

Planungsrelevante Bewertung des Stadtklimas

Am Beispiel von Freiburg im Breisgau

A. Matzarakis, R. Röckle, C.-J. Richter, H.-C. Höfl, W. Steinicke, M. Streifeneder, H. Mayer

Zusammenfassung Die Stadt Freiburg führt die Fortschreibung des Flächennutzungsplans mit dem Zieljahr 2020 durch. Um die Belange des lokalen Klimas und der Lufthygiene zu berücksichtigen, wurde eine flächendeckende Stadtklimaanalyse durchgeführt. In der Untersuchung wurden alle zur Verfügung stehenden Methoden und Daten berücksichtigt und integriert. Mit dieser Analyse wurden Grundlagen erarbeitet, die es erlauben, im Flächennutzungsplan die Erhaltung und die Verbesserung eines günstigen Kleinklimas und einer günstigen lufthygienischen Situation adäquat zu berücksichtigen. Auch für künftige Einzelfallbetrachtungen im Rahmen der verbindlichen Bauleitplanung soll die Analyse den fachlichen Rahmen bieten und Auswertungen ermöglichen.

Planning oriented assessment of urban climate – the case of Freiburg

Abstract The Freiburg city council began to update the city's master plan and to adjust it for the year 2020. Local climate and air pollution were considered in this scheme through the application of a spatial urban climate analysis of the entire area. For the present analysis all available methods and data were included and integrated. The results of this analysis provide basic information for the consideration of important micro climate areas and air pollution conditions in the planning scheme. The present analysis builds the basis for future analyses of individual areas in the context of building applications.

1 Einleitung

Das Stadtklima ist das durch die Wechselwirkung mit der Bebauung und deren Auswirkungen – einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen – modifizierte Klima. Daraus geht hervor, dass durch die Charakteristika Landnutzungsart Stadt das großräumige Klima und die lufthygienische Hintergrundsituation des Raums, in dem sich eine Stadt befindet, verändert werden [1]. Für viele Zwecke der angewandten Stadtklimatologie, u. a. Berücksichtigung des Stadtklimas als Planungsfaktor oder bei der Bewertung des Stadtklimas, ist es sinnvoll, das Stadtklima in seine beiden wichtigsten Komponenten zu unterteilen [2]:

- Die thermische Komponente umfasst die gesamte Energetik der Stadtluft, d. h. Strahlung, fühlbare und latente Wärme, Gebäude- und Bodenwärme, anthropogen erzeugte Wärme.

Prof. Dr. Andreas Matzarakis,

Prof. Dr. Helmut Mayer,

Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Dr. Rainer Röckle, Dipl.-Met. Claus-Jürgen Richter,

Dipl.-Met. Hans-Christian Höfl,

iMA Richter & Röckle, Freiburg.

Dipl.-Phys. Wolfgang Steinicke,

Dipl.-Geogr. Margit Streifeneder,

Steinicke und Streifeneder, Umweltuntersuchungen GbR, Freiburg.

- Die lufthygienische Komponente umfasst die chemisch und physikalisch bedingte Qualität der Stadtluft auf dem Weg von der Emission über die Transmission und Immission zur Deposition.

Bei der Analyse der Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen der atmosphärischen Umwelt und der Gesundheit bzw. dem Wohlbefinden von Menschen werden in der Humanbiometeorologie hauptsächlich der thermische und der lufthygienische Wirkungskomplex berücksichtigt [3; 4]. Diese Größen besitzen in der Vorsorgeplanung eine besondere Bedeutung und sind mit Mitteln der Planung beeinflussbar [5].

Die Stadtplanung kann durch verantwortungsvollen Umgang bei der Ausweisung von Flächen auch auf klimatische und lufthygienische Belange eingehen [5]. Aus dieser Sicht sind folgende Ziele zu nennen:

- Erhaltung günstiger klimatischer Bedingungen,
- Reduktion der Luftschadstoffbelastung,
- Schaffung einer möglichst großen Klimavielfalt.

Die Aufgabenstellung beinhaltet für die Klimaanalyse der Stadt Freiburg im Wesentlichen die Frage, welche Flächen sich aus klimatischer und lufthygienischer Sicht a) gut, b) weniger gut, c) gar nicht für die Ausweisung von Wohngebieten/Gewerbegebieten eignen.

In Freiburg steht die Erhaltung der positiven/günstigen Eigenschaften des Klimas von Seiten der Stadt an wichtiger Stelle. Für die konkrete Planung bedarf es der genauen Kenntnis, in welchen Bereichen Belastungen auftreten und von welchen klimatisch erwünschte Wirkungen ausgehen. Um eine Datengrundlage zur Beschreibung der derzeitigen klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse in Freiburg zu erhalten, wurden Messungen (Thermalbefliegungen, Bodenmessprogramm, SF₆-Experimente) und Modellrechnungen (Humanbioklimakartierung, Kaltluftabflussimulationen, Durchlüftungsanalyse, Lufthygieneindexberechnung) durchgeführt [6].

Der Beitrag beschreibt die eingesetzten Methoden und stellt die ausgearbeiteten Planungshinweise der flächendeckenden Stadtklimaanalyse für deren Integration in den neuen Flächennutzungsplan von Freiburg für das Jahr 2020 vor.

2 Untersuchungsgebiet

Durch die Lage im Oberrheingraben zählt Freiburg zu den wärmsten Städten in Deutschland [7; 8]. So findet man im Stadtgebiet an über 30 Tagen Situationen, die sich humanbioklimatologisch belastend auswirken [9; 10]. In außergewöhnlich warmen Sommern wie 2003 lag diese Zahl noch weitaus höher. Die lufthygienische Belastungssituation wird hauptsächlich durch den Kfz-Verkehr bestimmt, da größere industrielle Emittenten fehlen [11].

