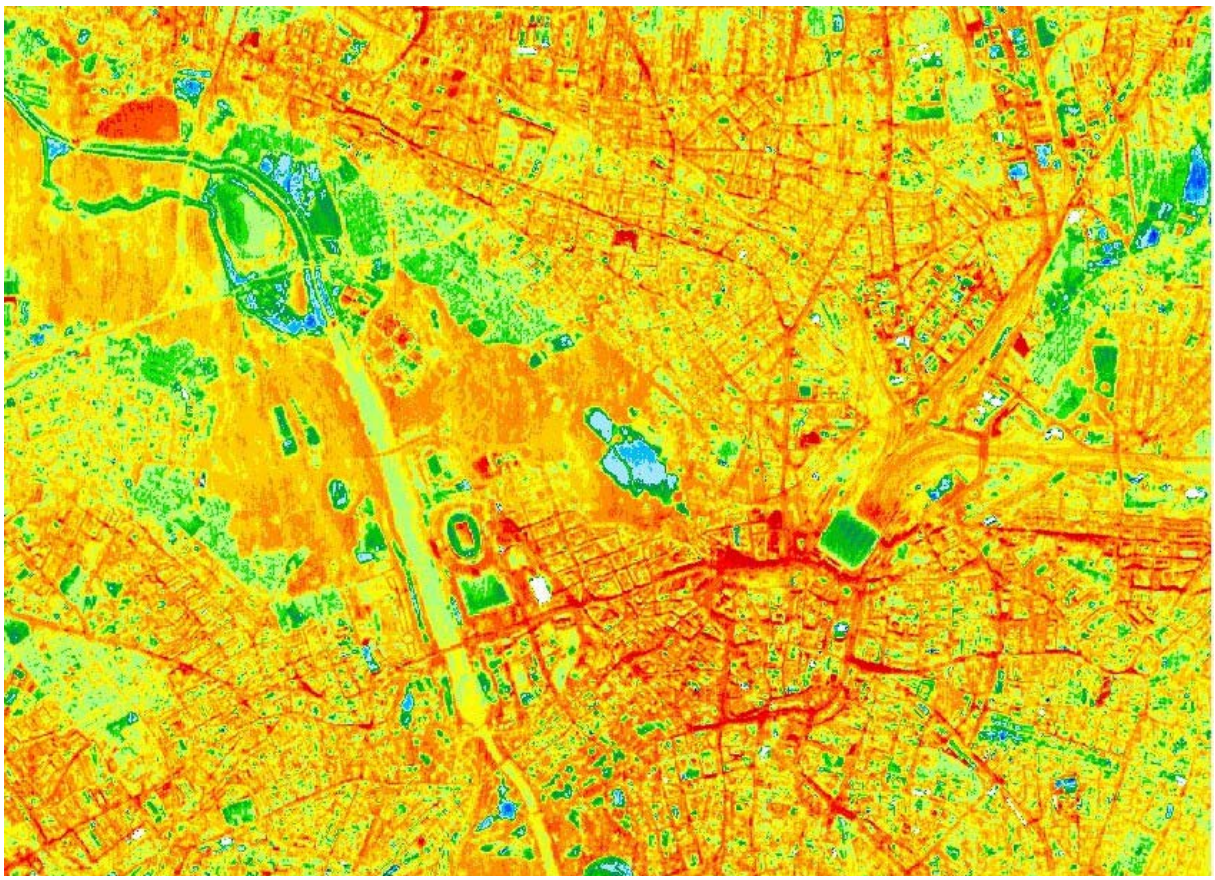
Stadtklimauntersuchung Leipzig



Thermalaufnahme Abend 22.09.2010

Steinicke & Streifeneder
Umweltuntersuchungen GbR

Eisenbahnstraße 43
D - 79098 Freiburg
Tel +49-761-202 1646
Fax +49-761-202 1671
www.klima-luft.de

Stadtklimauntersuchung Leipzig

Auftraggeber Stadt Leipzig
Amt für Umweltschutz

Bearbeitung Dipl.-Phys. Dr. rer. nat. Wolfgang Steinicke
Dipl.-Geogr. Ulrike Schwab

Dezember 2010

Inhalt

1 Einleitung 2

2 Datengrundlagen und Methodik 4

3 Charakterisierung des Untersuchungsraumes 8
3.1 Naturraum und Flächennutzung 8
3.2 Regionalklima 9
3.3 Lufthygienische Situation 17

4 Thermalscanneraufnahmen 19
4.1 Thermalkarten und Differenzkarte 19
4.2 Klassifizierte Thermalkarte 20
4.3 Differenzkarten 1997 und 2010 der Abend- und Morgensituation 26

5 Klimafunktionskarte 29
5.1 Überwärmungsbereiche 29
5.2 Kaltluftgebiete 30
5.3 Sonstige klimarelevante Flächen 33
5.4 Strömungsparameter 34

6 Bewertungskarte Klima/Luft 37
6.1 Freiflächen 37
6.2 Siedlungsflächen 38
6.3 Sachinformationen 39
6.4 Sonstige klimarelevante Flächen 39
6.5 Vorbelastungen und Konflikte 40
6.6 Nachrichtliche Informationen 41

7 Darstellung und Bewertung bestehender oder potentieller stadtklimatisch-lufthygienischer Konfliktsituationen, Ableitung von Planungshinweisen 42
7.1 Ursachen und Auswirkungen des Klimawandels 42
7.2 Konfliktsituationen und allgemeine Planungshinweise 45

8 Zusammenfassung 48

9 Quellenverzeichnis 50

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Kartenbeilage (A3-Format)

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht dokumentiert den Abschluss der Klimauntersuchung für die Stadt Leipzig nebst Umland entsprechend dem Vertrag vom 28. Juni 2010 zwischen der Stadt Leipzig und der Firma Steinicke & Streifeneder Umweltuntersuchungen, Freiburg.

Die Stadtklimauntersuchung umfasst gemäß den vertraglichen Vereinbarungen folgende Punkte:

- Darstellung und Bewertung der klimatischen und lufthygienischen Ist-Situation
- Ausarbeitung von Planungshinweisen
- Darstellung der Ergebnisse in Form von Gutachten und Karten
- Präsentation der Ergebnisse

Wichtigste Grundlage für die Darstellung der klimatischen Ist-Situation sind die am 22. und 23. September 2010 über dem Gebiet der Stadt Leipzig durchgeführten Thermalscannerbefliegungen. Parallel dazu lief ein meteorologisches Messprogramm, ausgeführt vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig (UFZ). Darüber hinaus wurden vorhandene meteorologische und lufthygienische Daten sowie weitere flächenbezogene Daten ausgewertet (siehe unten).

Wichtigste Ergebnisse der Klimauntersuchung sind die **Klimafunktionskarte**, die eine flächendeckende, detaillierte Darstellung der thermischen und dynamischen Verhältnisse des klimatischen Ist-Zustandes zeigt, sowie die **Bewertungskarte Klima/Luft**, die bestehende Belastungen verdeutlicht und eine qualitativ abgesicherte Beurteilung von Planungsvorhaben ermöglicht.

Die vorliegende Untersuchung ist die dritte nach 1993 und 1997 (auch bei den früheren wurden Thermalscannerbefliegungen durchgeführt). Die Untersuchung von 2010 ist eine Aktualisierung und Fortschreibung der von 1997 (Steinicke & Streifender Umweltuntersuchungen GbR, 1998). Aus dem Vergleich der Thermaldaten von 1997 und 2010 ergibt sich die Möglichkeit, Veränderungen und Entwicklungen der letzten Jahre zu dokumentieren und darzustellen.

Unter **Stadtklima** versteht man ganz allgemein das "durch die Wechselwirkung mit der Bebauung und deren Auswirkungen (einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen) modifizierte Klima" (WMO, 1981). Bekannteste Erscheinung des Stadtklimas ist die Ausbildung einer **städtischen Wärmeinsel**. So können die Temperaturen innerhalb der Bebauung um bis zu 10 K höher sein als im Umland. In extremer Ausbildung tritt diese Situation in windschwachen sommerlichen Strahlungsnächten und nach vorangegangenen strahlungsreichen Tagen auf. Die Ursache hierfür liegt vor allem in der weitreichenden Veränderung des Wärmehaushaltes gegenüber dem Freiland: Wärmespeicherung durch die städtische Bebauung, herabgesetzte Verdunstung durch die fehlende Vegetation sowie verringerte langwellige Ausstrahlung aufgrund der Luftverunreinigungen in der Stadtatmosphäre. Im Winter kommen Gebäudeheizungen als zusätzliche Wärme- und Schadstoffquellen hinzu.

Das zweite wesentliche Merkmal des Stadtklimas ist die starke **Veränderung der Windverhältnisse** gegenüber dem Umland. Die erhöhte Rauhigkeit der städtischen Bebauung bewirkt im Mittel eine Verringerung der Windgeschwindigkeiten, was gleichzeitig den Luftaustausch und den Abtransport von Schadstoffen verschlechtert. In der Nähe von hohen Gebäuden kann es hingegen zu einer Zunahme der Windgeschwindigkeitsspitzen, also einer Erhöhung der Böigkeit, kommen.

Darüber hinaus ist die **Veränderung der lufthygienischen Situation** von großer Bedeutung. So treten innerhalb von Stadtgebieten üblicherweise höhere Emissionen auf als im Umland. Während früher vor allem Hausbrand und Gewerbe dafür verantwortlich waren, ist in den vergangenen Jahren der Kfz-Verkehr zum Hauptverursacher geworden. In Verbindung mit dem reduzierten Luftaustausch kommt es zu einer Erhöhung der Schadstoffkonzentrationen im Stadtgebiet.

Entscheidend für die Klimagunst oder -ungunst einer Stadt sind die **Belüftungsverhältnisse**. Gerade bei windschwachen, austauscharmen Hochdruckwetterlagen ist eine ausreichende Durchlüftung ausschlaggebend für das Wohlbefinden der Stadtbewohner. Sie sorgt zum einen für die Verringerung der Wärmebelastung, zum anderen für die Verbesserung der lufthygienischen Situation durch Abtransport von Schadstoffen bzw. Verdünnung der Schadstoffkonzentration. Die wichtigste Rolle spielt dabei die Zufuhr kühler, gering belasteter Luftmassen aus dem Umland in Form von Kaltluftströmen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Möglichkeit des horizontalen Luftaustausches über sog. Ventilations- oder Luftleitbahnen. Das sind Bereiche geringer Rauhigkeit, die eine gute Durchströmbarkeit erlauben.

Mit **§ 1 Abs. 5 BauGB** ist die **Berücksichtigung der Belange des Klimas und der Luft in der Bauleitplanung** durch den Gesetzgeber vorgesehen. Dabei ist als Grundvoraussetzung luft- und klimaverträglicher Planung die sinnvolle Zuordnung von bebauten und unbebauten Flächen einerseits sowie von emittierenden und immissionsempfindlichen Nutzungen andererseits bereits auf der Ebene der Flächennutzungsplanung zu nennen (vgl. REUTER et al., 1991).

2 Datengrundlagen und Methodik

Thermalscannerbefliegung

Am 22. und 23. September 2010 wurden mit einem Thermalscanner zwei Befliegungen über dem Stadtgebiet von Leipzig durchgeführt. Das Wetter in Mitteldeutschland war zu diesem Zeitpunkt geprägt durch das zwischen den Tiefs „Joleen“ und „Hiltrud“ liegende Hochdruckgebiet „Karlheinz“, verbunden mit Strahlungswetter und schwachen Winden. Wie die meteorologischen Daten zeigen (siehe Tabelle 1 und Abbildung 1), waren – trotz der spätsommerlichen Situation – die Befliegungsbedingungen ideal („autochthone Wetterlage“). Die lange Sonnenscheindauer garantierte eine hohe Einstrahlung und der wolkenlose Himmel in der Nacht hervorragende Ausstrahlungsbedingungen.

Tab. 1 Wetterdaten am 22.09.2010 (DWD-Angaben für Leipzig-Schkeuditz)

Luftdruck	1006 hPa
Lufttemperatur (2 m ü. G.)	Mittel 14,7 °C, Min. 8,0 °C, Max. 21,4 °C
Relative Luftfeuchte	78,1 %
Windstärke	Mittel 2 Bft, in Böen 4 Bft
Sonnenscheindauer	11,2 Std.
Niederschlag	keiner

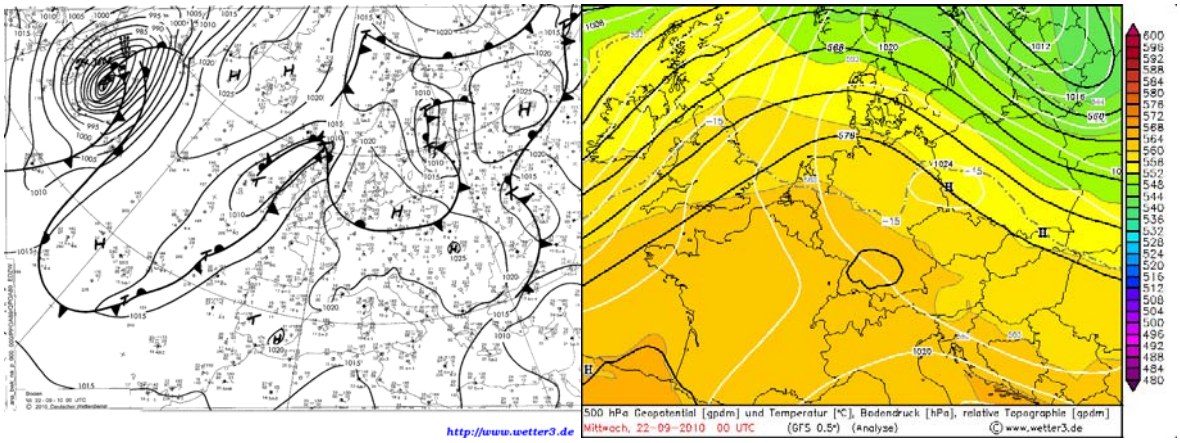


Abb. 1 Links: Wetterkarte; rechts: Analyse des amerikanischen „Global Forcast System“ (GFS-Modell)

Bei der Thermalbefliegung werden die Strahlungstemperaturen der vom Scanner erfassten Oberflächen aufgezeichnet. Der erste Flug fand kurz nach Sonnenuntergang, der zweite Flug kurz vor Sonnenaufgang statt (Tabelle 2). Die Wahl der Zeitpunkte erlaubt die Darstellung des nächtlichen Abkühlungsverhaltens.

Tab. 2 Angaben zu den Thermalscanneraufnahmen Leipzig 2010

Datenaufnahme	Abendflug: 22.09.2010, 19:30 – 21:00 MESZ Morgenflug: 23.09.2010, 05:00 – 06:30 MESZ
Gebietsgröße	30250 m (W-O), 24700 m (N-S)
Flughöhe	2000 m ü. G.
Anzahl Flugstreifen	9 (Orientierung W-O)
Geometrische Auflösung	5,0 m

Aufnahmegerät war ein Thermalscanner vom Typ Daedalus AADS 1250, der die von der Erdoberfläche ausgehende langwellige Wärmestrahlung im thermischen Infrarot (Wellenlängenbereich 8 - 14 μm) detektiert. Dabei wird die emittierte Strahlung der Geländeobjekte bildpunktweise in quer zur Flugrichtung verlaufenden Streifen (Scanstreifen) aufgenommen. Grundelement des Abtastsystems ist ein rotierender Spiegel, mit dem das Gelände zeilenweise abgetastet wird, während sich das den Scanner tragende Flugzeug in Flugrichtung fortbewegt. Die von der Erdoberfläche ausgehende Strahlung wird dabei über ein optisches System, das die Strahlung in einzelne Wellenlängenbereiche zerlegt, auf Detektoren geleitet, die die Intensität der Strahlung messen.

Durch die Aufnahme von Referenztemperaturen („black bodies") werden bei der Befliegung den gemessenen 8-bit-Grauwerten (Bereich 0...255) Oberflächenstrahlungstemperaturen (in °C) zugeordnet. Nach Berücksichtigung der aufgenommenen Fluglagekorrekturen werden die Daten der Abend- und Morgenbefliegung für das Untersuchungsgebiet geometrisch entzerrt. Grundlage hierfür war die digitale Stadtkarte Leipzig 1:25.000, sowie die digitale Topographische Karte 1:25.000 (Sachsen/Sachsen-Anhalt) (Amt für Geoinformation und Bodennutzung, Stadt Leipzig 2005). Die Entzerrung der einzelnen Flugstreifen erfolgt über Passpunkte (insgesamt ca. 20.000). Die geometrisch korrigierten Streifen werden anschließend zu einem Bildverband zusammengesetzt. Als Ergebnis entstehen georeferenzierte Thermalkarten (Gauß-Krüger-Koordinaten).

Meteorologische und lufthygienische Daten

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung standen meteorologische Messreihen stationärer Messstationen in Leipzig aus unterschiedlichen Messzeiträumen als Tagesmittelwerte zur Verfügung (Tabelle 3). Mit Ausnahme der Stationen Leipzig-Universitätsgärtnerei und Leipzig-Connewitz (Meteomedia) werden alle Stationen vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) betrieben.

Tab. 3 Messstationen und verfügbare meteorologische Parameter im Untersuchungsgebiet (angegeben sind Startmonat/-jahr der Aufzeichnung).

Messstation	**WR**	**WG**	**T**	**F**	**D**	**S**	**NS**
Leipzig-Mitte	12/90	12/90	12/90	12/90	01/06	11/06	10/07
Leipzig-West	09/94	09/94	09/94	09/94	09/94	09/94	
Leipzig-Lützner Str.		01/01	01/01	04/08	01/05		
Schkeuditz	06/03	06/03	06/03	06/03	06/03	06/03	
Leipzig-Thekla	04/04	04/04	04/04	04/04	04/04	04/04	
Leipzig-Universitätsgärtnerei		08/03	08/03	08/03			
Leipzig-Connewitz		04/09	04/09	04/09			05/09

WR = Windrichtung, WG = Windgeschwindigkeit, T = Temperatur, F = rel. Luftfeuchte, D = Luftdruck, S = Globalstrahlung, NS = Niederschlag

Begleitend zur Befliegung wurden vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig vom 20. bis 26.09.2010 an 9 verschiedenen Standorten im Stadtgebiet Datenlogger zur Messung von Lufttemperatur und Luftfeuchte in 1,5 m Höhe eingesetzt. Vom 22. bis 23.09.2010 wurden in einem mobilen Messgang ebenfalls Daten zu Lufttemperatur und -feuchte aufgenommen. Alle Daten liegen als Minutenwerte vor und wurden vom UFZ in eigener Fragestellung bearbeitet. Die Auswertung ist in einem Bericht zusammengefasst (s. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, 2011). Ein Schwerpunkt der Untersuchung war die Korrelation zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur. Dazu wurden die hochaufgelösten Thermaldaten (Pixelwerte) in der Umgebung eines Messpunkts gemittelt, um einen Vergleich mit den räumlich viel gröberen Werten der Lufttemperatur zu ermöglichen. Da hier über unterschiedliche Oberflächen und Höhen gemittelt wird, ist ein solches Vorgehen kritisch zu sehen. Entsprechend spiegeln die Resultate allenfalls die bekannte Korrelation zwischen Nutzung (Bebauung, Freiland) und Temperatur wieder. Bezüglich der Einzelheiten sei auf den o. g. Bericht des UFZ verwiesen.

Für die Einschätzung der lufthygienischen Situation stehen umfangreiche Messreihen und Datenanalysen zur Verfügung. So befinden sich vier Stationen des Sächsischen Messnetzes zur Überwachung der Luftqualität innerhalb des Stadtgebietes von Leipzig (Tabelle 4).

In die vorliegende Untersuchung gehen insbesondere die Ergebnisse des Luftreinhalteplans für die Stadt Leipzig (Herausgeber: Stadt Leipzig, Stand 18. Dezember 2009) und der vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie herausgegebene Jahresbericht 2009 zur Luftqualität in Sachsen ein.

Tab. 4 Luftmessstationen und verfügbare Schadstoffdaten im Stadtgebiet von Leipzig (angegeben sind Startjahr bzw. Zeitraum der Aufzeichnung).

Messstation	**PM_{10}**	**$PM_{2,5}$**	**NO_2**	**NO**	**O_3**	**SO_2**	**Benzol**	**Toluol**	**Xylol**
Leipzig-Mitte	1999	1999	1992	1992		1991	1994	1994	1994
Leipzig-West	1999		1994	1994	1995				
Leipzig-Lützner Str.	2002		1995/96 1998/99 ab 2003	1995/96 1998/99 ab 2003					
Leipzig-Thekla					2003				

Landschaftsspezifische Daten

Neben den meteorologisch-thermischen und lufthygienischen Daten werden landschaftsspezifische Daten berücksichtigt, die für die Ausprägung des lokalen Klimas mitverantwortlich sind (Flächennutzung, Relief, Rauhigkeit).

