

04.10 Klimamodell Berlin - Analysekarten (Ausgabe 2003)

Problemstellung

Auf Grund der in großen Teilen engen inhaltlichen Bezüge weisen die Erläuterungstexte zu den Karten 04.10.01 bis 04.10.12 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) im Gesamtgebiet
- Bodennahe Temperaturen (06.00 Uhr) im Gesamtgebiet
- Bodennahe Temperaturen (22.00 und 06.00 Uhr) im Vertiefungsgebiet
- Luftaustausch und Luftmassenstrom (22.00 und 06.00 Uhr) im Gesamtgebiet
- Luftaustausch und Luftmassenstrom (22.00 und 06.00 Uhr) im Vertiefungsgebiet.

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 1998b), 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 1994).

Daher wurde im Rahmen eines Projektes für die gesamte Stadtfläche Berlins einschließlich eines Ausschnittes des Berliner Umlandes sowie ein Vertiefungsgebiet 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 Gesamttraum 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 Ausgleichspotentiales von Freiflächen - der Kaltlufthaushalt - wird erstmals für Berlin flächendeckend untersucht. Vor allem dieser Analyseschritt stellt eine notwendige Ergänzung zu den bisher im Umweltatlas vorhandenen Informationsebenen dar.

Auch diese Untersuchung belegt den schon vielfach bestätigten Zusammenhang zwischen dem Klima verschiedener Stadtgebiete und ihrer Bau-, Freiflächen- und Vegetationsstruktur. 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 Karten 04.10.01 - 04.10.12 ist es, die Ergebnisse der Anwendung des regionalen Simulationsmodelles 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 und Simulationsergebnissen von Modellanwendungen die verschiedenen Rahmenbedingungen zu beachten sind. Besondere Bedeutung haben jedoch die Darstellungen zur räumlichen Abgrenzung und Quantifizierung der autochthonen Luftaustauschprozesse. Der Begriff 'autochthon' bezeichnet dabei klimatische Vorgänge, die an Ort 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 1650 km² großen Bereich des Umlandes. Zusätzlich wurde ein Vertiefungsgebiet definiert, in dem das Klimamodell FITNAH in einer 4-fach höheren Rasterauflösung angewendet wurde (vgl. Abbildung 1).

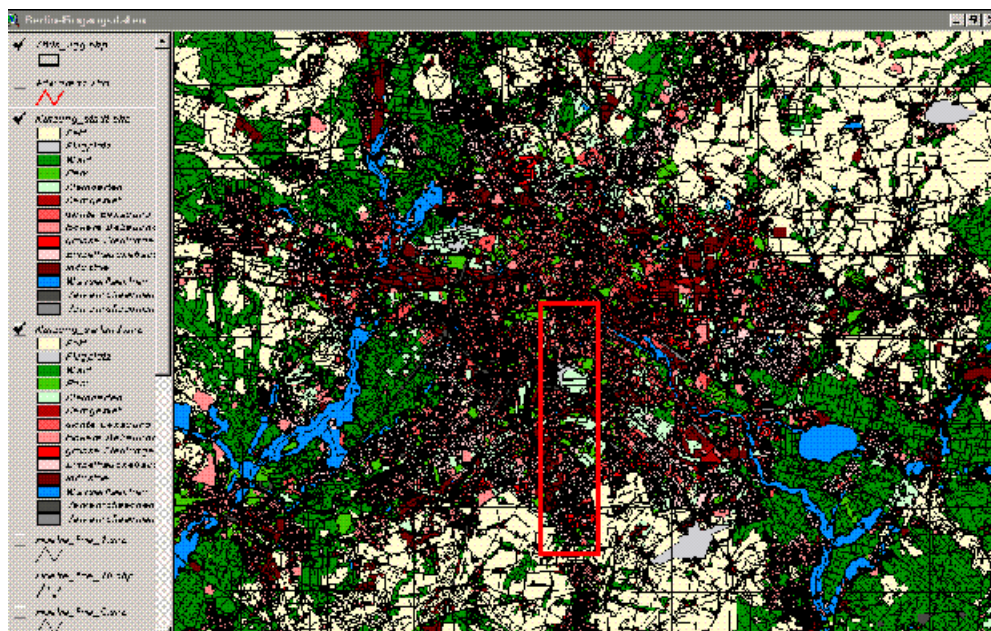


Abb.1: Klassifizierung der Landnutzung für die Modellanwendung. Es kommt ein Schlüssel mit 14 Nutzungsklassen zum Einsatz, der an die Erfordernisse des Modells FITNAH angepasst ist. Das rote Rechteck umgrenzt den Bereich des Vertiefungsgebiets für die Modellanwendung

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 Bezugssystem, die für die Berechnung der Klimagrößen des ISU zur Verfügung gestellt wurden:

- Flächennutzung. Die Daten der **Flächennutzung** beruhen auf der Auswertung von Luftbildern, bezirklichen Flächennutzungskarten und weiteren Unterlagen für den Umweltatlas (vgl. Karte 06.01, SenStadtUm 1995b, 1995e und Karte 06.02, SenStadtUm 1995c, 1995f). Es werden etwa 30 Nutzungsarten unterschieden. Bis auf einzelne Nachträge gaben sie zum Zeitpunkt der Modellanwendung noch den Nutzungsstand von 1990 wieder (Fortschreibung auf den Datenstand Ende 2001 in Bearbeitung)
- Stadtstrukturtypen (Karte 06.07, SenStadtUm 1995g). Eine weitere Verfeinerung dieser Daten fand über eine Sachdatenbasis statt, die typenspezifische Angaben zur Höhe der Gebäude und Vegetationsstrukturen innerhalb der einzelnen Stadtstrukturtypen enthält
- Versiegelung (Karte 01.02, SenStadtUm 1995d).
- Zur Verifizierung der Modellergebnisse wurden aus dem Bestand der existierenden Klimakarten und vorliegender Gutachten insbesondere ausgewählt:
- Oberflächentemperaturen bei Tag und Nacht (Karte 04.06, SenStadt 2001d).
- Bioklima bei Tag und Nacht (Karte 04.09, SenStadtUm 1998b).
- Untersuchung lokalklimatische Situation Gleisdreieck (Vogt 2002a) und (Vogt 2002b).