Durch die Lage am Fuß des Schwarzwaldes (**Bild 1**) und speziell durch die am Ausgang des Dreisamtals stellen sich bei

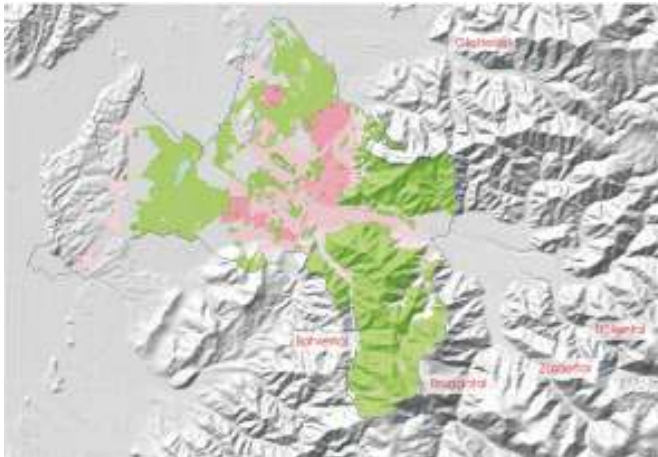


Bild 1. Untersuchungsgebiet sowie räumliche Eingliederung.

wolkenarmen schwachwindigen Großwetterlagen thermisch bedingte Ausgleichströmungen ein. In den Tagstunden strömen Luftmassen in Richtung Schwarzwald und führen damit zu einem spürbaren Luftaustausch. In den Nachtstunden stellen sich Kaltluftabflüsse ein, die in den Hanglagen als Hangabwinde wirksam werden und im Dreisamthal und den nach Westen bis Nordwesten anschließenden Siedlungsgebieten in Form des „Höllentälers“ eine merkliche Durchlüftung bewirken [7; 8; 12 bis 14].

Die Kaltluftabflüsse treten, abhängig von der Wetterlage, mit unterschiedlichen Intensitäten und Reichweiten auf. Während die Hangabwinde meist nur lokal von Bedeutung sind, überstreicht der Höllentäler mehrere Stadtteile und ist bodennah bis ins Rieselfeld und bis zum Flugplatzgelände nachweisbar. Im Dreisamthal tritt der Höllentäler in über 60 % der Nachtstunden auf [12].

3 Angewandte Methodik

Um die räumliche Verteilung der klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse zu analysieren, wurden problemorientierte Messungen und Modellrechnungen durch-

geführt. Die einzelnen Merkmale (Lufttemperatur, Wind, Humanbioklima, Schadstoffbelastung) wurden aggregiert und in Kartenform zusammengestellt [6]. Das Flussdiagramm in Bild 2 zeigt, wie die einzelnen Informationen ineinander greifen und in welchen Karten die jeweiligen Daten dargestellt sind.

Im Detail wurden folgende Untersuchungsmethoden eingesetzt:

- Messungen
 - Thermalscannerbefliegungen,
 - Thermalkartierungen (Tag und Nacht),
 - Bodenmesskampagnen,
 - Tracergasversuche.
- Modellierungen
 - Kaltluftabflusssimulationen,
 - Durchlüftungsanalyse,
 - Analyse des thermischen Bioklimas,
 - Analyse der lufthygienischen Situation,
 - Analyse der Betroffenheit.
- Karten
 - Klimafunktionskarte,
 - Planungshinweiskarte.

Neben umfangreichen Messungen kamen auch Modellrechnungen zum Einsatz, die flächendeckende Informationen auf einem relativ feinen Raster (≤ 50 m) lieferten.

3.1 Messungen und Ergebnisse

3.1.1 Thermalscannerbefliegungen

Die Thermalscannerbefliegung ist eine Methode, flächendeckende Informationen über die thermische Situation der Oberfläche in hoher Auflösung (bis zu 3 bis 5 m) zu gewinnen [15; 16]. Allerdings können keine Aussagen zu Luftströmungen, z. B. Kaltluftabflüsse, abgeleitet werden. Auch ein Rückschluss auf die Lufttemperatur ist nicht ohne Weiteres möglich.

Um die Tag-Nacht-Dynamik darzustellen, wurden zwei Messflüge zu den Zeitpunkten der stärksten Aufheizung (8. Juli 2001, Nachmittag) bzw. größten Abkühlung (9. Juli 2001, kurz vor Sonnenaufgang) bei einer windschwachen Strahlungswetterlage durchgeführt. Das Ergebnis der Auf-

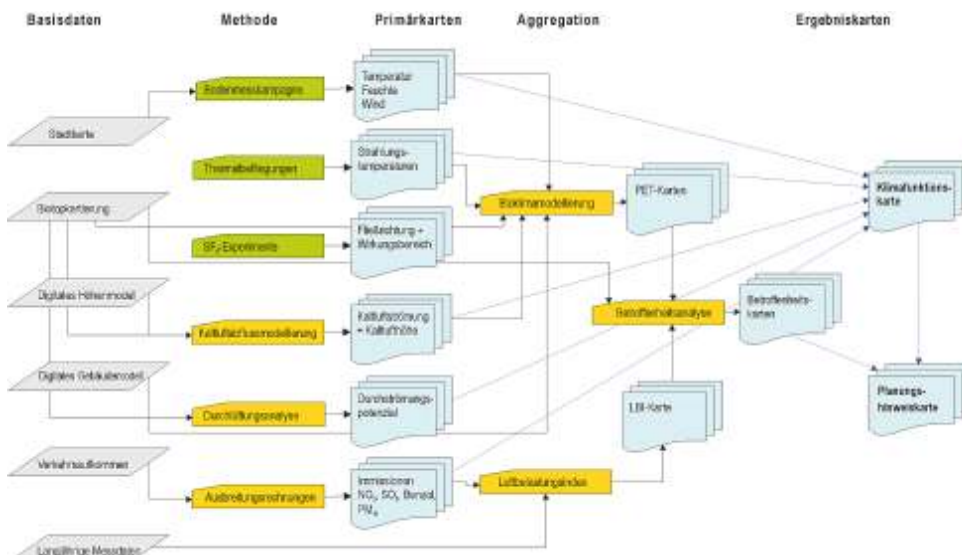


Bild 2. Fließbild der Stadtklimaanalyse Freiburg im Breisgau.

nahme ist allerdings nicht unmittelbar die Oberflächentemperatur, sondern die am Detektor (im Flugzeug) ankommende Strahlungstemperatur.

Mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum nehmen die Strahlungstemperaturen ab, was auf die weniger dichte Bebauung und stärkere Durchgrünung zurückzuführen ist. Innerhalb der locker bebauten Randbereiche heben sich die versiegelten Straßenzüge sowie Häuserzeilen von den durch mehr Vegetation geprägten und somit kühleren Flächen ab. Wälder erscheinen tagsüber auf der Thermalkarte mit relativ niedrigen Strahlungstemperaturen [16; 17].

Trotz des insgesamt deutlich niedrigeren Strahlungstemperaturniveaus während der Nacht (Mittel bei ca. 17 °C gegenüber ca. 26 °C am Tag) heben sich die Siedlungsflächen durch ihre höhere Strahlungstemperatur von den umgebenden Flächen ab. In der Nachtaufnahme dominiert eindeutig der Stadtkern. Die Straßen und Gebäude erwärmen sich tagsüber stark und geben nachts die Energie in Form von langwelliger Strahlungsenergie wieder an ihre Umgebung ab. Aufgrund der Horizontzeinschränkung ist dabei die Abkühlung innerhalb von Straßenschluchten geringer als im Dachniveau. Das Muster der Straßenzüge ist dadurch deutlich hervorgehoben.

Das Strahlungstemperaturniveau des Freilands liegt deutlich unter dem der bebauten Flächen, weist jedoch eine relativ starke Streuung auf. Wälder sind auf Thermalaufnahmen stets ein besonderer Fall. Sie speichern in der Astholzmasse die tagsüber aufgenommene Wärme und kühlen je nach Dichte und Lage (Laub-/Nadelwald, Ebene/Hang) verschieden stark ab. Zu Beginn der nächtlichen Abkühlungsphase verhindert die im Stammraum und zwischen den Blättern und Ästen befindliche warme Luft ein schnelles Abkühlen [18].

3.1.2 Bodenmesskampagne

Parallel zur Thermalscannerbefliegung am 8. und 9. Juli 2002 wurde ein 24-stündiges Bodenmessprogramm durchgeführt, das der messtechnischen Erfassung meteorologischer Parameter, wie Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, diente. Das Messprogramm stellt u. a. eine Datengrundlage zur flächendeckenden Ermittlung der humanbiometeorologischen Verhältnisse im Stadtgebiet Freiburg dar.

Die Auswertung zeigt, an welchen Orten und zu welchen Zeitpunkten die höchsten Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet beobachtet wurden. Zurzeit des Lufttemperaturmaximums am Nachmittag ist es beispielsweise auf dem Münsterplatz in Freiburg um ca. 2,5 °C wärmer als über den Wiesenflächen im Westen von Freiburg, während die Differenz zur Zeit des Temperaturminimums ca. 5,5 °C beträgt. Der Wärmeinseleffekt ist also nachts stärker ausgeprägt als in den Tagstunden [10; 19].

3.1.3 Tracergasversuche

Mittels eines Tracergases (SF₆) wurden an sechs Orten Ausbreitungsexperimente in den Abend- und Nachtstunden von Strahlungstagen durchgeführt. Die Ausbreitungsversuche zeigen den Verlauf der Kaltluftabflussströmung und den Einflussbereich an den jeweiligen Standorten. Die Ergebnisse der Experimente decken sich weitgehend mit denen der Kaltluftabflussberechnungen.

3.2 Modellrechnungen und Ergebnisse

3.2.1 Kaltluftabflusssimulation

Im gesamten Untersuchungsgebiet wurden in einem 50-m-Raster die abendlichen und nächtlichen Kaltluftabflüsse mit einem numerischen Strömungsmodell für eine typische Strahlungswetterlage simuliert [20]. Nachts dominiert im Stadtgebiet von Freiburg der „Höllentäler“, wie die Kaltluftsimulationen, die SF₆-Messungen und das Bodenmessprogramm zeigen. Sein Einfluss reicht weit über das Dreisamtal bzw. den Freiburger Osten hinaus. Er überstreicht den Schlossberg (im Osten der Stadt), die Innenstadt und schwenkt nach Nordwesten ab. Einflüsse des Höllentälers sind noch in den nördlichen Stadtteilen von Freiburg bemerkbar. Der Höllentäler macht sich außerhalb des Dreisamtals (Ursprungsgebiet) erst einige Stunden nach Sonnenuntergang bemerkbar. In den frühen Abendstunden dominieren lokale Abflüsse aus verschiedenen Tälern und Hängen. Diese speisen den großen Ost-West-Strom und werden mehr und mehr von diesem überlagert [14; 19].

3.2.2 Durchlüftungsanalyse

Die Durchlüftungsanalyse wurde mit einem numerischen Strömungsmodell durchgeführt [21]. Grundlage für die Analyse war das Gebäudekataster der Stadt Freiburg, sodass die Berechnungen detaillierte Ergebnisse im 5-m-Raster ermöglichen. Um die Darstellungen übersichtlich zu gestalten, wurde auf ein 20-m-Raster gemittelt.

Die Analyse zeigt, an welchen Stellen und wie stark die bodennahe Strömung durch Hinderniseinflüsse reduziert wird. Die Analysen wurden für die Hauptwindrichtungen durchgeführt und ermöglichen so die Ausweisung von Belüftungsbahnen, wie z. B. die Gleisanlagen oder die Dreisamtauen. Im Untersuchungsgebiet ist die Freiburger Innenstadt vergleichsweise schlecht durchlüftet. Dies liegt an der relativ hohen Bebauung mit meist geringen Zwischenräumen. Auch in den Gewerbegebieten findet man Bereiche mit schlechter Durchlüftung.

