfunktionen beschränken sich meist auf die Fläche selbst. Gleichzeitig ist die Beeinträchtigung durch angrenzende thermische Lastflächen ebenfalls gering.

7.3.2 Freilandklimatope

Acker- und Wiesenflächen im Außenbereich werden als Freiflächen zusammengefaßt. Entscheidende Kriterien sind die geringe Oberflächenrauigkeit und eine niedrige Bestandshöhe. Daraus resultieren gute Durchlüftungsverhältnisse sowie größtmögliche

Umsätze aller Komponenten der Energiebilanzgleichung. Anders als in den Waldbereichen spielt die jeweilige Reliefsituation bei den Freiflächen eine Rolle für die Ausprägung der entsprechenden Klimafunktionen.

In allen Freiflächen liegt die Hauptumsatzfläche für die Energieströme in Bodennähe, so daß die bodennahe Luftschicht und somit auch der Hauptlebensraum des Menschen von ihnen geprägt wird. Abgesehen von reliefbedingten Horizonteinschränkungen herrschen auf Freiflächen ungestörte Ein- und Ausstrahlungsverhältnisse. Tagsüber resultiert daraus eine schnelle Erwärmung der Oberflächen, die wiederum einen Großteil dieses Energieüberschusses an die Luft abgeben. Der Mensch ist hier neben den hohen Lufttemperaturen der ungestörten Sonnenstrahlung ausgesetzt. Daraus resultiert unter bioklimatischen Aspekten eine hohe Strahlungstemperatur, die an warmen und sonnigen Tagen schnell für eine bioklimatische Belastung sorgt. Fehlt eine natürliche Luftbewegung, reagiert der Mensch mit verstärktem Schwitzen auf diesen Wärmestreß. Der Wärmestreß hängt selbstverständlich stark von der Intensität seiner körperlichen Aktivitäten ab. Während der Mittags- und Nachmittagsstunden stellen Freiflächen somit einen bioklimatischen Ungunstraum dar. Kuppenbereiche schneiden bei der bioklimatischen Bewertung wegen der hier niedrigeren Lufttemperaturen und ihrer stärkeren Durchlüftung etwas besser ab als die Freiflächen in Niederungsbereichen. Bei Sonnenuntergang verfügt das Bayreuther Stadtgebiet auch an Strahlungstagen flächendeckend über sehr ähnliche thermische Verhältnisse. Zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang entwickeln sich bei Strahlungswetterlagen alle Freiflächen zu kaltluftproduzierenden Bereichen. Dafür ist allein ihr besonderer Energiehaushalt verantwortlich. Unter den genannten Bedingungen sind Freiflächen die Areale, auf denen die Strahlungsbilanz besonders stark negativ wird, was mit niedrigen Werten der Oberflächentemperatur verbunden ist. Die übrigen Energieströme reagieren auf die negative Strahlungsbilanz und führen der Oberfläche ihrerseits Wärme zu. Der Rückgang der Lufttemperatur (fühlbare Wärme) und die beginnende Taubildung (latente Wärme) sind meß- bzw. sichtbare Beweise dafür. In Kuppenlage führen horizontale Luftbewegungen immer wieder zu Durchmischungen der Luft, wodurch der Temperaturrückgang in der bodennahen Schicht gestört und somit verlangsamt wird. In Hangbereichen setzt in Folge der Schwerkraft eine Eigenbewegung der Luft, die diese hangwärts leitet, ein. In Niederungsbereichen erhält die örtliche Kaltluftbildung Unterstützung durch die Hangabwinde. Ist die Reliefenergie entlang des Talgrundes groß genug, und ist der Niederungsbereich gleichzeitig weitgehend frei von größeren Strömungshindernissen, entwickelt sich hier eine talwärts gerichtete Luftbewegung. Da diese Luftbewegung ausschließlich durch die Abkühlung der bodennahen Luftschicht erfolgt, man spricht in diesen Fällen von thermisch induzierten Strömungssystemen. Sie setzen sich im Bayreuther Stadtgebiet aus Hangabwinden und in Richtung der Talachse wehenden Bergwinden zusammen. Bei wärmebelastenden Wettersituationen stellen Freiflächen somit nachts thermische Gunsträume dar. Im Zusammenhang mit thermischen Lasträumen können sie zusätzlich die Funktion thermischer Wirk- und Ausgleichsräume übernehmen. Dazu müssen die kühlen Luftmassen der Freiflächen überwärmte Stadtquartiere erreichen können und hier eine zusätzliche Abkühlung hervorrufen.

Eine wichtige Einheit stellen im Bayreuther Stadtgebiet die zusammenhängenden Waldflächen dar. Sie spielen hinsichtlich der meisten Klimatelemente eine besondere Rolle. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Energieumsätze in der bodennahen Luftschicht als auch für das Windfeld. Waldgebiete stellen für das Strömungsfeld ein natürliches Hindernis dar. Sie werden größtenteils überströmt und nur in geringem Maße durchflossen. Daher stellt der Waldinnenraum auch bei höheren Windgeschwindigkeiten eine Zone relativer Luftruhe dar, wodurch günstige Voraussetzungen für die Entstehung eines speziellen Lokal-

klimas bestehen. Da Wind in erheblichem Maße das Wärme- und Kälteempfinden des Menschen beeinflusst, spielt Luftruhe auch für das humanbioklimatische Empfinden eine entscheidende Rolle. In der Regel empfindet der Mensch eine Luftbewegung als abkühlend, solange seine Haupttemperatur über dem Niveau der Lufttemperatur liegt. Bei sommerlichen Verhältnissen Lufttemperatur bietet somit Wind einen willkommenen Abkühlungsreiz. Bei niedrigen Lufttemperaturen - insbesondere bei Frost - hingegen wird Wind als unangenehmer Kältereiz empfunden. Dabei nimmt der Kältereiz mit höheren Windgeschwindigkeiten zu. Bei höheren Windgeschwindigkeiten stellen Waldgebiete stets einen klimatischen Gunstraum besonderer Güte dar.