Von der Stadt Leipzig (Amt für Geoinformation und Bodenordnung) wurden dazu folgende Unterlagen zur Verfügung gestellt:

- Digitale Biotoptypen- und Landnutzungskartierung (BTLNK) im Freistaat Sachsen (Stand 2005)
- Digitale Stadtkarte Leipzig 1 : 25.000 (DSK 25 ©Stadt Leipzig 2005)
- Digitale Topographische Karte 1 : 25.000 (DTK 25 ©GeoSN 2004; ©GeoLVermGeo 2006)
- Digitales Geländemodell DGM 25 mit 20 m bzw. 25 m Auflösung (DGM 25 ©GeoSN 2010; ©GeoLVermGeo 2010)

Als Anschauungsmaterial (pdf-Dateien) lagen zusätzlich vor:

- Landschaftsplan der Stadt Leipzig, Zielkonzept Klima/Luft (Stand 2009)
- Änderung und Ergänzung des Flächennutzungsplanes – FNP Fortschreibung (Entwurf) (Stand 19.11.2009)

3 Charakterisierung des Untersuchungsraumes

3.1 Naturraum und Flächennutzung

Die Stadt Leipzig liegt im Kern der Halle-Leipziger Tieflandsbucht nördlich der Deutschen Mittelgebirgsschwelle. An die Bucht schließen sich nach Süden das Erzgebirge und der Thüringer Wald, nach Westen der Harz und das Thüringer Becken an. Während des Pleistozäns war das Altmoränengebiet um Leipzig Aufschüttungsgebiet der von Süden kommenden Flüsse, welche sich am nördlich von Leipzig verlaufenden Eisrand der Saaleeiszeit aufstauten und durch die Sedimentation von Bändertonen für die Einebnung des Reliefs verantwortlich waren. Aus der Situation dieser Eisrandlage erklären sich auch die heutigen Talsysteme von Weißer Elster, Pleiße und Parthe und insbesondere die markante Biegung des Elstertales nach Westen zur Saale hin (BREUSTE, 1996). Mit Ausnahme der Talauen ist die Leipziger Tieflandsbucht von einer bis zu 2 m mächtigen Löß-, bzw. Sandlößdecke überzogen, was auf den periglazialen Charakter der Region während des Mittel- und Jungpleistozäns hinweist (LIEDTKE & MARCINEK, 1994).

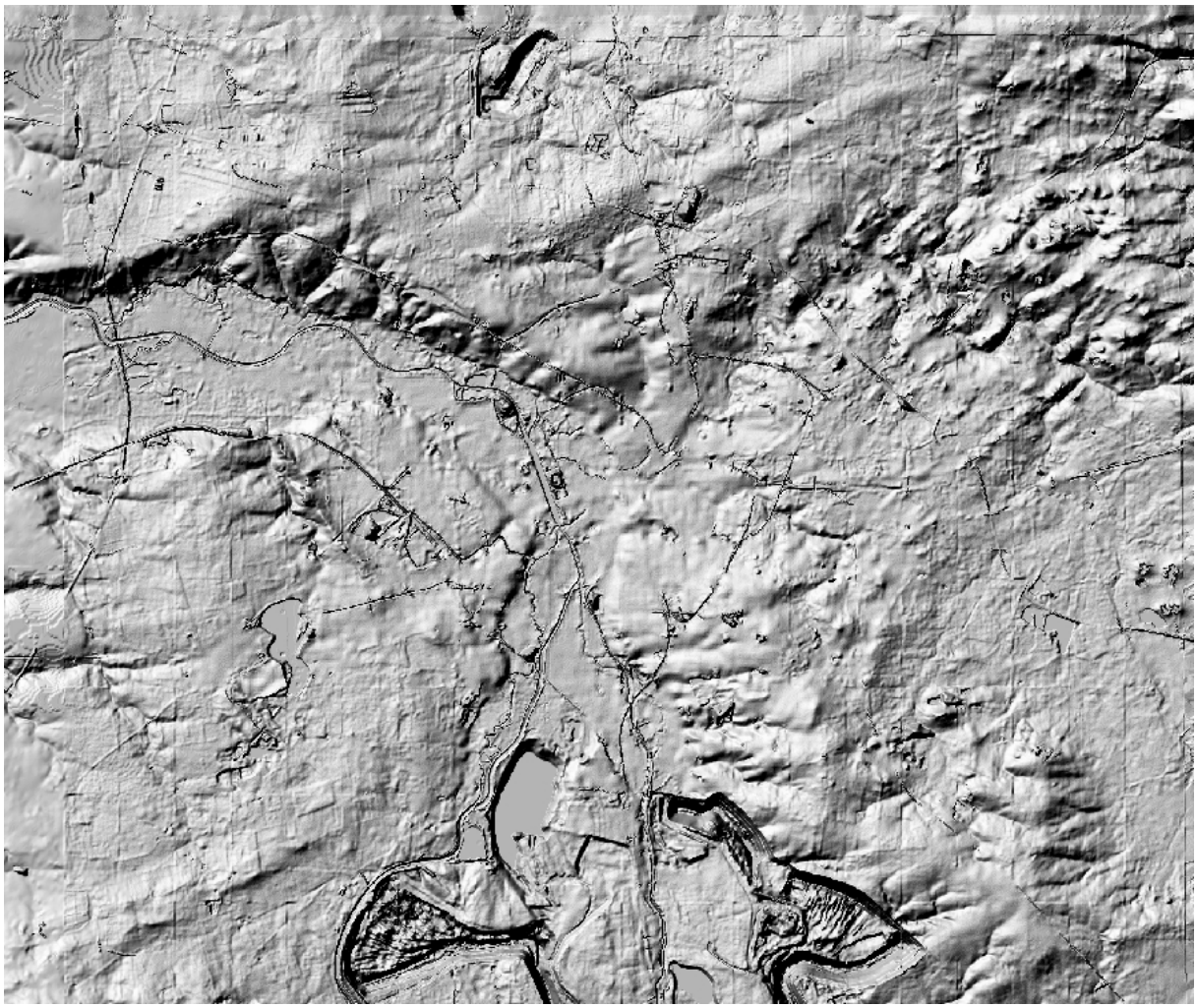


Abb. 2 Überhöhtes Reliefbild von Leipzig und Umgebung (Digitales Geländemodell DGM 25C GeoSN 2010)

Die Topografie von Leipzig und Umgebung ist in Abbildung 2 dargestellt. Die mittlere Höhe des Stadtgebietes liegt bei 118 m ü. NN, niedrigster Punkt ist mit 98 m ü. NN Gundorf (Luppe-Gebiet), höchster Punkt mit 184 m ü. NN die Kippe Liebertwolkwitz im Südosten des Stadtgebietes. Die Stadt besitzt eine Gesamtausdehnung in Nord-Süd-Richtung von ca. 23 km, in Ost-West-Richtung von rund 21 km. Eine natürliche Gliederung erfährt das Leipziger Stadtgebiet durch die weiträumige Elster-Pleiße-Aue, die trotz der unmittelbaren Stadtnähe und der heute fehlenden natürlichen Überflutung noch bedeutende Auwaldreste und naturnahe Landschaftsteile beherbergt. Trotz des Anstiegs von Nordwesten nach Südosten kann Leipzig als Ebene bezeichnet werden, so dass Höheneinflüsse auf Klima und Schadstoffverteilung auszuschließen sind.

Mit Abschluss der Gemeindegebietsreform des Freistaates Sachsen wuchs die Fläche der Stadt im Jahr 2000 ca. auf das Doppelte an und beträgt heute 297 km^2. Die Einwohnerzahl in Leipzig liegt bei 518.862 (Stand 2009, Quelle: Statistisches Jahrbuch Stadt Leipzig 2010). Leipzig ist von einem dichten Ring aus Gemeinden und Städten umgeben, die sowohl baulich als auch strukturell eng mit der eigentlichen Stadt verbunden sind.

Das neue Stadtgebiet von Leipzig zeichnet sich auch durch einen relativ hohen Anteil an Freiflächen aus. So nehmen Landwirtschafts-, Erholungs-, Wald- und Wasserflächen einen Anteil von über 50 % der Gesamtfläche ein (s. Statistisches Jahrbuch, Stadt Leipzig 2010; vgl. auch: Luftreinhalteplan für die Stadt Leipzig, 2009).

3.2 Regionalklima

Unter **Klima** wird entsprechend einer Definition der World Meteorological Organisation (WMO) die für einen Ort oder einen größeren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsvorgänge während eines längeren Zeitraumes in charakteristischer Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Werte verstanden.

Dabei wird das Klima von zahlreichen Faktoren beeinflusst, insbesondere von der geographischen Breite, der Meeresnähe oder -ferne, der Höhe des Gebietes über NN, der Landnutzung und dem Geländerelief.

Leipzig ist makroklimatisch dem Übergangsbereich zwischen kontinentalem und maritimem Klima zuzuordnen. Der jährliche Witterungsverlauf wird im Wesentlichen durch eine rege zyklonale Tätigkeit bestimmt, die recht wechselhaftes Wetter zur Folge hat. So treten Niederschläge zu allen Jahreszeiten auf, ein Maximum ist in den Sommermonaten zu beobachten. Insgesamt ergibt sich ein für den mitteleuropäischen Raum typischer, ausgeprägter Jahresgang der Lufttemperatur mit relativ hohen/tiefen absoluten Maxima/Minima. Der wärmste Monat weist in der Regel Temperaturen von über 17 °C auf, der kälteste Monat liegt im Mittel selten unter der 0 °C-Grenze.

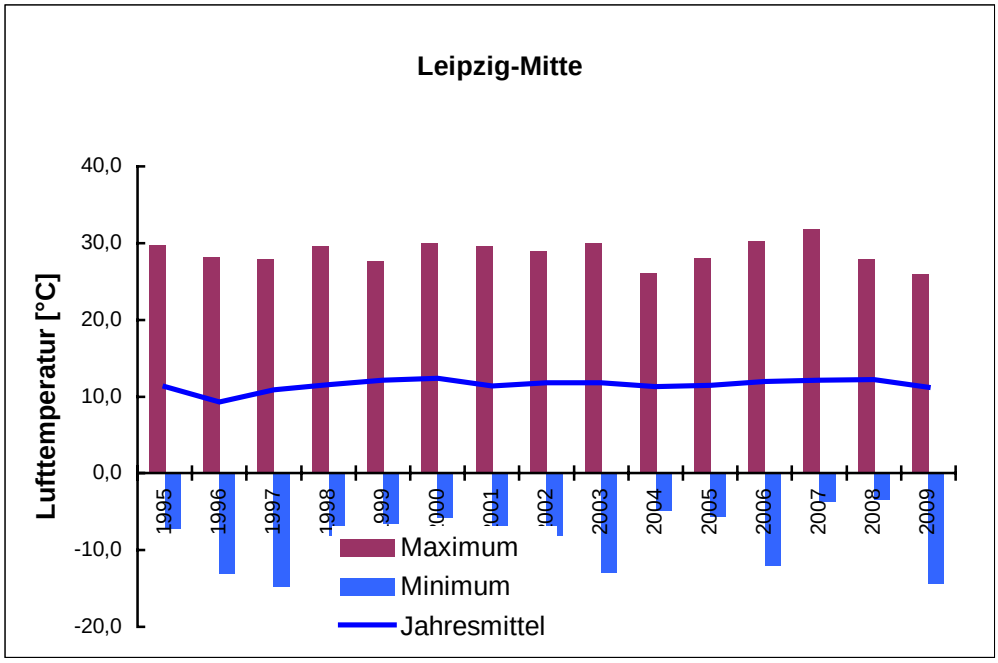
In Tabelle 5 sind die Jahresmitteltemperaturen an den Stationen Leipzig-Mitte und Leipzig-West von 1999 bis 2008 aufgelistet. Aus der zehnjährigen Reihe ergibt sich ein **Jahresmittel von 11,9 °C für Leipzig-Mitte** und **9,8 °C für Leipzig-West**. Leipzig-Mitte steht dabei für eine innerstädtische, verkehrsnahe Messstelle (Verkehrsaufkommen 55.000 Kfz/Tag), Leipzig-West für eine den städtischen Hintergrund repräsentierende Messstelle (Verkehrsaufkommen 10.400 Kfz/Tag).

In der zurückliegenden Stadtklimauntersuchung (Steinicke & Streifeneder, 1998) wurde als repräsentativ für die Stadt Leipzig die langjährige Jahresmitteltemperatur an der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes Leipzig-Schkeuditz aufgeführt, die in der Messperiode 1961-1990 8,6 °C betragen hatte.

Tab. 5 Jahresmittel der Lufttemperatur an den Stationen Leipzig-Mitte und Leipzig-West und mittlere jährliche Temperaturdifferenz (ΔT) im Vergleich.

	Leipzig-Mitte	**Leipzig-West**	$\Delta T_{Mitte - West}$
1999	12,1 °C	10,3 °C	1,8 K
2000	12,4 °C	10,2 °C	2,2 K
2001	11,4 °C	9,3 °C	2,1 K
2002	11,8 °C	9,6 °C	2,2 K
2003	11,8 °C	9,6 °C	2,2 K
2004	11,3 °C	9,1 °C	2,2 K
2005	11,4 °C	9,2 °C	2,2 K
2006	12,0 °C	10,0 °C	2,0 K
2007	12,2 °C	10,3 °C	1,9 K
2008	12,2 °C	10,0 °C	2,2 K
Mittel (1999-2008)	11,9 °C	9,8 °C	2,1 K

Die folgenden Abbildungen 3 zeigen noch einmal den Verlauf der Jahresmitteltemperatur im Zeitraum 1995 bzw. 1996 bis 2009 an den Stationen Leipzig-Mitte und Leipzig-West, wobei hier zusätzlich die jeweils höchsten und tiefsten Tagesmittelwerte des entsprechenden Jahres eingetragen sind.



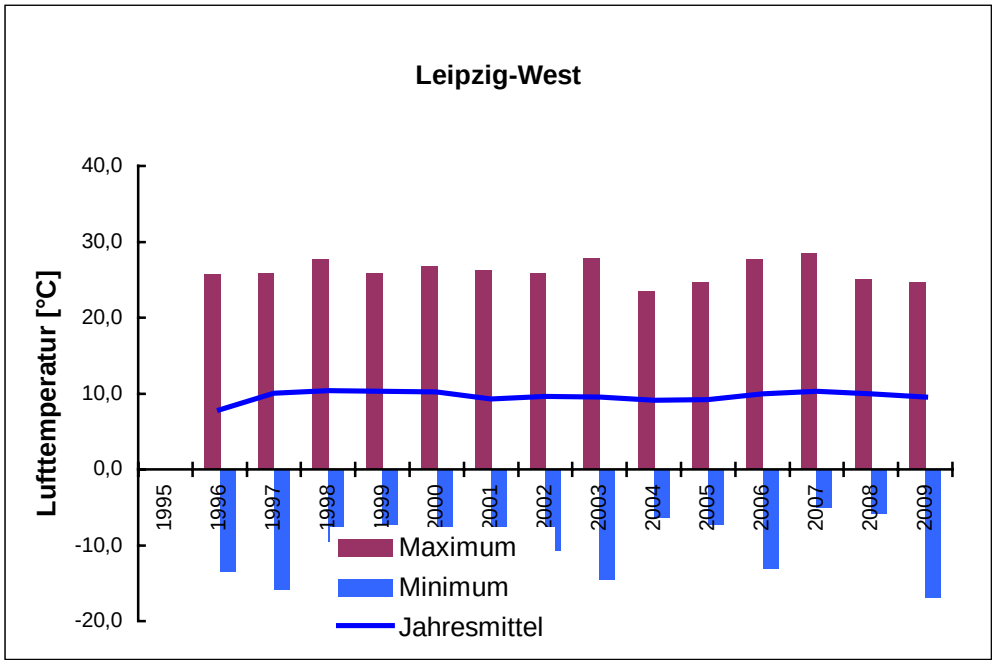
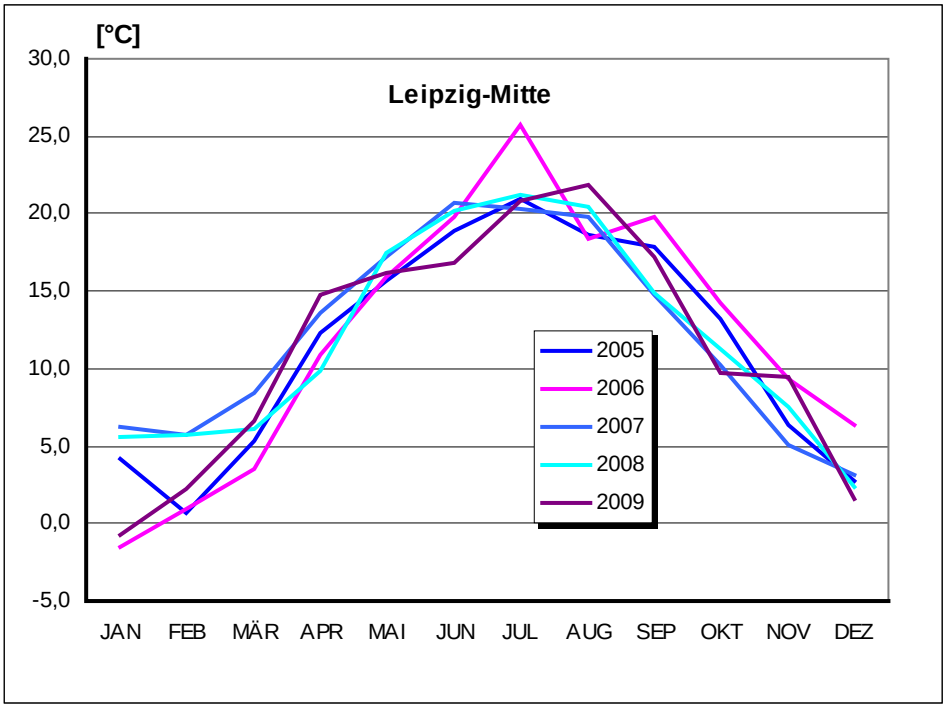


Abb. 3 Jahresmitteltemperaturen und mittlere Tageshöchst- (Maximum) und Tagestiefstwerte (Minimum) an den Stationen Leipzig-Mitte und Leipzig-West in den Jahren 1995 – 2009 (Anmerkung: An der Station Leipzig-Mitte gab es in den Jahren 1995, 1997, 1998, 2008 und 2009 an mehr als 5 Tagen im Jahr Messausfälle.)

Insgesamt zeigt sich der nahezu parallele um ca. 2 K verschobene Temperaturverlauf an beiden Stationen. Die höchsten Tagesmittelwerte liegen an der Station Leipzig-Mitte im Mittel 2,5 K über denen der Station Leipzig-West, die tiefsten Tagesmittelwerte liegen dagegen an der Station Leipzig-West im Mittel 1,7 K unter denen an der Station Leipzig-Mitte.

Abbildung 4 zeigt den mittleren Temperaturverlauf in den Jahren 2005 bis 2009 anhand der berechneten Monatsmittelwerte, wobei auch hier der nahezu parallele Verlauf an beiden Messstationen deutlich wird.



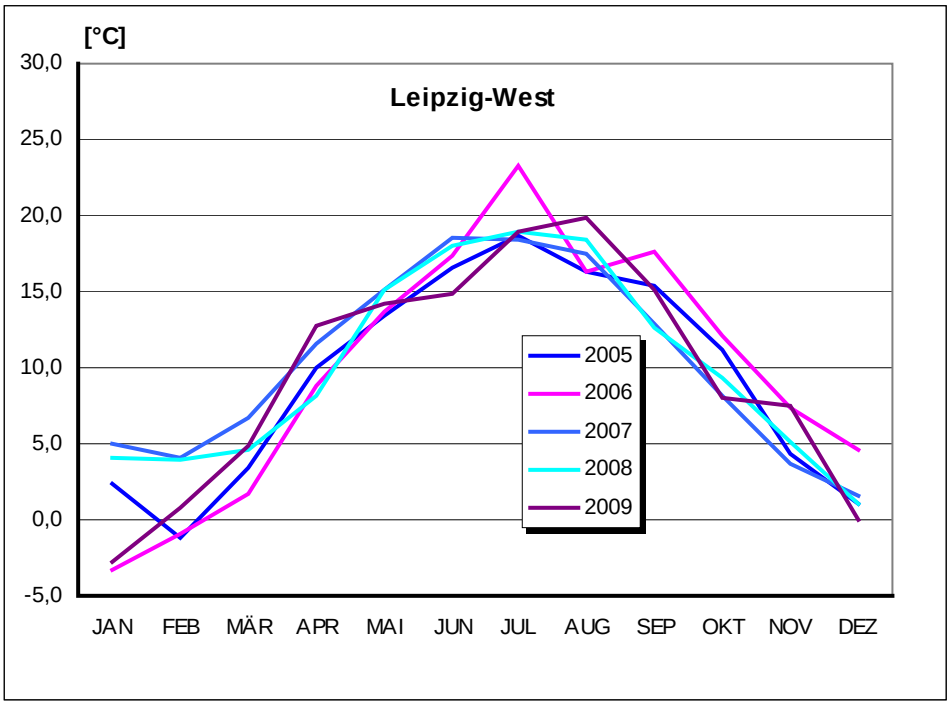


Abb. 4 Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur an den Messstationen Leipzig-Mitte und Leipzig-West in den Jahren 2005-2009

In Abbildung 5 sind beispielhaft für das Jahr 2009 die Monatsmittel der Lufttemperatur für die Stationen Leipzig-Mitte und Leipzig-West, sowie zusätzlich für die Stationen Leipzig-Lützner Straße und Schkeuditz dargestellt. Auch hier zeigt sich der nahezu parallele Temperaturverlauf, die Monatsmittel an der Station Leipzig-Lützner Str. liegen noch etwas über den an der Station Leipzig-Mitte gemessenen, die Station Schkeuditz liegt zwischen den Stationen Leipzig-Mitte und Leipzig-West. Besonders deutlich: in den Sommermonaten wird der Abstand zwischen allen Verlaufslinien größer, in den Wintermonaten wird er kleiner.