Zusätzlich wurden etwa 700 Projektgebiete, die im Rahmen des städtebaulichen Flächenmonitoring der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung für den Zeitraum 1990 - Ende 2002 erfasst wurden, in die geographische und die Sachdatenbasis eingearbeitet. Zur Bereitstellung der orographischen Eingangsparameter für die Berechnung des Wind- und Temperaturfeldes wurde auf der Grundlage der Höhenpunkte der Bohrpunktdatei der Landesgeologie Berlin (110 000 Punktdaten) ein gesondertes Geländehöhenmodell für Berlin generiert (Karte 01.08, SenStadtUm 1998a). Um der hohen Modellauflösung im Vertiefungsgebiet gerecht zu werden, wurden für diesen Ausschnitt die Geometrie- und Sachdaten der Automatisierten Liegenschaftskarte ALK für die weitere Auswertung herangezogen. Die Liegenschaftskarte 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 der Hochbaustrukturen gut geeignet (vgl. Abbildung 2).

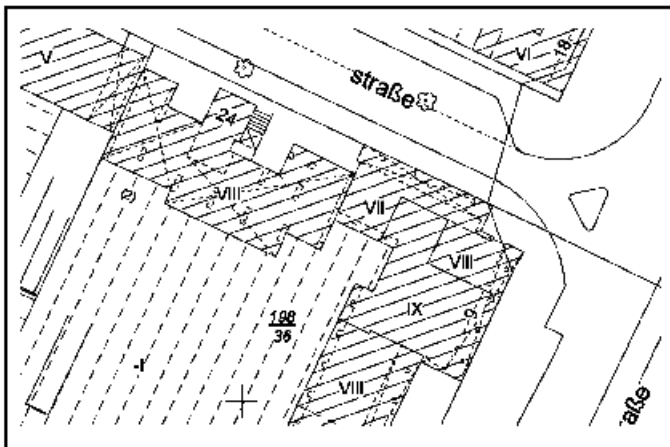


Abb. 2: Ausschnitt aus der Automatisierten Liegenschaftskarte (Angabe der Gebäudegeschosse in römischen Zahlen)

In die Basisgeometrie der Teilbaublöcke der Karte 1: 50 000 des ISU konnten so zusätzlich die Gebäudegrundrisse mit den aus dem ALK-Bestand abgeleiteten Gebäudehöhen integriert werden.

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

- [ATKIS](#) (Amtlich-kartographisches Informationssystem). Das Kartenwerk umfasst die erste Realisierungsstufe des Basislandschaftmodells - 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.

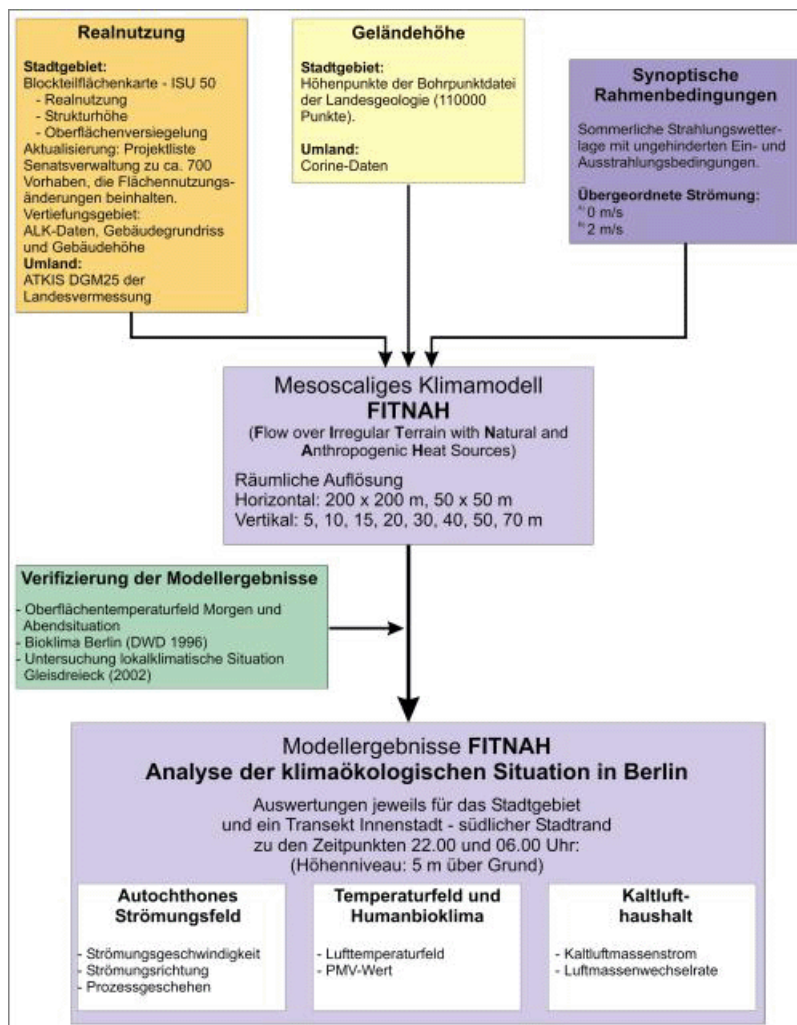


Abb. 3: Datenbasis und Datenfluss für die Anwendung des Klimamodells FITNAH

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. Bisher wurden im Umweltatlas der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung vorrangig die Bereiche Feldmessung und Fernerkundung zur Erfassung stadtklimatischer Phänomene eingesetzt.

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 mit dem Modell **FITNAH** (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) durchgeführt. Eine genaue mathematische und physikalische Beschreibung des Modells ist bei Groß

1993 und Richter& Röckle o.J. zu finden. An dieser Stelle 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).

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 Klimamodelles FITNAH

Zur Überprüfung der aus den Modellläufen abgeleiteten Informationen wurde auf eine Studie zu den lokalklimatischen Funktionen der Freiflächen im Bereich des so genannten 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 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 (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 in Differenzengleichungen überführt und auf einem numerischen Gitter gelöst. Die hier verwendete räumliche Maschenweite Δx beträgt in beide horizontale Raumrichtungen 50 m bzw. 200 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 3000 m über Grund. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Orographie und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind (vgl. Abbildung 4).

