

ARCHIVIERUNGSEXEMPLAR



UFZ-Bericht

UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht

UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

Nr. 3/1999

Dissertation

**Mikrometeorologische Analyse
und Bewertung kleinräumiger
Stadtstrukturen**

Bernhard Bauer

ISSN 0948-9452

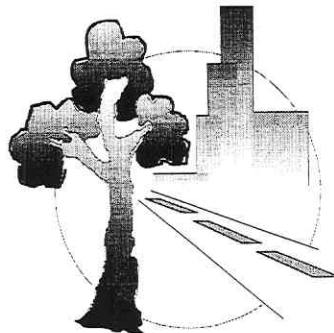
Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten
der Georg-August-Universität zu Göttingen

Mikrometeorologische Analyse und Bewertung kleinräumiger Stadtstrukturen

Bernhard Bauer

aus Grafenau

Archiv



Projektbereich Urbane Landschaften

D 7

Referent: Prof. Dr. G. Gerold

Korreferent: Prof. Dr. G. Gravenhorst

Prof. Dr. J. Breuste

Tag der mündlichen Prüfung: 04.11.1998

Göttingen 1998

UFZ-Umweltforschungszentrum
Leipzig-Halle GmbH
Zentralbibliothek
Permoserstraße 15
04318 Leipzig

99-646

Vorwort

Die quantifizierte Bewertung der atmosphärischen Umgebungsbedingungen für Menschen in der Stadt stellt eine aktuelle Aufgabe in der Angewandten Stadtklimatologie dar. Je besser sie gelöst werden kann, desto mehr gewinnt das Stadtklima in der Stadt- und Vorsorgeplanung an Bedeutung und erreicht im Abwägungsprozeß unter den vielen Planungsfaktoren eine fundierte Stellung. Dabei ist es von erheblicher Bedeutung, daß vieles von dem, was in der Stadtklimatologie qualitativ schon lange bekannt und den Menschen in der Stadt wohl vertraut ist, in Zahl und Maß oder als Funktion quantifiziert wird und auch den Bezug zu Menschen aufweist. Erschwert wird die aufgezeigte Problematik durch die unterschiedlichen Maßstabsebenen in der Stadtplanung, weil dadurch räumlich und zeitlich variable Auflösungsansprüche vorgegeben sind.

Die Bearbeitung dieser Problemstellung ist Bestandteil der vorliegenden Arbeit, die sich auf die thermische Komponente des Stadtklimas in kleinräumigen Stadtstrukturen bezieht. Die kombinierte Anwendung von experimentellen Untersuchungen, einschließlich bodengestützter Infrarotthermographie, und mikroskaligen Modellierungen liefert detaillierte meteorologische Informationen für eine human-biometeorologische Bewertung in Stadtstrukturen. Diese Methodik hat einen hohen modellhaften Charakter, so daß ihre Anwendung nicht auf die lokalen Untersuchungsobjekte beschränkt bleibt.

Die Beziehungen zwischen den thermischen Umgebungsluftbedingungen und Menschen erfordern die Anwendung von modernen human-biometeorologischen Bewertungsverfahren. Der daraus resultierende thermische Bewertungsindex *Physiologisch Äquivalente Temperatur* weist - im Gegensatz zu früher verwendeten Bewertungskenngrößen - eine thermophysiological Relevanz auf. Ferner liefert er Ergebnisse über die Wahrnehmung der thermischen Umgebung durch Menschen, die aufgrund seiner Einheit „°C“ auch für diejenigen leicht verständlich sind, die keinen großen Bezug zur Human-Biometeorologie haben.

H. Mayer, Freiburg

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

Seite:

1 Einleitung	1
2 Zielsetzung.....	2
3 Grundlagen mikroskaliger Stadtmeteorologie.....	3
3.1 Städtische Raumeinheiten.....	5
3.1.1 Stadtstrukturtypen.....	7
3.1.2 Vegetationsstrukturen.....	7
3.1.3 Baukörperstrukturen	8
3.2. Klimamodifikation durch städtische Bebauung	8
3.2.1 Energie- und Strahlungshaushalt.....	9
3.2.2 Windfeld.....	14
3.2.3 Lufttemperatur- und Luftfeuchteverteilung.....	15
3.3 Thermischer Wirkungskomplex.....	18
3.3.1 Wärmehaushalt des Menschen.....	19
3.3.2 Human-biometeorologische Kenngrößen.....	21
3.4 Mikroskalige stadtmeteorologische Untersuchungsmethoden.....	23
3.4.1 Experimentelle Methoden.....	23
3.4.2 Mikroskalige Stadtklimamodelle.....	26
4. Untersuchungsmethoden.....	30
4.1 Untersuchungskonzept.....	30
4.2 Experimentelle Untersuchungen.....	32
4.2.1 Kontinuierliche Klimamessungen.....	32
4.2.2 Mobile meteorologische Messungen.....	34
4.2.2.1 Lufttemperatur und Dampfdruck.....	35
4.2.2.2 Windgeschwindigkeit.....	35

4.2.2.3 Kurz- und langwellige Strahlungsflüsse	35
4.2.2.4 Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur.....	37
4.2.2.5 Oberflächentemperatur.....	38
4.2.3 Bodengestützte Infrarotthermographie.....	39
4.3 Human-biometeorologische Bewertung.....	40
4.3.1 Klima-Michel-Modell.....	40
4.3.2 Münchener Energiebilanz Modell für Individuen (MEMI).....	41
4.4 Mikroskalige Stadtklimamodellierung.....	42
4.4.1 Modell SHADOW	43
4.4.2 Modell MISKAM	44
5 Einführung in das Untersuchungsgebiet.....	45
5.1 Stadt Leipzig.....	45
5.1.1 Stadtklimatische Untersuchungen in Leipzig.....	47
5.1.2 Stadtstrukturen in Leipzig.....	48
5.2 Untersuchungsstandorte.....	50
5.2.1 Auswahlkriterien.....	50
5.2.2 Standortbeschreibung.....	51
5.2.3 Kartierung der Oberflächenstrukturen.....	52
6 Untersuchungszeitraum	54
6.1 Klimatische Bedingungen im Untersuchungszeitraum.....	54
6.2 Zeiträume der mobilen Meßkampagnen.....	60
7. Ergebnisse experimenteller Untersuchungen.....	62
7.1 Einfluß von mikrometeorologischen Bedingungen auf thermo-physiologische Kenngrößen.....	62
7.1.1 Typische Tagesgänge meteorologischer Kenngrößen bei Strahlungswetterlagen.....	62
7.1.2 Korrelationen meteorologischer und thermophysilogischer Kenngrößen...	67
7.2 Einfluß technogener und natürlicher Umgebungsflächen auf mikrometeorologische Bedingungen.....	74
7.2.1 Horizontale Umgebungsflächen.....	74
7.2.2 Vertikale Umgebungsflächen.....	81
7.2.3 Großvegetation.....	91

7.3 Variabilität human-biometeorologischer Bedingungen in ausgewählten Stadtstrukturen.....	96
7.3.1 Großwohnsiedlung.....	96
7.3.2 Gründerzeitliche Blockrandbebauung.....	98
7.3.3 Parkanlage mit angrenzender Bebauung.....	104
7.4 Zusammenfassung.....	107
8 Ergebnisse mikroskaliger Modellierung.....	111
8.1 Strahlungshaushaltssimulation.....	112
8.1.1 Großwohnsiedlung.....	112
8.1.2 Gründerzeitliche Blockrandbebauung.....	116
8.2 Windfeldmodellierung.....	121
8.2.1 Großwohnsiedlung.....	121
8.2.2 Gründerzeitliche Blockrandbebauung.....	126
8.3 Zusammenfassung.....	130
9 Diskussion.....	132
9.1 Bewertung experimenteller und modellhafter Untersuchungsmethoden.....	133
9.2 Anwendbarkeit der Methoden unter stadtplanerischen Gesichtspunkten.....	136
9.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Untersuchungsgebiete.....	137
9.4 Stadtklimatische und human-biometeorologische Verbesserungspotentiale kleinräumiger Stadtstrukturen.....	138
11 Schlußbetrachtung.....	146
12 Zusammenfassung/Summary.....	148
Literaturverzeichnis.....	152
Anhang	
Beschreibung der Untersuchungsgebiete.....	I-VI
Danksagung	
Lebenslauf	

Abbildungsverzeichnis:	Seite:
Abb. 1: Schematische Darstellung der atmosphärischen Grenzschicht im Bereich einer Großstadt (KUTTLER 1997, verändert nach HELBIG 1987)	4
Abb. 2: Schematische Darstellung von verschiedenen Maßstabsebenen in städtischen Siedlungsräumen (verändert nach WICKOP et al. 1998)	6
Abb. 3: Verminderung der langwelligen Ausstrahlung (E) in Abhängigkeit der Horizontüberhöhung (α) durch Häuserfronten (KUTTLER 1993 nach GEIGER 1961)	11
Abb. 4: Das thermische Verhalten verschiedener Elemente städtischer Baukörper im Tagesgang (nach WEISCHET et al. 1977)	12
Abb. 5: Thermoisoplethendiagramm der Lufttemperaturdifferenzen [K] zwischen einer Innenstadtstation und einer Freilandstation in Düsseldorf; Meßperiode: 12.01.1993 - 11.01.1994 (KUTTLER 1997)	16
Abb. 6: Die Komponenten im Wärmehaushalt des Menschen (VDI - Richtlinie 3787, Blatt 2 1998 nach JENDRITZKY et al. 1990)	19
Abb. 7: Schematische Darstellung des Untersuchungskonzeptes	31
Abb. 8: Photo der mobilen Meßeinrichtung (Eigentum des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg); (Photo: B. Bauer)	34
Abb. 9: Strahlungsgalgen mit Pyranometer und Pyrgeometer (Photo B.Bauer)	36
Abb. 10: Landnutzungsverteilung im Stadtgebiet von Leipzig (STADT LEIPZIG 1995)	48
Abb. 11: Isoplethendiagramme der Lufttemperatur (wöchentliche Stundenmittel) an der Umlandstation Schkeuditz für die Jahre 1996 und 1997	55
Abb. 12: Isoplethendiagramme der Lufttemperaturdifferenzen (gebildet aus wöchentlichen Stundenmittel) zwischen Leipzig-Grünau und Schkeuditz sowie Leipzig-Volkmarshausen und Schkeuditz für 1997	57
Abb. 13: Isoplethendiagramme der Lufttemperaturdifferenzen (gebildet aus wöchentlichen Stundenmittel) zwischen Leipzig- Mariannenpark und Schkeuditz sowie Leipziger Aue Nord und Schkeuditz für 1997	58
Abb. 14: Tagesgang Globalstrahlung, gemessen an der Dachstation des Umweltforschungszentrums (Höhe ca. 26m über Grund) vom 11.8.97 bis 13.8.97	63
Abb. 15: Tagesgang Lufttemperatur in 2 m Höhe, gemessen an der Umlandstation Schkeuditz und den Stadtstationen Leipzig-Volkmarshausen und Leipzig-Mariannenpark vom 11.8.97 bis 13.8.97	64
Abb. 16: Tagesgang relative Luftfeuchte in 2 m Höhe, gemessen an der Umlandstation Schkeuditz und den Stadtstationen Leipzig-Volkmarshausen und Leipzig-Mariannenpark vom 11.8.97 bis 13.8.97	65

Abb. 17: Tagesgang Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe, gemessen an der Umlandstation Schkeuditz und den Stadtstationen Leipzig-Volkmarsdorf und Leipzig-Mariannenpark vom 11.8.97 bis 13.8.97	66
Abb. 18: Korrelation aller gemessenen Werte von PET und PMV (n=827)	68
Abb. 19: Korrelation der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) mit der Lufttemperatur (n=827)	69
Abb. 20: Korrelation der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) mit der Lufttemperatur aufgeteilt nach besonnten und beschatteten Standorten (n=773)	70
Abb. 21: Korrelation der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) mit der mittleren Strahlungstemperatur (n=827)	72
Abb. 22: Korrelation der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) mit der mittleren Strahlungstemperatur für alle Wertepaare, die bei Lufttemperaturen über 18 °C gemessen wurden (n=739)	72
Abb. 23: Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen über Asphalt- und Rasenflächen (Leipzig Festwiese; mobile Messungen am 12.08.97)	75
Abb. 24: Thermalbildaufnahme einer Asphaltdecke;	77
Abb. 25: Thermalbildaufnahme einer Rasenfläche;	77
Abb. 26: Thermalbildaufnahme einer Feinschotterdecke;	78
Abb. 27: Thermalbildaufnahme einer Kopfsteinpflasterdecke;	78
Abb. 28: Thermalbildaufnahme eines südexponierten Innenhofbereiches in Leipzig-Grünau	81
Abb. 29: Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen vor unterschiedlich exponierten Fassaden in Straßenschluchten einer gründerzeitlichen Blockbebauung (Anhang Karte 1) (Leipzig-Volkmarsdorf; mobile Messungen am 11.08.97)	83
Abb. 30: Thermalbildaufnahme einer nordexponierten Hausfront in einer Straßenschlucht in Leipzig-Volkmarsdorf	86
Abb. 31: Thermalbildaufnahme einer südexponierten Hausfront in einer Straßenschlucht in Leipzig-Volkmarsdorf	86
Abb. 32: Thermalbildaufnahme einer Straßenschlucht mit einer nord- und einer südexponierten Hausfront in Leipzig-Volkmarsdorf	87
Abb. 33: Thermalbildaufnahme einer südexponierten Hausfront in Leipzig-Reudnitz ohne Fassadenbegrünung	89
Abb. 34: Thermalbildaufnahme einer südexponierten Hausfront mit Fassadenbegrünung	89

Abb. 35:	Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen unter Einzelbäumen, in einer Baumgruppe und in einem städtischen Wald (Leipziger Auwald „Nonne“ am 06.08.97; Baumgruppe: Mariannenpark 21.08.96; Einzelbäume: Festwiese 12.08.97)	92
Abb. 36:	Thermalbildaufnahme einer parkähnlichen Innenhofgestaltung mit Baumgruppen („Meyersche Häuser“ Leipzig-Kleinzschocher)	94
Abb. 37:	Thermalbildaufnahme von Einzelbäumen mit Schattenwurf über einer Schotterfläche (Standort Leipzig-Festwiese)	94
Abb. 39:	Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen in einem Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau (GR) (Anhang Karte 2); (Mobile Messungen am 19.08.96)	97
Abb. 40:	Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen in einem Innenhof einer gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf (V) (Anhang Karte 3) (Mobile Messungen am 20.08.96)	100
Abb. 41:	Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen in einem Innenhof einer gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Kleinzschocher (Anhang Karte 4) (mobile Messungen am 13.08.96)	102
Abb. 42:	Kurz- und langwelliger Strahlungshaushalt, mittlere Strahlungstemperatur und Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) gemessen in einer Parkanlage mit angrenzender Bebauung (Anhang Karte 5) (Leipzig Mariannenpark; Mobile Messungen am 21.08.96)	105
Abb. 43:	Berechnung der Globalstrahlung am 19.08.96 zu verschiedenen Tageszeiten in einem Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau	113
Abb. 44:	Horizonteinengung durch seitliche Bebauung am Beispiel von Meßpunkt 2 und 4 des untersuchten Innenhofes der Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau	115
Abb. 45:	Berechnung der Globalstrahlung am 20.08.96 zu verschiedenen Tageszeiten in einem Innenhöfen und Straßenschluchten einer Gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf	117
Abb. 46:	Horizonteinengung durch seitliche Bebauung am Beispiel eines Innenhofes (Hofmitte) und einer Straßenschlucht in einer Gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf	119
Abb. 47:	Windfeldberechnung (Vektorfelder) für den Untersuchungsstandort Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau für 2,5 m über Grund	123
Abb. 48:	Windgeschwindigkeit in % des Einstromwertes (Skalarfelder) für einen Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau	124
Abb. 49:	Windfeldberechnung (Vektorfelder) für den Untersuchungsstandort Gründerzeitliche Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf	127
Abb. 50:	Windgeschwindigkeit in % des Einstromwertes (Skalarfelder) für einen Innenhof einer Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf	128

Tabellenverzeichnis:	Seite:
Tab. 1: Klimatische Unterschiede zwischen Stadt und Umland (Auszug aus: BAUMÜLLER und HOFFMANN 1993)	8
Tab. 2: Thermische Bewertung nach PMV (Predicted Mean Vote) und PET (Physiological Equivalent Temperature); (MAYER und MATZARAKIS 1997; JENDRITZKY et al. 1979)	42
Tab. 3: Untersuchungsstandorte der mobilen meteorologischen Meßkampagnen	51
Tab. 4: Lufttemperaturdaten und Extremwerttage der Klimastationen in 1996 und 1997	56
Tab. 5: Korrelationskoeffizienten ausgewählter meteorologischer Größen mit den human-biometeorologischen Bewertungsgrößen PET und PMV	68
Tab. 6: Mikrometeorologische Bedingungen am 12.08.97 über einer Asphaltfläche (Abb. 24) und einer Rasenfläche (Abb. 25) gegen 15:00 Uhr (MEZ)	79
Tab. 7: Mikrometeorologische Bedingungen am 11.08.97 vor einer nord-exponierten Hausfront (Abb. 30) und einer südexponierten Hausfront (Abb. 31) (Gründerzeitliche Blockbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf) gegen 13:00 (MEZ)	87
Tab. 8: Mikrometeorologische Bedingungen in einer Baumgruppe (vgl. Abb. 36) am 13.08.97 um 13:10 Uhr und im Bereich von Einzelbäumen (vgl. Abb. 37) am 12.08.97; Meßpunkt besonnt. 13:45 Uhr; Meßpunkt beschattet 15:00 Uhr (alle Zeitangaben in MEZ)	95
Tab. 9: Lufttemperatur, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit in 2m Höhe am 21.08.96 Mariannenpark mit angrenzender Bebauung; Information zu Abbildung 42 (vgl. Anhang Karte 5)	106
Tab. 10: Vergleich Modellierung und mobile Messungen der Globalstrahlung am 19.08.96 in einem Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig Grünau (vgl. Anhang; Karte 2 und Abb. 39)	107
Tab. 11: Vergleich Modellierung und Messungen am 20.08.96 in einem Innenhof einer Gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf (vgl. Anhang Karte 3; und Abb. 40)	118
Tab. 12: Angaben über Windgeschwindigkeiten ausgewählter Klimastationen und Vergleich von Modellierung (MISKAM) und mobilen Messungen am 19.08.96 in einem Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau	125
Tab. 13: Angaben über Windgeschwindigkeiten ausgewählter Klimastationen und Vergleich von Modellierung (MISKAM) und mobilen Messungen am 19.08.96 in einem Innenhof einer Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf	129

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen:

A:	Wärmestrahlung der Atmosphäre (in W)
a_k :	Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung
a_l :	Absorptionskoeffizient für langwellige Strahlung
c_p :	spezifische Wärme bei konstantem Druck ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
D:	diffuse Sonnenstrahlung (in W)
e:	Dampfdruck in hPa
E:	Wärmestrahlung der Umschließungsflächen (in W)
E_{KM} :	Wärmestrahlung des Menschen (in W)
I:	direkte Sonnenstrahlung (in W)
Icl:	Wärmedurchgangswiderstand (in clo)
K_i :	Kurzwellige (solare) Strahlungsflüsse in $W \cdot m^{-2}$
KMM:	Klima-Michel-Modell
KW-E:	Kurzwellige Strahlung aus dem östlichen Halbraum
KW-N:	Kurzwellige Strahlung aus dem nördlichen Halbraum
KW-O:	Kurzwellige Strahlung aus dem oberen Halbraum
KW-S:	Kurzwellige Strahlung aus dem südlichen Halbraum
KW-U:	Kurzwellige Strahlung aus dem unteren Halbraum
KW-W:	Kurzwellige Strahlung aus dem westlichen Halbraum
L_i :	Langwellige (terrestrische) Strahlungsflüsse in $W \cdot m^{-2}$
L_v :	latente Verdunstungswärme von Wasser ($J \cdot kg^{-1}$)
LW-E:	Langwellige Strahlung aus dem östlichen Halbraum
LW-N:	Langwellige Strahlung aus dem nördlichen Halbraum
LW-O:	Langwellige Strahlung aus dem oberen Halbraum
LW-S:	Langwellige Strahlung aus dem südlichen Halbraum
LW-U:	Langwellige Strahlung aus dem unteren Halbraum
LW-W:	Langwellige Strahlung aus dem westlichen Halbraum
M:	Gesamtenergieumsatz (Metabolische Rate) (in W)
MEMI:	Münchener Energiebilanz-Modell für Individuen
MP:	Meßpunkt
p:	Luftdruck in hPa
PET:	Physiologisch Äquivalente Temperatur (in °C)

PMV:	Predicted Mean Vote
Q^* :	Strahlungsbilanz (in W)
Q_H :	Fluß fühlbarer Wärme (Konvektion) (in W)
Q_L :	Fluß latenter Wärme (Wasserdampfdiffusion) (in W)
Q_{Re} :	Wärmetransport über Atmung (in W)
Q_{Sw} :	Fluß latenter Wärme (Verdunstung von Schweiß) (in W)
R:	Reflexstrahlung, kurzweilig (in W)
S_{Str} :	mittlere Strahlungsflußdichte in $W \cdot m^{-2}$
T_a :	Lufttemperatur in $^{\circ}C$
T_{eq} :	Äquivalenttemperatur in $^{\circ}C$
T_{mrt} :	mittlere Strahlungstemperatur in $^{\circ}C$
UBL:	Urban Boundary Layer
UCL:	Urban Canopy Layer
VDI:	Verein Deutscher Ingenieure
W:	Mechanische Leistung (in W)
W_i :	Wichtungsfaktor
σ :	Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)
ε_p :	Emissionskoeffizient für langwellige Strahlung

1 Einleitung

Stadtklimatologische und human-biometeorologische Fragestellungen sind ein fester Bestandteil von stadtökologischer Forschung und ökologisch orientierter Stadtplanung. Eine Vielzahl von wissenschaftlichen Aktivitäten an Universitäten, Forschungseinrichtungen, Umweltbehörden und Planungsbüros unterstreichen diese integrative stadtökologische Bedeutung der Stadtklimatologie. Die Verankerung klimatischer Belange in gesetzlichen Festlegungen wie dem Baugesetzbuch und UVP-Gesetz sowie die Bereitstellung stadtklimarelevanter VDI-Richtlinien sind ebenfalls ein Beleg für die Relevanz stadtklimatologischer Fragestellungen in der Stadtplanung. Mit dem Entwurf der VDI-Richtlinie „Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2, 1998) ist zusätzlich ein Instrumentarium bereitgestellt worden, das es ermöglicht human-biometeorologische Belange in der Stadtplanung stärker zu berücksichtigen.

Viele stadtklimatologische Arbeiten belegen, daß sich der urbane Raum aus einem Mosaik von Mikroklimaten zusammensetzt, die durch die Wechselwirkungen zwischen Stadt und Umland und durch die Anordnung von Baukörper-, Vegetations- und Freiflächenstrukturen geprägt sind. Da die Gestaltung und Beschaffenheit von Oberflächenstrukturen und die Meteorologie der bodennahen Luftschichten in einem engen kausalen Zusammenhang stehen, ist für human-biometeorologische Fragestellungen besonders der Bereich zwischen dem Boden und dem mittleren Dachniveau von Bedeutung. Ein hoher Versiegelungsgrad, eine ungünstige Anordnung von Gebäuden oder eine fehlende Vegetationsausstattung kann Ursache dafür sein, daß für den Menschen thermophysiologisch ungünstige Witterungsbedingungen noch verstärkt werden.

Es entsteht ein Wechselspiel zwischen einem durch die vielfältigen menschlichen Aktivitäten geprägtem Stadtklima und den human-biometeorologischen Bedingungen im Lebensraum Stadt. Gerade deshalb gehört es zu den Aufgaben von stadtklimatologischen Arbeiten, diese Wechselwirkung zwischen Stadtgestaltung und Stadtklima zu analysieren und Vorschläge für klimaökologische Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Jeder Siedlungsraum verfügt über Verbesserungspotentiale, die zu einer Minderung stadtklimatischer Konflikte beitragen könnten.

2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die räumliche und zeitliche Variabilität mikrometeorologischer Bedingungen in verschiedenen gestalteten Stadtstrukturen an Beispielen in der Stadt Leipzig zu untersuchen und unter human-biometeorologischen Aspekten zu bewerten. Die Untersuchungsschwerpunkte beziehen sich auf den thermischen Wirkungskomplex während sommerlicher Strahlungswetterlagen, um Extremsituationen thermischer Wärmebelastung in Siedlungsräumen zu erfassen. Methodisch steht die Verknüpfung von experimentellen und modellhaften Untersuchungsmethoden zur mikrometeorologischen Analyse und Bewertung von kleinräumigen Stadtstrukturen im Vordergrund.

Aus der Themenstellung und Zielsetzung lassen sich folgende Fragestellungen ableiten, zu deren Beantwortung die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten möchte:

- Wie groß ist der Einfluß von meteorologischen Parametern auf thermophysiologische Bedingungen?
- Welchen Einfluß haben vertikale und horizontale Umgebungsflächen von verschiedenen Stadtstrukturen auf die mikrometeorologischen Bedingungen und damit auf den Wärme- und Energiehaushalt des Menschen?
- Sind die eingesetzten experimentellen und modellhaften Untersuchungsmethoden kompatibel und für eine Anwendung unter stadtplanerischen Gesichtspunkten geeignet?
- Welche stadtklimatischen Verbesserungsvorschläge lassen sich aus den durchgeführten Untersuchungen ableiten und sind diese übertragbar auf andere Untersuchungsräume?

3 Grundlagen mikroskaliger Stadtmeteorologie

Einleitend ist es notwendig darauf hinzuweisen, daß der Oberbegriff „Stadtklimatologie“ oft sehr unscharf verwendet wird. In der Literatur ist es allgemein üblich, auch Untersuchungen mit Fallstudiencharakter, der „Stadtklimatologie“ zuzuordnen, obwohl in diesen Fällen der Begriff der „Stadtmeteorologie“ vielfach zutreffender ist (KERSCHGENS 1987). Da der Begriff der „Stadtklimatologie“ in der Literatur sehr fest verankert ist, wird auch diese Arbeit trotz Fallstudiencharakter sowohl der „Stadtmeteorologie“, als auch der „Stadtklimatologie“ zugeordnet.

Die World Meteorological Organisation (WMO) definierte 1981 den Begriff „Stadtklima“ unter dem Gesichtspunkt der Klimamodifikation, hervorgerufen durch Bebauung und menschliche Aktivitäten:

„Das Stadtklima ist das durch die Wechselwirkung mit der Bebauung und deren Auswirkungen (einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen) modifizierte Klima.“ (SCHIRMER 1988)

Eine weitere Definition zum Begriff „Stadtklima“, die 1988 von der Arbeitsgruppe „Bioklima in der Stadt“ im Fachausschuß „Biometeorologie“ der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft aufgestellt wurde, beschäftigt sich mit der Frage wie das Leitbild eines „idealen Stadtklimas“ zu formulieren ist. Diese Idealvorstellung von „Stadtklima“ unterstreicht die Bedeutung der kleinräumigen Betrachtung human-biometeorologischer Fragestellungen.

„Ideales Stadtklima ist ein räumlich und zeitlich variabler Zustand der Atmosphäre in urbanen Bereichen, bei dem sich möglichst keine anthropogen erzeugten Schadstoffe in der Luft befinden und den Stadtbewohnern in Gegendnähe (charakteristische Länge: 150m) eine möglichst große Vielfalt an Atmosphärenzuständen (Vielfalt der urbanen Mikroklimata) unter Vermeidung von Extremen geboten wird.“ aus: (MAYER 1990)

Zur weiteren thematischen Abgrenzung dieser Arbeit ist es hilfreich kurz auf die Gliederung der Stadtatmosphäre einzugehen, die in Abbildung 1 schematisch dargestellt ist.

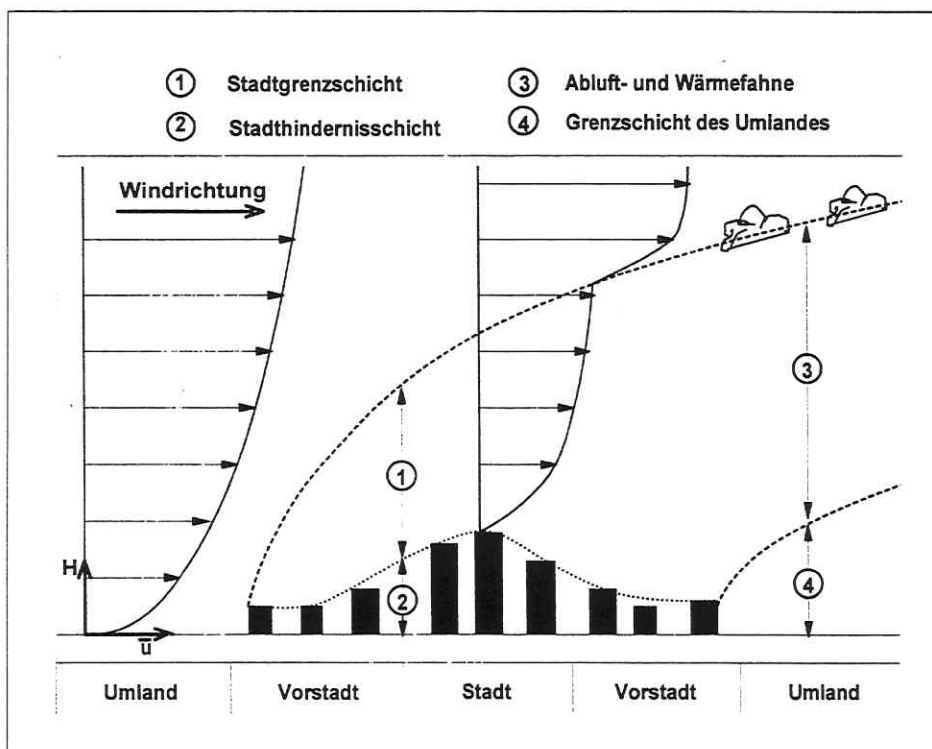


Abb. 1: Schematische Darstellung der atmosphärischen Grenzschicht im Bereich einer Großstadt (KUTTLER 1997, verändert nach HELBIG 1987)

Die vertikale Gliederung der Stadtatmosphäre läßt sich nach KUTTLER (1997) und OKE (1987) in zwei Schichten einteilen,

- die Stadtgrenzschicht (Urban Boundary Layer (UBL)), die sich über dem mittleren Dachniveau der Stadt ausbildet und dem Meso-scale zugeordnet ist und
- die Stadthindernisschicht (Urban Canopy Layer (UCL)), die sich vom Boden bis ins mittlere Dachniveau erstreckt und dem Micro-scale zugeordnet ist.

Während die Stadtgrenzschicht durch die Stadt als Ganzes beeinflusst wird, ist die Stadthindernisschicht durch die Anordnung von Gebäude-, Freiflächen- und Vegetations-

strukturen geprägt und kann durch eine große Variation an Mikroklimaten auf engstem Raum gekennzeichnet sein.

Eingebettet in die übergeordnete Wetterlage und in regionalklimatische Begebenheiten (z.B. Relief, Exposition, Höhenlage) beeinflusst die Gestaltung der Stadthindernisschicht mit ihren vertikalen (z.B. Häuserfassaden) und horizontalen (z.B. Straßen) Umgebungsflächen direkt die mikroklimatischen Bedingungen. Es entsteht ein eigenes meteorologisches Regime, das durch veränderte Rauigkeitselemente und Oberflächen-Energiebilanzen kontrolliert wird. Auf engstem Raum ist deshalb eine starke Variation an meteorologischen Elementen zu finden, die durch das Gefüge von städtischen Strukturelementen (Gebäudeanordnung, Gebäudehöhe, Gebäudeausrichtung, Straßenführung, Straßenbreite, Oberflächenart, Vegetationsausstattung usw.) geprägt ist (KUTTLER 1997; BECKRÖGE 1990; OKE 1987). Entsprechend der Themenstellung beziehen sich alle Untersuchungen dieser Arbeit auf die Stadthindernisschicht.

Die Meteorologie innerhalb der Stadthindernisschicht ist ein äußerst komplexes Gebilde, das kaum restlos aufgelöst werden kann. Allein der Versuch, über Strukturen im Stadtbereich eine Abschätzung der klimatologischen Auswirkungen zu erhalten, erscheint einigermaßen sinnvoll (BECKRÖGE 1990).

3.1 Städtische Raumeinheiten

Ausgangspunkt der räumlichen Differenzierung von klimatischen und meteorologischen Prozessen ist eine Einordnung der Fragestellung in die zugehörige Maßstabsebene. In Abbildung 2 ist eine schematische, hierarchisch aufgebaute Darstellung von verschiedenen Maßstabsebenen in städtischen Siedlungsräumen graphisch umgesetzt.

Die Übergänge zwischen den Maßstabsebenen sind ebenso wie die zugehörigen klimatischen und meteorologischen Prozesse fließend und deshalb nicht exakt abgrenzbar. Zwischen den Maßstabsebenen besteht eine enge wechselseitige Beziehung. Das Gebäudeklima hat Einfluß auf das Innenhofklima, welches das Klima der verdichteten Stadtbebauung prägt und dieses bildet zusammen mit anderen städtischen Klimazonen einen Klimatopverbund in einem städtischen Siedlungsraum. Das gleiche gilt für den Einfluß vom Klimatopverbund einer Stadt hin zum Gebäudeklima.

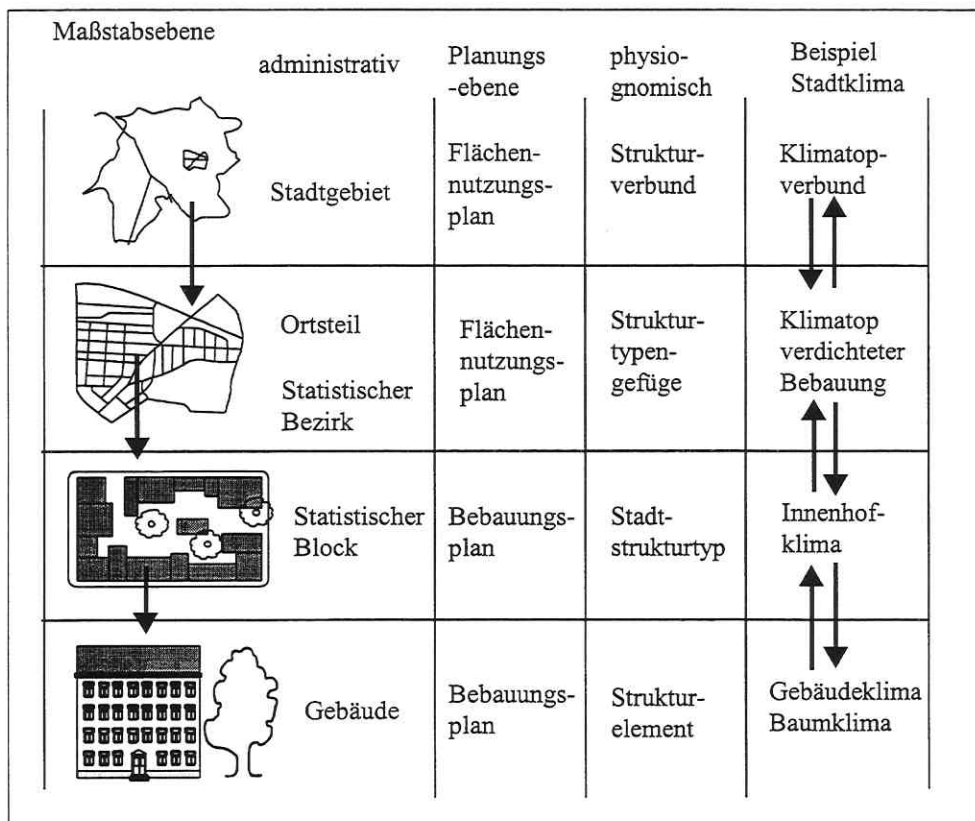


Abb. 2: Schematische Darstellung von verschiedenen Maßstabsebenen in städtischen Siedlungsräumen (verändert nach WICKOP et al. 1998)

Der in Abbildung 2 verwendete Begriff Klimatop ist nach VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 (1994), wie folgt definiert: „Klimatope bezeichnen räumliche Einheiten, in denen die mikroklimatisch wichtigsten Faktoren relativ homogen und die Auswirkungen wenig unterschiedlich sind“

In der Literatur sind Klimatope häufig der Maßstabsebene von physiognomisch ähnlichen Stadtteilen (z.B. Klimatop verdichteter Bebauung) zugeordnet (z.B. BAUMÜLLER et al. 1992; STOCK 1992; VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1, 1994). Für viele mikrometeorologischen Fragestellungen ist jedoch eine stärkere Auflösung der städtischen Raumeinheiten unter funktionellen und strukturellen Gesichtspunkten erforderlich. Die maßstabsmäßige Zugehörigkeit dieser Arbeit läßt sich in Anlehnung an Abbildung 2 in der Maßstabsebene von

Stadtstrukturtypen (kleinräumigen Stadtstrukturen) und Strukturelementen einordnen. Deshalb ist es notwendig im folgenden kurz die Begriffe Stadtstrukturtypen, Baukörperstrukturen und Vegetationsstrukturen zu definieren, wie sie innerhalb dieser Arbeit Verwendung finden.

3.1.1 Stadtstrukturtypen

Stadtstrukturen sind nach WICKOP et al. (1998) „*Flächen physiognomisch einheitlicher Ausprägung, im städtischen Bereich überwiegend gekennzeichnet durch eine charakteristische Konfiguration der Bebauung und der Freiflächen. Der Strukturtyp ist weitgehend homogen bezüglich Art und Dichte der Bebauung und der Freiflächenausprägung (insbesondere Anteil versiegelter Flächen, Vegetations- und Gehölzanteil)*“.

Als Beispiele für Stadtstrukturtypen, die innerhalb dieser Arbeit auch als kleinräumige Stadtstrukturen bezeichnet werden, lassen sich stellvertretend gründerzeitliche Blockbebauung, Großwohnsiedlung oder Einzelhausbebauung nennen. Auch zusammenhängende Grünflächen wie Parkanlagen, städtische Wälder oder Kleingärten zählen zu den Stadtstrukturtypen. Eine Übersicht über die Gliederungsmöglichkeit von Stadtstrukturtypen bietet WICKOP et al. (1998). Jeder Stadtstrukturtyp setzt sich aus einer unterschiedlichen Kombination und Dichte von verschiedenen technogenen und natürlichen Strukturelementen zusammen, die unter den Begriffen Vegetations- und Baukörperstrukturen beschrieben werden.

3.1.2 Vegetationsstrukturen

Für die natürlichen oder biogenen Strukturelemente innerhalb von Stadtstrukturen wird der Begriff Vegetationsstruktur verwendet. Eine Parkanlage als Stadtstrukturtyp kann aus mehreren verschiedenen Formen von Vegetationsstrukturen gestaltet sein, z.B. Einzelbäumen, Baumgruppen, Sträuchern; Rasenflächen usw., aber auch in Stadtstrukturen wo die Bebauung eine dominierende Rolle übernimmt, sind Vegetationsstrukturen wie Straßenbäume, Rasenflächen und Fassadenbegrünung anzutreffen die mikroklimatisch von großer Bedeutung sind.

3.1.3 Baukörperstrukturen

Der Begriff der Baukörperstruktur wird innerhalb dieser Arbeit für die horizontale und vertikale Anordnung von technogenen Strukturelementen verwendet. Als Beispiele technogener Strukturelemente können Parkplätze, Straßen, Hausfassaden und daraus resultierend Straßenschluchten und Innenhöfe genannt werden, wie sie in den verschiedenen Stadtstrukturen in unterschiedlicher Anordnung und Dichte zu finden sind und zur Bodenversiegelung und Horizonteinengung beitragen.

Da die Meteorologie der bodennahen Luftschicht und die Gestaltung und Beschaffenheit der Baukörperstrukturen in einer sehr engen Beziehung zueinander stehen, ist es notwendig Prozesse und deren Abhängigkeiten aufzuzeigen, die zu einer Modifikation der mikroklimatischen Verhältnisse beitragen.

3.2. Klimamodifikation durch städtische Bebauung

Eine Auswahl der wichtigsten klimatischen Unterschiede zwischen Stadtgebieten und dem Stadtumland, wie sie vielfach untersucht wurden ist in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Element	Bezugsgröße	Änderung gegenüber dem Umland
Strahlung	Globalstrahlung UV-Strahlung	bis 20 % weniger Sommer: bis 5 % weniger Winter: bis 30 % weniger
	Sonnenscheindauer	bis 15 % weniger
Lufttemperatur	Jahresmittel	bis 1,5 K höher
	nächtliches Minimum	bis 12 K höher
	Heiztage	bis 10 % weniger
	Dauer der Frostperiode	bis 25 % kürzer
Luftfeuchte	Bodeninversion	kaum vorhanden im Stadtbereich
	Jahresmittel (relative Feuchte)	Sommer: bis 10 % weniger Winter: bis 2 % weniger
Verdunstung	Mittelwert	bis 60 % geringer
Windgeschwindigkeit	Jahresmittel	bis 30 % niedriger
	Böen	bis 20 % niedriger
	Windstille (Calmen)	bis 20 % häufiger

Tab. 1: Klimatische Unterschiede zwischen Stadt und Umland (Auszug aus: BAUMÜLLER und HOFFMANN 1993)

Die wesentlichen räumlichen und zeitlichen Veränderungen zeigen sich beim Strahlungshaushalt, bei der Verteilung der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, der Verdunstung und der Windgeschwindigkeit.

Stadtklimatische Erscheinungen sind grundsätzlich kein Schönwetterphänomen, mikroklimatische Unterschiede sind durch die Bebauungsstruktur immer gegeben, allerdings lassen sich bestimmte Situationen ausweisen, bei denen diese mikroklimatischen Unterschiede besonders ausgeprägt sind. BECKRÖGE (1990) unterscheidet dabei zwei Grundsituationen:

- Prägung des Mikroklimas durch die Stadtgeometrie im Sinne eines „Rauhigkeitssprunges“ bei Wetterlagen mit höheren Windgeschwindigkeiten und weniger ausgeprägtem Tagesgang der Strahlungskomponenten.
- Dominanz des veränderten Energieumsatzes auf das Mikroklima während windschwacher Strahlungswetterlagen.