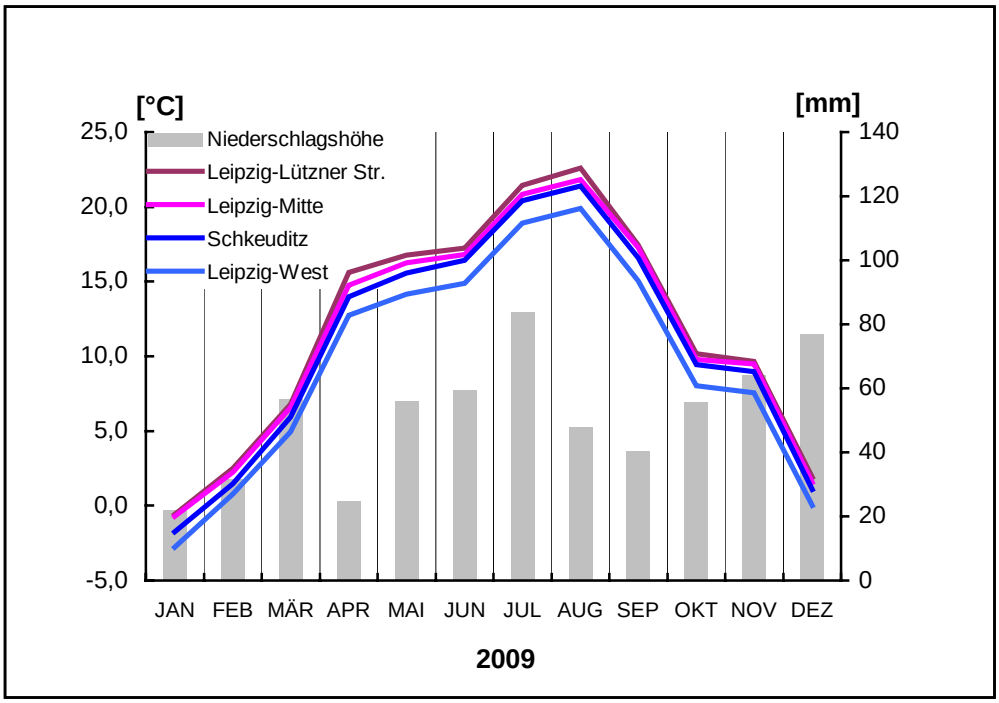
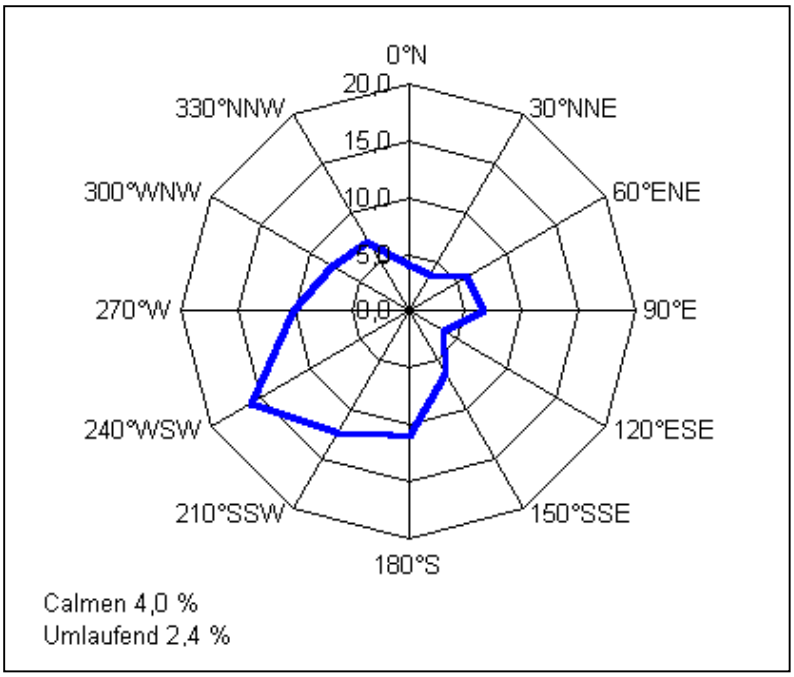


Abb. 5 Monatsmittel der Lufttemperatur 2009 an den Stationen Leipzig-Lützner Straße, Leipzig-Mitte, Leipzig-West und Schkeuditz sowie Monatssummen des Niederschlages gemessen an der Station Schkeuditz. (Die Messstation Leipzig-Lützner Straße befindet sich in einer Straßenschlucht von 19 m Breite und einem Verkehrsaufkommen von 24.200 Kfz/Tag.)

Hinsichtlich der **Windrichtungsverteilung** ergibt sich für Mitteleuropa im Jahresmittel das Vorherrschen von Winden aus südwestlichen bis westlichen Richtungen. Da in Leipzig und seinem Umland keine großen Reliefunterschiede vorkommen, wird das Windfeld topografisch nicht oder bestenfalls nur gering modifiziert. Die relative Häufigkeit der Windrichtungen an der Station Schkeuditz in den Jahren 1980 – 1990 bzw. 2004 – 2009 ist in Abbildung 6 dargestellt. Dabei dominieren Winde aus südwestlichen Richtungen, ein kleineres Maximum liegt bei Winden aus östlichen und nordwestlichen Richtungen. Der Südwest-Einfluss ist offenbar über die Jahre stärker geworden. Der Anteil der Calmen (Windgeschwindigkeit < 0,5 m/s) dürfte dagegen gleich geblieben sein. Wegen der unterschiedlichen Erwärmung und Abkühlung der Erdoberfläche kommt es in besonderen Lagen in diesem Fall zur Ausbildung von lokalen thermischen Ausgleichströmungen („Flurwind“).



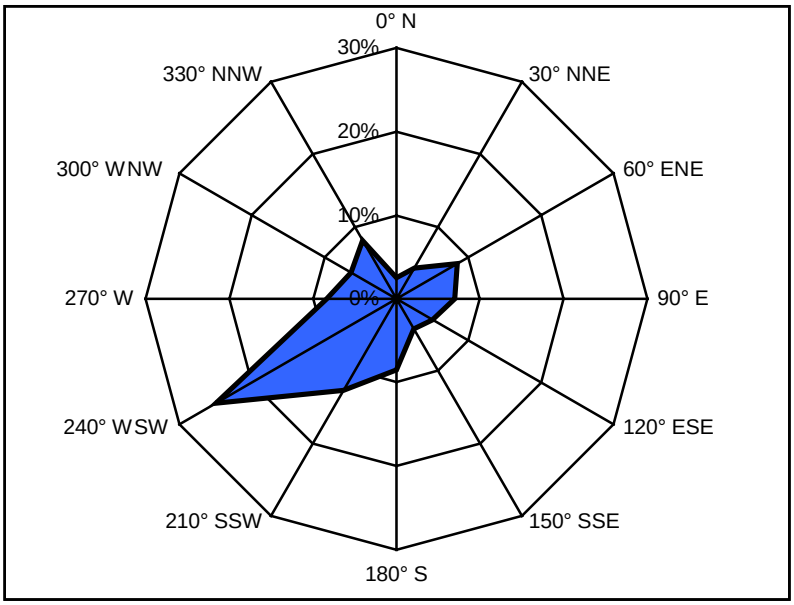


Abb. 6 Windrichtungsverteilung an der Station Schkeuditz. Oben: 1980 – 1990 (DWD Dresden, 1995); unten: 2004 – 2009

In Abbildung 7 sind beispielhaft die relativen Häufigkeiten der Windrichtungen an den Stationen Leipzig-Mitte, Leipzig-West und Schkeuditz für 2008 dargestellt. Auch hier zeigt sich deutlich das Vorherrschen von Winden aus südwestlichen Richtungen, mit einem kleineren Maximum bei Winden aus östlichen Richtungen, jedoch variiert die Windrichtungsverteilung nach Lage und Ausrichtung der jeweiligen Messstation. So zeigt sich für die Station Leipzig-Mitte ein deutliches zweites Maximum für Winde aus E, während sowohl an der Station Leipzig-West als auch Schkeuditz die Winde aus östlicher Richtung einen größeren Sektor umfassen (ENE bis SSE bzw. NNE bis SSE).

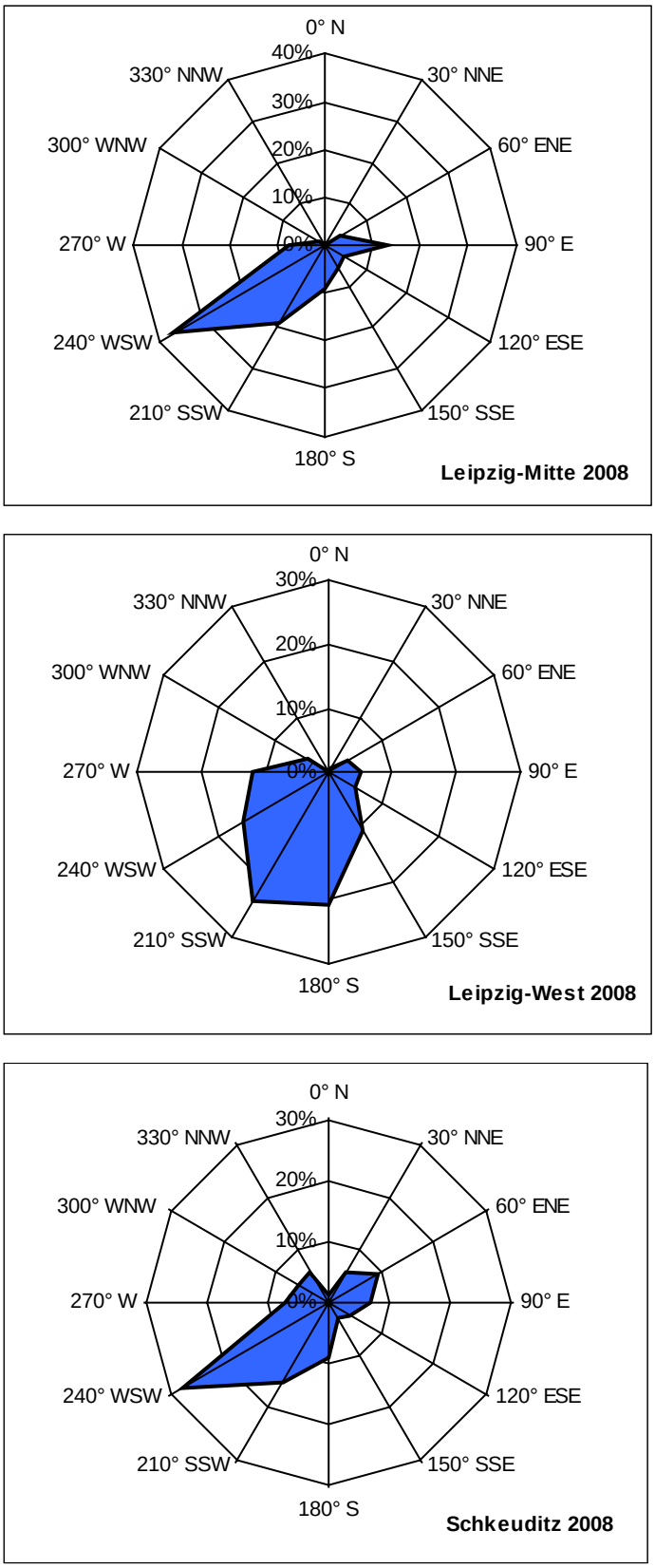


Abb. 7 Relative Häufigkeit der Windrichtungen an den Stationen Leipzig-Mitte, Leipzig-West und Schkeuditz 2008

Was die Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten angeht, so liegen nur Daten für Schkeuditz aus dem Zeitraum 1980-1990 vor (Abbildung 8). Der Mittelwert liegt bei ca. 4 m/s. Die stärkeren Winde kommen aus dem Südwestsektor. Lokalklimatisch bedeutsame Schwachwinde mit Geschwindigkeiten unter 2 m/s treten relativ häufig auf und kommen primär aus dem Ostsektor.

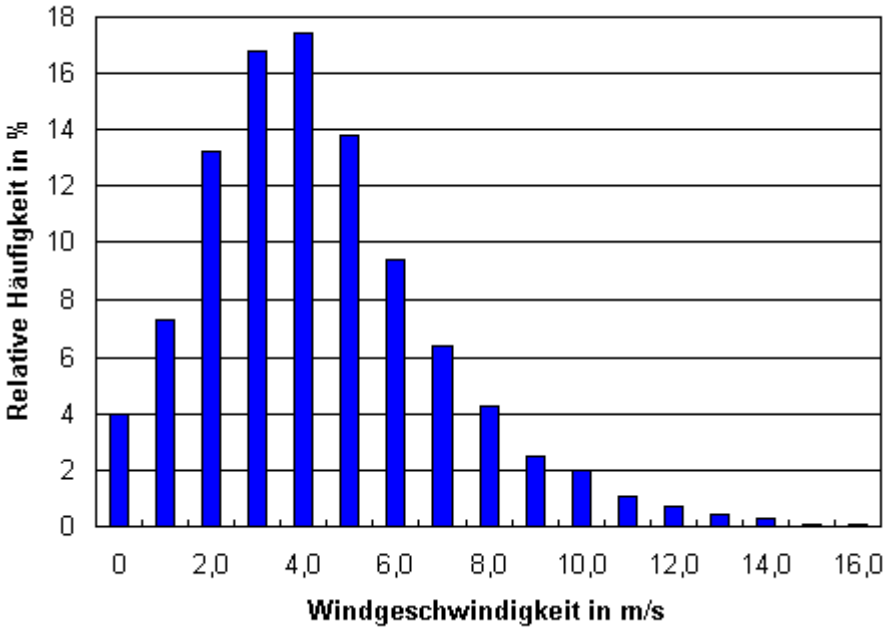


Abb. 8 Relative Häufigkeit der Stundenwerte der Windgeschwindigkeit an der Station Schkeuditz 1980 – 1990 (DWD Dresden, 1995)

Für die lufthygienische Situation (im folgenden Abschnitt behandelt) ist neben der Windgeschwindigkeit und Windrichtung vor allem die Turbulenz der Atmosphäre wichtig. Sie ist bedingt durch thermische Prozesse oder mechanische Störungen des Windfeldes durch Strömungshindernisse, wie z. B. Bauwerke. Die Stärke der Turbulenz (Böigkeit) beschreibt das Auftreten unregelmäßiger Windströmungen in der Atmosphäre.

Eng mit diesem Maß ist die Stabilität der Atmosphäre verknüpft, welche durch die Temperaturschichtung, Windgeschwindigkeit und Richtungsscherungen geprägt wird (VDI-KOMMISSION REINHALTUNG DER LUFT, 1988). Da Turbulenzen schwer bestimmbar sind, bedient man sich ersatzweise des in der TA-Luft beschriebenen Verfahrens von KLUG und MANIER zur Bestimmung der Ausbreitungsklassen, welches neben der Windgeschwindigkeit den Bedeckungsgrad berücksichtigt. Aus Tabelle 6 gehen die Häufigkeit der einzelnen Klassen in Leipzig und die dabei herrschenden Verhältnisse im Vergleich zu anderen Städten in Deutschland hervor. Die stabilen bis neutralen Lagen – mit geringen Windgeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 8) – treten relativ häufig auf. Der für die Schadstoffverdünnung relevante Luftaustausch ist dann eingeschränkt. Die Verhältnisse sind aber besser als in Karlsruhe und Stuttgart.

Tab. 6 Häufigkeit der Ausbreitungsklassen nach KLUG/MANIER (nach REGIERUNGSPRÄSIDIUM LEIPZIG (Hrsg.), 1992)

Klasse	I	II	III/1	III/2	IV	V	VI
Temperatur-schichtung	sehr stabil	stabil	stabil/ neutral	neutral/ labil	labil	sehr labil	unbekannt
Austausch-verhältnisse	extrem schlecht	schlecht	mittel	mittel	gut	sehr gut	meist schlecht
Art der Turbulenz	-	mechanisch	Konvektion/ mechanisch	Konvektion	Konvektion	Konvektion	-
Leipzig	8 %	15 %	55 %	12 %	6 %	3 %	1 %
Karlsruhe	18 %	21 %	35 %	14 %	7 %	4 %	1 %
Stuttgart	23 %	22 %	28 %	14 %	8 %	4 %	1 %
Hamburg	9 %	12 %	56 %	13 %	5 %	3 %	2 %

3.3 Lufthygienische Situation

Zur Einordnung der lufthygienischen Situation in Leipzig können die im Jahresbericht zur Luftqualität in Sachsen (2009) vorliegenden Ergebnisse herangezogen werden. Hinsichtlich der einzelnen Luftschadstoffe im Jahr 2009 ergibt sich dabei zusammengefasst folgendes Bild:

Die **SO_2-Immissionsbelastung** befand sich auch 2009 auf sehr niedrigem Niveau. Grenzwerte wurden überall weit unterschritten.

Die **Ozonkonzentrationen** lagen vor allem in ländlichen Gebieten weiterhin auf hohem Niveau.

Bei den **NO_2-Konzentrationen** war weiterhin kein Rückgang zu beobachten. Der Jahresmittel-Grenzwert von 40 $\mu g/m^3$ wird seit 1995 an zwei Messstellen kontinuierlich überschritten.

Der für **Benzol-Konzentrationen** geltende Jahresmittel-Grenzwert von 5 $\mu g/m^3$ wurde an allen Messstellen weit unterschritten.

Der für **Partikel-Konzentration (PM_{10})** geltende Jahresmittel-Grenzwert von 40 $\mu g/m^3$ wurde nur 2005 an einer Messstelle überschritten. Dagegen gibt es seit 1999 eine kontinuierliche Überschreitung des Tagesmittel-Grenzwerts von 50 $\mu g/m^3$ an mehr als 35 Tagen an mindestens einer Messstelle.

Die Konzentration von **Blei, Cadmium, Arsen** und **Nickel** im Feinstaub lagen unter den relevanten Grenz- und Zielwerten. Der Grenzwert für partikelgebundenes **Benzo(a)pyren** wurde an keiner Messstelle überschritten.

An den kritischen Schadstoffbelastungen ist zu großen Teilen der **Straßenverkehr** beteiligt. So beträgt der Anteil des Straßenverkehrs an der Stickstoffoxidbelastung (NO_x) an der Messstation Leipzig-Lützner Straße 76 %, an der Station Leipzig-Mitte 78 %. An der Belastung mit Feinstaub (PM_{10}) hat der Straßenverkehr an der Station Leipzig-Lützner Straße einen Anteil von 38 %, an der Station Leipzig-Mitte von 32 % (Luftreinhalteplan für die Stadt Leipzig, 2009).

Die im Luftreinhalteplan für die Stadt Leipzig vorgesehenen Maßnahmen zur Minderung der Luftschadstoffbelastung in Leipzig sind daher in erster Linie „auf die Vermeidung, Verringerung oder Optimierung des Straßenverkehrs" ausgerichtet. Die Einführung einer Umweltzone (ab 01.03.2011) stellt dabei eine der wichtigsten Maßnahmen dar.

4 Thermalscanneraufnahmen

4.1 Thermalkarten und Differenzkarte

Die Thermalkarten zeigen flächendeckend die Strahlungstemperatur der Landschaftsoberfläche in der Abend- und Morgensituation. Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist die „Temperatur" eines Pixels zunächst durch einen 8-bit-Wert (Level L) im Bereich zwischen L = 0 und L = 255 kodiert. Anschließend wird jedem Level anhand der aufgezeichneten Referenztemperaturen (Minimum/Maximum) eine Strahlungstemperatur in °C zugeordnet. Dem unteren Level (0) entspricht die Minimaltemperatur und dem oberen Level (255) die Maximaltemperatur. Damit entsteht eine Temperaturskala.