Auch bei windarmen Strahlungswetterlagen entwickelt sich gantztägig ein typisches Waldinnenklima. Hauptursache dafür ist der schattenspendende Kronenraum. Dies gilt für Laubwälder vorwiegend im Sommerhalbjahr, für Misch- und Nadelwälder ganzjährig. Der Kronenraum stellt für alle Energieströme die Hauptumsatzfläche dar. Die kurzwellige Strahlung der Sonne wird hier zum größten Teil absorbiert, so daß nur noch ein kleiner Teil den Waldboden erreichen kann. Somit steht im Stammraum nur wenig Energie zur Verfügung, um die Bestandsluft zu erwärmen. Da auch nur wenig Licht auf den Waldboden trifft, steigt seine Temperatur kaum über das Lufttemperaturniveau an. An Strahlungstagen wird das humanbioklimatische Empfinden beim Menschen neben der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit in erster Linie durch die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung bestimmt. Diese liegt bei Vollschaten etwa auf dem Niveau der Lufttemperatur. Somit empfindet der Mensch die langwellige Wärmeabstrahlung nicht als Wärmebelastung. An heißen Sommertagen stellen Waldgebiete die wichtigsten klimatischen Ausgleichsräume im Stadtgebiet dar. Ihre Gunstfunktion reicht aber nicht über den Bestandsraum hinaus, sondern beschränkt sich auf die Waldfläche selbst.

Auch im Kronenraum wird der größte Teil der Strahlungsenergie nicht zur Erwärmung der Luft, sondern für die pflanzliche Transpiration verwendet. Durch die Verdunstung wird die Luft allerdings mit Wasserdampf angereichert. Somit gibt der Wald auch nach außen kaum Wärme ab. Da seine Albedo niedrig ist, wird auch wenig Sonnenlicht reflektiert und dadurch im kurzwelligen Spektralbereich kaum Energie abgegeben.

In den Nachtstunden stellt der Wald aufgrund seiner besonderen Struktur ebenfalls eine klimatische Oase dar. Die für tagsüber ausführlich beschriebenen Eigenschaften führen jetzt zu einer stark gedämpften Abkühlung im Waldbestand. Wie tagsüber ist die Oberseite des Kronenraumes die Hauptumsatzfläche für die energetischen Prozesse. Für die langwelligen Strahlungsflüsse bedeutet dies im Bestand eine nahezu ausgeglichene Bilanz, wodurch eine stärkere Abkühlung der Bestandsluft verhindert wird. An der Oberseite des Kronenraumes wird die Strahlungsbilanz bereits vor Sonnenuntergang negativ, so daß der Luft Wärme entzogen wird. Ist das Relief für das Waldklima tagsüber weitgehend ohne Bedeutung, bestimmt es in Strahlungsnächten die thermischen Verhältnisse mit. Sowohl in Kuppen als auch in Niederungsbereichen kann die abgekühlte Luft aus dem Kronenraum allmählich in den Bestandsraum und schließlich bis zum Boden absinken. Da die Dichteunterschiede innerhalb der Luft gering sind, ist dieser Vorgang allerdings nicht sehr wirkungsvoll. Auf geneigten Flächen gleitet die über dem Kronenraum gebildete Luft der Schwerkraft folgend hangabwärts. Solche Hangabwinde haben allerdings in der Reliefsituation des Untersuchungsgebietes nur einen geringen Impuls, so daß ihre Reichweite und die damit verbundene Temperatenausgleichsleistung klein sind.

7.3.3 Besondere Klimaeigenschaften

Ergänzend zur flächenhaften Klimatopklassifikation wurden die Hauptstraßen als linienhafte Emissionsbänder dargestellt. Neben dem Hausbrand und der Industrie stammen die meisten Schadstoffe aus dem Straßenverkehr. In Ermangelung genauerer Informationen wurde die Autobahn A9 sowie die Bundesstraßen im Bayreuther Stadtgebiet hervorgehoben. Insbesondere innerhalb von thermischen Lasträumen erhöht sich die bioklimatische Ungunst dann, wenn zusätzliche Schadstoffbelastungen hinzukommen. Darüber hinaus können verkehrsbedingte Schadstoffe mit bodennahen Luftströmungen verfrachtet werden, wenn Ventilationsbahnen von stark frequentierten Straßen gekreuzt werden. In diesen Fällen kann sich die Luft mit Schadstoffen anreichern und somit ihre bioklimatische Ausgleichsleistung verlieren.

Desweiteren werden in der Klimafunktionskarte auch kleinräumige Strömungsbesonderheiten eingetragen. Im Stadtgebiet von Bayreuth konnten 3 unterschiedliche, jedoch jeweils thermisch induzierte Windsysteme nachgewiesen werden. Gemeinsam ist allen Strömungsbesonderheiten auch, daß sie ausschließlich während der Nachtstunden auftreten. Ihr Nachweis erfolgte entweder mit Hilfe der stationären Windmessungen oder mit Hilfe der durchgeführten Rauchgasexperimente. Hangabwinde treten bei windschwachen Strahlungswetterlagen schon kurz nach Sonnenuntergang auf. Resultat solcher Hangabwinde sind Bergwindsysteme, die sich zeitlich verzögert in Richtung der Talachse entwickeln. Sie beinhalten eine größere Fließdynamik als die Hangwinde und stellen somit aus Sicht der Humanbiometeorologie sehr wertvolle Ausgleichsströmungen dar, die thermische Lasträume mit kühler Luft aus den Wirkungsräumen versorgen. Bei entsprechend stark entwickelten Windsystemen ist davon auszugehen, daß ihr Einzugsgebiet weit über den meßtechnisch erfaßten Bereich hinausgeht. Im Zusammenhang mit den nachgewiesenen Phänomenen wurden zusätzlich Strömungsbesonderheiten eingetragen, die im Zusammenhang mit gemessenen Windsystemen vermutet werden. Ihre Darstellung hat somit keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Die Klimafunktionskarte stellt den Istzustand der kleinklimatischen Verhältnisse im gesamten Bayreuther Stadtgebiet dar. Für insgesamt 6 Teilräume werden auf ihrer Basis konkrete Hinweise zu Planungsabsichten im Bayreuther Stadtgebiet gegeben.