Autochtone Strahlungswetterlagen, charakterisiert durch maximalen Energieumsatz verbunden mit minimalem Austausch, zeigen in Bezug auf städtische Klimamodifikation die wohl deutlichsten Ausprägungen sowohl im Stadt-Umland-Vergleich als auch innerhalb der Stadt mit ihren vielfältigen Strukturen (KUTTLER 1997; JENDRITZKY 1991; MAYER und SUPPAN 1990; BRÜNDL et al. 1987). Auch unter dem Aspekt der Human-Biometeorologie sind diese Wetterlagen von großer Bedeutung (JENDRITZKY 1991; HÖPPE und MAYER 1987), da sie mit sehr hohen Lufttemperaturen und Strahlungswerten verbunden sind. Die Untersuchungen dieser Arbeit beziehen sich deshalb vorrangig auf die mikroklimatischen Bedingungen während windschwacher Strahlungswetterlagen um Extremsituationen zu erfassen.

3.2.1 Energie- und Strahlungshaushalt

Die entscheidenden Prozesse der städtischen Klimamodifikation finden durch eine Veränderung des Energiehaushaltes statt, dessen Bilanz sich hauptsächlich aus den folgenden Komponenten zusammensetzt (KUTTLER 1997):

- Kurz- und langwellige Strahlungsflüsse (W/m^2)
- Latente Wärme flu ß dichte (W/m^2)
- Sensible Wärme flu ß dichte (W/m^2)
- Bodenwärmeflu ß dichte (inkl. Gebäude und Untergrund) (W/m^2)
- Anthropogene Energie flu ß dichte (W/m^2)

Die Luftverunreinigungen in der Stadtgrenz- und Stadthindernisschicht führen zu einer Abschwächung der Globalstrahlung (siehe Tab.1) und zu einer Zunahme der indirekten Strahlung im Verhältnis zur direkten Strahlung. Im Gegensatz dazu erhöht sich durch die Luftverunreinigungen die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung, die zur Erwärmung der Stadtatmosphäre beiträgt.

Die wesentlichen Veränderungen der kurzwelligen Strahlungsflüsse sind in der Stadthindernisschicht durch die Baukörperstrukturen gegeben. Der Schattenwurf von Gebäuden ist der Faktor, der die solare Einstrahlung im Stadtgebiet am stärksten beeinflusst (RATH 1988) und so für eine hohe Variabilität von kurzwelligen Strahlungsintensitäten sorgt. Des weiteren kann die größere Oberfläche von Bebauungsstrukturen zu einer Erhöhung der Absorption kurzwelliger Strahlung beitragen. TERJUNG und LOUIE (1973) (in DOSCH 1993) haben berechnet, daß Hochhausbauten gegenüber der nicht bebauten Ebene mehr als das sechsfache an Einstrahlung absorbieren können, so daß lokal ein entsprechender Überschuß an Wärmeenergie für die Stadtluft zur Verfügung steht. Ebenso kann eine Mehrfachreflexion (Strahlungsfalle) innerhalb von Baukörperstrukturen die Absorption kurzwelliger Strahlungsflüsse erhöhen.

Neben der Exposition von Oberflächen spielt die Art der Oberfläche mit der jeweiligen Absorptions- und Reflexionsfähigkeit eine große Rolle für den kurz- und langwelligen Strahlungshaushalt. Eine Auflistung von Strahlungseigenschaften und thermischem Verhalten von typischen Baumaterialien und natürlichen Oberflächen würde an dieser Stelle zu weit führen, weshalb auf weiterführende Literatur verwiesen wird (VDI-Richtlinie 3789, Blatt 2, 1994; KUTTLER 1993; OKE 1990 und HELBIG 1987).

Grundsätzlich gilt, daß Baumaterialien mit einer hoher Wärmeübergangszahl zu einer stärkeren Speicherung sensibler Wärme beitragen. Oberflächen mit geringen Reflexionseigenschaften fördern die Absorption kurzwelliger Strahlung, was mit erhöhten Oberflächentemperaturen verbunden ist. Die langwellige Strahlung (emittierte Wärme-

strahlung) eines Baukörpers, wird dann durch seine Oberflächentemperatur und seinen effektiven langwelligen Emissionsgrad bestimmt.

Die langwellige Einstrahlung auf die Bodenoberfläche eines Innenhofes, setzt sich deshalb nur noch zum Teil aus der atmosphärischen Gegenstrahlung zusammen. Einen großen Anteil an der eingehenden Wärmestrahlung haben die vertikalen Umgebungsflächen (RATH 1988), weshalb innerhalb von Baukörperstrukturen oftmals höhere langwellige Strahlungsflüsse zu finden sind. Die Gesamtausstrahlung (vgl. Abb. 3) und damit die Energieabgabe an die Stadtgrenzschicht wird zusätzlich durch die Horizonteinengung erheblich beeinflusst.

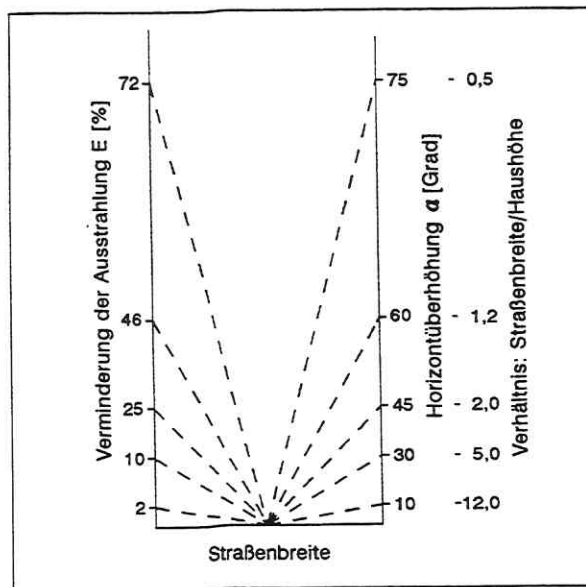


Abb. 3: Verminderung der langwelligen Ausstrahlung (E) in Abhängigkeit der Horizontüberhöhung (α) durch Häuserfronten (KUTTLER 1993 nach GEIGER 1961)

Die langwellige Ausstrahlung an der Bodenoberfläche vermindert sich in Abhängigkeit von der Horizontüberhöhung (Herabsetzung des Himmelssichtfaktors), was einen „Temperaturhalteeffekt“ bedingt, der in Straßenschluchten besonders hoch sein kann (KUTTLER 1993). Dieser thermische Effekt der verminderten Ausstrahlung in Baukörperstrukturen macht sich besonders während der Nachtstunden bemerkbar.

In einer zusammenfassenden Darstellung zum langwelligen Strahlungshaushalt ist in Abbildung 4 schematisch das Oberflächentemperaturverhalten von verschiedenen Struktur-

elementen in Abhängigkeit von der Oberflächenart, der Exposition und der Tageszeit dargestellt (WEISCHET et al. 1977). Straße, Plätze und Fassaden wirken durch die oben erläuterten Prozesse besonders nachts als Wärmespeicher. Auch tagsüber zählen besonnte Baukörperstrukturen auf Grund der höheren Absorptionseigenschaften zu den wärmsten Oberflächen. Rasenflächen bleiben tagsüber im Vergleich dazu relativ kühl. Bei Bäumen oder Baumgruppen ist zu berücksichtigen, daß sich die Strahlungsmaxima in den Kronenbereich verlagern, weshalb der Boden bei nächtlicher Ausstrahlung relativ warm und bei Einstrahlung am Tag durch Beschattung relativ kühl bleibt.

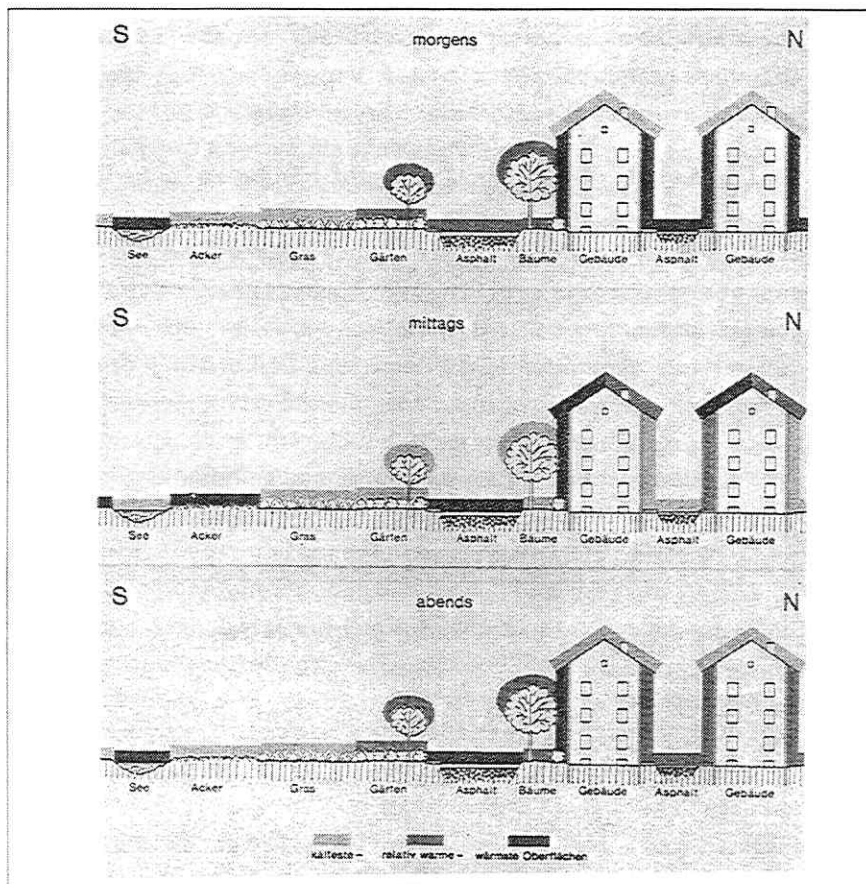


Abb. 4: Das thermische Verhalten verschiedener Elemente städtischer Baukörper im Tagesgang (nach WEISCHET et al. 1977)

Die Energie, die tagsüber durch den Strahlungshaushaltsüberschuß an der horizontalen und vertikalen Oberfläche eingeht, wird durch fühlbare und latente Wärme Flüsse an die Atmosphäre und durch Wärmeleitung in den Untergrund abgeführt. Die städtische Energiebilanz wird deshalb in erheblichem Maße auch durch die verringerte Evapotranspiration bestimmt. Ein hoher Versiegelungsgrad verbunden mit einem raschen Regenabfluß und fehlende Vegetationsausstattung führen dazu, daß innerhalb von Stadtstrukturen geringere Verdunstungsraten existieren und deshalb ein verringerter latenter Wärme fluß stattfindet. Bei fehlender Evapotranspiration wird keine Energie für den Verdunstungsvorgang benötigt, so daß diese Energie sowohl dem Bodenwärmefluß als auch für die Erwärmung der Luft in Form von fühlbarer Wärme zur Verfügung steht. Bei verdunstungsaktiven Flächen ergeben sich umgekehrte Verhältnisse, der latente Wärmestrom nimmt zu, der Bodenwärmestrom und die konvektive Wärmeabgabe verlieren an Bedeutung (KUTTLER 1997; KIESE 1995; OKE 1990; RATH 1988; GEIGER 1961). In diesem Zusammenhang spielen die Transportprozesse sensibler und latenter Wärme Flüsse, wie sie besonders über die Windgeschwindigkeit reguliert werden, eine große Rolle. Bevor im folgenden Kapitel die Modifikation der Strömungsverhältnisse in Stadtstrukturen besprochen wird, sollte noch auf die anthropogene Energieflußdichte hingewiesen werden.

Eine Besonderheit innerhalb der städtischen Energiebilanz sind anthropogene Wärmequellen, wie sie zum Beispiel durch die unterschiedlichsten Energieumwandlungsprozesse in der Industrie, beim Kfz-Verkehr, bei Hausbrand, sowie durch schlechte Wärmedämmung auftreten. Der Anteil der anthropogenen Abwärme an der Gesamtenergiebilanz ist in unseren Breitengraden besonders in Wintermonaten während der Heizperiode von Bedeutung, bei der die anthropogene Wärme produktion in Stadtregionen den Wert der natürlichen Strahlungsbilanz übersteigen kann (KUTTLER 1997; BALTRUSCH und SCHÜTZ 1988). Während strahlungsintensiven Sommermonaten mit geringerer anthropogener Wärme produktion (Hausbrand entfällt) ist dieses Verhältnis umgekehrt, der Anteil der anthropogen verursachten Abwärme an der Gesamtenergiebilanz verliert an Bedeutung.

3.2.2 Windfeld

Eine weitere wichtige stadtklimatische Komponente ist die Veränderung der Luftströmung, die in der Stadthindernisschicht besonders ausgeprägt ist. Wie in Tabelle 1 (Kap. 3.2) bereits erwähnt, ist in städtischen Siedlungsräumen, bedingt durch die größere Oberflächenrauigkeit, im Allgemeinen eine Verringerung der Windgeschwindigkeit festzustellen. Diese kann im Jahresmittel bis zu 30 % niedriger sein als im Umland. Untersuchungen von KUTTLER (1997) belegen, daß sowohl die Anzahl der Schwachwindepisoden ($u \leq 1,5$ m/s), als auch die maximale Dauer einer Episode im bebauten Bereich zunehmen.

Die städtische Bebauung beeinflusst das Windfeld auf zwei unterschiedlichen Wegen. Die Rauigkeit der Bebauung hat Auswirkungen auf die mechanische Turbulenz, während die thermische Turbulenz durch den veränderten Wärmehaushalt geprägt wird (BECKRÖGE 1990).

Das Windfeld der Stadthindernisschicht wird zunächst durch die Anströmrichtung und Windstärke über Dachniveau, also durch die übergeordneten Windverhältnisse beeinflusst. Durch die Erhöhung der Rauigkeit ergibt sich eine Vergrößerung der Schubspannung, die eine größere mechanische Turbulenz mit verringerten mittleren Windgeschwindigkeiten (siehe oben) zur Folge hat. Es entstehen je nach Bebauungs- und Vegetationsstruktur in unmittelbarer Nachbarschaft stark variierende Strömungsverhältnisse, wobei Umlenk- und Düseneffekte lokal begrenzt sogar eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit verursachen können. In Bereichen mit verringerten Windgeschwindigkeiten reduziert sich der turbulente Wärmetransport, was zu einer fehlenden Abkühlung der Oberflächen und damit über den fühlbaren Wärmestrom zur lokalen Erhöhung der Lufttemperatur beitragen kann. Unter lufthygienischen Gesichtspunkten bewirkt eine größere mechanische Turbulenz lokal zwar eine bessere Durchmischung (Wirbelbildung an Gebäuden), aber ein schneller Weitertransport, der für eine gute Durchlüftung der Stadtstruktur sorgt und eine Anreicherung von Luftschadstoffen verhindert, ist durch die geringere Strömungsgeschwindigkeit eingeschränkt (BECKRÖGE 1988).

Die thermische Turbulenz entsteht im wesentlichen durch die Wärmeabgabe der Umgebungsflächen, also durch den fühlbaren Wärmestrom. Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, können in Städten besonders bei gradientschwachen Strahlungswetterlagen Prozesse auftreten,

bei denen der Strahlungsgewinn in größerem Maße in fühlbare Wärme umgesetzt wird und dadurch thermisch induzierte Luftströmungen in Stadtgebieten stärker gefördert werden (BECKRÖGE 1988). Sich in diesem Zusammenhang einstellende Flurwinde können für eine bessere Durchlüftung des Stadtkörpers sorgen (KUTTLER 1997; BARLAG und KUTTLER 1991) und stehen in enger Beziehung zu den besonders nachts auftretenden Lufttemperaturunterschieden zwischen Stadt und Umland, wobei anzumerken bleibt, daß der meßtechnische Nachweis dieser relativ geringen Luftströmungen sehr schwierig ist.

3.2.3 Lufttemperatur- und Luftfeuchteverteilung

Die städtische Überwärmung läßt sich nicht nur an Hand der Oberflächentemperaturen, sondern auch durch die Lufttemperaturverteilung in der Stadthindernisschicht beschreiben. Die vielfach untersuchte und beschriebene positive Lufttemperaturanomalie (vgl. Tab.1) in Stadtgebieten, besser bekannt unter den Begriffen Wärmeinsel und Wärmearchipel, ist letztendlich eine Folge aus den in Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 beschriebenen meteorologischen Prozessen. Zusammenfassend lassen sich folgende Faktoren aufzählen, die zu einer Erhöhung der sensiblen Wärmeströme führen und damit zu positiven Lufttemperaturanomalien in der Stadthindernisschicht beitragen (KUTTLER 1993 und OKE 1990):

- erhöhte Absorption kurzwelliger Strahlung,
- erhöhte langwellige Gegenstrahlung,
- verringerte langwellige Ausstrahlung,
- erhöhte Speicherung sensibler Wärme,
- verminderte Evapotranspiration,
- anthropogene Wärmequellen
- und verminderter turbulenter Gesamtwärmetransport.

Die zeitliche Verteilung der städtischen Überwärmung läßt sich besonders gut mit Hilfe von Thermoisoplethendiagrammen der Lufttemperaturdifferenzen von Stadt- und Umlandstationen aufzeigen (Abb. 5).

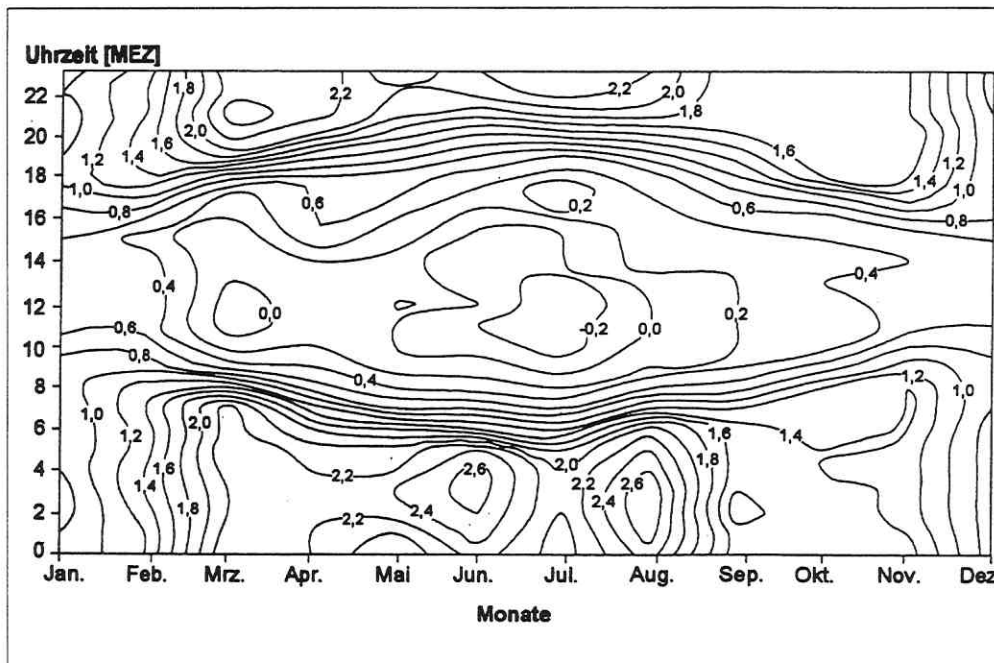


Abb. 5: Thermoisoplethendiagramm der Lufttemperaturdifferenzen [K] zwischen einer Innenstadtstation und einer Freilandstation in Düsseldorf; Meßperiode: 12.01.1993 - 11.01.1994 (KUTTLER 1997)

Der Jahresverlauf zeigt, daß die positiven Lufttemperaturanomalien, entsprechend ihrer verursachenden meteorologischen Prozesse, am intensivsten während jener Sommermonate sind, die einen hohen Anteil an windschwachen Strahlungswetterlagen aufweisen. Im Tagesverlauf ist die Wärmeinselintensität (Lufttemperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland) in Bodennähe während der Tagesstunden zwischen Stadt und Umland ausgeglichen, was zum einen an der besseren konvektiven Durchmischung tagsüber und zum anderen an der Verlagerung der Strahlungsreferenzflächen vom Straßen- ins Dachniveau liegen kann.

Während der Nachtstunden ist die Wärmeinselintensität am ausgeprägtesten, was auf die Dominanz der durch Horizont einschränkung verursachten Verringerung der langwelligen Ausstrahlung zurückzuführen ist. Zum nächtlichen Lufttemperaturminimum können zwischen dichten Bebauungsstrukturen und Freiflächen des Umlandes Lufttemperaturdifferenzen bis über 10 K auftreten (vgl. Tab.1).

In ihrer räumlichen Verteilung sind die positiven Lufttemperaturanomalien sehr stark an das Gefüge und den Verbund unterschiedlicher Stadtstrukturtypen sowie an die Topographie gebunden, weshalb häufig innerhalb der Literatur der Begriff des Wärmearchipels oder der mehrkernigen Wärmeinsel Verwendung findet. Dabei nimmt in der Regel die Überwärmung der Lufttemperatur mit der Bebauungsdichte und dem Versiegelungsgrad zu. Diese strukturräumliche Abhängigkeit der Lufttemperaturverteilung wurde in vielen stadtklimatischen Untersuchungen belegt (MÜLLER 1995; KATZSCHNER 1994; BRÜNDL et al. 1987; NAUMANN 1986; WEISCHET 1979; ERIKSEN 1976).

Innerhalb von Stadtstrukturen (z.B. in Innenhöfen oder Straßenschluchten) ist die Lufttemperaturverteilung bedingt durch kleinräumige Durchmischung wesentlich homogener. Ganz im Gegensatz zur Oberflächentemperaturverteilung, die wesentlich größere Variabilität aufweist (siehe Kap. 3.2.1). Allerdings lassen sich auch in dieser Maßstabsebene Lufttemperaturdifferenzen nachweisen, wenn auch in einer wesentlich geringeren Größenordnung als beim Stadt-Umland-Vergleich (vgl. KATZSCHNER 1994).

Wesentlich komplexer, und damit auch schwieriger zu erfassen als die Lufttemperaturverteilung, ist die Modifikation der Luftfeuchte in Stadtgebieten. Dies liegt teilweise an den gegenläufigen meteorologischen Prozessen aber auch an den verschiedenen Feuchtekenngößen die in ihrer Aussagekraft recht unterschiedlich sind (BRÜNDL et al. 1987; KIESE 1995).

Zur Erhöhung der Luftfeuchte trägt neben der anthropogenen Freisetzung von Wasserdampf durch Verbrennungsprozesse auch die durch die positive Temperaturanomalie verursachte seltenere Taubildung bei. Die geringere Evapotranspiration, bedingt durch schnellen Niederschlagsabfluß und fehlende Vegetation, führt hingegen zu einer Abnahme der Luftfeuchte in Bebauungsstrukturen.

Die in Tabelle 1 angeführte mittlere Verringerung der relativen Feuchte von bis zu 10 % im Sommer steht dabei in engem Zusammenhang mit der Lufttemperaturerhöhung, da diese direkten Einfluß auf die Kenngröße „relative Feuchte“ besitzt. Unter diesem Aspekt erscheint es sinnvoller die Feuchteverteilung mit Hilfe von Dampfdruck, absoluter oder spezifischer Feuchte vorzunehmen, da diese Kenngrößen von der Lufttemperatur unabhängiger sind (KIESE 1995; KUTTLER 1993). Innerhalb kleinräumiger Stadtstrukturen ist die Feuchteverteilung wie die Lufttemperaturverteilung recht homogen.

Die innerhalb des Kapitel 3.2 beschriebenen städtischen Klimamodifikationen sind zwangsläufig mit Auswirkungen auf human-biometeorologische Bedingungen verbunden. Hohe Lufttemperaturen, erhöhte kurz- und langwellige Strahlungsflüssen und verringerte Windgeschwindigkeiten tragen dazu bei, daß sich standortbezogen ungünstige thermophysiologische Bedingungen einstellen können.

3.3 Thermischer Wirkungskomplex

Die Human-Biometeorologie ist die Wissenschaft von den Einflüssen der atmosphärischen Umwelt auf den Menschen, wobei sich die atmosphärischen Wirkungskomplexe in drei Schwerpunktbereiche gliedern lassen (vgl. VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2, 1998; HÖPPE 1995; JENDRITZKY 1993; MAYER 1990).

- Der aktinische Wirkungskomplex bezieht sich auf die photochemischen Auswirkungen der Strahlung, insbesondere der UV-Strahlung, auf den Menschen.
- Der lufthygienische Wirkungskomplex behandelt den Einfluß der natürlichen und anthropogen geprägten Luftzusammensetzung auf den Menschen.
- Der thermische Wirkungskomplex umfaßt den Einfluß von meteorologischen Elementen auf den Wärmehaushalt des Menschen.

Obwohl die genannten Wirkungskomplexe oft in enger systemarer Beziehung stehen und jeder der genannten Bereiche innerhalb der Human-Biometeorologie eine wichtige Bedeutung hat, bleiben die weiteren Ausführungen im wesentlichen auf den thermischen Wirkungskomplex beschränkt, da dieser entsprechend der Eingangs formulierten Zielstellung ein wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist.

3.3.1 Wärmehaushalt des Menschen

Die Energiebilanz des Menschen basiert auf einem recht komplexen Regulationsmechanismus, der für einen ständigen Ausgleich zwischen Wärmebildung und Wärmeabgabe sorgt, um die Kerntemperatur des Menschen bei etwa 37 °C konstant zu halten.

Nach HÖPPE 1984 und JENDRITZKY 1990 (vgl. auch VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2, 1998) läßt sich der Wärmehaushalt des Menschen in folgender Gleichung zusammenfassen (Abb. 6):

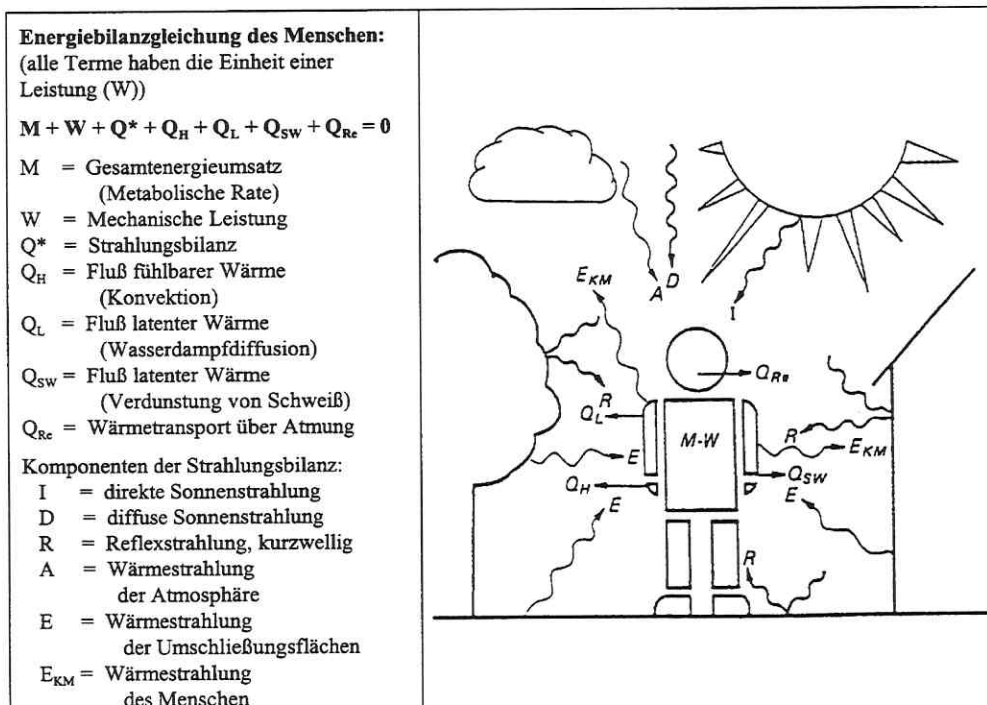


Abb. 6: Die Komponenten im Wärmehaushalt des Menschen (VDI - Richtlinie 3787, Blatt 2 1998 nach JENDRITZKY et al. 1990)

Um das thermische Gleichgewicht zu halten, muß die im Organismus des Menschen durch Stoffumsatz gebildete Wärme vollständig an die Umgebung abgegeben werden, wobei folgende nicht meteorologische Einflußfaktoren für den Energieaustausch zwischen Körper und Umgebung von Bedeutung sind:

- Der Gesamtenergieumsatz und der mechanische Wirkungsgrad sind zuständig für die innere Wärmeproduktion, die sich je nach körperlicher Aktivität unterscheidet.
- Über den Wärmedurchgangswiderstand (I_{cl} in clo; $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ Km}^2/\text{W}$) der Bekleidung kann der Mensch regulierend auf den eigenen Wärmehaushalt eingreifen.

Eine Übersicht über die verschiedenen Gesamtenergieumsätze und mechanische Wirkungsgrade bei unterschiedlichen körperlichen Aktivitäten sowie über einige Wärmedurchgangswiderstände bei verschiedenen Bekleidungsarten hat FANGER 1972 zusammengestellt, welche auch vielfach in der Literatur Anwendung fand (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2, 1998; BANTZHAFF 1994; JENDRITZKY 1990; HÖPPE 1984).

Die meteorologischen Einflußfaktoren, die den Energieaustausch zwischen Atmosphäre und dem Körper des Menschen mitbestimmen sind (vgl. Abb. 6):

- die Lufttemperatur (dominanter Einfluß auf Q_H ; Q_{Re}),
- die Luftfeuchte (dominanter Einfluß auf Q_L ; Q_{Sw} ; Q_{Re}),
- die Windgeschwindigkeit (dominanter Einfluß auf Q_H ; Q_{Sw}) und
- die kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse (beschreiben Q^*).

Die Thermoregulierung des Menschen kann unter extremen meteorologischen Umgebungsbedingungen überfordert werden und es stellen sich thermische Belastungssituationen ein.

- Niedrige Lufttemperaturen verbunden mit hohen Windgeschwindigkeiten haben Kältestreß zur Folge. Durch hohe Windgeschwindigkeiten kühlt der Körper infolge größerer Abgabe fühlbarer Wärme stärker aus.
- Hohe Lufttemperaturen in Kombination mit hoher Luftfeuchte führen zu Schwüle und damit zu Hitzestreß. Durch die hohe Luftfeuchtigkeit wird die latente Wärmeabgabe über die Schweißverdunstung eingeschränkt.
- Zum Körper eines Menschen gerichteten erhöhten kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse, in Kombination mit geringen Windgeschwindigkeiten und hohen Lufttemperaturen, verursachen Hitzestreß. Über die kurzwelligen Strahlungsflüsse kommt es zu einem hohen Energiegewinn, während die fühlbare Wärmeabgabe durch geringe Windgeschwindigkeit und hohe Lufttemperatur reduziert wird.

Aus der Aufzählung wird deutlich, daß für eine human-biometeorologischen Bewertung Kenngrößen benötigt werden, die eine Kombination verschiedener meteorologischer Bedingungen beinhalten. Da sich die Untersuchungen auf sommerliche Strahlungswetterlagen beziehen, sind im Rahmen dieser Arbeit besonders die beiden zuletzt genannten Aspekte von Bedeutung.

Die in Kapitel 3.2 angesprochenen städtischen Klimamodifikationen können Ursache dafür sein, daß thermophysiologisch ungünstige Witterungsbedingungen innerhalb der Stadt-hindernisschicht noch verstärkt werden. So ist bei Untersuchungen in München festgestellt worden, daß im Stadtzentrum Stunden mit Schwüle häufiger auftreten als im Stadtumland (BRÜNDL et al. 1987). In weiteren Untersuchungen zur Regionalisierung des Bioklimas ist belegt, daß Siedlungsräume durch eine größere Anzahl von Wärmebelastungstagen gekennzeichnet sind (BANZHAF 1994; JENDRITZKY 1993). Damit schließt sich der Kreis zwischen stadtklimatologischen und human-biometeorologischen Fragestellungen.

3.3.2 Human-biometeorologische Kenngrößen

Zwei sehr bekannte und schon seit langem verwendete thermische Kenngrößen sind der Wind-Chill-Index und die Äquivalenttemperatur. Der Wind-Chill-Index, eine Kombination aus Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit, ist eine Kenngröße die vorrangig als Indikator für Kältestreß Verwendung findet, und deshalb im Rahmen dieser Arbeit weniger von Bedeutung ist. Von größerem Interesse ist die Äquivalenttemperatur (T_{eq}), die ein Maß für die Temperatur ist, die ein Luftpaket annehmen würde, wenn die ganze in ihm gespeicherte latente Wärme in fühlbare Wärme umgesetzt würde. Sie beschreibt demnach den potentiellen Gesamtwärmeinhalt der Luft (ROEDEL 1994).

$$T_{eq} = T_a + \frac{0,622 \cdot L_v \cdot e}{p \cdot c_p} \quad (1)$$

mit	T_{eq} :	Äquivalenttemperatur in °C
	T_a :	Lufttemperatur in °C
	L_v :	latente Verdunstungswärme von Wasser (J*kg ⁻¹)
	e :	Dampfdruck in hPa
	p :	Luftdruck in hPa
	c_p :	spezifische Wärme bei konstantem Druck (J*kg ⁻¹ *K ⁻¹)

In einer vereinfachten Faustformel läßt sich sagen, daß die Äquivalenttemperatur ungefähr der Lufttemperatur plus dem doppelten Wert des Dampfdruckes entspricht (aus KUTTLER 1993). Die Äquivalenttemperatur wird als Kenngröße für den Begriff der Schwüle verwendet. Der Deutsche Wetterdienst spricht von Schwüle, wenn die Äquivalenttemperatur größer als 49 °C ist. Mit der Äquivalenttemperatur sind die thermischen Bedingungen aber noch nicht ausreichend beschrieben, da kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse und Windgeschwindigkeiten keine Berücksichtigung finden. Weitere detaillierte Auflistungen thermischer Kenngrößen finden sich bei BRÜNDL et al. (1987) und in einem Aufsatz von AULICIMIENS und DE DEAR (1998).

Heute verbreitete human-biometeorologische Kenngrößen basieren im wesentlichen auf der Wärmebilanzgleichung (vgl. Kap. 3.3.1) des Menschen bei stationären Bedingungen. Das hat den Vorteil, daß alle wichtigen meteorologischen Einflußgrößen Berücksichtigung finden. In der Bundesrepublik haben sich vor allem zwei Bewertungsverfahren etabliert, das Klima-Michel-Modell KMM mit der klassifizierten Größe Predicted Mean Vote (PMV) (JENDRITZKY et al. 1979 und JENDRITZKY et al. 1990) und das Münchener Energiebilanzmodell für Individuen (MEMI) (HÖPPE 1984 und HÖPPE 1993) mit der Bewertungsgröße Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET), die mittlerweile auch in einem VDI-Richtlinienentwurf festgeschrieben sind (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2, 1998). Da beide Methoden ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit sind, findet eine nähere Beschreibung im Methodenteil dieser Arbeit statt, so daß hier um Wiederholungen zu vermeiden auf Kapitel 4.3 verwiesen wird.

Die genannten human-biometeorologischen Modelle beziehen sich grundsätzlich auf stationäre Bedingungen, das heißt, daß die Aussagen nur für Personen gelten, die sich über längere Zeit bei gleichbleibender Aktivität und Bekleidung unter konstanten meteorologischen Bedingungen aufhalten. Für zeitlich hoch aufgelöste instationäre Bedingungen wurde das Münchener Energiebilanz-Modell für Individuen zu einem dynamischen Wärmebilanzmodell (IMEM) weiterentwickelt (HÖPPE 1985). Dynamische human-biometeorologische Berechnungsverfahren sind aber sehr komplex und aufwendig, so daß in der Regel nur zeitlich und räumlich eng begrenzte Berechnungen möglich sind.

Ein weiteres und entscheidendes Problem bei komplexen meteorologischen Kenngrößen, wie sie aus den Modellen MEMI und KMM abgeleitet werden, ist die Bereitstellung der meteorologischen Inputgrößen in räumlich und zeitlich Auflösung. Deshalb stellt sich die

Frage, welche Untersuchungsmethoden zur Verfügung stehen, die eine human-biometeorologische Analyse und Bewertung kleinräumiger Stadtstrukturen unterstützen.

3.4 Mikroskalige stadtmeteorologische Untersuchungsmethoden

Im Vordergrund planungsorientierter Stadtklimatologie stehen ganz allgemein die Analyse, Modellierung und Bewertung von sowohl stadtmeteorologischen Istzuständen als auch von Prognosesituationen um Handlungs- und Verbesserungsempfehlungen ableiten zu können. Untersuchungsgegenstand sind hauptsächlich die in Kapitel 3.2 beschriebenen städtischen Klimamodifikationen zum Energie- und Strahlungshaushalt, zum Windfeld und zur Lufttemperaturverteilung. Entsprechend vielfältig ist das Angebot an experimentellen und modellhaften stadtmeteorologischen Untersuchungsmethoden (siehe auch Übersicht in KUTTLER 1993).

3.4.1 Experimentelle Methoden

Unter experimentellen Methoden werden in diesem Kapitel Untersuchungen angesprochen, die mit Hilfe von Meßtechnik meteorologische Prozesse erfassen und damit zur Beschreibung der atmosphärischen Istzustände beitragen.

Zur Erhebung meteorologischer Daten innerhalb von Stadtstrukturen bietet sich zwei grundlegende Arbeitsansätze an, es besteht die Möglichkeit meteorologische Informationen über ein stationäres Meßnetz oder über mobile Meßprogramme einzuholen. Der Vorzug der Klimameßnetze liegt eindeutig in der kontinuierlichen Datenerfassung über längere Zeiträume, was mit dem Nachteil verbunden ist, daß die Betrachtung nur weniger Standorte in Frage kommt. Mobile Meßprogramme besitzen den Vorteil, daß räumlich differenziertere Aussagen gewonnen werden, was natürlich voraussetzt, daß die Zeiträume für die Meßrouten nicht zu groß gewählt werden, da sonst aufwendige Zeitkorrekturen der Meßwerte vorgenommen werden müssen um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Bei den mobilen Meßprogrammen können je nach räumlicher Ausdehnung und Zugänglichkeit des Untersuchungsgebietes Meßfahrten mit Fahrzeugen oder Meßgänge in Frage kommen.

Oftmals bietet sich eine Kombination aus kontinuierlichen Klimamessungen und mobilen Untersuchungen an, wobei die Gerätekonfiguration der mobilen und stationären Meßeinrichtungen sich grundsätzlich nach der jeweiligen meteorologischen Fragestellung richtet.

Für die Erfassung der städtischen Lufttemperatur- und Luftfeuchteverteilung werden vorrangig Meßfahrzeuge eingesetzt (z.B.: DANZEISEN 1983; NAUMANN 1986). Diese haben den großen Vorteil, daß ganze Stadtgebiete erschlossen werden, mit der Einschränkung, daß die Meßrouten an den Straßenraum gebunden sind und deshalb für den kleinräumigen Einsatz in Stadtstrukturen nur bedingt tauglich sind.

Der Nachweis bodennaher Windsysteme kann zum einen durch meßtechnische Methoden wie thermische Anemometer oder Tracerversuche, oder über visuelle Methoden wie Rauchkerzen und Driftballons (KUTTLER 1993; VOGT 1994) erfolgen, wobei letztere für die Stadtmeteorologie weniger geeignet sind. Der Einsatz von SODAR-Geräten zur Sondierung vertikaler Strömungsverhältnisse gestaltet sich innerhalb von Stadtstrukturen wegen der hohen Lärmbelästigung ebenfalls als kaum durchführbar.

Zur Beschreibung der Einstrahlungsbedingungen in Baukörperstrukturen werden häufig zwei recht einfach handhabbare Methoden zur Erfassung von Horizonteinengung und Beschattung gewählt. Die Horizontoskop- (BAUMÜLLER et al. 1993) und Fish-Eye-Aufnahmen (MAYER und SUPPAN 1990; HOLMER 1992) liefern wichtige Informationen über den Himmelssichtfaktor und damit auch über den urbanen Strahlungshaushalt, sind aber nur für Punktanalysen geeignet.

Unter human-biometeorologischen Gesichtspunkten ist sowohl bei stationären als auch bei mobilen experimentellen Untersuchungen darauf zu achten, daß Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlungsflüsse im Aufenthaltsbereich des Menschen erfaßt werden, um alle meteorologischen Inputgrößen für eine thermophysiologische Bewertung zu erhalten (vgl. Kap. 3.3.2). Eine für human-biometeorologischen Untersuchungen geeignete mobile Meßmethodik ist in HÖPPE (1992) und in MAYER und SUPPAN (1990) beschrieben. Da die genannte Methode ein wichtiger Bestandteil der Arbeit ist, folgt eine detailliertere Beschreibung zu einem späteren Kapitel (Kap. 4.2.2).

Ein häufig durchgeführtes Verfahren zur Beschreibung des thermischen Oberflächenverhaltens ist die Infrarotthermographie. Zur Charakteristik der städtischen Überwärmung (bezogen auf Oberflächenstrahlungstemperaturen und nicht auf

Lufttemperatur) werden oftmals Thermalscanner-Befliegungen verwendet (z.B. STADT LEIPZIG 1993), wobei der große Vorteil in der Erfassungsmöglichkeit ganzer Stadtgebiete liegt. Die senkrecht zur Bodenoberfläche aufgenommenen Thermalbilder haben allerdings den Nachteil, daß vertikale Umgebungsflächen unberücksichtigt bleiben, Dach- und Bodenoberflächen auf ein Niveau gebracht werden und für kleinräumige Strukturen die Auflösung oft zu gering ist. In neueren Arbeiten von VOOGT (1995) und ELIASSON (1992) werden höher aufgelöste luftgestützte Thermalaufnahmen auch speziell für die Betrachtung von kleinräumigen Stadtstrukturen herangezogen. Bei VOOGT (1995) werden gezielt Schrägaufnahmen durchgeführt, um auch den Einfluß der Fassaden auf die „complete surface temperature“ von Stadtstrukturen zu gewinnen. WILMERS (1986) hat die Infrarotthermographie am Beispiel von Gartenhöfen auch bodengestützt eingesetzt, um thermische Aussagen über verschiedene natürliche und technogene Strukturelemente in Höfen zu erhalten. Die bodengestützte Infrarotthermographie eignet sich besonders zur Beschreibung der städtischen Oberflächenstrahlungstemperaturen von horizontalen und vertikalen Umgebungsflächen. Sie ist damit ein wichtiges Hilfsmittel um überwärmte Bereiche in Stadtstrukturen zu erkennen. Ein großes Anwendungsgebiet hat die Infrarotthermographie in der Baukörperklimatologie zur Untersuchungen von Wärmedämmung an Gebäuden.

