04.10 Klimamodell Berlin - Analysekarten (Ausgabe 2009)

Problemstellung

Auf Grund der in großen Teilen engen inhaltlichen Bezüge weisen die Erläuterungstexte zu den Karten 04.10.01 bis 04.10.06 eine gemeinsame Darstellung in den Kapiteln Problemstellung, Datengrundlage und Methode auf. Im Kapitel Kartenbeschreibung folgt dann eine Unterteilung in die einzelnen **Auswertungen**:

- Bodennahe Temperaturen (22.00 Uhr)
- Bodennahe Temperaturen (06.00 Uhr)
- Luftaustausch und Luftmassenstrom (22.00 und 06.00 Uhr)

Die im Rahmen der bisherigen Klima-Untersuchungen für den Umweltatlas Berlin gewonnenen Ergebnisse, dokumentiert in den Karten 04.02 - 04.07 sowie 04.09 (SenStadt 2001a-e und SenSUT 1998), basierten methodisch im Wesentlichen auf der Durchführung von stationären und mobilen Messungen sowie der Interpretation von Grundlageninformationen wie Flächennutzungs- oder Versiegelungsdaten. Diese Methoden erlaubten jedoch nur in Ansätzen die Untersuchung und Abgrenzung von lokalen oder regionalen Windzirkulations-Systemen, deren grundsätzliche Bedeutung für das Stadtklima einer Metropole, zumal in weitgehend ebenem Gelände, jedoch außer Frage steht.

Die moderne Klimaanalyse für die Praxis muss insbesondere das Prozesssystem der Luftaustauschströmungen erfassen und versuchen, eine Verbindung zwischen diesen Vorgängen und einer Gliederung des Untersuchungsraumes in klimatisch-(lufthygienische) Gunst- und Ungunsträume herzustellen. Diese beiden Begriffe beschreiben aus klimatischer Sicht die Gliederung des Raumes in Ausgleichsräume, Wirkungsräume und verbindende Strukturen (Leitbahnen), und sein Verständnis als Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Gefüge. "Ein **Ausgleichsraum** ist dabei ein vegetationsgeprägter, unbebauter Raum, der durch Bildung kühlerer und frischerer Luft über funktionsfähige Austauschbeziehungen lufthygienische oder bioklimatische Belastungen in Wirkungsräumen vermindern oder abbauen kann. Ein **Wirkungsraum** ist ein belasteter, bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum, der über Luftaustauschprozesse an einen angrenzenden oder über eine **Luftleitbahn** erschlossenen Ausgleichsraum angebunden ist." (vgl. Mosimann, Frey, Trute und Wickenkamp 1999). Diese Verfahrensweise löst sich damit grundlegend von der früher verbreiteten statischen Betrachtung auf der Basis von Stadtklimatopen, die den Untersuchungsraum in räumliche Einheiten untergliedert, in denen die mikroklimatisch wichtigsten Faktoren relativ homogen und die Auswirkungen wenig unterschiedlich sind. (vgl. VDI 1997).

Daher wurde erstmals 2003/2004 (SenStadt 2003 und SenStadt 2004b) im Rahmen eines Projektes für die gesamte Stadtfläche Berlins einschließlich eines Ausschnittes des Berliner Umlandes ein einheitliches digitales Klimamodell angewendet, welches die Untersuchung dieser Gesichtspunkte in einer hohen räumlichen Auflösung ermöglichen sollte. Zentraler Baustein dieses Verfahrens war das Methodenpaket FITNAH (vgl. Kapitel Methode). Diese Herangehensweise beinhaltet folgende wichtige Vorteile:

- Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Gesamtraum wird gewährleistet
- Neben den qualitativen Aussagen zur Ausprägung einzelner stadtklimatischer Phänomene werden auch quantitative Aussagen zu klimaökologischen Zuständen und zur Austauschprozessen möglich
- Klimaökologische Ausgleichs- und Prozessräume werden im Stadtgebiet verortet und in ihrer (möglichst exakten) räumlichen Ausprägung dargestellt
- Ein wichtiger Aspekt des klimaökologischen Ausgleichspotenziales von Freiflächen - der Kaltlufthaushalt - kann nur auf diese Weise flächendeckend untersucht werden.
- FITNAH ermöglicht auch die flächenhafte Berechnung der Ausbreitung von Luftschadstoffen unter den angenommenen meteorologischen Randparametern.

Auch mit dieser Anwendung des Klimamodells konnte der den schon vielfach bestätigte Zusammenhang zwischen dem Klima verschiedener Stadtgebiete und ihrer Bau-, Freiflächen- und Vegetationsstruktur bestätigt werden. Das typische Lokalklima entsteht aber nicht nur durch die Struktur eines Stadtgebietes, sondern auch durch seine Lage innerhalb der Stadt. So können verschiedene Räume einer Stadt untereinander oder mit dem Umland in Wechselwirkung stehen. Von entscheidender Bedeutung für den klimatischen Austausch sind dabei die Temperaturunterschiede benachbarter Gebiete. Eine Reduzierung dieser Unterschiede, z.B. durch Erhöhung der Baudichte oder Angleichung der Strukturen verschlechtert das Stadtklima. Weiterführende Hinweise zu diesen Themen und zu den Einflüssen der großräumigen Wetterlagen auf das lokale Klima finden sich im Erläuterungstext zur Karte 04.07 Klimafunktionen (SenStadt 2001e).

Ziel der vorliegenden aktualisierten Karten 04.10.01 - 04.10.06 ist es, die Ergebnisse der Anwendung des regionalen Simulationsmodells FITNAH zu präsentieren. Um eine Vergleichbarkeit mit den bereits im digitalen Umweltatlas veröffentlichten Klimaparametern herzustellen, wird auch die Verteilung der Lufttemperatur zu zwei Zeitschnitten präsentiert, obwohl bei einem direkten Vergleich der auf Messungen und Analogieschlüssen basierenden Kartendarstellungen mit den Simulationsergebnissen von Modellanwendungen die verschiedenen Rahmenbedingungen zu beachten sind. Dieser Hinweis gilt ebenso beim **Vergleich der Ergebnisse der beiden FITNAH Modellanwendungen** der Ausgaben 2003/2004 und 2009, da einerseits Umfang und Detaillierungsgrad der Eingangsdaten, andererseits auch die Weiterentwicklungen des Modells selbst zu von einander abweichenden Ergebnissen bzw. auch Klassifikationen führen können.

Besondere Bedeutung haben die Darstellungen zur räumlichen Abgrenzung und Quantifizierung der autochthonen Luftaustauschprozesse. Der Begriff 'autochthon' bezeichnet dabei klimatische Vorgänge, die an Ort und Stelle bzw. von selbst (also ohne Fremdwirkung, z.B. durch großräumige Windströmungen) entstehen (Gegensatz: allochthon). Sie begründen sich damit in der klimatischen Leistungsfähigkeit der einzelnen Nutzungsstruktur in ihrem jeweiligen Umfeld und bieten eine begründete Basis zur Ableitung von konkreten Planungsempfehlungen.

Datengrundlage

Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle erfordert eine über das eigentliche Untersuchungsgebiet hinausgehende räumliche Erfassung der Grundlagendaten und meteorologischen Randbedingungen. Dadurch soll gewährleistet werden, dass sich das Modell 'einschwingen' kann, um am Rande des eigentlichen Projektgebietes möglichst realitätsnahe Zustände simulieren zu können (zur Methodik des hier verwendeten Klimamodells FITNAH vgl. (Methode). Daher untergliederte sich das Untersuchungsgebiet in das etwa 890 km² große Stadtgebiet von Berlin sowie einen rund 900 km² großen Bereich des Umlandes (vgl. Abbildung 1).

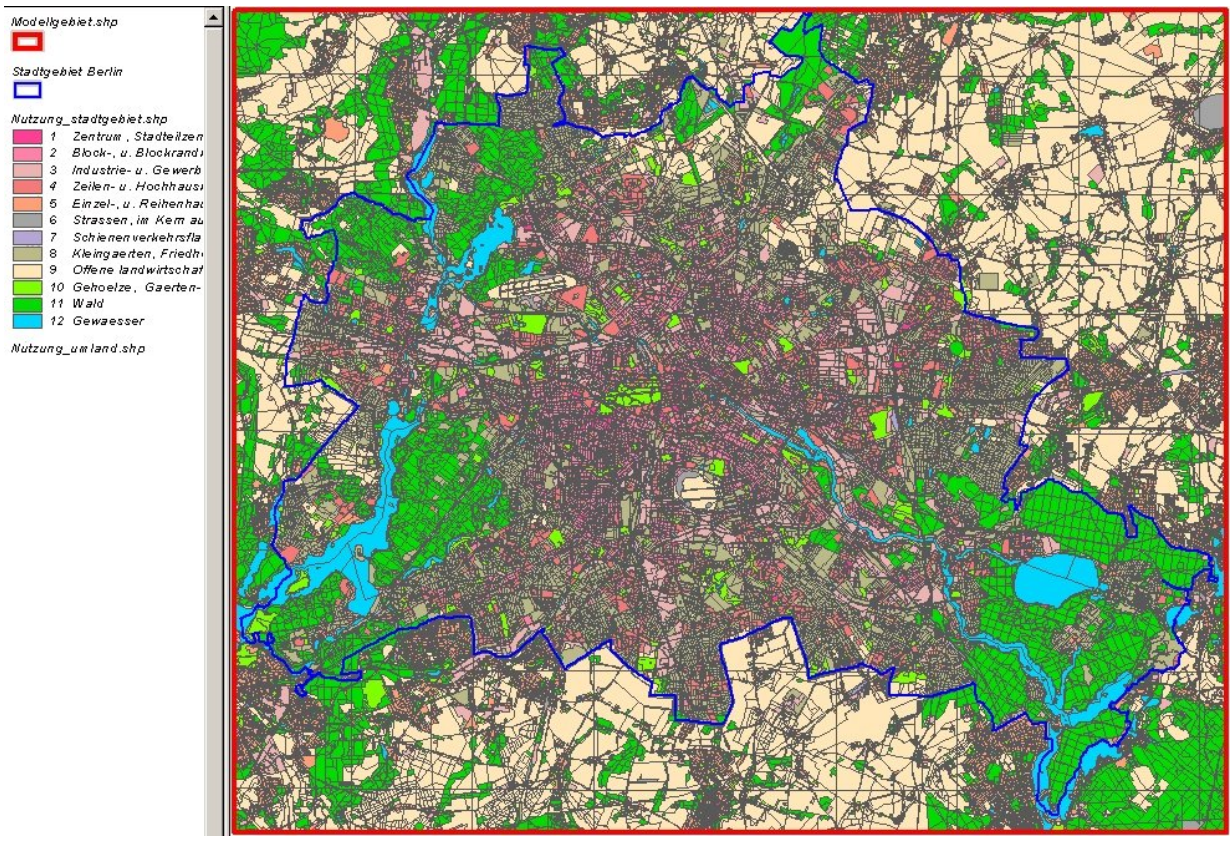

Abb.1: Klassifizierung der Landnutzung für die Modellanwendung. Es kommt ein Schlüssel mit 12 Nutzungsklassen zum Einsatz, der an die Erfordernisse des Modells FITNAH angepasst ist.