8. PLANUNGSHINWEISE FÜR TEILRÄUME

Vom Stadtplanungsamt wurde eine Kartenskizze zusammengestellt, die Flächen enthält, auf denen Nutzungsänderungen beabsichtigt sind. Die Teilräume werden anhand der Informationen aus dem Digitalen Höhenmodell/Hangneigungsklassen wie mit Hilfe der klassifizierten Klimatope beurteilt. Soweit vorhanden, werden auch Ergebnisse aus dem Meßnetz mitverwendet. Auf dieser Basis werden Empfehlungen abgeleitet, ob und gegebenenfalls in welchem Umfang durch die Nutzungsänderungen nachteilige Modifikationen des örtlichen Klimas entstehen können. Im Falle negativer Klimaveränderungen wird deren Reichweite abgeschätzt und ihre Bedeutung für angrenzende Teilräume beurteilt. Im folgenden werden die einzelnen Teilräume dieser Bewertung unterzogen. Die Bearbeitung erfolgt von Westen nach Osten.

8.1 Teilraum Oberpreuschwitz

Dieser Teilraum erstreckt sich vom östlichen Bebauungsrand des Stadtteiles Oberpreuschwitz nach Osten. Hier reicht er bis an das Klinikum Bayreuth (Jakob-Herz-Straße) bzw. bis an den westlichen Bebauungsrand des Stadtteiles Meyernberg (Schmatzenhöhe) heran (Karte 13a). Das digitale Höhenmodell weist diesen Bereich als schwachgeneigtes Hochplateau aus. Die Schmatzenhöhe, die im Grenzbereich zum Eckersdorfer Ortsteil Donndorf liegt, stellt mit 434,2m ü.NN den höchsten Punkt dar. Nördlich von Oberpreuschwitz befindet sich der markante Talraum der Preuschwitzerin, die unterhalb der Bayreuther Kläranlage in den Roten Main mündet. Im Süden hat sich der Teufelsgraben stark in die Landschaft eingeschnitten. Der Teufelsgraben gehört zum Kaltlufteinzugsgebiet des Mistelbachtals, in das er bei Laimbach mündet.

Während die stärker geneigten Hangbereiche meist bewaldet sind, dominiert ansonsten die landwirtschaftliche Nutzung. Diese Bereiche sind in der Klimafunktionskarte fast vollständig als Freilandklimatop ohne Bezug zu thermischen Lastflächen klassifiziert. Die Plateaulage verhindert eine stärkere nächtliche Abkühlung, was durch die Ergebnisse der Meßfahrten bestätigt wird (vgl. Karte 4). In Nächten mit Inversionsbildung liegt dieser Teilraum zumindest während des Sommerhalbjahrs häufig über der Inversionsobergrenze, d.h. er bleibt verhältnismäßig warm (vgl. Karte 3, insbesondere Tour 3 und Tour 4). Die angrenzenden Siedlungsräume sind als Siedlungsklimatop ausgewiesen. Die aufgelockerte Baustruktur läßt keine besondere thermische Belastung erwarten. Bei den Meßfahrten unterschieden sich die bebauten Bereiche thermisch kaum von Freiflächen.

Aus fachlicher Sicht bestehen gegen eine Umnutzung der bisherigen Freiflächen in eine lockere Wohnbebauung keine Bedenken. Bei einer konkreten Planung sollte im südlichen Bereich das Einzugsgebiet des Teufelsgrabens von einer potentiellen Bebauung ausgespart bleiben. Das selbe gilt auch für den Grabenbereich, der sich wenig westlich der Jakob-Herz-Straße entwickelt, dann zwischen der REHA-Klinik und dem Klinikum Bayreuth in Richtung Südosten verläuft und schließlich ebenfalls in den Mistelbach einmündet.

8.2 Teilraum Altstadt/Saas

Die Stadtteile Altstadt und Saas befinden sich im Südwesten des Untersuchungsraumes (Karte 13b). Während Saas von größeren Freiflächen umgeben ist, stellt der Stadtteil Altstadt bereits einen Übergangsbereich zum Innenstadtquartier dar. Die südwestliche Stadtgrenze zur Nachbargemeinde Gesees wird durch einen markanten Höhenrücken geprägt. Seine größten Erhebungen liegen bei 431m ü.NN. Während große Teile bewaldet sind, befindet sich im Südosten (Große und Kleine Ebene) eine zusammenhängende

kaum geneigte Freifläche. Nach Norden und Nordosten fällt das Gelände ziemlich steil ab (Hangneigungsklasse >8%). Während die Steilhänge bewaldet sind, verfügen die unteren, weniger stark geneigten Hangbereiche über offenes Freiland.

Südlich der Spitzwegstraße ist das Gelände nur kleinflächig versiegelt, südlich der Glockenstraße schließt sich das Wohngebiet im Stadtteil Saas an. Das Plangebiet reicht über die Glockenstraße weit nach Süden und endet erst an der Ludwig-Thoma-Straße. Dieser Teilraum wurde nur in einigen Bereichen durch die Meßfahrten erfaßt. Die Daten im Bereich Lerchenbühl zeigen jedoch eine hohe Abkühlungsleistung. Das gilt auch für die Meßpunkte entlang der Spitzwegstraße. Aus dem bebauten Bereich des Stadtteiles Saas liegen ebenfalls Temperaturdaten vor. Die Wohngebiete verfügen über ein gutes nächtliches Abkühlungsverhalten. Ursache für das insgesamt niedrige Temperaturniveau ist die starke nächtliche Kaltluftbildung über den vorhandenen Freiflächen. Das Relief unterstützt den Abtransport dieser Kaltluft. Das gilt sowohl großflächig für die Hang- und Talräume als kanalisiert in den vorhandenen Rinnenlagen. Die Kaltluftproduktion ist auch im Zusammenhang mit der Kaltluftzufuhr über das Mistelbachtal zu sehen. Dies gilt zumindest für das Plangebiet nördlich der Glockenstraße. Vom Bereich Große Ebene sind intensive Kaltluftabflüsse über den bewaldeten oberen Hangbereich sowie insbesondere über die Freiflächen im unteren Hangbereich zu erwarten. Besonders in westlicher Verlängerung des A sternweges sind kanalisierte Kaltluftabflüsse wahrscheinlich, die den zentralen Bereich von Saas mit kühler Luft versorgen. Dies müßte durch gezielte Sonderuntersuchungen verifiziert werden.