Anwendungsbeispiele mikrometeorologischer Untersuchungsmethoden, die sich auf die Maßstabebene der Stadtstrukturtypen und der Strukturelemente beziehen und zum Teil auch in Innenhöfen und Straßenschluchten durchgeführt wurden, finden sich beispielsweise in den Arbeiten von MAYER und SUPPAN (1990); TUROWSKI (1995); KATZSCHNER (1994); BARTFELDER und KÖHLER (1987); BRÜNDL et al. (1987); WILMERS (1986); NYC (1978); GEHRKE, NÜBLER und WEISCHET (1977); GERTIS und WOLFSEHER (1977). Meteorologische Messungen sind in der Regel mit sehr viel Zeit- und Personalaufwand verbunden, werden meist nur stichprobenartig durchgeführt und eine räumliche Übertragbarkeit der Meßergebnisse kann mit Problemen verbunden sein, so daß bei vielen meteorologischen Fragestellungen, und hier insbesondere auch für Prognoseaussagen und Beschreibung von Planungszuständen, eine Verknüpfung mit Modellen zu empfehlen ist.

3.4.2 Mikroskalige Stadtklimamodelle

Die Anwendungsbereiche mikroskaliger Stadtklimamodelle, sind allgemein zu unterscheiden in numerische oder physikalische Modelle. Bei den numerischen Modellen werden meteorologische Fragestellungen mit Hilfe komplexer Berechnungsverfahren simuliert, während bei den physikalischen Modellen die Stadtstruktur verkleinert im Modell nachgebaut wird und meteorologische Prozesse künstlich erzeugt werden. Grundsätzlich sind Modellanwendungen ebenso wie experimentelle Untersuchungen eng an einzelne meteorologische Fragestellungen gebunden und entsprechend vielfältig ist deshalb das Angebot an Stadtklimamodellen.

Die Möglichkeiten thermophysiologischer Modellierung und Ableitung human-biometeorologischer Kenngrößen wurde bereits in Kapitel 3.3.2 behandelt, so daß innerhalb dieses Kapitels vorrangig Modellansätze vorgestellt werden, die meteorologische Aussagen und Inputgrößen für eine weiterführende human-biometeorologische Bewertung liefern können.

Innerhalb der mikroskaligen Stadtmeteorologie haben sich besonders bei der Strahlungshaushaltssimulation und in der Windfeldberechnung eine Vielzahl an Anwendungen etabliert, während die kleinräumige Modellierung der Lufttemperatur- und Feuchteverteilung in Stadtstrukturen aufgrund ihrer großen Homogenität eher eine untergeordnete Rolle spielt. Die Anzahl numerischer Stadtklimamodelle hat bedingt durch verbesserte Rechnerleistungen innerhalb der letzten Jahre in erheblichem Maße zugenommen, so daß an dieser Stelle nur eine Auswahl an Modellen angesprochen wird.

Unter den mikroskaligen Modellen zur Windfeldberechnung hat sich in Deutschland besonders das Programm MISKAM (Mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell) (EICHHORN 1989) etabliert, das eine rasterförmige Simulation der Strömungsbedingungen (Windgeschwindigkeiten und -richtungen) in Stadtstrukturen zuläßt und vorrangig zur Ausbreitungsberechnung von Luftschadstoffen eingesetzt wird (vgl. VDI-Richtlinie 3782, Blatt 8, 1998).

Bei der numerischen Modellierung des Strahlungshaushaltes in der Stadthindernisschicht werden oft einfache Modelllösungen verwendet, die sich vorrangig auf den kurzwelligen Strahlungshaushalt beziehen und über die Geometrie der Bebauungsstruktur und der daraus

resultierende Beschattung die Einstrahlungsbedingungen simulieren. Die Reflexion an horizontalen und vertikalen Oberflächen und der langwellige Strahlungshaushalt werden dabei nicht berücksichtigt. Als Beispiele lassen sich folgende Modelle nennen:

- Das Schattenwurfmodell GOSOL (GORETZKI 1989 in BAUMÜLLER et al. 1993) wird vorrangig unter dem Aspekt der passiven Sonnenenergienutzung eingesetzt.
- SHADOW (BRUSE 1995) ist für Berechnungen von kurzweiliger Einstrahlung in räumlicher und zeitlicher Auflösung ausgelegt. Es bietet die Möglichkeit der Punkt- und Flächenanalysen und ist sowohl für Untersuchungen in kleinräumigen Stadtstrukturen (Eingabe der Objektstruktur) als auch für geländeklimatologische Fragestellungen einsetzbar.
- HelioDat (MERTENS 1997) ist speziell für kleinräumige Stadtstrukturen entwickelt worden und berechnet die Besonnung in Abhängigkeit der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer und umgebender Baukörperstruktur (Abschattung). Das mit HelioDat kombinierte Modul BioKlima (MERTENS 1997) erlaubt eine human-biometeorologische Bewertung (Ausgabe von PMV-Wert), wobei anzumerken ist, daß ähnlich wie bei einem Horizontoskop oder einer Fish-eye-Aufnahme nur Punktanalysen möglich sind.

Komplexe mikroskalige Stadtklimamodelle, die neben den kurzweiligen Strahlungsflüssen auch das thermische Verhalten von Oberflächen berücksichtigen und damit Informationen zur Energie- und Strahlungsbilanz liefern, sind wegen Ihrer aufwendigen Berechnungen meist auf einfache städtische Geometrien wie zum Beispiel zweidimensionale Ausschnitte von Straßenschluchten beschränkt.

- Das Strahlungsmodell nach ARNFIELD (1982 und 1994) berechnet sowohl langwellige als auch kurzweilige Strahlungsflüsse an Oberflächen, ist aber an einfache Straßenschluchtgeometrien gebunden, wobei die Oberflächentemperaturen nicht modelliert werden sondern als Inputgröße vorhanden sein müssen.
- Mit dem im Modell MUKLIMO (mikroskaliges urbanes Klima-Modell) (SIEVERS und ZUNDOWSKI 1986) angekoppelten Strahlungsmodell läßt sich die mittlere Strahlungstemperatur in einer zweidimensionalen Straßenschlucht berechnen. Die berechneten meteorologischen Größen aus MUKLIMO können zur human-

biometeorologischen Bewertung z.B. mit dem Klima-Michel-Modell verknüpft werden (JENDRITZKY et al. 1990). Eine Berechnung komplexer Stadtstrukturen wäre zu aufwendig.

- Das mikroskalige Klimamodell ENVI-met (BRUSE 1998) basiert auf den Teilmodellen Atmosphäre und Boden, die über die Bestimmung der Energiebilanz an der Bodenoberfläche numerisch miteinander gekoppelt sind. Darüber hinaus ist in einem Programmmodul auch die Berücksichtigung von Vegetationsstrukturen möglich.

Für eine flächenhafte Darstellung von human-biometeorologischen Bedingungen und zur Erstellung von Bioklimakarten in der Maßstabsebene von 1:25.000 bis zu 1:10.000 ist vom Deutschen Wetterdienst (GRÄTZ und JENDRITZKY 1995) das Urbane-Bioklima-Modell UBIKLIM entwickelt worden. Als Datenbasis dient die Topographie und die räumliche Verteilung von Stadtstrukturen, wobei anzunehmen ist, daß für die Inputgrößen zur human-biometeorologische Beurteilung auf Erfahrungswerte zurückgegriffen wird, da eine numerische Modellierung der meteorologischen Parameter in dem Modellkonzept nicht erkennbar ist. Für eine kleinräumige hochauflösende Beurteilung von Stadtstrukturen ist die Maßstabsebene von 1:10.000 zu grob.

Für manche meteorologischen Fragestellungen und Prognosen kann der Einsatz von physikalischen Modellen angebracht sein. Besonders bei recht komplexen Bebauungsstrukturen kann eine physikalische Modellierung gegenüber der numerischen Berechnung Vorteile haben.

Die bei Planungsprognosen häufig eingesetzten Windkanaluntersuchungen (PLATE 1982 und 1996; KUTTLER 1991) ermöglichen eine Simulation der Strömungsverhältnisse in Bebauungsstrukturen und liefern so wichtige Informationen für Windkomfort und Ausbreitungsklimatologie. Über den Austausch einzelner Strukturelemente im Modell können problemlos verschiedene Planungsszenarien durchgespielt werden. Anzumerken ist, daß die physikalische Simulation gegenüber numerischer Modellierung als sehr material- und zeitaufwendig einzustufen ist.

Gleiches gilt für die Abschattungsmodellierung (BAUMÜLLER et al. 1993 nach LOHMEYER et al. 1992), bei denen eine künstliche Lichtquelle den Sonnenstand und den Schattenwurf der Gebäude simuliert. Es werden aber nur Informationen zu den

Schattengrenzen gewonnen, detaillierte quantitative Aussagen über kurz- und langwellige Strahlungsflüsse sind nicht möglich.

Sehr schwierig bei Modellanwendungen ist es eine Ähnlichkeit zwischen Modellebene und Wirklichkeit zu gewährleisten, da nie alle Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden können. Ein weiteres grundlegendes Problem ist, daß Randbedingungen, die räumlich außerhalb der Modellebene liegen aber Einfluß auf die meteorologischen Bedingungen haben, oft nicht berücksichtigt werden können, weshalb gerade in den Randbereichen Simulationsfehler auftreten.

4. Untersuchungsmethoden

Anhand der Zielstellung aus Kapitel 2 und den Ausführungen zur mikroskaligen Stadtmeteorologie in Kapitel 3 wurde für die human-biometeorologische Analyse und Bewertung kleinräumiger Stadtstrukturen ein Untersuchungskonzept entworfen, das sowohl experimentelle als auch modellhafte Untersuchungsmethoden beinhaltet.

4.1 Untersuchungskonzept

Der Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Erfassung der räumlichen und zeitlichen Variabilität mikrometeorologischer Bedingungen in komplexen Stadtstrukturen. Im Vordergrund steht die Frage, wie die notwendigen topographischen Informationen und meteorologischen Inputgrößen gewonnen werden können, um eine Datengrundlage zu erhalten, die eine human-biometeorologische Bewertung in kleinräumigen Stadtstrukturen zuläßt. Eine schematische Übersicht der gewählten Untersuchungsansätze ist in Abbildung 7 zusammengefaßt.

Die physiognomische Kartierung der gewählten Untersuchungsgebiete bildet eine wichtige Grundlage für die spätere Interpretation der mikrometeorologischen Bedingungen, das gilt sowohl für den experimentellen als auch für den modellhaften Untersuchungsansatz innerhalb dieser Arbeit.

Für den eher prozeßorientierten Teil der Fragestellungen aus Kapitel 2, sind mikrometeorologische Messungen unentbehrlich, weshalb die experimentellen Untersuchungen mit Klimastationen, mobilen Messungen und der Einsatz von Infrarotthermographie ein Hauptbestandteil der vorliegenden Arbeit sind. Die Untersuchungsmethoden sind dabei so zu wählen, daß Aussagen über die wichtigsten meteorologischen Kenngrößen wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlungsflüsse gewonnen werden, und diese als Inputgrößen für eine human-biometeorologische Bewertung in Stadtstrukturen zur Verfügung stehen.

Unter den Gesichtspunkten der räumlichen Interpretation, der Verringerung des Meßaufwandes und der Übertragung von Untersuchungsergebnissen auf andere Untersuchungsräume erscheint es sinnvoll, die Unterstützung von mikroskaligen Stadtklima-

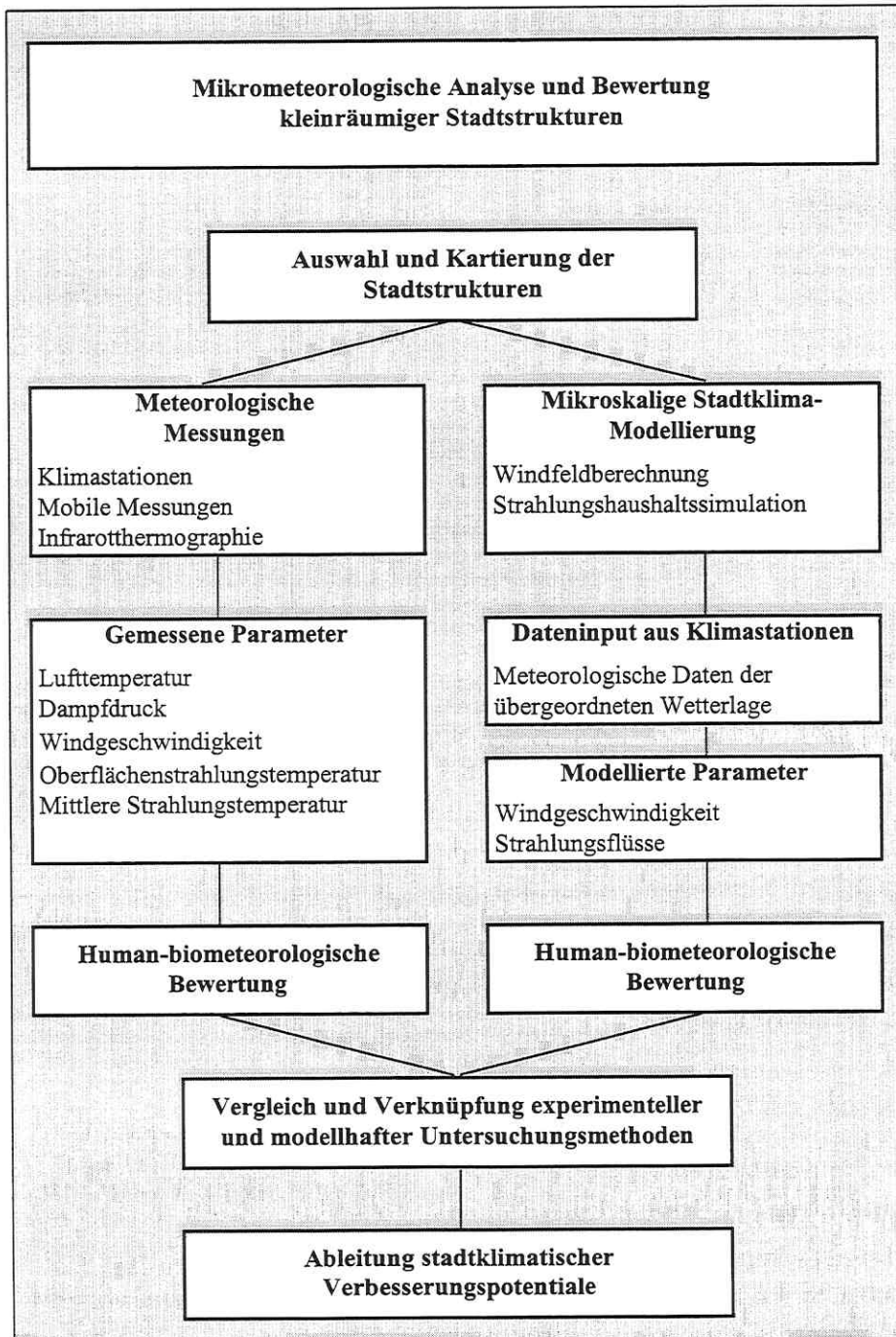


Abb. 7: Schematische Darstellung des Untersuchungskonzeptes

modellen zur Windfeldberechnung und Strahlungshaushaltssimulation zu Hilfe zu nehmen, um zu einer räumlich differenzierteren Bewertung der human-biometeorologischen Bedingungen in Stadtstrukturen zu gelangen.

Die Modellierungen beschränken sich im wesentlichen auf die in Stadtstrukturen besonders stark variierenden meteorologischen Prozesse des Strahlungshaushaltes und der Strömungsverhältnisse. Die kleinräumige Modellierung der Lufttemperatur und Luftfeuchte in Stadtstrukturen wird wegen der größeren Homogenität als nicht notwendig erachtet. Die für die Modellierung notwendigen Eingangsdaten werden dem kontinuierlichen Meßprogramm entnommen.

In der Diskussion der Untersuchungsergebnisse bleibt zu klären, ob die experimentellen und modellhaften Untersuchungsansätze zu ähnlichen Ergebnissen führen, wie sie sinnvoll miteinander verknüpft werden können und unter stadtplanerischen Gesichtspunkten einsetzbar sind. Den Abschluß des Untersuchungskonzeptes bilden stadtklimatische Verbesserungsvorschläge für kleinräumige Stadtstrukturen, die aus den durchgeführten Untersuchungen abgeleitet werden.

4.2 Experimentelle Untersuchungen

Um Aussagen über die räumliche und zeitliche Variabilität meteorologischer Kenngrößen in Stadtstrukturen zu gewinnen, werden im Rahmen der Geländeuntersuchungen stationäre Klimamessungen, mobile meteorologische Messungen und bodengestützte Infrarotthermographie eingesetzt.

4.2.1 Kontinuierliche Klimamessungen

Die kontinuierlichen Klimamessungen haben vorrangig die Aufgabe, Hintergrundinformationen bereitzuhalten, um die mobilen Untersuchungsergebnisse klimatisch besser einordnen zu können, die Inputdaten für die Stadtklimamodellierung zur Verfügung zu haben und um eine Differenzierung der klimatischen Bedingungen in ausgewählten Stadtstrukturen im gesamten Untersuchungszeitraum zu gewinnen.

Eingesetzt wurden 5 Klimameßstationen der Fa. THIES, die mit einem Dataloggersystem nach WEIHOFEN ausgestattet sind und alle zehn Minuten einen Datensatz aus Mittel- oder Summenwerten abspeichern. Die Daten liegen deshalb in relativ hoher zeitlicher Auflösung vor. Übernommen wurden die Stationen aus dem Ende 1995 auslaufenden Stadtklimameßprogramm von MÜLLER (1997), in dessen Arbeit sich weitere detaillierte Angaben zu den eingesetzten Klimastationen finden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit auf Daten der Sektion Hydrogeologie am Umweltforschungszentrum und des Meteorologischen Institutes der Universität Leipzig zuzugreifen, die weitere Stationen im Stadtgebiet von Leipzig betreiben.

Zur Grundausrüstung der Klimastationen gehören:

- Hygro-Thermogeber mit Strahlungs- und Wetterschutz mit Pt 100 Widerstandsthermometer zur Erfassung der Lufttemperatur (Genauigkeit etwa $\pm 0,3$ K) und Haarhygrometer zur Erfassung der relativen Feuchte (Genauigkeit etwa ± 3 %)
- Windgeber mit Schalenkreuz-Anemometer (Anlaufgeschwindigkeit 0,3 m/s) und bei kombinierten Windgebern zusätzlich mit Windfahne
- Bodentemperaturgeber mit NTC-Widerstand

Einzelne Stationen waren zusätzlich ausgestattet mit:

- Pyranometer CM 11 der Fa. KIPP & ZONEN zur Erfassung der Globalstrahlung (Empfindlichkeit $4-6 \mu V \cdot W^{-2} \cdot m^{-2}$)
- Niederschlagsgeber mit Kippwaage (200 cm² Auffangfläche; Auflösung 0,1 mm)

Für die Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit wurden vorrangig die Lufttemperatur- und Luftfeuchtedaten in 2 m Höhe, die Windgeschwindigkeit in 2,6 m bzw. 10 m Höhe und die Globalstrahlung (Dachstation des Umweltforschungszentrums in ca. 26 m Höhe über Grund) herangezogen. Eine Übersicht der Klimastationen ist im Anhang zu finden.

Ein Nachteil der verwendeten Meßtechnik ist, daß die eingesetzten Hygro-Thermofühler nicht ventiliert und nur mit einfachem Strahlungsschutz versehen sind, so daß bei direkter Sonneneinstrahlung Meßwertabweichungen auftreten können, die sich besonders bei den Tagesmaxima auswirken. In Vergleichen konnten Abweichungen bis zu einem Kelvin festgestellt werden, was bei der späteren Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

4.2.2 Mobile meteorologische Messungen

Den Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen bilden die mobilen meteorologischen Messungen. Mit Ihrer Hilfe sollen räumlich differenzierte Aussagen innerhalb von kleinräumigen Stadtstrukturen zu den human-biometeorologischen Bedingungen gewonnen werden, wobei folgende Ansprüche an die Meßeinrichtung zu stellen sind:

- Es müssen alle meteorologischen Parameter erfaßt werden, die für eine human-biometeorologische Beurteilung relevant sind.
- Eine hohe Mobilität muß den Einsatz auch außerhalb des Straßenraumes ermöglichen.
- Es sollte eine bereits standardisierte Meßmethodik zum Einsatz kommen um die Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten und Untersuchungsgebieten zu ermöglichen.

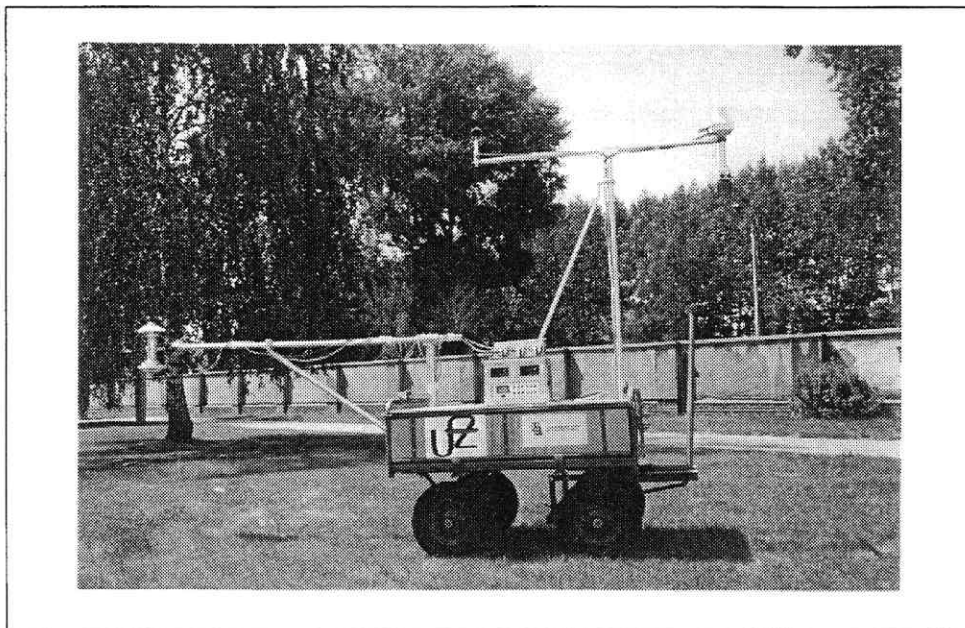


Abb. 8: Photo der mobilen Meßeinrichtung (Eigentum des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg); (Photo: B. Bauer)

Bei den mobilen meteorologischen Untersuchungen wurde deshalb auf eine in der Praxis bewährte Methode zurückgegriffen, die in MAYER und SUPPAN (1990) und HÖPPE (1992) beschrieben und in Auszügen auch in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (1998) enthalten ist

und somit dem Anspruch der Standardisierung gerecht wird. Die Arbeiten von HÖPPE und MAYER (1987) und MAYER und SUPPAN (1990) bieten weiterhin eine gute Vergleichsmöglichkeit zur eigenen Arbeit, da diese Untersuchungen ebenfalls auf der Ebene kleinräumiger Stadtstrukturen (hier am Beispiel von München) durchgeführt wurden.

Für die mobilen Untersuchungen wird ein Handwagen (siehe Abb. 8) mit fest installierten Geräten eingesetzt, der leicht zu ziehen ist und somit die meteorologischen Meßeinrichtungen ohne große zeitaufwendige Umbaumaßnahmen transportiert werden können. Neben der Stromversorgung ist der Meßwagen mit meteorologischen Geräten zur Erfassung von Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen bestückt.

4.2.2.1 Lufttemperatur und Dampfdruck

Mit einem elektrisch ventilierten Aspirationspsychrometer (Pt 100 Meßelemente), wurde in einer Höhe von 2m über Bodenniveau Lufttemperatur (Trockentemperatur T_a und Feuchtemperatur T_f) gemessen. Die Berechnung der verschiedenen Feuchtemaße wie relative Feuchte (RH) und Dampfdruck (e) erfolgte auf der Basis der VDI 3786, Blatt 4, (1985).

4.2.2.2 Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit (v) wurde mit einem Hitzdraht-Anemometer der Fa. DANTEC (Genauigkeit etwa $\pm 0,03 \text{ ms}^{-1}$ bis 1 ms^{-1} und $\pm 0,15 \text{ ms}^{-1}$ bis 5 ms^{-1}) in einer Höhe von 2m gemessen. Für Windgeschwindigkeiten über 5 ms^{-1} stand ein Schalenkreuz-Anemometer der Fa. THIES zur Verfügung.

4.2.2.3 Kurz- und langwellige Strahlungsflüsse

Zur meßtechnischen Bestimmung der kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse aus den Umgebungsräumen werden jeweils ein drehbar angeordnetes Pyranometer und Pyrgeometer

eingesetzt (siehe Abb. 9). Durch drehen der Sensoren um jeweils 90° können nacheinander die Strahlungsflüsse aus allen vier Himmelsrichtungen und dem unteren und oberen Halbraum gemessen werden. Die Meßgeräte sind in einer Höhe von 1,1 m über dem Bodenniveau angebracht, um die Strahlungsflüsse etwa in der Höhe des Körperschwerpunktes eines stehenden Menschen zu erfassen (HÖPPE 1992; VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2, 1998).

- Die kurzwelligen Strahlungsflüsse werden mit dem Pyranometer CM21 der Fa. KIPP & ZONEN (Spektraler Bereich 305-2800 nm; Empfindlichkeit $14\text{-}17\mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) gemessen. Der Eichfaktor für das verwendete Pyranometer beträgt $11.66\cdot 10^{-3}\text{ mV}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.
- Die langwelligen Strahlungsflüsse werden mit dem Pyrgeometer CG1 der Fa. KIPP & ZONEN (Spektraler Bereich 5-50 μm ; Empfindlichkeit $10\text{-}20\mu\text{V}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) erfaßt. Der Eichfaktor für das verwendete Pyrgeometer beträgt $9.93\cdot 10^{-3}\text{ mV}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Bei der Bestimmung der eingehenden langwelligen Strahlungsintensität E müssen der Microvoltsignal-Detektor V, der Temperaturdetektor T und der Eichfaktor des Sensors C berücksichtigt werden ($E=V/C+5,67\cdot 10^{-8}\cdot T^4$) (Gerätebeschreibung KIPP & ZONEN).

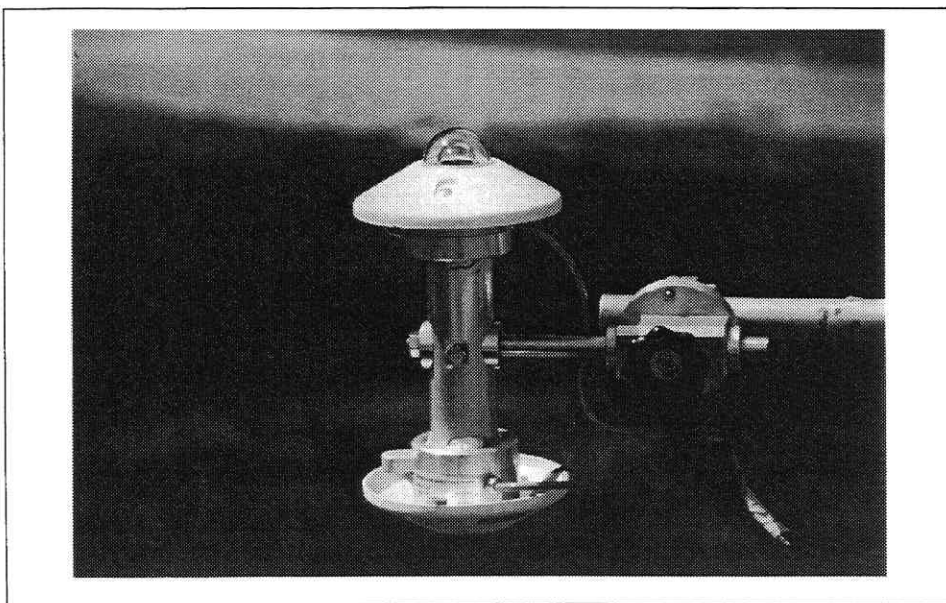


Abb. 9: Strahlungsgalgen mit Pyranometer und Pyrgeometer (Photo B.Bauer)

Durch ungenaues Ausrichten der Sensoren in den zu untersuchenden Halbraum, kann es zu Meßungenauigkeiten bei der Ermittlung der kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse kommen. Bei den eher geringen Schwankungen unterlegenen langwelligen Strahlungsflüssen macht sich diese Fehlermöglichkeit nur gering bemerkbar und kann vernachlässigt werden. Schwieriger ist die Erfassung der kurzwelligen Strahlung, wo schon geringste Abweichungen mit Meßfehlern verbunden sein können. Die Ausrichtung der Sensoren erfolgte daher immer mit Kompaß und an den Sensoren angebrachten Linsen zur waagrechten Einstellung. Aus den meßtechnisch ermittelten Strahlungsflüssen läßt sich die mittlere Strahlungstemperatur berechnen, die eine wichtige Eingangsgröße für die Energiebilanzmodelle ist.

4.2.2.4 Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur

Die mittlere Strahlungstemperatur ist definiert als „die einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umschließungsfläche, die zu dem gleichen Strahlungsenergiegewinn eines Menschen führt wie die aktuellen meist sehr unterschiedlichen Strahlungsflüsse“ (HÖPPE 1992). Die mittlere Strahlungstemperatur entspricht in Innenräumen meist den Größenordnungen der Lufttemperatur, kann aber an besonnten Stellen im Freien mehr als 30 K über den Werten der Lufttemperatur liegen.

Um aus den jeweils sechs Einzelmessungen der terrestrischen und solaren Strahlung (vgl. Kap. 4.1.2.3) die mittlere Strahlungsflußdichte auf die Oberfläche eines stehenden Menschen berechnen zu können, ist eine Gewichtung der Strahlungsflüsse hinsichtlich ihrer Bedeutung notwendig. Strahlungsflüsse aus den vier Himmelsrichtungen sind mit einem Gewichtungsfaktor je 0,22 versehen, da ihnen aufgrund einer größeren Körperexposition des stehenden Menschen eine größere Bedeutung zukommt, während die Strahlungsflüsse aus dem oberen und unteren Halbraum mit einem Gewichtungsfaktor von 0,06 multipliziert werden. Die Werte der Absorptionskoeffizienten für Haut und Kleidung können für terrestrische Strahlung (a_t) mit 0,97 und für solare Strahlung (a_k) mit 0,7 angesetzt werden (HÖPPE 1992; VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 1996). Entsprechend dieser Vorgaben läßt sich die mittlere Strahlungsflußdichte für die Körperoberfläche des Menschen wie folgt berechnen:

$$S_{Str} = \sum_{i=1}^6 W_i \cdot (a_k \cdot K_i + a_l \cdot L_i) \quad (2)$$

mit: S_{Str} : mittlere Strahlungsflußdichte in $W \cdot m^{-2}$
 W_i : Wichtungsfaktor
 a_k : Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung
 K_i : Kurzwellige (solare) Strahlungsflüsse in $W \cdot m^{-2}$
 a_l : Absorptionskoeffizient für langwellige Strahlung
 L_i : Langwellige (terrestrische) Strahlungsflüsse in $W \cdot m^{-2}$

Aus der mittleren Strahlungsflußdichte, kann mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes die mittlere Strahlungstemperatur (t_{mrt}) berechnet werden. Für den langwelligen Emissionskoeffizienten (ε_p) wird ebenso wie für den langwelligen Absorptionskoeffizienten (a_l) der Wert 0,97 angenommen.

$$t_{mrt} = \left[S_{Str} / (\varepsilon_p \cdot \sigma) \right]^{0,25} - 273,2 \quad (3)$$

mit: t_{mrt} : mittlere Strahlungstemperatur in $^{\circ}C$
 S_{Str} : mittlere Strahlungsflußdichte in $W \cdot m^{-2}$
 ε_p : Emissionsskoeffizient für langwellige Strahlung
 σ : Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

4.2.2.5 Oberflächentemperatur

Bei den mobilen Messungen wurden punktuell die Oberflächentemperaturen der Umgebungsflächen gemessen, um Aussagen über das thermische Verhalten der verschiedenen städtischen Oberflächen zu gewinnen.

Verwendet wurde ein tragbares Strahlungspyrometer KT 19.82 der Fa. HEITRONICS mit Durchblicksucher zur berührungslosen Temperaturmessung an Oberflächen. Fühlerthermometern gegenüber haben Infrarotsensoren den Vorteil, daß es zu keinen Verfälschungen des Temperaturmeßfeldes durch Wärmeableitung kommt. Der eingesetzte Strahlungspyrometer hat eine spektrale Empfindlichkeit von 8-14 μm und ist für

Temperaturen zwischen -50°C und $+1000^{\circ}\text{C}$ geeignet. Die Temperaturauflösung des Strahlungspyrometers liegt bei 0,1 K. Der Emissionskoeffizient konnte manuell eingestellt werden, so daß man die Emissionsfaktoren der unterschiedlichen Oberflächen (siehe Anhang I) berücksichtigen konnte. Da durch die Punktmessungen keine räumliche Analyse möglich ist, wurden zusätzlich für einzelne Meßkampagnen Thermalbildaufnahmen gemacht.

4.2.3 Bodengestützte Infrarotthermographie

Im Gegensatz zum Pyrometer, mit dem terrestrische Strahlungsflüsse ermittelt werden, die am Meßpunkt aus dem jeweiligen Halbraum ankommen, liefert die Infrarotthermographie zusätzlich die Informationen, welche Oberflächen hohe Strahlungstemperaturen aufweisen und damit zur Erhöhung langwelliger Strahlungsflüsse in Stadtstrukturen beitragen. Für eine human-biometeorologische Bewertung sind die beim Menschen ankommenden Strahlungsflüsse von Bedeutung, unter stadtplanerischen Aspekten ist zusätzlich das Oberflächentemperaturverhalten der vertikalen und horizontalen Umgebungsflächen von Interesse. Die bodengestützte Infrarotthermographie ergänzt deshalb sehr gut die Messungen mit dem Pyrometer.

In der Infrarotthermographie haben sich zwei bevorzugte Wellenlängenbereiche, das Kurzwellenband SW (= short wave) von ca. $2\text{-}5\mu\text{m}$ und das Langwellenband LW (= long wave) von ca. $8\text{-}12\mu\text{m}$, herausgebildet, in denen die meisten verfügbaren IR-Systeme arbeiten (BREUCKMANN 1993). Die früher übliche Einteilung, daß Hochtemperaturmessungen mit SW-Technik und Tieftemperaturmessungen mit LW-Technik durchgeführt werden, gilt heute wegen der verfeinerten Technik nicht mehr. Auch im Kurzwellenband können Objekte mit Temperaturen bis zu -10°C mit der annähernd gleichen Genauigkeit und Temperaturauflösung wie im Langwellenband gemessen werden. Der Vorteil der SW-Optik liegt in dem wesentlich einfacheren Detektorkühlverfahren (BREUCKMANN 1993).

Als Thermographiesystem wurde deshalb der im SW-Bereich arbeitende thermoelektrisch gekühlte Thermalscanner THERMOVISION 470 pro (THV470 SWB) der Fa. AGEMA gewählt. Der Scanner hat eine spektrale Empfindlichkeit von $2\text{-}5\mu\text{m}$ und liefert eine Temperaturauflösung von $0,1^{\circ}\text{C}$. Der Temperaturmeßbereich liegt zwischen -10 und $+2000^{\circ}\text{C}$ bei einer Genauigkeit von etwa 1°C bzw. 1%. Um ein ausreichend breites Bildfeld zu

erhalten, hat sich der Einsatz einer 40° Optik bewährt. Ausführliche Darstellungen zu den physikalischen Grundlagen und Gerätetechniken von Wärmebildkameras sind bei BREUCKMANN (1993) zu finden. Zum System gehören auch ein 3,5" Diskettenlaufwerk zur Speicherung der aufgenommenen Bildinformationen und die digitale Infrarotbildverarbeitung mit der windowsgestützten Software IRWIN.

4.3 Human-biometeorologische Bewertung

Nachdem die in dieser Arbeit verwendeten meßtechnischen Methoden zur Beschreibung meteorologischer Zustände besprochen wurden, soll dieses Kapitel auf die gewählten human-biometeorologischen Bewertungsmethoden eingehen.

Eine grundlegende Anforderung an die Bewertungsmodelle ist, daß alle human-biometeorologisch relevanten meteorologischen Größen Berücksichtigung finden. Für eine bessere räumliche und zeitliche Vergleichbarkeit der human-biometeorologischen Bedingungen in kleinräumigen Stadtstrukturen erscheint es notwendig mit stationären Modellen zu arbeiten und personenbezogene Inputgrößen konstant zu halten, was zusätzlich auch den Vergleich zwischen den Bewertungsmethoden erleichtert.

4.3.1 Klima-Michel-Modell

Das Klima-Michel-Modell (KMM) basiert auf der Behaglichkeitsgleichung nach FANGER 1972 (ausführliche Beschreibung der Behaglichkeitsgleichung bei JENDRITZKY et al. 1990 und VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2, 1998), die zunächst für Innenräume entwickelt und von JENDRITZKY et al. (1979) und JENDRITZKY et al. (1990) mit der Berechnung kurz- und langweilliger Strahlungsflüsse erweitert wurde und so eine Bewertung auch unter Freilandbedingungen möglich ist. An meteorologischen Eingangsgrößen werden die Werte für die Lufttemperatur, Dampfdruck, Windgeschwindigkeit und mittlere Strahlungstemperatur benötigt.

Als Kenngröße wird der PMV-Wert (Predicted Mean Vote) ausgegeben, der eine Klassifizierung des thermischen Empfinden eines Norm-Menschen zuläßt (siehe Tabelle 2). Der Norm-Mensch im Klima-Michel-Modell ist wie folgt definiert:

- Größe: 1,75 m
- Gewicht: 75 kg
- Körperoberfläche: 1,78 m²
- Emissionskoeffizient der Bekleidung bzw. der Haut: 0,97
- Absorptionskoeffizient für solare Strahlung: 0,7

4.3.2 Münchener Energiebilanz Modell für Individuen (MEMI)

Das Münchener Energiebilanz-Modell für Individuen (MEMI) (HÖPPE 1984 und HÖPPE 1993), das ebenfalls mit der Wärmebilanzgleichung des Menschen arbeitet, unterscheidet sich im wesentlichen vom KMM durch zusätzliche detailliertere Berechnungen der thermophysiologischen Vorgänge an der Körperoberfläche des Menschen (z.B. Hauttemperatur, Schweißverdunstung), wobei die meteorologischen Eingangsparameter (Lufttemperatur, Dampfdruck, Windgeschwindigkeit und mittlere Strahlungstemperatur) die gleichen sind. Eine detaillierte Darstellung der Modellstruktur von MEMI ist in der Arbeit von HÖPPE (1984) enthalten. Die personenbezogenen Daten werden ebenso wie beim KMM festgelegt (siehe oben). Die Angaben gelten für einen 35 Jahre alten Menschen männlichen Geschlechts. Bei allen durchgeführten Berechnungen wird für die Aktivität ein Arbeitsumsatz von 80 W (entspricht etwa der Aktivität von langsam gehen) und für den Wärmedurchgangswiderstand der Kleidung ein Wert von 0,9 clo angenommen.

Die aus MEMI abgeleitete Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET in °C) (siehe Tabelle 2) ist für eine beliebige Stelle im Freien definiert als diejenige Lufttemperatur, bei der in einem typischen Innenraum die Wärmebilanz eines Menschen bei gleichen Werten der Haut- und Kerntemperatur ausgeglichen ist wie bei den Bedingungen im Freien. Dabei wird für den Innenraum angenommen, daß die mittlere Strahlungstemperatur der Lufttemperatur entspricht, die Windgeschwindigkeit 0,1 m/s und der Wasserdampfdruck 12 hPa beträgt. (VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 1998).

Die Kenngröße PET hat demnach die physikalische Einheit °C, was sie wesentlich leichter mit anderen thermischen Größen wie der Lufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur oder der Äquivalenttemperatur vergleichbar macht.

Tabelle 2 enthält eine Gegenüberstellung von PMV- und PET-Werten in Bezug zu der jeweilig erwarteten Belastungsstufe.

PMV	PET °C	Thermisches Empfinden	Belastungsstufe
-3,5	4	sehr kalt	Kältestreß
-2,5	8	kalt	
-1,5	13	kühl	
-0,5	18	leicht kühl	Keine thermische Belastung
0,5	23	neutral	
1,5	29	leicht warm	
2,5	35	warm	
3,5	41	heiß	Hitzestreß
		sehr heiß	

Tab. 2: Thermische Bewertung nach PMV (Predicted Mean Vote) und PET (Physiological Equivalent Temperature); (MAYER und MATZARAKIS 1997; JENDRITZKY et al. 1979; (gültig für Wärmedurchgangswiderstand 0.9 clo bei einer inneren Wärmeproduktion von 80 W/m²)

4.4 Mikroskalige Stadtklimamodellierung

Mit Hilfe der gewählten Modelle sollen Aussagen zur räumlichen Verteilung der Windgeschwindigkeit und der Strahlungsflüsse in kleinräumigen Stadtstrukturen gewonnen werden. Die Anwendung numerischer Modelle erhielt gegenüber physikalischen Modellen den Vorzug, da sie viel einfacher einsetzbar und mit wesentlich geringerem Kostenaufwand durchzuführen sind. Bei der Auswahl der numerischen Modelle spielte neben der

Benutzerfreundlichkeit und dem Einarbeitungsaufwand auch die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit eine wesentliche Rolle.