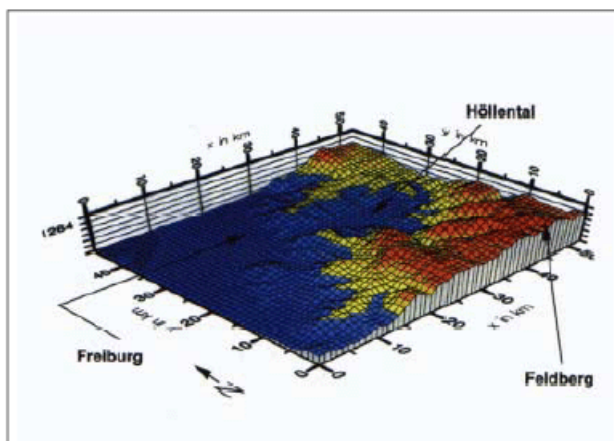


Abb. 4: Beispiel für die Wiedergabe einer Naturlandschaft im Modellgebietscharakter (aus: Richter & Röckle o.J.)

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 2 m/s (0 m/s)
- relative Feuchte der Luftmasse 50 %.

Hinweise zur Interpretation der Modellergebnisse

Aufgrund der verwendeten horizontalen Maschenweite von 50 m bzw. 200 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 ($U_{\text{Haus}} = 0$ m/s) und 60 % ohne Strömungshindernisse (z.B. $U_{\text{Frei}} = 1$ m/s), so beträgt die repräsentative Windgeschwindigkeit, die auch vom Modell berechnet wird,

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

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 $T_{\text{Modell}} = 15,9$ °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 raugkeitsarmen 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 weit gehende 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 800 m und 2000 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. Hier dringt die lokal gebildete Kaltluft ca. 440 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 gibt einen Kaltluftabfluss aus dem Bereich Kreuzberg/Victoriapark, der in die Freiflächen Gleisdreieck eingreift**

Die Messergebnisse zu den lokalen Kaltluftabflüssen aus dem Bereich Viktoriapark/Kreuzberg bestätigen die FITNAH-basierten Simulationsrechnungen (vgl. Vogt 2002a, S. 17). In den Messungen

spiegelte sich die Kanalisierung des Kaltluftabflusses über die Katzbachstraße und Möckernstraße wieder. Diese Strömungen gingen mit geringen Windgeschwindigkeiten von 0,7 bis 0,2 m/s einher.

Auch das Vordringen der orographisch bedingten Kaltluftabflüsse bis in den Bereich Gleisdreieck wird über das Modellergebnis belegt. Im Bereich Yorkstraße/Katzbachstraße kann ein Vordringen der Kaltluft bis in die Freiflächen des Gleisdreiecks festgestellt werden. Die Eindringtiefe der Kaltluft aus dem Bereich Victoriapark beträgt etwa 300 m (vgl. Abbildung 5).

Überprüfung der Ergebnisse von FITNAH

Untersuchung Lokalklima Gleisdreieck
Prof.Dr. Vogt im Auftrag der Vivico, 3/2002

Arbeitsergebnisse Gleisdreieck; Modell
Fitnah, GeoNet 11/2003

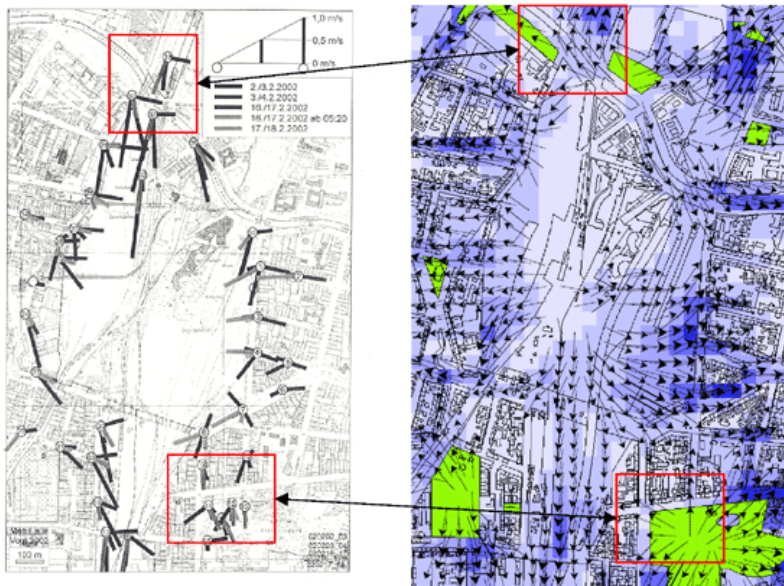


Abb. 5: Verifizierung der Ergebnisse des Klimamodells FITNAH (rechte Abb.) anhand stationärer und mobiler Messungen im Bereich Gleisdreieck (linke Abb., aus Vogt 2002a und Vogt 2002b); in der linken Abb. weisen die von den Messpunkten ausgehenden Linien in die Richtung, aus der der Wind kommt; in der 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) im Gesamtgebiet
- Bodennahe Temperaturen (06.00 Uhr) im Gesamtgebiet
- Bodennahe Temperaturen (22.00 und 06.00 Uhr) im Vertiefungsgebiet
- Luftaustausch und Luftmassenstrom (22.00 und 06.00 Uhr) im Gesamtgebiet

- Luftaustausch und Luftmassenstrom (22.00 und 06.00 Uhr) im Vertiefungsgebiet

Die Modellrechnungen wurden jeweils abends zur Zeit des Sonnenunterganges gestartet und bis Sonnenaufgang des darauf folgenden Tages durchgeführt. 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 Einstrahlungszur 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 bzw. für das Vertiefungsgebiet südlicher Stadtrand - Mitte 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 anteilmäßigen 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 - Berlin und Umland

Die Temperaturverhältnisse der bodennahen Atmosphäre **um 22 Uhr** im Gesamtgebiet 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 Uhr) heben sich dabei die Hauptlandnutzungen in charakteristischer Weise gegeneinander ab.

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

Die **Freiflächen** werden tagsüber stark aufgeheizt und kühlen sich nach Sonnenuntergang ebenso stark ab. Aufgrund der relativ hohen abendlichen Ausgangstemperatur ist zu dem gewählten Zeitpunkt diese Abkühlung noch nicht so weit fortgeschritten, dass das Niveau der kühlen Waldflächen schon erreicht wird.