Demzufolge wurde der gesamte Planungsraum in der Klimafunktionskarte als Freilandklimatop mit Bezug zu thermischen Lastflächen ausgewiesen. Von den Freiflächen im Nordteil profitiert in erster Linie die Kernstadt, die Freiflächen im Süden sorgen für die günstigen bioklimatischen Bedingungen in Saas. Darüber hinaus ist eine Fernwirkung für die über den Röhrensee stadteinwärts gerichtete Ventilationsbahn nicht auszuschließen.

Eine Bebauung - auch nur in Teilen dieses Teilraumes - würde sich negativ auf die bioklimatischen Verhältnisse auswirken. Ob und in welchen Bereichen eine Nutzungsänderung aus fachlicher Sicht tolerierbar wäre, kann nur im Rahmen eines Detailgutachtens endgültig geklärt werden.

8.3 Teilraum Thiergarten

Im Stadtteil Thiergarten existiert bisher noch kein zusammenhängendes Baugebiet. Das Plangebiet umfaßt ausschließlich offenes Freiland (Karte 13c). Die Reliefsituation ist als leichte Kessellage zu charakterisieren. Lediglich nach Norden öffnet sich die Landschaft. Östlich des Plangebietes liegt der in Süd-Nord-Richtung verlaufende Talraum der Tappert, der sich relativ tief eingeschnitten hat und dessen Talgrund ebenfalls waldfrei ist. Fast vollständig bewaldet sind hingegen der Römersberg und der weiter westliche liegende Krodelsberg. Die größten Höhen liegen bei 468m ü. NN (Spitzigerstein). Das Plangebiet liegt etwa 80m niedriger, die Hangneigung ist hier gering.

Aufgrund der großen Entfernung zum verdichteten Siedlungsraum ist der gesamte Raum in der Klimatopkarte als Freilandklimatop ohne Bezug zu thermischen Lastflächen ausgewiesen. Einer Umnutzung der Freiflächen in ein locker bebautes Wohngebiet steht aus fachlicher Sicht nichts entgegen.

8.4 Teilraum Pfaffenleck/Bühlersmühle/Oberkonnersreuth

In diesem Fall sind drei Flächenbereiche, in denen Nutzungsänderungen beabsichtigt sind, kartographisch zu einem Teilraum zusammengefaßt (Karte 13d). Aufgrund ihrer unterschiedlichen topographischen Lage werden sie weitgehend einzeln betrachtet. Alle Standorte sind durch die Nähe zu Hauptverkehrsachsen geprägt. Dies ist einerseits die Bundesautobahn A9, die im Zusammenhang mit der Abfahrt Bayreuth-Süd zu sehen ist. Andererseits sind es die auf der Nürnberger Straße parallel geführten, stark frequentierten Bundesstraßen 2 und 85 sowie im Norden die B 22 (Königsallee/Kemnather Straße). Mehrere Gewerbegebiete dürften einen erhöhten Anteil von LKW hervorrufen, woraus eine lufthygienisch nicht unproblematische Situation entstanden ist.

Östlich der Nürnberger Straße verläuft ein Höhenrücken, der markant die Talräume der Tappert und des Roten Main voneinander abgrenzt. Von der unbewaldeten Hochfläche zwischen Meyernreuth und Eichelberg kommt es in Strahlungsnächten häufig zu flächenhaften Kaltluftabflüssen, deren Auswirkungen in Form von nächtlichen Ostwinden noch an der Windmeßstation Hohlmühle nachgewiesen wurden. Entlang der Nürnberger Straße wurde mit Hilfe der Meßfahrten eine gute nächtliche Abkühlungsleistung festgestellt.

Aufgrund der starken, straßenverkehrsbedingten Emissionen, die im Plangebiet Oberkonnersreuth von den Bundesstraßen 2 und 85 sowie von der BAB 9 stammen, dürfte die lufthygienische Situation hier jedoch sehr ungünstig sein. Im Rahmen einer konkreten B-Planung sollten entsprechende Untersuchungen durchgeführt werden. Im Fall einer Planung von zusätzlichen Gewerbeflächen sind die Anforderungen geringer als bei der Ausweisung eines Wohngebietes. Von geringerer Bedeutung ist die Lage dieses Plangebietes im Kaltlufteinzugsgebiet des Tappert. Die teilweise in Dammlage verlaufende Eisenbahntrasse dient als Barriere, so daß sich die für das Tapperttal relevanten Kaltluftentstehungsgebiete in erster Linie westlich der Bahnlinie befinden.

Als lufthygienisch ähnlich problematisch ist das Plangebiet Pfaffenleck einzuordnen. Dieses Areal ist in allen Himmelsrichtungen von stark befahrenen Straßen umgeben, so daß sich hier vorwiegend eine Nutzung als Gewerbegebiet anbietet. In diesem Fall ist eine lufthygienische Begutachtung hinsichtlich der sich nördlich anschließenden Sport- und Freizeitflächen angeraten. Um die ohnehin bereits kritische Luftleitbahnfunktion des Tappert/Sendelbaches nördlich der Konrad-Pöhler-Straße nicht noch weiter zu beeinträchtigen, sollte das Gebiet westlich der Nürnberger Straße aus fachlicher Sicht nicht genutzt werden. Dies gilt auch in Bezug auf die äußerst sensible Nutzung als Standort für ein Altenwohnheim unterhalb des Glasenweihers. In welchem Umfang dieses Plangebiet, das in der Klimatopkarte vorwiegend als Freilandklimatop mit Bezug zum thermischen Lastraum dargestellt wurde, tatsächlich die Funktion eines Kaltluftentstehungsgebietes hat und ob diese Flächen Leitbahnen für Kaltluftabflüsse aus dem Bereich Eichelberg sind, müßte durch kleinklimatische Detailuntersuchungen geklärt werden.