3.2.3 Analyse des thermischen Bioklimas

Das physiologische Wärmeempfinden des Menschen wird nicht nur von der Lufttemperatur, sondern von den Einstrahlungsbedingungen (z. B. tages- und jahreszeitenabhängige Sonneneinstrahlung, Schattenwurf, langwellige Wärmeabstrahlung der Gebäude), der Windgeschwindigkeit sowie der Luftfeuchtigkeit beeinflusst [1; 22].

Charakteristisch für das Stadtklima sind Wärmebelastungen bis hin zum Hitzestress. Kältereiz spielt beim Stadtklima vor dem Hintergrund der urbanen Wärmeinsel keine wesentliche Rolle. Wärmebelastungen treten insbesondere tagsüber in den Nachmittagstunden auf. Aufgrund des Tagesgangs der Lufttemperatur und des Fehlens der kurzwelligen Strahlung sind die Wärmebelastungen nachts im Freien deutlich geringer.

Die Methoden zur Bestimmung des thermischen Bioklimas des Menschen sind in der Richtlinie VDI 3787 Blatt 2 beschrieben [22]. Für die Bewertung der thermischen Komponente werden thermische Indizes eingesetzt, die auf der Energiebilanz des Menschen beruhen. In der hier vorgestellten Untersuchung wurde die Physiologisch Äquivalente Temperatur bestimmt [23; 24]. Die Simulationen basieren auf der Nutzungskartierung, dem digitalen Höhenmodell, den Messungen aus dem Bodenmessprogramm und den Thermalaufnahmen. Bei der Untersuchung wurde ein

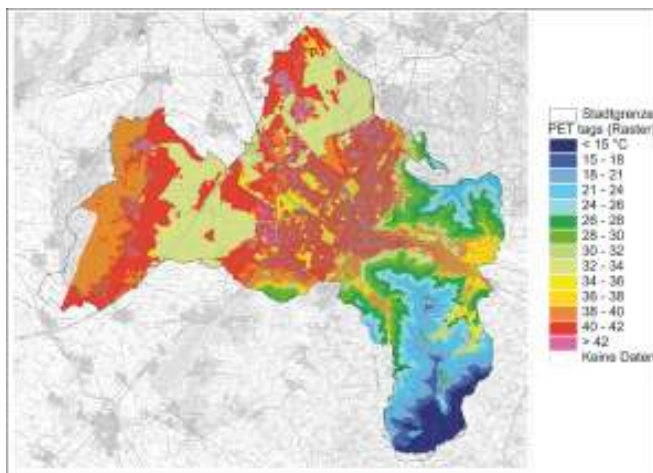


Bild 3. Kartierung der physiologisch äquivalenten Temperatur für die Tagsituation.

typischer sommerlicher Strahlungstag betrachtet. Berechnet wurde die Physiologische Äquivalente Temperatur (PET) um 15:00 Uhr MEZ (Bild 3) mit dem Strahlungs- und Bioklimamodell RayMan [25].

Im gesamten Stadtgebiet bzw. in bebauten Gebieten liegen die PET-Werte höher als 33 bzw. 35 °C, d. h. es liegt eine starke bis sehr starke Wärmebelastung vor. Wärmebelastungen treten im Stadtgebiet von Freiburg an über 30 Tagen im Jahr auf [9; 10], wobei die Tendenz aufgrund des Klimawandels eher zunehmend ist.

Die höchsten PET-Werte treten bei Landnutzungen auf, die einen hohen Versiegelungsgrad und wenig Grün besitzen. Relativ stark belastet sind daher auch die dörflichen Strukturen in den Randbereichen. Hier macht sich bemerkbar, dass die niedrigen Gebäude weniger Verschattung erzeugen als es in der höheren urbanen Bebauung der Fall ist.

Mäßige Wärmebelastung ist erst ab Höhen von 400 m über NN anzutreffen. Nur in den höheren Lagen des Schauinslands ist keine Wärmebelastung mehr vorhanden.

Während der späten Nachtsituation (3:00 Uhr MEZ morgens) werden im Stadtgebiet von Freiburg PET-Werte von 6 bis 11 °C berechnet. Dies bedeutet für Personen, die sich im Freien aufhalten, einen leichten Kältereiz.

3.2.4 Analyse der lufthygienischen Situation

Die lufthygienische Situation wird in Freiburg aufgrund fehlender Großemittenten hauptsächlich durch den Kfz-Verkehr bestimmt [11; 26]. Für diese Quellengruppe wurden detaillierte Berechnungen der Immissionssituation für die Schadstoffe NO₂, Benzol und PM₁₀ durchgeführt [27]. Um dem orografisch stark strukturierten Untersuchungsgebiet Rechnung zu tragen, wurde ortsabhängig mit fünf verschiedenen meteorologischen Ausbreitungsklassenstatistiken gerechnet [28].

Als Prognosehorizont wurde das Jahr 2005 angesetzt. Durch den weiteren Rückgang der spezifischen Fahrzeugemissionen werden die Immissionen gegenüber den berechneten Werten bis zum Jahr 2020 abnehmen.

Die höchsten Konzentrationen treten erwartungsgemäß entlang der Autobahn A5, am Autobahnzubringer Mitte, der Paduaallee und im weiteren Verlauf der B51 an den Tunnelportalen im Freiburger Osten auf. Für NO₂ kann im Straßennahbereich der Grenzwert der 22. Bundes-Immissionsschutzverordnung erreicht oder überschritten werden.

Aus den berechneten Werten von Benzol, NO₂ und Schwebstaub (PM₁₀) wurde zur weiteren Bewertung ein „Luftbelas-

tungsindex“ (LBI) gebildet [29]. Abgesehen von den stark befahrenen Straßen und deren unmittelbarer Umgebung sind die meisten Bereiche des Stadtgebiets lufthygienisch gering belastet.

Im Gegensatz zu den Wärmebelastungen treten hohe Schadstoffbelastungen meist bei winterlichen Inversionswetterlagen auf, bei denen der großräumige Luftaustausch stark reduziert ist.