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 Flughäfen Tempelhof bzw. 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.

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.

Bodennahes Temperaturfeld - Vertiefungsgebiet südlicher Stadtrand - Mitte

Bei einer Verfeinerung der räumlichen Auflösung heben sich bei der Temperatur die einzelnen Nutzungstypen, gerade auch in bebautem Gelände, noch deutlicher gegeneinander ab (vgl. Karte 04.10.07 und Karte 04.10.08).

Rasterzellen, die vollständig mit dicht bebautem Gebiet ausgefüllt sind, grenzen unmittelbar an Freiflächen und somit ergeben sich **große Temperaturunterschiede auf kürzester Distanz**. Diese Unterschiede werden aufgrund der stark verringerten Windgeschwindigkeit in den urbanen Gebieten nur geringfügig abgebaut und bleiben während der gesamten Nachtstunden erhalten.

Die unterschiedlichen Bebauungsstrukturen in dem ausgewählten Bereich werden besonders vom Flughafen Tempelhof, dem Erholungspark Britzer Garten und den Freiflächen östlich und westlich von Lichtenrade unterbrochen.

Das thermische Verhalten der einzelnen Landnutzungen unterscheidet sich nicht von den weiter oben beschriebenen Verhältnissen für das Gesamtgebiet von Berlin. In den Abendstunden sind die waldbestandenen Teile der Parks die kühleren Flächen gefolgt von den Freiflächen. Wasserflächen weisen einen nur sehr geringen Tagesgang auf und ordnen sich vom Temperaturniveau zu diesem Zeitpunkt in die vorhandene Spannbreite der Temperatur für die unterschiedlich bebauten Gebiete ein.

Bis in die frühen Morgenstunden bilden sich die landnutzungstypischen Temperaturverhältnisse aus. Während in der umgebenden Flur bei Lichtenrade die Temperatur über Wiesen und Äcker relativ stark zurückgeht, kühlen sich die innerstädtischen Freiflächen, beispielsweise im Bereich des Flughafens Tempelhof, nicht in dem entsprechenden Maße ab. Hier macht sich bemerkbar, dass das Flughafengelände in eine insgesamt wärmere Umgebung eingebettet ist.

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 für die Gesamtstadt bzw. Karte 04.10.09 bis Karte 04.10.12 für das Vertiefungsgebiet).

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 0,2m/s während einer austauscharmen, sommerlichen Strahlungswetternacht erreichen. Die Ausgleichsströmungen können als Hang- oder Talwinde bezeichnet werden, wenn Hang- bzw. Talbodenneigungen von $>1^\circ$ auftreten. Thermisch induzierte Strömungssysteme sind in den nahezu ebenen Arealen zu finden (vgl. Abbildung 6).

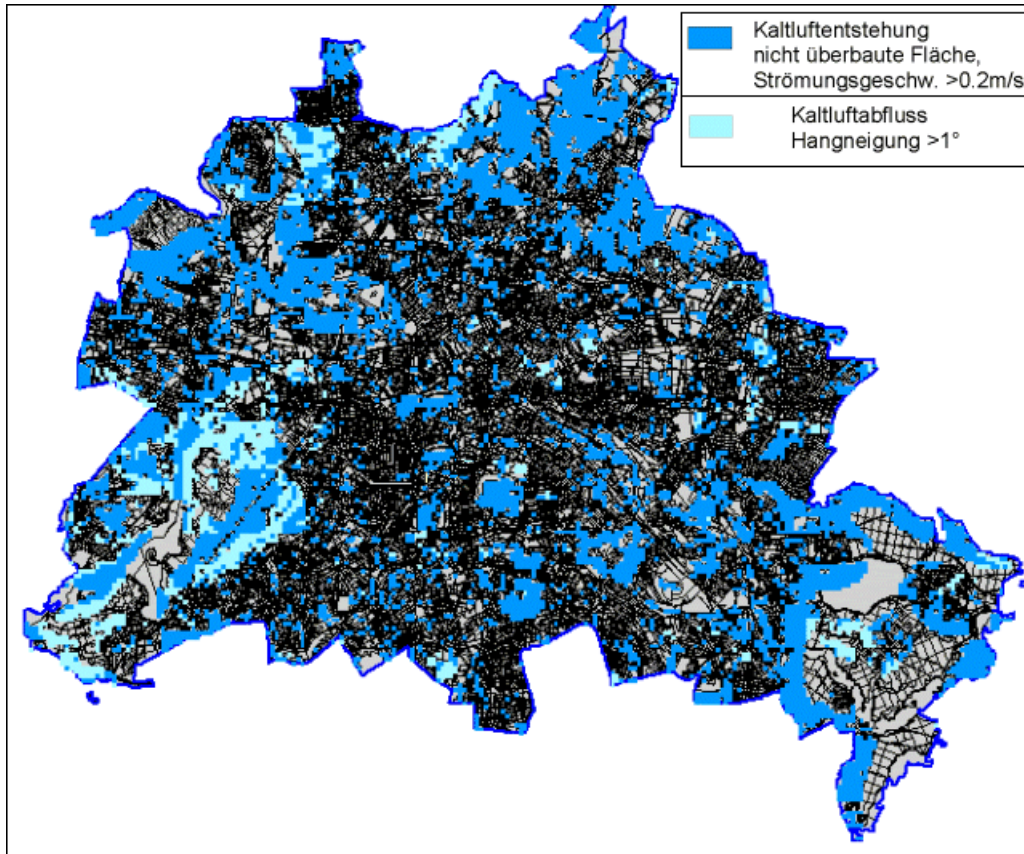


Abb. 6: An Kaltluftentstehung bzw. Kaltluftabfluss beteiligte Flächen im Stadtgebiet Berlin während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (22.00 Uhr; Rasterauflösung 200 m)

Bedeutende 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	25,9	26,7
Orographisch induzierte Strömungssysteme	4,9	5,3