In der Regel überdeckt die Häufigkeitsverteilung der Levelwerte (Histogramm) nicht den gesamten Bereich (es treten beispielsweise nur Werte zwischen 50 und 200 auf). Dann kann das Thermalbild „kontrastverstärkt" werden, in dem man den Bereich 50...200 linear auf 0...255 transformiert (die Temperaturskala wird dann enger). Will man die Abend- und Morgenaufnahme auf eine gemeinsame Temperaturskala anpassen, so wird der Bereich ausgedehnt. Die Temperaturskala wird dann weiter und das Bild erscheint kontrastärmer.

Beides wurde bei den Thermalbildern angewendet. So entstanden (a) angepasste und (b) kontrastverstärkte Daten (siehe Tabelle 7). Im Fall (a) sind die Skalen der Abend- und Morgenaufnahme identisch gewählt, damit ein direkter Vergleich möglich ist. Im Fall (b) sind die Skalen individuell gewählt, so dass die Bilder einen maximalen Kontrast bieten. Bei der Farbcodierung werden 14 Stufen unterschieden, von blau (kalt) bis rot (warm). Erwartungsgemäß erscheint bei dieser Darstellung die Morgensituation aufgrund der nächtlichen Ausstrahlung kühler als die Abendsituation. Eine Ausnahme stellen Wasserflächen dar, deren Temperatur auf hohem Niveau über Nacht praktisch konstant bleibt.

Dies zeigt insbesondere die erstellte Differenzkarte Abend-Morgen. Sie stellt die Temperaturänderung zwischen der Abend- und Morgensituation dar ($\Delta T = T_{abend} - T_{morgen}$; Einheit K = Kelvin). Bei der Temperaturskala werden 14 Stufen unterschieden: von $\Delta T = 0$ K (konstante Temperatur, rot) bis $\Delta T = 16$ K (maximale Abkühlung, blau). Bei der Erstellung von Differenzbildern ist folgendes zu beachten (dies gilt auch für die „Abkühlung" auf der Klassifizierte Thermalkarte): Subtrahiert man zwei Datensätze, die jeweils einen Levelbereich von 0...255 umfassen, so entsteht ein Bereich von –255...+255. Dieser wird anschließend wieder linear auf 0...255 transformiert; aus dem ursprünglichen Level L wird dann $L' = ½ (L+255)$.

Tab. 7 Temperaturskalen der Abend-, Morgen- und Differenzkarte

Bilddaten	Befliegungen	Temperatur bzw. Temperaturdifferenz	Erläuterung
Abend (a)	Abend	5,0 °C – 18,0 °C	14 Farbstufen; gleiche Skalierung wie Morgen
Morgen (a)	Morgen	5,0 °C – 18,0 °C	14 Farbstufen; gleiche Skalierung wie Abend
Abend (b)	Abend	11,7 °C – 17,3 °C	14 Farbstufen (kontrastverstärkt)
Morgen (b)	Morgen	5,9 °C – 16,1 °C	14 Farbstufen (kontrastverstärkt)
Differenz	Abend und Morgen	0,0 K – 16,0 K	14 Farbstufen

Die folgende Tabelle 8 zeigt Beispiele für Flächen, die auf der Abend-/Morgenkarte bzw. auf der Differenzkarte durch eine extreme Temperatur (warm/kalt) bzw. besondere Temperaturdifferenz (konstant/große Abkühlung) auffallen.

Tab. 8 Flächen mit auffälliger Temperatur (warm/kalt) bzw. Temperaturdifferenz (konstant/stark abgekühlt)

Bilddaten	warm / konstant	kalt / stark abgekühlt
Abend	Flugplatz, Tagebauseen, Seen an der A9 bei Kleinliebenau	Freiflächen: nördlich von Liebertwolkwitz, östlich von Quelle, südlich der Weißen Elster im Nordwesten
Morgen	Tagebauseen, Seen an der A9 bei Kleinliebenau	Freiflächen: östlich von Quelle, südlich der Weißen Elster im Nordwesten, westlich der Kleinsiedlung Thomas Müntzer, Elsterstausee (Wasser abgelassen), Große Wiese
Differenz	Tagebauseen, Seen an der A9 bei Kleinliebenau	Freiflächen: westlich der Kleinsiedlung Thomas Müntzer, Bereich „Neue Hardt“

4.2 Klassifizierte Thermalkarte

Grundlagen und Erstellung

In einer windschwachen Strahlungswetterlage zeigen Oberflächen während der nächtlichen Abkühlungsperiode ein charakteristisches, nahezu lineares Abkühlungsverhalten. Sind T_{abend} und T_{morgen} die Temperaturwerte eines Oberflächenelements (Pixel) in der Abend- bzw. Morgenaufnahme, so lässt sich das Oberflächentemperaturverhalten durch die folgenden Parameter beschreiben:

Abkühlung (K = Kelvin) $\Delta T = T_{abend} - T_{morgen}$

mittlere Temperatur (°C) $Tm = ½ (T_{abend} + T_{morgen})$

Bei der Abkühlung müssen die Level (siehe Differenzkarte) transformiert werden. Bei der mittleren Temperatur ist dies nicht der Fall: Zunächst wird aus den Bereichen 0..255 durch Addition 0...510. Durch den Faktor ½ in der Formel für Tm landet man aber wieder bei 0...255; also gilt L' = L.

Auf dieser Beziehung beruht die Erstellung der **Klassifizierten Thermalkarte**, bei der die Bildverbände der Abend- und Morgensituation (2010) digital überlagert und für jedes Bildelement nach obiger Formel die mittlere nächtliche Temperatur und die Abkühlung berechnet werden. Im Idealfall würde sich eine Landschaftsoberfläche gemäß ihrem Typ (Acker, Wiese, Asphaltfläche) verhalten, also charakteristische Werte der mittleren Temperatur und Abkühlung zeigen.

Um die aus den Thermalaufnahmen gewonnenen, individuellen ΔT-Tm-Werte mit den theoretischen Idealwerten vergleichen zu können, muss man die Temperaturwerte korrigieren. Tages- und jahreszeitliche Einflüsse müssen aus den Daten eliminiert werden, so dass in erster Linie die Faktoren Wetterlage und Nutzung das Temperaturbild bestimmen, nicht jedoch der Befliegungstermin. Dies geschieht in Form der sog. standardisierten multitemporalen Klassifikation, gleichbedeutend mit einer festen Einteilung des Oberflächentemperaturverhaltens in verschiedene Klassen. Dabei werden die festen Landschaftsoberflächen durch die 12 Klassen B bis M, Wasserflächen durch die Klasse A beschrieben. Die Abgrenzung ist aber nicht scharf; so gibt es auch Wasserflächen in der Klasse B. Jeder Klasse wird eine bestimmte Farbe zugeordnet (siehe Abbildung 9). Die Farbgebung der Klassen verläuft vertikal mit zunehmenden mittleren Temperaturen von blau über grün und gelb bis rot. Horizontal variiert die Farbintensität mit zunehmender nächtlicher Abkühlung von Dunkel nach Hell.

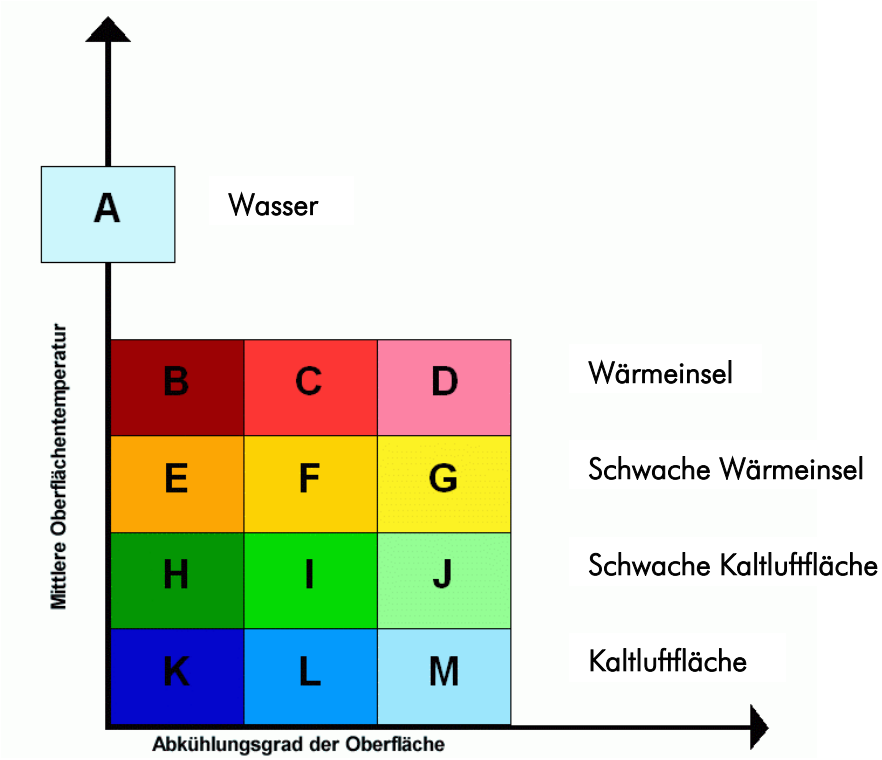


Abb. 9 Standardisierte Klassifikation des Oberflächentemperaturverhaltens (siehe Text).

Bei stark reflektierenden Flächen (mit einem Emissionsvermögen ε, das deutlich kleiner als 1 ist, wie z. B. Metall- oder Glasdächer) liefert die Thermographie keine verlässlichen Werte der Oberflächenstrahlungstemperatur. Die Struktur dieser Flächen ist aber bekannt (z. B. Hallendächer in Gewerbegebieten), so dass Fehlinterpretationen weitgehend ausgeschlossen sind. Solche, nicht-klassifizierte Pixel sind auf der Klassifizierten Thermalkarte weiß dargestellt.

Bei der Interpretation von Thermalbildern ist weiterhin zu berücksichtigen, dass der Scanner stets nur die äußerste Schicht der Landschaftsoberfläche aufnimmt, also solche Punkte, die dem Detektor am nächsten sind. So kann er nicht in einen dichten Wald hineinschauen sondern detektiert ausschließlich das Kronendach. Es gibt also kein einheitliches „Scanniveau". Bildelemente von Straßen- und Dachflächen liegen z. B. unmittelbar nebeneinander. Auch enthält ein Bildelement bei einer Auflösung von 5 m in der Regel die Strahlungsinformation verschiedener Materialen („Mischpixel"), was Übergänge zwischen verschiedenen Nutzungen unscharf erscheinen lässt. Möglich ist auch eine Mischung von Vertikalflächen.

Thermische Eigenschaften der wichtigsten Landnutzungen

Der Zusammenhang zwischen Nutzung und thermischem Verhalten ist komplex. Es gibt keine eindeutige Korrelation zwischen den auf der Klassifizierten Thermalkarte dargestellten Klassen (A bis M) und der Realnutzung. Die Streuung ist groß, wie die folgende Tabelle 9 zeigt. Mit insgesamt 42,5 % Anteil sind schwache Kaltluftflächen (H, I, J) am häufigsten vertreten, gefolgt von schwachen Wärmeinseln (E, F, G) mit 24,5 %. Kaltluftflächen (K, L, M) haben einen Anteil von 16,2 % und Wärmeinseln (B, C, D) von 12,1 %. Schließlich fallen 3,2 % der Bildpunkte in die „Wasserklasse" A.

Ebenfalls finden sich auf der Klassifizierten Thermalkarte viele Beispiele mit räumlich abrupter Änderung des Oberflächentemperaturverhaltens insbesondere innerhalb der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Grund hierfür sind aneinander grenzende unterschiedliche Nutzungsarten mit unterschiedlichen Fruchtfolge-, Vegetations- und Erntezyklen. Da ein horizontaler Temperaturausgleich über Bodenwärmeströme zwischen verschieden genutzten Flächen kaum stattfindet, hat jede Nutzung ihre eigene Temperatur. Gelegentlich kann es aber zu Abkühlungs- oder Erwärmungseffekten von Oberflächen kommen, wenn sie von entsprechenden Luftströmungen überstrichen werden. Beispiele sind Kaltluftabflüsse oder thermische Ausgleichströmungen im ebenen Gelände („Flurwind").

Tab. 9 Bedeutung der Klassen in der Klassifizierten Thermalkarte (vgl. Abbildung 9)

Kl	Farbe	Anteil (%)	Typ	Vorkommen / Beispiele
A	Sehr helles Blau	3,2	Wasser	Größere Wasserflächen, z. B. Tagebauseen im Norden, Westen und Süden; Elsterkanal
B	Dunkelrot	3,2	Wärmeinsel	Straßen in der Innenstadt, große asphaltierte Flächen, kleinere Gewässer, Uferbereiche; Teilbereiche von dichten Waldflächen (z. B. Lindenthaler Tannenwald)
C	Rot	8,9	Wärmeinsel	Straßen in Siedlungen; asphaltierte Flächen; Autobahnen (z. B. A14); größere Waldflächen; Deponien
D	Hellrot	1,4	Wärmeinsel	Straßen und Autobahnen; große asphaltierte Flächen (Flugplatz);
E	Dunkles Gelb	8,5	Schwache Wärmeinsel	Äußere Zone von Straßen-, Wegen- und Gewässerrändern; Landwirtschaftliche Fläche mit dichtem Bewuchs (z. B. im Nordraum);
F	Gelb	15,4	Schwache Wärmeinsel	Siedlungsflächen; innerstädtische Parks und sonstige baumbestandene Freiflächen (Friedhöhe, Kleingärten); Straßen in locker bebauten Gebieten; Gleisanlagen (z. B. Hauptbahnhof, Güterbahnhof)
G	Helles Gelb	0,6	Schwache Wärmeinsel	Gleise (z. B. am Bahnhof Wiederitzsch oder an der B6); Straßen in relativ unbebautem Gebiet
H	Dunkelgrün	23,6	Schwache Kaltluftfläche	Landwirtschaftsflächen (gesamtes Umland), meist mit dichterem Bewuchs
I	Grün	17,4	Schwache Kaltluftfläche	Landwirtschaftsflächen (gesamtes Umland), meist mit weniger dichtem Bewuchs
J	Hellgrün	1,5	Schwache Kaltluftfläche	Gleise (z. B. am S-Bahnhaltepunkt Großstädteln); ungeflutete Tagebauflächen
K	Dunkelbau	10,3	Kaltluftfläche	Feuchte Acker- und Wiesenflächen (West- und Ostraum); Elsterhochflutbett; Ufer der Weißen Elster (Westen)
L	Blau	5,6	Kaltluftfläche	Acker- und Wiesenflächen (z. B. östl. von Holzhausen; Rennbahn)
M	Hellblau	0,3	Kaltluftfläche	ungeflutete Tagebauflächen (Südraum)

Im Folgenden wird das thermische Verhalten einiger besonderer Nutzungen beschrieben.

<u>Gewässer</u>

- Wasser besitzt eine extrem hohe Wärmekapazität (Wärmespeichervermögen). Bis seine Temperatur um 1 K ansteigt kann es drei- bis zehnmal soviel Wärme aufnehmen wie das gleiche Volumen Erdboden.
- Daraus resultiert ein ausgeglichener Temperaturgang, d. h. Schwankungen zwischen Tag und Nacht und auch zwischen den Jahreszeiten sind bei Wasserflächen sehr viel kleiner als beim festen Boden. Beispiele sind die aufgefüllten Tagebaulöcher im Norden, Westen und Süden von Leipzig.

- Seen und Flüsse erscheinen an heißen Sommertagen tagsüber kühler als das viel stärker erhitzte Land; in der Nacht ist es umgekehrt.
- Auf der Klassifizierten Thermalkarte fallen die meisten Wasserflächen in die Klasse A (sehr helles Blau). Sie ist charakterisiert durch sehr hohe mittlere Temperatur und sehr geringe Abkühlung. Besonders im Uferbereich großer Wasserflächen oder bei Flüssen und Teichen kann es zu Überschneidungen mit der Klasse B (hohe mittlere Temperatur, geringe Abkühlung) kommen. Bei Fließgewässern kommt es zu einer starken Vermischung und damit stärkerer Abkühlung. Wasserflächen in den Klassen B und C sind nicht mit Wärmeinseln zu verwechseln.

Landwirtschaftsflächen

- Die Energieumsätze bleiben auf die oberste Bodenschicht beschränkt, d. h. die Bodenoberfläche erhitzt sich rasch und kühlt auch rasch wieder aus. Unbewachsener Boden ist somit recht hohen Temperaturschwankungen unterworfen.
- Wie groß die Schwankungen sind, hängt im Wesentlichen von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens ab. Diese wiederum wird von der Bodenart, der Bodenfeuchte und dem Luftgehalt des Bodens bestimmt.
- Neben den Bodeneigenschaften hat die Vegetationsdecke einen großen Einfluss auf das thermische Verhalten von Landwirtschaftsflächen. So wird bewachsenem Boden tagsüber wesentlich weniger Wärme zugeführt als unbewachsenem, d. h. Wiesen und mit Ackerfrüchten bestandene Felder sind sowohl tagsüber als auch nachts kühler als nackter Boden und insbesondere Wiesen kühlen nach Sonnenuntergang sehr rasch aus. Hier spielt auch Feuchte eine Rolle (Verdunstungskälte). Ein dichter Bestand kann dagegen die Wärme sehr gut speichern und erscheint nachts wärmer als eine abgeerntete Fläche.
- Landwirtschaftliche Nutzflächen fallen in die Klassen K, L und M (Blautöne), wenn es sich um unbewachsene, zum Teil feuchte Freiflächen handelt. Am häufigsten treten die Klassen H, I und J (Grüntöne) auf. Bei relativ dichtem Bestand, wie in einem Maisfeld, sind sogar D, E und F (Gelbtöne) möglich. Hier wird viel Wärme gespeichert, die nachts von der obersten Schicht abgestrahlt wird. Beispiele für solche Flächen finden sich in der gesamten Peripherie von Leipzig. Wie eingangs erwähnt, sind Flurgrenzen scharf abgebildet, wie etwa zwischen grünen und gelben Flächen nördlich der A14 oder zwischen blauen und grünen Flächen östlich der Stadt.

Waldflächen

- Wälder stellen – abhängig von der Bestandsdichte – die höchste und dichteste Form einer Vegetationsdecke dar. Wie bei einer Wiese oder einem Weizenfeld findet auch hier der Energieumsatz nicht am Boden, sondern an der Oberfläche der Vegetation, also am Kronendach statt.
- Im Stammraum herrscht ein eigenes „Binnenklima" oder Bestandsklima mit ausgeglichenem Temperaturgang. Im Waldinneren ist es an einem Sommertag tagsüber kühler und nachts wärmer als im Umland.

- Wälder erscheinen auf Thermalaufnahmen meist relativ warm und fallen in die Klassen B und C. Sie sind jedoch keinesfalls mit Wärmeinseln gleichzusetzen. Ursache dafür ist, dass die am Kronendach abgekühlten Luftmassen in den Stammraum sinken und von dort durch wärmere, aufsteigende Luftmassen ersetzt werden. Daher bleibt die Waldoberfläche relativ warm und nur diese kann der Scanner vom Flugzeug aus einsehen, der Stammraum bleibt ihm verborgen!
- Auch Flächengröße, Höhe und Dichte des Bestands, sowie Zusammensetzung und Vitalität der Baumarten beeinflussen das Erscheinungsbild von Wäldern auf Thermalaufnahmen. Ein dichtes und damit warmes Waldgebiet ist z. B. der Lindenthaler Tannenwald südlich der Autobahn A14. Auch spielt die Feuchtigkeit eine Rolle. In einem feuchten Waldgebiet (z. B. Auwald) wird zusätzlich Wärme gespeichert; das Ratsholz südlich der Innenstadt ist ein Beispiel.

Straßen und Gleisanlagen

- Straßen und sonstige asphaltierte Flächen gehören an einem heißen Sommertag sowohl tags als auch nachts zu den wärmsten Landoberflächen. Besonders in dicht bebauten Gebieten bleiben die Straßen die ganze Nacht hindurch relativ warm und erscheinen daher auf der Klassifizierten Thermalkarte als rote Bänder in den Klassen B und C (z. B. der Innenstadtring); im Freiland kühlen sie etwas stärker ab, das gilt auch für größere Flächen wie der Flugplatz (Klasse D); einige fallen sogar in die Klassen E und F (z. B. die B6 nordwestlich der Stadt).
- Gleisanlagen heizen sich tagsüber an der Oberfläche stark auf, kühlen aber wesentlich rascher aus als Straßen. Grund hierfür ist die im Schotterkörper eingeschlossene Luft, durch die Wärme schlechter weitergeleitet und gespeichert wird als bei Asphalt. Auf der Klassifizierten Thermalkarte erscheinen daher Gleisanlagen häufig in den „gelben" Klassen E und F. Beispiele hierfür sind die zum Hauptbahnhof führenden Gleise oder das Areal des Güterbahnhofs.