4.4.1 Modell SHADOW

Das Strahlungshaushaltsmodell SHADOW (BRUSE 1995) berechnet die Horizonteinengung, den Schattenwurf und daraus abgeleitet die räumliche und zeitliche Verteilung der kurzwelligen Einstrahlung (siehe auch Kap. 3.4.2) in relativen (%) oder absoluten Einstrahlungswerten (W/m^2).

Für die Konfiguration von SHADOW werden neben den geographischen Koordinaten, Informationen über die Meteorologie (Trübungsfaktor, Dampfdruck), das Relief und die Objektstruktur (Bebauung) benötigt.

Zur Darstellung des Modellraumes wird ein äquidistantes Rechengitter mit maximal 250×250 Gitterpunkten verwendet, wobei die minimale Gitterpunktgröße 1 Meter beträgt. Das in der Modellstruktur von SHADOW enthaltene Geländemodell wird im Rahmen dieser Arbeit generell als einfache Ebene festgelegt, da eine Einbindung des Reliefs in den Untersuchungsbeispielen nicht notwendig ist. Einfache Geometrien wie Quader und Zylinder beschreiben die Baukörperstruktur, während Baumbestände über den Objekttyp „Baum“ definiert werden. Nach der Berechnung von Sonnenstand und Schattengrenzen werden über die Bestimmung des Extinktionskoeffizienten der Atmosphäre die absoluten Einstrahlungswerte in W/m^2 berechnet. Als meteorologische Eingangsgrößen werden Dampfdruck und Trübungsfaktoren nach ÅNGSTRÖM benötigt.

Das Programm SHADOW bietet die graphische Ausgabemöglichkeit der Punktanalysen (z.B. Jahresbilanz der Globalstrahlung an einem Punkt; Horizontoskop mit Sonnenbahnen) und der Flächenanalyse (z.B. räumliche Verteilung der möglichen Sonnestunden an einem Tag, räumliche Verteilung der Globalstrahlung zu einem bestimmten Termin des Tages).

Allgemein zeichnet sich das Modell SHADOW durch eine benutzerfreundliche Handhabung und durch geringe Rechenzeiten aus. Die Einfachheit des Modell hat allerdings den Nachteil, daß die Reflexion kurzwelliger Strahlungsflüsse und der langwellige Strahlungshaushalt nicht berücksichtigt werden können.

4.4.2 Modell MISKAM

MISKAM (Mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell) (EICHHORN 1989) ist ein dreidimensionales prognostisches Strömungsmodell (Differenzenverfahren) zur Berechnung von Windfelder in kleinräumigen Stadtstrukturen. Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten, werden thermisch induzierte Strömungen nicht berücksichtigt. Durch Überlagerung von Einzelrechnungen können zusätzlich Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsstatistiken erstellt werden. Aufbauend auf diesen Windfeldberechnungen ist eine Ausbreitungssimulation von dichteneutralen, nicht-reaktiven Substanzen bei vorgegebener Quellverteilung möglich (vgl. VDI-Richtlinie 3782, Blatt 8, 1998). Die Beschreibung des numerischen Verfahrens und der Modellphysik ist ausführlich bei EICHHORN 1989 und in dem Entwurf der VDI-Richtlinie 3782, Blatt 8, (1998) enthalten. Die Anwendung von MISKAM innerhalb dieser Arbeit bleibt auf Fragen der Berechnung von Strömungsverhältnissen beschränkt.

Die dreidimensionale Ausdehnung des Modellgebietes wird über die Anzahl der Gitterzellen und die Angabe der Gebietsgröße definiert, eine Berücksichtigung des Reliefs ist in der Modellstruktur nicht enthalten. In diesen Modellraum wird die zu untersuchende Bebauungsstruktur über ein Gebäudekataster integriert. Dabei ist zu beachten, daß die Gebäudeausdehnung und -höhe streng an die Gitternetzvorgabe gebunden ist. Die Genauigkeit der eingefügten Bebauungsstruktur ist demnach stark an die Auflösung des Diskretisierungsgitters gebunden.

Neben der Raumorientierung gegen Nord gehen die Rauigkeit von Bodenoberfläche und Fassaden als Inputgrößen in die Gebietsdefinition mit ein. Als weitere Eingangsgrößen sind die übergeordneten Windverhältnisse (Windgeschwindigkeit und Windrichtung mit der Angabe der Anemometerhöhe) anzugeben. Für die Berechnungen wird eine neutral geschichtete Atmosphäre angenommen.

Das berechnete Windfeld wird graphisch als Horizontalschnitt dargestellt, indem für jede Gitterzelle ein Pfeil mit Aussagen zu Windrichtung und Windgeschwindigkeit ausgegeben wird. Die Darstellung aller Gitterboxebenen, vom Grund bis zum Oberrand des Rechengitters, ist möglich. Für die Bearbeitung der vorliegenden Fragestellungen sind vorrangig Windfelder der bodennahen Gitterboxebene herangezogen worden.

5 Einführung in das Untersuchungsgebiet

Obwohl die Fragestellung dieser Arbeit (vgl. Kap.2) nicht auf eine bestimmte Stadt oder Stadtregion festgelegt ist, hat sich die Auswahl der Stadt Leipzig als exemplarisches Untersuchungsgebiet für eine mikrometeorologische Analyse und Bewertung von kleinräumigen Stadtstrukturen aus verschiedenen Gründen als vorteilhaft erwiesen.

Seit 1990 finden in ostdeutschen Großstädten tiefgreifende Umstrukturierungsprozesse statt, die sowohl mit positiven als auch negativen Tendenzen in der stadtökologischen Entwicklung verbunden sind (BREUSTE et al. 1996). Im Bereich des stadtklimatischen Umweltzustandes von Leipzig haben besonders die zunehmende Flächenversiegelung, hervorgerufen durch Nachverdichtungen im Stadtgebiet und Neubebauung im Stadtumland, für eine Verschlechterung gesorgt. Die vorhandene Untersuchung erhält dadurch einen aktuellen Bezug zu den stadtklimatologischen Problemen von Leipzig und liefert damit einen weiteren Beitrag zur Einbeziehung stadtklimatologischer Belange in die stadtökologische Entwicklung der Stadt Leipzig.

Für die Untersuchungen selbst ist die geringe orographische Gliederung des Stadtgebietes von Vorteil, da mikrometeorologische Unterschiede vorrangig durch Gestaltung der Stadtstrukturen und deren Ausstattung mit Baukörper- und Vegetationsstrukturen geprägt sind. Dies erleichtert den räumlichen und zeitlichen Vergleich von mikrometeorologischen Bedingungen in kleinräumigen Stadtstrukturen da sie nicht durch orographische Einflüsse verwischt werden.

5.1 Stadt Leipzig

Naturräumlich liegt die Stadt Leipzig in der nach ihr benannten Leipziger Tieflandsbucht, einer im Tertiär angelegten und im Pleistozän überformten Ebene die Teil des Norddeutschen Tieflandes ist. Klimageographisch gehört die Region Leipzig zu den warmgemäßigten Klimazonen mit immerfeuchten und sommerwarmen Klimabedingungen (Klimatyp nach der Klassifikation von KÖPPEN Cfb). Durch die Lage der Region in der Übergangszone zwischen maritimen und kontinentalen Einflüssen sind häufige Wechsel verschiedener Großwetterlagen kennzeichnend. Ozeanische Luftmassen bringen ganzjährig Niederschläge

und wegen ihrer ausgleichenden Wirkung relativ mildes Winterwetter und kühles regnerisches Sommerwetter. Setzen sich kontinentale Einflüsse stärker durch, treten im Winter stabile Wetterlagen mit geringen Niederschlägen und sehr niedrigen Temperaturen auf, während in den Sommermonaten strahlungsreiche Hochdruckwetterlagen für Hitze und Trockenheit sorgen.

Die geographische Lage des Stadtzentrums liegt bei 51°20' nördlicher Breite und 12°23' östlicher Länge, die Höhe über NN beträgt an dieser Stelle 113m. Das Stadtgebiet umfaßt eine Gesamtfläche von 157,8 km² und hat jeweils eine Ausdehnung von 13,2 km in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung. Bei einer Gesamteinwohnerzahl von etwa 470.000 ergibt sich eine Einwohnerdichte von knapp 3000 Einwohner je km² (STADT LEIPZIG 1996). Durch geplante Eingemeindungen wird sich die Ausdehnung und Einwohnerzahl der Stadt Leipzig in naher Zukunft entsprechend erhöhen.

Die Stadt Leipzig, die auf eine slavische Ortsgründung im 9. Jahrhundert zurückgeht, bekam 1165 die Stadtrechte verliehen und wurde stadtgeschichtlich besonders durch die Gründung der Universität (1409) und durch die Zusicherung von Messeprivilegien (1507) geprägt. Im Zuge der Industrialisierung am Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte sich Leipzig zu einer bedeutenden Industrie- und Handelsstadt, mit weitreichenden Einflüssen auf die Ausdehnung und Gestaltung der Stadt (GRUNDMANN et al. 1996). Viele der gründerzeitlichen Stadtteile sind auch heute noch erhalten, obwohl es während des zweiten Weltkrieges zu umfangreichen Zerstörungen kam, die heute noch im Stadtbild sichtbar sind. Zu Zeiten der ehemaligen DDR gab es städtebauliche Expansionen vor allem in den sechziger und siebziger Jahren mit der Erschließung neuer Wohnsiedlungen in Plattenbauweise. Im Zuge der Wiedervereinigung kam es in Leipzig zu einem Strukturwandel, der unter anderem dazu führte, daß innerstädtische Industrieflächen brach fielen, und im Stadtumland neue Gewerbegebiete entstehen, so daß eine zunehmende Flächeninanspruchnahme durch Bebauung in den Randbereichen erfolgt. Die räumliche Expansion ist gut in den Aufnahmen der Thermalscannerbefliegung in den neueren Stadtklimauntersuchungen der STADT LEIPZIG (1998) zu sehen.

5.1.1 Stadtklimatische Untersuchungen in Leipzig

Ein Schwerpunkt stadtklimatologischer Arbeiten, die im Stadtgebiet von Leipzig innerhalb der letzten Jahre durchgeführt wurden, war die Erarbeitung von stadtgebietesbezogenen Klimafunktionskarten für die Regional- und Stadtplanung (STADT LEIPZIG 1991; 1993; 1995; 1998). Bei den Stadtklimauntersuchungen in den Jahren 1992 und 1997, die seitens der STADT LEIPZIG in Auftrag gegeben wurden, sind während sommerlichen Strahlungswetterlagen Thermalscannerbefliegungen in Kombination mit Bodenmeßprogrammen durchgeführt worden, um flächendeckende Aussagen über die thermischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet zu gewinnen. Daraus resultierend wurde eine flächendeckende Klimafunktionskarte erstellt, in der Überwärmungsbereiche, Kaltluftentstehungsgebiete und wichtige Luftleitbahnen ausgewiesen sind. In einer Bewertungskarte werden großräumige Freiflächen bezüglich ihrer stadtklimatischen Ausgleichsfunktion und Siedlungsflächen hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung betrachtet. Trotz der bekannten Nachteile von Thermalscannerbefliegungen (vgl. Kap. 3.4.1) liefern diese Untersuchungen eine gute Möglichkeit der gesamtstädtischen Betrachtung.

Am Institut für Meteorologie der Universität Leipzig werden zur Zeit mehrere Arbeiten mit stadtklimatischem Bezug zu Leipzig bearbeitet. Schwerpunkt der Untersuchungen von DAUNKE (1997) sind Simulationsmöglichkeiten des Stadtklimas in verschiedenen Maßstabsebenen (mesoscalig: GESIMA; mikroschalig: MISKAM). Die Arbeit von FANENBRUCK (1997) bezieht sich auf die Entwicklung eines thermophysiologischen Bewertungsmodells, das exemplarisch sowohl auf Strukturelemente wie Straßenschluchten als auch auf das gesamte Stadtgebiet von Leipzig übertragen wurde.

In den stadtklimatologischen Arbeiten von MÜLLER (1997), die am Umweltforschungszentrum Leipzig von 1992 bis 1995 durchgeführt wurden, wird mit Hilfe von Lufttemperaturmeßfahrten und kontinuierlichen Klimamessungen die Beziehung zwischen Flächennutzungsstrukturen der Stadt Leipzig und ihrem Grad der Überwärmung beschrieben, wobei in der Korrelationsanalyse für die Flächennutzung der Versiegelungsgrad als Indikator Verwendung findet.

Mit der eigenen Arbeit, die ebenfalls am Umweltforschungszentrum Leipzig durchgeführt wurde, ist der Untersuchungsschwerpunkt weg von der Gesamtbetrachtung des Stadtgebietes auf die, zwar nicht flächendeckende, aber dafür detailliertere Analyse von unterschiedlich

gestalteten kleinräumigen Stadtstrukturen gelegt worden, verbunden mit der Anforderung, human-biometeorologische Aspekte und Untersuchungen zum urbanen Strahlungshaushalt stärker zu berücksichtigen. Die genannten Arbeiten ergänzen sich damit sowohl von der Themenstellung als auch durch die verschiedenen Maßstabsebenen und tragen somit zu einer weiteren Beschreibung und Bewertung der stadtklimatologischen Bedingungen in Leipzig bei.

5.1.2 Stadtstrukturen in Leipzig

Die Flächennutzungsstruktur der Stadt Leipzig (Abb. 10) zeigt, daß etwa 52 % der Gesamtfläche durch bebaute Strukturen in Anspruch genommen werden, wobei reine Wohngebiete einen Anteil von etwa 25 % ausmachen.

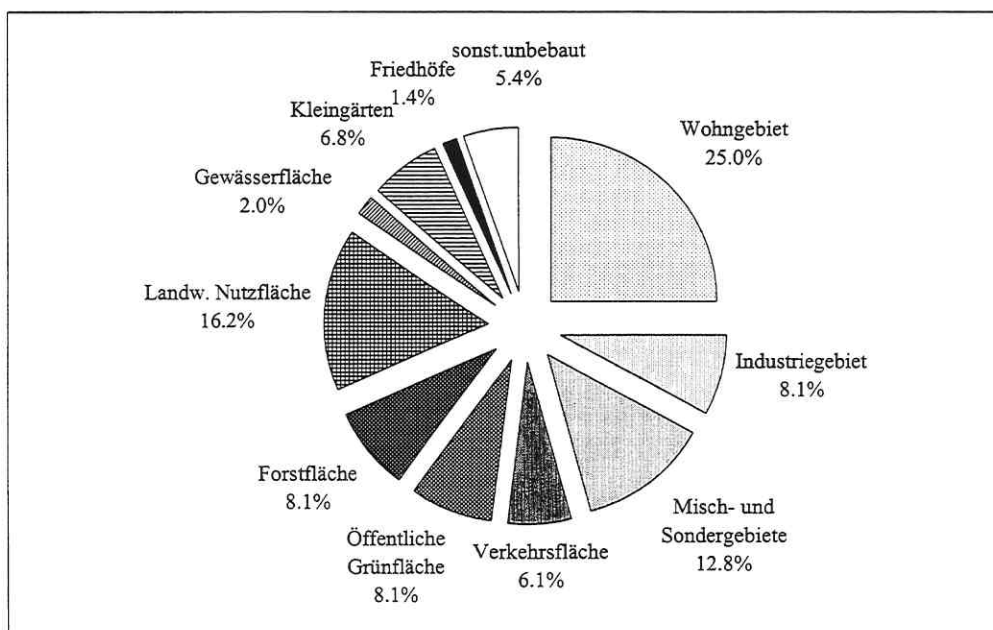


Abb. 10: Landnutzungsverteilung im Stadtgebiet von Leipzig (STADT LEIPZIG 1995)

Bei den unbebauten Flächen ist auffällig, daß mit über 16 % der Anteil an landwirtschaftlichen Nutzflächen im Stadtgebiet recht hoch ist. Eine Besonderheit von Leipzig ist der relativ hohe Anteil an Kleingartenanlagen, die mit einem Flächenanteil von

knapp 7 % angegeben werden. Die Forstflächen mit ca. 8 % beziehen sich zum großen Teil auf die Auwaldbereiche, die von Süden und Norden her bis in zentrale Bereiche der Stadt reichen (STADT LEIPZIG 1994 und 1995). Öffentliche Grünflächen und Parkanlagen haben einen Anteil von etwa 8 % an der Gesamtfläche.

Eine stärkere Untergliederung der Flächennutzung nicht nur nach funktionellen, sondern auch nach strukturellen Gesichtspunkten haben WICKOP et al. (1998) vorgenommen. Hier werden zum Beispiel die Wohnflächen und die Flächen mit gemischter Nutzung weiter differenziert nach den Bebauungstypen.

Die **Block- und Blockrandbebauung**, die auf gründerzeitliche Erschließungsphasen zurückgeht, haben einschließlich aller Subtypen einen Anteil von fast 40 % (WICKOP et al. 1998 und STADT LEIPZIG 1994) an der Wohngebietsfläche und gehören damit zu den dominierenden Wohnstrukturen in Leipzig. Die geschlossene Blockbebauung, gekennzeichnet durch Bebauung der Blockinnenbereiche, kann durch die hohe Bebauungsdichte Versiegelungsgrade von über 90 % erreichen (MÜNCHOW et al. 1996). In der Blockrandbebauung hingegen sind häufiger begrünte Innenhöfe zu finden, und entsprechend geringer ist der Versiegelungsgrad. Kriegsbedingte Lücken in der gründerzeitlichen Blockbebauung sind vielfach durch Neubauten geschlossen worden, weshalb in diesem Strukturtyp oft Gebäude verschiedener Bauphasen zu finden sind. Die Blockstruktur blieb in ihrer Form aber meist erhalten. Ein typisches Beispiel eines Stadtteiles mit vorrangig gründerzeitlicher Bebauung ist Leipzig-Volkmarsdorf (siehe Anhang Karte 1 und 3).

Ein- und Zweifamilienhaussiedlungen (ca. 27 % der Wohngebietsfläche von Leipzig; WICKOP et al. 1998) haben, auf die Fläche bezogen, unter den Bebauungsstrukturen die geringsten Versiegelungsgrade (variiert je nach Bebauungsdichte und Verkehrsflächenanteil zwischen 20 und 50 %). Anzumerken ist allerdings, daß bedingt durch die geringe Einwohnerdichte der Anteil der überbauten Fläche pro Einwohner besonders groß ist.

Ein weiterer dominanter Strukturtyp in Leipzig sind die **Großwohnsiedlungen**, in den 70/80er Jahren in Plattenbauweise errichtete mehr- und vielgeschossige Wohnbauten, die etwa 17 % Flächenanteil an den Wohngebieten einnehmen (WICKOP et al. 1998). Der prozentuale Anteil an versiegelter Fläche kann in Großwohnsiedlungen durchaus 60 % erreichen (MÜNCHOW et al. 1996). Leipzigs größte zusammenhängende Großwohnsiedlung mit ca. 80.000 Einwohnern befindet sich im Stadtteil Grünau (siehe Anhang Karte 2).

Die typische **Zeilenbebauung** (Versiegelungsgrad um 40 %; MÜNCHOW et al. 1996), bei der mehrgeschossige Wohnhäuser in Reihen angeordnet und durch Abstandsgrün voneinander getrennt sind, spielt mit 9% Flächenanteil an der Wohnbebauung schon eine untergeordnete Rolle. Anders als bei den vorher genannten Strukturen, bei denen die Strukturtypen ganze Stadtteile dominieren, ist die Zeilenbebauung eher in kleineren Einheiten anzutreffen.

5.2 Untersuchungsstandorte

Begibt man sich bei stadtmeteorologischen Untersuchungen auf die beschriebene Maßstabsebene von Stadtstrukturtypen und Strukturelementen ist eine gesamtstädtische Betrachtung nicht mehr möglich, deshalb wird die eingangs beschriebene Fragestellung (vgl. Kap. 2) anhand ausgewählter Untersuchungsstandorte bearbeitet.

5.2.1 Auswahlkriterien

Für die Auswahl der Untersuchungsstandorte waren folgende Kriterien ausschlaggebend. Die Untersuchungsstandorte sollten

- in Stadtstrukturen liegen, die zwar für Leipzig typisch sind (vgl. Kapitel 5.1.2), aber in ähnlicher Form auch in anderen Großstädten auftreten, um die Übertragbarkeit der Untersuchungen zu gewährleisten,
- unter stadtklimatischen Aspekten von hoher Relevanz sein, in dem sie durch starke sommerliche Überwärmung geprägt sind oder Bestandteil klimaökologischer Ausgleichsflächen sind,
- für den Einsatz der mobilen Meßeinheit (vgl. Kap. 4.2.2) geeignet sein, indem beispielsweise Innenhöfe frei zugänglich sind oder die mobilen meteorologischen Messungen im Straßenraum nicht durch zu hohes Verkehrsaufkommen behindert werden,
- in unmittelbarer Nachbarschaft alle für die jeweilige Stadtstruktur typischen technogenen und/oder natürlichen Strukturelemente aufweisen, um für die mobile Untersuchungen möglichst kurze Distanzen zwischen den Meßpunkten zu haben und damit die Untersuchungsdauer während eines Meßganges so gering wie möglich zu halten.

5.2.2 Standortbeschreibung

In Tabelle 3 werden in einer Übersicht alle Untersuchungsstandorte aufgelistet in denen mobile mikrometeorologische Untersuchungen durchgeführt wurden. Bei größeren Untersuchungsstandorten ist eine Kartierung der Umgebung im Anhang zu finden.

Strukturtyp	Standortbeschreibung und Strukturelemente	Stadtteil; Straße;
Großwohnsiedlung	Mit einfachem Abstandsgrün gestalteter Innenhofbereich eines 6-geschossigen Wohnblocks (Karte 2)	Leipzig-Grünau; Basteistraße
Gründerzeitliche Blockbebauung	Begrünter Innenhof einer 4-geschossigen Blockrandbebauung und Straßenschluchten ohne Vegetationsstrukturen (Karte 1 und 3)	Leipzig-Volkmarisdorf; Mariannenstraße; Ludwigstraße
Gründerzeitliche Blockbebauung	Großzügig angelegter Innenhofbereich mit parkähnlichem Charakter (Karte 4)	Kleinzschocher; Meyersche Häuser; Schönauer Straße
Parkanlage mit angrenzender Blockbebauung	Parkanlage mit verschiedenen Vegetationsstrukturen wie Baumgruppen und freien Rasenflächen, Baumallee; angrenzende Blockbebauung; Straßen mit und ohne Straßenbäume (Karte 5)	Mariannenpark; Zeumerstraße; P.-Heyes-Straße
Freiflächen	große Grünfläche mit benachbarter großer Parkplatzfläche	Festwiese; Jahnallee
Forstfläche	Städtischer Auwaldbereich mit geschlossenem Kronendach	Auwald; Die Nonne; Industriestraße
offene Blockrandbebauung	Hausfassaden mit und ohne Fassadenbegrünung	Reudnitz; Geographisches Institut; Johannisallee

Tab. 3: Untersuchungsstandorte der mobilen meteorologischen Meßkampagnen

Aus dem Stadtklimameßnetz Leipzig von MÜLLER 1997 konnten Meßstationen und Standorte übernommen werden, die räumlich zu den ausgewählten Untersuchungsstandorten der mobilen Meßkampagnen passen. Die Stationen wurden nicht umgesetzt, um die bisherigen Zeitreihen fortzuführen, wobei folgende Klimameßstationen übernommen und weitergeführt wurden:

- Leipzig-Grünau: Großwohnsiedlung; Breisgaustraße
- Leipzig-Plagwitz: Mischgebiet; Erich-Zeigner-Allee
- Leipzig-Volkmarisdorf: Blockrandbebauung (Innenhof); Ludwigstraße
- Leipzig-Mariannenpark: innerstädtische Parkanlage; Zeumerstraße;
- Leipzig-Umweltforschungszentrum: Permoserstraße

Zusätzlich wurden Klimadaten der Meßstationen der Sektion Hydrogeologie am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle verwendet, die mit gleichen Meßsystemen arbeiten. Mit in die Auswertung genommen wurden die Daten der Standorte

- Schkeuditz, einer Umlandstation im Nord-Westen von Leipzig, die im Auenbereich der Weißen Elster liegt und
- Leipziger Aue Nord, einer Bestandsstation im nördlichen Auwaldbereich.

5.2.3 Kartierung der Oberflächenstrukturen

Grundlage für eine Analyse und Bewertung der mikroklimatischen Bedingungen in Stadtstrukturen ist eine detaillierte Beschreibung und Kartierung der Umgebungsbedingungen. Eine Kartierung ist besonders bei den Untersuchungsstandorten notwendig, bei denen viele verschiedene technogene und/oder natürliche Strukturelemente für eine hohe Variabilität an mikrometeorologischen Bedingungen sorgen, dies trifft besonders auf die Untersuchungsstandorte der gründerzeitlichen Bebauungen, der Großwohnsiedlung und der Parkanlage Mariannenpark zu. Bei den sehr homogenen und sehr kleinräumigen Untersuchungsstandorten wie den Freiflächen, dem Waldstandort oder der Fassadenbegrünung, wurde eine Kartierung als nicht sinnvoll erachtet, da hier eine verbale Beschreibung als ausreicht. Zusätzlich zur Kartierung sind die Untersuchungsstandorte im Anhang mit Photos dokumentiert. Die kartographische Darstellung erfolgt mit dem geographischen Informationssystem ARC INFO und dem Programmpaket ARC VIEW.

Das methodische Vorgehen der Kartierung wurde sehr stark an die Arbeit von MÜNCHOW et al. 1996 angelehnt, bei der die Erfassung von Versiegelungsgraden im Vordergrund steht. Der

Kartierschlüssel wurde deshalb leicht modifiziert, um stadtklimatischen Aspekten stärker gerecht zu werden. In die Kartierung einbezogen werden

- die für Gebäudestrukturen relevanten Merkmale wie Gebäudehöhe, -ausrichtung, Geschößzahl und Dachart,
- die technogenen Belagarten der Bodenoberfläche wie gebundene Decken (z.B. Asphalt), Platten- und Pflasterbeläge und ungebundene Decken,
- die Vegetationsstrukturen wie Wiese oder Rasen, Beete, Strauchbepflanzungen, Einzelbäume und Baumgruppen und
- die Meßpunkte der mobilen Untersuchungen, so daß zwischen den Darstellungen der experimentellen Untersuchungen und den Umgebungsbedingungen eine räumliche Zuordnung möglich ist.

6 Untersuchungszeitraum

Die Untersuchungen wurden 1996 und 1997 durchgeführt. Die kontinuierlichen Meßwertaufzeichnungen an den in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Standorten haben zum 1.1.96 begonnen, Ausnahme ist die Station Volkmarsdorf, die aus meßtechnischen Gründen erst zum 1.6.96 starten konnte. Ende des Meßzeitraumes war der 31.12.97, so daß für die gewählten Standorte genau für zwei Kalenderjahre Klimadaten zur Verfügung stehen. Die mobilen Untersuchungen fanden analog dazu in den Sommermonaten 1996 und 1997 statt.

6.1 Klimatische Bedingungen im Untersuchungszeitraum

Da die thermischen Bedingungen im Untersuchungszeitraum für die Fragestellung dieser Arbeit von größerer Bedeutung sind als die hygrischen (vgl. Kap 3), werden für die Beschreibung der klimatischen Bedingungen vorrangig Isoplethendiagramme zur zeitlichen Verteilung der Lufttemperatur herangezogen. Die Abbildung 11 zeigt die Jahres- und Tagesgänge, beschrieben durch die stundenbezogenen wöchentlichen Mittelwerte der Lufttemperatur, für den Umlandstandort Schkeuditz 1996 und 1997.

Obwohl die beiden Jahre allgemein einen ähnlichen Jahresgang in der Lufttemperaturverteilung haben, sind in der Intensität der Lufttemperaturen doch erhebliche Unterschiede festzustellen.

Das Jahr 1996 ist durch eine Periode besonders tiefer Temperaturen im Februar gekennzeichnet, wobei die Sommermonate relativ kühl bleiben und nur im August während einer Woche (Kalenderwoche 34) das wöchentliche Stundenmittel von 25 °C überschritten wird. Nach Informationen des DEUTSCHEN WETTERDIENSTES 1997 ist das Jahr 1996 im Vergleich zu den langjährigen Mittelwerten (1961/90) allgemein als etwas zu kalt einzustufen. Besonders die hohe Anzahl an „Frost- und Eistagen“ sorgen dafür, daß die Jahresmitteltemperaturen der Stationen in 1996 um etwa 2 K niedriger ausfallen als 1997 (Tab. 4).

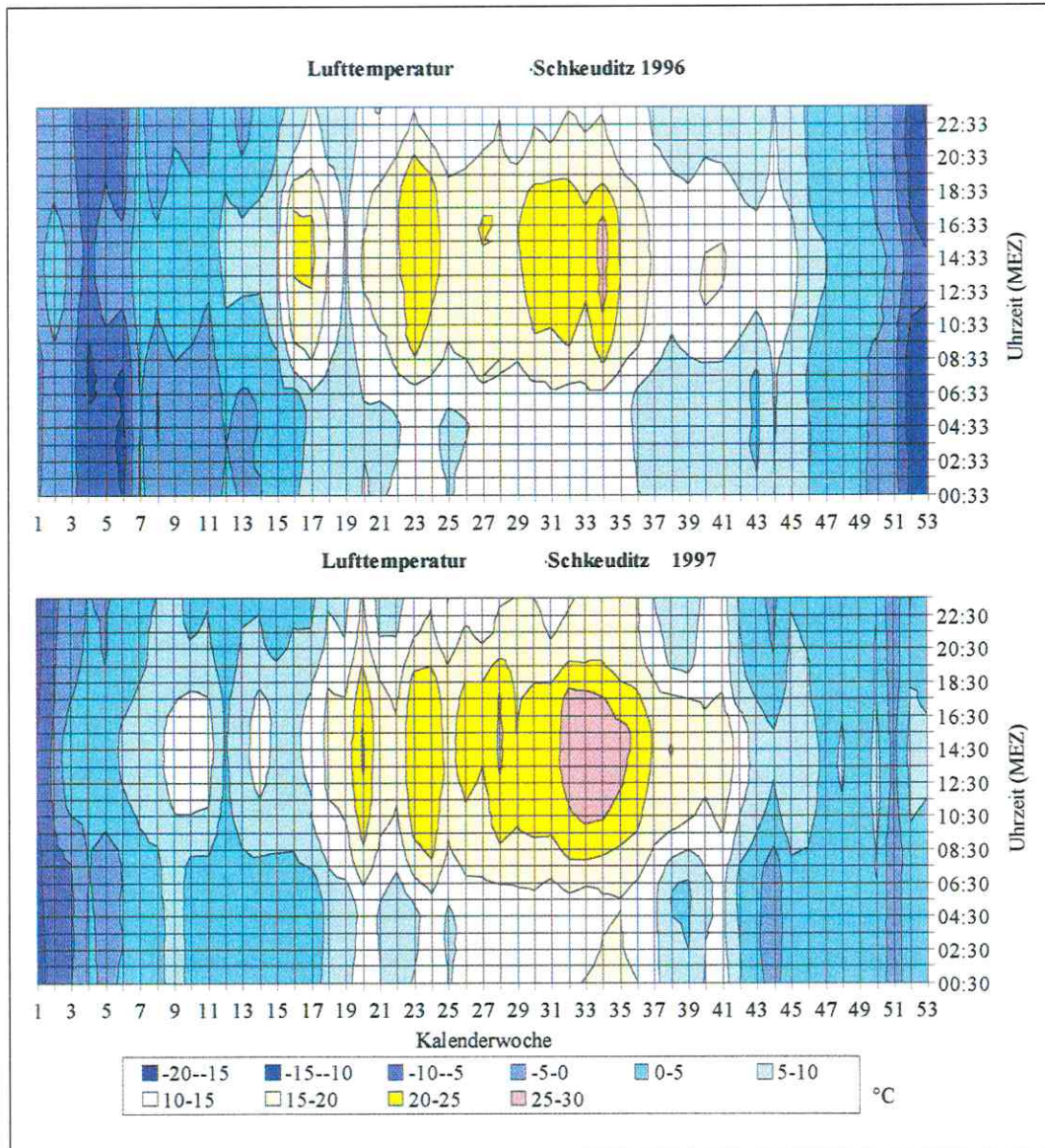


Abb. 11: Isoplethendiagramme der Lufttemperatur (wöchentliche Stundenmittel) an der Umlandstation Schkeuditz für die Jahre 1996 und 1997 (Meßhöhe 2m)

Das Jahr 1997 ist im langjährigen Vergleich als leicht wärmer einzustufen (DEUTSCHER WETTERDIENST 1998). Auffällig ist eine länger anhaltende Schönwetterperiode in den Augustwochen (Abb. 11). In diesem Zeitraum bleiben die wöchentlichen Stundenmittelwerte zur Mittagszeit sogar vier Wochen lang (Kalenderwoche 31 bis 34) über 25 °C. Zusammenfassend kann man sagen, daß im Jahresvergleich 96/97 das Untersuchungsjahr 1997 durch fast die doppelte Anzahl an Sommertagen gekennzeichnet war (Tab. 4).

Klima- stationen	1996					1997				
	Mittel- wert LT in °C	Heiße Tage Max. ≥ 30 °C	Sommer- tage Max. ≥ 25 °C	Frost- tage Min. < 0°C	Eis- tage Max. < 0°C	Mittel- wert LT in °C	Heiße Tage Max. ≥ 30 °C	Sommer- tage Max. ≥ 25 °C	Frost- tage Min. < 0°C	Eis- tage Max. < 0°C
Schkeuditz	7,2	7	35	128	48	9,1	11	64	101	14
Leipzig Aue Nord	6,7	1	18	125	48	8,6	0	26	93	14
Leipzig- Grünau	8,0	9	37	102	48	10,0	16	64	58	14
Leipzig- Volkmarsdorf	-	-	-	-	-	10,1	15	62	54	14
Leipzig- Mariannenpark	7,7	9	39	114	46	9,7	18	67	79	14

Tab. 4: Lufttemperaturdaten und Extremwerttage der Klimastationen in 1996 und 1997 (Basis für die Datenauswertung sind die 10-Minuten Mittelwerte der UFZ-Klimastationen (vgl. Kap.4))

Im Stadt-Umland Vergleich zeigt sich, daß die Jahresmittelwerte der Stadtstationen um etwa 1 K höher liegen als die der Umlandstation in Schkeuditz (Tab. 4). Dies spiegelt sich auch bei den Extremwerttagen wieder. Die Stadtstationen verzeichnen eine wesentlich geringere Anzahl an Frosttagen und geringfügig mehr „Heiße Tage“ und „Sommertage“. Dies entspricht auch ungefähr den Literaturangaben, wie sie in Tabelle 1 (Kap. 3.2) zusammengetragen sind. Besonders auffällig sind die Abweichungen der Bestandsstation im Leipziger Auwald-Nord, so ist die Anzahl der Sommertage etwa die Hälfte geringer als bei den Freilandstationen.

Betrachtet man exemplarisch die Isoplethendiagramme der Lufttemperaturdifferenzen für das Jahr 1997 zwischen der Umlandstation Schkeuditz und verschiedenen städtischen Standorten (Abb. 12 und 13) so werden die thermischen Unterschiede im Tages- und Jahresverlauf noch deutlicher.

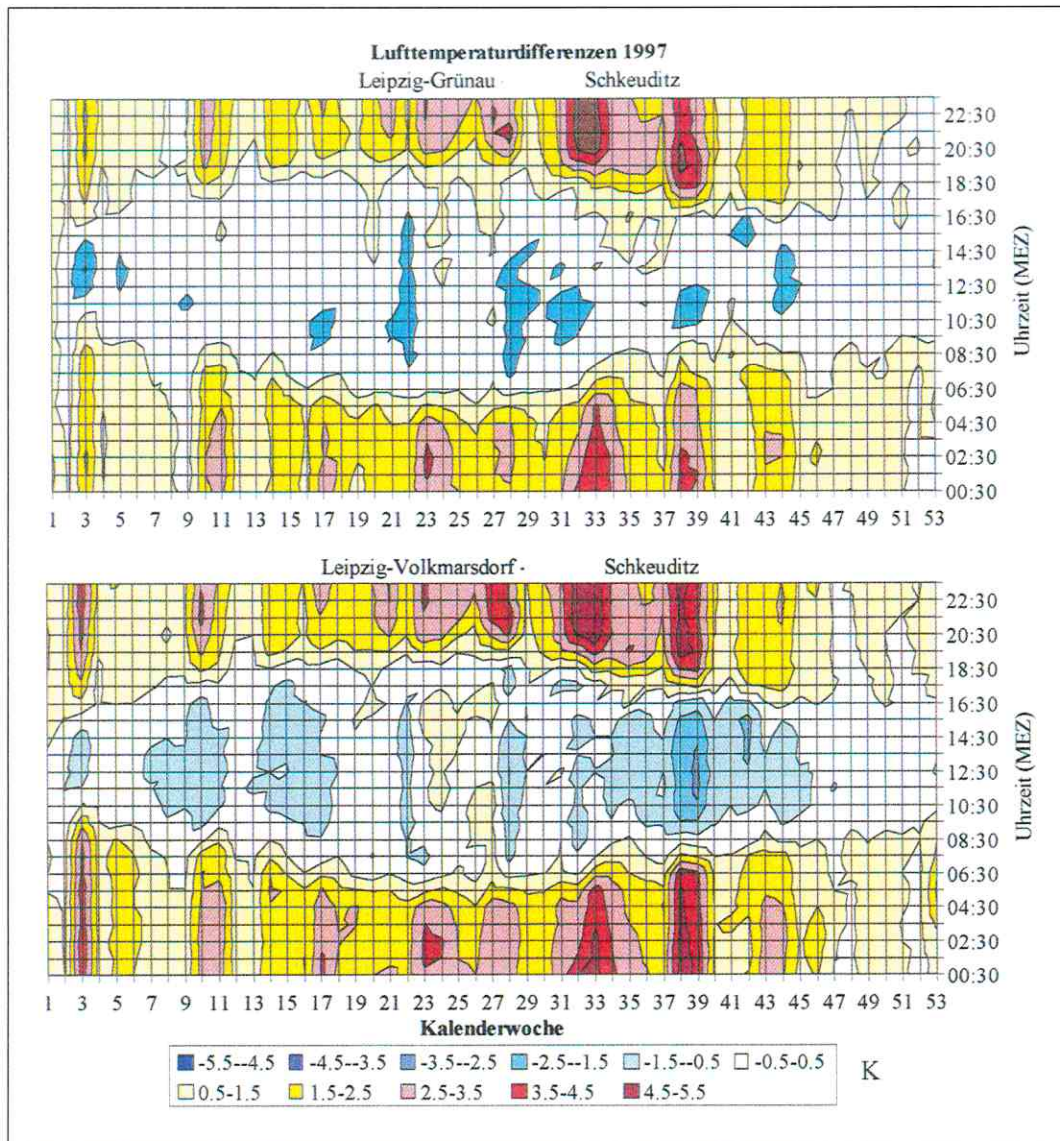


Abb. 12: Isoplethendiagramme der Lufttemperaturdifferenzen (gebildet aus wöchentlichen Stundenmittel) zwischen Leipzig-Grünau und Schkeuditz sowie Leipzig-Volkmarshaus und Schkeuditz für 1997 (Meßhöhe 2m)

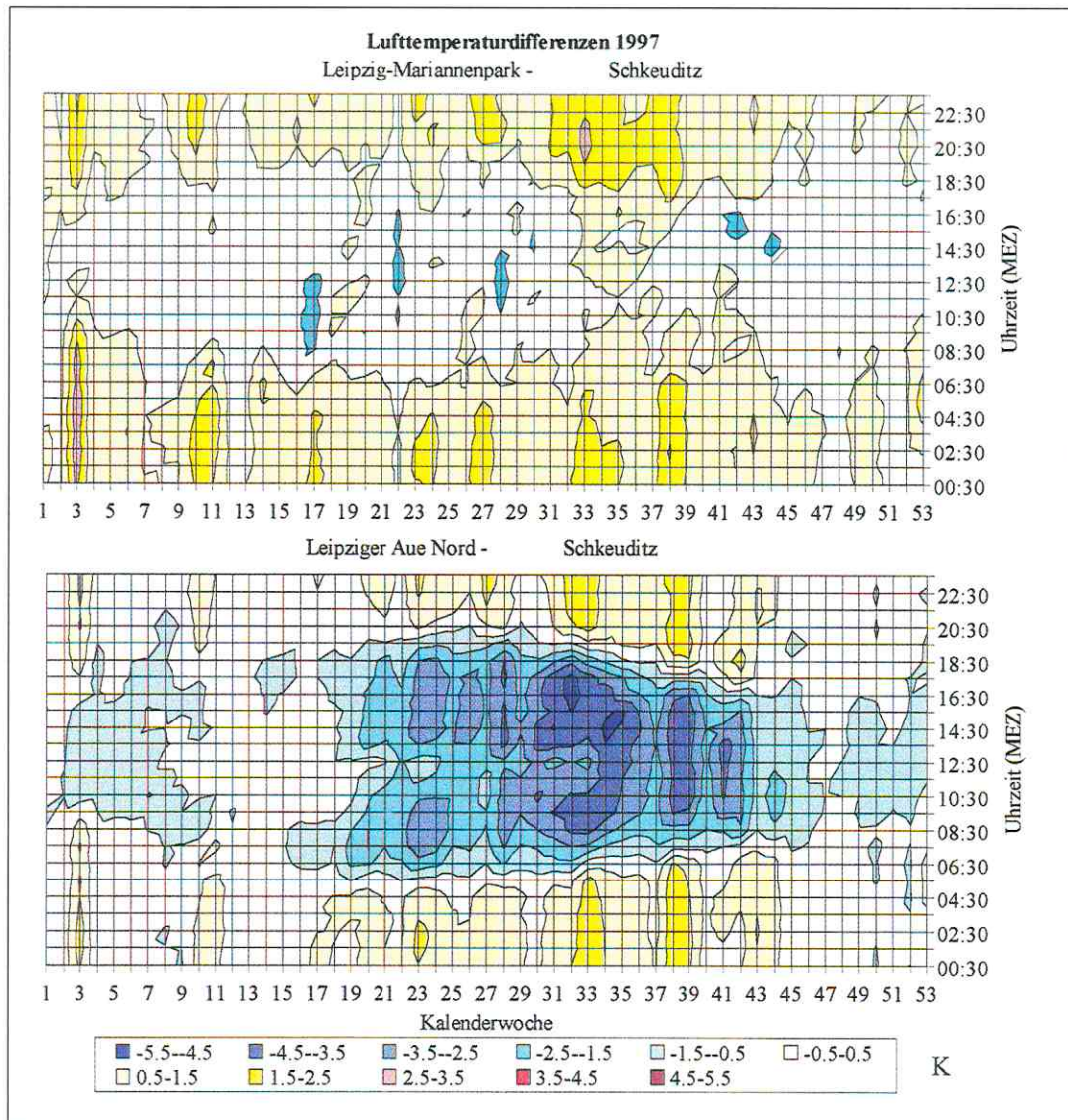


Abb. 13: Isoplethendiagramme der Lufttemperaturdifferenzen (gebildet aus wöchentlichen Stundenmittel) zwischen Leipzig- Mariannenpark und Schkeuditz sowie Leipziger Aue Nord und Schkeuditz für 1997 (Meßhöhe 2m)

In der Abbildung 12 sind zwei Grafiken zusammengefaßt, die den Unterschied zwischen einer Umlandstation und zwei durch Bebauung dominierte Stadtstrukturen, einem Standort in einer Großwohnsiedlung und einer gründerzeitlichen Blockbebauung, verdeutlichen. Beide Grafiken zeigen eine regelmäßige Überwärmung der bebauten Strukturen während der Nachtstunden, wie sie auch bei KUTTLER 1997 (vgl. Abb. 5 in Kap. 3.2.3) und BARLAG 1993 dokumentiert wurden. Bei der angewendeten wöchentlichen stundenbezogenen Mittelwertbildung lassen sich sehr gut die Zeiträume aufzeigen, in denen sommerliche Strahlungswetterlagen verstärkt zum Stadtklima-Effekt beitrugen (in 1997 besonders Kalenderwoche 31 bis 35 und 38). Daß die Wärmeinselintensität am Standort der gründerzeitlichen Blockbebauung leicht größer ist, liegt daran, daß es sich hier um einen reinen Innenhofstandort handelt, der durch eine große Horizonteinengung die nächtliche Ausstrahlung entsprechend behindert (vgl. Kap. 3.2).