Nur wenige der verwendeten Parameter für das **Stadtgebiet Berlin** wurden speziell für dieses Projekt erhoben, es handelte sich vielmehr um Datengrundlagen aus jahrelangen Arbeiten zum Umweltatlas und zum ISU Berlin, die für vielfältige Auswertungen und Berechnungen zur Verfügung stehen. Das Informationssystem Stadt und Umwelt (ISU) der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung enthält ca. 25.000 Einzelflächen in einem räumlichen Bezugssystems, die für die Berechnung der Klimagrößen des ISU zur Verfügung gestellt wurden:

- Flächennutzung. Die Daten der **Flächennutzung** geben den Nutzungsstand von Ende 2005 wieder und beruhen auf der Auswertung von Luftbildern, bezirklichen Flächennutzungskarten, Ortsbegehungen und weiteren Unterlagen für den Umweltatlas (vgl. Karte 06.01, SenStadt 2008a und Karte 06.02, SenStadt 2008a). Es werden etwa 30 Nutzungsarten unterschieden.
- Stadtstrukturtypen (Karte 06.07, SenStadt 2008b). Eine weitere Verfeinerung dieser Daten fand über die Nutzungsdatei des ISU statt, die u.a. typenspezifische Angaben zur Höhe der Gebäude und Vegetationsstrukturen innerhalb der einzelnen Stadtstrukturtypen enthält.
- Versiegelung (Karte 01.02, SenStadt 2007)
- Als Geländemodell stand ein Digitales Geländemodell (DGM5) im Innenstadtbereich und teilweise im Norden und Südosten der Stadt, für die restlichen Bereiche ein DGM25 zur Verfügung.

Aus den Vorarbeiten zur Umsetzung der EU-Richtlinie zum Umgebungslärm konnte eine mit Höhenangaben aufbereitete Gebäudedatei eingespeist werden, welche mit Datenstand 2005 sämtliche 550.000 Gebäude der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) des Landes Berlin sowie in einem Abstand von 3 km um das Stadtgebiet 231.445 Gebäude aus dem Land Brandenburg enthält.

Die Liegenschaftskarte ALK bildet als darstellender Teil des so genannten Liegenschaftsbuches neben den Flurstücken vor allem die Gebäude einschließlich ihrer Geschossanzahl flächenscharf ab und ist daher als Basisinformation zur Abbildung von Hochbaustrukturen gut geeignet (vgl. Abbildung 2).

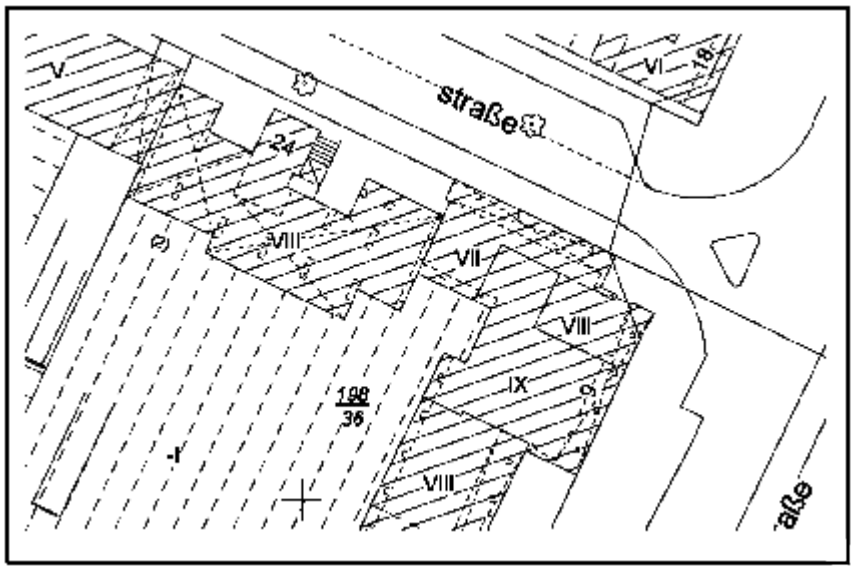

Abb. 2: Ausschnitt aus der Automatisierten Liegenschaftskarte (Angabe der Gebäudegeschosse in römischen Zahlen)

Gegenüber der ersten Anwendung des Klimamodells 2003/2004 wurde in dieser Ausgabe die lufthygienische Komponente auch in einer flächenhaften Auswertung aufgenommen. Dazu wurden Daten des **Emissionskatasters Verkehr 2005** der Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz genutzt (SenGesUmV 2008).

Zur Einbindung der **Flächen außerhalb Berlins** wurden folgende Datengrundlagen genutzt:

- ATKIS (Amtlich-kartographisches Informationssystem). Das Kartenwerk umfasst die erste Realisierungsstufe des Basislandschaftsmodells - DLM 25/1. Der Grunddatenbestand enthält verschiedene Objektarten und Attribute. Die Straßen, Wege, Eisenbahnen, Gewässer und Grenzen bilden eine geometrisch exakte Linienstruktur der Landschaft. Sie ist durch die flächenhaften Landschaftsteile, wie Wohnbauflächen usw., ausgefüllt.
- Die Geländehöhen wurden dem Datenbestand des CORINE-Projektes entnommen. Corine ist ein Synonym für "koordinierte Erfassung von Informationen über die Umwelt" und stellt ein von der Kommission der Europäischen Union im Jahr 1985 gegründetes Programm zur Erfassung von Umweltdaten dar.

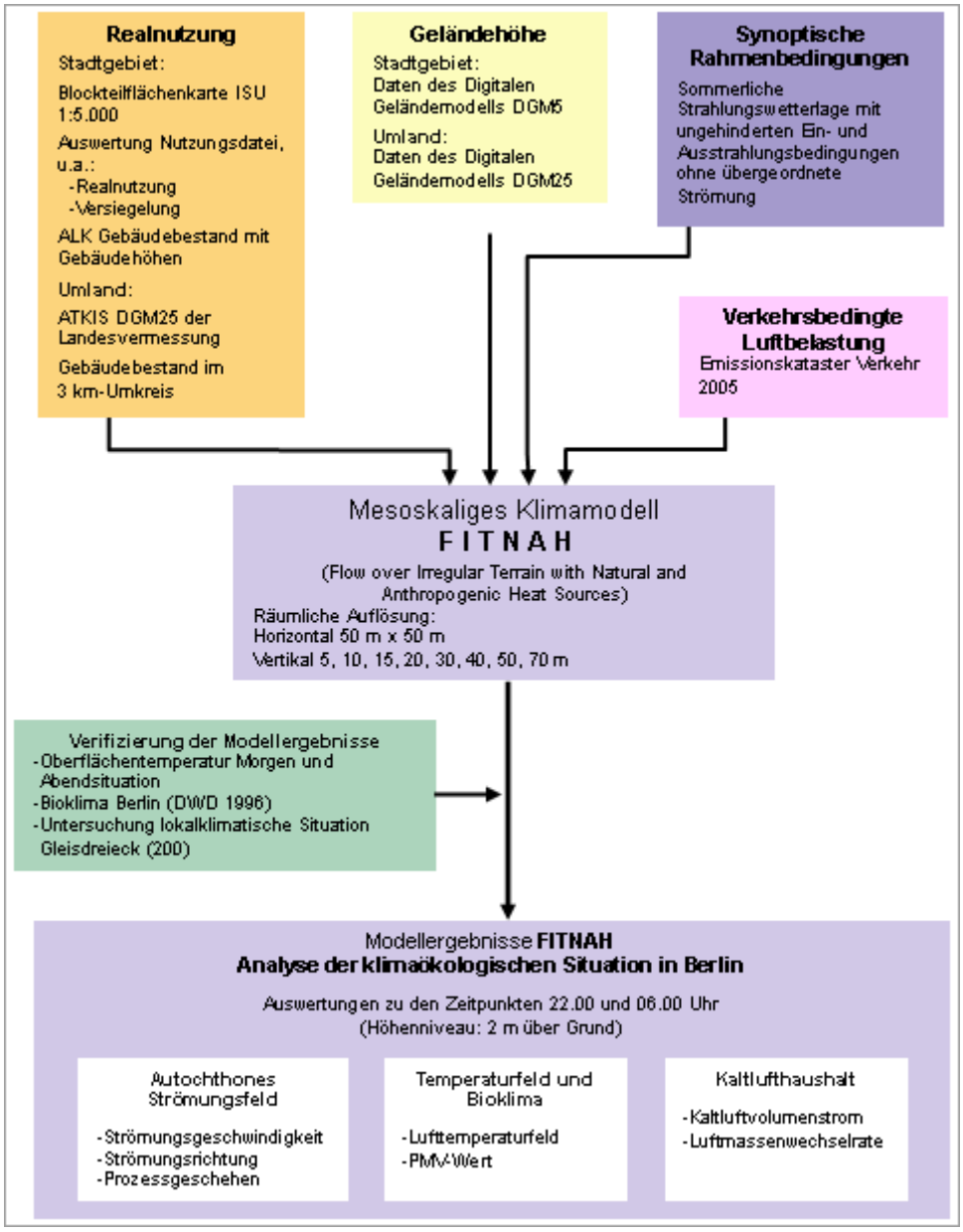

Abb. 3: Datenbasis und Datenfluss für die Anwendung des Klimamodells FITNAH

Methode

Eine wichtige Ursache für die Entstehung und die Ausbildung eines Stadtklimas sind die gegenüber dem Umland veränderten Boden- und Oberflächeneigenschaften im urbanen Raum. Daraus resultiert die städtische Überwärmung genauso wie eine städtische Lokalwindzirkulation. Wind und Temperatur sowie daraus abgeleitete Größen sind die dominierenden Einflussfaktoren zur Bewertung des Stadtklimas unter human-biometeorologischen und lufthygienischen Gesichtspunkten.

Die **Untersuchung und Erfassung des Stadtklimas** kann mit Hilfe verschiedener Methoden erfolgen. Hierzu zählen Feldmessungen und Fernerkundungsverfahren genauso wie Windkanalstudien und die Anwendung numerischer Simulationsmodelle.

Gerade numerische Simulationsmodelle sind in vorteilhafter Weise in der Lage, die aufgrund der großen Komplexität der Bebauungsstrukturen räumlich und zeitlich sehr stark veränderlichen meteorologischen Größen zu erfassen.

Die detaillierte Berechnung der Wind- und Temperaturverhältnisse im Großraum Berlin wurde auch in dieser Aktualisierung mit dem fortgeschriebenen Modell **FITNAH** (**F**low over **I**rregular **T**errain with **N**atural and **A**nthropogenic **H**eat Sources) durchgeführt. Eine genaue mathematische und physikalische Beschreibung des Modells ist bei Groß 1993 und Richter & Röckle o.J. zu finden. In

diesen Quellen können weitere detaillierte Hinweise zu Grundgerüst und Arbeitsansatz des dreidimensionalen Modells FITNAH sowie zur Interpretation der Modellergebnisse anhand eines beispielhaften Vergleiches mit Messdaten unter Methode / ergänzende Hinweise eingesehen werden.

Generell gilt, dass numerische Simulationsmodelle in sehr vielen Gebieten der Meteorologie eingesetzt werden, da die resultierenden Erkenntnisse wichtige Basisinformationen für viele Lebensbereiche liefern (vgl. Übersicht der wichtigsten Modelle). Die Wettervorhersage für die nächsten 1-5 Tage wird fast ausschließlich von solchen komplexen und umfangreichen Computermodellen erstellt. Auch die Erkenntnisse zu den möglichen Veränderungen unseres globalen Klimas in den nächsten Jahrzehnten resultieren aus solchen Rechnungen. Und schließlich werden Modelle ähnlichen Typs auch dazu verwendet, die lokalen und die regionalen Verteilungen der meteorologischen Variablen in der Atmosphäre zu berechnen (Groß 2002).

Ausschließlich durch Modelle kann das Immissionsverhalten von Luftschadstoffen in der Atmosphäre simuliert werden. Auf der Basis der FITNAH-Rechenergebnisse war es möglich, ein realistisches Ausbreitungsverhalten des untersuchten Gases Stickstoffdioxid durchzuführen. Dabei wurden die Strömungs- und Turbulenzfelder, die mit dem dreidimensionalen Modell FITNAH berechnet wurden, genutzt. Die Ergebnisse zu den berechneten NO_2-Konzentrationen in Grünflächen werden in den Bewertungskarten 04.11 dargestellt und in den Begleittexten beschrieben.