3.2.5 Analyse der Betroffenheit

Für die Bewertung einer Belastung ist nicht nur die Intensität der Belastung, sondern auch die Anzahl der davon betroffenen Menschen von Bedeutung. Deshalb wurde – getrennt für die Tag- und Nachtsituation – eine Betroffenheitskarte erstellt (Bild 4).

In der Tagsituation fällt die gesamte Innenstadt aufgrund hoher thermischer Belastung verbunden mit großer Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Menschen in die höchste Klasse. In der Nacht kommen weitere Gebiete im Westen von Freiburg (thermisch belastete, dicht besiedelte Bereiche) hinzu.

Die meisten Flächen liegen auf beiden Karten in den Klassen „mäßig“ bis „erheblich“. Die Klassen „sehr gering“ bzw. „gering“ sind kaum vertreten. Insgesamt zeigt Freiburg größere Bereiche mit hoher Betroffenheit, die hauptsächlich von der thermischen Belastung herrührt.

Vor diesem Hintergrund muss die Bewertung der Freiflächen gesehen werden. Gerade für die Innenstadt gibt es wenig entlastende Momente, insbesondere tagsüber bei sommerlichen Strahlungswetterlagen. Neben der Tagsituation ist aber auch die Nachtsituation von Bedeutung. Hier bietet sich die einzige Möglichkeit für eine „Erholung“ des Stadtklimas (Abkühlung der Baukörper und Abtransport belasteter Luft). Die Durchlüftung sollte deshalb, insbesondere für Kaltluftabflüsse mit niedrigem Schadstoffgehalt, nicht nachhaltig reduziert werden.

4 Ergebnisse und Hinweise für die Stadtplanung

Auf der Basis dieser Informationen sowie der Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen (z. B. [7; 8; 10]) wurden eine Klimafunktionskarte und eine Planungshinweiskarte erarbeitet. Der flächendeckende Charakter der Klimainformationen schafft für die Stadt Planungssicherheit hinsichtlich der Auswirkungen aktueller und künftiger Änderungen der Flächennutzung auf das lokale Klima und die Luftqualität.

4.1 Klimafunktionskarte

Die Klimafunktionskarte beinhaltet eine flächendeckende, detaillierte Darstellung der thermischen und dynamischen Verhältnisse des klimatischen Ist-Zustands [30; 31]. Dabei gibt sie in erster Linie die Verhältnisse während autochthoner Wetterlagen, also windschwacher austauscharmer Hochdruckwetterlagen wieder. Über die Darstellung der Luftleitbahnen werden jedoch auch die auf alle Wetterlagen bezogenen langjährigen mittleren Windverhältnisse berücksichtigt. Die Klimafunktionskarte basiert auf einer gemeinsamen Betrachtung der vorhandenen Klimafaktoren (z. B. Reliefverhältnisse, Flächennutzung etc.), der gemessenen Klimaelemente (z. B. Lufttemperatur, Wind, Strahlungstemperatur, Luftqualität) sowie auf den Ergebnissen von Modellrechnungen (Durchlüftung, Kaltluftabflüsse, Bioklima). Da Vorgänge in den unteren Atmosphärenschichten be-