Wohngebiete

- Bei bebauten Flächen hängt das Thermalbild stark von der Dichte, Höhe und Anordnung der Häuser, von der Durchgrünung und der Lage der Fläche ab (Stadtzentrum oder Rand).
- Das thermische Spektrum reicht von der extremen Wärmeinsel (Innenstadt, Zentrum von Grünau) bis zu kaum wahrnehmbaren Veränderungen gegenüber dem Freiland (Gundorf, Burghausen). Dementsprechend unterschiedlich ist auch die Kennzeichnung auf der Klassifizierten Thermalkarte: sichtbar durch „rote" bis hin zu „gelben" und sogar „grünen" Klassen. Charakteristisches Merkmal sind die Straßenzüge, die meist gelb erscheinende Siedlungen als rote Adern durchziehen. Im dichtbebauten Gebiet wirkt der „Canyon-Effekt": In der Straßenschlucht wird viel Wärme gespeichert, die nachts aufgrund des reduzierten Himmelsauschnitts („skyview") nicht effektiv ausgestrahlt werden kann. Dies ist die Ursache für das dichte „Rot" in der Innenstadt.

Gewerbe- und Industriegebiete

- Für Gewerbe- und Industriegebiete gilt prinzipiell das Gleiche wie für die Wohngebiete. Allerdings sind hier die thermischen Strukturen etwas flächiger als in den eher linear geprägten Siedlungen, weil sich größere versiegelte Bereiche (in „roten" Klassen B und C) mit unversiegelten Bereichen abwechseln. Beispiele sind die Areale von Quelle und BMW.
- Charakteristisch für das Erscheinungsbild von Gewerbe- und Industriegebieten auf Thermalaufnahmen ist außerdem das Vorkommen von rechteckigen weißen Flächen. Dabei handelt es sich um Hallendächer mit reflektierenden Eigenschaften, z. B. aus Metall oder Glas. Solche Dächer spiegeln die Kälte des Nachthimmels wieder, so dass die Thermographie in diesen Fällen keine verlässlichen Werte der Strahlungstemperatur liefert. Ein Beispiel findet sich im Güterverkehrszentrum südlich der A14.

4.3 Differenzkarten 1997 und 2010 der Abend- und Morgensituation

Im Jahr 1997 wurde, wie bereits erwähnt, ebenfalls eine Thermalscannerbefliegung der Stadt Leipzig durchgeführt (mit kleinerem Aufnahmegebiet von 24 km x 22 km aber gleicher räumlicher Auflösung von 5 m). Um Unterschiede zur heutigen Situation (2010) deutlich zu machen, wurden Differenzkarten zwischen den jeweiligen Abend- bzw. Morgensituationen erstellt. Dazu mussten die Daten von 1997 neu aufbereitet werden.

Generell weisen Differenzkarten stets Ungenauigkeiten auf, die sowohl geometrische als auch radiometrische Ursachen haben. Einerseits ist bei Thermalscannerdaten niemals eine pixelgenaue Entzerrung möglich, so dass an der Grenze benachbarter Nutzungen Grauwertdifferenzen zwischen verschiedenen Objekten gebildet werden, andererseits lässt sich eine exakte radiometrische Anpassung zweier Aufnahmen nicht erreichen. Die Differenzkarten zeigen daher im Wesentlichen großflächige Veränderungen der Thermalstruktur an, punktuelle Aussagen sind aufgrund der genannten Ungenauigkeiten nur eingeschränkt möglich.

Die Temperaturskalen der Abendaufnahmen von 1997 und 2010 sind zunächst unterschiedlich (gleiches gilt für die Morgenaufnahmen). Um eine sinnvolle Differenz zu erstellen, müssen die Skalen zunächst in Übereinstimmung gebracht werden. Dies geschieht durch Anpassung der jeweiligen Histogramme (Häufigkeitsverteilung der Temperaturwerte) und deren maximale und minimale Temperaturwerte. Dieser Prozess erzeugt „symmetrische" Temperaturskalen für die Differenz $\Delta T = T_{1997} - T_{2010}$. Unveränderte Flächen liegen folglich bei Differenzen um $\Delta T = 0$ K (Kelvin). Obwohl die exakte Fixierung eines „Nullpunkts" technisch nicht machbar ist, lassen sich die wesentlichen Trends (relative Erwärmung/Abkühlung) erkennen.

Die Ergebnisse sind in der Differenzkarte Abend 1997-2010 und der Differenzkarte Morgen 1997-2010 dargestellt. Die Temperaturskalen sind so gewählt, dass ein optimaler Kontrast entsteht (Tabelle 10). Positive Werte von ΔT bedeuten, dass der Zustand im Jahr 1997 wärmer war als 2010 (die Fläche erscheint 2010 also kühler; Darstellung in grünen und blauen Farbtönen). Bei negativen Werten von ΔT war der Zustand im Jahr 1997 kühler als 2010 (die Fläche erscheint 2010 also wärmer; Darstellung in gelben und roten Farbtönen). Differenzen um 0 K sind hellgrau dargestellt. Dies sind alle Flächen deren Temperatur nahezu gleich geblieben ist. Die Form der Karten ist eine Folge des kleineren Untersuchungsgebiets 1997.

Tab. 10 Temperaturskalen der Differenzkarten Abend 1997-2010 und Morgen 1997-2010

Differenzkarte	**Befliegungen**	**Temperaturskala (ΔT)**	**Farbkodierung**
Abend 1997-2010	Abendaufnahmen 1997 und 2010	-5,5 K – +5,5 K	6 Farbstufen für $\Delta T < 0$ 1 Graustufe für $\Delta T \approx 0$ 6 Farbstufen für $\Delta T > 0$
Morgen 1997-2010	Morgenaufnahmen 1997 und 2010	-8,8 K – +8,8 K	6 Farbstufen für $\Delta T < 0$ 1 Graustufe für $\Delta T \approx 0$ 6 Farbstufen für $\Delta T > 0$

Die Differenzkarten zeigen Veränderungen der Nutzung und ihr Einfluss auf das Oberflächentemperaturverhalten und damit auf das Mikroklima. Dies betrifft vor allem Industrie-/Gewerbegebiete, Wohngebiete, Straßen, Wasserflächen und Landwirtschaftsflächen. Wie dies zu bewerten ist, wird in Kapitel 7 diskutiert.

Große bauliche Veränderungen haben in den vergangenen 13 Jahren vor allem in den Randbezirken der Stadt und den Umlandgemeinden stattgefunden. Durch Industrie- und Gewerbegebiete, wie etwa die Areale von BMW und Porsche oder der stark erweiterte bzw. umgestaltete Flughafen Leipzig-Halle, sind neue Wärmeinseln entstanden. Gerade im Nordraum von Leipzig sind damit wichtige Kaltluftflächen verloren gegangen. Auch sind einige neue Wohngebiete und Straßen entstanden. Ebenfalls große Unterschiede zeigen sich bei den Tagebauarealen. Einige waren 1997 noch tiefe Mulden und sind mittlerweile geflutet, andere Wasserflächen sind größer geworden, was Änderungen im Uferbereich bewirkt. Hierbei wurde Landschaftsoberfläche mit geringer Wärmekapazität (starke Abkühlung) durch Wasser mit hoher Wärmekapazität (geringe Abkühlung) ersetzt. Die Flächen erscheinen folglich heute deutlich wärmer.

Viele landwirtschaftliche Flächen unterscheiden sich natürlich auch im Bewuchs. Wenn etwa ein Maisfeld im Jahr 1997 abgeerntet war und dies bei jetzigen Befliegung nicht der Fall war, so erscheint es nun wärmer.

Die folgende Aufstellung zeigt Beispiele für Gebiete, die 2010 in der Abend- bzw. Morgensituation wärmer erscheinen (rot) als auf den entsprechenden Karten von 1997:

- Flugplatz Leipzig-Halle
- Porsche-Areal
- BMW-Areal
- neue Siedlung am Fuchsberg
- S1 nördlich der Sternsiedlung Nord
- landwirtschaftliche Nutzflächen an der A14
- NSG nördlich vom Cospudener See
- geflutete Tagebauareale (Zwenkauer See, Markkleeberger See, Störmthaler See, Schladitzer See) oder Erweiterungen (Cospudener See)

Insgesamt sind die Fälle mit Erwärmung deutlich häufiger. Das markanteste Beispiel für ein 2010 kühleres Areal ist der Elsterstausee. Die frühere Wasserfläche ist heute eine feuchte Niederung. Verdunstungskälte und Kaltluftsammlung sorgen für relativ niedrige Temperaturen. Ein weniger stark ausgeprägtes Beispiel: die „grünen" Freiflächen (Abend 1997 – 2010) am Saale-Elster-Kanal nördlich von Gundorf.

5 Klimafunktionskarte

Die Klimafunktionskarte gibt die lokal- und regionalklimatischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet flächendeckend und weitgehend wertfrei wieder. Kartengrundlage bildet die Klassifizierte Thermalkarte in Überlagerung mit der Topographischen Karte. Auf ihr werden verschiedene thermische (= den Temperaturhaushalt betreffende) und dynamische (= die Strömungsverhältnisse betreffende) Kategorien dargestellt. Die Aussagen zur thermischen Komponente basieren dabei im wesentlichen auf den klassifizierten Oberflächentemperaturen (vgl. Tabelle 9), den Nutzungsstrukturen und vorhandenen Klimadaten. Die dynamische Komponente des Klimas wird aus der Synthese der topographischen Verhältnisse (Relief), der Bodenrauhigkeit und der verfügbaren meteorologischen Daten abgeleitet.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Klimafunktionskarte in erster Linie die Verhältnisse während autochthoner Wetterlagen, also windschwacher, austauscharmer Hochdruckwetterlagen wiedergibt, bei denen sich lokalklimatische Phänomene am deutlichsten ausprägen. Weiter ist anzumerken, dass es sich bei den in der Klimafunktionskarte dargestellten Abgrenzungen nicht um flächen- bzw. parzellenscharfe Abgrenzungen handelt. Da Vorgänge in der unteren Atmosphäre betrachtet werden, sind die Übergänge – im Gegensatz zur Oberflächentemperatur – fließend und besonders zu den Rändern der Fläche hin ergeben sich bereits Einflüsse der angrenzenden Nachbarflächen. Ebenso besitzen die dargestellten Pfeilsymbole „symbolhaften" Charakter, d. h. aus ihrer Lage und Größe auf der Karte lassen sich keine exakten quantitativen Angaben (z. B. zu Reichweite oder Mächtigkeit der Strömungen) ableiten.

5.1 Überwärmungsbereiche

Intensiver städtischer Überwärmungsbereich (Innenstadtklima)

Das Innenstadtklima zeigt die stärksten Veränderungen der Klimaelemente gegenüber dem Freiland: stark erhöhte Temperaturen, sehr geringe nächtliche Abkühlung, geringe relative Feuchte und starke Einschränkung der Durchlüftung bei gleichzeitiger Böigkeit des Windes. Ursachen dafür sind die hochverdichtete Bebauung mit hohem Versiegelungsgrad und geringem Grünflächenanteil. Ein weiteres wichtiges Kennzeichen ist die hohe lufthygienische Belastung, wobei als Hauptemissionsquelle der Straßenverkehr zu nennen ist, gewerbliche/industrielle Nutzungen und Hausbrand spielen ebenso eine Rolle. Unter „Innenstadtklima" fallen also nicht nur die dicht bebauten innerstädtischen Bereich sondern auch größere Gewerbe- und Industriegebiete (die meisten liegen im Nordraum von Leipzig). Letztere erscheinen im Thermalbild etwas anders als Wohngebiete.

Im Thermalbild dominieren die rot dargestellten Klassen, die die stark überwärmten, anthropogen überprägten Flächen charakterisieren. Deutlich wird, dass die stärkste Erwärmung durch die hochgradig versiegelten und geteerten Flächen hervorgerufen wird. Das Innenstadtklima ist insgesamt als stark belastend für den Menschen einzustufen. Beispiele sind die Innenstadt, Plagwitz, Schönau, die Neue Messe, die Areale von Quelle, Porsche und BMW sowie das Paunsdorf-Center.

Gemäßigter städtischer Überwärmungsbereich (Stadtklima)

Die Klimaeigenschaften von Gebieten dieser Kategorie liegen zwischen den intensiven städtischen Überwärmungsbereichen und den nur geringfügig überwärmten Randbezirken. Die immer noch deutlich geringere nächtliche Abkühlung im Vergleich zum Freilandklima findet ihre Ursachen in einem noch relativ hohen Versiegelungsgrad, den eingeschränkten Be- und Entlüftungsmöglichkeiten und der nicht ausreichenden Durchgrünung. Problematisch sind auch hier die entstehenden Emissionen mit den gleichen Quellen wie beim Innenstadtklima. Im Thermalbild sind neben den roten nun auch die gelben Klassen stark vertreten, Straßenzüge und versiegelte Plätze erscheinen als rote Bänder. Die Strukturen sind hier etwas flächiger, weil sich größere versiegelte Komplexe mit unversiegelten Bereichen abwechseln. Insgesamt müssen dem Klimaraum lufthygienisch und klimatisch belastende Eigenschaften zugeschrieben werden. Beispiele sind Mockau, Gohlis, Connewitz, Rackwitz, Schkeuditz oder Teile von Markkleeberg

Geringfügig überwärmter Peripheriebereich des städtischen Raums (Stadtrand- und Siedlungsklima)

Das Stadtrand- und Siedlungsklima weist ebenfalls eine Veränderung der Klimaelemente im Vergleich zum Freiland auf. Die relativ lockere Bebauung, ein geringer Versiegelungsgrad und die gute Durchgrünung wirken jedoch einer stärkeren Überwärmung entgegen und unterstützen die Durchlüftung. Die schwache bis mäßige lufthygienische Belastung stammt in erster Linie vom Straßenverkehr und vom Hausbrand. Insgesamt besitzt das Stadtrand- und Siedlungsklima für den Menschen günstige Eigenschaften. Beispiele sind Wiederitzsch, Meusdorf oder Großpösna.

5.2 Kaltluftgebiete

Darunter sind überwiegend land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen sowie größere innerstädtische Grünflächen zu verstehen, über denen sich aufgrund der nächtlichen Ausstrahlung die darüber liegenden Luftschichten stark abkühlen, so dass es zur Bildung einer bodennahen Kaltluftschicht kommt. Je nach Beschaffenheit des Entstehungsgebietes (Neigung, Lage, Bewuchs) bleibt die kühle Luft auf der Fläche liegen oder sie setzt sich aufgrund der Schwerkraft dem Gefälle folgend in Bewegung. Über die für das Abfließen der Kaltluft nötige Neigung gibt es recht unterschiedliche Angaben mit Werten zwischen 0,5 °C und 1 °C (ca. 1 bis 2,2 %) und einem Wert von 2 °C (ca. 3,5 %). Einigkeit besteht jedoch darin, dass neben der Neigung die Rauhigkeit des Untergrundes eine wichtige Rolle in Bezug auf die Abflussmöglichkeiten spielt.

Umstritten ist auch die Funktion von Wäldern im Hinblick auf Kaltluftproduktion und Kaltluftabfluss (GERTH 1986, HAUF u. WITTE 1985, NOACK 1986, PARLOW 1983). So reichen die Angaben zur Kaltluftproduktivität eines Waldes von 0,6 $m^3/(m^2h)$ bis weit über 20 $m^3/(m^2h)$. Bei Wäldern ist die Hauptenergieumsatzfläche nicht der Erdboden, sondern das Kronendach. Die dort durch nächtliche Ausstrahlung abgekühlten Luftmassen sinken in den Stammraum und werden dort zum Teil wieder erwärmt. Dies ist nach einer älteren Untersuchung von BAUMGARTNER (zit. aus GERTH, 1986) der Grund für die im Vergleich zu Freiflächen geringe Kaltluftproduktionsrate von Wäldern. GOSSMANN dagegen (zit. aus PARLOW, 1983) sieht eben diesen Kreislauf als Ursache für die kontinuierliche Kaltluftproduktion von Wäldern. Aus demselben Grund erscheinen Wälder auf der Thermalkarte meist in den gelben oder sogar in den roten, also relativ warmen Klassen, da der Scanner nur den Kronenbereich abtastet und nicht die Verhältnisse im Stammraum wiedergibt. Auch das Relief spielt für das Erscheinungsbild von Wäldern auf Thermalaufnahmen eine Rolle. So erscheinen Wälder an Hängen meist wärmer als in ebenen Lagen oder gar in Flussauen.

Ungeklärt ist zudem, ob bzw. in welchem Maße die kühlen Luftmassen aus dem Stammraum abfließen können oder ob der Abfluss hauptsächlich oberhalb des Kronendaches stattfindet. So kamen z. B. HAUF und WITTE (1985) in ihrer Fallstudie zu dem Ergebnis, dass der Kronenraum für den Kaltluftabfluss ein Strömungshindernis darstellt, während der lichte Stammraum relativ ungehindert durchströmt werden kann. Andere Untersuchungen erbrachten dagegen Hinweise darauf, dass der Kaltluftabfluss vorwiegend oberhalb des Kronendaches erfolgt, weil dort ein stärkeres Geschwindigkeitsmaximum gefunden wurde als im Stammraum (FINKE u. LÖBEL, zit. aus KRdL 1993). PARLOW (1983) hat bei Messungen im Gelände festgestellt, dass sich der Kaltluftabfluss an bewaldeten Hängen in erster Linie im Bereich von Hohlformen, also Tälern und Mulden vollzieht und weniger als flächiger Abfluss über den gesamten Hang. Auch wenn die Abflussvorgänge noch nicht vollständig geklärt sind, so hat sich in jüngerer Zeit doch die Ansicht durchgesetzt, dass bewaldete Hänge sehr effektive Kaltluftproduzenten sind, weil sie erstens ein größeres Kaltluftvolumen produzieren als Freiflächen und weil sie zweitens durch die zeitliche Verzögerung des Kaltluftabflusses auch tagsüber noch zu einer Abkühlung der Umgebung beitragen können. Lediglich in Bezug auf die Temperatur sind Freiflächen die "besseren" Kaltluftproduzenten, d. h. über Freiflächen kühlt die Luft stärker ab als über Wäldern. In bestimmten Fällen können Wälder aber auch Strömungshindernisse für Kaltluftabflüsse darstellen, z. B. wenn ein dichter Waldstreifen ein ansonsten unbewaldetes Tal quert.

Die Bedeutung der Kaltluft in ihrer Wirkung für den Menschen muss differenziert betrachtet werden. Fließen saubere Kaltluftmassen in ein überwärmtes Stadtgebiet ein, so bringen sie Abkühlung und frische Luft, sie sind also thermisch und lufthygienisch als günstig zu beurteilen. Nimmt die Luft auf ihrem Weg in die Stadt Schadstoffe auf, so wirkt sie zwar immer noch kühlend, trägt aber nicht mehr zur Verbesserung der Luftqualität bei. Sammelt sich die kalte Luft in Mulden und Talauen, so ist sie sowohl thermisch als auch lufthygienisch als ungünstig zu bewerten: es kommt zu erhöhter Frost- und Nebelbildung und durch die stabile Schichtung zur Anreicherung von Luftschadstoffen, sofern Emittenten im Sammelgebiet liegen.

Kaltluftgebiete mit guten bis sehr guten Kaltluftentstehungsbedingungen

Hierzu zählen sowohl landwirtschaftlich genutzte Flächen als auch Waldflächen. Auf der Klassifizierten Thermalkarte erscheinen sie in den grünen und blauen, z. T. auch in den gelben Farben, Waldflächen werden zumeist in den gelben oder roten Klassen wiedergegeben (siehe oben).

Landwirtschaftsflächen

Landwirtschaftlich genutzte Flächen zeigen einen stark ausgeprägten Tagesgang von Temperatur und Feuchte. Wie groß die Temperaturschwankungen sind, hängt dabei im Wesentlichen von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens ab, die wiederum von der Bodenart, der Bodenfeuchte und dem Luftgehalt des Bodens bestimmt wird. So leitet z. B. Lehm besser als Sand oder Torf, nasser Boden besser als trockener Boden und verdichteter Boden besser als lockerer. Je größer die Wärmeleitfähigkeit des Bodens, umso kleiner sind die Temperaturschwankungen an der Bodenoberfläche und umgekehrt.