Die o.g. Computermodelle für die verschiedenen Skalen und Aufgabenstellungen und auch das hier eingesetzte Modell FITNAH basieren alle auf dem gleichen mathematisch-physikalischen Gleichungssystem. Lediglich im Detail finden sich skalenspezifische Unterschiede.

Meteorologische Rahmenbedingungen für die Modellberechnung

Neben den modellinternen Festsetzungen spielen die meteorologischen Randbedingungen eine große Rolle. Während Hochdruckwetterlagen können sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Landschaft besonders gut ausprägen. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagerten synoptischen Wind gekennzeichnet. Bei den hier durchgeführten numerischen Simulationen wurden die großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen entsprechend festgelegt.

Hinweise zur Interpretation der Modellergebnisse

FITNAH basiert in der horizontalen Ausrichtung auf einem gleichmäßigen, in der Vertikalen auf einem gestreckten Gitternetz. Durch die anteilmäßige Zuordnung der Eingangsparameter wie Flächennutzung, Geländehöhen etc. auf dieses Raster kann für jedes Rastervolumen nur ein repräsentativer Wert berechnet, der einen gewichteten Mittelwert aus allen eingegangenen Daten darstellt (vgl. Methode / ergänzende Hinweise).

Verifizierung der Ergebnisse des Klimamodells FITNAH

Zur Überprüfung der aus den Modellläufen abgeleiteten Informationen wurde auf eine Studie zu den lokalklimatischen Funktionen der Freiflächen im Bereich des Gleisdreieckes in Berlin-Schöneberg zurückgegriffen.

Anhand eines umfangreichen Vergleiches wurden die Messergebnisse der Studie mit den Simulationsresultaten der Modellanwendung verglichen.

Im Ergebnis dieses Vergleiches kann eine **gute Übereinstimmung** zwischen den Ergebnissen der Messkampagne und der Modellierung des lokalen Strömungsfeldes mit FITNAH in der Region Gleisdreieck festgestellt werden.

Die eigenbürtigen, lokalen Strömungsphänomene, die durch die Modellrechnung postuliert werden, können zum großen Teil über die Messungen belegt werden. Angaben zur Strömungsrichtung und -geschwindigkeit liegen in den gleichen Größenordnungen. Die relevanten Luftaustauschprozesse – kleinräumige, orographisch bedingte Kaltluftabflüsse aus dem Viktoriapark/Kreuzberg und thermisch induzierte Ausgleichsströmungen zwischen den Freiflächen des Gleisdreiecks und der angrenzenden Bebauung – werden qualitativ und quantitativ gleich erfasst und dargestellt (vgl. Vogt 2002a, S. 26 ff). Eine eher regional geprägte Ausgleichsströmung zwischen Berliner Innenstadt und Umland kann hingegen durch beide methodischen Ansätze nicht belegt werden (vgl. Methode / ergänzende Hinweise).

Methode / ergänzende Hinweise

Nachfolgend werden umfangreiche Zusatzinformationen zum Themenkomplex der methodischen Bearbeitung des Klimamodells Berlin angeboten. Der Text ergänzt damit die Inhalte des Kapitels Methode.

Konzept und Verfahren des Klimamodells FITNAH

Das **Grundgerüst des dreidimensionalen Modells FITNAH** besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie sowie Bilanzgleichungen für Feuchtekomponenten und Luftbeimengungen. Die verschiedenen turbulenten Flüsse werden mit Hilfe empirischer Ansätze mit den berechenbaren mittleren Größen verknüpft. Der dabei auftretende turbulente Diffusionskoeffizient wird aus der turbulenten kinetischen Energie berechnet, für die eine zusätzliche Gleichung gelöst wird.

Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität des Wasserdampfes in der Luft berücksichtigt wird.

Bei detaillierten Simulationen in realem Gelände müssen neben der Orographie insbesondere auch der **Einfluss von Wäldern und urbanen Strukturen** auf die Verteilung der meteorologischen Größen realitätsnah berücksichtigt werden. Hierzu sind in FITNAH besondere Parametrisierungen vorgesehen.

Ein Wald oder Baumbestand findet über bestandsspezifische Größen wie Baumhöhe, Bestandsdichte und Baumart Eingang in das Modell. Damit gelingt es u.a., die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im Kronenbereich und die starke nächtliche Abkühlung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit verfügbaren Beobachtungen zu simulieren.

Unter Berücksichtigung der stadtspezifischen Größen Gebäudehöhe, Versiegelungs- und Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (vgl. Groß 1989).

Das gesamte Gleichungssystem einschließlich der Parametrisierungen wird in ein dem Gelände folgendes Koordinatensystem transformiert. Damit gelingt es insbesondere, die Randbedingungen der verschiedenen meteorologischen Größen am unteren Rand, dem Erdboden, problemspezifisch zu formulieren. Die Berechnung der Erdoberflächentemperatur erfolgt über eine Energiestrombilanz, bei der fühlbarer und latenter Wärmestrom, der Bodenwärmestrom, kurz- und langwellige Strahlungskomponenten sowie der anthropogene Wärmestrom Berücksichtigung finden.

Die Differentialgleichung des benutzten Gleichungssystems werden auf einem numerischen Gitter gelöst. Die hier verwendete räumliche Maschenweite Δx beträgt in beide horizontale Raumrichtungen 50 m. Die vertikale Gitterweite ist nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre sind die Rechenflächen besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 70 m. Nach oben hin wird der Abstand Δz immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3.000 m über Grund. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind (vgl. Abbildung 4).

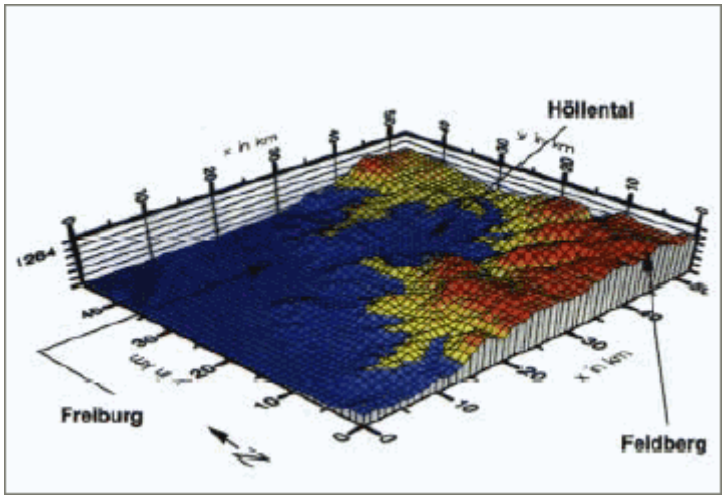

Abb. 4: Beispiel für die Wiedergabe einer Naturlandschaft im Modellgebietscharakter (aus: Richter & Röckle o.J.)

Synoptische Rahmenbedingungen für die Modellberechnung

Während Hochdruckwetterlagen (autochthone Wetterlagen) können sich die lokalklimatischen Besonderheiten einer Landschaft besonders gut ausprägen. Eine solche Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwachen überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet. Bei den hier durchgeführten numerischen Simulationen wurden die großräumigen synoptischen Rahmenbedingungen entsprechend festgelegt:

- Bedeckungsgrad 0/8
- geostrophische Windgeschwindigkeit 0 m/s
- relative Feuchte der Luftmasse 50 %.

Hinweise zur Interpretation der Modellergebnisse

Aufgrund der verwendeten horizontalen Maschenweite von 50 m können beispielsweise einzelne Häuser und Bauten nicht explizit aufgelöst werden. Vielmehr wird vom Modell ein für dieses Rastervolumen ($\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$) repräsentativer Wert berechnet, der einen gewichteten Mittelwert aus den vorhandenen Landnutzungen darstellt.

Dieser Sachverhalt soll an Hand der Windgeschwindigkeit U verdeutlicht werden: Sind beispielsweise 40 % des Rastervolumens mit Bauten ausgefüllt (U_{Haus} = 0 m/s) und 60 % ohne Strömungshindernisse (z.B. U_{Frei} = 1 m/s), so beträgt die repräsentative Windgeschwindigkeit, die auch vom Modell berechnet wird,

$40\ \% \cdot U_{Haus} + 60\ \% \cdot U_{Frei} = 0{,}6$ m/s.

Auch bei der Berechnung der Temperatur ist eine ähnliche Wichtung der einzelnen Landnutzungen verfahrensbedingt im Modell enthalten und muss bei der Interpretation der Simulationsergebnisse berücksichtigt werden. Sind beispielsweise in einem Raster vier verschiedene Landnutzungen mit unterschiedlichen Flächenanteilen vorhanden, so z.B.

Wasser	Flächenanteil 20 %	T_{Wasser}	= 18 °C
Freiland	Flächenanteil 40 %	T_{Frei}	= 14 °C
Stadt	Flächenanteil 30 %	T_{Stadt}	= 17 °C
Wald	Flächenanteil 10 %	T_{Wald}	= 16 °C

so berechnet sich ein für das Raster repräsentativer Wert von T_{Modell} = 15,9 °C.

Verifizierung der Ergebnisse des Klimamodells FITNAH

Zur Überprüfung der aus den Modellläufen abgeleiteten Informationsebenen kann auf eine Studie zu den lokalklimatischen Funktionen der Freiflächen im Bereich Gleisdreieck zurückgegriffen werden. Die orientierende Untersuchung zu den Strömungs- und Temperaturfeldern im Bereich Gleisdreieck setzte sich methodisch aus

- stationären Messungen aus dem Sommerhalbjahr 2001 (vier Messkampagnen) und
- mobilen Messungen aus dem Winterhalbjahr 2001/2002 (vier Messkampagnen)

zusammen. Die meteorologischen Rahmenbedingungen schienen geeignet, dass sich eigenbürtige Strömungssysteme im Umfeld des Areals Gleisdreieck ausbilden konnten (vgl. Vogt 2002a und Vogt 2002b).

Folgende Arbeitshypothesen sollten im Zuge der Messkampagnen überprüft werden:

1. es gibt eine autochthone, regionale Strömung, die Kaltluft über die rauigkeitsarmen Strukturen des Gleiskörpers (= Leitbahn) aus dem Raum Teltow in die Innenstadt Berlins transportiert
2. das durch Freiflächen geprägte Areal Gleisdreieck liefert Kaltluft in die unmittelbar angrenzenden bebauten Stadtteile

3. es gibt einen Kaltluftabfluss aus dem Bereich Kreuzberg/Viktoriapark, der in die Freiflächen des Gleisdreiecks eingreift.

Diese Annahmen decken sich mit den Vorstellungen zur Ausprägung von autochthonen Strömungssystemen zwischen unterschiedlich strukturierten urbanen Arealen in dieser Untersuchung und sollten sich somit auch in den Modellergebnissen der FITNAH-Simulationen wiederfinden lassen. Deshalb können hier die Messdaten zum Strömungsfeld für die Überprüfung der Plausibilität der Modellergebnisse herangezogen werden.

Allerdings muss von einer eingeschränkten Aussagefähigkeit dieses Vergleichs ausgegangen werden:

- Die meteorologischen Rahmenbedingungen für die Messungen waren nicht in jedem Fall ideal für die Ausprägung von eigenbürtigen Strömungssystemen
- mobile und stationäre Messungen können immer nur einen Stichprobencharakter haben (räumlich und zeitlich)
- die mobilen Messungen sind im Winterhalbjahr während starker Frostperioden durchgeführt worden
- es handelt sich auch eher um „quasistationäre“ Kurzzeitmessungen, da an jedem der 37 Messplätze nacheinander für ca. 4 Minuten die Windfeldparameter erfasst worden sind. Die Messkampagnen zur Erfassung des Windfelds für diesen Raum werden 4 bis 5 Stunden gedauert haben. Es handelt sich somit nicht um die Wiedergabe eines Windfeldes für einen definierten Zeitschnitt
- bei den Modellläufen, die für den Vergleich herangezogen werden, wird von idealen Rahmenbedingungen für die Ausbildung von eigenbürtigen Strömungssystemen ausgegangen, d.h. die Oberströmung weist eine Geschwindigkeit von 0 m/s auf.