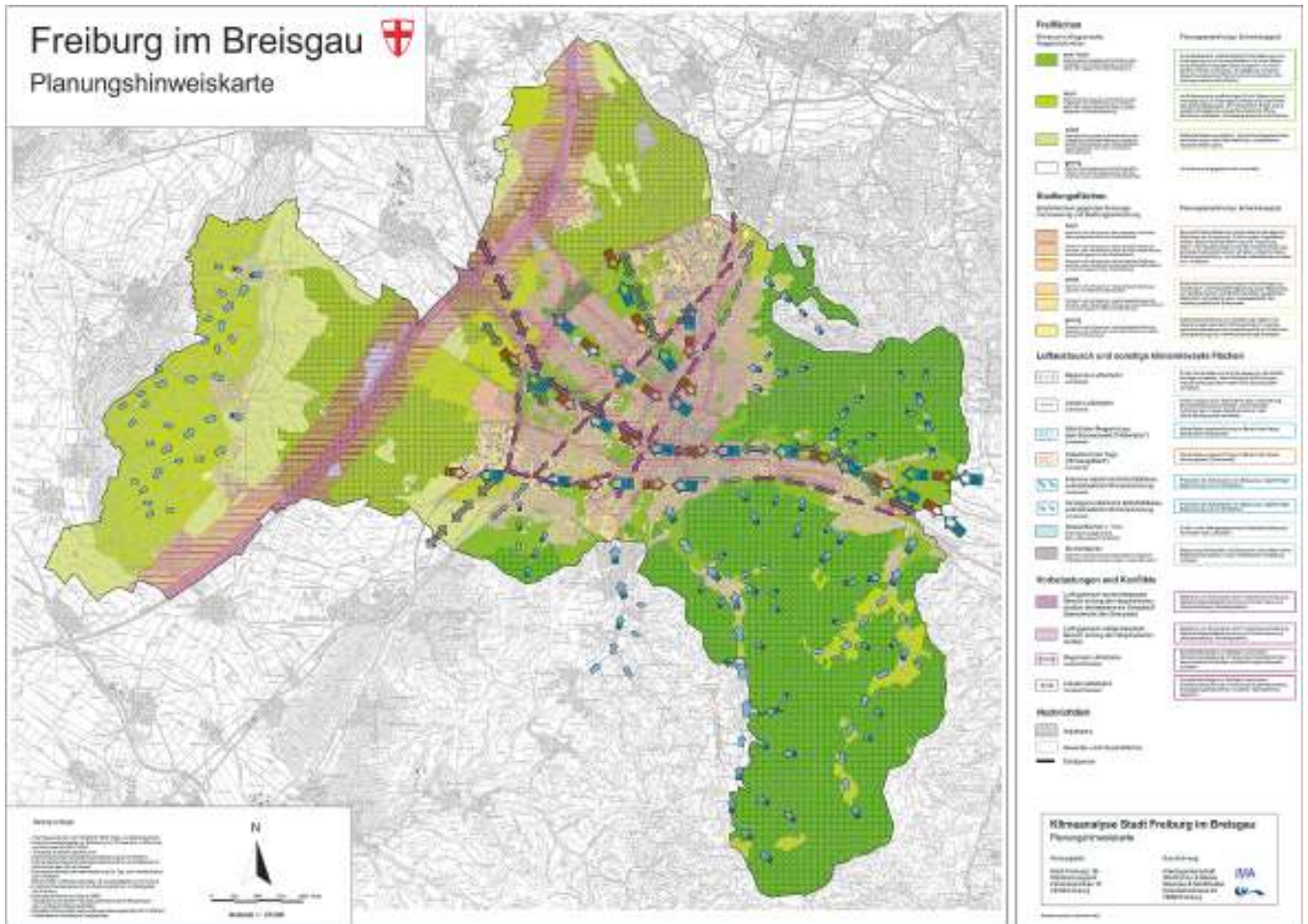


Bild 4. Planungshinweiskarte.

trachtet werden, sind die Übergänge zwischen den klima-relevanten Flächen („Klimatopen“) fließend [32], d. h. die Abgrenzungen in der Klimafunktionskarte sind nicht als „scharfe“ Grenzen, sondern eher als „Grenzsäume“ zu sehen. Ebenso besitzen die Signaturen „symbolhaften“ Charakter, d. h. aus ihrer Lage und Größe lassen sich keine exakten quantitativen Angaben (z. B. zur Reichweite oder Mächtigkeit der Strömungen) ableiten.

Die Klimatope in der Klimafunktions- und Planungshinweiskarte basieren auf der Richtlinie VDI 3787 Blatt 1 [32].

4.2 Planungshinweiskarte

Die zuvor genannten Grundlagen und Ergebnisse fließen zunächst in die Klimafunktionskarte ein. Auf der Basis dieser Karte wurde unter Einbeziehung der vorliegenden lufthygienischen Messdaten bzw. Berechnungen und der Betroffenheitskarte die Planungshinweiskarte (Bild 4) erstellt. Im Gegensatz zur weitgehend wertfreien Darstellung auf der Klimafunktionskarte werden auf der Planungshinweiskarte die Freiflächen hinsichtlich ihrer klimatisch-lufthygienischen Ausgleichsfunktion und die Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber einer Siedlungsverdichtung oder -erweiterung in mehrere Klassen unterteilt. Die Luftleitbahnen werden differenziert in weitgehend unbelastete und schadstoffbelastete Bahnen [33]. Gezeigt sind außerdem die lufthygienisch belasteten Bereiche entlang der Hauptverkehrsstraßen. Darauf auf-

bauend wurden Planungsempfehlungen bzw. Erhaltungs- und Entwicklungsziele für die Ebene der Flächennutzungsplanung erarbeitet. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Planungshinweiskarte sind im Folgenden zusammengefasst.

Kriterien für die Einteilung der **Siedlungsflächen** in Bereiche mit geringer, mittlerer oder hoher Empfindlichkeit gegenüber einer Siedlungsverdichtung oder -erweiterung ist zum einen die Betroffenheit als Maß für die bestehende thermische und lufthygienische Belastung, zum anderen die Bedeutung für angrenzende Siedlungsräume.

Entscheidend für die Einstufung der **Freiflächen** als Flächen mit geringer bis sehr hoher klimatisch-lufthygienischer Ausgleichsfunktion ist zum einen ihre Klimawirksamkeit und zum anderen ihr Bezug zum Siedlungsraum. Auffällig ist in Freiburg bei den Freiflächen ein deutliches „Ost-West-“ bzw. „Süd-Nord-Gefälle“. So treten im Osten und Süden Freiburgs überwiegend Flächen mit sehr hoher klimatisch-lufthygienischer Ausgleichsfunktion auf, während im Westen und Norden eher Flächen mit mittlerer bis hoher Ausgleichsfunktion zu finden sind. Hauptursache für dieses Verteilungsmuster ist das bereits beschriebene Phänomen des „Höllentälers“. Dieser nächtliche kühle Bergwind spielt bei belastenden Wetterlagen eine wichtige Rolle bei der Belüftung großer Teile von Freiburg und als dementsprechend hoch wurde die Bedeutung der Quellgebiete des „Höllentälers“, also der Waldgebiete im Freiburger Osten und Südosten eingestuft.

Ebenso wurden die Freiflächen im Dreisamtal und im Unteren Kappler Tal aufgrund ihrer Lage innerhalb der Hauptabflussbahn des „Höllentälers“ als Flächen mit sehr hoher klimatisch-lufthygienischer Ausgleichsfunktion eingestuft. Aus dem Bohrrtal (Günterstal) und dem Reichenbachtal (Merzhausen) kommen ebenfalls größere Kaltluftströme, sodass auch hier die Freiflächen im Bereich der Talausgänge eine sehr hohe Wertigkeit erhielten. Die Frei- und Waldflächen am Schönberg leisten zumindest in den ersten Nachtstunden einen wichtigen Beitrag zur Belüftung von St. Georgen und fallen daher auch in die Kategorie mit sehr hoher Ausgleichsfunktion. Eine weitere große Freifläche mit sehr hoher Ausgleichsfunktion ist der Bereich des Flugplatzes, der vor allem tagsüber bei belastenden Wetterlagen das Einströmen kühlerer relativ gering belasteter Luftmassen vom Mooswald her in Richtung Hauptfriedhof und die daran angrenzenden Wohngebiete ermöglicht. Aufgrund ihrer Lage innerhalb mäßig bis hoch belasteter Wohngebiete fallen auch die meisten innerstädtischen Parks und sonstigen Grünflächen in die Kategorie mit sehr hoher klimatisch-lufthygienischer Ausgleichsfunktion (z. B. Hauptfriedhof, Alter Friedhof, Botanischer Garten, Stadtgarten, Seepark, Kleingärten in Haslach etc.).