Tagsüber sind die Verhältnisse aufgrund besserer Durchmischung fast ausgeglichen, das zeigt sich besonders am Standort der Großwohnsiedlung. Am Meßpunkt in der gründerzeitlichen Blockbebauung ist sogar eine Abkühlung gegenüber der Umlandstation zu verzeichnen, die durch eine Verschiebung des maximalen Energieumsatzes in Dachhöhe hervorgerufen wird. Unterstützt wird dieser Effekt noch durch ein meßtechnisches Problem, auf das bereits in Kapitel 4.2.1 hingewiesen wird. Die eingesetzten Temperaturfühler sind nicht ventiliert und nur mit einfachem Strahlungsschutz versehen, so daß bei direkter Sonneneinstrahlung bis zu einem Kelvin höhere Werte aufgezeichnet werden können. So kann es tagsüber an der besonnten Station in Schkeuditz zu verfälschten höheren Werten kommen, die an der, durch Gebäudeschatten beeinflussten, Station in Volkmarisdorf nicht auftreten, welche deshalb in der Lufttemperaturdifferenz als kühler erscheint.

In Abbildung 13 werden die Lufttemperaturdifferenzen zwischen Schkeuditz und einer Station im Mariannenpark (städtischen Parkanlage) und einer Bestandstation im Auwald gegenübergestellt. Die Lufttemperaturdifferenzen zwischen der Parkanlage und dem Umland fallen von den untersuchten Strukturen am geringsten aus, was an den ähnlichen Ein- und Ausstrahlungsbedingungen größerer Freiflächen liegt. Allerdings ist auch hier der Einfluß der nächtlichen Wärmeinsel in der Stadt festzustellen, die sich bis in die Parkanlage auswirkt, wenn auch nicht so ausgeprägt, wie in den Bebauungsstrukturen selbst. Dadurch, daß beide Meßpunkte tagsüber nicht beschattet sind, eliminiert sich die mögliche Meßwertabweichung (s.o.).

Ein ganz anderes Bild bietet die Temperaturdifferenz von Freiland (Schkeuditz) und Bestandsstation (Auwald Leipziger Aue Nord). Auffällig sind hier die ausgeprägten Differenzen während der Sommermonate. Das Isoplethendiagramm zeigt sehr deutlich, daß die Waldflächen wesentlich ausgeglichene klimatische Bedingungen (geringere tägliche Lufttemperaturamplituden) aufweisen als Freiflächen. Das geschlossene Kronendach des Auwaldes ist verantwortlich dafür, daß die nächtliche Abkühlung in Bodenniveau eingeschränkt ist, und somit nachts die Lufttemperaturen im Bestand in Bodennähe höher sind als auf der Freifläche. Tagsüber ist die Situation genau umgekehrt, jetzt ist es im Bodenniveau der Waldfläche kühler, da der maximale Energieumsatz im Kronenraum stattfindet und zusätzlich die Transpiration der Auwaldvegetation für einen höheren latenten Wärmefluß und damit für eine Abkühlung der Lufttemperatur sorgt (vgl. Kap. 2.2.1). Auch hier wird die Situation noch durch die angesprochenen meßtechnischen Probleme verstärkt, aber mit bis zu 4,5 K niedrigeren Werten im Auwald sind die Unterschiede doch wesentlich größer als eine mögliche Abweichung von einem Kelvin. Im Vergleich zwischen den Abbildungen 12 und 13 wird insgesamt doch recht deutlich, wie wichtig innerstädtische Frei- und Waldflächen hinsichtlich ihrer thermischen Ausgleichsfunktionen sind.

Innerhalb dieser zweijährigen Untersuchungsphase wurden für ausgewählte Meßkampagnen exemplarisch detailliertere Untersuchungen zu den mikroklimatischen Bedingungen durchgeführt, die im folgenden beschrieben werden.

6.2 Zeiträume der mobilen Meßkampagnen

Wie bereits in der Zielsetzung formuliert (Kap. 2), werden die mobilen Untersuchungen ausschließlich während windschwachen sommerlichen Strahlungswetterlagen durchgeführt, um die Extremsituationen thermischer Belastung in Stadtstrukturen zu erfassen. Wie auch aus den Abbildungen 11 bis 13 abzuleiten ist, kamen für die mobilen Untersuchungen für 1996 und 1997 hauptsächlich die Augustwochen in Frage. Während die Meßkampagnen 1996 vorwiegend auf die Kalenderwoche 34 beschränkt blieben, gab es in 1997 mehrere Episoden in den Kalenderwochen 31 bis 34. Insgesamt wurden an 16 Tagen mobile Meßkampagnen durchgeführt, die hier im Detail nicht aufgelistet werden, da der genaue Untersuchungszeitpunkt in den späteren Ergebnisdarstellungen mit angeführt wird.

Die Meßkampagnen fanden tagsüber zwischen 7:00 Uhr und 19:00 Uhr (MEZ) statt. Eine Ausdehnung auf zusätzliche Nachtuntersuchungen war aus Kapazitätsgründen nicht möglich. Die Meßrouten sind so angelegt, daß jeder Meßpunkt entweder jeweils nach 30 oder spätestens 60 Minuten wieder erreicht wird, wodurch sowohl Tagesgänge an einzelnen Meßpunkten als auch Profilrouten von 4-8 Meßpunkten möglich waren. Die untersuchten Meßpunkte sind in den Karten im Anhang verzeichnet und durchnummeriert, so daß die Meßroute des jeweiligen Untersuchungsgebietes dort nachvollzogen werden kann.

Der Thermalscanner zur bodengestützten Infrarotthermographie stand nur leihweise für kurze Zeiträume zur Verfügung, so daß nicht bei allen mobilen Meßkampagnen Thermalaufnahmen möglich waren. Ebenso sind teilweise zur besseren Auslastung des Scanners an zwei verschiedenen Untersuchungsgebieten Thermalaufnahmen gemacht worden, obwohl die mobilen Untersuchungen auf ein Gebiet beschränkt blieben.

7. Ergebnisse experimenteller Untersuchungen

Die Auswertung der meteorologischen Messungen und Geländeuntersuchungen gliedert sich in drei Schwerpunkte. Einleitend ist es notwendig, die Beziehungen von meteorologischen und thermophysiologischen Kenngrößen zu betrachten, bevor anschließend die mikrometeorologischen Einflüsse der technogenen und natürlichen Umgebungsflächen sowie die Variabilität human-biometeorologischer Bedingungen in ausgewählten Stadtstrukturen behandelt werden.

7.1 Einfluß von mikrometeorologischen Bedingungen auf thermophysiologische Kenngrößen

Daß die meteorologischen Bedingungen in enger Beziehung zu den thermophysiologischen Kenngrößen PET und PMV stehen, ist außer Frage, da die meteorologischen Werte die Eingangsgrößen für die human-biometeorologische Modellierung bilden. Innerhalb dieses Kapitels stellt sich deshalb nicht die Frage ob, sondern welche der meteorologischen Kenngrößen einen besonders engen Bezug zu den Kenngrößen PMV und PET während sommerlichen Strahlungswetterlagen aufweisen und ob damit die eine oder andere meteorologische Größe als Indikator für eine thermophysiologische Bewertung dienen kann. Bevor die durchgeführten Korrelationsanalysen näher betrachtet werden, soll einführend an typischen Tagesgängen eines Beispielzeitraumes gezeigt werden, bei welchen meteorologischen Konditionen die mobilen Untersuchungen stattgefunden haben.

7.1.1 Typische Tagesgänge meteorologischer Kenngrößen bei Strahlungswetterlagen

Da alle mobilen Meßkampagnen bei ähnlichen meteorologischen Bedingungen durchgeführt wurden, reicht es aus, die Tagesgänge an einem Beispielzeitraum aufzuzeigen. In der Zeit vom 3.8.97 bis zum 21.8.97 dominierte hoher Luftdruck über dem fennoskandischen Raum die Wettersituation in Deutschland (DEUTSCHER WETTERDIENST 1997) (vgl. dazu Abb. 11-13; KW 32-34). Aus dieser Schönwetterperiode wird ein Zeitraum von drei Tagen (11.8.97

bis 13.8.97) ausgewählt, welche als Beispiel zur Beschreibung der typischen Tagesgänge bei Strahlungswetterlagen dienen und wo auch mobile Untersuchungen durchgeführt wurden. Für die Darstellung der Globalstrahlung (Abb. 14) werden die Werte der Dachstation des Umweltforschungszentrums in Leipzig-Sellerhausen herangezogen, während für Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit (Abb. 15 bis 17) die Werte der Umlandstation Schkeuditz und im Vergleich dazu die der Stadtstationen Leipzig-Volkmarshausen (gründerzeitliche Blockbebauung) und Leipzig-Mariannenpark (Parkanlage) angeführt werden. Wegen der ähnlicher Kurvenverläufe (z.B. Leipzig-Volkmarshausen und Leipzig-Grünau) und zur besseren Übersicht wurde auf die Darstellung aller Stationen verzichtet.

Die Globalstrahlung (Abb. 14), die in Dachniveau in etwa 26 m über Grund gemessen wird, zeigt an alle drei Tagen Maximalwerte von 800 W/m^2 auf. Die Tageszeit, an der kurzweilige Einstrahlung registriert wurde, reicht von 5:30 Uhr bis 19:30 (MEZ).

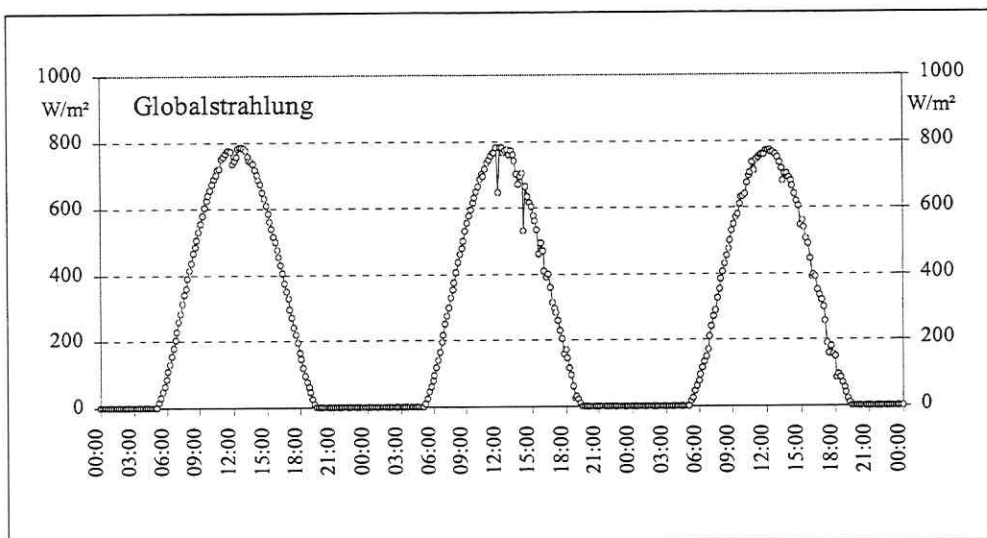


Abb. 14: Tagesgang Globalstrahlung, gemessen an der Dachstation des Umweltforschungszentrums (Höhe ca. 26m über Grund) vom 11.8.97 bis 13.8.97 (Zeitangaben in MEZ)

Leichte Quellbewölkung, die vereinzelt ab den Mittagsstunden aufgetreten ist, kann zu kurzzeitig niedrigeren Globalstrahlungswerten führen. Im Rahmen der Meßkampagnen wurde darauf geachtet, bei störendem Einfluß von Quellwolken die Messungen zu unterbrechen, um die Vergleichbarkeit der Strahlungsmeßergebnisse zu gewährleisten.

Der Tagesgang der Lufttemperaturen (Abb. 15) ist geprägt durch eine große Amplitude zwischen Tag- und Nachtsituation. Tagsüber sorgt erhöhte Einstrahlung mit einem hohen Anteil direkter Strahlung für einen hohen Energieumsatz an der Erdoberfläche, der mit Lufttemperaturmaxima um die 30°C verbunden ist. Zu beachten ist, daß die Tagesmaxima der Lufttemperaturen gegenüber der Tagesmaxima der Globalstrahlung um zwei bis drei Stunden in den Nachmittag hinein verschoben sind. Der starke nächtliche Temperaturabfall ist auf ungehinderte langwellige Ausstrahlungsbedingungen zurückzuführen, wobei diese innerhalb der bebauten Strukturen wesentlich stärker eingeschränkt sind (vgl. dazu auch Kap. 6.1 und Kap. 3). So werden in den Morgenstunden gegen 6:00 (MEZ), kurz bevor die beginnende kurzwellige Einstrahlung Wirkung zeigt, in Schkeuditz Tiefsttemperaturen um 12 °C und in Leipzig- Volkmarsdorf 16 °C verzeichnet, der Standort Mariannenpark liegt mit Werten um 14 °C dazwischen.

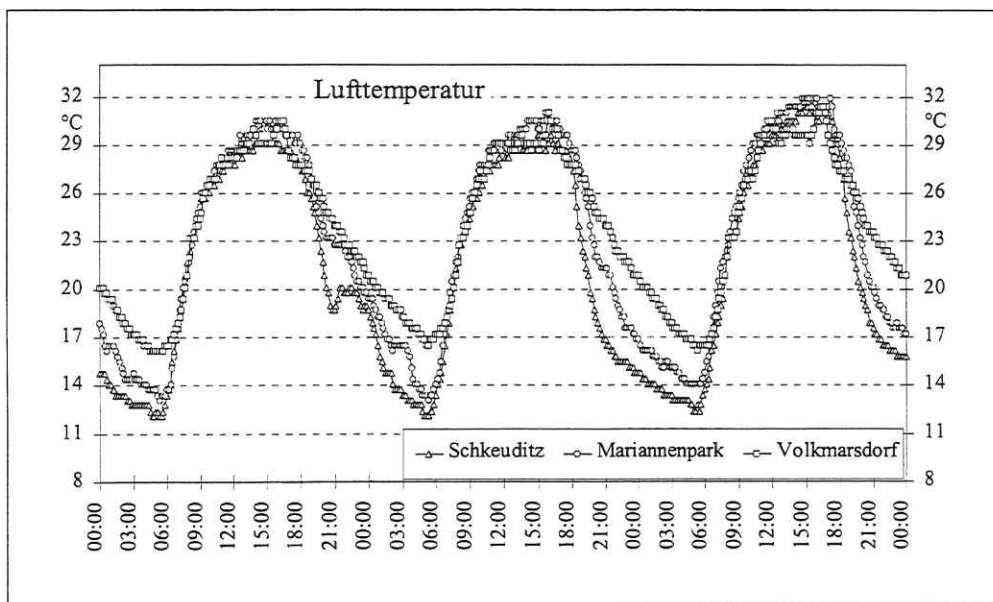


Abb. 15: Tagesgang Lufttemperatur in 2 m Höhe, gemessen an der Umlandstation Schkeuditz und den Stadtstationen Leipzig-Volkmarsdorf und Leipzig-Mariannenpark vom 11.8.97 bis 13.8.97 (Zeitangaben in MEZ)

Die eigenen Messungen decken sich damit sehr gut mit den Erfahrungen aus der Literatur (z.B. KIESE 1995; KATZSCHNER 1994; BRÜNDL et al.1987; HORBERT 1983) (vgl. auch Kap. 3.2.3), die für Strahlungswetterlagen ähnliche Differenzierungen festgestellt haben.

Eine größere Durchmischung, resultierend aus höheren Windgeschwindigkeiten (Abb. 17), sorgt tagsüber für ausgeglichene Lufttemperaturen zwischen den Untersuchungsstandorten. Kleinere Schwankungsbereiche bei den Tagesmaxima, können mit den bereits angesprochenem Problem der nicht ventilierten, nur mit Strahlungsschutz versehenen Temperaturgebern zusammenhängen (vgl. Kap. 4.2.1 und 6). Die Schwankungsbereiche sind am letzten Beispieltag am größten, was mit den niedrigeren Windgeschwindigkeiten und den dadurch eingeschränktem Wärmetransport an diesem Tag verbunden ist.

Durch ihre große Temperaturabhängigkeit ist die relative Feuchte (Abb. 16) sehr eng an den Tagesgang der Lufttemperatur gekoppelt, entsprechend ausgeprägt sind deshalb auch die Amplituden bei Strahlungswetterlagen.

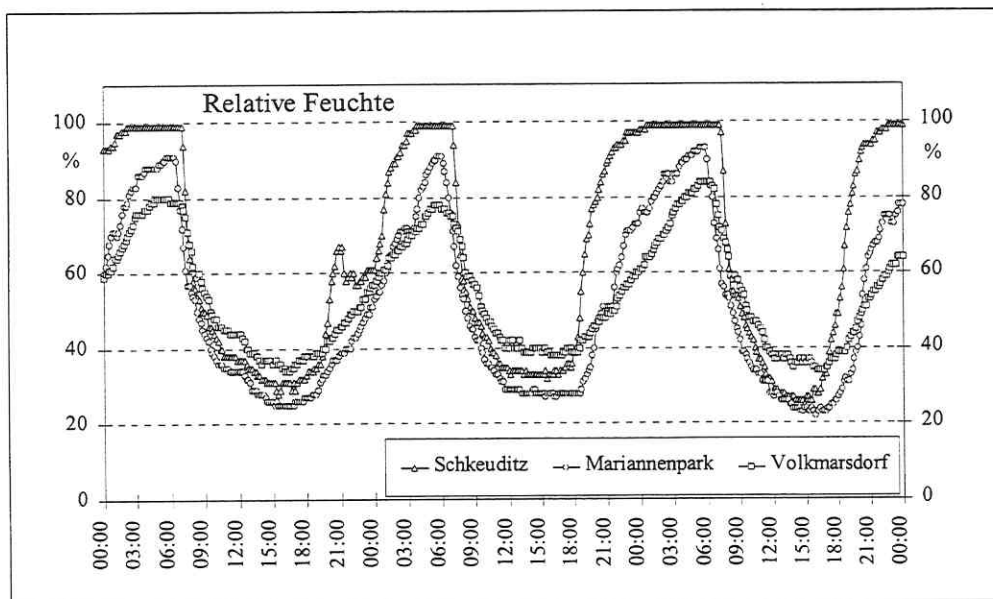


Abb. 16: Tagesgang relative Luftfeuchte in 2 m Höhe, gemessen an der Umlandstation Schkeuditz und den Stadtstationen Leipzig-Volkmarshdorf und Leipzig-Mariannenpark vom 11.8.97 bis 13.8.97 (Zeitangaben in MEZ)

Am größten ist die Amplitude an der Umlandstation in Schkeuditz. Die Tagesminima in den frühen Nachmittagsstunden liegen bei ca. 30 % relativer Feuchte, während in den Morgenstunden die Taupunkttemperatur unterschritten wird. Aufgrund der positiven Temperaturanomale weist die Kurve der Station Leipzig-Volkmarsdorf eine wesentlich geringere Amplitude auf, bei der in den Morgenstunden nur Werte um 80% erreicht werden und damit im Vergleich zur Umlandstation die Taupunkttemperatur nicht erreicht wird, auch an der Station Mariannenpark wird in 2m Höhe die Dampfdrucksättigung nicht erreicht. Die Tagesminima von Leipzig-Volkmarsdorf liegen zwischen 35 und 40 % und damit um ca. 5 bis 10 % über den Werten der Umlandstation. Ähnliche Tagegänge der relativen Feuchte haben BRÜNDL et al. (1987) am Beispiel von Stadtstrukturen in München aufgezeichnet.

Betrachtet man die Tagesgänge der Windgeschwindigkeiten in Abbildung 17, so sind deutlich die tageszeitlichen Relationen zur Einstrahlung zu erkennen, wie sie bei autochthonen Wetterlagen mit lokalen Druckgradienten typisch sind.

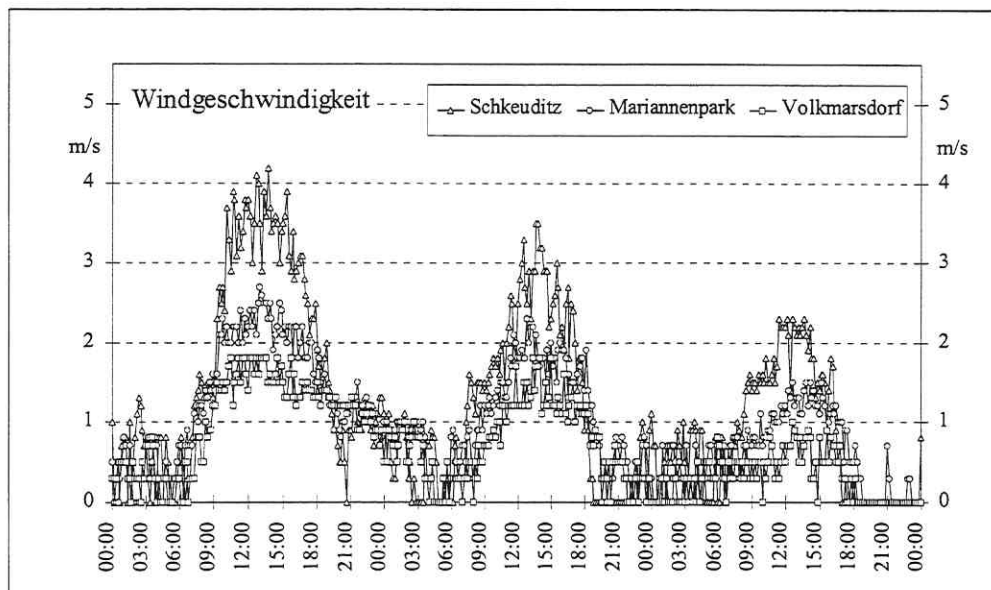


Abb. 17: Tagesgang Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe, gemessen an der Umlandstation Schkeuditz und den Stadtstationen Leipzig-Volkmarsdorf und Leipzig-Mariannenpark vom 11.8.97 bis 13.8.97 (Zeitangaben in MEZ)

Mit Beginn der Einstrahlung steigen die Windgeschwindigkeiten an, erreichen während der Nachmittagsstunden das Maximum und flauen nach Sonnenuntergang wieder ab. Beispiele für dieses sommerliche Phänomen sind auch in Untersuchungen von BARLAG (1993) beschrieben.

In der räumlichen Differenzierung der Windgeschwindigkeit zeigen sich besonders tagsüber signifikante Unterschiede, die eng an die verschiedenen Oberflächenrauigkeiten der gezeigten Standorte gebunden sind, nachts hingegen sind die Windgeschwindigkeiten an allen drei Standorten relativ angeglichen. An der Station Volkmarsdorf, die in einer abgeschlossenen Innenhofsituation steht, werden tagsüber um etwa 50 % niedrigere Werte gemessen als an der freistehenden Umlandstation in Schkeuditz, die Werte der Station Mariannenpark (Parkanlage) liegen an allen drei Tagen dazwischen.

7.1.2 Korrelationen meteorologischer und thermophysiologischer Kenngrößen

In die Korrelationsanalyse sind alle Untersuchungsergebnisse einbezogen, die während der mobilen Messungen durchgeführt wurden. Der Gesamtstichprobenumfang hat 827 Einzelmessungen, wobei jedesmal ein Wert für Lufttemperatur, Dampfdruck, Windgeschwindigkeit, die verschiedenen Richtungen der kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse und daraus abgeleitet die mittlere Strahlungstemperatur bestimmt wurde.

In einer Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten von PET und PMV mit den meteorologischen Größen (Tab. 5) wird ein Vergleich zwischen den beiden human-biometeorologischen Kenngrößen hinsichtlich ihrer unterschiedlichen meteorologischen Gewichtungen möglich. Darüber hinaus wird beschrieben, welche der meteorologischen Größen bei den angegebenen Untersuchungsbedingungen (vgl. Kap. 6) einen besonders engen Bezug zu PET und PMV aufweisen.

Zusätzlich zu den vier Inputgrößen (T_a , e , v , T_{mrt}) werden stellvertretend für die verschiedenen Strahlungsflüsse die kurzwellige Strahlung aus dem oberen Halbraum und die langwellige Strahlung aus dem unteren Halbraum analysiert. Die Korrelationen von PET und PMV fallen insgesamt recht einheitlich aus, was darauf schließen läßt, daß mit beiden Bewertungsansätzen ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, daß PMV eher einen

engeren Bezug zur Lufttemperatur aufweist, während PET stärker an die mittlere Strahlungstemperatur gekoppelt ist.

	Ta	e	v	Tmrt	KW-O	LW-U
PET	0.71	n.s.	-0.21	0.84	0.68	0.79
PMV	0.80	n.s.	-0.25	0.78	0.59	0.79

Tab. 5: Korrelationskoeffizienten ausgewählter meteorologischer Größen mit den humanbiometeorologischen Bewertungsgrößen PET und PMV (n=827; n.s. = nicht signifikant bei einem Vertrauensbereich von 99,9%)

In einer Analyse zwischen PET und PMV (Abb. 18) wird die enge Korrelation ($r=0,99$) zwischen beiden Größen noch deutlicher. Auffällig ist, daß bei PET zwischen 20 °C und 30 °C die PMV-Werte etwas höher ausfallen, während oberhalb von 30 °C PET die PMV-Werte im Vergleich leicht niedriger sind. Im Bereich unterhalb von PMV mit Wert 0 und PET mit Wert 20 °C ist eine etwas größere Streuung festzustellen. Vergleicht man diese Korrelationsanalyse mit der Gegenüberstellung von PMV und PET nach MATZARAKIS und MAYER (1997) in Tabelle 2 (Kap. 4.3.2) so werden die dort angegebenen Größenordnungen bestätigt.

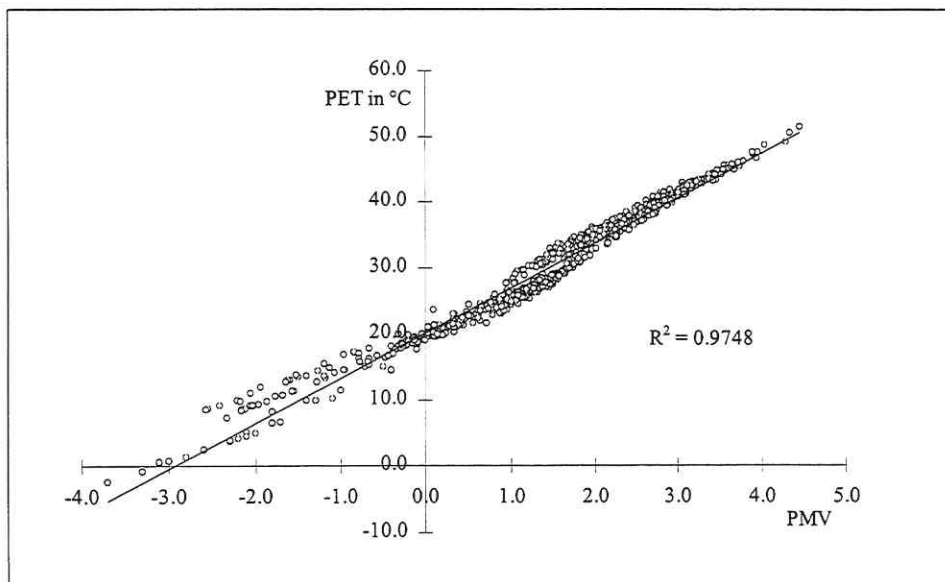


Abb. 18: Korrelation aller gemessenen Werte von PET und PMV (n=827)

Fazit ist, daß sowohl mit dem Klima-Michel-Modell (Kenngröße: PMV) nach JENDRITZKY et al. (1990) als auch mit dem Münchener Energiebilanz Modell für Individuen (Kenngröße: PET) nach HÖPPE (1993) ähnliche Ergebnisse in der human-biometeorologischen Bewertung erzielt werden. Der Einfachheit halber wird deshalb bei allen weiteren human-biometeorologischen Auswertungen nur noch die Größe PET verwendet. Gegenüber der Bewertungsgröße PMV hat PET den Vorteil, daß bei gleichem Meß- und Berechnungsaufwand eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen thermischen Größen gegeben ist (physikalische Einheit °C) und deshalb als human-biometeorologische Bewertungsgröße verständlicher ist (MAYER 1997).

Aus der Gegenüberstellung in Tabelle 5 geht hervor, daß bei sommerlichen Strahlungswetterlagen tagsüber die Lufttemperatur und die mittlere Strahlungstemperatur in sehr enger Beziehung zu den PET-Werten stehen und Dampfdruck und Windgeschwindigkeit von diesen stärker überlagert werden. Um die Abhängigkeiten noch näher zu betrachten, werden für die Lufttemperatur und die mittlere Strahlungstemperatur Korrelationsdiagramme dargestellt.

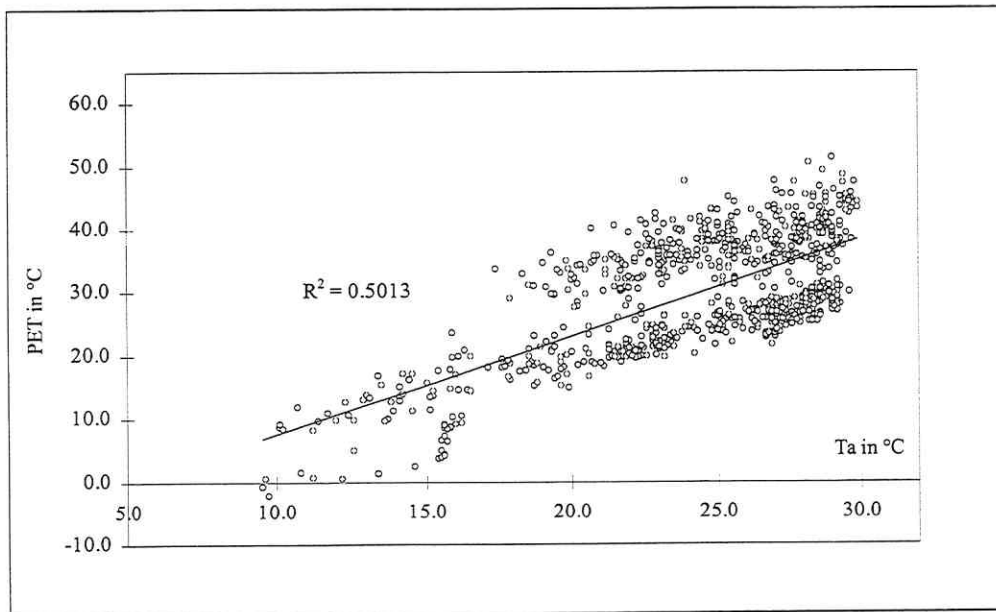


Abb. 19: Korrelation der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) mit der Lufttemperatur (n=827)

In Abbildung 19 sind alle gemessenen Wertepaare von PET und Lufttemperatur in einem Punktdiagramm dargestellt. Trotz der signifikanten positiven Korrelation ist eine erhebliche Streuung der Werte um die Trendlinie festzustellen, so sind beispielsweise bei einer Lufttemperatur von 25 °C Werte zu finden, die von 20 °C PET bis über 40°C PET reichen. Auffällig ist, daß sich im Lufttemperaturbereich oberhalb von etwa 18°C zwei Punktwolken herausbilden, wobei eine unterhalb, und die andere oberhalb der Trendlinie liegt.

Um die Zusammenhänge noch stärker differenzieren zu können, wurden die PET-Werte untergliedert in Messungen, die entweder im Schatten (Baumschatten oder Gebäudeschatten) oder unter direkter Sonneneinstrahlung vorgenommen wurden (Abb. 20). Die Gegenüberstellung von PET und Lufttemperatur bleibt damit bestehen, wobei zusätzlich Aspekte direkter Einstrahlung mit einbezogen werden.

Im Vorfeld sind alle Datensätze, die sich nicht eindeutig einer Messung im Schatten oder in der Sonne zuordnen lassen, wie zum Beispiel Messungen unter dem Einfluß von leichter Quellbewölkung, aus der Wertung genommen worden. Dadurch erklärt sich auch der geringere Stichprobenumfang (n=773) in Abbildung 20.

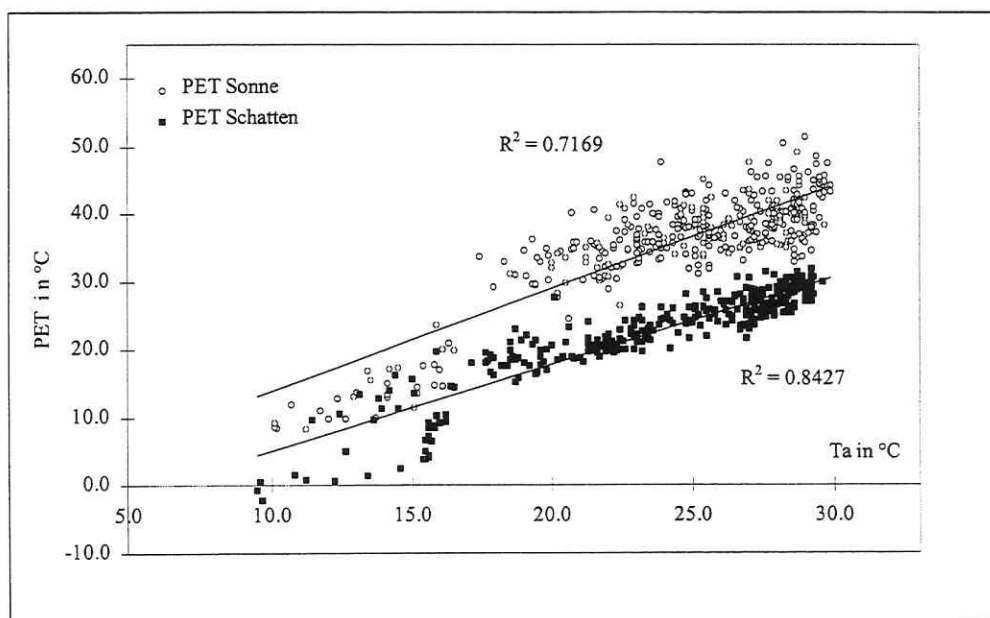


Abb. 20: Korrelation der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) mit der Lufttemperatur aufgeteilt nach besonnten und beschatteten Standorten (n=773)

Die Korrelationen der Lufttemperatur zu besonnten und beschatteten Messungen von PET sind durch die Aufteilung noch deutlicher geworden. Bei den Messungen unter direkter Sonneneinstrahlung fallen die Streuungen um die Trendlinie allerdings etwas größer aus als in den beschatteten Bereichen. Im Mittel weisen die Standorte mit direkter Sonneneinstrahlung etwa 10 °C höhere PET-Werte auf, was allerdings nur für Lufttemperaturen zutrifft, die über ca. 17 oder 18 °C liegen. Die Lufttemperatur in Kombination mit den kurzwelligen Einstrahlungsbedingungen liefert damit Hinweise, die für die untersuchte Wetterlage eine grobe Abschätzung für PET möglich machen. Unter dem Lufttemperaturbereich von ca. 18 °C ist die Verteilung der Punkte wesentlich uneinheitlicher, was darauf zurückzuführen ist, daß es sich bei diesen Werten um Morgenmessungen handelt, bei denen die Einstrahlungsbedingungen gegenüber anderen meteorologischen Größen eine untergeordnete Rolle spielen. Zu erwähnen ist, daß die Repräsentativität in diesem Bereich geringer ist, da nur wenige Messungen unter einer Lufttemperatur von 18 °C durchgeführt wurden, und deshalb nur ein kleiner Stichprobenumfang vorliegt.

Den gleichen Sachverhalt spiegelt Abbildung 21 wieder, in der in einer Korrelationsanalyse die mittlere Strahlungstemperatur den PET-Werten gegenübergestellt wird.

Betrachtet man den gesamten Stichprobenumfang sind einige Ausreißer zu finden, die trotz einer hohen mittleren Strahlungstemperatur geringe Werte an PET aufweisen. Auch hier handelt es sich um Bedingungen während Morgenstunden, bei denen Einstrahlung schon anzutreffen ist, die Lufttemperaturen aber noch nicht nachgezogen haben (s.o.).

Um dies zu belegen werden in einer weiterführenden Darstellung (Abb. 22) alle Wertepaare entfernt, die bei einer Lufttemperatur unter 18 °C gemessen wurden. Das Resultat ist, daß alle Ausreißer, die extrem von der Trendlinie abweichen, wegfallen und deshalb eine wesentlich deutlichere Korrelation ($r=0.92$) zwischen T_{mrt} und PET festzustellen ist. Die hohe Dominanz der Strahlungsbedingungen in der human-biometeorologischen Bewertung, auf die bereits JENDRITZKY et al. (1990) und HÖPPE und MAYER (1987) hingewiesen haben, kommt in der Abbildung 22 nochmals zum Ausdruck.

Generell sind in Abbildungen 21 und 22 zwei Punktwolken auszumachen, die ähnlich wie in Abbildung 20, beschatteten (T_{mrt} bei ca. 20 bis 40 °C) und besonnten (T_{mrt} bei ca. 50 bis 70 °C) Situationen zugeordnet werden können.

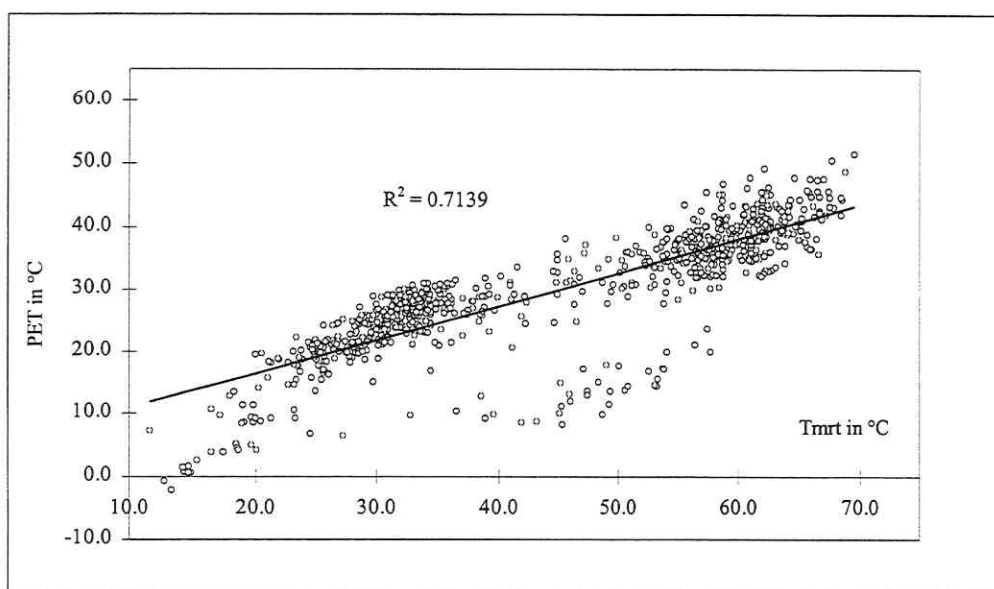


Abb. 21: Korrelation der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) mit der mittleren Strahlungstemperatur (n=827)

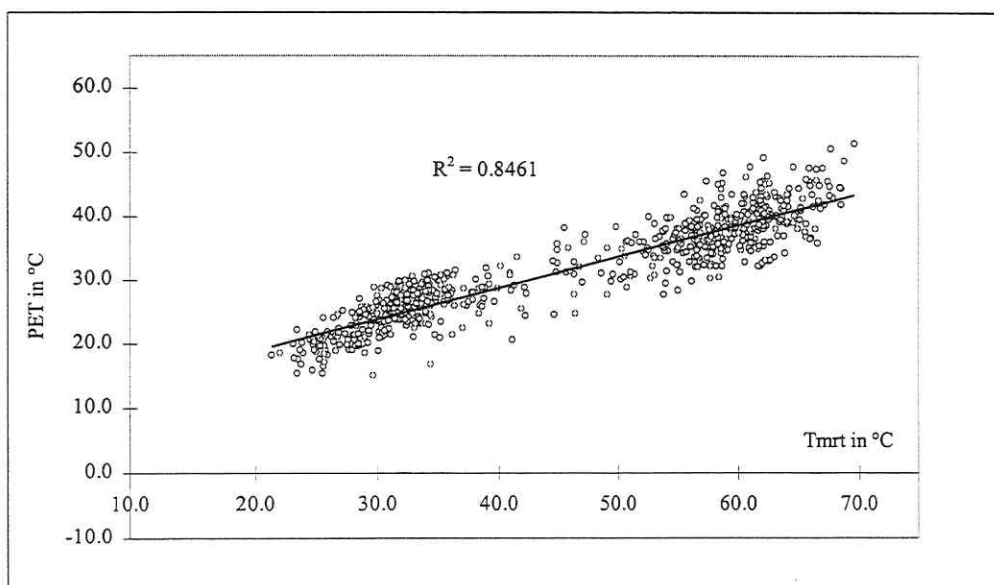


Abb. 22: Korrelation der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) mit der mittleren Strahlungstemperatur für alle Wertepaare, die bei Lufttemperaturen über 18 °C gemessen wurden (n=739).