Überprüfung der Arbeitshypothesen zum autochthonen Strömungsfeld

Betrachtet werden bei diesem Abgleich vorrangig die Ergebnisse, die in den frühen Nachtstunden in 2,5 m über Grund erzielt werden. So ist in dieser Hinsicht eine weitgehende Vergleichbarkeit der Ergebnisse Modell/Messung gewährleistet. Der Abgleich erfolgt an Hand der aufgestellten Arbeitshypothesen zur Strömungssituation im Untersuchungsraum:

- **es gibt eine autochthone, regionale Strömung, die Kaltluft über die rauigkeitsarmen Strukturen des Gleiskörpers (= Leitbahn) aus dem Raum Teltow in die Innenstadt Berlins transportiert.**

Weder in den Messkampagnen noch in den Modellrechnungen kann eine regionale Strömung, die die rauigkeitsarmen Freiflächen der Bahnanlagen als Leitbahn nutzen, nachgewiesen werden.

Am Messplatz „Monumentenbrücke“ hätte sich ein solches Strömungssystem in den Messwerten abbilden müssen (vgl. Vogt 2002a, S. 14). Nachgewiesen werden konnte aber innerhalb der Messkampagnen lediglich das Durchgreifen der Oberströmung in den relativ rauigkeitsarmen, vegetationsgeprägten Flächen des Gleisdreiecks. Auch im Rahmen der mobilen, winterlichen Messungen wurde diese Strömung nicht erfasst (vgl. Vogt 2002b, Abb. 78 ff.).

Auch das Modellergebnis spricht gegen eine großräumigere Austauschströmung. Das Strömungsfeld (22.00 Uhr) zeigt ein lokal geprägtes Mosaik von kleinräumig wirksamen Luftaustauschzellen, die vorrangig thermisch induziert werden. Die räumliche Ausdehnung dieser „Strömungszellen“ beträgt in der Regel zwischen 500 m und 1200 m (vgl. Abbildung 5).

- **Das von Freiflächen geprägte Areal Gleisdreieck liefert Kaltluft in die unmittelbar angrenzenden, bebauten Stadtteile**.

Die Messungen lieferten klare Hinweise auf das Vorhandensein dieser lokalen Ausgleichströmungen (vgl. Vogt 2002a, S. 15). Allerdings wurde eine umfassende Abbildung dieser Strömungssysteme durch die nicht bei allen Messkampagnen optimalen meteorologischen Rahmenbedingungen und den zeitlichen Versatz bei mobilen Messungen verhindert.

Die mit FITNAH erzeugten Modellergebnisse zeichnen dagegen ein umfassendes Bild der räumlichen Ausprägung dieser lokalen, vorrangig thermisch induzierten Strömungssysteme nach. Zusätzlich zu den punktuellen Aussagen der Messungen erlauben die Modellergebnisse Aussagen zur Reichweite (= Eindringtiefe) der Strömungen in die angrenzende Bebauung. Exemplarisch kann hier auf den Bereich zwischen den Messpunkten Lützowstraße und Kurfürstenstraße am Westrand des Areals Gleisdreiecks verwiesen werden (Abb. 5). Hier dringt die lokal gebildete Kaltluft ca. 500 m in die Bebauung ein.

Die Strömungsgeschwindigkeiten, die gemessen bzw. modelliert werden, erreichen sehr ähnliche Größenordnungen. In der Regel gehen diese thermisch induzierten Strömungssysteme mit Windgeschwindigkeiten von 0,1 bis 0,5 m/s einher. Die Messkampagnen zeigten, dass diese Werte sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr erreicht werden (vgl. Vogt 2002a, S. 19 und 22). Es zeigt sich außerdem ein Vordringen der Kaltluft im Bereich Möckernstraße, wobei die Eindringtiefe mit bis zu 150 m geringer ausgeprägt ist (vgl. Abb. 5).

- **Es gibt einen Kaltluftabfluss im Bereich Kreuzberg/Victoriapark.**

Die Messergebnisse zu den lokalen Kaltluftabflüssen aus dem Bereich Viktoriapark/Kreuzberg bestätigen darüber hinaus die FITNAH-basierten Simulationsrechnungen (vgl. Vogt 2002a, S. 17). In den Messungen spiegelte sich die Kanalisierung des Kaltluftabflusses vor allem über die Kreuzbergstraße sowie Großbeerenstraße wieder. Diese Strömungen gingen mit geringen Windgeschwindigkeiten von 0,7 bis 0,2 m/s einher.

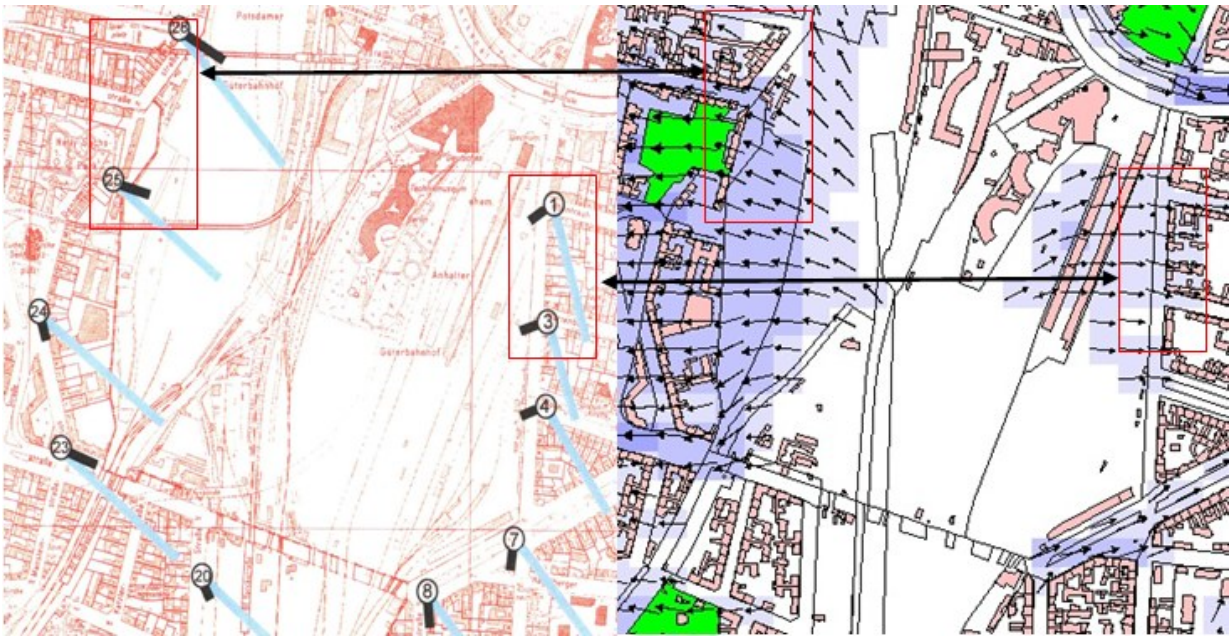

Abb. 5: Verifizierung der Ergebnisse des Klimamodells FITNAH (rechte Abb.) anhand stationärer und mobiler Messungen im Bereich Gleisdreieck (linke Abb., aus Vogt 2002a und Vogt 2002b); in der linken Abb. weisen die von den Messpunkten ausgehenden Linien in die Richtung, aus der der Wind kommt; in der rechten Abb. zeigen die Windpfeile in Strömungsrichtung

Fazit

Insgesamt gibt es eine **gute Übereinstimmung** zwischen den Ergebnissen der Messkampagne und der Modellierung des lokalen Strömungsfeldes mit FITNAH in der Region Gleisdreieck.

Die eigenbürtigen, lokalen Strömungsphänomene, die durch die Modellrechnung postuliert werden, können zum großen Teil über die Messungen belegt werden. Angaben zur Strömungsrichtung und -geschwindigkeit liegen in den gleichen Größenordnungen. Die relevanten Luftaustauschprozesse – kleinräumige, orographisch bedingte Kaltluftabflüssen aus dem Viktoriapark/Kreuzberg und thermisch induzierte Ausgleichsströmungen zwischen den Freiflächen des Gleisdreiecks und der angrenzenden Bebauung – werden qualitativ und quantitativ gleich erfasst und dargestellt (vgl. Vogt 2002a, S. 26 ff). Eine eher regional geprägte Ausgleichsströmung zwischen Berliner Innenstadt und Umland kann hingegen durch beide methodischen Ansätze nicht belegt werden.

Kartenbeschreibung

Nachfolgend wird eine gemeinsame Beschreibung für alle Einzelauswertungen der Modellrechnungen präsentiert. Zur schnelleren Orientierung im Text werden Verknüpfungen zu den einzelnen Schwerpunktbereichen angeboten:

- Bodennahe Temperaturen (22.00 Uhr)
- Bodennahe Temperaturen (06.00 Uhr)

- Luftaustausch und Luftmassenstrom (22.00 und 06.00 Uhr)

Die Modellrechnungen wurden jeweils abends zur Zeit des Sonnenunterganges gestartet und bis Sonnenaufgang des darauf folgenden Tages durchgeführt. Die Zeitschnitte, zu denen die Modellergebnisse ausgelesen werden sollen, können prinzipiell frei ausgewählt werden (Minuten bis Stunden). Ausgewertet und in Form von Karten dargestellt werden für die einzelnen Klimaparameter die Zeitschnitte 22.00 Uhr und 06.00 Uhr. Der Termin 22.00 Uhr repräsentiert kurz nach Sonnenuntergang den Umschwung von der Einstrahlungs- zur Ausstrahlungssituation und steht für den Beginn einer Phase mit großer Abkühlungsdynamik in den unterschiedlich strukturierten Teilflächen im Stadtgebiet. Der 06.00 Uhr Termin steht für die maximale Abkühlung innerhalb des Stadtkörpers.

Im Folgenden werden einzelne, exemplarische Ergebnisse der Modellrechnungen für das gesamte Stadtgebiet kurz dargestellt. Einen Überblick über die jeweils ausgewerteten klimatologischen Parameter gibt die Abbildung 3 .

Bodennahes Temperaturfeld - Allgemeine Anmerkungen

Bei der Darstellung des bodennahen Temperaturfeldes handelt es sich um das Rastermittel der Temperatur in der bodennahen Schicht der Atmosphäre (0 – 5 m über Grund). Sind innerhalb einer Rasterzelle mehrere Landnutzungen mit unterschiedlichem Flächenanteil vorhanden, so berechnet sich die gezeigte Temperatur aus der anteilsmäßigen Wichtung. Insofern sind die simulierten Temperaturwerte nur für größere Gebiete mit einheitlicher bzw. entsprechender Landnutzung mit bodengebundenen Messwerten vergleichbar.

Ausschlaggebend für die Temperaturverteilung sind die landnutzungsabhängigen Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie deren Wechselwirkungen mit den atmosphärischen Prozessen in der bodennahen Grenzschicht. Innerhalb des Erdbodens sind dabei Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Bedeutung. Je größer beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit des Bodens ist, umso schneller und tiefer kann Wärme in das entsprechende Material eindringen, aber auch wieder von diesem abgegeben werden.

Die Oberflächenbeschaffenheit natürlicher und künstlicher Flächen bestimmt über die Albedo (Reflexionsvermögen) und die Emissivität die Menge an Energie, die im kurzwelligen und im langwelligen Bereich der Strahlung für eine Erwärmung / Abkühlung zur Verfügung steht. Schließlich spielt der Turbulenzzustand der bodennahen Atmosphäre eine große Rolle bei dem Transport von fühlbarer und latenter Energie vom Erdboden weg oder zu diesem hin.