Neben den Bodeneigenschaften hat das Vorhandensein einer Vegetationsdecke großen Einfluss auf das thermische Verhalten von Landwirtschaftsflächen. Da Pflanzenbestände im Allgemeinen ein lockeres Gefüge mit hohem Luftanteil besitzen, sind sie ausgesprochen schlechte Wärmeleiter und können auch selbst kaum Wärme aufnehmen. Damit wird bewachsenem Boden wesentlich weniger Wärme zugeführt als unbewachsenem. Wiesen und mit Ackerfrüchten bestandene Felder sind daher sowohl tagsüber als auch nachts kühler als nackter Boden. Insbesondere Wiesen kühlen nach Sonnenuntergang sehr rasch aus, was sich häufig in der Entstehung von Nebelschwaden bemerkbar macht. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Feuchtigkeit, denn durch Verdunstung wird dem Boden Wärme entzogen, so dass er stärker abkühlt (Verdunstungskälte). Insgesamt lässt sich folgern, dass eine Fläche umso kälter ist, je höher auf der Klassifizierten Thermalkarte der Anteil an den blauen Farben ist, was sowohl ein Indiz für intensive Kaltluftbildung als auch für Kaltluftsammlung sein kann. So kann es in relativen Tieflagen zu Kaltluftsammlung mit intensiver nächtlicher Abkühlung und der Ausbildung von Bodeninversionen kommen. Beispiele für besonders kühle Freiflächen (blau) finden sich in der Niederung der Weißen Elster südlich von Schkeuditz (Feuchte, z. T. mit Kaltluftsammlung), östlich der Neuen Messe, östlich bzw. südöstlich von Holzhausen oder östlich von Lützen. Mäßig kühle Freiflächen (grün) liegen etwa um Priesteblich nördlich Markranstädt oder an der B87 im Nordosten. Warme Freiflächen (gelb) mit relativ dichtem Bestand findet man z. B. nördlich der A14 oder westlich von Markkleeberg.

Waldflächen

Wälder stellen die höchste und dichteste Form einer Vegetationsdecke dar. Wie erwähnt findet auch hier der Energieumsatz nicht mehr am Boden, sondern an der Oberfläche der Vegetation, also am Kronendach statt. Im Stammraum kommt es zur Ausbildung eines eigenen „Binnenklimas" oder Bestandesklima. Wichtigstes Merkmal dieses Bestandsklimas ist - ähnlich wie beim Wasser - der ausgeglichene Temperaturgang. Im Waldinneren ist es an einem Sommertag tagsüber kühler und nachts wärmer als im Umland.

Weitere Unterschiede zum Freiland sind die stark reduzierte Windgeschwindigkeit, die höhere relative Luftfeuchte und die höhere Verdunstung. Auch in Bezug auf die Lufthygiene nehmen Wälder eine Sonderstellung ein. So sind sie in der Lage, feste und flüssige Schmutzstoffe aus der Atmosphäre zu filtern. Die Rauhigkeit der Waldoberfläche verursacht zudem eine stärkere Durchmischung der Luft, so dass die gesamte Konzentration an Luftschadstoffen in der bodennahen Luftschicht herabgesetzt wird. Insgesamt besitzen Wälder eine hohe klimatische Gunstfunktion für den Menschen. Beispiele finden sich am Saale-Elster-Kanal, im Landschaftsschutzgebiet Leipziger Ratsholz, südöstlich des Cospudener Sees oder die markante Dreiecksfläche des Lindenthaler Tannenwalds.

Kaltluftgebiete mit mäßigen bis guten Kaltluftentstehungsbedingungen

In diese Kategorie fallen sowohl die innerstädtischen Freiflächen, wie Parks, Friedhöfe und Sportanlagen, als auch die in Leipzig einen recht hohen Flächenanteil einnehmenden Kleingartenanlagen.

Je nach Anteil an höherer Vegetation findet sich ein mehr oder weniger stark ausgeprägter Tagesgang der Temperatur und Feuchte sowie unterschiedlich gute nächtliche Kaltluftproduktion. In Abhängigkeit von ihrer Ausdehnung und Lage erfüllen innerstädtische Freiflächen sowohl klimatische und lufthygienische, als auch weitere ökologischen Funktionen im städtischen Umfeld, die allerdings häufig durch unterschiedliche Nutzungen (Erholungsnutzug, Verkehrswege und -anlagen, Randbebauung) belastet sind (KRdL, 1993). Die klimatische Wirksamkeit von Freiflächen ist im Wesentlichen von ihrer Größe, den Reliefbedingungen und der Vegetationsstruktur aber auch von der Dichte und Durchlässigkeit der Randbebauung abhängig. Beispiele finden sich bei Lindenthal, bei Möckern, die Große Wiese am Zoo oder die Rennbahn Scheibenholz.

5.3 Sonstige klimarelevante Flächen

Wasserflächen

Freie Wasserflächen unterscheiden sich in ihrem thermischen Verhalten deutlich vom Erdboden. Wichtigstes Kennzeichen ist ihr ausgeglichener Temperaturgang, d. h. die Schwankungen zwischen Tag und Nacht und auch zwischen den Jahreszeiten sind sehr viel kleiner als beim festen Boden. Verantwortlich dafür sind die folgenden drei physikalischen Besonderheiten von Wasser:

- Kurzwellige Strahlung kann - besonders bei klaren Gewässern - bis in große Tiefen vordringen und bleibt nicht auf die Oberfläche beschränkt.
- Wasser kann durch Strömungen und Wind durchmischt werden, so dass die aufgenommene Energie auf ein größeres Volumen verteilt wird.
- Wasser besitzt ein extrem hohes Wärmespeichervermögen. So kann Wasser drei- bis zehnmal soviel Wärme aufnehmen wie das gleiche Volumen Erdboden, bis seine Temperatur um 1 K ansteigt (HÄCKEL, 1990).

Die Folge dieser Eigenschaften ist, dass Seen und Flüsse an heißen Sommertagen kühler sind als das viel stärker erhitzte Land, in der Nacht jedoch wärmer. Auf der Klassifizierten Thermalkarte, die ja das nächtliche Oberflächentemperaturverhalten darstellt, sind Wasserflächen somit die wärmsten Oberflächen und fallen damit meist in die Klasse A (sehr helles Blau). Bei niedrigerer Temperatur (z. B. Fließgewässer mit guter Durchmischung oder kleinere Gewässer mit geringer Wassertiefe und erhöhter Trübung) kommen auch die roten Klassen vor. Wasserflächen können aber auch durch ihre geringe Rauhigkeit zum ungestörten Lufttransport beitragen (Durchlüftung). Beispiele sind der Kulkwitzer und Cospudener See im Luv der Stadt. Weitere Beispiele für klimarelevante Wasserflächen sind in Kapitel 4 genannt.

Verkehrsanlagen

Größere Gleisanlagen, wie die Areale des Haupt- und Güterbahnhofs, zeichnen sich durch intensive Überwärmung am Tage, im Gegensatz zu Straßen und versiegelten Flächen aber auch durch rasche Abkühlung in den Nachtstunden aus. Auf der Thermalkarte erscheinen sie daher meist in den gelben Farben, im Umland sind Bahngleise auf Thermalaufnahmen oft kaum noch zu erkennen (vgl. Kapitel 4). Aufgrund ihrer geringen Rauhigkeit erleichtern Bahnanlagen den Luftaustausch und übernehmen daher, abhängig von ihrer Lage und Ausrichtung, häufig die Funktion von Luftleitbahnen.

Auf größeren Flugplätzen kommt es durch großflächige Versiegelungen zu deutlichen Veränderungen der Klimaelemente gegenüber dem Freiland und zur Ausbildung lokaler Wärmeinseln im meist unbebauten Umland. Deutlich zu erkennen ist auf der Klimafunktionskarte der nördlich von Schkeuditz gelegene Flughafen Leipzig-Halle mit großflächig versiegelten Bereichen, Start- und Landebahnen, die auf der Klassifizierten Thermalkarte in den roten Klassen erscheinen, und den dazwischenliegenden Freiflächen, die in hellen bis dunklen Grüntönen wiedergegeben werden.

Sonderflächen

Sonderflächen wie Abbauflächen, Halden und Deponien können kleinräumig mit speziellen klimatologisch-lufthygienischen Auswirkungen verbunden sein. Aufgrund ihrer veränderten Oberflächenform und -beschaffenheit haben sie häufig Einfluss auf die Wind- und Ausbreitungsverhältnisse in ihrer Umgebung, sowie auf weitere Klimaelemente wie Temperatur, Feuchte, Niederschlag und Sonnenscheindauer. Bei Abbauflächen spielt auch die Staubauswehung eine wesentliche Rolle. Beispiele sind die (ehemaligen) Deponien Seehausen, Liebertwolkwitz, Cröbern oder Möckern.

5.4 Strömungsparameter

Luftleitbahnen

Mit Luftleitbahnen werden Strukturen bezeichnet, die den Luftaustausch innerhalb der Stadt begünstigen. Voraussetzungen sind geringe Bodenrauhigkeit, ausreichende Länge und Breite sowie ein möglichst geradliniger Verlauf der Strömungsbahnen.

Als Faustregel für die Breite der Bahn wird eine Mindestbreite von der zehnfachen Höhe der Randbebauung genannt (KRdL, 1988), andere Quellen fordern eine Mindestbreite von 50 m und eine Mindestlänge in einer Richtung von 1000 m (MAYER, BECKRÖGE u. MATZARAKIS, 1994). Wichtige Merkmale sind außerdem ihre Richtungsgebung durch vorhandene Strukturen und der Zusammenhang mit der Windrichtungsverteilung. Als Beispiele sind Grünflächen mit niedrigem Bewuchs, Wasserflächen, mehrgleisige Bahnanlagen und größere Straßen zu nennen.

Die Kanalisierung der Luftströmungen ist in starkem Maße von den jeweiligen Strömungsrichtungen der Wetterlagen abhängig. Während windschwacher Hochdruckwetterlagen dienen die Luftleitbahnen als potentielle Einströmschneisen für lokale thermische Ausgleichströmungen. Bei stärkerem Wind werden Flächen mit geringer Rauhigkeit frei überströmt; bei engeren Luftleitbahnen (Straßen in bebautem Gebiet) kann es zu Kanalisierungen (Düseneffekte) kommen. Die Luftgüte wird dabei zunächst nicht betrachtet, d. h. die transportierten Luftmassen können sowohl belastet (z. B. bei Straßen) als auch unbelastet sein (z. B. bei Grünflächen). Eine Differenzierung in belastete und unbelastete Luftleitbahnen erfolgt im Rahmen der Bewertungskarte Klima/Luft. Die effektivsten Luftleitbahnen im Untersuchungsgebiet sind solche, die an der Hauptwindrichtung (SW-Sektor) orientiert sind; hier kommen höhere Windgeschwindigkeiten vor. Beispiele für Luftleitbahnen: Bahntrasse durch Grünau, Bahntrassen zum Hauptbahnhof und Bayerischen Bahnhof, Güterbahnhöfe Mockau, Leutzsch, Paunsdorf und Stötteritz, Bahnhof Plagwitz, B181 durch Lindenau, B87 durch Schönefeld, Pleiße und parallele Bahnlinie östlich des Markkleeberger Sees, Elsterbecken mit Elsterflutbett und Elsterhochflutbett.

Flächen mit Durchlüftungsfunktion (nicht dargestellt)

Im Gegensatz zu den Luftleitbahnen, welche die Luft kanalisieren, handelt es sich hier um breitere Strukturen. Sie sind charakterisiert durch geringe Rauhigkeit, grobe Ausrichtung nach der Windrichtung (Haupt- bzw. Nebenmaximum) und Bezug zu einem Wirkungsraum (Stadt). Da dies auf viele Freiflächen in der Peripherie von Leipzig zutrifft, ist diese Klimafunktion auf der Karte nicht explizit dargestellt (die vielen erforderlichen Pfeile gingen zu Lasten der Übersicht). Die wichtigsten Flächen mit Durchlüftungsfunktion sind:

- nördlich des Saale-Elster-Kanals (Lage: nordwestlich der Stadt, Orientierung W-O),
- nordwestlich des Kulkwitzer Sees (Lage: westlich der Stadt, Orientierung: W-O),
- südöstlich des Cospudener Sees (Lage: südlich der Stadt, Orientierung: S-N),
- nördlich des Störmthaler Sees (Lage: südöstlich der Stadt, Orientierung: SO-NW),
- östlich der B 186 bei Baalsdorf (Lage: östlich der Stadt, Orientierung: O-W).

Die Flächen zeigen wie „grüne Finger“ auf die Stadt und sorgen bei stärkerem Wind (aus dem Südwestsektor) bzw. Schwachwind (Ostsektor) für die Frischluftversorgung der Stadt.

In ca. 4 % der Jahresstunden treten Calmen auf, definiert durch eine Windgeschwindigkeit < 0,5 m/s (siehe Abb. 6). In diesem Fall ist die Durchlüftung allein bedingt durch thermische Ausgleichsströmungen („Flurwind"). Warme Luft steigt über der erhitzten Stadt auf (Wärmeinsel) und saugt so kühlere Luft aus dem Umland an. Dabei entstehen nur geringe Luftbewegungen, deren Nachweis sehr schwierig ist. Die hier genannten Flächen sind für diese Zirkulation von besonderer Bedeutung. Sie sind effektive Kaltluftproduzenten und grenzen unmittelbar an die städtische Wärmeinsel.

Kanalisierte Kaltluftabflüsse (funktionsfähig/verzögert)

In vom Relief vorgegebenen Strukturen (Täler, Rinnen) kommt es zur Ausbildung von Hang- bzw. Berg-Tal-Wind-Zirkulationen mit talaufwärtiger Strömung am Tage und talabwärtiger Strömung in der Nacht. Von Bedeutung sind hier vor allem die nächtlichen hang- bzw. talabwärtigen Strömungen, mit denen Kaltluft ins Stadtgebiet gelangt. Volumen und Geschwindigkeit der Ströme sind abhängig von der Beschaffenheit des Entstehungsgebietes (Größe, Nutzungsart) und der Abflussbahn (Querschnitt, Rauhigkeit, Gefälle). Die Qualität des Kaltluftstromes hängt davon ab, ob sich in seinem Einzugsgebiet bzw. in seiner Abflussbahn Emittenten befinden. Eine Differenzierung in belastete und unbelastete Kaltluftabflüsse erfolgt im Rahmen der Bewertungskarte Klima/Luft. Durch natürliche oder künstliche Hindernisse wie z. B. Verengung des Talquerschnittes, Pflanzriegel, Dämme oder Bebauung wird der Kaltluftstrom abgebremst. Dadurch wird die Reichweite der Kaltluftmassen eingeschränkt, bei Wärmezufuhr infolge von Bebauung verlieren sie mehr oder weniger schnell ihre Kühlwirkung. Neben der Erhöhung der Bodenrauhigkeit kann auch geringes Gefälle oder ein stark gewundener Talverlauf den Kaltluftabfluss verzögern.

Aufgrund des sehr geringen Gefälles zwischen 0,4 und 1,6 % ist im Untersuchungsgebiet trotz guten Kaltluftentstehungsbedingungen im Umland von Leipzig nicht von der Entstehung stadtklimatisch relevanter Kaltluftströme auszugehen. Allerdings spielen auch andere Faktoren, wie die Größe des Einzugsgebietes, die Rauhigkeit und die Breite der Abflussbahn eine Rolle. Auf der Klimafunktionskarte sind nur wenige potentielle Kaltluftströme ausgewiesen; Gefälle, Ausdehnung und Kaltluftvolumen sind gering. Beispiele: Freifläche bei Lützschena-Stahmeln, Landschaftsschutzgebiet östlich von Lössnig, Freifläche nordwestlich Kleinsiedlung Mockau (verzögert), Freifläche nördlich Siedlung Goldene Höhe (verzögert).

Strömungsbarrieren

Kompakte Bebauung, dichte Gehölzbestände oder Dämme führen zur Unterbrechung oder Verzögerung von Luftströmungen und zum Luftstau. In erster Linie betrifft dies Schwachwindsituationen, bei denen der Horizontalaustausch eingeschränkt und durch Barrierewirkung zusätzlich mehr oder weniger unterbunden wird. Auch thermische Überhitzung (z. B. von Straßen oder Bahnanlagen) kann zu einem Barriere-Effekt führen (GESAMTHOCHSCHULE KASSEL, 1991). Hier sei noch auf die Ambivalenz bestimmter Strukturen hingewiesen: so kann eine breite geradlinige Straße oder eine Bahnlinie die Funktion einer Luftleitbahn erfüllen und gleichzeitig eine thermische und/oder dynamische Barriere für Kaltluftströme darstellen (siehe Beispiele für verzögerte Kaltluftabflüsse im letzten Abschnitt).

6 Bewertungskarte Klima/Luft

Die Bewertungskarte Klima/Luft verknüpft die klimatische Ist-Situation, basierend auf der Klimafunktionskarte, mit den lufthygienischen Verhältnissen. Im Gegensatz zur weitgehend wertfreien Darstellung auf der Klimafunktionskarte werden auf der Bewertungskarte die Frei- und Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer klimatisch-lufthygienischen Ausgleichsfunktion bzw. ihrer Empfindlichkeit gegenüber Eingriffen in mehrere Klassen eingeteilt. Kaltluftabflüsse und Luftleitbahnen werden differenziert in weitgehend unbelastete und schadstoffbelastete Kaltluftabflüsse bzw. Luftleitbahnen. Dargestellt sind außerdem Vorbelastungen wie z. B. Großemittenten und Hauptverkehrsstraßen. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich auch bei den in der Bewertungskarte dargestellten Abgrenzungen nicht um flächen- bzw. parzellenscharfe Abgrenzungen handelt. Da Vorgänge in der unteren Atmosphäre betrachtet werden, sind die Übergänge fließend und besonders zu den Rändern der Fläche hin ergeben sich bereits Einflüsse der angrenzenden Nachbarflächen. Die Bewertungskarte bildet auch die Grundlage für Planungshinweise, insbesondere im Fall von Konfliktsituationen. Es geht dabei nicht um konkrete Planungen sondern um allgemeine Aussagen vor dem Hintergrund der Stadtentwicklung. Hierzu wird auf das Kapitel 7 verwiesen.

6.1 Freiflächen

Entscheidend für die Einstufung der Freiflächen als Flächen mit mittlerer, hoher oder sehr hoher klimatisch-lufthygienischer Ausgleichsfunktion ist zum einen ihre Kaltluftproduktivität, zum anderen ihr Bezug zum Siedlungsraum. Kaltluftentstehungsgebiete und -abflussbahnen, Luftleitbahnen und Wälder mit direktem Bezug zum Siedlungsraum fallen in die Kategorie hoch und sehr hoch, wobei die Bedeutung mit zunehmender Belastung des Wirkungsraumes ansteigt. Anders ausgedrückt: Freiflächen, die als Kalt- bzw. Frischluftlieferanten für mäßig bis hoch belastete Siedlungsgebiete dienen, erhalten eine höhere Bewertungsstufe als Flächen, die in Wechselwirkung mit gering belasteten Siedlungen stehen. Alle „Flächen mit Durchlüftungsfunktion“ (siehe Abschnitt 5.4) fallen in die Kategorie hoch und sehr hoch. Sie sind zuständig für den Transport kühler, frischer Luft in die innerstädtischen Siedlungsbereiche. Dies gilt für die gesamte Palette der Windsituationen, vom stärkeren Westwind über den schwächeren Ostwind bis hin zum lokalen Flurwind (bei Calmen).

Zusammenhängende Waldflächen werden im von Landwirtschaftsflächen geprägten Untersuchungsraum aufgrund ihrer hohen klimatischen Gunstfunktion und der lufthygienischen Bedeutung (Filterfunktion) zumeist ebenfalls in die Kategorie sehr hoch eingeordnet und zwar unabhängig vom Siedlungsbezug. Beispiele sind die Gebiete entlang des Saale-Elster-Kanals, das Leipziger Ratsholz oder der Lindenthaler Tannenwald. Waldflächen sollten generell nicht angetastet werden.

Bei den sonstigen Freiflächen mit sehr hoher Ausgleichsfunktion ist eine Bebauung nur in Ausnahmefällen möglich. Hier ist eine strenge Prüfung der lokalen klimatisch-lufthygienischen Gegebenheiten erforderlich. Freiflächen mit sehr hoher Ausgleichsfunktion befinden sich hauptsächlich in der unmittelbaren Peripherie der Stadt. Von besonderer Bedeutung sind z. B. die Gebiete südlich der A14 und westlich von Grünau. Erstere bieten einen klimatischen Ausgleich zu den bereits bestehenden Gewerbe- und Industriegebieten im Leipziger Norden und sorgen für eine Verdünnung der Luftschadstoffe, z. B. durch die A14. Letztere liegen im Luv der Stadt und versorgen sie effektiv mit Kalt- und Frischluft. Sie wirken sowohl als Kaltluftproduzenten wie auch im Sinne der regionalen Durchlüftung (als frei überströmbare Flächen).

In die Kategorie mit mittlerer Bedeutung fallen Kaltluftentstehungsgebiete, Kaltluftabflussbahnen und kleinere Waldflächen ohne direkten Bezug zum Siedlungsraum. Sie liegen im Umland von Leipzig und schließen sie ringförmig ein. Auch sie produzieren Kaltluft und fördern die Durchlüftung. Dort, wo es konkrete Wirkungsräume gibt, wie etwa im Südwesten der Stadt (Luvsituation), sollte eine weitere Bebauung weitgehend ausgeschlossen werden. Im Nordraum profitieren vor allem kleinere Ortschaften wie Podelwitz oder Radefeld. Die Freiflächen im Ostraum sind besonders bei Schwachwind von Bedeutung. Hier können lokale thermische Ausgleichströmungen für Abkühlung sorgen.