Die gute Korrelation von T_{mrt} und PET könnte dafür sprechen die mittlere Strahlungstemperatur als meteorologischen Indikator für eine human-biometeorologische Beurteilung bei Strahlungswetterlagen zu verwenden. Allerdings ist anzumerken, daß die mittlere Strahlungstemperatur wegen ihrer Komplexität nur mit sehr großem Meß- oder Rechenaufwand ermittelt werden kann. Hat man die mittlere Strahlungstemperatur, läßt sich PET relativ leicht berechnen, weshalb T_{mrt} als Indikator relativ ungeeignet ist.

Betrachtet man die Korrelationen einzelner Strahlungsflüsse aus der mittleren Strahlungsflußdichte (Berechnungsgrundlage für die mittlere Strahlungstemperatur), wie zum Beispiel die kurzwelligen Strahlungsflüsse aus dem oberen Halbraum und die langwelligen Strahlungsflüsse aus dem unteren Halbraum (Tab. 5), zeigen sich ebenfalls gute positive Korrelationen mit den PET-Werten, allerdings ist die Streuung um die Trendlinie bei beiden Strahlungsflüssen wesentlich ausgeprägter als bei der mittleren Strahlungstemperatur. Trotzdem können Kenntnisse über kurzwellige Einstrahlungsbedingungen oder langwellige Strahlungsflüsse Hinweise über die Größenordnung von PET liefern.

Bei den in diesem Kapitel angestellten Überlegungen handelt es sich um allgemeine Beschreibungen zum Gesamtstichprobenumfang, die helfen sollen, ein besseres Gefühl für die Größenordnungen von PET und deren Beziehungen zu den meteorologischen Größen zu bekommen. Die teilweise erheblichen Streuungen machen auch deutlich, daß die human-biometeorologische Größe PET wenn möglich in Zusammenhang mit den dazugehörigen meteorologischen Größen genannt werden sollte, um zu erkennen welche der Eingangsgrößen den PET-Wert dominiert. Die durchgeführten Korrelationsanalysen sagen weder etwas aus über die Variabilität human-biometeorologischer Bedingungen in Stadtstrukturen, noch über die Einflüsse der verschiedenen horizontalen und vertikalen Umgebungsflächen. Für eine detailliertere Beurteilung ist deshalb die Betrachtung der jeweiligen Untersuchungssituationen, wie sie in den folgenden Kapiteln beschrieben werden, notwendig.

7.2 Einfluß technogener und natürlicher Umgebungsflächen auf mikrometeorologische Bedingungen

In diesem Kapitel stehen Untersuchungsergebnisse im Vordergrund, die den Einfluß verschiedener städtischen Umgebungsflächen auf die mikroklimatischen Bedingungen beschreiben. Es ist unmöglich, die gesamte Vielfalt an städtischen Oberflächen untersuchen zu wollen, so daß hier exemplarisch nur einige Beispiele angesprochen werden. Zur besseren Übersicht werden die Umgebungsflächen nach ihrer Lage im Raum betrachtet, das heißt es wird unterschieden zwischen den Einflüssen von horizontalen und vertikalen Umgebungsflächen. Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist die Art ihrer Oberflächenbeschaffenheit, wobei unter technogenen Umgebungsflächen alle durch Bebauung gekennzeichnete Flächen und unter natürlichen Umgebungsflächen die Vegetationsstrukturen verstanden werden. Die unterschiedlichen Auswirkungen der Umgebungsflächen auf den langwelligen Strahlungshaushalt werden zusätzlich durch bodengestützte Infrarotthermographie dokumentiert.

7.2.1 Horizontale Umgebungsflächen

Will man explizit die mikroklimatischen Unterschiede verschiedener horizontaler Umgebungsflächen betrachten, ist es notwendig auf Untersuchungsflächen zu gehen, die ohne größeren Einfluß von seitlicher Bebauung oder Großvegetation sind, um überprägende Nachbarschaftseffekte durch horizontale Strukturen zu vermeiden. Für die Untersuchungen wurde deshalb ein großer versiegelter Parkplatz und eine benachbarte Wiese mit ähnlicher Flächengröße gewählt.

In Abbildung 23 werden stellvertretend für technogene und natürliche Oberflächen die meteorologischen Messungen über einer geschlossenen Asphaltdecke mit den Werten über einer Rasenfläche verglichen. Die Grafiken zeigen, daß die kurzwelligen Einstrahlungsbedingungen aus dem oberen Halbraum für beide Standorte ähnlich sind. Die Globalstrahlung (KW-O) hat an diesem Untersuchungstag gegen 13 Uhr ihr Maximum mit Werten um 800 W/m^2 erreicht. Man kann hier durchaus von Globalstrahlung sprechen, da der Einfluß seitlicher Bebauung weitgehend fehlt.

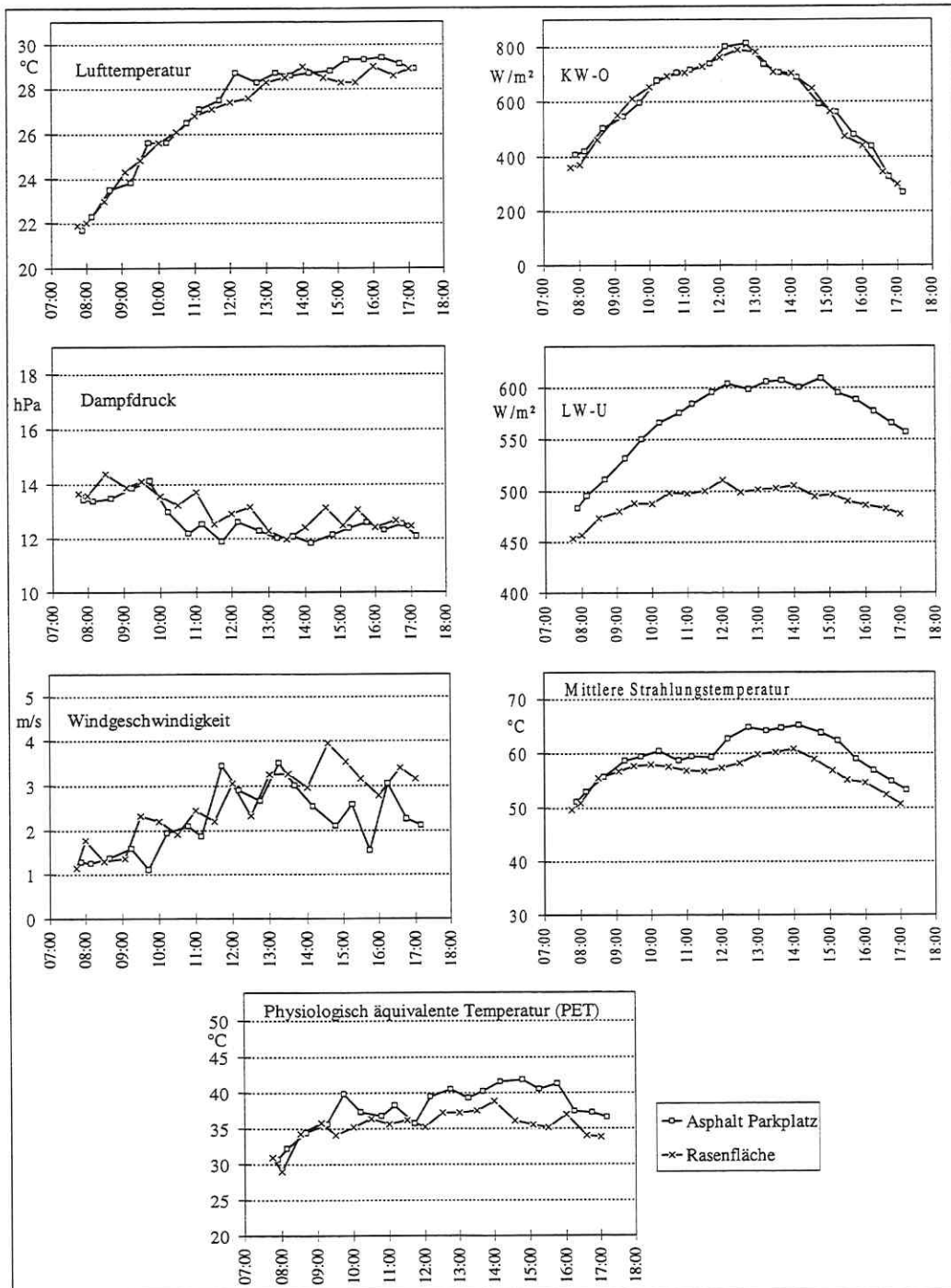


Abb. 23: Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen über Asphalt- und Rasenflächen (Leipzig Festwiese; mobile Messungen am 12.08.97; Zeitangaben in MEZ; Windgeschwindigkeiten gemittelt über 3 min)

Ebenso sind die Kurvenverläufe von Lufttemperatur und Dampfdruck an beiden Standorten ziemlich einheitlich. Bei der Lufttemperatur zeigen sich vereinzelt leicht höhere Werte (etwa 1 K) über der Asphaltfläche. Ein ähnlicher Tagesgang der Lufttemperaturen mit maximalen Differenzen von 1,9 K zwischen einem Parkplatz und einer Brachfläche wird bei KATZSCHNER (1994) beschrieben. Beim Dampfdruck sind über der Rasenfläche geringfügig höhere Werte zu finden als über der Asphaltfläche, was auf die Verdunstungsleistung der Vegetation hinweisen kann.

Die größten Differenzen zwischen beiden Meßpunkten finden sich bei der langwelligen Strahlung aus dem unteren Halbraum (LW-U), die in den frühen Nachmittagsstunden ihr Maximum erreicht hat. Über der Asphaltdecke werden Werte von 600 W/m² erreicht, während über der Rasenfläche für LW-U nur 500 W/m² gemessen werden.

In der mittleren Strahlungstemperatur (T_{mrt}), in deren Berechnung auch alle seitlichen Strahlungsflüsse einbezogen sind, ergibt sich zwischen der Rasenfläche (Max. 60 °C) und der geschlossenen Asphaltdecke (Max. 65 °C) zu Zeiten der Tagesmaxima ein Unterschied von ca. 5 K. Zusammen mit einer leicht höheren Lufttemperatur und einer teilweise niedrigeren Windgeschwindigkeit führt dies dazu, daß in den Nachmittagsstunden über der Asphaltdecke um 5 K höhere PET-Werte ermittelt werden.

Zusätzlich zu den eben angeführten Untersuchungen wurden zeitgleich Infrarotaufnahmen (Abb. 24 bis 27) der vorhandenen Oberflächenarten gemacht, die das unterschiedliche thermische Verhalten dokumentieren sollen. Der blauen Rahmen in den Thermalbildern, markiert die Fläche, die mittels eines Histogrammes ausgewertet wird, welches die prozentuale Verteilung der Oberflächentemperaturen und deren Mittel- und Streuungsmaße zeigt. Zusätzlich werden für die mit blauen Kreuzen gekennzeichneten Punkte die Einzelwerte angegeben.

In Abbildung 24 und 25 sind die Thermalaufnahmen der Asphaltfläche und der Rasenfläche gegenübergestellt, um die eben diskutierten Untersuchungsergebnisse nochmals zu unterstreichen. Die Asphaltfläche hat recht einheitliche Oberflächenstrahlungstemperaturen, die um 15 Uhr (MEZ) im Bereich zwischen 51 °C und 54 °C liegen. Wesentlich inhomogener und weiter gestreut sind die Oberflächenstrahlungstemperaturen der Rasenfläche. Die Werte reichen von Minimum 29 °C bis Maximum 40 °C innerhalb einer Fläche von etwa 1m² gemessen werden, wobei Vegetationsoberflächen als kühler und offene Bodenstellen als wärmer erfaßt werden. Im Mittel bewegen sich die Werte um etwa 33°C.

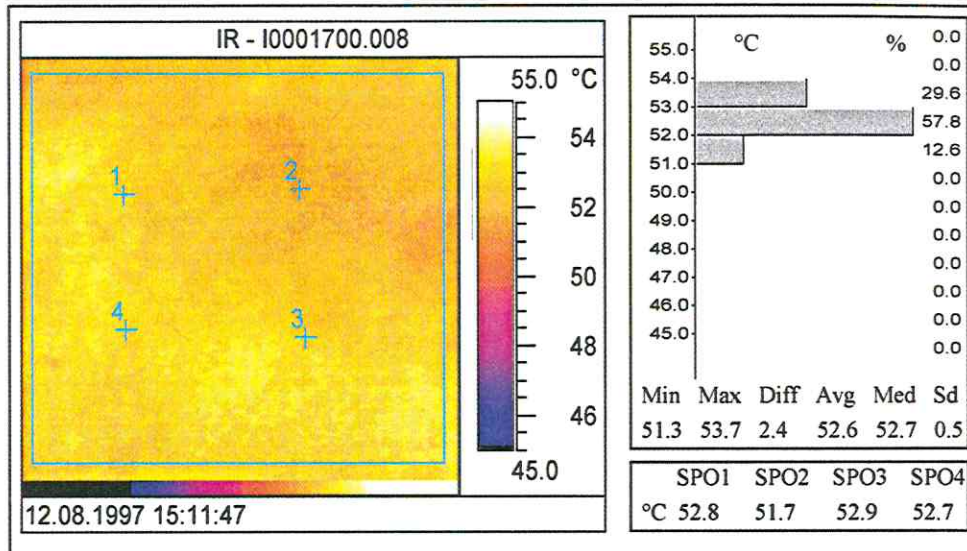


Abb. 24: Thermalbildaufnahme einer Asphaltdecke; (Objektdistanz ca. 1,5 m; 40°-Optik; Flächenausschnitt ca. 1 m²; Lufttemperatur in 2 m über Grund: 29,3°C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangaben in MEZ)

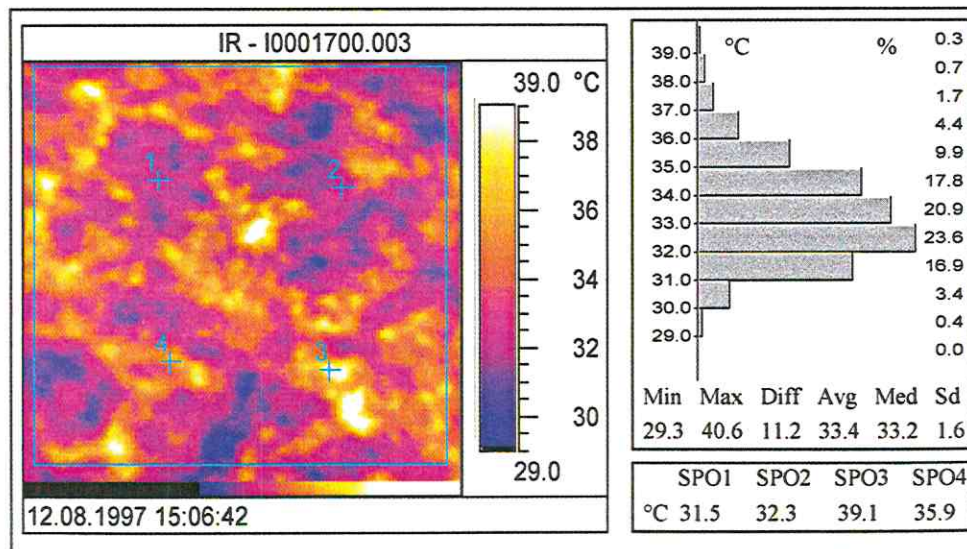


Abb. 25: Thermalbildaufnahme einer Rasenfläche; (Objektdistanz ca. 1,5 m; 40°-Optik; Flächenausschnitt ca. 1 m²; Lufttemperatur in 2 m über Grund: 28,3 °C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangaben in MEZ)

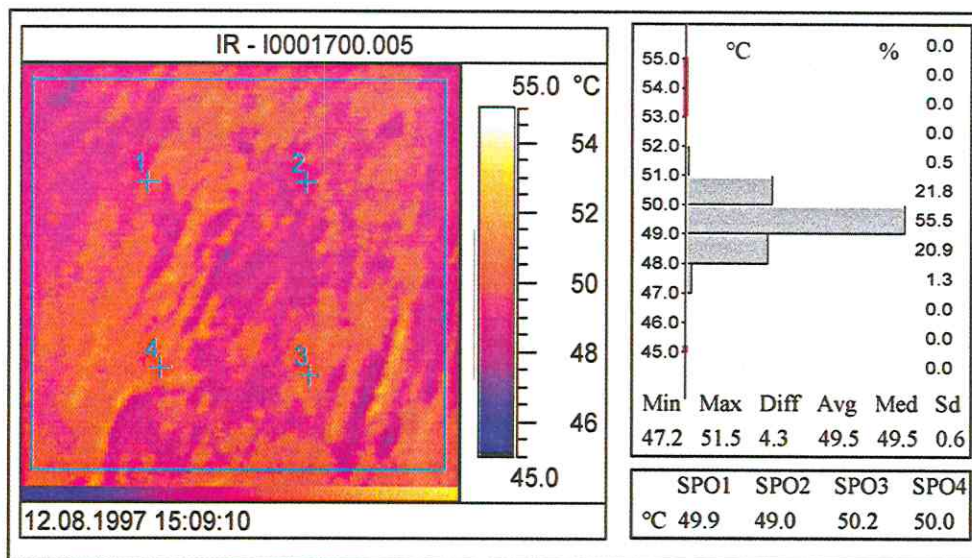


Abb. 26: Thermalbildaufnahme einer Feinschotterdecke; (Objektdistanz ca. 1,5 m; 40°-Optik; Flächenausschnitt ca. 1 m²; Lufttemperatur in 2 m über Grund: 29,0°C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangaben in MEZ)

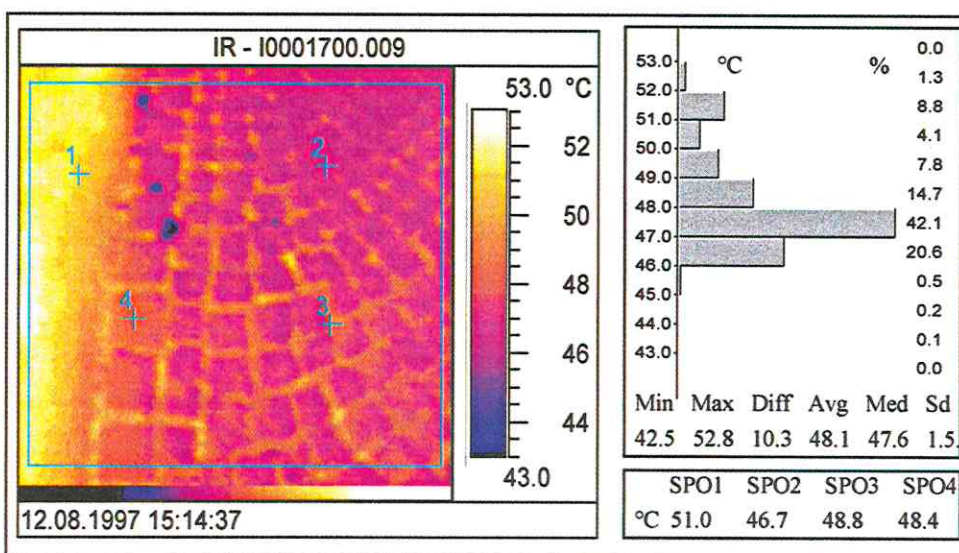


Abb. 27: Thermalbildaufnahme einer Kopfsteinpflasterdecke; (Objektdistanz ca. 1,5 m; 40°-Optik; Flächenausschnitt ca. 1 m²; Lufttemperatur in 2m über Grund: 29,3 °C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangaben in MEZ)

Im Gegensatz zu herkömmlichen Infrarotthermometern zur berührungslosen Oberflächentemperaturmessung haben die Thermalscanner den Vorteil, daß sie Temperaturstreuungen an Oberflächen wesentlich besser erfassen und dokumentieren.

Die Temperaturdifferenz zwischen beiden Oberflächen beträgt im Mittel ca. 19 K. Ähnliche Größenordnungen der Oberflächentemperaturen werden auch bei FEZER 1975 diskutiert, der in Tagesgängen bei sommerlichen Strahlungstagen für Asphaltflächen Maxima um 48 °C und für Rasenflächen Maxima um 32 °C angibt. Zur besseren Einordnung der Infrarotbilder werden für die Untersuchungszeit die wichtigsten meteorologischen Größen nochmals in Tabellenform aufgelistet (Tab. 6).

	KW-O W/m²	KW-U W/m²	LW-O W/m²	LW-U W/m²	Tmrt °C
Asphaltfläche	560,9	78,0	400,2	594,8	62,3
Rasenfläche	562,6	93,5	396,9	496,6	56,9
	Ta °C	e hPa	v m/s	PET °C	
Asphaltfläche	29,3	12,4	2,6	40,5	
Rasenfläche	28,3	12,5	3,5	35,5	

Tab. 6: Mikrometeorologische Bedingungen am 12.08.97 über einer Asphaltfläche (Abb. 24) und einer Rasenfläche (Abb. 25) gegen 15:00 Uhr (MEZ)

Bei Einzelmessungen über Rasenfläche können langfristige Änderungen im Bodenwasserhaushalt nicht erfaßt werden. Das heißt, nach einer längeren Trockenzeit heizen sich Rasenflächen bedingt durch eingeschränkte Evapotranspiration wesentlich stärker auf als nach Perioden mit zwischenzeitlichen Niederschlägen. Bei Rasenflächen ist deshalb grundsätzlich eine höhere Variabilität der Oberflächentemperaturen gegeben als bei versiegelten Oberflächen wie Asphalt. Im vorliegenden Fall wurden vom 1.8.97 bis zum Untersuchungstag am 12.8.97 an der Klimastation in Leipzig-Plagwitz, die räumlich am nächsten zur Festwiese liegt, zwei Niederschlagsereignisse (1.8.97 mit 2,9 mm und 8.8.97 mit 4,3 mm) registriert. Trotz der verzeichneten Niederschläge dürfte die Rasenfläche aber durch den Einfluß der vorherrschenden Strahlungswetterlagen relativ trocken sein.

Mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes (vgl. Kap. 4.2.2.5) lassen sich die gemessenen Oberflächenstrahlungstemperaturen umrechnen in langwellige Strahlungsflüsse, die von der jeweiligen Oberfläche ausgehen. Als langwelliger Emissionsgrad (VDI-3789, Blatt 2, 1994)

wurde 0,95 gewählt, der annähernd sowohl für Rasen als auch für Asphalt verwendet werden kann. Für Asphalt wird bei einer Durchschnittstemperatur von 52 °C eine Strahlungsflußdichte in der Größenordnung um 600 W/m² berechnet. Die Rasenfläche hingegen erreicht bei durchschnittlich 33 °C eine langwellige Ausstrahlung von etwa 480 W/m². Die Informationen, die mit Hilfe der bodengestützten Infrarotthermographie gewonnen werden, decken sich demnach ganz gut mit den oben besprochenen Pyrgeometermessungen (LW-U in Abb. 23).

Abbildung 26 und 27 zeigen zwei weitere Oberflächenarten die im urbanen Raum vorzufinden sind. In Abbildung 26 ist die Thermalaufnahme einer Feinschotterdecke zu sehen, die Oberflächenstrahlungstemperaturen in ähnlicher Größenordnung wie die Asphaltdecke aufweist. Die Temperaturen liegen größtenteils zwischen 48 und 51 °C bei einem Mittel von 49,5 °C, was einer langwelligen Strahlung von rund 580 W/m² entspricht. Abbildung 27 zeigt ein Thermalbild einer Kopfsteinpflasterfläche, deren Oberflächenstrahlungstemperatur im Mittel bei 48 °C liegt, was einer Ausstrahlung von ca. 570 W/m² gleichkommt.

Im Vergleich der gezeigten Oberflächenarten ist anzumerken, daß Rasenflächen nicht nur wegen ihrer nächtlichen Abkühlungsraten als Kaltluftproduktionsflächen von stadtklimatologischer Bedeutung sind, sondern auch tagsüber unter human-biometeorologischen Aspekten wegen ihrer geringeren langwelligen Strahlungsabgabe als vorteilhaft anzusehen sind. In diesem Fall geht es nicht um die stadtklimatologische Reichweite von Grünflächen, sondern um die mikrometeorologischen Bedingungen am Standort, die durch unversiegelte Rasenflächen verbessert werden.

Überleitend zu den vertikalen Umgebungsflächen wird an einem Beispiel ein Vergleich zwischen horizontalen und vertikalen Umgebungsflächen gezeigt. In Abbildung 28 ist eine Thermalbildaufnahme eines südexponierten Innenhofbereiches zu sehen, bei der in der unteren Bildhälfte eine kühlere Rasenfläche mit Plattenweg und in der oberen Bildhälfte die wärmere südexponierte Hausfront zu sehen ist. Das Thermalbild macht deutlich, daß je nach Einstrahlungswinkel und Oberflächenart vertikale Umgebungsflächen eine größere Oberflächentemperatur aufweisen können als benachbarte horizontale Flächen. Bei der Berechnung der von einem stehenden Menschen absorbierten Strahlungsflußdichte werden die Strahlungsflüsse von vertikalen Umgebungsflächen stärker gewichtet als bei horizontalen.

Dadurch gewinnen die langwelligen Strahlungsflüsse von Hausfronten für die human-biometeorologische Bewertung zusätzlich an Bedeutung.

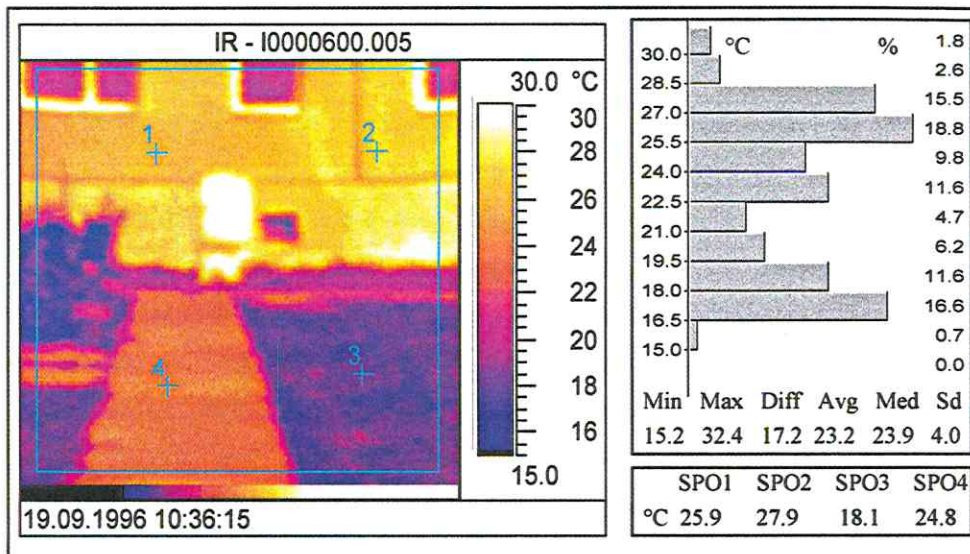


Abb. 28: Thermalbildaufnahme eines südexponierten Innenhofbereiches in Leipzig-Grünau; (Objektdistanz ca. 20 m; 20°-Optik; Lufttemperatur in 2m über Grund: 14,0° C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangaben in MEZ) (aus BAUER 1998)

7.2.2 Vertikale Umgebungsflächen

Der mikrometeorologische Einfluß von Hausfassaden ist wesentlich schwieriger zu untersuchen als der von horizontalen Flächen, was daran liegt, daß man vertikale Flächen nicht losgelöst von der horizontalen Fläche betrachten kann auf der sie steht, es die vielfältigsten Expositionsmöglichkeiten zur Sonne gibt und viele Oberflächenarten und Farben an Gebäuden zu finden sind.

Aus der Vielfalt an Möglichkeiten werden zwei Schwerpunkte behandelt. Am Beispiel von Hausfassaden in einer von Ost nach West und einer von Nord nach Süd orientierten Straßenschlucht wird der Einfluß unterschiedlicher Expositionen aufgezeigt. An einer südexponierten Fassade, die zur Hälfte mit wildem Wein (*parthenocissus tricuspidata*) bewachsen ist, wird die Wirkung von Fassadenbegrünung beschrieben.

In Abbildung 29 sind die meteorologischen Größen, die auf dem Gehweg in etwa 1 m Entfernung vor der jeweiligen Hausfront in 1,1 m bzw. 2 m (vgl. Kap. 4.2.2) über Grund gemessen wurden, graphisch aufbereitet. Die mobilen Untersuchungen fanden am 11.08.1997 in Straßenschluchten einer gründerzeitlichen Blockbebauung in Leipzig-Volkmarisdorf statt. Zum besseren Verständnis und zur räumlichen Einordnung der in Abbildung 29 angeführten Meßpunkte ist im Anhang eine ausklappbare Karte (Karte 1) der Gebäude- und Oberflächenstruktur des Untersuchungsstandortes zu finden.

Der Verlauf von Lufttemperatur und Dampfdruck (Abb. 29) ist an allen vier Meßpunkten einheitlich, wobei an der süd- und westorientierten Hausfront um etwa 1 K höhere Lufttemperaturen gemessen werden und ein Maximum von knapp 30 °C erreicht wird.

Die markantesten Differenzen innerhalb der Straßenschluchten sind im kurzwelligen Strahlungshaushalt zu finden. So erreicht die kurzwellige Strahlung aus dem oberen Halbraum (KW-O) auf der nach Süden exponierten Hausfront unter dem Einfluß direkter Sonneneinstrahlung knapp 800 W/m², während bei der im Gebäudeschatten liegenden, nach Norden exponierten Seite ein Wert von rund 50 W/m² ermittelt wird. Auch die Messungen aus dem südlichen Halbraum (KW-S) weisen z.B. in den Mittagsstunden Differenzen von über 500 W/m² in der kurzwelligen Strahlungsflußdichte auf (vgl. Tab. 7 auf S. 88).

Die Tagesgänge der kurzwelligen Strahlung (KW-O) zeigen, daß der vor der nordexponierten Hausfront liegende Meßpunkt (MP) 4 während des untersuchten Zeitraumes von 8:00 bis 17:00 Uhr (MEZ) permanent im Schatten liegt und die gegenüberliegende Seite in diesem Zeitraum durchgehend besonnt ist. In der von Nord nach Süd verlaufenden Straßenschlucht mit den west- und ostexponierten Fassaden sind die Kurvenverläufe entsprechend zeitlich verschoben. Die ostexponierte Fassade hat von ca. 9:00 bis 13:00 Uhr (MEZ) Sonne, während die westexponierte Seite von 12:00 bis 16:00 Uhr (MEZ) besonnt ist.

Aus den kurzwelligen Einstrahlungsbedingungen resultieren die Tagesgänge der langwelligen Strahlungsflüsse, die vor der südexponierten Hausfront am größten sind. Anstelle der sonst üblichen Beschreibung der langwelligen Strahlung aus dem unteren Halbraum werden in Abbildung 29 die langwelligen Strahlungsflüsse gezeigt, die von der jeweiligen Hausfassade kommen, da in diesem Kapitelabschnitt besonders der seitliche Einfluß von Interesse ist.

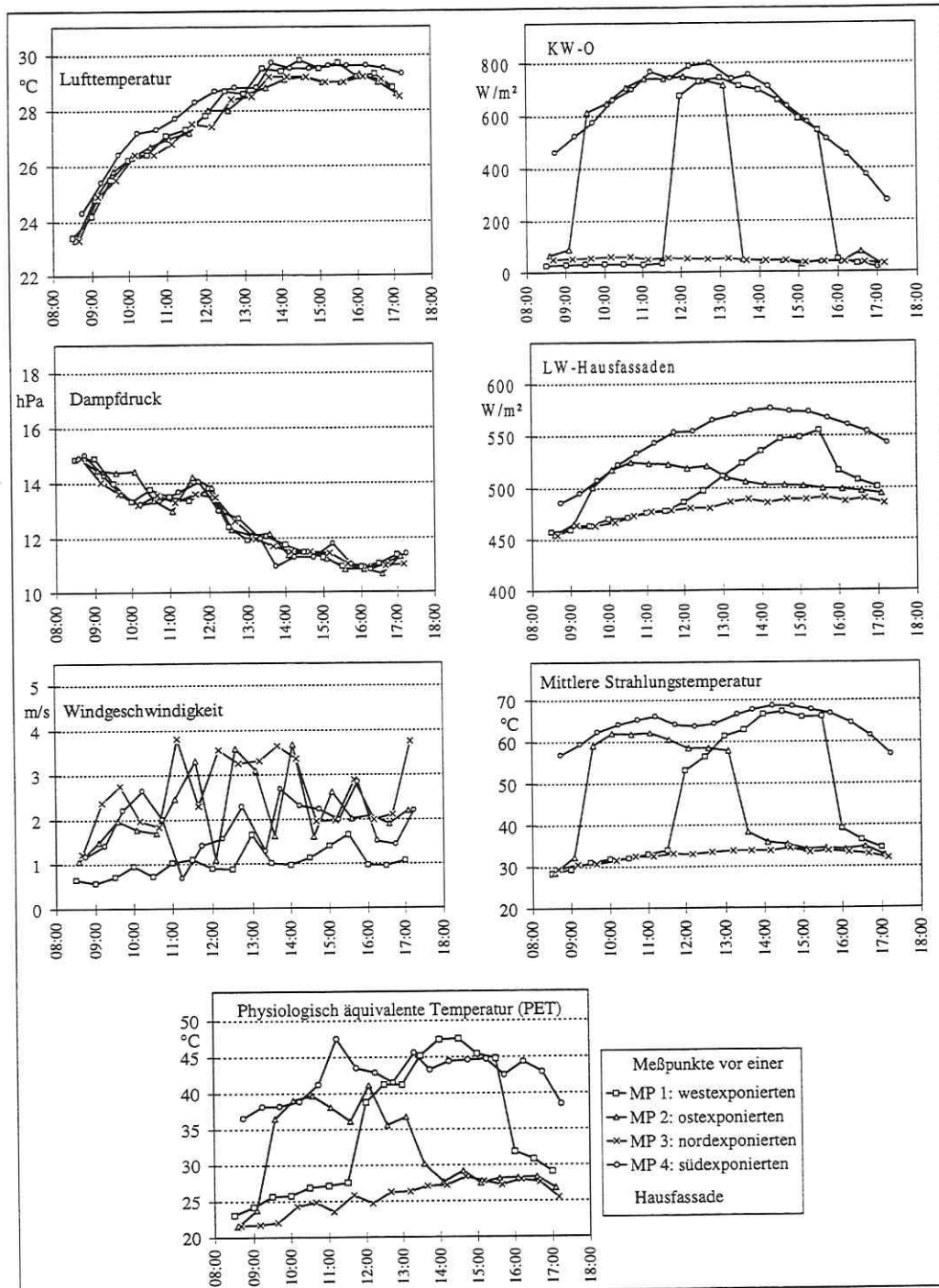


Abb. 29: Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen vor unterschiedlich exponierten Fassaden in Straßenschluchten einer gründerzeitlichen Blockbebauung (Anhang Karte 1) (Leipzig-Volkmarisdorf; mobile Messungen am 11.08.97; Zeitangaben in MEZ; LW: langwellige Strahlung aus dem der jeweiligen Hausfront zugewandten Halbraum; Windg. gemittelt über 3 min)

Der Verlauf der LW-Kurven (Hausfassaden) ist sehr eng an die kurzwelligen Einstrahlungsbedingungen gebunden. Am größten fällt der Unterschied zwischen der nord- und der südexponierten Hausfront aus. Während auf der nordexponierten Seite die höchsten Werte um 480 W/m^2 liegen, sind die Strahlungsflüsse von der südexponierten Wand um fast 100 W/m^2 höher. Langwellige Strahlungsflüsse der vertikalen Umgebungsflächen haben in der human-biometeorologischen Bewertung deshalb eine besondere Bedeutung, da ihnen größere Gewichtungsfaktoren (0,22) zugrunde liegen als bei den Werten des unteren Halbraumes (Gewichtungsfaktor: 0,06) (HÖPPE 1992).

Entsprechend der untersuchten Strahlungsflüsse ergibt sich ein ähnlicher Kurvenverlauf für die mittlere Strahlungstemperatur, die an den süd- und westexponierten Meßpunkten Tagesmaxima von über 65°C erreicht. Der nordexponierte Meßpunkt hingegen bleibt deutlich unter 35°C Tmrt. Bei Meßpunkt 4 ist zur Mittagszeit ein leichter Rückgang der mittleren Strahlungstemperatur zu verzeichnen, was auf verringerten seitlichen kurzwelligen Strahlungseinfall in der von Ost- nach West ausgerichteten Straßenschlucht zu diesem Zeitpunkt zurückzuführen ist.

Im Vergleich zu Messungen in Straßenschluchten von MAYER 1993 ergeben sich recht gute Übereinstimmungen. Auch in dieser Arbeit wurde in einer Nord-Süd ausgerichteten Straßenschlucht ein ähnlicher Kurvenverlauf wie bei MP1 beschrieben, mit Maxima über 60°C Tmrt.

Von allen human-biometeorologischen Inputgrößen liefert die mittlere Strahlungstemperatur damit die größte Variabilität, was deutlich macht, wie wichtig die kleinräumige Betrachtung des urbanen Strahlungshaushaltes ist (MAYER 1997). Für die gemessenen Strahlungsflüsse kann angenommen werden, daß sie für die angegebenen Bedingungen (z.B. sommerliches Strahlungswetter; nord- und südexponierte Straßenräume) typisch sind, also die Unterschiede in ähnlicher Größenordnung auch an anderen Tagen auftreten.

Anders verhält es sich bei der Windgeschwindigkeit. Obwohl Meßpunkt 1 während des ganzen Tagesverlaufes (11.08.97) bedingt durch abgeschirmte Lage zur übergeordneten Windrichtung aus Ost/Nord-Ost mit etwa 1 m/s die niedrigsten Windgeschwindigkeiten von allen Meßpunkten aufweist, kann diese nicht ohne weiteres auf andere Tage übertragen werden. Die übergeordnete Windrichtung und Windgeschwindigkeit und die thermischen Bedingungen spielen hier die entscheidende Rolle. Dies macht deutlich, daß die

Windverhältnisse in kleinräumigen Stadtstrukturen am wenigsten verallgemeinert werden können.

Die größten Werte in der human-biometeorologischen Bewertung werden für den Meßpunkt 1 in den frühen Nachmittagsstunden (14:00 bis 16:00 Uhr) mit PET über 45 °C ermittelt, was sich durch eine Kombination aus hohen Strahlungsflüssen und geringen Windgeschwindigkeiten ergibt. Der südexponierte Meßpunkt zeigt während des ganzen Meßzeitraumes relativ hohe PET-Werte mit über 40 °C. Obwohl zur Mittagszeit (12:00 bis 13:00 Uhr) nicht die Maximalwerte erreicht werden, haben zu diesem Zeitpunkt expositionsbedingt drei der vier Meßpunkte PET-Werte um 40 °C.

Die Thermalbildaufnahmen, die zusätzlich zu den mobilen Messungen für diesen Standort durchgeführt wurden, zeigen nochmals recht deutlich die Unterschiede im langwelligen Strahlungshaushalt einer Straßenschlucht.

Das Thermalbild der nordexponierten Wand in Abbildung 30 zeigt, daß die Oberflächenstrahlungstemperaturen der beschatteten Hausfront (ca. 30°C) mit der Höhe der gemessenen Lufttemperatur (28,4 °C) vergleichbar sind (vgl. Tab. 7). Dies entspricht einer von der Wand ausgehenden langwelligen Strahlung von ca. 460 W/m², was in ähnlicher Größenordnung auch mit dem Pyrgeometer gemessen wurde (MP 3: LW-S; 480 W/m² in Tab.7).

Die Oberflächen der südexponierten Hauswand (ohne Fensterbereiche) weisen hauptsächlich Temperaturen in dem Bereich um 45 °C auf (Abb. 31). Die Fensterflächen (etwa 36 °C) sind wegen ihres Emissionsverhaltens schwierig zu erfassen. Die mittlere Oberflächenstrahlungstemperatur der südexponierten Wand wird daraus resultierend mit 42°C angegeben. Als langwellige Strahlungsflußdichte, die von der südexponierten Hausfront ausgeht, werden nach der Thermalaufnahme etwa 530 W/m² berechnet. Im Vergleich zu den Pyrgeometermessungen (MP 4: LW-N; 565 W/m² in Tab.7), die nicht die Strahlung messen die von der Wand abgeht, sondern die aus dem untersuchten Halbraum ankommt, liegt der Wert des IR-Bildes etwas niedriger. Der Grund ist, daß mit dem Halbraum des Pyrgeometer auch langwellige Strahlungsflüsse des Gehweges erfaßt werden, der mit annähernd 50 °C (Abb. 31 SPO3) Oberflächenstrahlungstemperatur etwas wärmer ist als die Hausfront. Die niedrigen Werte im unteren Teil des Bildes (SPO4) beziehen sich auf den durch die gegenüberliegenden Gebäude beschatteten Bereich der Straße.