Alle genannten Prozesse sind über die Energiebilanz des Erdbodens miteinander verknüpft und bestimmen die Temperatur der Oberflächen und der darüber liegenden Luftschichten.

Bodennahes Temperaturfeld

Die Temperaturverhältnisse der bodennahen Atmosphäre **um 22 Uhr** im Stadtgebiet sind in Karte 04.10.01 gezeigt. Aufgrund der großen Vielfalt landnutzungsbedingter Unterschiede dieser Einflussgrößen wird eine **stark strukturierte räumliche Verteilung der bodennahen Temperatur** simuliert. In den frühen Nachtstunden (22.00 Uhr) heben sich dabei die Hauptlandnutzungen in charakteristischer Weise gegeneinander ab.

Die **Freiflächen** werden tagsüber stark aufgeheizt und kühlen sich nach Sonnenuntergang ebenso stark wieder ab. Im Temperaturfeld treten vor allem die am Rand des Stadtgebietes gelegenen unbebauten, vegetationsgeprägten Freiflächen mit den geringsten Temperaturen hervor, da hier eine ungehinderte, nächtliche Wärmeausstrahlung erfolgen kann.

Die **Waldflächen** sind um diese Zeit noch etwa 1 K wärmer als die umgebende Flur, jedoch deutlich kälter als die bebauten Gebiete.

Urbane Gebiete heben sich deutlich durch ein insgesamt höheres Temperaturniveau von der Umgebung ab. Allerdings ist die Temperaturverteilung in den bebauten Gebieten räumlich stark differenziert, da beispielsweise Rasterzellen mit Einzelhausbebauung, Kerngebiete, Industriegebiete und Verkehrsanlagen stark unterschiedliche Boden- und Oberflächeneigenschaften aufweisen. Auch wird das im Mittel höhere Temperaturniveau durch innerstädtische Grünanlagen wie Großer Tiergarten und die Bereiche ehemaliger Flughafen Tempelhof bzw. Flughafen Tegel unterbrochen.

In Abhängigkeit von den individuellen Oberflächeneigenschaften der verschiedenen Landnutzungen kühlt sich die Erdoberfläche im Laufe der Nacht unterschiedlich stark ab, die **Temperaturverteilung um 06.00 Uhr** morgens zeigt die Karte 04.10.02.

Während bei **Wasserflächen** diese Abkühlung aufgrund des guten Wärmespeichervermögens nur sehr gering ausfällt, zeigen Freiflächen wie **Äcker und Wiesen** einen starken Temperaturrückgang. Dies liegt in der ungehinderten, langwelligen Ausstrahlung dieser Flächen begründet, wobei der Bodenwärmestrom durch Trockenheit zusätzlich reduziert werden kann. Bei **Waldflächen** schützt das Kronendach die darunter liegende bodennahe Atmosphäre vor einer starken Abkühlung; daher heben sich Wälder in der Temperaturverteilung als relativ warme Gebiete hervor.

In den **urbanen Bereichen** wird die Abkühlung durch die vorhandenen wärmespeichernden Materialien wie Beton und Stein deutlich reduziert. Zum einen trägt die tagsüber gespeicherte Wärmemenge dazu bei, dass die Temperatur nicht so stark zurückgeht. Zum anderen werden durch die niedrigen Windgeschwindigkeiten turbulenter und latenter Wärmestrom reduziert, die den Abtransport wärmerer Luft bewerkstelligen könnten. Die Stadtgebiete bleiben somit insgesamt wärmer. Während der Temperaturunterschiede zum unbebauten Umland in den Abendstunden typischerweise 2 K beträgt, wächst dieser Wert bis in die frühen Morgenstunden auf 6 K an. Diese großen horizontalen Unterschiede werden im Bereich der innerstädtischen Freiflächen nicht ganz erreicht. Hier macht sich die Nachbarschaft zu den relativ warmen bebauten Gebieten bemerkbar.

Luftaustausch und Luftmassenstrom als Kriterien klimatischer Ausgleichsleistungen

Die gute Durchlüftung von Siedlungsgebieten kann zum Abbau von humanbiometeorologischen Belastungen führen (vgl. Moriske und Turowski 2002). So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen gesenkt werden, was zu einem Abbau der Wärmebelastung des Menschen in den Sommermonaten führt. Ist diese herangeführte kühlere Luft mit Luftschadstoffen unbelastet (Frischluft), so führt die Durchlüftung gleichzeitig auch zu einer Verbesserung der lufthygienischen Situation.

Zur Beurteilung der Durchlüftungssituation ist folglich die geeignete **Zuordnung von Belastungsräumen und Ausgleichsräumen**, die die entsprechende unbelastete Luft zur Verfügung stellen, sowie ein Zirkulationssystem, welches einen Luftmassentransport bewerkstelligen kann, notwendig.

Klimaökologische Ausgleichswirkungen gehen von den unbebauten Arealen aus, die in das Stadtgebiet eingestreut sind. Sie sind durch einen hohen Vegetationsanteil sowie einem geringen Versiegelungsgrad von weniger als 20 % charakterisiert und verbessern die lokalklimatische Situation selbst in den dicht bebauten Kernbereichen Berlins (vgl. Karte 04.10.03 bis Karte 04.10.06).

Die Ausgleichsleistung wird über thermisch und/oder orographisch induzierte Strömungssysteme erbracht. Um die Freiflächen, die benachbarte bebaute Bereiche mit Frisch-/Kaltluft versorgen, zu identifizieren und sie den unterschiedlichen Austauschprozessen zuordnen zu können, werden nachfolgende Abgrenzungskriterien verwendet. Bei klimaökologisch relevanten Freiflächen sollten die eigenbürtigen Ausgleichsströmungen mindestens eine Geschwindigkeit von 0,2 m/s während einer austauscharmen, sommerlichen Strahlungswetternacht erreichen. Die Ausgleichströmungen können als Hang- oder Talwinde bezeichnet werden, wenn Hang- bzw. Talbodenneigungen von >1° auftreten. Thermisch induzierte Strömungssysteme sind in den nahezu ebenen Arealen zu finden (vgl. Abbildung 6).

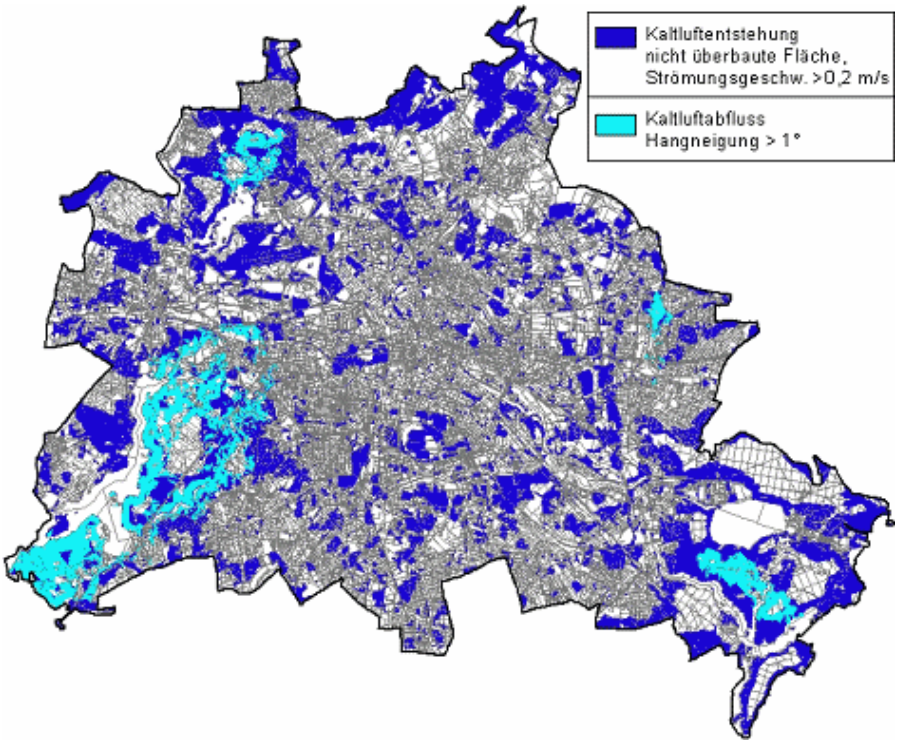

Abb. 6: An Kaltluftentstehung bzw. Kaltluftabfluss beteiligte Grünflächen bzw. grünbestimmte Siedlungsräume im Stadtgebiet Berlin während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (22.00 Uhr; Rasterauflösung 50 m)

Bedeutsame Ausgleichsleistungen sind von den großen zusammenhängenden Wald- und Parkflächen zu erwarten, die vor allem in den Randbereichen Berlins flächenhaft verbreitet sind. Aufgrund der hohen Abkühlungsraten in den Abend- und Nachtstunden sind diese Bereiche als wichtige Kaltluftliefergebiete anzusprechen. Tabelle 1 zeigt die prozentualen Flächenanteile im Stadtgebiet, die an der Bildung von Flurwinden sowie Kaltluftabflüssen beteiligt sind:

Prozess	Flächenanteile in % 22.00 Uhr	Flächenanteile in % 06.00 Uhr
Thermisch induzierte Strömungssysteme	24,2	37,2
Orographisch induzierte Strömungssysteme	4,7	5,0

Tab. 1: Anteil der an der Ausbildung autochthoner Strömungssysteme beteiligten Flächen im Stadtgebiet. Unterschieden werden thermisch und orographisch (reliefbedingt) induzierte Strömungssysteme

Somit sind, beide Prozesse zusammengenommen, am Beginn einer Strahlungsnacht **ca. 30 % des Stadtgebietes an der Ausbildung von Ausgleichsströmungen beteiligt**, wobei der Flächenanteil im Verlauf der Nacht von 28,9 % um 22.00 Uhr auf 42,2 % um 06.00 Uhr morgens zunimmt. Diese Zunahme ist darauf zurückzuführen, dass weitere unbebaute Flächen insbesondere im Nordosten Berlins sowie im Umfeld des Müggelsees und des Grunewaldes an der Kaltluftbildung teilnehmen.

Die Folge ist, dass zum frühen Morgen zwar eine größere unbebaute Fläche an der Kaltluftentstehung mit einer Strömungsgeschwindigkeit >0,2 m/s beteiligt ist, diese sich im Vergleich zum Zeitpunkt 22.00 Uhr jedoch auf einem etwas niedrigeren Niveau abspielt. Bei einem Vergleich der mittleren Luftaustauschrate aller Rasterzellen des gesamten Stadtgebietes fällt auf, das der mittlere Zellenwert von 14,4 (22.00 Uhr) auf 17,4 (06.00 Uhr) ansteigt. Im Gegenzug sinkt der maximale Zellenwert von 93,14 auf 90,58 ab. Insofern nimmt die mittlere Luftaustauschrate zwar insgesamt zu, die Höchstwerte des 22.00 Uhr Zeitschnittes bzw. die Intensität des Luftaustausches werden jedoch durch die zunehmende Nivellierung der Temperaturunterschiede nicht mehr erreicht.

Die Ausgleichsleistung der Freiflächen erreicht große Teile der Siedlungsräume in Berlin. Eine Bilanzierung für das Stadtgebiet ergibt:

- Etwa 37 % der überbauten Flächen wird zum Zeitschnitt 22.00 Uhr von autochthonen Strömungen mit einer Geschwindigkeit von mindestens 0,2 m/s erreicht bzw. durchdrungen.
- Die Ausgleichsleistung der Freiflächen steigt aufgrund der Intensivierung der Kaltluftlieferung umlandbezogener Strömungssysteme im Laufe der Nacht auf eine räumliche Abdeckung von ca. 63 % der durch Bebauung geprägten Stadtareale (Zeitschnitt 06.00 Uhr).
- Gleichzeitig verringert sich die Kaltluftlieferung der meisten innerstädtischen Grün- und Freiflächen. Dies ist darauf zurück zu führen, dass sie in eine wärmere Umgebung eingebettet sind und die Abkühlung im Verlauf der Nacht weniger stark ausgeprägt ist als die der Flächen des Umlandes.