Eine Bebauung einzelner Flächen mit mittlerer Ausgleichsfunktion ist unter strengen Auflagen möglich (moderate Versiegelung, Durchlüftungsschneisen, Einschränkung der Emissionen). Auf keinen Fall dürfen Summeneffekte entstehen. Dies ist dann der Fall, wenn mehrere Freiflächen in einem Gebiet bebaut werden. Auf diese Weise können zusammenhängende Wärmeinseln entstehen, mit beträchtlichen klimatisch-lufthygienischen Folgen. Die übrigen Freiflächen sind dann kaum noch in der Lage die Ausgleichfunktion zu wahren. Dies ist auch von überregionaler Bedeutung, denn die fortschreitende Bebauung von Freiflächen ist ein Beitrag zur Verstärkung des Klimawandels (siehe Kapitel 7).

Flächen ohne nennenswerte Kaltluftproduktion sowie ohne Einfluss auf Siedlungsräume werden in die vierte Kategorie (geringe Bedeutung) eingestuft. Da im Untersuchungsgebiet keine solchen Flächen vorkommen, ist diese Kategorie auf der Bewertungskarte nicht vertreten.

6.2 Siedlungsflächen

Die Siedlungsflächen werden hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung (Bebauungsverdichtung, Flächenversiegelung) in drei Bewertungsklassen eingeteilt (gering, mittel, hoch). Kriterium ist zum einen die bereits bestehende klimatisch-lufthygienische Belastung des betrachteten Gebietes und zum anderen die Bedeutung für benachbarte Siedlungsbereiche.

Hoch verdichtete und belastete Innenstadtbereiche sowie intensiv genutzte Gewerbe- und Industriegebiete fallen grundsätzlich in die Klasse mit hoher Empfindlichkeit gegenüber einer weiteren Nutzungsintensivierung. In dieselbe Klasse gehören aber auch mäßig und gering belastete Siedlungsbereiche, die eine wichtige Ausgleichsfunktion für angrenzende stärker verdichtete Siedlungen innehaben. Beispiel sind die Innenstadt, Lindenau, Grünau, Gohlis, Mockau und die Neue Messe/Quelle.

In die Klasse mit mittlerer Empfindlichkeit fallen mäßig und gering belastete Siedlungsbereiche, mit nur geringem Einfluss auf benachbarte Siedlungen. Beispiele sind Wiederitzsch, Wahren, Böhlitz-Ehrenberg, Plagwitz, Großzschocher, Markkleeberg, Liebertwolkwitz und Rackwitz.

In die Klasse mit geringer Empfindlichkeit fallen locker bebaute, gering belastete Siedlungsbereiche ohne Bezug zu belasteten Siedlungen. Beispiele sind Taucha, Panitzsch, Großpösna, Markkleeberg-Ost, Zöbigker, Gundorf und Modelwitz.

6.3 Sachinformationen

Als zusätzliche Informationen werden die weitgehend unbelasteten Kaltluftabflüsse (vgl. Abschnitt 5.4), Luftleitbahnen (Elsterbecken) und Waldflächen größer als 1 ha (vgl. Abschnitt 5.2) dargestellt.

6.4 Sonstige klimarelevante Flächen

Wasserflächen

Bei ausreichender Größe (> 1 ha) wirken Wasserflächen ausgleichend auf den Temperatur- und Feuchtehaushalt ihrer Umgebung. Die erhöhte Verdunstung kann allerdings auch zu vermehrter Nebelbildung führen. Bei größeren Gewässern kommt es durch den Temperaturgegensatz zwischen Wasser- und Landoberfläche zur Ausbildung kleinräumiger Zirkulationssysteme, der sog. Land-See-Windzirkulation mit Strömungen vom See zum Land am Tage und umgekehrter Strömung in der Nacht. Wasserflächen begünstigen aufgrund ihrer glatten Oberfläche das Überströmen von Luftmassen. Befinden sie sich innerhalb einer Luftleitbahn, so erhöhen sie deren Leistungsfähigkeit und verbessern zudem die Qualität der Luftmassen, da Gewässer als Senke für eine Vielzahl in der Luft enthaltener gas- und partikelförmiger Schadstoffe zu betrachten sind. Erklärt wird dieser positive lufthygienische Effekt von Wasser dadurch, dass sich die Ablagerungsgeschwindigkeit von sehr kleinen Teilchen über einer Wasseroberfläche erhöht, weil die Teilchen in der feuchten wassernahen Luft rasch anwachsen (KUTTLER, 1991). In den Abschnitten 4.2 und 5.3 sind Beispiele genannt.

Im Vergleich zu 1997 sind durch die Flutung von Tagebaurestlöchern einige größere Wasserflächen dazugekommen. Hier sind insbesondere der Zwenkauer See, der Markkleeberger See, der Störmthaler See und der Schladitzer See zu nennen (die Wasserfläche des Cospudener Sees wurde erweitert). Die dadurch entstandenen Änderungen der Oberflächentemperatur sind besonders gut in Differenzkarte Morgen 1997 – Morgen 2010 zu sehen. Das Windfeld wurde lokal modifiziert. Aus Fall- und Aufwinden in den Senken (mit den entsprechenden Turbulenzen) wurden nun laminare Strömungen. Weggefallen sind außerdem Staubemissionen und -immisionen. Auch das Temperatur- und Feuchtefeld in der Umgebung wurde verändert. Es hat sich der oben beschriebene und positiv zu bewertende Klimazustand eingestellt.

Sonderflächen und Verkehrsanlagen

Sonderflächen wie Abbauflächen, Halden und Deponien können (wie bereits in Abschnitt 5.3 erläutert) kleinräumig mit speziellen klimatologisch-lufthygienischen Auswirkungen verbunden sein. Größere Gleisanlagen erleichtern aufgrund ihrer geringen Rauhigkeit den Luftaustausch.

6.5 Vorbelastungen und Konflikte

Großemittenten

Hierunter fallen alle nach dem BImSchG genehmigungsbedürftigen Anlagen, die für das Jahr 2008 eine Emissionserklärung gemäß der 11. BImSchV abzugeben hatten. Die Orte sind mit einem roten Punkt markiert.

Straßenabschnitte mit kritischer Luftschadstoffbelastung

Hier werden alle Straßenabschnitte dargestellt, für die Grenzwertüberschreitungen bei NO_2 und PM_{10} berechnet wurden (Prognose für das Jahr 2011), sowie Straßenabschnitte, bei denen die Gefahr einer Überschreitung besteht, da der prognostizierte (= berechnete) Wert dem Grenzwert entspricht. Dabei handelt es sich sowohl um bewohnte Abschnitte (z. B. die B 181 in Neu Burghausen) als auch um unbewohnte Abschnitte (z. B. die A 38 südlich des Cospudener Sees). Die folgende Tabelle 11 zeigt die derzeit gültigen Grenz- und Alarmwerte für NO_2 und PM_{10}.

Tab. 11 Grenz- und Alarmwerte für die Luftschadstoffe NO_2 und PM_{10} (EU-Richtlinie 2008/50 und 39. BImSchV)

	1h-Wert	**24h-Wert**	**Jahresmittel**
NO_2 [µg/m³]	**400 *** (gleitender Stundenmittelwert über 3 aufeinanderfolgende Stunden) **200 **** (Stundenmittelwert, darf max. 18-mal im Jahr überschritten werden)		**40 **** (berechnet aus Stundenmittelwerten)
Partikel PM_{10} [µg/m³]		**50 ***** (Tagesmittelwert, darf max. 35-mal im Jahr überschritten werden)	**40 ***** (berechnet aus Tagesmittelwerten)

* Alarmwert ** Grenzwert seit 2010 *** Grenzwert seit 2005

Luftleitbahn (schadstoffbelastet)

Die Ausweisung schadstoffbelasteter Luftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüsse ist eine rein qualitative Einschätzung und stützt sich auf die bekannten Informationen zur lufthygienischen Situation im Untersuchungsgebiet. Wie hoch die Schadstoffkonzentrationen im Einzelnen sind und ob es z. B. durch den Zufluss belasteter Kaltluftmassen tatsächlich zu einer Verschlechterung der Verhältnisse im Wirkungsraum kommt, müsste durch Vor-Ort-Messungen oder Modellrechnungen überprüft werden. Eine schadstoffbelastete Luftleitbahn kann auch zur Durchlüftung beitragen, insbesondere in der Nacht, wenn der Verkehr geringer ist. Im Untersuchungsgebiet sind mit Ausnahme des Elsterbeckens (einschließlich Elsterflutbett und Elsterhochfluchbett) sämtliche Luftleitbahnen als schadstoffbelastet ausgewiesen. Schadstoffbelastete Kaltluftabflüsse sind nicht vorhanden.

6.6 Nachrichtliche Informationen

Als ergänzende Information ohne Bewertungscharakter ist die Stadtgrenze von Leipzig eingetragen.

7 Darstellung und Bewertung bestehender oder potentieller stadtklimatisch-lufthygienischer Konfliktsituationen, Ableitung von Planungshinweisen

7.1 Ursachen und Auswirkungen des Klimawandels

Die Darstellung und Bewertung bestehender oder potentieller stadtklimatisch/lufthygienischer Konfliktsituationen beruht im Wesentlichen auf der Bewertungskarte Klima/Luft. Die zukünftige Entwicklung darf aber nicht nur im lokalen (städtischen) Maßstab gesehen werden. Mehr und mehr rückt auch der globale Zusammenhang ins Bewusstsein. Das Stichwort hierzu lautet „Klimawandel". Die globale Erwärmung ist wissenschaftlich nachgewiesen. Sie beruht im Wesentlichen auf anthropogenen Ursachen, bei denen der weltweite CO_2-Ausstoß ein wichtiger Faktor ist.

Städte sind sowohl passiv als auch aktiv involviert. Was die passive Komponente angeht, so verändert sich das städtische Bioklima und wird zunehmend ungünstiger. Durch das Ansteigen der Temperatur, was sich z. B. in extrem heißen Sommern wie im Jahr 2003 zeigte, wird das Wohnen in der Stadt zum Problem. Kranke oder ältere Mensachen sind dem Hitzestress besonders ausgesetzt. Kann man tagsüber der Sonne noch ausweichen, so ist man der nächtlichen Wärmebelastung meist hilflos ausgeliefert. Entscheidend ist, ob die Stadtlandschaft sich nachts regenerieren kann, sowohl bioklimatisch als auch lufthygienisch.

Städte sind aber auch aktive Mitverursacher des Klimawandels. Grund ist u. a. die zunehmende Flächenversiegelung. Durch Bebauung von Freiflächen dehnen sich die städtischen Wärmeinseln mehr und mehr aus und werden intensiviert. Konkret geht es um den Verlust von Kaltluftentstehungsflächen und Durchlüftungsschneisen (Luftleitbahnen), Reduktion von Vegetationsflächen sowie Behinderung lokaler Kaltluftabflüsse. Der notwendige Luftaustausch zwischen Umland und Stadtzentrum, der vorwiegend in der Nacht erfolgt (Stichwort „Regeneration"), wird gestört.

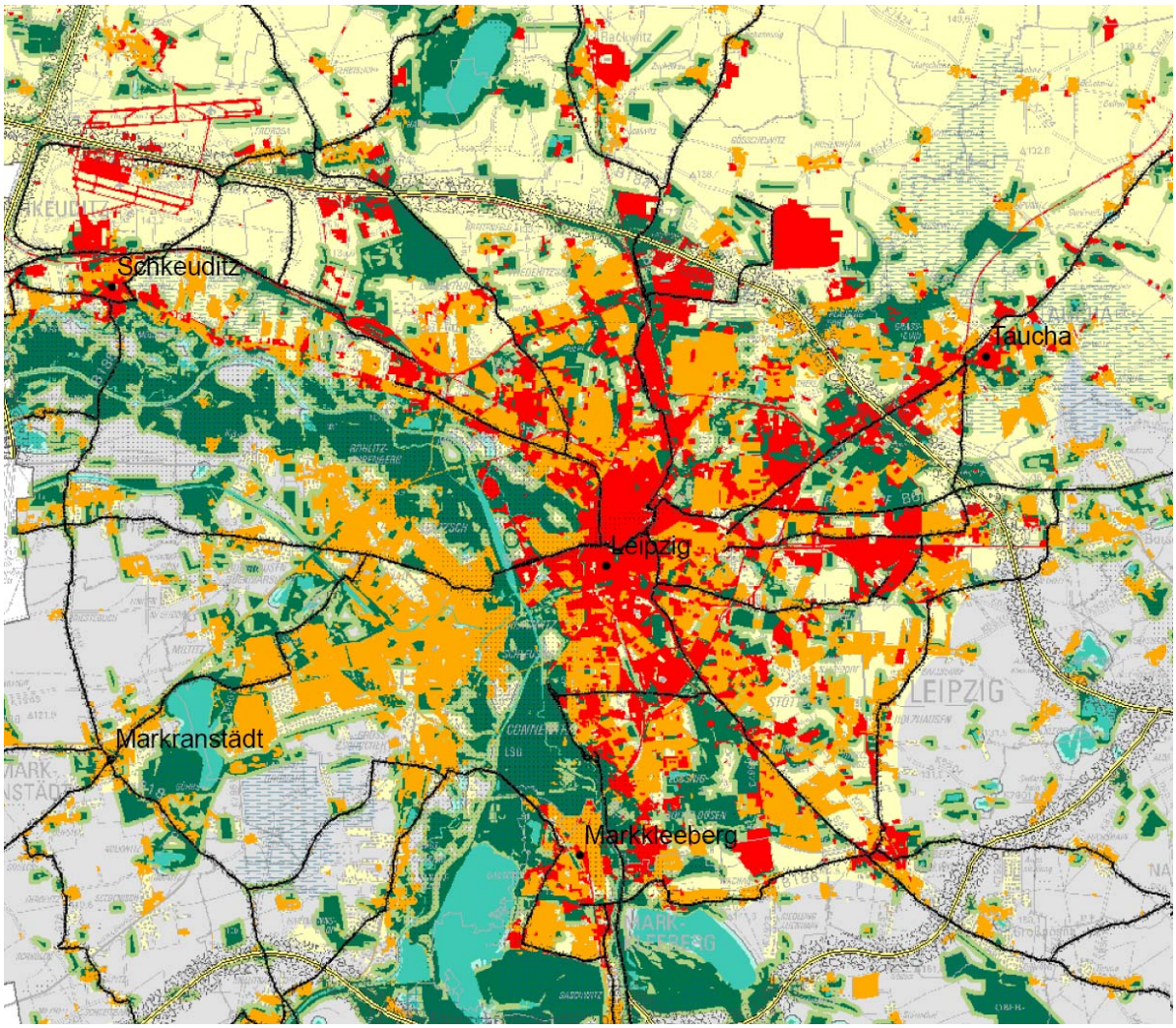
Freiflächen sind damit Orte potentieller klimatisch-lufthygienischer Konfliktsituationen. Ihre Bebauung reduziert einerseits das Kaltluftpotential und andererseits geht eine Fläche verloren, die Frischluft transportieren und Luftschadstoffe verdünnen kann. Sind mehrere, räumlich zusammenhängende Flächen betroffen, so besteht die Gefahr einer Summenwirkung. Zusätzlich zieht jede Bebauung auch Verkehr an. Durch die zusätzlichen Luftschadstoffe wird die Atmosphäre weiter belastet.

Um dem entgegenzuwirken, muss in der Stadt- und Landschaftsplanung ein übergeordneter, nachhaltiger Ansatz verfolgt werden. Nur so kann der Lebensraum Stadt auch zukünftig attraktive Lebensbedingungen gewährleisten. Die Verschärfung der bioklimatischen Belastungssituation in Ballungsräumen führt zu einem erhöhten Handlungsdruck.

Dabei steht den Planungsbehörden ein Katalog von Maßnahmen zur Verfügung:

- Wärmeschutzvorrichtungen an Gebäuden
- Einsatz heller (reflektierender) Baumaterialien
- Fassaden- und Dachbegrünung
- Verschattung von Freiflächen mit Aufenthaltsfunktion (z. B. durch großkronige Bäume)
- Verlängerung bzw. Optimierung von Luftleitbahnen
- Schaffung von Flächen mit Durchlüftungsfunktion
- Abbau von Strömungshindernissen
- Schaffung von „Komfortinseln" mit räumlicher Verortung
- Vernetzung innerstädtischer Freiflächen („Klimavielfalt")

Was Westsachsen betrifft, liegt seit 2010 hierzu eine umfassende Studie der TU Dresden vor. Mittels Modellrechnungen wird die „Vulnerabilität" für den Zeitraum 2026-2055 prognostiziert. Damit ist die Verletzbarkeit der Region gegenüber Änderungen des Klimas, bedingt durch anthropogene Eingriffe in die Umwelt, gemeint. Der für die vorliegende Stadtklimauntersuchung wichtigste Aspekt ist die Hitzebelastung, d. h. die Zunahme der Jahrsmitteltemperatur und Anzahl der Tropentage (Höchsttemperatur > 30 °C). Die folgende Abbildung 10 (nächste Seite) zeigt das Ergebnis für Leipzig und Umgebung.



sehr hohe Vulnerabilität gegenüber Hitzebelastungen (Vorstufe)

hohe Vulnerabilität gegenüber Hitzebelastungen (Vorstufe)

maßgebliche Vulnerabilität gegenüber Hitzebelastungen (Vorstufe)

geringe Vulnerabilität gegenüber Hitzebelastungen (Vorstufe)

Abb. 10 Ausschnitt aus der Karte „Vulnerabilität gegenüber Hitzebelastungen“ (TU Dresden, 2010); er entspricht etwa dem Gebiet der Klimauntersuchung.

7.2 Konfliktsituationen und allgemeine Planungshinweise

Die auf Modellrechnungen basierende Karte der „Vulnerabilität gegenüber Hitzbelastung“ stimmt in ihren Aussagen recht gut mit der Bewertungskarte Klima/Luft überein. Deutlich wird, dass die Vulnerabilität in den stark bebauten Gebieten, wie etwa Leipzig-Zentrum oder größeren Industriegebieten, am höchsten ist. Ebenfalls sichtbar ist die Abnahme zu den weniger stark bebauten Flächen, die sich hautsächlich an der Peripherie befinden. Interessant ist die Asymmetrie zwischen „maßgeblicher“ und „geringer“ Vulnerabilität. Erstere konzentriert sich auf die Freiflächen im Nordraum von Leipzig. Die übrigen Freiflächen im Umland fallen in die schwächste Kategorie.

Der Nordraum ist damit ein besonders schützenswertes Gebiet. Die Freiflächen sind auf der Bewertungskarte mit hoher bzw. sehr hoher klimatischer Ausgleichsfunktion dargestellt. Gerade in diesem Raum haben sich bereits, bedingt durch die gute Verkehrsanbindung (Autobahn, Flughafen), zahlreiche Gewerbe- und Industriebetriebe angesiedelt (Beispiele sind Porsche und BMW). Der Flächenverbrauch ist hoch und es besteht – bei anhaltendem Planungsdruck – die Gefahr einer klimatischen Summenwirkung. Der Verlust der Kaltluftentstehungsflächen kann letztlich zur Bildung einer mehr oder weniger zusammenhängenden Wärmeinsel im Nordraum von Leipzig führen. Das Kaltluftpotential wird damit merklich eingeschränkt. Darüber hinaus beeinflusst die zunehmende Rauhigkeit die Durchlüftung. Wenn gleichzeitig das Verkehrsaufkommen wächst, erhöhen sich auch die Schadstoffimmissionen.

Was die landwirtschaftlichen Nutzflächen im Nordraum von Leipzig angeht, so ist also darauf zu achten, dass deren Bestand weitgehend gesichert wird. Die Bebauung weiterer Flächen muss in jedem Einzelfall kritisch geprüft werden. Hier ist die individuelle klimatische Wertigkeit und Ausgleichsfunktion entscheidend.

Obwohl die übrigen Freiflächen im Westen, Süden und Osten von Leipzig in Abbildung 10 mit „geringer Vulnerabilität gegenüber Hitzebelastungen“ charakterisiert sind, ist auch hier Vorsicht geboten. Insbesondere die Flächen im Westen und Süden sind für das Stadtklima von großer Bedeutung. Es handelt sich um „Flächen mit Durchlüftungsfunktion“ (siehe Abschnitt 5.4). Bei den vorherrschenden Windrichtungen (SW-Sektor) wird hierüber Leipzig mit Kalt- und Frischluft versorgt, die über die vorhandenen Luftleitbahnen (z. B. Bahnlinie durch Grünau, Elsterhochflutbett) bis in die Innenstadt vordringen können. Die Bebauung solcher Freiflächen im Luv der Stadt reduziert also nicht nur das Kaltluftpotential sondern auch die Durchlüftung. Die Freiflächen im Osten liegen in der Regel im Lee der Strömung. Sie produzieren aber ebenfalls Kaltluft und können bei schwachen Ostwinden oder über thermisch induzierte, lokale Ausgleichsströmungen („Flurwind“ in bei Calmen) positiv zum Stadtklima beitragen.