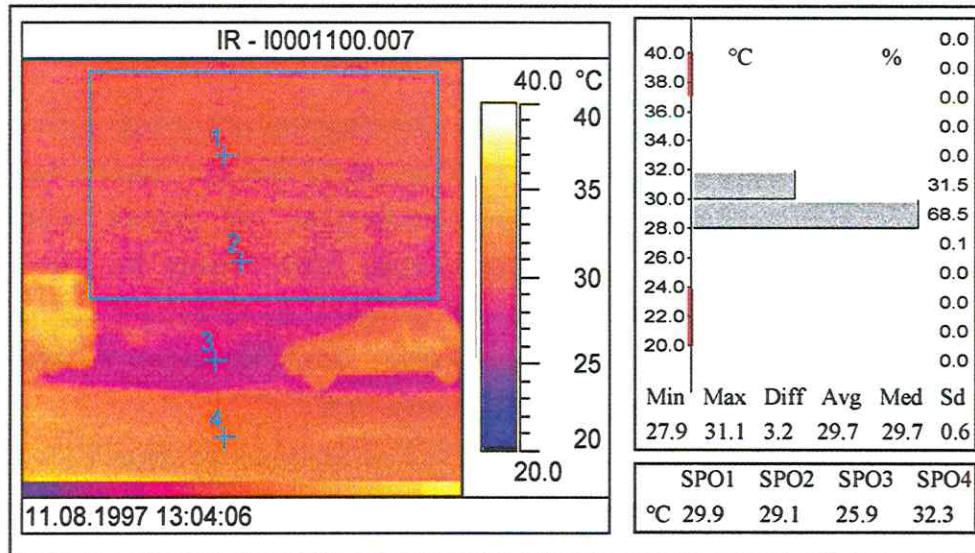


Abb. 30: Thermalbildaufnahme einer nordexponierten Hausfront in einer Straßenschlucht in Leipzig-Volkmarisdorf (Objektdistanz ca. 10 m; 40°-Optik; Lufttemperatur in 2m über Grund: 28,5°C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangabe in MEZ)

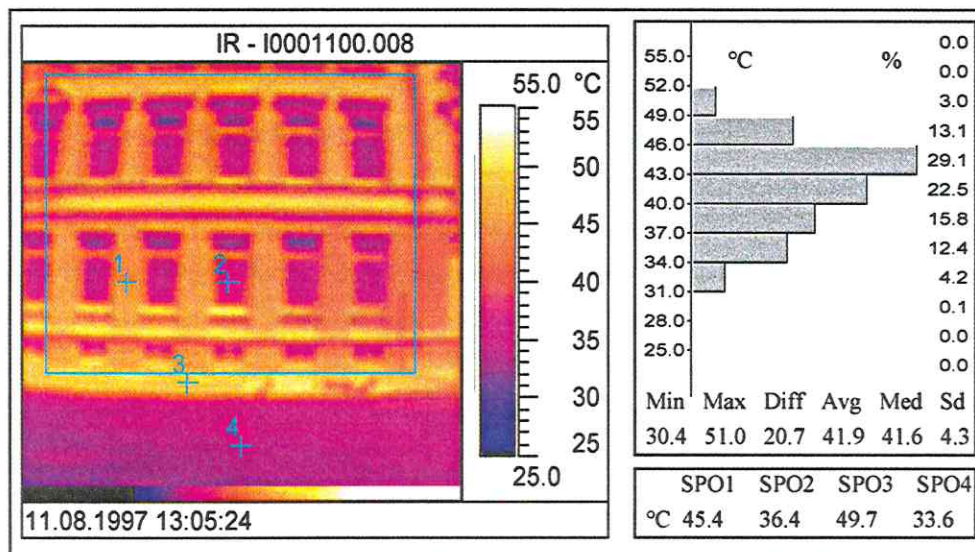


Abb. 31: Thermalbildaufnahme einer südexponierten Hausfront in einer Straßenschlucht in Leipzig-Volkmarisdorf (Objektdistanz ca. 10 m; 40°-Optik; Lufttemperatur in 2m über Grund: 28,5 °C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangabe in MEZ)

	KW-O W/m ²	KW-U W/m ²	KW-N W/m ²	KW-E W/m ²	KW-S W/m ²	KW-W W/m ²
MP3: nordexponiert	49,7	0,0	54,9	27,4	6,0	28,3
MP4: südexponiert	795,9	150,9	137,2	120,9	578,9	171,5
	LW-O W/m ²	LW-U W/m ²	LW-N W/m ²	LW-E W/m ²	LW-S W/m ²	LW-W W/m ²
MP3: nordexponiert	449,9	472,0	492,2	474,1	480,1	484,1
MP4: südexponiert	481,4	592,2	564,7	526,4	508,6	523,4
	T _{mrt} °C	T _a °C	e hPa	v m/s	PET °C	
MP3: nordexponiert	33,4	28,4	12,6	3,2	26,3	
MP4: südexponiert	64,2	28,8	12,7	2,3	41,5	

Tab. 7: Mikrometeorologische Bedingungen am 11.08.97 vor einer nordexponierten Hausfront (Abb. 30) und einer südexponierten Hausfront (Abb. 31) (Gründerzeitliche Blockbebauung in Leipzig-Volkmarisdorf) gegen 13:00 (MEZ) (Anhang Karte 1)

In Abbildung 32 ist in einer perspektivischen Infrarot-Aufnahme die Straßenschlucht zu sehen, in der die Messungen (vgl. Abb. 29 und Tab. 7) zwischen den meteorologischen Bedingungen einer nord- und südexponierten Hausfront durchgeführt wurden.

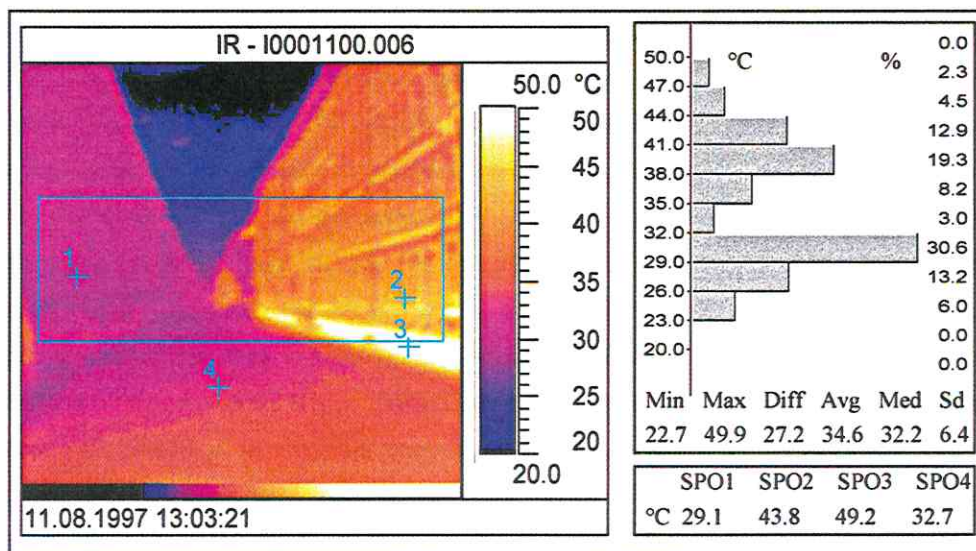


Abb. 32: Thermalbildaufnahme einer Straßenschlucht mit einer nord- und einer südexponierten Hausfront in Leipzig-Volkmarisdorf (40°-Optik; Lufttemperatur in 2m über Grund: 28,5 °C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangabe in MEZ; vgl. Anhang Photo 1)

Ein Problem bei perspektivischen Aufnahmen ist die Objektdistanz zwischen zu untersuchender Oberfläche und Scanner, die nicht exakt festgelegt werden kann. Vergleicht man die perspektivische Aufnahme in Abbildung 32 mit den annähernd zeitgleich gemachten Aufnahmen in Abbildung 30 und 31 so läßt sich trotzdem eine recht gute Übereinstimmung erkennen.

Auf der südexponierten Seite geht der Einfluß der Fensterflächen durch die Schrägaufnahme unter. Dennoch zeigt die Abbildung 32 deutlich die großen Unterschiede in den thermischen Bedingungen zwischen einer nord- und südexponierten Straßenseite. So sind mikrometeorologische Unterschiede zwischen beschatteten und besonnten Straßenseiten oftmals größer als zwischen vergleichbaren Strukturen im Stadtzentrum und im Stadtumland, was die Bedeutung der kleinräumigen Betrachtung des Stadtklimas unterstreicht (JENDRITZKY et al. 1990; HÖPPE und MAYER 1987; BRÜNDL et al. 1987).

Der langwellige Strahlungshaushalt einer Oberfläche ist nicht nur von der Exposition abhängig, sondern auch von seiner Oberflächenbeschaffenheit. Im folgenden wird auf die mikrometeorologischen Einflüsse durch Fassadenbegrünung hingewiesen.

In den Abbildungen ist eine südexponierte Hausfront zu sehen, die auf einer Seite ohne (Abb. 33) und auf der anderen Seite mit Fassadenbegrünung (Abb. 34) ausgestattet ist. Die Aufnahmen wurden am 11.08.97 zur Mittagszeit durchgeführt. Leider stehen für diesen Standort keine mobilen Messungen zur Verfügung, da zur besseren Auslastung des Scanners (vgl. Kap. 6.2) an diesem Tag zeitgleich Untersuchungen in der Straßenschlucht in Volkmarsdorf (Abb. 29 bis 32) durchgeführt wurden und die mobile Meßeinrichtung an diesem Standort zum Einsatz kam. Da anzunehmen ist, daß die kurzwelligen Einstrahlungsbedingungen ähnlich sind (gleiche Exposition) und auch bei Lufttemperatur, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit in einer Entfernung zur Hauswand ab 1 m kaum größere Unterschiede zu erwarten sind (vgl. Untersuchungen von BARTFELDER und KÖHLER 1987), bleiben die Unterschiede für eine human-biometeorologische Bewertung vorrangig auf den langwelligen Strahlungshaushalt beschränkt. Dadurch erscheint es ausreichend die thermischen Unterschiede zwischen beiden Meßpunkten mit Hilfe der IR-Thermographie zu beschreiben.

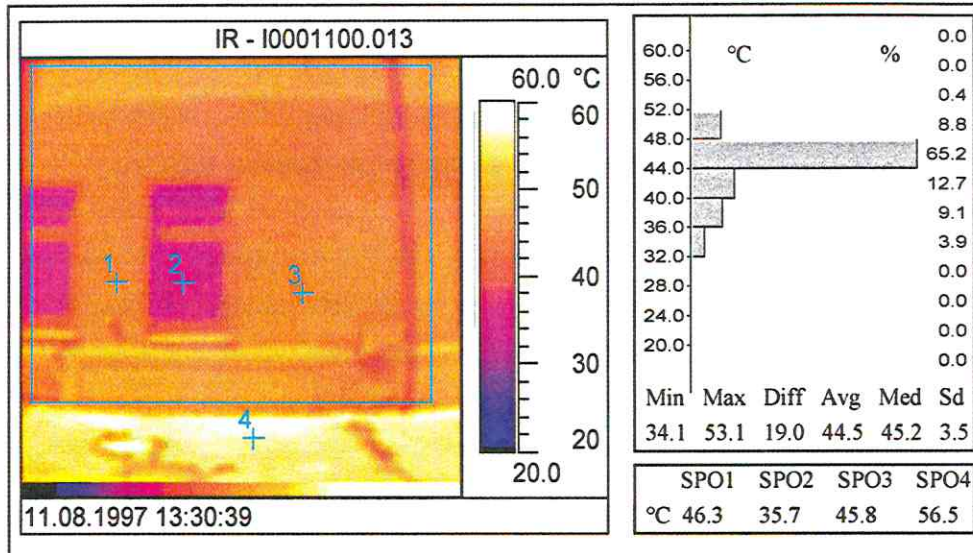


Abb. 33: Thermalbildaufnahme einer südexponierten Hausfront in Leipzig-Reudnitz ohne Fassadenbegrünung (Objektdistanz ca. 5 m; 40°-Optik; Lufttemperatur in 2 m über Grund: 29,5 °C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangabe in MEZ)

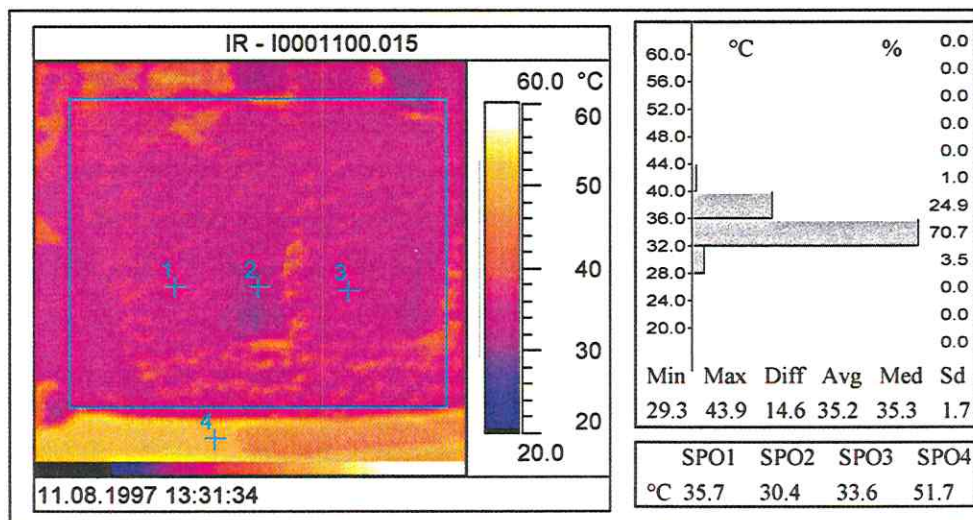


Abb. 34: Thermalbildaufnahme einer südexponierten Hausfront mit Fassadenbegrünung (Objektdistanz ca. 5 m; 40°-Optik; Lufttemperatur in 2 m über Grund: 29,5 °C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangabe in MEZ)

Bei der Betrachtung der Thermalbilder in Abbildung 33 und 34 ist festzustellen, daß die durchschnittliche Oberflächenstrahlungstemperatur der unbegrünten Hauswand mit ca. 45 °C um 10 K wärmer ist als bei der Hauswand mit Fassadenbegrünung, die eine durchschnittliche Oberflächenstrahlungstemperatur von 35 °C aufweist. Bei der begrünten Wand liegen 70 % der untersuchten Fläche im Oberflächentemperaturbereich von 32 bis 36 °C, womit dieser etwa 2 bis 6 K höher ist als die Lufttemperatur mit 29,5°C (Entfernung zur Wand 2 m; Meßhöhe 2 m). Ähnliche Größenordnungen finden sich in Untersuchungen von WILMERS (1986), der Oberflächentemperaturmessungen mit einem Infrarotscanner in Gartenhöfen durchgeführt hat. Detaillierte Untersuchungen zum mikroklimatischen Verhalten von Fassadenbegrünungen sind ausführlich bei BARTFELDER und KÖHLER (1987) beschrieben.

Berechnet man mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes und einem angenommenen Emissionskoeffizienten von 0,95 die langwelligen Strahlungsflüsse, so ergibt sich für die mit wildem Wein (*Parthenocissus tricuspidata*) bewachsene Seite der Hausfront eine langwellige Strahlungsflußdichte von 480 W/m², das sind rund 70 W/m² weniger als bei der unbewachsenen Wandseite (550 W/m²). Ebenfalls dürften LW-O und LW-U auf der begrünten Seite geringfügig niedriger ausfallen, so daß insgesamt von einer geringeren mittleren Strahlungsflußdichte von etwa 10 bis 20 W/m² ausgegangen werden kann, wenn man die Wandseite mit einem Gewichtungsfaktor von 0,22 bewertet (vgl. Kap. 4). In der mittleren Strahlungstemperatur macht sich das dann mit etwa 2 °C bemerkbar, so daß mit einem Unterschied bei PET in etwa gleicher Größenordnung gerechnet werden kann. Damit liegt das Verhältnis von begrünter Fassade zu unbegrünter Fassade ähnlich wie bei unversiegelten zu versiegelten Freiflächen in Kapitel 7.2.1.

Mit Hilfe der bodengestützten Infrarotthermographie läßt sich sehr gut zeigen, von welchen Flächen höhere langwellige Strahlungsflüsse ausgehen und so zu einer stärkeren Wärmebelastung während sommerlicher Strahlungswetterlagen beitragen. Sie liefern damit wichtige Informationen in welchen Bereichen Verbesserungspotentiale z.B. durch Vegetationsstrukturen genutzt werden können.

7.2.3 Großvegetation

Ein wesentlicher Aspekt bei der Betrachtung mikrometeorologischer Bedingungen in Stadtstrukturen ist die Einbeziehung von städtischer Großvegetation, wie sie durch größere Bäume und Sträucher gegeben ist. Aufgrund der großen Vielfalt konzentrieren sich die gezeigten Beispiele vorrangig auf die Vegetationsstrukturen wie Einzelbäume, Baumgruppen und städtischer Wald. An dieser Stelle kann nur eine Zusammenstellung aus mehreren Untersuchungen gezeigt werden (Abb. 35), da an keinem der untersuchten Standorte alle drei Varianten vorhanden waren. Da alle Untersuchungen bei ähnlichen Wetterlagen stattfanden ist eine Vergleichbarkeit, wenn auch mit Einschränkungen, trotzdem gewährleistet.

Große Differenzen sind bei den Lufttemperaturkurven in Abbildung 35 zu sehen. Hier zeigen die Messungen im Leipziger Auwald „Nonne“ im Vergleich einen deutlich niedrigeren Temperaturverlauf. Anzumerken ist, daß an diesem Untersuchungstag auch die Lufttemperaturen an anderen Standorten nur Maximalwerte von etwa 26 °C (z.B. Tagesmaximum am 06.08.97 an der Station Mariannenpark 26,1 °C) erreichen, so daß die niedrigen Temperaturen nicht nur allein auf den Einfluß des Auwaldes zurückzuführen sind. Die Werte der Globalstrahlung waren an allen drei Untersuchungstagen ähnlich und hatten Maxima um 800 W/m².

Der entscheidende Unterschied zwischen den drei Standorten ist die Dichte des Kronendaches. Während der Waldstandort und der Standort der Baumgruppe ein geschlossenes Kronendach mit ganztägigem Baumschatten aufweisen, sind die Einzelbäume so verteilt, daß kein geschlossenes Kronendach besteht.

Betrachtet man den Kurvenverlauf (Abb. 35) der Messung unter den Einzelbäumen, so zeigt sich, daß der Meßpunkt in den Morgenstunden aufgrund der geringen Sonnenhöhe durch einen benachbarten Baum beschattet war. Dann kommt eine Periode mit direkter Sonneneinstrahlung und kurzwelligen Strahlungsflüssen um 800 W/m², gefolgt von etwa 1,5 Stunden in denen der Meßpunkt im Baumschatten liegt und die Werte von KW-O unter 200 W/m² absinken. Der gleiche Kurvenverlauf ist dann analog bei der langwelligen Strahlung zu finden. In Bezug zur Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) zeigt sich, daß selbst durch einen einzelnen Baum die PET-Werte in dessen Schattenbereich von rund 40 °C auf 30 °C gedrückt werden. Dieser Sachverhalt wird auch bei MAYER (1993) deutlich hervorgehoben. Ist der Meßpunkt außerhalb des Schattenbereiches des Baumes, steigen die

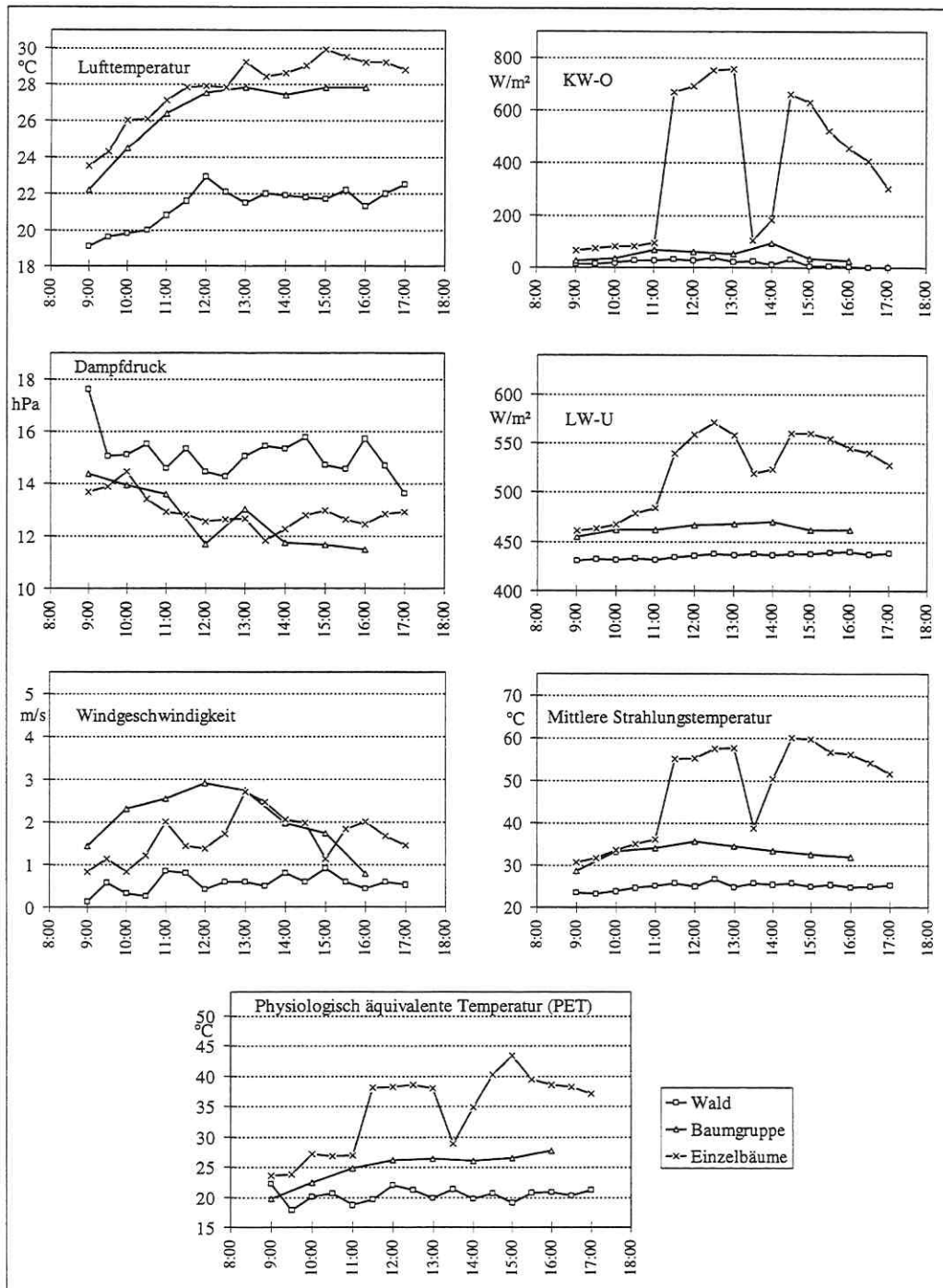


Abb. 35: Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen unter Einzelbäumen, in einer Baumgruppe und in einem städtischen Wald (Leipzig Auwald „Nonne“ am 06.08.97; Baumgruppe: Mariannenpark 21.08.96; Einzelbäume: Festwiese 12.08.97; Zeitangaben in MEZ; Windgeschwindigkeit gemittelt über 3 min)

Werte wieder auf das ursprüngliche Niveau. In diesem Beispiel wird dies zusätzlich noch durch niedrigere Windgeschwindigkeiten verstärkt, so daß gegen 15:00 Uhr (MEZ) der Wert für PET sogar über 40 °C erreicht. Die PET-Werte des Auwaldes liegen während des ganzen Meßzeitraumes bei rund 20 °C, die der Baumgruppe bei etwa 25 °C, was beim letzteren durch die höheren Lufttemperaturen bedingt ist. Auch MAYER (1993) gibt bei ähnlicher Wetterlage im Stammraum eines Waldes Werte zwischen 20 und 25 °C PET an.

Die folgenden Thermalbilder zeigen perspektivische Aufnahmen zweier Vegetationsstrukturen, ergänzend dazu sind in Tabelle 8 die meteorologischen Kenngrößen aus dem mobilen Messprogramm angegeben.

In Abbildung 36 ist ein IR-Bild einer Baumgruppe auf einer Rasenfläche in einem parkähnlich angelegten Innenhof (Meyersche Häuser; Kleinzschocher) zu sehen. Die Baumgruppe weist an dieser Stelle ein geschlossenes Kronendach auf. Sehr deutlich sind im Hintergrund die wärmeren Oberflächen einer südexponierten Fassade zu erkennen. Die Oberflächenstrahlungstemperaturen der beschatteten Unterseite des Kronenraumes und der darunterliegenden ebenfalls beschatteten Rasenfläche (Abb. 36) zeigen ähnliche Größenordnungen wie die Lufttemperatur (28,1 °C), wobei der Kronenraum etwas wärmer ist als die Bodenoberfläche. Dieses Verhältnis findet man ebenso bei den langwelligen Strahlungsflüssen in Tabelle 8. Durch das höhere Energieniveau im Kronenraum sind die langwelligen Strahlungsflüsse aus dem oberen Halbraum (LW-O: 492 W/m²) geringfügig größer als aus dem unteren Halbraum (LW-U: 482 W/m²). Trotz der einigermaßen hohen Lufttemperatur von 28,1 °C werden an diesem Meßpunkt durch den Baumschatten PET-Werte von nur 28,8 °C ermittelt.

Das zweite Thermalbild (Abb. 37) zeigt Einzelbäume, die auf einer Fläche mit feinem Schotter stehen (Leipzig-Festwiese) (vgl. auch Abb. 35). Im IR-Bild sind die Bäume mit ihren Schattenflächen und dazwischen die wärmeren Bereiche der besonnten Flächen gut zu sehen. Die Oberflächenstrahlungstemperaturen der Baumkronen und Schattenbereiche sind über den Transport fühlbarer Wärme eng an die Lufttemperatur gekoppelt. Zum besseren Vergleich werden in Tabelle 8 die meteorologischen Bedingungen beider Standorte beschrieben. Wie das Thermalbild zeigt, sind die Übergänge der Oberflächentemperaturen ziemlich abrupt, was darauf hindeutet, daß sich die Oberflächentemperaturen ziemlich schnell an die veränderten Einstrahlungsbedingungen anpassen.

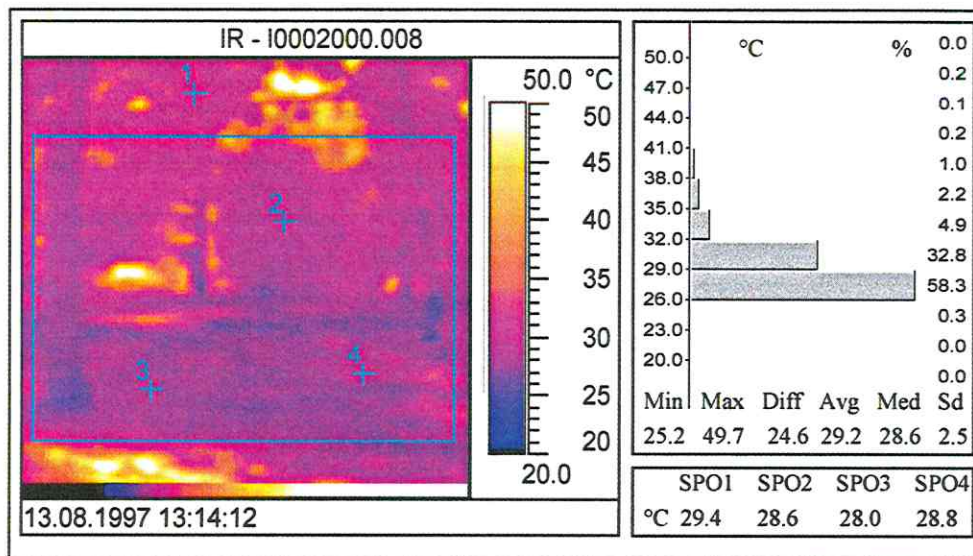


Abb. 36: Thermalbildaufnahme einer parkähnlichen Innenhofgestaltung mit Baumgruppen („Meyersche Häuser“ Leipzig-Kleinzschocher; 40°-Optik; Lufttemperatur in 2 m über Grund: 28,1 °C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangabe in MEZ)

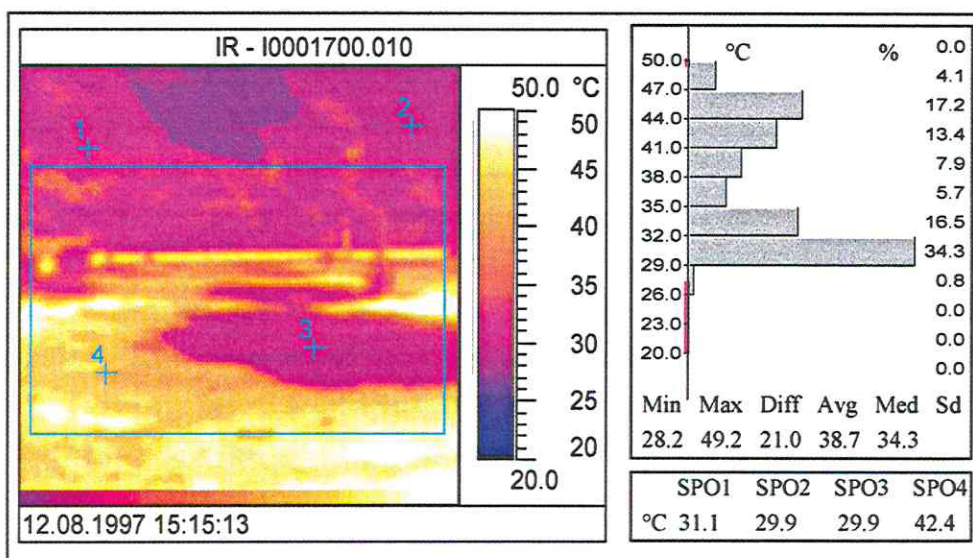


Abb. 37: Thermalbildaufnahme von Einzelbäumen mit Schattenwurf über einer Schotterfläche (Standort Leipzig-Festwiese; 40°-Optik; Lufttemperatur in 2 m über Grund: 29,9 °C; verwendeter Emissionskoeffizient 0,95; Zeitangabe in MEZ)

	KW-O W/m²	KW-U W/m²	LW-O W/m²	LW-U W/m²	Tmrt °C
Baumgruppe	36,0	0,0	492,1	482,0	33,5
Einzelbaum /Schatten	181,8	18,9	417,1	522,9	50,3
Einzelbaum /Sonne	626,9	49,7	427,5	559,5	59,6
	Ta °C	e hPa	v m/s	PET °C	
Baumgruppe	28,1	10,9	0,7	28,8	
Einzelbaum /Schatten	28,9	12,3	2,1	34,8	
Einzelbaum /Sonne	29,9	12,9	1,1	43,3	

Tab. 8: Mikrometeorologische Bedingungen in einer Baumgruppe am 13.08.97 um 13:10 Uhr (vgl. Abb. 36) und im Bereich von Einzelbäumen am 12.08.97; Meßpunkt besonnt. 13:45 Uhr; Meßpunkt beschattet 15:00 Uhr (vgl. Abb. 37) (alle Zeitangaben in MEZ)

Ein Vergleich zwischen den Pyrgeometermessungen und der IR-Thermographie erscheint in diesem Fall etwas schwierig, da mit dem Pyrgeometer der gesamte untere Halbraum aus 1,1 m Höhe gemessen wird und deshalb eine Unterscheidung zwischen langwelligen Strahlungsflüssen, die von sonnigen oder schattigen Bereichen kommen, nicht möglich ist. Obwohl über die Thermalbilder keine mittlere langwellige Strahlungsflußdichte ermittelt werden, tragen sie zu einem optischen Verständnis bei und beschreiben recht deutlich die Einflüsse von Bäumen auf den langwelligen Strahlungshaushalt. Resümierend läßt sich sagen, daß die Kurvenverläufe der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET) in Abbildung 35 und die gezeigten Thermalbilder die ausgleichende Wirkung durch schattenspendende Vegetation und die positive Bedeutung der Baumvegetation auf die Erholungsfunktion unter human-biometeorologischen Gesichtspunkten belegen (vgl. auch MAYER 1997).

7.3 Variabilität human-biometeorologischer Bedingungen in ausgewählten Stadtstrukturen

Innerhalb dieses Kapitels steht sowohl die Frage im Vordergrund, welche Einfluß komplex gestaltete Stadtstrukturen auf die Differenzierung mikroklimatischer Bedingungen nehmen als auch ob zwischen den Untersuchungsstandorten nennenswerte Unterschiede auftreten. Die Ergebnisse der mobilen Meßkampagnen werden am Beispiel verschieden gestalteter Innenhofsituationen einer Großwohnsiedlung und zweier gründerzeitlicher Blockrandbebauungen dargestellt. Des weiteren werden an einer Profilroute, die von einer Parkanlage in die benachbarte Bebauung führt, mikrometeorologische Differenzierungen zwischen einer Grünfläche und einer Bebauung beschrieben.

7.3.1 Großwohnsiedlung

Betrachtet man Großwohnsiedlungen unter stadtklimatischen Aspekten, so erscheint es wichtig, auf folgende Merkmale hinzuweisen. Wie im Anhang aus dem CIR-Bildausschnitt 2 und dem Photo zu Karte 2 hervorgeht, bestehen die Großwohnsiedlungen aus mehr- bis vielgeschossigen, in Plattenbauweise errichteten Wohnbauten, die durch ihre Anordnung große Innenhöfe und breite Straßenschluchten bilden. Die Innenhofgestaltung ist in der Regel durch einfaches Abstandsgrün (Scherrasen) gekennzeichnet, so daß viele Innenhöfe der Großwohnsiedlungen in ihrer Art ähnlich sind. Die homogene und einfache Gestaltung des untersuchten Innenhofes (Anhang Karte 2) hat zur Folge, daß mikroklimatische Unterschiede vorrangig durch die Gebäudestruktur bestimmt werden.

Die meteorologischen Bedingungen in ihrer zeitlichen und räumlichen Verteilung in Abbildung 39 zeigen, daß Lufttemperatur und Dampfdruck räumlich nur wenig differieren. Anders sieht es bei den gemessenen Windgeschwindigkeiten aus. Zur besseren Orientierung sei gesagt, daß an der Umlandstation in Schkeuditz an diesem Tag (19.08.96) zur Mittagszeit in 10 m über Grund maximale Windgeschwindigkeiten bis 4,5 m/s aus Süd-Ost und an der Dachstation des Umweltforschungszentrums (Höhe ca. 26 m über Grund) maximal 4,8 m/s aus Ost-Süd-Ost gemessen wurden.

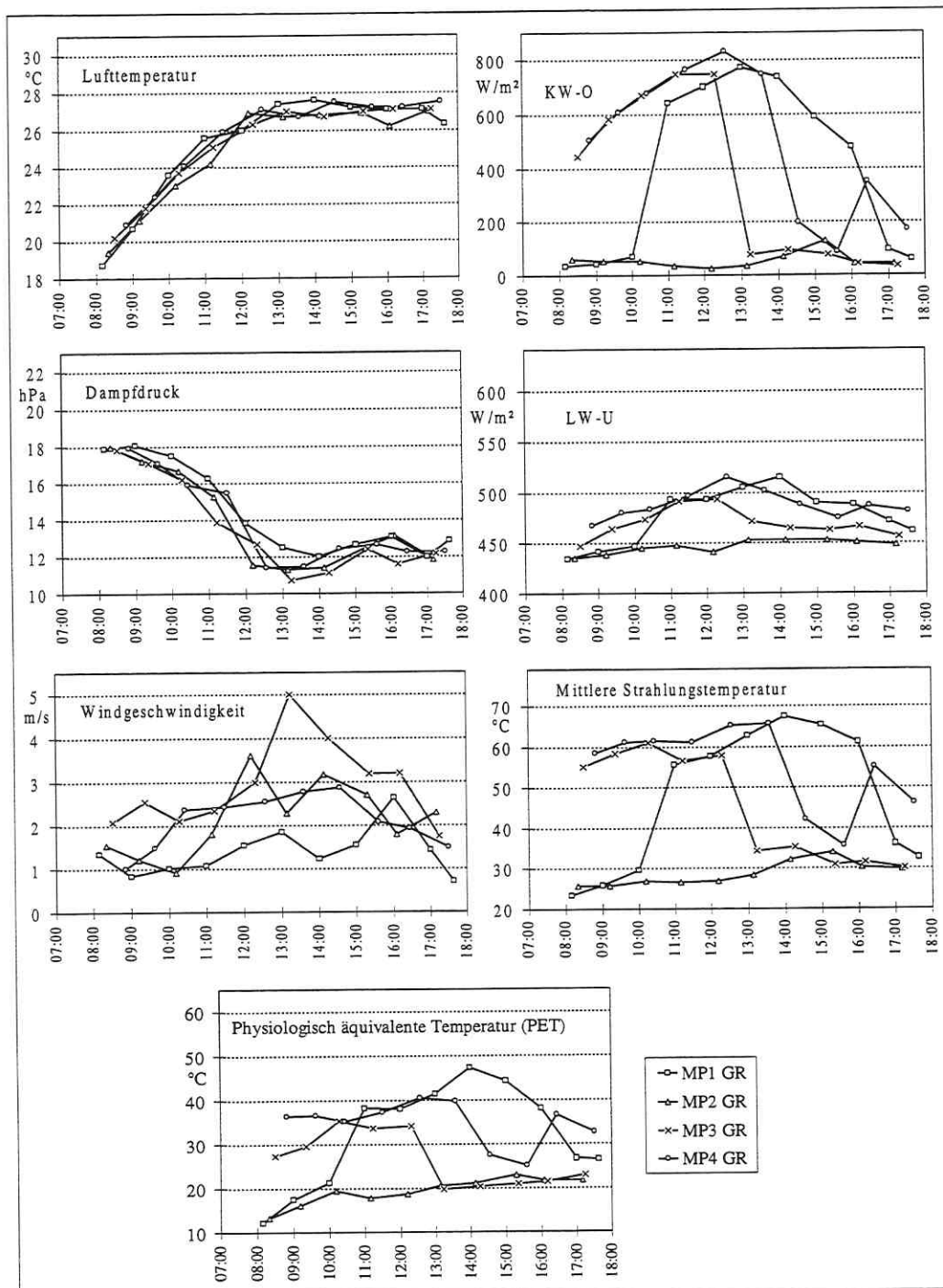


Abb. 39: Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen in einem Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau (GR) (Anhang Karte 2); (Mobile Messungen am 19.08.96; Zeitangaben in MEZ; Windgeschwindigkeit gemittelt über 3 min)

Vergleicht man die Meßergebnisse der Windgeschwindigkeiten aus Abbildung 39 mit der Lage der Meßpunkte in der ausklappbaren Karte 2 im Anhang, so wird deutlich, daß Meßpunkt 1 bei dieser übergeordneten Windrichtung durch das südliche Gebäude abgeschirmt wird, während besonders Meßpunkt 4 zur Mittagszeit ähnliche bzw. sogar höhere Windgeschwindigkeiten aufweist, als die Umlandstation in Schkeuditz. Dies liegt daran, daß eine Öffnung des Innenhofes genau in der vorherrschenden Windrichtung liegt.

Was den kurzwelligen Strahlungshaushalt angeht, so ist durch den großen Einfluß von Gebäuden eine Ähnlichkeit mit den Messungen in den Straßenschluchten (vgl. Kap. 7.2) zu erkennen. Bei dem südexponierten Meßpunkt MP 4 ist zwischenzeitlich ein Abfall aus KW-O festzustellen, der auf Gebäudeschatten zurückzuführen ist. Durch die nördliche Öffnung des Innenhofes ist gegen Abend wieder direkte Sonneneinstrahlung auf MP 4 möglich. Alle Messungen in diesem Innenhof wurden über Rasen durchgeführt, so daß die Unterschiede in den langwelligen Strahlungsflüssen vom Boden rein auf die verschiedenen Einflüsse durch Gebäudeschatten zurückzuführen sind.

Betrachtet man die PET-Werte in Abbildung 39, so ist deutlich zu sehen, daß die westorientierte Seite des Innenhofes während der Nachmittagsstunden der Bereich mit der größten thermischen Belastung ist. Erstaunlich ist, daß die für Kinder angelegten Sandspielplätze in der Mitte des Innenhofes an keiner Stelle während der Nachmittagsstunden beschattet sind. Bei extremen sommerlichen Strahlungswetterlagen ist eine Nutzung der Spielflächen über längere Zeit kaum möglich. Zu empfehlen wäre eine räumliche Aufteilung der Spielflächen in schattige und sonnige Bereiche des Innenhofes, bzw. vereinzelt Bäume anzupflanzen, die in Teilbereichen der Spielflächen immer für eine Beschattung sorgen. Der Wäscheplatz im oberen und unteren Teil des Hofes befindet sich auf der ostorientierten Seite, so daß bereits ab den frühen Nachmittagsstunden keine Sonne mehr zur Verfügung steht.

7.3.2 Gründerzeitliche Blockrandbebauung

Gründerzeitliche Bebauungen sind, was die Innenhofgestaltungen angeht wesentlich inhomogener (vgl. Anhang CIR-Luftbild 3) als die eben beschriebenen Innenhöfe der Großwohnsiedlung. So kann man zwei wesentliche Haupttypen, die Blockrandbebauung mit freien oder entkernten Innenhöfen und die Blockbebauung mit bebauten Blockinnenbereichen

(WICKOP et al. 1998), unterscheiden. Entsprechend breit gestreut sind auch die Angaben zu den Versiegelungsgraden (MÜNCHOW et al. 1996).