Durch die enge Verzahnung von bebauten Bereichen und Freiflächen **weist Berlin insgesamt ein hohes klimaökologisches Ausgleichspotential auf**. Kaltluft*abflüsse* haben daran aber aufgrund des meist flachen Reliefs einen vergleichsweise geringen Anteil. Sie treten flächenhaft vor allem in den folgenden Bereichen auf:

- Östliches Havelufer entlang des Grunewaldes
- Ostflanke des Grunewaldes
- Südlich des Großen Müggelsees im Berliner Stadtforst Bürgerheide.

Als Leitbahnen für den Kaltlufttransport fungieren große, linear ausgeprägte Freiflächen mit einer verhältnismäßig geringen Oberflächenrauigkeit. Hinsichtlich dieser Funktion sind drei Bereiche des Havel- bzw. Spreetals als bedeutsam zu nennen. Zum einen der Havelabschnitt zwischen Pichelsee und Ruhlebener Straße, der auf einer Länge von ca. 3 km Kaltluft nach Norden in den Stadtteil Spandau führt. Zum anderen tritt der Rummelsburger See als Teil der Spree hervor, über den Kaltluft von Alt-Treptow und vom Plänterwald aus nach Rummelsburg strömt. Darüber hinaus ist noch ein Abschnitt der Dahme entlang von Grünauer- und Regattastraße zu nennen. Diese Ergebnisse decken sich mit den Befunden eines Gutachten des Deutschen Wetterdienstes (DWD 1996).

Aufgrund der wenig ausgeprägten Orographie sind solch relieforientierte Luftleitbahnen aber eher selten. Ein wesentlicher Beitrag der Niederungsbereiche von Fließgewässern zum Transport von Kaltluft aus dem Berliner Umland in das Stadtgebiet ist nicht zu erkennen, vielmehr treten nur Teile der Flusstäler innerhalb des Stadtgebietes als Leitbahnen in Erscheinung.

Als Beispiele für die Ausgleichsleistung von Freiflächen werden unter Kartenbeschreibung / ergänzende Hinweise 3 Standorte ausführlich dargestellt, um die Dynamik des Kaltlufthaushaltes im Grenzbereich von kaltluftproduzierender Freifläche zur Bebauung zu verdeutlichen.

Abschließend soll auf den Kaltlufthaushalt Berlins als Ganzes eingegangen werden. Dazu wird der Luft-Massenstrom herangezogen, wobei ausgehend von den 22.00 Uhr Werten die Kaltluftbewegung in einer Nacht von 8 Stunden quantifiziert wird. Somit werden im Stadtgebiet Berlin in einer austauscharmen, sommerlichen Strahlungswetternacht 2,3 Billionen m³ Kaltluft bewegt. Dies entspricht einem stündlichen Durchsatz von 0,29 Billionen m³. Welche Kaltluftmengen in den einzelnen Stadtteilen bewegt werden, zeigt Tabelle 2.

Bezirk	**Massenstrom in Mrd. m³ pro Nacht von 8 h**
Friedrichshain-Kreuzberg	42,93
Mitte	82,27
Neukölln	86,94
Tempelhof-Schöneberg	118,03
Lichtenberg	126,76
Marzahn-Hellersdorf	131,96
Charlottenburg-Wilmersdorf	212,01
Pankow	249,84
Spandau	250,01
Reinickendorf	257,87
Steglitz-Zehlendorf	308,83
Treptow-Köpenick	450,38

Tab. 2: Kaltluftvolumenstrom in den Berliner Bezirken während einer sommerlichen Strahlungswetternacht

Die stadtteilbezogenen Ergebnisse entsprechen den Erwartungen hinsichtlich Größe und Lage innerhalb des Stadtgebietes. Dabei zeigt sich, dass die Kernbereiche wie Friedrichshain - Kreuzberg sowie Mitte mit einem hohen Bebauungs- und Versiegelungsgrad einen vergleichsweise schwachen Massenstrom aufweisen. Anders ist die Situation in Stadtteilen wie Pankow, Reinickendorf oder Köpenick.

Zwar sind auch hier verdichtete Areale in Richtung auf das Stadtzentrum vorhanden, dies wird jedoch durch die großen, unbebauten Flächen im Verzahnungsbereich zum Umland wieder ausgeglichen. In den nicht überbauten, kaltluftbildenden Bereichen in den Randbezirken ist deshalb der größte Beitrag zum Kaltluftmassenstrom zu sehen.

Kartenbeschreibung / ergänzende Hinweise

Nachfolgend werden anhand von ausgewählten Beispielen umfangreiche Zusatzinformationen zur Dynamik und Bedeutung des Kaltlufthaushaltes von Freiflächen angeboten. Der Text ergänzt damit die Inhalte des Kapitels Kartenschreibung. Die Legendeneinstufung von Kaltluftvolumenstrom und Luftaustausch orientiert sich an dem in der VDI-Richtlinie 3785 Blatt 1 (VDI 2008) beschriebenen Standardisierungsverfahren zur Z-Transformation. Dieses statistische Vorgehen legt allgemein das lokale/regionale Werteniveau einer Klimaanalyse zugrunde und bewertet die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen in einem Untersuchungsraum. Die VDI-Richtlinie definiert zur Einordnung der Ergebnisse vier Bewertungskategorien (sehr günstig / günstig / weniger günstig / ungünstig), an denen sich auch die Klassifizierung der Modellergebnisse orientiert.

Kaltluftproduzierende Freiflächen und ihr Einfluss auf die Bebauung

In Abbildung 7 sind 3 Standorte gekennzeichnet, an deren Beispiel entlang eines ausgewählten Streckenabschnitts von jeweils 10 Rasterzellen mit 500 m Abschnittslänge näher auf den Kaltlufthaushalt eingegangen werden soll. Zur Charakterisierung der Dynamik des Kaltlufthaushaltes an verschiedenen Standorten im Stadtgebiet Berlins wurden diese Beispiele im Grenzbereich von kaltluftproduzierender Freifläche zur Bebauung platziert. Für den gebietsübergreifenden Vergleich der Werte innerhalb des 50 m Rasters wurde anschließend ein mittlerer Rasterzellenwert auf Basis der Zellen ermittelt, die sich entlang des Streckenverlaufs befinden.

Als Beispiele für die Ausgleichsleistung wurden drei Beispiele ausgewählt. Der südwestliche Bereich des ehemaligen Flughafens Tempelhof (A) repräsentiert einen innerstädtisch geprägten Standort, wohingegen für den Raum Spandau (B) der Einfluss von randstädtischen und umlandbezogenen Kaltluftentstehungsgebieten erläutert wird. Zwischen diesen beiden Standorten nimmt der Übergangsbereich vom Grunewald nach Wilmersdorf (C) eine Zwischenstellung ein.

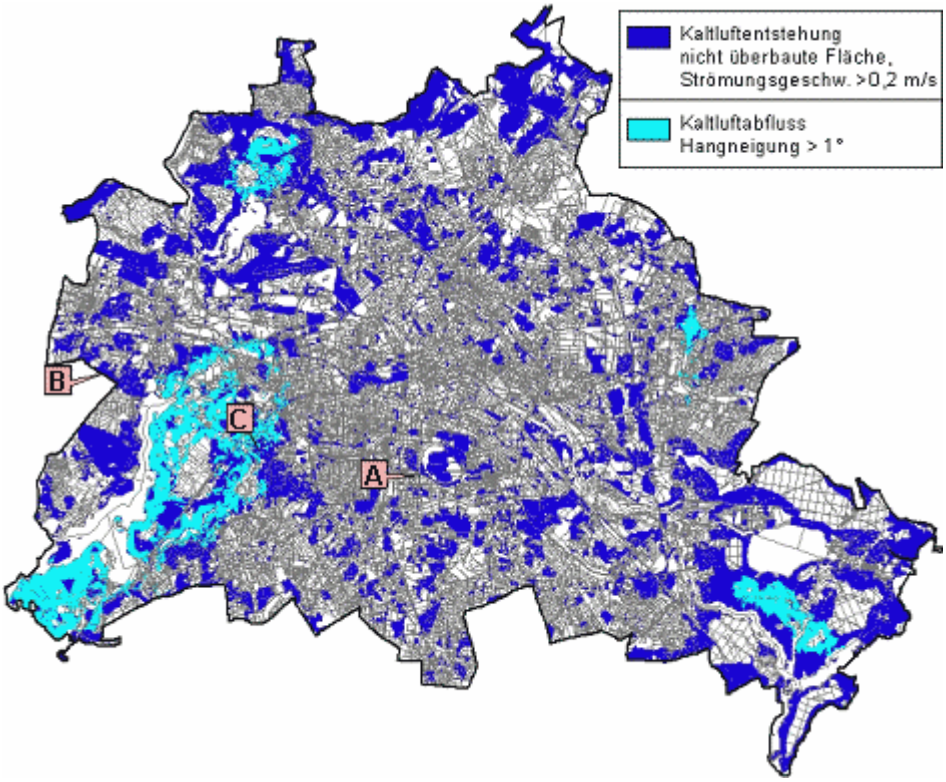

Abb. 7: Lage der Beispielsgebiete A, B und C zur Verdeutlichung der Prozesse 'Kaltluftentstehung' und 'Kaltluftabfluss' während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (22.00 Uhr; Rasterauflösung 50 m)

Beispiel Flughafen Tempelhof

Für die Betrachtung des Kaltlufthaushaltes im innerstädtischen Raum soll an dieser Stelle der südwestliche Teil des ehemaligen Flughafens Tempelhof dienen, wobei hier ein 500 m langer Abschnitt entlang des Tempelhofer Damms ausgewählt wurde (vgl. Abb. 8). Der ehemalige Flughafen Tempelhof besitzt aufgrund seiner Größe und Lage innerhalb des Stadtgebiets Berlin eine **hohe stadtklimatische Relevanz** und leistet einen bedeutsamen lokalen Beitrag zur Reduzierung der sommerlichen Wärmebelastung in den angrenzenden Siedlungsräumen.