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, **über 30 % des Stadtgebietes an der Ausbildung von Ausgleichsströmungen beteiligt**, wobei der Flächenanteil im Verlauf der Nacht von 30,8 % um 22.00 Uhr auf 32,0 % um 06.00 Uhr morgens geringfügig zunimmt. Diese Zunahme ist darauf

zurückzuführen, dass weitere unbebaute Flächen insbesondere im Umfeld des Müggelsees sowie 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 niedrigeren Niveau abspielt. Bei einem Vergleich der mittleren Luftaustauschrate aller Rasterzellen des gesamten Stadtgebietes fällt auf, dass der mittlere Zellenwert von 7,6 (22.00 Uhr) auf 8,1 (06.00 Uhr) ansteigt. Im Gegenzug sinkt der maximale Zellenwert von 29,47 auf 22,8 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 überbauten Flächen Berlins. Eine Bilanzierung für das Stadtgebiet ergibt:

- Etwa 65,5 % der überbauten Flächen wird zum Zeitschnitt 22.00 Uhr von autochthonen Strömungen mit einer Geschwindigkeit von mindestens 2 m/s erreicht bzw. durchdrungen
- Die Ausgleichsleistung der Freiflächen sinkt auf Grund der Nivellierung des Temperaturniveau – und damit Abschwächung der thermisch induzierten Strömungssysteme – im Laufe der Nacht auf eine räumliche Abdeckung von ca. 40 % der durch Bebauung geprägten Stadtareale (Zeitschnitt 06.00 Uhr).

Durch die enge Verzahnung von bebauten Bereichen und Freiflächen **weist Berlin insgesamt ein hohes klimaökologisches Ausgleichspotential auf**. Kaltluftabflüsse haben daran aber 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 Lieper Bucht bis Ruhlebener Straße, der auf einer Länge von ca. 7 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 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 2,18 Billionen m^3 Kaltluft bewegt. Dies entspricht einem stündlichen Durchsatz von 0,27 Billionen m^3 . Welche Kaltluftmengen in den einzelnen Stadtteilen bewegt werden, zeigt Tabelle 2.

Tab. 2: Kaltluftmassenstrom in den Berliner Bezirken während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht	
Bezirk	Massenstrom im Mrd m³ pro Nacht von 8 h
Friedrichshain-Kreuzberg	44,98
Mitte	88,06
Neukölln	96,95
Lichtenberg	134,73
Tempelhof-Schöneberg	139,68
Marzahn-Hellersdorf	160,72
Charlottenburg-Wilmersdorf	208,89
Steglitz-Zehlendorf	238,27
Spandau	243,45
Pankow	250,08
Reinickendorf	267,95
Köpenick	314,06

Tab. 2: Kaltluftmassenstrom 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 den Stadtteilen 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 Kaltfluthaushaltes von Freiflächen angeboten. Der Text ergänzt damit die Inhalte des Kapitels Kartenschreibung.

Kaltluftproduzierende Freiflächen und ihr Einfluss auf die Bebauung

In Abbildung 7 sind 3 Standorte gekennzeichnet, an deren Beispiel entlang eines ausgewählten Streckenabschnitts von jeweils 9 Rasterzellen mit 1600 m Abschnittslänge (200 m Raster) bzw. 450 m (50 m Raster) näher auf den Kaltfluthaushalt eingegangen werden soll. Zur Charakterisierung der Dynamik des Kaltfluthaushaltes wurden diese Beispiele im Grenzbereich von kaltluftproduzierender Freifläche zur Bebauung platziert. Für den gebietsübergreifenden Vergleich der Werte innerhalb des 200 m Rasters wurde anschließend ein mittlerer Rasterzellenwert auf Basis der Zellen ermittelt, die sich entlang des Streckenverlaufs befinden.

Als Beispiele für die Ausgleichsleistung von Freiflächen wurden Übergangsbereiche vom Grunewald nach Wilmersdorf (A) sowie im Bezirk Mahlsdorf (B) am östlichen Stadtrand Berlins herangezogen. Der südwestliche Abschnitt des Flughafens Tempelhof (C) repräsentiert das Vertiefungsgebiet, in dem ein feiner aufgelöstes 50 m Raster zum Einsatz kam.

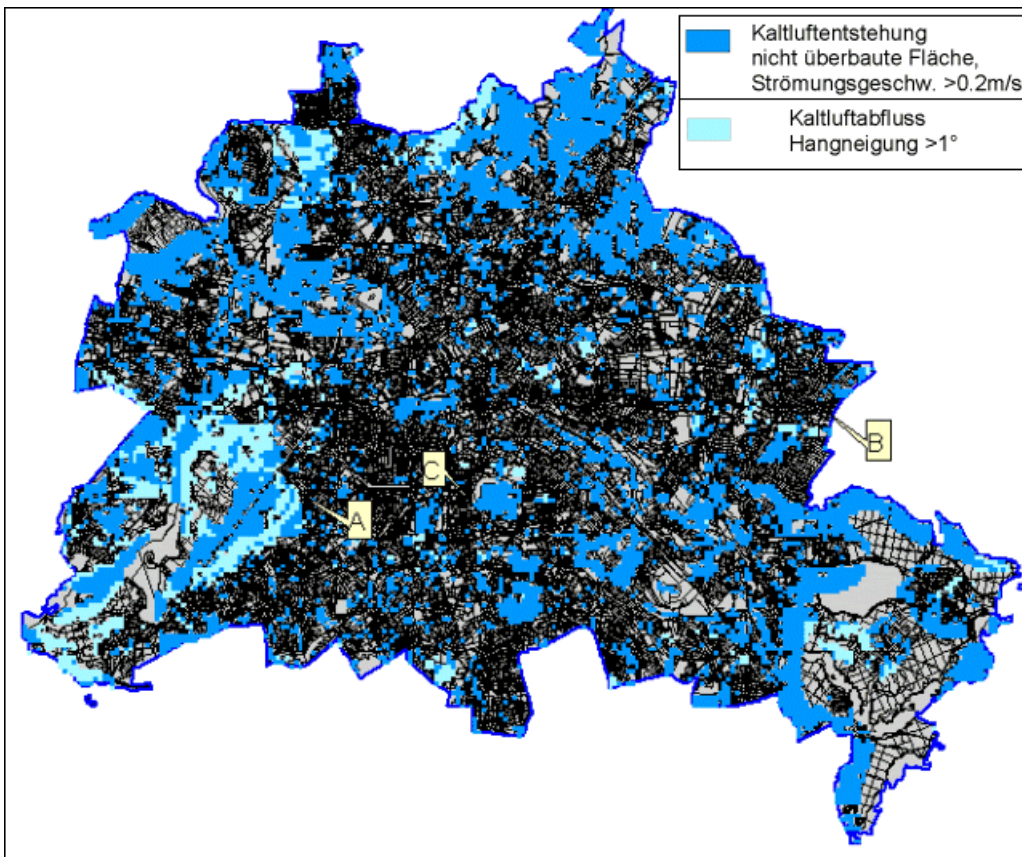


Abb. 7: Lage der Beispielsgebiete A, B und C zur Verdeutlichung der Prozesse 'Kaltluftentstehung' und 'Kaltluftabfluss' während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (22.00 Uhr; Rasterauflösung 200 m)