Freiflächen mit direktem Bezug zu niedrig bis mäßig belasteten Wohngebieten wurden meist in die Kategorie mit hoher klimatisch-lufthygienischer Ausgleichsfunktion eingestuft.

Eine mittlere klimatisch-lufthygienische Ausgleichsfunktion besitzen Freiflächen mit Bezug zu nur niedrig belasteten Wohngebieten oder mäßig belasteten Gewerbegebieten oder Freiflächen, die einen nur indirekten Siedlungsbezug aufweisen, sich also bei den während belastender Wetterlagen vorherrschenden Windrichtungen auf der siedlungsabgewandten Seite befinden.

Flächen ohne nennenswerte Kaltluftproduktion sowie ohne Siedlungsbezug werden in die vierte Kategorie (geringe klimatisch-lufthygienische Ausgleichsfunktion) eingestuft, die jedoch in Freiburg nicht vorkommt.

Neben der Bewertung der Frei- und Siedlungsflächen stellt die Planungshinweiskarte die verschiedenen Elemente des **Luftaustauschs** dar: den großräumigen nächtlichen Bergwind (Höllentäler) mit der entgegengesetzten Strömung am Tage, die nächtlichen Kaltluftabflüsse aus den teils bewaldeten, teils unbewaldeten Tälern und die Luftleitbahnen von regionaler bzw. lokaler Bedeutung. Letztere wurden auf der Planungshinweiskarte in weitgehend unbelastete und belastete Bahnen eingeteilt.

Luftleitbahnen sind Strukturen, die aufgrund ihrer geringen Bodenrauigkeit, ausreichender Länge und Breite und möglichst geradlinigem Verlauf zu einer Durchlüftung von Siedlungsgebieten beitragen [33]. Während die regionalen Luftleitbahnen den Austausch belasteter Luftmassen in der Stadt gegen weitgehend unbelastete Luftmassen aus der Umgebung begünstigen, sorgen die lokalen Luftleitbahnen innerhalb des Stadtgebiets für eine bessere Durchlüftung. Generell ist die Wirksamkeit von Luftleitbahnen von der jeweils vorherrschenden übergeordneten Windrichtung abhängig.

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Für die Bewertung potenziell bebaubarer Flächen wurde in Anlehnung an die Methode der ökologischen Risikoanalyse

vorgegangen. Die Beeinträchtigung eines Gebiets bzgl. Änderungen des Kleinklimas ergibt sich aus der

- a) Intensität, Reichweite und Richtung der Wirkung,
- b) Empfindlichkeit und Wertigkeit der betroffenen Flächen gegenüber einer bestimmten Wirkung des Vorhabens.

Zur Bestimmung der Empfindlichkeit wurden die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Menschen (geschätzt aus der Flächennutzung), die humanbiometeorologische Belastung (PET) und die lufthygienische Belastung herangezogen. Der Wert des Schutzguts „Mensch“ wurde durchweg als hoch angesetzt, sodass in dieser Hinsicht keine Differenzierung notwendig war.

Nach der Bebauung einer Freifläche ändern sich deren Eigenschaften (z. B. Wärmehaushalt, Durchlüftung, Schadstoffeintrag etc.). Inwieweit umgebende Flächen betroffen sind, hängt davon ab, ob der Wind diese Eigenschaften in diese benachbarten Flächen transportiert.

Das Humanbioklima wurde in Tag- und Nachtsituation unterteilt, da sich die Strömungsverhältnisse an heißen Strahlungstagen deutlich von denen in der Nacht unterscheiden. Dies gilt vor allem für Ballungsgebiete im komplexen Gelände.

Um den Einfluss einer potenziell bebaubaren Fläche auf benachbarte Flächen beurteilen zu können, wurde deren Auswirkung auf das Kleinklima mit der Empfindlichkeit der betroffenen Fläche verknüpft.

Die klimatisch begründete Planungskonsequenz daraus ist:

1. Freihalten von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen (für Frisch- und Kaltluft) und
2. kleinräumige Klimamanipulationen, um das Aufheizen der Gebäude tagsüber zu reduzieren. Eine Möglichkeit ist z. B. das Anpflanzen von breitkronigen Laubbäumen (Verschattung) oder die Oberflächengestaltung mit Materialien, die eine hohe Reflektion der ankommenden kurzwelligen Strahlung bewirken (Albedomanagement).

Weiterhin ist für menschliche Aktivitäten im Außenbereich (Freizeit, Erholung, Zurücklegen von Wegen) eine möglichst große Klimavielfalt günstig, da ohne großen Zeitaufwand diejenigen Bereiche aufgesucht werden können, die dem jeweiligen Temperaturbedürfnis am nächsten kommen. Der Einfluss des Bioklimas ist in den Betroffenheitskarten zu sehen.

Insgesamt ist anzumerken, dass es wenig sinnvoll ist, Klimaanalysen von einzelnen Stadtquartieren bzw. Stadtteilen durchzuführen, ohne vorher eine Gesamtanalyse der Stadt, unter Berücksichtigung der lokalen klimatischen Faktoren bzw. Verhältnisse, gemacht zu haben.

Die Analyse des Stadtklimas sollte keinen Alibifaktor darstellen, sondern ihre Möglichkeiten als solide Abwägungsbasis für Entscheidungsträger erkannt und angewandt werden. Dies gilt vor allem für Städte, die unter dem Druck der weiteren Bebauung und Verdichtung stehen, insbesondere wenn sie im Süden Deutschlands liegen. Die klimatischen Verhältnisse in Ballungsräumen gewinnen immer mehr an Bedeutung, wenn man die Klimawandeldiskussion berücksichtigt und die Aspekte von Erhöhung der globalen Lufttemperaturen sowie das Auftreten von Extremereignissen im Auge behält.