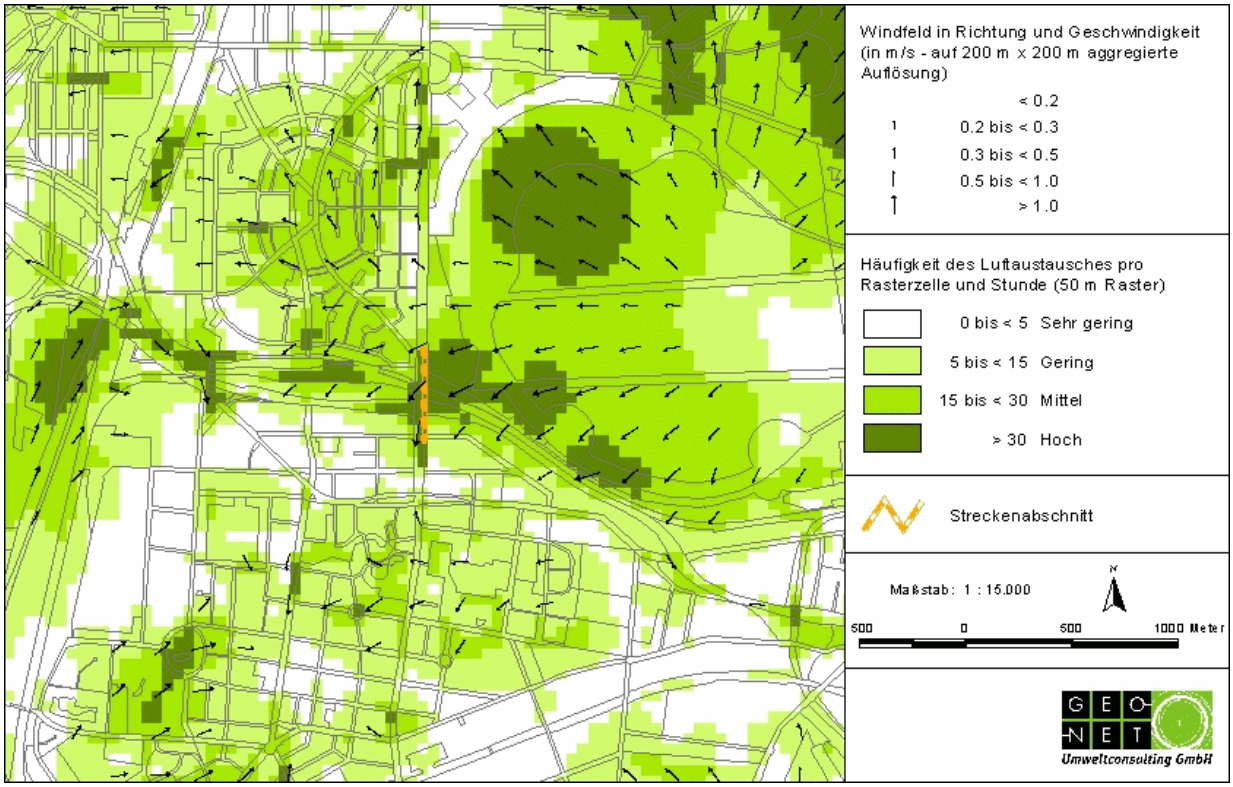

Abb. 8: Luftaustausch pro Rasterzelle sowie autochthones Strömungsfeld im Bereich des ehemaligen Flughafens Tempelhof während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (22.00 Uhr; Rasterauflösung 50 m)

Hinsichtlich der Luftwechselrate sind auf dem Flughafengelände mit dem Vorfeldbereich sowie dem südwestlichen, an den Tempelhofer Damm / Autobahn A 100 angrenzenden Gebiet zwei **Areale mit vergleichsweise hoher stündlicher Austauschrate** von über 30 pro Rasterzelle erkennbar. Trotz der auch flächenhaft hohen Austauschrate wird die Entfaltung des auf dem Vorfeld entstehenden Flurwindes sowohl um 22.00 Uhr als auch um 06.00 Uhr durch das Abfertigungsgebäude beeinflusst. Der südwestlich am ehemaligen Flughafen verlaufende Gleis- und Straßenraum ermöglicht dagegen mit seiner geringen Oberflächenrauigkeit das Vordringen der auf dem Tempelhofer Feld entstehenden Kaltluft in Richtung Westen. Die Reichweite dieser Strömung beträgt, ausgehend vom Tempelhofer Damm, etwa 700 m (vgl. Abb. 8). Ihr steht zu diesem Zeitpunkt eine ostwärts gerichtete Kaltluftbewegung aus den Kleingartenkolonien des Südgeländes Schöneberg gegenüber, während sich beide Flurwinde etwa bis zur Alboinstraße erstrecken.

Bis zum Zeitpunkt 06.00 Uhr ist letztgenannter Flurwind aus dem Koloniegelände nahezu zum Erliegen gekommen, während sich die Reichweite des vom Flughafen Tempelhof ausgehenden Flurwindes auf ca. 800 m erhöht hat und bis zu 400 m nach Süden in den Tempelhofer Damm bis auf Höhe von Alt-Tempelhof eindringt.

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse für die Werte der Rasterzellen zusammen, welche sich entlang des Streckenabschnitts befinden. Dabei zeigt sich, dass die berechneten Werte im Verlauf der Nacht geringfügig zurück gehen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Verlauf der Nacht auch das Temperaturniveau in den bebauten Bereichen abnimmt und sich somit der Temperaturgradient als „Antrieb“ für Luftaustauschprozesse reduziert.

Zeitpunkt	mittlere Luftaustauschrate / h pro 50 m Rasterzelle	mittlerer Volumenstrom in m³/s pro 50 m Rasterzelle	mittlere Strömungs-geschwindigkeit des Flurwindes in m/s
22.00 Uhr	50	793	0,72
06.00 Uhr	45	715	0,58

Tab. 3: Mittlere Luftaustauschrate, Volumenstrom sowie Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes pro Rasterzelle entlang eines Streckenabschnitts im Bereich des ehemaligen Flughafens Tempelhof während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (Rasterauflösung 50 m)

Die mittlere Luftaustauschrate pro Rasterzelle geht von 50 zum 22.00 Uhr Zeitpunkt auf 45 um 06.00 Uhr zurück, was einer Abnahme von 10 Prozentpunkten entspricht. Der Kaltluftvolumenstrom geht ebenfalls um ca. 10 Prozentpunkte von 793 m^3/s auf 715 m^3/s zurück. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit sinkt hingegen um etwa 19 Prozentpunkte ab. Ganz generell ergibt sich für die innerstädtischen Kaltluft produzierenden Freiflächen die Tendenz einer abnehmenden Kaltluftlieferung im Verlauf einer Nacht. Das Niveau der Luftaustauschprozesse im Umfeld des ehemaligen Flughafens kann aufgrund seiner Größe aber auch zum Zeitpunkt 06.00 Uhr noch als vergleichsweise hoch bezeichnet werden. Der Rückgang der Kaltluftlieferung ist bei den übrigen, meist kleineren innerstädtischen Freiflächen daher oft noch stärker ausgeprägt und kann bis zum Ende der Nacht sogar vollständig zum Erliegen kommen.

Beispiel Spandau

Der Ortsteil Spandau ist sowohl durch seine Randlage im Stadtgebiet als auch durch die urban geprägte Siedlungsstruktur gekennzeichnet. Im vorliegenden Beispiel wird ein 500 m langer Abschnitt in Höhe des Weinmeisterhornwegs betrachtet. Das Kaltluftquellgebiet für diesen Raum stellt die Freifläche dar, die sich westlich der Potsdamer Chaussee außerhalb Berlins im Raum Seeburg befindet. Wie Abb. 9 zeigt, treten hohe Luftwechselraten vor allem dort auf, wo sich Kleingartenanlagen und Einzelhausbebauung an die weitläufigen unbebauten Areale des Umlandes anschließen und das Eindringen der Kaltluft in den Siedlungsraum begünstigen. Dies ist auf den geringen Überbauungsgrad und den hohen Vegetationsanteil zurück zu führen, so dass diese Flächen kleinräumig als Kaltluftleitbahnen wirksam werden. Sie heben sich mit Luftwechselraten von über 30 pro Rasterzelle und Stunde deutlich von den benachbarten stärker überbauten Siedlungsflächen ab.

Die Kaltluft dringt zum Zeitpunkt 22.00 Uhr bis über die Heerstraße hinaus in die Bebauung vor, so dass die Reichweite der Strömung hier mehr als 600 m beträgt. Weiter östlich im Bereich der Fahremundstraße strömt die Kaltluft bis zum Blasewitzer Ring, so dass sich, ausgehend vom Weinmeisterhornweg, eine Reichweite von ca. 1.300 m ergibt, bevor die Strömungsgeschwindigkeit auf unter 0,2 m/s und der Luftaustausch auf ein sehr geringes Niveau absinken.

Bis um 06.00 Uhr verstärkt sich insgesamt die Kaltluftdynamik im Beispielgebiet. Während sich zum Beginn der Nacht das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung vor allem an den gering überbauten Strukturen orientiert, ist nun ein flächenhaftes Einströmen zu beobachten. Damit geht auch eine hohe Eindringtiefe von lokal mehr als 2.000 m einher.

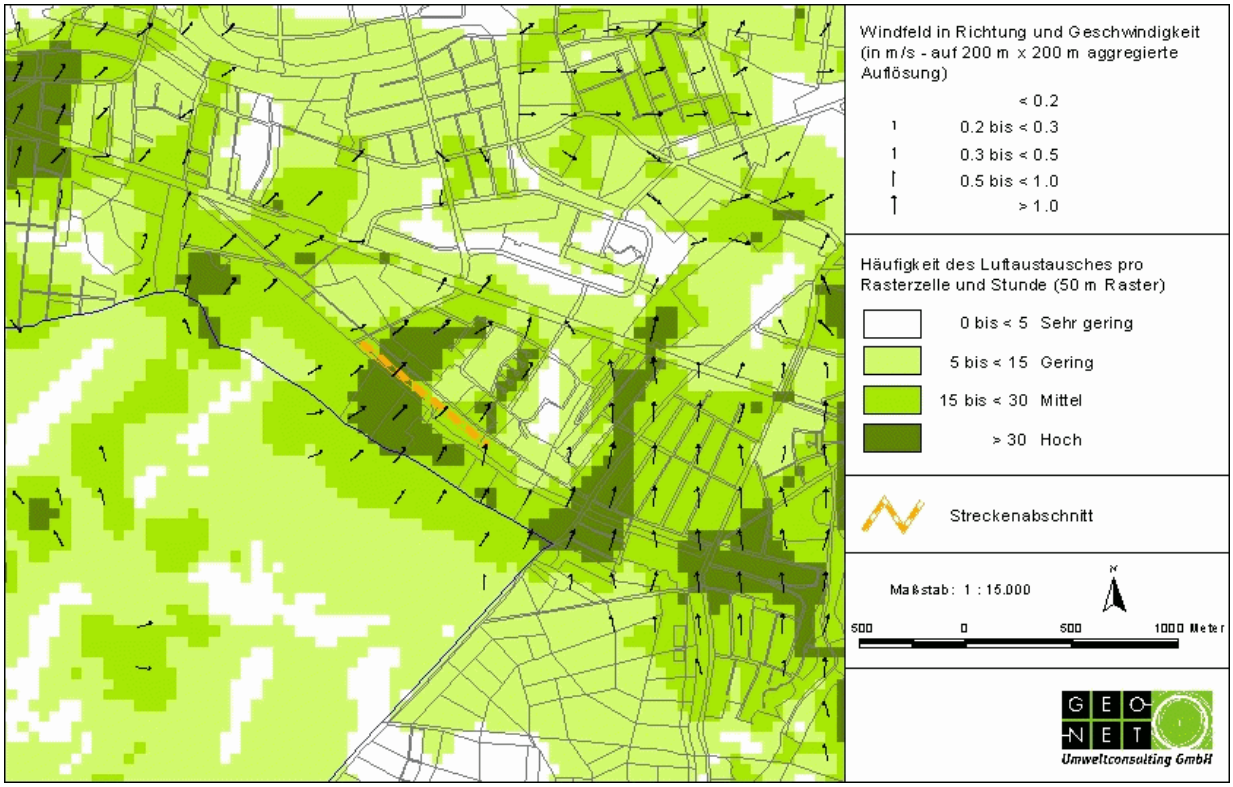

Abb. 9: Luftaustausch pro Rasterzelle sowie autochthones Strömungsfeld im Bereich Spandau während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (22.00 Uhr; Rasterauflösung 50 m)

Die Intensivierung der Luftaustauschprozesse ist vor allem auf den im Verlauf der Nacht stetig anwachsenden Kaltluftvorrat zurück zu führen, den die ausgedehnten Freiflächen im Umland zur Verfügung stellen. Dieser Vorgang spiegelt sich in den ermittelten Werten wieder (Tab. 4).

Zeitpunkt	mittlere Luftaustauschrate / h pro 50 m Rasterzelle	mittlerer Volumenstrom in m³/s pro 50 m Rasterzelle	mittlere Strömungs-geschwindigkeit des Flurwindes in m/s
22.00 Uhr	28	409	0,34
06.00 Uhr	44	744	0,75

Tab. 4: Mittlere Luftaustauschrate, Volumenstrom sowie Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes pro Rasterzelle entlang des Streckenabschnitts in Spandau während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (Rasterauflösung 50 m)

So wächst die mittlere Luftaustauschrate von 28 auf 44 an, was einem Anstieg von 57 Prozentpunkten bezogen auf den 22.00 Uhr Zeitpunkt entspricht. Eine deutliche Zunahme ist auch beim Kaltluftvolumenstrom zu verzeichnen, der von 409 m³/s pro Rasterzelle auf 744 ansteigt, was einer Steigerung um +82 Prozentpunkten entspricht. Die höchste Zunahme von 121 Prozentpunkten liegt jedoch bei der mittleren Strömungsgeschwindigkeit vor. Sie steigt von 0,34 m/s auf 0,75 m/s an.