Ohne Bezug zu thermischen Lastflächen sind die Freiflächen im Bereich Bühlersmühle. Die leichte Hanglage in Verbindung mit ihrer Nordexposition führt zur Zeit in Strahlungsnächten zu örtlicher Kaltluftbildung und zu einem in Richtung Colmdorf gerichteten Kaltluftabfluß. Die hier vorhandenen Siedlungsräume sind aufgrund ihrer aufgelockerten Bebauungsstruktur nicht auf zusätzliche Abkühlungsleistungen angewiesen, so daß gegen eine ebenfalls nicht zu massive Wohnbebauung in diesem Teilraum keine fachlichen Bedenken bestehen.

8.5 Teilraum Aichig

Dieses Plangebiet liegt innerhalb des Talraumes des Roten Mains, der hier von Südosten nach Nordwesten verläuft (Karte 13e). Der Waldanteil ist in diesem Bereich des Bayreuther Stadtgebietes relativ gering, so daß große landwirtschaftlich genutzte Freiflächen vorherrschen. Das Plangebiet ist leicht nach Nordosten exponiert und wurde in der Klimafunktionskarte als Freilandklimatop ohne Bezug zu thermischen Lastflächen ausgewiesen. Im Status-quo produzieren diese Flächen in Strahlungsnächten Kaltluft, die der geringen Hangneigung folgend in die Talaue des Roten Main abfließt. Mit einer Umnutzung in Wohnbauflächen, geht diese Klimafunktion verloren. Wegen des geringen Flächenanteiles am Kaltlufteinzugsgebiet des Roten Main und der Ferne der Bayreuther Kernstadt ist diese Maßnahme aus fachlicher Sicht unbedenklich.

8.6 Teilraum St. Johannis

Der Stadtteil St. Johannis liegt im Osten des Bayreuther Stadtgebietes (Karte 13f). Neben der Wohnbebauung befinden sich hier die Schloßanlagen (Eremitage) mit großen Parkbereichen. Beide Bereiche befinden sich in leichter Kuppenlage etwa 30m über der Talaue des Roten Main. Das Plangebiet schließt sich nach Südwesten an die vorhandene Wohnbebauung an. Die südwestliche Hangexposition führt dazu, daß es sich um eine klimatisch günstige Situation handelt. Das Plangebiet wird auf Grund seiner Lage als Freilandklimatop mit Bezug zu den thermischen Lastflächen der Bayreuther Kernstadt ausgewiesen. Obwohl aus diesem Teilraum keine konkreten Meßergebnisse vorliegen, ist davon auszugehen, daß sich hier in Strahlungsnächten Kaltluft bildet, die teilweise zum Haupttal des Roten Main abfließt, teilweise aber auch über ein kleines Seitental abtransportiert wird. In beiden Fällen muß die in Dammlage geführte Autobahn A9 überströmt werden. Nach einer Bebauung geht diese Klimafunktion zwar verloren, was sich aber wegen der verhältnismäßig kleinen Fläche auf die nächtlichen Zirkulationsverhältnisse im Talsystem des Roten Main nicht signifikant auswirken wird. Aus fachlicher Sicht bestehen gegen eine entsprechende Nutzungsänderung keine Bedenken.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Basis für jede stadtklimatische Untersuchung ist die möglichst genaue Kenntnis der regionalen Klimaverhältnisse. Entsprechende Informationen liefert der Klimaatlas für Bayern. Teilweise liegt das Datenmaterial hier in Form von Klimatabellen vor, teilweise wird es kartographisch präsentiert. Demnach beträgt z.B. die Jahresmitteltemperatur in Bayreuth 7,8°C und Summe des Jahresniederschlages liegt hier bei 709mm. Diese und weitere Klimadaten, die über mehrere Jahrzehnte gemittelt wurden, stammen von Amtlichen Wetterstationen. Die natürliche Klimavariabilität der Region Bayreuth wird in erster Linie durch das Relief geprägt. Mit zunehmender Höhe wird es kälter und im Luv des Fichtelgebirges steigt die jährliche Niederschlagsmenge deutlich an.

Da stadtklimatische Sondermessungen immer nur für einen relativ kurzen Zeitschnitt vorhanden sind, ist die möglichst genaue Kenntnis der Witterungsverhältnisse für die Untersuchungsperiode unverzichtbar, um zu fachlich relevanten Aussagen zu kommen. Für den Meßzeitraum Juni bis September 2000 erfolgte dies anhand des vom Deutschen Wetterdienst herausgegebenen Monatlichen Witterungsbericht. Nur der Juli brachte mehrheitlich unbeständiges Wetter. Ansonsten überwog bei Hochdruckeinfluß sonnenreiches und niederschlagsarmes Wetter. Somit standen mehrere hochsommerliche Episoden zur Verfügung, aus denen stadtklimatische Besonderheiten abgeleitet werden konnten.

Im Rahmen einer Stadtklimaanalyse kommt es in erster Linie darauf an, die lokalen Eigenheiten des Klimas bei autochthonen Wetterlagen aufzuzeigen. In der Regel überlagern sich bei kleinräumigen Klimaanomalien in einem Stadtgebiet natürliche und anthropogen beeinflusste Klimaphänomene. Als planungsrelevante Klimatelemente sind in erster Linie die Lufttemperatur und das Windfeld zu nennen. Die Untersuchungsmethoden innerhalb der Stadtklimatologie haben sich in den letzten Jahren kaum verändert, so daß man auf bewährte Werkzeuge zurückgreifen kann.

Die Erfassung der stadtmeteorologischen Parameter erfolgte in Bayreuth mit Hilfe von acht Meßstationen. Sie waren so auf das Stadtgebiet verteilt, daß sie für möglichst viele Strukturtypen repräsentativ waren. Stellvertretend für die stadtnahen Erholungsräume war der Standort Hohe Warte. Zwei typische Wohnquartiere wurden durch je einen Standort in der Innenstadt und im Stadtteil Roter Hügel repräsentiert. Desweiteren wurden Daten am größten Bayreuther Gewerbegebiet St. Georgen erfaßt. Da neben Informationen zu den thermischen Lasträumen auch Meßwerte aus den potentiellen Luftleitbahnen von großem Interesse waren, wurden vier Stationen entsprechend platziert. Die Stationen Roter Main, Mistelbachtal und Hohlmühle befanden sich in Talsystemen oberhalb der Kernstadt, der Standort Kläranlage lag unmittelbar unterhalb der Innenstadt im Tal des Roten Mains.