Beispiel Grunewald

Der Grunewald zählt mit einer Größe von über 3000 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 Kaltluftproduktivität. Abbildung 8 zeigt den Übergangsbereich vom Grunewald zur Einzelhausbebauung in Wilmersdorf, hier fällt der Luftaustausch pro Rasterzelle und Stunde mit Wechselraten von über 20 vergleichsweise hoch aus.

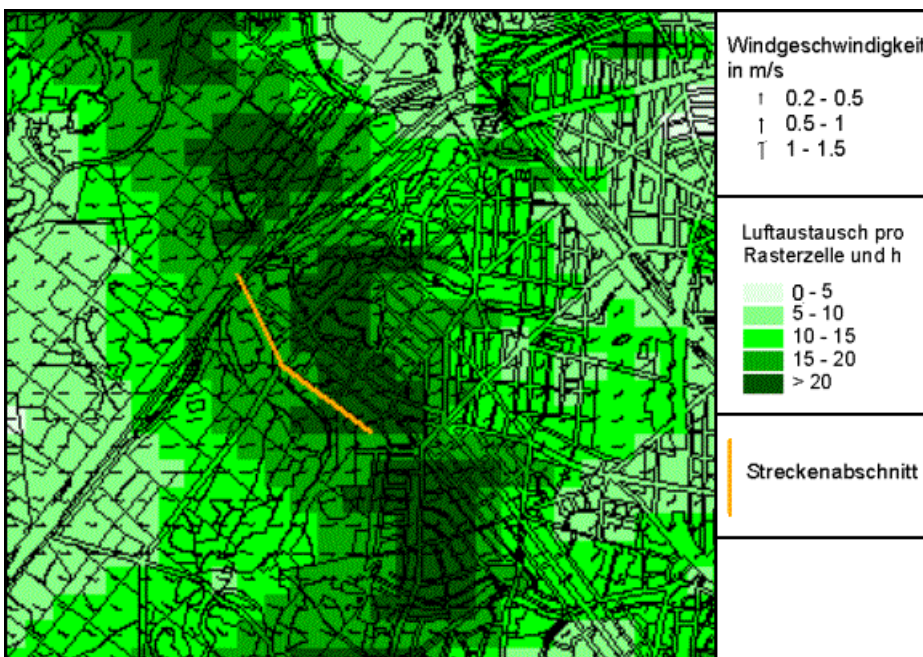


Abb. 8: Luftaustausch pro Rasterzelle sowie autochthones Strömungsfeld im Übergangsbereich Grunewald-Wilmersdorf während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (22.00 Uhr; Rasterauflösung 200 m)

Die entsprechend **große Reichweite der Kaltluftströmung** ist in Wilmersdorf um 22.00 Uhr mit bis zu 3000m am stärksten ausgeprägt und liegt in der ausgedehnten Einzelhausbebauung begründet. In Steglitz dagegen wird mit zunehmend dichterem Bauung nur noch ein Wert von ca. 1500 m erreicht. Um 06.00 Uhr morgens dringt die Kaltluft nur noch ca. 1000 bis maximal 2200 m in die Bebauung ein.

Für den 1600 m langen Abschnitt sind beispielhaft die mittlere Ausprägung des Luftaustausches pro Rasterzelle, des Massenstroms sowie die Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes berechnet worden (vgl. Tabelle 3). Diese Strecke beginnt in der Auerbachstraße an der Avus und führt über die Regerstraße bis zur Waldmeisterstraße.

Dabei zeigt sich die Abnahme der mittleren Rasterzellenwerte im Verlauf der Nacht. Die Luftwechselrate geht von 20,13 auf 13,99 um ca. 30 % zurück. Ähnliches gilt für den Massenstrom, der sich um ca. 25 % verringert. Der Rückgang der Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes ist mit ca. 64 % noch stärker ausgeprägt.

Tab.3: Mittlere Luftaustauschrate, Massenstrom sowie Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes pro Rasterzelle entlang des Streckenabschnittes im Übergangsbereich Grunewald-Wilmersdorf während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (Rasterauflösung 200 m)

Zeitpunkt	mittlere Luftaustauschrate / h pro 200 m Rasterzelle	mittl. Massenstrom in 1000 m ³ / s pro 200 m Rasterzelle	mittl. Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes in m/s
22.00 Uhr	20,13	9,35	0,77
06.00 Uhr	13,99	6,97	0,28

Tab. 3: Mittlere Luftaustauschrate, Massenstrom sowie Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes pro Rasterzelle entlang des Streckenabschnittes im Übergangsbereich Grunewald-Wilmersdorf während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (Rasterauflösung 200 m)

Beispiel Mahlsdorf

Das Kaltluftquellgebiet für dieses Beispiel stellt die Freifläche dar, die sich nördlich des Dahwitzer Forstes anschließt. Sie hebt sich hierbei mit Luftwechselraten bis über 20 pro Rasterzelle und Stunde deutlich von den überbauten Flächen ab (vgl. Abb. 9).

Die Reichweite dieser Luftbewegung liegt gegen 22.00 Uhr zwischen 1100 m nördlich der Bundesstraße 5 im Bereich der S-Bahntrasse und 1800 m in Richtung auf den Hönower Damm. Dort vereinigt sie sich mit dem Flurwind aus dem Kaulsdorfer Busch und fließt nach Norden, wo am Mahlsdorfer S-Bahnhof die Windgeschwindigkeit schließlich auf unter 0,2 m/s absinkt.