Beispiel Grunewald

Der Grunewald zählt mit einer Größe von über 3.000 ha zu den größten Waldflächen im Stadtgebiet. Auf einer Länge von ca. 11 km profitieren insbesondere Teile der östlich gelegenen Stadtteile Charlottenburg-Wilmersdorf und Zehlendorf-Steglitz von der hohen Kaltluftlieferung. Abbildung 10 zeigt den Übergangsbereich vom Grunewald zur Einzelhausbebauung in Wilmersdorf, hier fällt der Luftaustausch pro Rasterzelle und Stunde mit Wechselraten von über 30 vergleichsweise hoch aus.

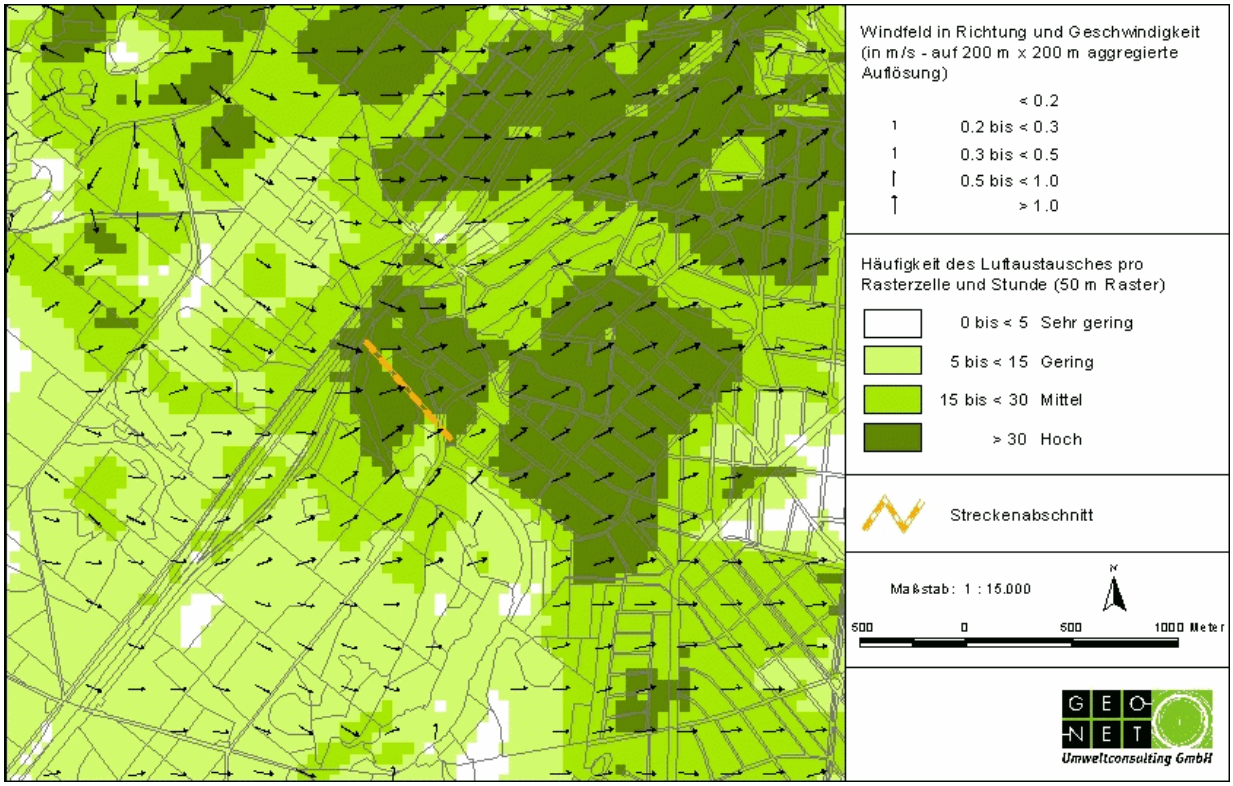

Abb. 10: Luftaustausch pro Rasterzelle sowie autochthones Strömungsfeld im Übergangsbereich Grunewald-Wilmersdorf während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (22.00 Uhr; Rasterauflösung 50 m)

Die entsprechend **große Reichweite der Kaltluftströmung** ist in Wilmersdorf um 22.00 Uhr mit bis zu 3.000 m am stärksten ausgeprägt und liegt in der ausgedehnten Einzelhausbebauung begründet. In Steglitz wird dagegen mit zunehmend dichterer Bebauung ein Wert von ca. 1.250 m erreicht. Um 06.00 Uhr morgens dringt die Kaltluft nur noch ca. 1.200 bis maximal 2.100 m in die Bebauung ein.

Für den 500 m langen Abschnitt sind beispielhaft die mittlere Ausprägung des Luftaustausches pro Rasterzelle, des Volumenstroms sowie die Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes berechnet worden (vgl. Tabelle 5). Diese Strecke beginnt in der Auerbachstraße an der Avus und endet an der Koenigsallee.

Dabei zeigen sich nur moderate Veränderungen der mittleren Rasterzellenwerte im Verlauf der Nacht. Die Luftwechselrate geht von 33 auf 32 um ca. 3 Prozentpunkte zurück. Die Abnahme des Kaltluftvolumenstroms ist mit 10 Prozentpunkten etwas stärker ausgeprägt. Die Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes steigt dagegen um ca. 9 Prozentpunkte von 0,47 m/s auf 0,51 m/s leicht an. Es bleibt jedoch festzustellen, dass trotz der Abnahme von Luftaustauschrate und Volumenstrom alle drei **Klimaparameter bis zum 06.00 Zeitpunkt auf einem hohen Niveau** verbleiben.

Zeitpunkt	mittlere Luftaustauschrate / h pro 50 m Rasterzelle	mittlerer Volumenstrom in m³/s pro 50 m Rasterzelle	mittlere Strömungs-geschwindigkeit des Flurwindes in m/s
22.00 Uhr	33	568	0,47
06.00 Uhr	32	510	0,51

Tab. 5: Mittlere Luftaustauschrate, Volumenstrom sowie Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes pro Rasterzelle entlang des Streckenabschnitts im Übergangsbereich Grunewald-Wilmersdorf während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (Rasterauflösung 50 m)

Fazit

Die Auswertung der Klimaparameter an einem innerstädtischen (Tempelhof), einem peripheren (Spandau) sowie einem intermediären Standort (Grunewald) macht die räumliche Ausprägung der Klimadynamik im Stadtgebiet Berlins deutlich. So zeigt sich am Beispiel Tempelhof die Tendenz, dass die Kaltluftlieferung von innerstädtischen Grünflächen zu Beginn einer Nacht am größten ist und sich zu deren Ende allmählich abschwächt. Bei den Kaltluftentstehungsgebieten des Umlandes ist es umgekehrt. Hier sind die Strömungssysteme in der zweiten Nachthälfte am stärksten entwickelt, nachdem entsprechende Kaltluftvolumina über den Freiflächen gebildet wurden. Das Beispiel Grunewald zeigt dagegen Merkmale sowohl von innerstädtischen als auch peripheren Standorten und nimmt somit eine Zwischenstellung zwischen beiden Situationen ein. Bei der stadtklimatischen Bewertung von Grünflächen sollte daher auch stets die Lage im Beurteilungsraum berücksichtigt werden.

Literatur

[1] Deutscher Wetterdienst DWD 1996:
Klimakarten für das Land Berlin, Teil 1: Bioklima Berlin, Gutachten im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie, unveröffentlicht.

[2] Groß, G. 1989:
Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies, in: Beitr. Phys. Atmosph.,H 62, S. 57-72.

[3] Groß, G. 1993:
Numerical simulation of canopy flows, Springer Verlag Berlin.

[4] Groß, G. 2002:
The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, in: Meteor.Z.schr. Vol. 11 Nr.5, S.701-710.

[5] Mosimann, T. et al. 1999:
Karten der klima- und immissionsökologischen Funktionen - Instrumente zur prozessorientierten Betrachtung von Klima und Luft in der Umweltplanung, in: Naturschutz und Landschaftsplanung 31,(4),S. 101-108, Stuttgart.

[6] **Moriske & Turowski 2002:**
Handbuch für Bioklima und Lufthygiene, 8. Ergänzungslieferung, Ecomed-Verlag, Landsberg.

[7] **Richter & Röckle (iMA Immissionen, Meteorologie Akustik) o.J.:**
Das numerische Simulationsmodell FITNAH, digitale PDF-Datei, Freiburg.

Internet: http://www.ima-umwelt.de/fileadmin/dokumente/klima_downloads/fitnah_kurzuebersicht.pdf (Zugriff am 11.05.2009)

[8] **Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz (SenGesUmV) 2008:**
Emissionskataster Kraftfahrzeug-Verkehr 2005, unveröffentlicht.

[9] **VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 1997:**
Richtlinie VDI 3787, Blatt1, Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, Düsseldorf.
Internet: http://www.vdi.de/ (Zugriff am 11.05.2009)

[10] **VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 2008:**
Richtlinie VDI 3785, Blatt1, Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima, Düsseldorf.
Internet: http://www.vdi.de/ (Zugriff am 11.05.2009)

[11] **Vogt, J. 2002a:**
Bericht über orientierende Untersuchungen zur lokalklimatischen Funktion der Flächen des Gleisdreieckes in Berlin, Textteil, Voruntersuchung im Auftrag der Vivico Management GmbH, unveröffentlicht, Berlin.

[12] **Vogt, J. 2002b:**
Bericht über orientierende Untersuchungen zur lokalklimatischen Funktion der Flächen des Gleisdreieckes in Berlin, Abbildungsteil, Voruntersuchung im Auftrag der Vivico Management GmbH, unveröffentlicht, Berlin.

Digitale Karten

[13] **SenSUT (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin) (Hrsg.) 1998:**
Umweltatlas Berlin, Ausgabe 1998, Karte 04.09 Bioklima bei Tag und Nacht, 1:75 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i409.htm

[14] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklun Berlin) (Hrsg.) 2001a:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2001, Karte 04.02 Langjährige Temperaturverteilung 1961 - 1990, 1:50 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ia402.htm

[15] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2001b:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2001, Karte 04.04 Temperatur in mäßig austauscharmen Strahlungsnächten, 1:125 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ia404.htm

[16] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2001c:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2001, Karte 04.05 Klimazonen, 1:50 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ia405.htm

[17] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2001d:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2001, Karte 04.06 Oberflächentemperaturen bei Tag und Nacht, 1:85 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ia406.htm

[18] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2001e:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2001, Karte 04.07 Klimafunktionen, 1:50 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ia407.htm

[19] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2003:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2003, Karte 04.10 Klimamodell Berlin - Analysekarten, 1:50 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i410.htm

[20] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2004a:**
Umweltatlas Berlin, Ausgabe 2004, Karte 01.08 Geländehöhen, 1:50 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i108.htm

[22] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2004b:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2004, Karte 04.11 Klimamodell Berlin - Bewertungskarten, 1:50 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i411.htm

[23] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2007:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2007, Karte 01.02 Versiegelung, 1:50 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ib102.htm

[23] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2008a:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2008, Karte 06.01 Reale Nutzung der bebauten Flächen und 06.02 Grün- und Freiflächenbestand, 1:50 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ic601.htm

[24] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin) (Hrsg.) 2008b:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 2008, Karte 06.07 Stadtstruktur, 1:50 000, Berlin.
Internet:
http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ic607.htm