Erwartungsgemäß konnte mit Hilfe der Stadtstandorte der sommerliche urbane Wärmearchipel nachgewiesen werden. Während in der Innenstadt die Temperatur an insgesamt 15 Tagen auf über 30°C anstieg, wurden solche Werte im Freiland nur an weniger als 5 Tagen registriert. Die Spannweite für die Häufigkeit von Sommertage (Temperaturmaxima von mindestens 25°C) reichte von 46 Tagen in der Innenstadt bis zu nur 17 Tagen in den bewaldeten Parkanlagen des Krankenhauses Hohe Warte. Humanbioklimatisch belastender ist eine unzureichende nächtliche Abkühlung. Als Kenngröße wurden Temperaturminima oberhalb von 15°C verwendet. Während dieser Schwellwert im Stadtteil Roter Hügel in 14 Nächten nicht unterschritten wurde, waren es im Außenbereich maximal 3 Nächte mit entsprechend hohen Minima.

Im engen Zusammenhang mit den thermischen Besonderheiten sind die Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsverhältnisse im Bayreuther Stadtgebiet zu sehen. Der jeweils

gemessene Windvektor ist das Ergebnis unterschiedlicher Strömungsphänomene. In Form von tageszeitenabhängigen Windrosen lassen sich die standorttypischen Zirkulationssysteme am besten präsentieren. Am Standort Kläranlage konzentrierte sich beispielsweise die nächtliche Anströmung auf den Sektor NNW. Hierbei ergänzten sich die Antriebskräfte von Flurwinden und Hangabwinden. Östliche Anströmungen, wie sie im Osten der Stadt beobachtet wurden, kamen hier nicht an. Am Standort Roter Main wurden hingegen während der Nachtstunden in mehr als zwei Dritteln aller Fälle Anströmungen aus dem Sektor zwischen Nord und Ost beobachtet. 3km weiter westlich, d.h. maintalabwärts, war von dieser Anströmung nichts mehr zu erkennen. Nächtliche Anströmungen zwischen Nord und Ost fehlten auch an der Station im Gewerbegebiet St. Georgen-West völlig. Hier konzentrierte sich die nächtliche Anströmung auf die Sektoren WNW und NNW. Für diesen Sektor verdoppelte sich die relative Häufigkeit im Vergleich tagsübernachts. Hierfür waren allein Hangabwinde aus den unbewaldeten Freiflächen unterhalb des Forstes Sankt Georgen verantwortlich. Am Standort Hohlmühle deutete die hohe nächtliche Anzahl von Calmen darauf hin, daß hier das überregionale Windfeld relativ schwach ausgeprägt war. Trotz der 28% Calmen blieb es hier in 40% aller Nachtstunden bei Anströmungen aus Ost bis Süd. Das heißt, die thermisch induzierten Hangab- und Bergwinde entwickelten sich trotz des erhöhten Calmenhäufigkeit mit großer Beständigkeit. In dieser Intensität war das Auftreten lokaler Windsysteme nicht erwartet worden. Hier besteht noch weiterer Untersuchungsbedarf, insbesondere dazu, ob sich diese Phänomene zu allen Jahreszeiten gleich stark ausbilden können.

Neben der Auswertung und Interpretation des Gesamtdatenkollektivs sind in der angewandten Stadtmeteorologie die kleinklimatischen Situationen bei Extremwetterlagen von besonderem Interesse. Der Meßzeitraum von 3 Monaten bietet allerdings ausschließlich sommerliche Episoden an.

Im Sommer 2000 stellte sich bereits im Juni eine mehrtägige Schönwetterperiode ein. Vom 17. bis 21. Juni gab es an 5 Tagen in Folge strahlungsreiches Hochsommerwetter. Die größten Temperaturunterschiede wurden jeweils am frühen Nachmittag sowie zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang registriert. Die Differenzbeträge überschritten teilweise 5K. Tagsüber stammen die Höchstwerte meist von der Station Innenstadt, während zu dieser Zeit die niedrigsten Werte am Standort Hohe Warte gemessen wurden. Nachts gehörten die tiefsten Werte zum Freilandstandort Kläranlage, am wärmsten blieb es am Standort Hohe Warte. Da die Feststationen nicht an den thermisch extremsten Standorten im Bayreuther Stadtgebiet installiert waren, dürften die tatsächlichen Temperaturunterschiede noch über den gemessenen Werten gelegen haben.

Da die Meßfahrten in der Nacht vom 19. zum 20. August durchgeführt wurden und die Rauchgasversuche wetterbedingt auf die Abendstunden des 24. gelegt wurden, wurde der Zeitraum 19. bis 25. August als zweite Einzelepisode betrachtet. Die Ergebnisse für die Lufttemperatur ähneln sehr den Resultaten aus der Juniepisode. Allerdings waren die thermischen Unterschiede im Untersuchungsraum etwas geringer als während der Juniepisode. Dies gilt insbesondere für die nächtliche Abkühlungsphase, da es in allen Nächten im Außenbereich zu erheblichen Taubildungen kam. Bei solchen Wetterlagen ist die thermische Ausgleichsleistung der kaltluftproduzierenden Freiflächen für die thermische belastete Innenstadt geringer als bei einer wasserärmeren Atmosphäre.

Während der Nacht vom 19. zum 20.08.2000 wurden in der Zeit zwischen 20 Uhr und 06 Uhr insgesamt 4 Temperaturmeßfahrten durchgeführt. Dabei wurden an mehr als 120 Punkten bei langsamer Autofahrt die thermischen Verhältnisse gemessen. Die Ergebnisse der Meßfahrten lassen sich zusammenfassen: Die Kategorie "hohe Mitteltemperatur" wurde nur für wenige Bereiche vergeben. Dazu gehören die Innenstadtquartiere (Stadtteil