Danksagung

Die Analyse wurde im Auftrag der Stadt Freiburg durchgeführt.

Literatur

- [1] *Matzarakis, A.*: Die thermische Komponente des Stadtklimas. Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg Nr. 6. Freiburg 2001.
- [2] *Mayer, H.*: Planungsfaktor Stadtklima. Münchner Forum, Berichte und Protokolle Nr. 107 (1992), S. 167-205.
- [3] *Helbig, A.; Baumüller, J.; Kerschgens, M. J.*: Stadtklima und Luftreinhaltung. 2. Aufl. Berlin: Springer 1999.
- [4] Stadtklima und Luftreinhaltung. Hrsg.: VDI-Kommission Reinhaltung der Luft. Heidelberg: Springer 1988.
- [5] *Richter, C.-J.; Röckle, R.; Gaede, M.*: Das Schutzgut Klima in der Umweltverträglichkeitsprüfung. Schriftenreihe Bd 28: Anthropogene Änderungen des lokalen Klimas, S. 4-14. Hrsg.: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss. Düsseldorf 1999.
- [6] *Röckle, R.; Richter, C.-J.; Höfl, H.-C.; Steinicke, W.; Streifeneder, M.; Matzarakis, A.*: Klimaanalyse Stadt Freiburg. Auftraggeber: Stadtplanungsamt der Stadt Freiburg. November 2003.
- [7] *Nübler, W.*: Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg. Freiburger Geographische Hefte, Bd. 16. Freiburg 1979.
- [8] *Rudloff, H. v.*: Beiträge zum Klima Freiburgs. Freiburg: Lingg Druck 1993.
- [9] Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd. Hrsg.: Trinationale Arbeitsgemeinschaft REGIO-KLIMA-PROJEKT. Zürich: Vdf Hochschulverlag, Offenbach: IFG, Straßburg: Editions Coprus 1995.
- [10] *Friedrich, M.*: Die raumzeitliche Differenzierung der thermischen Bedingungen des Menschen im Klima der Stadt. Dissertation an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 2000.
- [11] Jahresbericht 2002. Hrsg.: Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit (UMEG). Karlsruhe 2003.
- [12] *Parlow, E.*: Geländeklimatologische Untersuchungen im Bereich der Staufener Bucht unter besonderer Berücksichtigung lokaler Ausgleichsströmungen. Freiburger Geographische Hefte, Bd. 20. Freiburg 1983.
- [13] *Rudloff, H. v.*: Das Freiburger Berg- und Talwindssystem: Eine Bestandsaufnahme. Freiburg 1992.
- [14] *Gross, G.*: Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg areas for different topographies. Phys. Atmosph. 62 (1989), S. 57-72.
- [15] *Goßmann, H.*: Thermalbilder und Oberflächentemperaturen. Geomethodica 12 (1987), S. 117-149.
- [16] *Goßmann, H.*: Infrarot-Thermometrie der Erdoberfläche. Meteorol. Fortbild. 21 (1991) Nr. 1/2, S. 1-10.
- [17] *Menz, G.*: Ableitung einer großmaßstäbigen Karte der Wärmebelastung im Raum-Freiburg-Basel mit Hilfe von Satellitendaten. Freiburger Geographische Hefte, Bd. 27. Freiburg 1987.
- [18] *Hildebrandt, G.*: Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwissenschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Heidelberg: Herbert Wichmann 1996.
- [19] *Ernst, S. A.*: Tagesperiodische Windsysteme und Belüftungsverhältnisse in Freiburg i. Br. – Planungsrelevante Aspekte eines Bergwindsystems. Freiburger Geographische Hefte, Bd. 49. Freiburg 1995.
- [20] *Hosker, R. P.*: Flow and diffusion near obstacles. In: *Randerson, D.* (Hrsg.): Atmospheric science and power production, S. 241-287. US Dept. of Energy Techn. DOE/TIC-27601. Washington 1984.
- [21] *Röckle, R.; Richter, C.-J.*: Ausbreitung von Geruchsstoffen in Kaltluftabflüssen – Messungen und Modellrechnungen. VDI-Berichte 1373, S. 249-259. Düsseldorf: VDI 1998.
- [22] VDI 3787 Blatt 2: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil I: Klima. Berlin: Beuth 1998.
- [23] *Höppe, P.*: The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. Int. J. Biometeorol. 43 (1999), S. 71-75.
- [24] *Matzarakis, A.; Mayer, H.; Iziomon, M.*: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. Int. J. Biometeorol. 43 (1999), S. 76-84.
- [25] *Matzarakis, A.; Rutz, F.; Mayer, H.*: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the Ray-Man model. Int. J. Biometeorol. 51 (2007), S. 323-334.
- [26] Immissionsuntersuchungen im Raum Freiburg/Emmendingen 1999/2000. Hrsg.: Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit (UMEG). Bericht Nr. 31-13/2001 im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr, Baden-Württemberg. Karlsruhe 2000.
- [27] Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 1.2. Hrsg.: INFRAS AG. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin 1999.
- [28] *Richter, C.-J.; Röckle, R.*: Methode zur Ermittlung von Kfz-bedingten Schadstoffkonzentrationen in bebauten Gebieten. UVP-Report 5 (1995), S. 233-235.
- [29] *Mayer, H.; Kalberlah, F.; Ahrens, D.; Reuter, U.*: Analyse von Indizes zur Bewertung der Luft. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 62 (2002) Nr. 4, S. 177-183.
- [30] *Stock, P.*: Synthetische Klimafunktionskarte Ruhrgebiet. Hrsg.: Kommunalverband Ruhrgebiet. Essen 1995.
- [31] Klimaanalyse für die Landeshauptstadt Düsseldorf. Hrsg. Kommunalverband Ruhrgebiet. Essen 1995.
- [32] VDI 3787 Blatt 1: Umweltmeteorologie: Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Berlin: Beuth 1997.
- [33] *Mayer, H.; Beckröge, W.; Matzarakis, A.*: Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-Report 5 (1994), S. 265-268.