Bis um 06:00 Uhr bleibt die Eindringtiefe nahezu erhalten. Lediglich die Strömungsrichtung ändert sich auf eine südwestliche Tendenz.

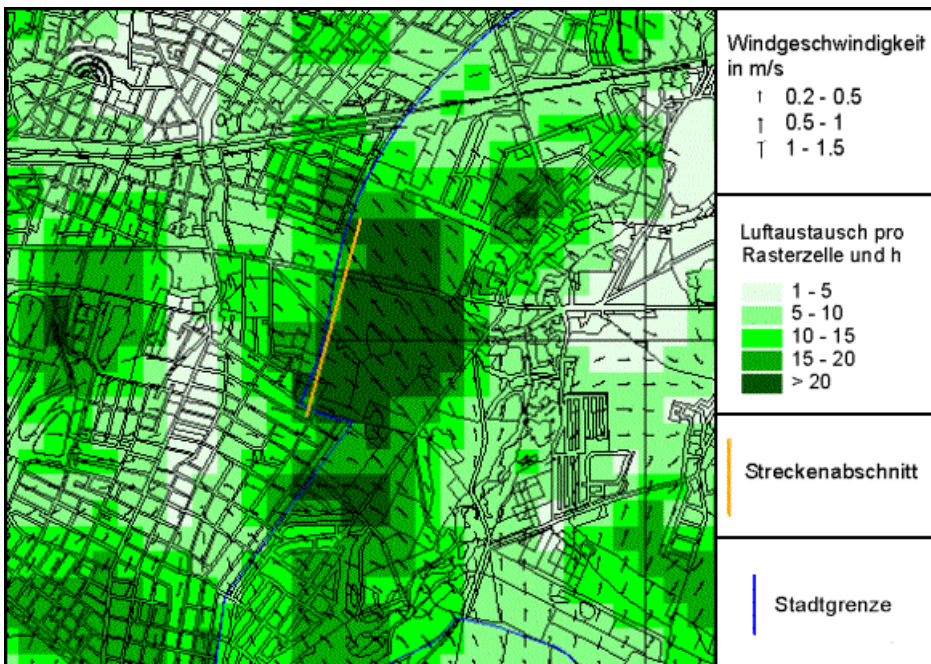


Abb. 9: Luftaustausch pro Rasterzelle sowie autochthones Strömungsfeld im Bereich Mahlsdorf während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (22.00 Uhr; Rasterauflösung 200 m)

Die mittleren Rasterzellenwerte übertreffen bis auf den Massenstrom die des Gebietes Wilmersdorf(A) geringfügig (vgl. Tab. 4). Der wesentliche Unterschied ist jedoch in dem schwächeren Rückgang der Werteausprägungen bis zum frühen Morgen zu sehen.

Tab.4: Mittlere Luftaustauschrate, Massenstrom sowie Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes pro Rasterzelle entlang des Streckenabschnittes in Mahlsdorf während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (Rasterauflösung 200 m)

Zeitpunkt	mittlere Luftaustauschrate/h pro 200 m Rasterzelle	mittl. Massenstrom in 1000 m ³ / s pro 200 m Rasterzelle	mittl. Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes in m/s
22.00 Uhr	20,72	8,46	0,91
06.00 Uhr	18,22	7,69	0,42

Tab. 4: Mittlere Luftaustauschrate, Massenstrom sowie Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes pro Rasterzelle entlang des Streckenabschnitts in Mahlsdorf während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (Rasterauflösung 200 m)

Beispiel Flughafen Tempelhof

Analog zu den bereits beschriebenen Untersuchungsgebieten wird auch hier die Situation anhand von 9 Rasterzellen entlang eines ausgewählten Streckenabschnittes untersucht. Für die Betrachtung des Kaltluftaushaltes im Vertiefungsgebiet soll an dieser Stelle der südwestliche Teil des Flughafens Tempelhof dienen, wobei hier ein 450 m langer Abschnitt entlang des Tempelhofer Damms ausgewählt wurde (vgl. Abb. 10). Bei der Betrachtung des Luftaustausches pro Rasterzelle / h ist die zu durchströmende Strecke maßgeblich. Um nun einen Vergleich zwischen den zwei Rasterweiten zu ermöglichen, muss der Zellenwert des hier betrachteten 50 m Rasters durch 4 dividiert werden, um ihn mit dem 200 m-Wert vergleichbar zu machen.

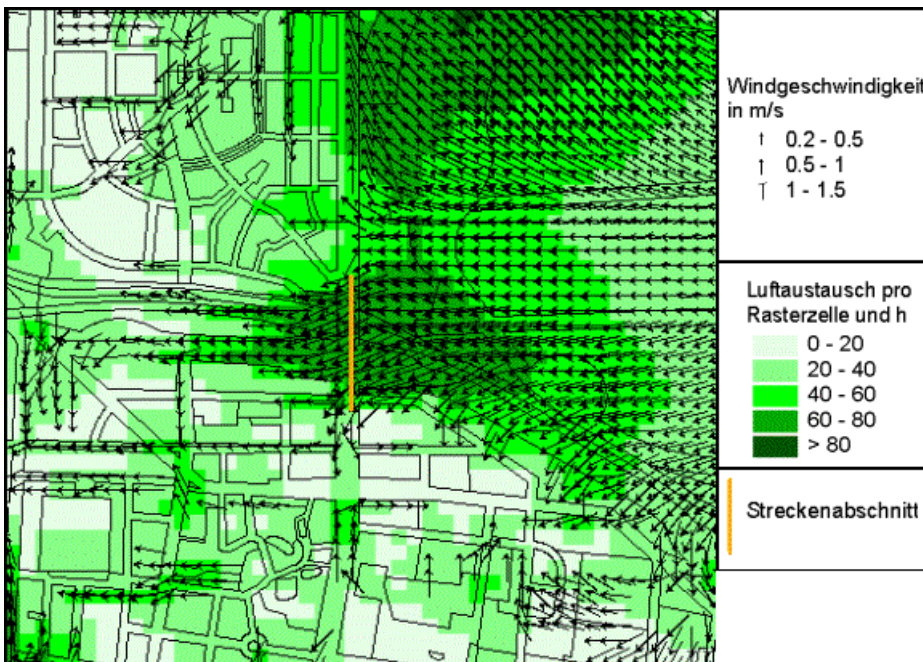


Abb. 10: Luftaustausch pro Rasterzelle sowie autochthones Strömungsfeld im Bereich des Flughafens Tempelhof während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (22.00 Uhr; Rasterauflösung 200 m)