St. Georgen, Citybereich), die zur Hohen Warte ansteigenden Wohnbereiche sowie der Stadtteil Roter Hügel. Auch der autobahnahe Bereich des Industriegebietes St. Georgen-West gehört dazu. Dabei ist die Abkühlungsleistung in den Niederungsbereichen größer als in den Hang- und Plateaulagen. Der übrige bebaute Bereich liegt fast völlig in der mittleren Kategorie. Die Freiflächenbereiche, die aufgrund der Meßfahrtenergebnisse in die Klasse "niedrige Mitteltemperatur" gehören und in der Kategorie Abkühlungsleistung mit "mäßig" oder "stark" bewertet wurden, gehören zu den besonders klimaaktiven Flächen. Hier wird in Strahlungsnächten in großem Umfang Kaltluft gebildet. Bei geeigneter Reliefstruktur fließt die Kaltluft auf diesen Flächen talabwärts. Liegen solche Flächen oberhalb von thermischen Lasträumen, erhalten sie in der Klimafunktionskarte das Prädikat "klimatische Ausgleichsfläche". Meßtechnisch nachgewiesen wurde dies für große Teile der Freiräume im Südwesten und Süden des Stadtgebietes. Im Osten des Stadtgebietes wurden beim Überqueren des Roten Mains (Grunauer Mühle) und der Steinach (Rodgersberg) entsprechende thermische Qualitäten festgestellt.

Rauchgasversuche brachten weitere Erkenntnisse über die Belüftungsverhältnisse zwischen Außenbereich und Kernstadt. Das Mistelbachtal verfügt zusammen mit seinen Seitentälern über das größte Kaltlufteinzugsgebiet. Darüber hinaus sind die Reliefunterschiede hier so groß, daß sich eine gute Abflußdynamik entwickeln kann. Stadtnah stellen vorhandene Baum- und Strauchbereiche ein wirkungsvolles Strömungshindernis dar. Im Rahmen der Stadt- und Umweltplanung muß abgewogen werden, welchen Stellenwert man der Kalt- und Frischluftzufuhr in diesem Teilraum geben möchte. Stellvertretend für andere aus Süden einmündende Talräume, die über eine geringere Reliefenergie verfügen, wurde das Sendelbachtal/Tappert untersucht. Um wirksame thermische Ausgleichsleistungen erfüllen zu können, bedarf es hier möglichst hindernisfreier Abflußbedingungen. Quer zum Talraum verlaufende Straßen- und Bahndämme führen zum Kaltluftstau, womit zumindest eine zeitliche Verzögerung der nächtlichen Kaltluftabflüsse verbunden ist. Sie entwickeln ihre thermische Ausgleichsfunktion dann am besten, wenn der bodennahe Kaltluftabfluß durch eine südlicher Oberströmung unterstützt wird.

Wichtiger Bestandteil gesamtstädtischer Klimagutachten ist die Umsetzung der gemessenen Daten in flächenhafte Informationen. Seit einiger Zeit wird dieser Arbeitsschritt durch den Einsatz von Geographischen Informationssystemen erleichtert. Sie ermöglichen die Synthese unterschiedlicher, flächig vorliegender Informationen. Dies sind in erster Linie topographische Informationen, die in bezug auf das digitale Geländemodell vom jeweiligen Landesvermessungsamt, hinsichtlich der realen Nutzung von Seiten der Stadt Bayreuth zur Verfügung gestellt wurden. Um die Anwendung des Geographischen Informationssystems bei der Entwicklung der Klimafunktionskarte für den Anwender weitgehend transparent zu machen, wurden die einzelnen Themenkarten komplett in den Erläuterungsbericht übernommen.

Arbeitsinstrument für den Planer sollte in der Regel ausschließlich die Klimafunktionskarte sein. Sie stellt den Istzustand der kleinklimatischen Verhältnisse im gesamten Bayreuther Stadtgebiet dar. Sie enthält den inhaltlich am weitesten gehende Schritt: die Festsetzung von Klimatopen. Dieser Arbeitsschritt richtet sich nach den Vorgaben der VDI Richtlinie 3787, Blatt 2.

Bei den Siedlungsbereichen wurde nach insgesamt 4 Klimatopklassen differenziert. Aufgrund der massiven Bebauung und seines geringen Grünflächenanteiles wurde der Innenstadtbereich als eigener Strukturtyp ausgewiesen. Er weist die stärksten Abweichungen vom Freilandklima auf. Weitere Siedlungsschwerpunkte wurden als Stadtklimatop klassifiziert. Hier wechseln größere Areale mit Blockbebauungsstrukturen und Gebiete mit vorwiegender Einzelhausbebauung ab. Hochhauskomplexe sind genauso die Ausnahme

wie größere Grünbereiche. Siedlungsbereiche außerhalb der Niederungsbereiche müssen meist auf eine zusätzliche nächtliche Abkühlung von außen verzichten. Dieses gilt insbesondere für höher gelegene Hangbereiche sowie für Kuppen- und Plateaulagen. Auch hier haben sich im Stadtgebiet von Bayreuth größere Siedlungsschwerpunkte gebildet, die über eine ähnliche Bebauungsstruktur wie im Niederungsbereich verfügen.

Das Stadtgebiet von Bayreuth verfügt in den Außenbereichen über zahlreiche weitere Siedlungsräume. Teilweise sind sie aus ursprünglich kleinen landwirtschaftlich geprägten Ortsteilen entstanden, andererseits handelt es sich um typische, allein zu Wohnzwecken geschaffene Stadtteile. Hier sind zukünftig die größten Nutzungsveränderungen zu erwarten. Gewerbe- und Industriegebiete ähneln bezüglich ihrer klimarelevanten Strukturen den Siedlungsflächen. Innerhalb von Gewerbe- und Industriegebieten nimmt man thermische Belastungen bis zu einem gewissen Maß in Kauf. Wichtiger ist hier, daß von diesen bioklimatischen Lastflächen keine negativen Auswirkungen auf angrenzende Siedlungsräume ausgehen. Ebenfalls im Rahmen der städtebaulichen Entwicklung entstanden sind die Bereiche, die innerhalb der Klimatoptypisierung als Parkklimatope ausgewiesen werden. In dieser Kategorie werden gestaltete, parkartige und in der Regel öffentlich zugängliche Bereiche zusammengefaßt, die innerhalb von Siedlungsräumen liegen oder direkt an sie angrenzen und somit unmittelbare Erholungsfunktionen übernehmen. Dabei handelt es sich im Bayreuther Stadtgebiet um mehrere größere baumbestandene Parks, um Friedhofsflächen sowie um diverse Kleingartengelände.