Was existierende Luftleitbahnen angeht, so ist darauf zu achten, dass diese nicht eingeengt bzw. in ihrer Wirkung minimiert werden. Hier entsteht oft ein Konflikt mit der Begrünung durch Bäume, die die Bahn säumen und damit einengen. Insbesondere bei Straßen kann der Lufttransport dadurch eingeschränkt werden. Andererseits wirken Bäume als Filter für Schadstoffe, insbesondere Staub. Es ist im Einzelfall zu prüfen, welcher Aspekt vorrangig von Bedeutung ist.

Auch in anderen Fällen können Immissionsschutzpflanzungen ambivalent wirken. Sind sie quer zur Hauptwindrichtung orientiert, entstehen Strömungshindernisse (gleiches gilt für Lärmschutzwände). In diesen Fällen bildet sich ein Lee-Effekt. Die windabgewandte Seite ist eine Turbulenzzone, in der die Schadstoffe längere Zeit verbleiben. Der reduzierte Luftaustausch erhöht die Immissionskonzentration. Die Turbulenzzone ergibt sich für alle Arten von künstlichen oder natürlichen Strömungshindernissen. Beispiele sind massive Gebäude (Riegelbauten), Halden aber auch Waldflächen. Für die Ausdehnung dieser Zone setzt man allgemein das Zehnfache der Hindernishöhe an. Damit erzeugt z. B. ein quer zur Windrichtung orientiertes Gebäude von 15 m Höhe einen „Leewirbel“ von ca. 150 m Länge. Ob eine lufthygienische Belastung entsteht, hängt davon, ab ob das Strömungshindernis selbst ein Emittent ist oder ob Emissionen im Luv bzw. in der Zone mit reduziertem Luftaustausch auftreten. Beispiele für den ersten Fall sind Gewerbe-/Industriegebiete, wie etwa das Industriegelände West, aber auch Halden, von denen Staub aufgewirbelt wird. Beispiele für den zweiten Fall sind Einkaufscenter, wie das Paunsdorf-Center (hier liegen Parkplätze im Luv des Gebäudes). Waldflächen wirken zwar als Strömungshindernisse und erzeugen somit einen Lee-Wirbel, emittieren selbst aber keine Schadstoffe sondern filtern sie aus. Dieser positive Effekt überwiegt. Trotzdem müssen Aufforstungen hinsichtlich ihrer Klimawirkung bedacht werden. Ist die Fläche ein Kaltluftproduzent mit hoher Ausgleichswirkung, sollte hier aus klimatischen Gründen kein Waldgebiet entstehen.

Bepflanzungen an Straßen können in der Innenstadt bioklimatisch förderlich sein, solange keine Luftleitbahn beeinträchtigt wird. Sie reduzieren die Einstrahlung und somit den Canyon-Effekt. Der nächtliche Wärmestau in der Straßenschlucht lässt sich aber auch durch Fassaden- bzw. Dachbegrünung eindämmen. Die durch Verdunstungskälte gebildete kühle Luft sinkt ins Straßenniveau ab und reduziert die Temperatur.

In Gebieten, die in die Klasse mit hoher Empfindlichkeit gegenüber einer weiteren Nutzungsintensivierung fallen ist darauf zu achten, dass zumindest der Status Quo erhalten bleibt. Dies betrifft insbesondere das kleinräumige Muster zwischen Bebauung und innerstädtischen Freiflächen (Parks etc.). Diese „Klimavielfalt“ ist bioklimatisch ein wichtiges Element. Eine räumlich starke Dominanz einer einzelnen Klimasituation („Klimatop“) ist daher bioklimatisch eher ungünstig. Der Mensch braucht die Abwechslung und den Übergang. Hier sind „Komfortinseln“ wichtig, in denen er der Überhitzung ausweichen kann (z. B. in Lindenau, im Zentrum, im Zentrum-Ost oder in der Südvorstadt). Der Stadtbewohner hat die Freiheit, sich überwärmten Flächen zu entziehen, den Schatten zu suchen, aber auch in die Sonne zurückzukehren. Wenn dies gewährleistet ist, steigert sich das Wohlbefinden – auch in der Stadtlandschaft.

Welche klimatischen Veränderungen sich ergeben, zeigt der Vergleich der Thermalaufnahmen von 1997 und 2010 (siehe Differenzkarten). Bei der Interpretation muss man aber bedenken, dass auch temporale Effekte eine Rolle spielen und die sichtbaren Differenzen nur teilweise auf einen „lokalen Klimawandel" zurückzuführen sind. Diese Effekte betreffen primär die individuelle Wettersituation (z. B. Temperaturminimum/-maximum) und den Bewuchs landwirtschaftlicher Nutzflächen (z. B. bestandenes/brach liegendes Feld). Reale Veränderungen mit Wirkung auf das Mikroklima sind dann gegeben, wenn Flächen versiegelt oder umgestaltet werden (z. B. neue Wohn- und Gewerbegebiete, Straßen, Tagebauseen) oder Bebauung verdichtet wird (z. B. Schließung von Baulücken in der Innenstadt). Beispiele sind in Abschnitt 4.3 genannt.

Interessant ist der Vergleich der Klassifizierten Thermalkarten von 1997 und 2010 (die unterschiedliche Größe des Untersuchungsgebiets ist dabei zu berücksichtigen). Der Anteil der Wärmeinseln (prozentuale Häufigkeit der Klassen B, C und D; vgl. Abbildung 9) hat um 5,5 Prozentpunkte zugenommen; der Anteil der schwachen Wärmeinseln (prozentuale Häufigkeit der Klassen E, F und G) hat um 0,3 Prozentpunkte zugenommen; der Anteil der schwachen Kaltluftflächen (prozentuale Häufigkeit der Klassen H, I und J) hat um 3,9 Prozentpunkte abgenommen; der Anteil der Kaltluftflächen (prozentuale Häufigkeit der Klassen K, L und M) hat um 5,9 Prozentpunkte abgenommen. Ursache ist z. T. die Versiegelung größerer Freiflächen (dies wird auch in den Differenzkarten Abend 1997-2010 bzw. Morgen 1997-2010 deutlich). Bleibt noch der Anteil der Wasserflächen (Klasse A): Er hat um 2,9 Prozentpunkte zugenommen. Die ausgleichende Wirkung auf die Temperatur und die bessere Durchlüftung bewirken dabei einen klimatisch positiven Effekt.

Insgesamt existiert in der Stadt Leipzig noch ein ausgleichend wirkendes Umland (Ring von Freiflächen), die klimatisch sehr wirksame Aue des Pleiße-, Elster- und Luppe-Gebietes, ein kleinräumiges Muster von innerstädtischen Freiflächen, sowie eine gute Durchlüftung durch Flächen geringer Rauhigkeit und Luftleitbahnen. Dieses klimatische Gefüge muss erhalten bleiben. Aus Sicht der Umweltvorsorge ist es ratsam, dem großen Planungsdruck (z. B. Flächenverbrauch im Nordraum) entgegen zu treten – Stichwort „Summeneffekt".

In jedem Fall sollte die lufthygienische Situation verbessert werden. Immissionsseitig profitiert man zwar vom funktionierenden Klimagefüge, die Emissionen müssen aber reduziert werden. Geeignete Maßnahmen sind Geschwindigkeitsbeschränkungen, Verkehrsvermeidung und -verlagerung auf den Umweltverbund. Darüber hinaus dürfte der technische Fortschritt (z. B. schadstoffarme Motoren, Elektromobilität) in Zukunft einiges bewirken.

8 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht dokumentiert den Abschluss der Klimauntersuchung für die Stadt Leipzig. Die Untersuchung umfasst die Darstellung und Bewertung der klimatischen und lufthygienischen Ist-Situation. Grundlagen sind die Thermalscannerbefliegungen am 22./23.09.2010 sowie meteorologische und lufthygienische Datenreihen.

Wichtigste Ergebnisse der Untersuchung sind die **Klimafunktionskarte**, die eine flächendeckende, detaillierte Darstellung der thermischen und dynamischen Verhältnisse des klimatischen Ist-Zustandes zeigt, sowie die **Bewertungskarte Klima/Luft**, die bestehende Belastungen verdeutlicht und eine rasche, qualitativ abgesicherte Beurteilung von Planungsvorhaben ermöglicht.
Als weitere Ergebnisse liegen die **Thermalkarten Abend** und **Morgen**, die **Klassifizierte Thermalkarte** (Grundlage der Klimafunktionskarte) und die **Differenzkarten 1997-2010** der Abend- und Morgensituation vor.

Kapitel 1 und 2 stellen den Inhalt der Untersuchung, sowie die zur Verfügung stehenden Datengrundlagen und Methodik vor. Angaben zum Naturraum, zur Flächennutzung, zum Regionalklima und zur lufthygienischen Situation im Untersuchungsgebiet finden sich in Kapitel 3. In Kapitel 4 wird die Vorgehensweise und Entstehung der vorliegenden Thermal- und Differenzkarten erläutert und ihre Aussagen interpretiert.

In Kapitel 5 und 6 werden die auf der Klimafunktionskarte und der Bewertungskarte Klima/Luft dargestellten Einheiten besprochen. Die Bewertungskarte Klima/Luft verknüpft dabei basierend auf der Klimafunktionskarte, die klimatische Ist-Situation mit den lufthygienischen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet. Im Gegensatz zur weitgehend wertfreien Darstellung auf der Klimafunktionskarte werden auf der Bewertungskarte die Frei- und Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer klimatisch-lufthygienischen Ausgleichsfunktion bzw. ihrer Empfindlichkeit gegenüber Eingriffen in mehrere Klassen eingeteilt.

Kapitel 7 behandelt zunächst den Klimawandel im Raum Leipzig, wie er in der aktuellen MORO-Studie dargestellt ist (TU-Dresden 2010). Zentraler Punkt des Kapitels sind bestehende bzw. potentielle klimatisch-lufthygienische Konfliktsituationen und allgemeine Planungshinweise. Grundlage hierfür ist die Bewertungskarte Klima/Luft.

In Leipzig sind, auch im Vergleich zu 1997, weiterhin große Teile des Stadtgebietes dem intensiven bis gemäßigten städtischen Überwärmungsbereich zugeordnet, der insgesamt als stark belastend bis belastend für den Menschen eingestuft wird. Dies zeigt sich zum einen in erhöhten Temperaturwerten, insbesondere in den Sommermonaten und während der Nachtstunden, bei gleichzeitig eingeschränkter Durchlüftung, zum anderen an der z. T. hohen lufthygienischen Belastung, wobei der Straßenverkehr zunehmend als Hauptemissionsquelle zu nennen ist.

Aufgrund des sehr geringen Gefälles ist im Untersuchungsgebiet trotz guter Kaltluftentstehungsbedingungen im Umland von Leipzig nicht von der Entstehung stadtklimatisch relevanter Kaltluftströme auszugehen. Von besonderer Bedeutung sind daher die den Luftaustausch innerhalb der Stadt begünstigenden Strukturen, die auf der Klimafunktionskarte als Luftleitbahnen ausgewiesen sind. Eine besondere Rolle spielt dabei das in etwa südost-/nordwest-verlaufende Elsterbecken, da hier weitgehend unbelastete Luftmassen herangeführt werden. Für alle anderen Luftleitbahnen ist davon auszugehen, dass sie je nach Nutzung und Emissionen lufthygienisch belastet sind. Hier sind Maßnahmen anzustreben, die zur Entlastung der Luftleitbahnen beitragen, insbesondere emissionsmindernde Maßnahmen wie Geschwindigkeitsbeschränkungen, Verkehrsvermeidung und –verlagerung auf den Umweltverbund, sowie Begrünung und offene Randbebauung.

Als bedeutendste klimatische Ausgleichsfläche für die Stadt Leipzig ist, wie schon in der zurückliegenden Untersuchung (Steinicke & Streifeneder, 1998) ausgeführt, die weiträumige Aue des Pleiße-Elster- und Luppe-Gebietes mit ihren noch weitgehend naturnahen Auwaldresten zu nennen. Ebenso sind es die innerstädtischen Freiflächen, die in Abhängigkeit von ihrer Ausdehnung und Lage zum Abbau der städtischen Wärmeinsel beitragen. Insgesamt ist weiterhin auf die herausragende Bedeutung der Vegetation hinzuweisen. Die Sicherung und Entwicklung von Freiflächen, die Erhaltung stadtnaher Wälder, der Erhalt und die Neupflanzung großkroniger Laubbäume, Maßnahmen wie Fassaden- und Dachbegrünung, sowie insgesamt die Entwicklung eines hohen Grünanteils im besiedelten Bereich tragen nicht nur zur Sicherung eines angenehmen Bestandsklimas, sondern auch zur Verbesserung der lufthygienischen Situation und Stabilisierung des Klima- und Wasserhaushaltes bei.

Aus Sicht der Umweltvorsorge muss diese noch relativ günstige klimatische Situation erhalten bleiben. Dem Klimawandel muss, insbesondere auf lokaler Ebene, durch die entsprechenden Adaptionsmaßnahmen begegnet werden, um die bioklimatische Belastungssituation nicht weiter zu verschärfen. Das bedeutet auch, dem allgemeinen Planungsdruck kritisch zu begegnen. Insbesondere die Freiflächen des Nordraums erscheinen durch die günstige Verkehrsinfrastruktur (und bereits sowie bestehende Präzedenzfälle) gefährdet. Hier sind auf der Ebene der verbindlichen Bauleitplanung entsprechend wirkungsvolle Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen vor Ort vorzusehen. Darüber hinaus muss durch geeignete Grünstrukturen ein Zusammenwachsen überwärmter Bereiche vermieden werden.

9 Quellenverzeichnis

BREUSTE, J. (Hrsg.) (1996): Stadtökologie und Stadtentwicklung: Das Beispiel Leipzig. Ökologischer Zustand und Strukturwandel einer Großstadt in den neuen Bundesländern (= Angewandte Umweltforschung, Bd. 4), Berlin

GERTH, W.-P. (1986): Klimatische Wechselwirkungen in der Raumplanung bei Nutzungsänderungen. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 171, Offenbach am Main

HÄCKEL, H. (1993): Meteorologie, 3. Aufl., Stuttgart

HAUF, T. und WITTE, N. (1985): Fallstudie eines nächtlichen Windsystems. Meteorologische Rundschau 38

HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG (2010, Entwurf): Stadtklimatologische Begleituntersuchung. Dokumentation und Datenlieferung. Leipzig

KOMMISSION REINHALTUNG DER LUFT (KRdL) IM VDI UND DIN (Hrsg.) 1993): Lufthygiene und Klima. Ein Handbuch zur Stadt- und Regionalplanung. Düsseldorf

KUTTLER, W. (1993): Stadtklima. In: SUKOPP, H. u. WITTIG, R. (Hrsg.) (1993): Stadtökologie, S. 113-153. Stuttgart u. a.

KUTTLER, W. (1997): Bewertungsmaßstäbe für Stadtklima und Lufthygiene. Geographische Rundschau, 10, S. 576-582

LIEDTKE, H. u. MARCINEK, J. (Hrsg.) (1994): Physische Geographie Deutschlands. Gotha

MAYER, H., BECKRÖGE, W. u. MATZARAKIS, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268

NOACK, E.-M. u.a. (1986): Quantifizierung der Einflüsse von Bebauung und Bewuchs auf das Klima in der urbanen Biosphäre. Forschungsberichte des BMFT. München

PARLOW, E. (1983): Geländeklimatologische Untersuchungen im Bereich der Staufener Bucht unter besonderer Berücksichtigung lokaler Ausgleichsströmungen. Freiburger Geographische Hefte Bd. 20

REGIERUNGSPRÄSIDIUM LEIPZIG (Hrsg.) (1992): Luftreinhalteplan Leipzig 1992

REUTER, U., BAUMÜLLER, J. u. HOFFMANN, U. (1991): Luft und Klima als Planungsfaktor im Umweltschutz. Grundlagen für die kommunale Planungs- und Entscheidungspraxis. Ehningen bei Böblingen

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (2009): Luftqualität in Sachsen, Jahresbericht 2009

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE: Klimafolgen und Anpassung, abrufbar unter: http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/klima/1284.htm

SPACETEC (Hrsg.) (1993): Stadtklimauntersuchung Leipzig. Abschlußbericht Mai 1993, unveröffentlicht. Freiburg

STÄDTEBAULICHE KLIMAFIBEL (1998): Städtebauliche Klimafibel - Hinweise für die Bauleitplanung. Völlig überarbeitete Neuauflage und Zusammenführung der Städtebaulichen Klimafibeln Folge 1 und 2, hrsg. vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart

STADT LEIPZIG (Amt für Geoinformation und Bodenordnung): Digitale Biotoptypen- und Landnutzungskartierung (BTLNK) im Freistaat Sachsen (Stand 2005)

STADT LEIPZIG (Amt für Geoinformation und Bodenordnung): Digitale Topographische Karte 1: 25.000 (Stand 2006)

STADT LEIPZIG (Amt für Umweltschutz): Luftreinhalteplan für die Stadt Leipzig (Stand 2009), abrufbar unter http:/www.umwelt.sachsen.de/umwelt/luft/17750.htm

STEINICKE & STREIFENEDER Umweltuntersuchungen GbR (Hrsg.) (1998): Stadtklimauntersuchung Leipzig. Klimatische und lufthygienische Untersuchungen. Abschlußbericht März 1998, unveröffentlicht. Freiburg

TU DRESDEN (2010, Entwurf): Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel. Vulnerabilitätsanalyse Westsachsen, Juli 2010; Internet: www.rpv-westsachsen.de (siehe Projekte / MORO Ergebnisse)

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Wetterdaten am 22.09.2010 (DWD-Angaben für Leipzig-Schkeuditz) 4

Tab. 2 Angaben zu den Thermalscanneraufnahmen Leipzig 2010.....5

Tab. 3 Messstationen und verfügbare meteorologische Parameter im Untersuchungsgebiet 6

Tab. 4 Luftmessstationen des LfULG im Stadtgebiet von Leipzig.....7

Tab. 5 Jahresmittel der Lufttemperatur an den Stationen Leipzig-Mitte und Leipzig-West und mittlere jährliche Temperaturdifferenz (ΔT) im Vergleich. 10

Tab. 6 Häufigkeit der Ausbreitungsklassen nach KLUG/MANIER. 17

Tab. 7 Temperaturskalen der Abend-, Morgen- und Differenzkarte.....20

Tab. 8 Flächen mit auffälliger Temperatur (warm/kalt) bzw. Temperaturdifferenz (konstant/stark abgekühlt).....20

Tab. 9 Bedeutung der Klassen in der Klassifizierten Thermalkarte 23

Tab. 10 Temperaturskalen der Differenzkarten Abend 1997-2010 und Morgen 1997-2010.....27

Tab. 11 Grenz- und Alarmwerte für die Luftschadstoffe NO_2 und PM_{10}.....41

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Links: Wetterkarte; rechts: Analyse des amerikanischen „Global Forcast System“ (GFS-Modell) 4

Abb. 2 Überhöhtes Reliefbild von Leipzig und Umgebung (Digitales Geländemodell DGM 25C GeoSN 2010) 8

Abb. 3 Jahresmitteltemperaturen und mittlere Tageshöchst- (Maximum) und Tagestiefstwerte (Minimum) an den Stationen Leipzig-Mitte und Leipzig-West in den Jahren 1995-2009....11

Abb. 4 Mittlerer Jahresgang der Lufttemperatur an den Messstationen Leipzig-Mitte und Leipzig-West in den Jahren 2005-2009 12

Abb. 5 Monatsmittel der Lufttemperatur 2009 an den Stationen Leipzig-Lützner Straße, Leipzig-Mitte, Leipzig-West und Schkeuditz sowie Monatssummen des Niederschlages gemessen an der Station Schkeuditz 13

Abb. 6 Windrichtungsverteilung an der Station Schkeuditz. Oben: 1980 – 1990 (DWD Dresden, 1995); unten: 2004 – 2009 14

Abb. 7 Relative Häufigkeit der Windrichtungen an den Stationen Leipzig-Mitte, Leipzig-West und Schkeuditz 2008 15

Abb. 8 Relative Häufigkeit der Stundenwerte der Windgeschwindigkeit an der Station Schkeuditz 1980-1990 (DWD Dresden, 1995) 16

Abb. 9 Standardisierte Klassifikation des Oberflächentemperaturverhaltens 21

Abb. 10 Ausschnitt aus der Karte „Vulnerabilität gegenüber Hitzebelastungen“ (TU Dresden, 2010); er entspricht etwa dem Gebiet der Klimauntersuchung....44