Hinsichtlich der Luftwechselrate sind auf dem Flughafengelände mit dem Vorfeldbereich sowie der Kreuzung Tempelhofer Damm / Autobahn A 100 zwei **Areale mit vergleichsweise hoher stündlicher Austauschrate** von über 80 pro Rasterzelle erkennbar. Bezogen auf das 200 m Raster, welches für das Stadtgebiet angewendet wurde, entspricht dies einem Zellenwert von 20 und ist von der Wertausprägung her mit dem Beispiel Wilmersdorf(A) vergleichbar. 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 die Abfertigungsgebäude beeinträchtigt. Durch die Umsetzung der Strukturhöhen in das Rechenraster für die FITNAH-Simulation ergibt sich eine mittlere Strukturhöhe, die dazu führt, dass einzelne Hindernisse, die nominell höher als 5 m sind, überströmt werden könnten.

Hingegen kann sich um 22.00 Uhr entlang des betrachteten Streckenabschnitts ein Flurwind ausbilden, der mit einer westlichen Strömung entlang der Autobahn A 100 und einer Länge von maximal 450 m im Vergleich zu den anderen Standorten eher schwach ausgeprägt ist. Ihm steht zu diesem Zeitpunkt eine ostwärts gerichtete Kaltluftbewegung aus den Kleingartenkolonien des Südgeländes Schöneberg gegenüber. Die Manteuffelstraße stellt sich dabei gewissermaßen als Trennungslinie beider Flurwinde dar.

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. 800m verdoppelt und bis zu 200 m nach Süden in den Tempelhofer Damm eindringt (vgl. Abb. 10).

Tabelle 5 fasst die Ergebnisse für den betrachteten Ausschnitt des Kerngebietes zusammen. Dabei wird deutlich, dass sich die berechneten Werte im Verlauf der Nacht geringfügig erhöhen und sich dadurch in ihrer Tendenz von den Gebieten (A) und (B) unterscheiden. Dies liegt in der hohen räumlichen Auflösung des 50 m Rasters begründet, in dem sich eine Verlagerung der Rasterzellen mit einer hohen Luftaustauschrate in Richtung auf die Bebauung abzeichnet.

Tab.5: Mittlere Luftaustauschrate, Massenstrom sowie Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes pro Rasterzelle entlang eines Streckenabschnittes im Bereich des Flughafens Tempelhof während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (Rasterauflösung 50 m)

Zeitpunkt	mittlere Luftaustauschrate / h pro 200 m Rasterzelle	mittl. Massenstrom in 1000 m ³ / s pro 200 m Rasterzelle	mittl. Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes in m/s
22.00 Uhr	64,86	1,72	0,7
06.00 Uhr	71,73	2,01	0,71

Tab. 5: Mittlere Luftaustauschrate, Massenstrom sowie Strömungsgeschwindigkeit des Flurwindes pro Rasterzelle entlang eines Streckenabschnittes im Bereich des Flughafens Tempelhof während einer austauscharmen sommerlichen Strahlungswetternacht (Rasterauflösung 50 m)

Für den sich westlich des betrachteten Streckenabschnitts und in Strömungsrichtung des Flurwindes anschließenden Bereich wurde das Kaltluftvolumen auf Basis des Luftaustausches ermittelt. Hierbei sind auf einer Fläche von ca. 20 Hektar die Rasterzellen berücksichtigt worden, die sich an den Streckenabschnitt westlich des Flughafens anschließen und für die eine Windgeschwindigkeit > 0,2 m/s nachgewiesen werden konnte.

Die Höhe dieser bodennahen Rasterzellen beträgt 5 m, woraus sich ein Volumen von 12 500 m³ pro Zelle ergibt. Für den genannten Bereich lässt sich ein stündlicher Luftaustausch von 5,52 Mio. m³ beziffern. Daraus ergibt sich in diesem Teilausschnitt, hochgerechnet auf eine Nacht von 8 Stunden, ein von den Kaltluftproduktionsflächen des Flughafens induzierter Luftaustausch in der bodennahen Luftschicht (bis 5 m ü. Grund) von insgesamt 43,36 Mio. m³.

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. Internet: <http://www.ima-umwelt.de/downloads/FITNAH-Kurzuebersicht.pdf>
- [8] **VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 1994:**
Richtlinie VDI 3787, Blatt1, Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen, Düsseldorf. Internet: <http://www.vdi.de/>
- [9] **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.

- [10] **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.

Karten

- [11] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1995a:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1995, Karte 01.02 Versiegelung, 1:50 000, Berlin.
- [12] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1995b:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1995, Karte 06.01 Reale Nutzung der bebauten Flächen, 1:50 000, Berlin.
- [13] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1995c:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe, Karte 06.02 Bestand an Grün- und Freiflächen, 1:50 000, Berlin.
- [14] **SenSUT (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin) (Hrsg.) 1998b:**
Umweltatlas Berlin, Ausgabe 1998, Karte 04.09 Bioklima bei Tag und Nacht, 1:75 000, Berlin.

Digitale Karten

- [15] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1995d:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1995, Karte 01.02 Versiegelung, 1:50 000, Berlin.
Internet:
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i102.htm>
- [16] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1995e:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1995, Karte 06.01 Flächennutzung, 1:50 000, Berlin.
Internet:
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i601.htm>
- [17] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1995f:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1995, Karte 06.02 Grün- und Freiflächenbestand, 1:50 000, Berlin.
Internet:
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i601.htm>
- [18] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1995g:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1995, Karte 06.07 Stadtstruktur, 1:50 000, Berlin.
Internet:
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i607.htm>
- [19] **SenSUT (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin) (Hrsg.) 1998a:**
Umweltatlas Berlin, Ausgabe 1998, Karte 01.08 Geländehöhen, 1:50 000, Berlin.
Internet:
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/i108.htm>
- [20] **SenStadt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung 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>

- [21] **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>
- [22] **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>
- [23] **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>
- [24] **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>