Neben den Siedlungsklimatopen verfügen Städte noch über städtebaulich kaum oder gar nicht beeinflusste Teilräume, die in der Stadtmeteorologie als Freilandklimatope bezeichnet werden. Acker- und Wiesenflächen im Außenbereich werden als Freiflächen zusammengefaßt. Entscheidende Kriterien sind die geringe Oberflächenrauigkeit und eine niedrige Bestandshöhe. Daraus resultieren gute Durchlüftungsverhältnisse sowie größtmögliche Umsätze aller Komponenten der Energiebilanzgleichung. Anders als in den Waldbereichen spielt die jeweilige Reliefsituation bei den Freiflächen eine Rolle für die Ausprägung der entsprechenden Klimafunktionen. Bei wärmebelastenden Wettersituationen stellen Freiflächen nachts thermische Gunsträume dar. Im Zusammenhang mit thermischen Lasträumen übernehmen sie dabei zusätzlich die Funktion thermischer Wirk- und Ausgleichsräume. Dazu müssen die kühlen Luftmassen der Freiflächen jedoch überwärmte Stadtquartiere erreichen können, um hier eine zusätzliche Abkühlung hervorzurufen.

Eine weitere Klimaeinheit stellen im Bayreuther Stadtgebiet die zusammenhängenden Waldflächen dar. Sie spielen hinsichtlich der meisten Klimaelemente eine besondere Rolle. Der Waldinnenraum stellt einerseits bei höheren Windgeschwindigkeiten eine Zone relativer Luftruhe dar, wodurch günstige Voraussetzungen für die Entstehung eines speziellen Lokalklimas bestehen. An heißen Sommertagen sind Waldgebiete darüber hinaus die wichtigsten klimatischen Ausgleichsräume. Ihre Gunstfunktion reicht aber nicht über den Bestandsraum hinaus, sondern beschränkt sich in der Regel auf die Waldfläche selbst.

Ergänzend zur flächenhaften Klimatopklassifikation wurden die Hauptstraßen als linienhafte Emissionsbänder dargestellt. Neben dem Hausbrand und der Industrie stammen die meisten Schadstoffe aus dem Straßenverkehr. Desweiteren werden in der Klimafunktionskarte auch kleinräumige Strömungsbesonderheiten eingetragen. Ihr Nachweis erfolgte entweder mit Hilfe der stationären Windmessungen oder anhand der durchgeführten Rauchgasexperimente. Im Zusammenhang mit den nachgewiesenen Phänomenen wurden zusätzlich Strömungsbesonderheiten eingetragen, die im Zusammenhang mit ge-

messenen Windsystemen vermutet werden. Ihre Darstellung hat somit keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Abschließend wurden für mehrere Teilräume konkrete Hinweise zu Planungsabsichten im Bayreuther Stadtgebiet gegeben. Aus fachlicher Sicht bestehen im Teilraum *Oberpreuschwitz* keine Bedenken gegen eine Umnutzung der bisherigen Freiflächen in eine lockere Wohnbebauung. Bei einer konkreten Planung sollte lediglich im südlichen Bereich das Einzugsgebiet des Teufelsgrabens von einer potentiellen Bebauung ausgespart bleiben. Dasselbe gilt auch für den Grabenbereich, der wenig westlich der Jakob-Herz-Straße beginnt, dann zwischen der REHA-Klinik und dem Klinikum Bayreuth in Richtung Südosten verläuft und schließlich ebenfalls in den Mistelbach einmündet. Im Gegensatz dazu würde sich im Teilraum *Altstadt/Saas* eine Bebauung wahrscheinlich ungünstig auf die bioklimatischen Verhältnisse der angrenzenden Stadtklimatope auswirken. Ob und in welchen Bereichen eine Nutzungsänderung aus fachlicher Sicht tolerierbar wäre, kann nur im Rahmen eines Detailgutachtens endgültig geklärt werden. Aufgrund der großen Entfernung zum verdichteten Siedlungsraum ist der Teilraum *Thiergarten* in der Klimatopkarte als Freilandklimatop ohne Bezug zu thermischen Lastflächen ausgewiesen. Einer Umnutzung der hier vorhandenen Freiflächen in ein locker bebautes Wohngebiet steht aus fachlicher Sicht somit nichts entgegen.

Die starken, straßenverkehrsbedingten Emissionen, die im Plangebiet *Oberkonnersreuth* von den Bundesstraßen 2 und 85 sowie von der BAB 9 stammen, sorgen hier für eine relativ ungünstige lufthygienische Situation. Im Rahmen einer konkreten B-Planung sollten entsprechende Detailuntersuchungen durchgeführt werden. Als lufthygienisch ähnlich problematisch ist das Plangebiet *Pfaffenleck* einzuordnen. Dieses Areal ist in allen Himmelsrichtungen von stark befahrenen Straßen umgeben, so daß sich hier vorwiegend eine Nutzung als Gewerbegebiet anbietet. In welchem Umfang dieses Plangebiet, das in der Klimatopkarte vorwiegend als Freilandklimatop mit Bezug zum thermischen Lastraum dargestellt wurde, die Funktion eines Kaltluftentstehungsgebietes hat und ob diese Flächen Leitbahnen für Kaltluftabflüsse aus dem Bereich Eichelberg sind, müßte durch klein-klimatische Detailuntersuchungen geklärt werden. Ohne Bezug zu thermischen Lastflächen sind die Freiflächen im Bereich *Bühlersmühle*. Die hier vorhandenen Siedlungs-räume sind aufgrund ihrer aufgelockerten Bebauungsstruktur nicht auf zusätzliche Abkühlungsleistungen angewiesen, so daß gegen eine ebenfalls nicht zu massive Wohnbebauung in diesem Teilraum keine fachlichen Bedenken bestehen. Im Teilraum *Aichig* sind wegen des geringen Flächenanteiles am Kaltlufteinzugsgebiet des Roten Mains und der großen Entfernung zur Bayreuther Kernstadt Wohnbaumaßnahmen aus fachlicher Sicht ebenfalls unbedenklich. Ähnlich unkritisch werden die Planungsabsichten im Teilraum *St. Johannis* beurteilt.