Bei sehr kleinen Innenhöfen, wie sie bei enger Bebauung in Blockinnenbereichen vorliegen, ist anzunehmen, daß die meteorologischen Bedingungen eher homogen sind, vor allem dann, wenn diese tagsüber permanent beschattet sind und der Strahlungsumsatz hauptsächlich in Dachniveau stattfindet. Für die Untersuchungen wurde deshalb ein Wohnblock (Anhang Karte 3) mit entkerntem Innenhofbereich ausgewählt. Die Größe des Hofes gewährleistet, daß direkte Einstrahlung auf die Bodenoberfläche die Ausbildung verschiedener Mikroklimata (Abb. 40) ermöglicht.

Auffallend an den Lufttemperaturverläufen in Abbildung 40 ist, daß die Meßpunkte MP 1 und MP 2 leichte Abweichungen zeigen. MP 2, der fast während des ganzen Meßzeitraumes im Gebäudeschatten liegt, hat um etwa 1 K niedrigere Temperaturen als die besonnten Bereiche. Auch die Lufttemperatur an MP1, der bis 12:00 Uhr beschattet ist, zeigt während der Vormittagsstunden etwa 2 K geringere Temperaturen an. Die Lufttemperaturunterschiede in diesem Innenhof werden nicht nur durch die Einstrahlungsbedingungen sondern auch durch den eingeschränkten Wärmetransport bei zum Teil geringe Windgeschwindigkeiten beeinträchtigt.

Die Grafik der Windgeschwindigkeiten (Abb. 40) zeigt sehr deutlich wie unterschiedlich die Strömungsverhältnisse in diesem Innenhof sind. An Strömungsbedingungen sind für den 20.8.96 (7-18 Uhr MEZ) folgende Werte gemessen worden: Umlandstation Schkeuditz (10m über Grund): maximale Windgeschwindigkeiten bis 5,5m/s (Mittel 3,6) aus Süd-Ost und an der Dachstation des Umweltforschungszentrums (ca. 26 m über Grund) maximal 6,9 m/s aus Süd-Ost. Die größten Windgeschwindigkeiten werden vor den der übergeordneten Windrichtung zugewandten Hausfronten an Meßpunkt 3 und 5 mit Maxima (vgl. Anhang Karte 1) um 3 m/s gemessen. Die entgegengesetzt liegenden Meßpunkte 1 und 2 zeigen im Tagesverlauf die niedrigsten Windgeschwindigkeiten, Meßpunkt 1 bleibt sogar während des gesamten Meßzeitraumes unter 1 m/s.

Der kurzwellige Strahlungshaushalt (Abb. 40) wird zum großen Teil durch die Gebäudestruktur, aber auch durch schattenspendende Vegetation bestimmt. Das wird besonders bei MP 1 und MP 5 mit kurzzeitigen Abnahmen von KW-O unter 200 W/m^2 deutlich. Entsprechend sind die Auswirkungen auf die langwelligen Strahlungsflüsse aus dem

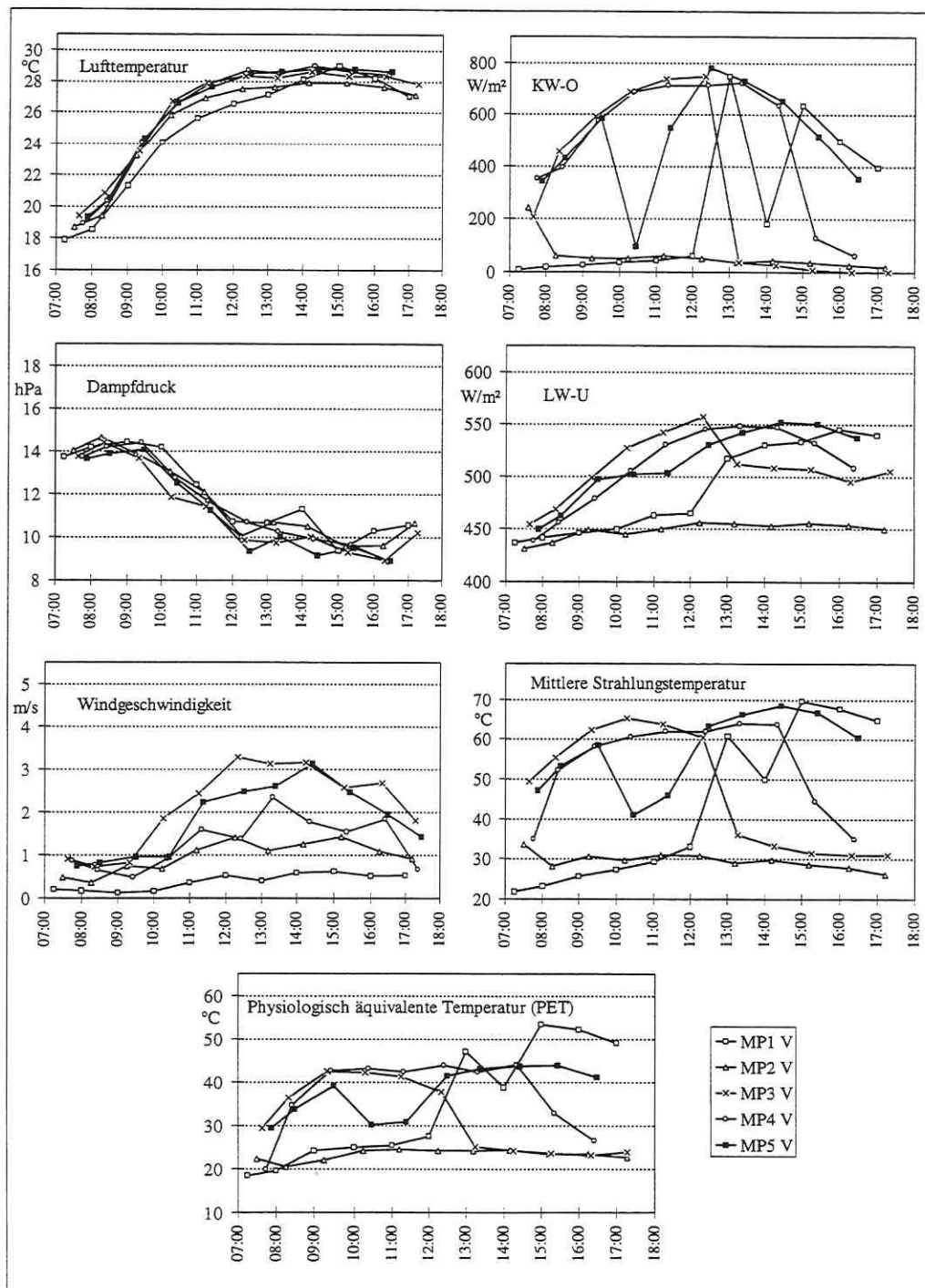


Abb. 40: Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen in einem Innenhof einer gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarisdorf (V) (Anhang Karte 3); (Mobile Messungen am 20.08.96; Zeitangaben in MEZ; Windgeschw. gemittelt über 3 min)

unteren Halbraum. Vergleicht man MP 3 (ostexponiert) mit MP 5 (südexponiert) so ist festzustellen, daß beide Kurvenverläufe in den Morgenstunden mit einem ähnlichen Anstieg beginnen. Zwischen 9:00 Uhr und 12:00 Uhr stagnieren die LW-U Werte an MP 5, so daß sich Unterschiede zwischen beiden Meßpunkten von annähernd 50 W/m² herausbilden. Der weitere Anstieg der Werte ist an MP 5 durch den Einfluß von Bäumen zeitlich um etwa zwei Stunden verzögert, mit der Folge, daß die PET-Werte (Abb. 40) am südexponierten Meßpunkt (MP 5) abgeschwächt werden. Die Maxima an PET sind in diesem Innenhof zu den Nachmittagsstunden zwischen 15:00 Uhr und 16:00 Uhr im westexponierten Innenhofbereich zu finden. Ursache hierfür sind die sehr geringen Windgeschwindigkeiten an diesem Meßpunkt, kombiniert mit hohen Einstrahlungswerten aus dem westlichen Halbraum (16:00 Uhr: KW-W 650 W/m²; KW-O 500 W/m²).

Zur mikroklimatischen Beurteilung des untersuchten Hofes läßt sich sagen, daß zu viele Bereiche des Innenhofes mit dichten Sträuchern versehen sind, die eine geringe schattenspendende Wirkung haben, den Luftaustausch in Bodennähe vermindern und zusätzlich die nächtliche Abkühlung behindern. Im nord- und ostexponierten Innenhofbereich sind offene Rasenflächen zu empfehlen. Die vorhandene Baumvegetation könnte im südexponierten Teil des Hofes ergänzt werden. In der westexponierten Seite des Hofes sind zwei größere Bäume vorhanden, aber zu dicht an den Hausfassaden gepflanzt. Dies hat den negativen Effekt, daß Wohnungen abgedunkelt werden, die Bodenoberfläche aber kaum beschattet wird und die thermische Zirkulation behindert wird. Diese Kritik sollte aber nicht als Empfehlung verstanden werden, diese Bäume zu entfernen, da diese neben mikroklimatischen noch eine Vielzahl anderer ökologischer Funktionen übernehmen. Es sollte vielmehr eine Anregung sein, bei Neuanpflanzungen im Vorfeld mikroklimatische Aspekte stärker mit einzubeziehen. Die Auslagerung von Parkplätzen wird empfohlen um den Versiegelungsgrad im Innenhofbereich möglichst gering zu halten.

Eine besondere Art der gründerzeitlichen Bebauung bilden die Leipziger „Meyerschen Häuser“, meist weiträumig angelegte Blockrandbebauungen mit großen Innenhöfen, die von dem Verleger und Industriellen Julius Meyer erbaut wurden und als billiger Wohnraum für Arbeiterfamilien entstanden sind. In dem parkähnlich angelegten Innenhof des Untersuchungsbeispiels (siehe Anhang Karte 4) werden mikrometeorologische Differenzierungen sehr stark durch die vorhandene Vegetationsstruktur bestimmt (Abb. 41).

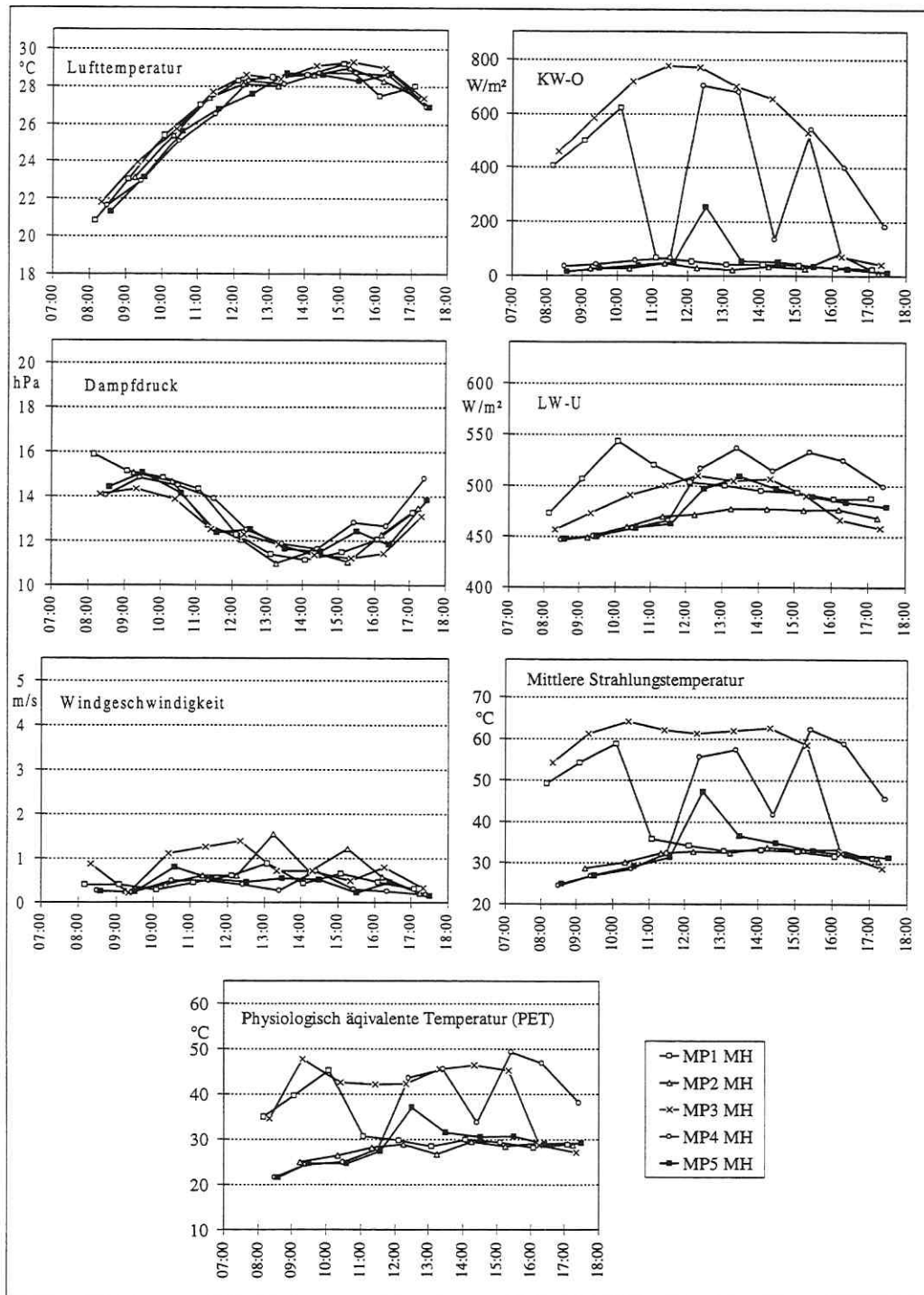


Abb. 41: Tagesgänge meteorologischer Größen gemessen in einem Innenhof einer gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Kleinzschocher (MH) (Anhang Karte 4); (Mobile Messungen am 13.08.97; Zeitangaben in MEZ; Windge. gemittelt über 3 min)

Wie schon in den Beispielen zuvor zeigen auch an diesem Untersuchungsstandort die Werte für Lufttemperatur und Dampfdruck einen relativ einheitlichen Verlauf (Abb. 41). Sehr homogen sind in diesem Beispiel ebenfalls die Windgeschwindigkeiten, die meistens zwischen 0 m/s und 1 m/s liegen. Ursache für die niedrigen Windgeschwindigkeiten sind zum einen etwas schwächere Strömungsverhältnisse an diesem Tag mit Maximalwerten nur um 3 m/s (Umlandstation Schkeuditz: Max: 3,1 m/s, Höhe 10 m über Grund; Umweltforschungszentrum: Max 3,7 m/s, Höhe 26 m über Grund; Windrichtung aus Süd-Süd-Ost) und zum anderen sorgen die geschlossenen Baumkronen der großen und dicht gepflanzten Baumgruppen für eine Reduzierung der Windgeschwindigkeiten.

Auf der großen Freifläche (MP 3) in der Mitte des Innenhofes sind wegen der geringen Horizonteinschränkung nach Süden, die größten kurzwelligen Strahlungsflüsse (Abb. 41) gemessen worden. Bei den langwelligen Strahlungsflüssen ist anzumerken, daß diese Fläche (MP 3) trotz hoher Solarstrahlung (800 W/m^2) mit max. 500 W/m^2 (LW-U) relativ kühl bleibt (vgl. dazu Abb. 23). Die nach Süden exponierte Innenhofseite hat durch ganztägigen Einfluß von Baumschatten die geringsten Werte für KW-O. Meßpunkt 4 und 5, zwei benachbarte westexponierte Standorte, haben trotz gleicher Exposition Unterschiede in der mittleren Strahlungstemperatur, die auf Baumschatten zurückzuführen ist. Im Gegensatz zu den Beispielen zuvor dominiert hier nicht die Gebäudestruktur, sondern die Vegetation den Strahlungshaushalt. Das belegen auch die niedrigen PET-Werte der süd- und westexponierten Innenhofbereiche.

Aus stadtklimatologischer Sicht kann man diese Innenhofgestaltung zum großen Teil als sehr positiv ansehen. Der Versiegelungsgrad ist mit 30-40 % verhältnismäßig gering, ebenso die Flächeninanspruchnahme pro Einwohner (rd. 700 Wohnungen im gezeigten Ausschnitt, Anhang Karte 4). Die große Rasenfläche in der Mitte unterstützt die nächtliche Abkühlung, während die Baumvegetation tagsüber für genügend beschattete Bereiche sorgt und so wichtige Ausgleichsräume vorhanden sind. Infolge des hohen Vegetationsanteiles ist mit geringeren fühlbaren Wärmeströmen zu Gunsten eines größeren latenten Wärmetransportes zu rechnen. Teilweise ist die Großvegetation zu dicht gepflanzt, was reduzierende Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse hat. Ebenso sind die Lichtverhältnisse vieler Wohneinheiten zum Teil eingeschränkt. Dennoch ist der hohe Baumbestand auch aus mikroklimatischer Sicht zu befürworten.

Abschließend sei angemerkt, daß aus der Vielzahl an möglichen Innenhöfen, die geprägt sind durch das Verhältnis von Gebäudehöhe zur Fläche des Innenhofes, ihre Ausrichtung zur Sonne und ihre Vegetationsausstattung, nur Beispiele gezeigt werden können. Auf ein Problem sei noch hingewiesen. Die zu Anfang des Kapitel bereits erwähnten ganzjährig beschatteten Innenhöfe weisen bei sommerlichen Strahlungswetterlagen während der Tagesstunden geringere Lufttemperaturen auf (vgl. TUROWSKI 1995 und MERTENS 1997), da der Strahlungsumsatz in Dachniveau erfolgt und der Luftaustausch zu benachbarten Strukturen eingeschränkt ist. Bedingt durch die fehlende direkte Einstrahlung sind entsprechend die PET-Werte als niedrig einzustufen. Dies mag vielleicht aus human-biometeorologischer Sicht bei Strahlungswetterlagen kurzzeitig positiv sein, bei vielen anderen mikroklimatischen Aspekten ist diese dichte Bebauung aber durchaus mit Nachteilen verbunden. Schlechte Durchlüftung, ganzjährig ungünstige Lichtverhältnisse, hoher Versiegelungsgrad sind nur einige Argumente. Damit sind diese Art von Innenhöfen stadtklimatisch eher als ungünstig einzustufen.

7.3.3 Parkanlage mit angrenzender Bebauung

Die kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse in Abbildung 42 verdeutlichen die hohe Variabilität des urbanen Strahlungshaushaltes auf kleinem Raum und beschreiben den Einfluß von Vegetations- und Bebauungsstrukturen auf die Strahlungskomponenten an einem wolkenlosen Sommertag zur Mittagszeit. Die Daten für Lufttemperatur, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit sind in Tabelle 9 als wichtige Hintergrundinformation für die Abbildung 42 zusammengefaßt. Wegen der Übersichtlichkeit werden in Abbildung 42 nur Strahlungsflüsse ausgewählter Halbräume gezeigt. Bei der Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur werden aber die Halbräume aller Himmelsrichtungen berücksichtigt.

Wie an der kurzwelligen Strahlung zu sehen ist, befinden sich die Meßpunkte 1, 3 und 4 im Schatten größerer Bäume und Baumgruppen, während alle anderen Meßpunkte nicht beschattet sind. Wegen der geringen Horizonteinengung werden insgesamt die größten kurzwelligen Strahlungsflüsse (KW-O: 750 W/m² und KW-S: 700 W/m²) auf der Freifläche (MP 2) gemessen, wobei die Werte aus dem südlichen Halbraum leicht höher ausfallen als bei

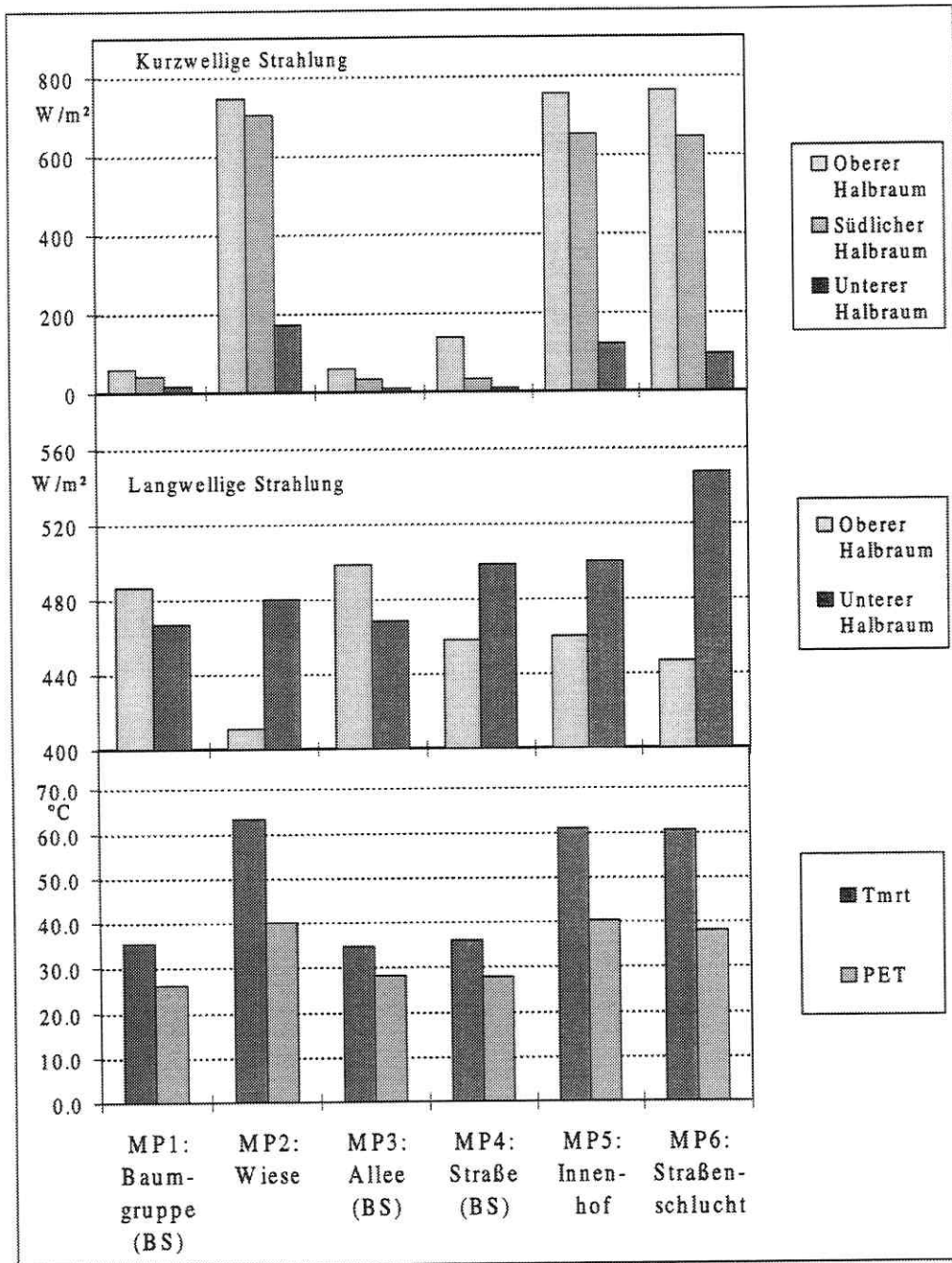


Abb. 42: Kurz- und langwelliger Strahlungshaushalt, mittlere Strahlungstemperatur und Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) gemessen in einer Parkanlage mit angrenzender Bebauung (Anhang Karte 5) (Leipzig Mariannenpark; Mobile Messungen am 21.08.96; zwischen 12:00 und 12:30 Uhr MEZ; BS = Baumschatten)

Meßpunkt:	Uhrzeit (MEZ):	Ta °C	e hPa	v m/s
MP 1: Baumgruppe (BS)	12:00	27,5	11,7	2,9
MP 2: Wiese	12:05	27,7	11,2	2,2
MP 3: Allee (BS)	12:10	28,1	10,7	1,3
MP 4: Straße (BS)	12:15	28,1	10,5	2,1
MP 5: Innenhof	12:20	28,2	11,0	1,8
MP 6: Straßenschlucht	12:25	27,9	10,8	2,6

Tab. 9: Lufttemperatur, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit in 2m Höhe am 21.08.96 Mariannenpark mit angrenzender Bebauung; Information zu Abbildung 42 (vgl. Anhang Karte 5) (BS = Baumschatten)

den anderen besonnten Meßpunkten. An dem Meßpunkt 2 ist auch die Reflexion aus dem unteren Halbraum am größten. Bei den terrestrischen Strahlungsflüssen in Abbildung 42 zeigt sich, daß bei der stark versiegelten Straßenschlucht (MP 6) die terrestrische Strahlung aus dem unteren Halbraum um etwa 70 W/m^2 größer ist als bei der ebenfalls besonnten Wiese (MP 2) (vgl. Kap. 7.2.1). An dem Meßpunkt 2 werden wegen der geringen Horizonteinengung die niedrigsten Werte für die langwellige Strahlung aus dem oberen Halbraum gemessen, da der Einfluß von seitlicher Bebauung entfällt und damit fast nur atmosphärische Gegenstrahlung erfaßt wird. Insgesamt weist die Rasenfläche die geringsten und die Straßenschlucht die höchsten langwelligen Strahlungsflüsse auf. Daß die mittlere Strahlungstemperatur am Meßpunkt 2 trotzdem am größten ist, erklärt sich durch den höheren Anteil an kurzwelligen Strahlungsflüssen. Die Baumkronen an Meßpunkt 1 und 3 sorgen dafür, daß die terrestrische Strahlung aus dem oberen Halbraum größer ist als von der Bodenoberfläche, da der maximale Strahlungsumsatz im Kronenraum stattfindet. Vergleicht man die PET-Werte von Straßenräumen mit (MP 4: 28°C PET) und ohne Baumvegetation (MP 6: 38°C PET), so sind Unterschiede bis zu einer Größe von 10 K PET festzustellen (vgl. auch Kap. 7.2.3). Ähnliche Ergebnisse werden in Untersuchungen von MAYER (1993 und 1997) beschrieben.

Hinsichtlich der stadtklimatischen Bedeutung ist die Parkanlage Mariannenpark durch ihre klimaökologische Ausgleichsfunktion als sehr positiv anzusehen. Auch wenn die Rasenfläche (MP 2) bedingt durch bessere Einstrahlungsbedingungen gleich hohe PET aufweist wie die ebenfalls besonnten Bebauungsstrukturen, so trägt sie doch in den Nachtstunden im Gegensatz zur Bebauung zu einer stärkeren Abkühlung bei (vgl. Abb. 15). Die

schattenspendenden Baumgruppen in der untersuchten Parkanlage übernehmen dagegen tagsüber eine thermische Ausgleichsfunktion, so zum Beispiel eine Baumallee, die parallel zur Straße verläuft und auf dem Fußweg für thermische Entlastung bei sommerlichen Strahlungswetterlagen sorgt. Die ausgleichende Wirkung von Parkanlagen ist demnach nicht nur eine Frage der Reichweite von durch die Parkanlage induzierten meteorologischen Bedingungen während der Nachtstunden, sondern vielmehr auch eine Frage der mikroklimatischen Erholungsfunktionen von städtischen Grünanlagen bei sommerlichem Strahlungswetter während der Tagesstunden (KATZSCHNER 1986). Um beiden Argumenten gerecht zu werden, ist eine Kombination aus größeren Rasenflächen mit vereinzelt Baumgruppen oder Baumreihen empfehlenswert (KIESE 1995).

Im vorliegenden Untersuchungsbeispiel zeigt sich die positive thermische Wirkung der Baumallee im Straßenbereich. Die Bäume stehen in einiger Entfernung zu der westexponierten Hausfassade, so daß für die Fassaden sowohl sonnige als auch schattige Zeiträume bestehen. Obwohl die hohen langwelligen Strahlungsflüsse der Straßenschlucht zur Wärmebelastung beitragen, wäre ein so dichter Baumbestand wie in der Allee aus stadtklimatischer Sicht eher ungünstig. Die ohnehin schon infolge Bebauung eingeschränkte nächtliche Abkühlung würde noch zusätzlich behindert. Ein Kompromiß wären einzelne Bäume auf der westexponierten Seite, die partiell für Beschattung sorgen.

7.4 Zusammenfassung

Alle Ausführungen in Kapitel 7 beziehen sich auf mikrometeorologische Untersuchungen in kleinräumigen Stadtstrukturen während sommerlicher Strahlungswetterlagen. Untersuchungsschwerpunkte sind die Beziehungen zwischen mikrometeorologischen und thermophysiologischen Kenngrößen, die Variabilität human-biometeorologischer Bedingungen in ausgewählten Stadtstrukturen und die Einflüsse technogener und natürlicher Umgebungsflächen.

Aus den meteorologischen Messungen über einer Asphaltfläche und einer Rasenfläche (vgl. Kap. 7.2.1) geht hervor, daß größere Rasenflächen unter stadtklimatologischen Aspekten nicht nur wegen ihrer höheren nächtlichen Abkühlungsraten, sondern auch wegen ihrer geringeren langwelligen Strahlungsabgaben während der Tagesstunden von Vorteil sind. So wurden über

Asphalt um 100 W/m^2 größere langwellige Strahlungsflüsse aus dem unteren Halbraum gemessen, was dazu führt, daß über der Asphaltdecke in den Nachmittagsstunden um 5 K höhere PET-Werte als über Rasen festzustellen sind.

An Beispielen unterschiedlich exponierter Hausfassaden (vgl. Kap. 7.2.2) wird der mikrometeorologische Einfluß vertikaler Umgebungsflächen deutlich. Vor einer südexponierten Wand konnten mittlere Strahlungstemperaturen von über 60°C gemessen werden, während vor einer beschatteten, nach Norden exponierten Fassade die Werte gut 30 K niedriger waren. In der physiologisch äquivalenten Temperatur (PET) ergeben sich dadurch Unterschiede von 20 K.

Ein ähnliches Verhältnis wie Rasen- zu Asphaltflächen zeigen begrünte und unbegrünte Hausfassaden. Mittels Thermalscanner-Aufnahmen konnte festgestellt werden, daß von einer begrünten Hauswand während der Mittagsstunden etwa 70 W/m^2 geringere langwellige Strahlungsflüsse ausgehen und so zu einer Reduzierung von PET beitragen.

Der Einfluß von Bäumen und Baumgruppen auf human-biometeorologische Bedingungen ist vor allem durch ihre schattenspendende Wirkung und der damit verbundenen Verlagerung der maximalen kurzwelligen Strahlungsumsätze in den Kronenraum gegeben. Vergleicht man PET-Werte von Straßenräumen mit und ohne Baumvegetation, so sind Unterschiede bis zu einer Größenordnung von 10 K festzustellen.

Bei Betrachtung der Variabilität in den untersuchten Stadtstrukturen ist folgendes anzumerken. Die recht einfache und homogene Innenhofgestaltung von Großwohnsiedlungen (Kap. 7.3.1) hat zur Folge, daß mikroklimatische Unterschiede vorrangig durch die Gebäudestruktur bestimmt werden. Die Maxima an PET wurden vor der westexponierten Hausfront mit Werten um 45°C gemessen. Daß die PET Werte nicht größer ausgefallen sind, liegt in der einigermaßen guten Durchlüftung des großen und mit zwei Öffnungen versehenen Innenhofes.

Auch in dem untersuchten Innenhof der Gründerzeitlichen Blockrandbebauung (Kap. 7.3.2) in Leipzig-Volkmarisdorf finden sich expositionsbedingt die Maxima im westexponierten Innenhofbereich. In diesem Fall werden diese noch durch niedrige Windgeschwindigkeiten ($<1 \text{ m/s}$), wie sie in den engen Bebauungsstrukturen von Block- und Blockrandbebauungen auftreten können, auf Werte über 50°C PET angehoben.

Am Beispiel eines parkähnlich angelegten Innenhofes (Kap. 7.3.2) und einer Parkanlage mit angrenzender Bebauung (Kap. 7.3.3) werden die mikrometeorologischen Einflüsse von

Vegetationsstrukturen hervorgehoben. Bei einem Vergleich zweier benachbarter westexponierter Meßpunkte in dem Innenhof der „Meyerschen Häuser“ wird deutlich, daß Baumschatten einen thermischen Ausgleich zur Folge hat und PET-Werte bis zu 40 % reduziert werden.

Die Untersuchungen innerhalb der Parkanlage Mariannenpark zeigen welche klima-ökologischen Ausgleichsfunktionen städtische Grünanlagen besitzen. Obwohl die Rasenflächen, aufgrund der besseren Einstrahlungsbedingungen, tagsüber hohe PET-Werte zeigen (Abb. 42), sind sie für die nächtliche Abkühlung förderlich (vgl. Abb. 15). Bei Bäumen und Baumgruppen ist es genau umgekehrt, trotz Einschränkung der nächtlichen Abkühlung sorgen sie tagsüber durch ihre schattenspendende Wirkung für eine Reduktion der PET-Werte (Abb. 42). Eine Kombination aus größeren Freiflächen und Baumgruppen oder Baumreihen ist deshalb für Parkanlagen wünschenswert.

Differenziert man die experimentellen Untersuchungen nach den gemessenen und berechneten meteorologischen Kenngrößen, so lassen sich folgende Gesichtspunkte zusammenfassen:

- **Lufttemperatur:** Die Messungen der Lufttemperatur zeigen, daß während der Tagesstunden die Variabilität innerhalb der Stadtstrukturen recht gering ist (vgl. z.B. Abb. 39 bis 42). Eine kleinräumige mobile Erfassung der Lufttemperatur erscheint deshalb nicht zwingend erforderlich. Für die Berechnung von PET sind Lufttemperaturwerte von Klimameßstationen durchaus ausreichend, dies gilt besonders während der Tagesstunden, wenn die Lufttemperaturen allgemein relativ ausgeglichen sind (vgl. Abb. 15). Als wichtige Hintergrundinformation ist die Lufttemperatur aber unerläßlich. Trotz guter Korrelationen mit PET ist die Streuung um die Trendlinie so groß, daß sich alleine mit Werten der Lufttemperatur keine Aussage über die Größenordnung von PET machen läßt (vgl. Abb. 19). Erst in der Kombination mit den Einstrahlungsbedingungen sind differenziertere Angaben zu Größenordnungen von PET möglich (vgl. Abb. 20).
- **Dampfdruck:** Ähnlich wie die Lufttemperatur zeigt der Dampfdruck eine geringe Variabilität innerhalb von Stadtstrukturen (vgl. z.B. Abb. 39 bis 42). Deshalb gilt auch für den Dampfdruck, daß als Inputgrößen für eine human-biometeorologische Bewertung Stationswerte ausreichen. Genauso wie die Lufttemperatur ist der Dampfdruck als Hintergrundinformation sehr wichtig, so zum Beispiel bei schwülen Wetterlagen. Durch

die geringe Korrelation mit PET ist der Dampfdruck als Indikatorgröße für PET bei Strahlungswetterlagen ungeeignet (vgl. Tab. 5).

- **Windgeschwindigkeit:** Durch ihre hohe Variabilität innerhalb von Stadtstrukturen ist die Windgeschwindigkeit eine wichtige Größe für die räumliche Verteilung von PET (vgl. z.B. Abb. 39 bis 42). Die Angabe von Stationswerten reicht auf Grund der hohen Variabilität nicht aus. Durch die geringe Korrelation mit PET ist die Windgeschwindigkeit als alleiniger Indikator für thermische Belastung relativ ungeeignet (Tab. 5).
- **Mittlere Strahlungstemperatur:** Die mittlere Strahlungstemperatur hat sich als die dominanteste meteorologische Eingangsgröße bei der human-biometeorologischen Bewertung mit MEMI herausgestellt (vgl. z.B. Abb. 39 bis 42) (vgl. MAYER 1997), entsprechend gut ist daher auch die Korrelation mit PET (vgl. Abb. 22). Die Variabilität von T_{mrt} ist in städtischen Strukturen durch die unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen und Oberflächenarten sehr groß. Während der Tagesstunden ist die mittlere Strahlungstemperatur ein wichtiger Indikator für PET. Als nachteilig ist dabei die sehr aufwendige Erfassung der mittleren Strahlungstemperatur zu sehen. Eine Betrachtung einzelner Strahlungsflüsse könnte deshalb weiterhelfen.
- **Kurzwellige Strahlungsflüsse (oberer Halbraum):** Wie aus den Abbildungen 39 bis 42 zu entnehmen ist, dominiert die solare Strahlung die mittlere Strahlungstemperatur und damit PET besonders. Die kurzwellige Strahlung aus dem oberen Halbraum kann deshalb ein relativ guter Indikator für PET sein (siehe auch Tab. 5). Es besteht auch eine gute Kombinationsmöglichkeit mit der Lufttemperatur (siehe oben und Abb. 20).
- **Langwellige Strahlungsflüsse (unterer Halbraum):** Die terrestrischen Strahlungsflüsse sind sehr eng an die Einstrahlungsbedingungen gekoppelt. Durch die unterschiedlichen Expositionen und Oberflächenarten ist eine große Variabilität festzustellen. Über die mittlere Strahlungstemperatur besteht ein enger Bezug zu PET. Die Infrarotthermographie kann deshalb gute Hinweise über die Größenordnung und Verteilung von PET liefern.

Über mobile Untersuchungen sind nur Einzelfallmessungen möglich, die wenig über die räumliche Verteilung mikrometeorologischer Bedingungen aussagen und darüber hinaus sind sie sehr personal- und zeitaufwendig, weshalb sich die Frage stellt, ob mit Hilfe mikroskaliger numerischer Modelle Hinweise zur räumlichen Verteilung von human-biometeorologischen Kenngrößen gewonnen werden können.

8 Ergebnisse mikroskaliger Modellierung

Wie den Ausführungen in Kapitel 7 zu entnehmen ist, ist eine kleinräumige Modellierung der Lufttemperatur und des Dampfdruckes nicht sinnvoll, da ihre räumliche Variabilität relativ gering ist und Stationswerte herangezogen werden können. Interessanter ist eine Modellierung des Strahlungshaushaltes und der Strömungsverhältnisse, da sie durch die hohe Variabilität zu den dominierenden meteorologischen Größen in der human-biometeorologischen Bewertung von kleinräumigen Stadtstrukturen zählen. Eine flächendeckende Modellierung der mittleren Strahlungstemperatur als wichtigste Inputgröße, ist sehr komplex und aufwendig, so daß bisher nur eine Modellierung und Berechnung für Einzelfälle möglich ist (vgl. JENDRITZKY 1991) und daher gegenüber den experimentellen Untersuchungen wenig Vorteile aufweist.

Für das weitere Vorgehen wurden deshalb Modelle zur Simulation der kurzwelligen Einstrahlung und zur Windfeldberechnung ausgewählt, deren Ergebnisse im folgenden Kapitel vorgestellt werden. Wie bereits im Methodenteil in Kapitel 4.4 beschrieben, wird für die Modellierung der kurzwelligen Einstrahlungsbedingungen das Modell SHADOW (BRUSE 1995) und für die Berechnung der Strömungsverhältnisse das Modell MISKAM (EICHHORN 1989) eingesetzt. Die verwendeten Modellversionen sind in den jeweiligen Abbildungsunterschriften mit angegeben.

Im Vordergrund der folgenden Ausführungen steht ein Vergleich von experimentellen und modellhaften Ergebnissen, weshalb für die Modellierungen die gleichen Untersuchungsgebiete und -zeiträume, wie bei den mobilen Untersuchungen zugrunde gelegt werden. Eine detaillierte Validierung und Evaluierung der Modelle kann im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen, da dazu wesentlich intensivere modellbezogene Untersuchungen notwendig wären. Gezeigt werden vorrangig Modellbeispiele der Standorte in Leipzig-Grünau und Leipzig-Volkmarisdorf, da diese Untersuchungsgebiete besonders durch Gebäudestrukturen geprägt sind und deshalb ein Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen am ehesten möglich ist. Die Einbeziehung von Vegetationsstrukturen in die Modellebenen ist zum Teil nur sehr generalisiert möglich.

Die räumliche Ausdehnung der Modellebenen ist gegenüber der Kartierung der Untersuchungsflächen (vgl. Anhang Karte 2 und 3) wesentlich größer gewählt worden, damit Fehler der Randbereiche vernachlässigt werden können. Für eine Interpretation der Ergebnisse wird nur der Kernbereich der graphischen Modellebene herangezogen.

8.1 Strahlungshaushaltssimulation

Aus den verschiedenen Analyse- und Darstellungsmöglichkeiten des Strahlungsmodells SHADOW (BRUSE 1995) wird als Flächenanalyse die Berechnung der Globalstrahlung gewählt, da sie als Indikatorgröße für PET geeignet erscheint (vgl. Kap. 7.4). Die Berechnungen werden für verschiedene Tageszeiten, in den Vormittagsstunden (9 Uhr MEZ), zur Mittagszeit (12 Uhr MEZ) und in den Nachmittagsstunden (16 Uhr MEZ), durchgeführt. Zur Beschreibung und Analyse einzelner beispielhaft ausgewählter Meßpunkte wird die Darstellung der Horizonteinengung verwendet, die mit Hilfe von Sonnenbahnen Auskunft über die mögliche Besonnung an einem Meßpunkt gibt.

8.1.1 Großwohnsiedlung

Die Abbildung 43 zeigt die Modellierung der kurzwelligen Einstrahlung für den Untersuchungsstandort in einem Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau (vgl. Anhang Karte 2 und Abb. 39) am 19.08.1996. Die Berechnungsgrundlage bezieht sich auf eine Höhe von 1 m über Grund, um die Vergleichbarkeit mit den Messungen zu ermöglichen. Die Gebäudehöhe wird mit 25 m angegeben.

Aufgrund der Modellierung ergeben sich in den Morgenstunden für die besonnten Innenhofbereiche Einstrahlungswerte von rund 500 bis 590 W/m², in der Mittagszeit von 780 bis 875 W/m² und in den Nachmittagsstunden von 390 bis 470 W/m². Vergleicht man diese Klassen mit den gemessenen Untersuchungen (siehe Tab. 10) so ist zu erkennen, daß die Größenordnungen für die besonnten Bereiche durchaus übereinstimmen, nur vereinzelt liegen die gemessenen Werte über der angegebenen Klasse.

Bei den beschatteten Meßpunkten zeigt sich, daß die Modellergebnisse zumindest in den Morgen- und Mittagsstunden eine Klasse zu hoch angesetzt werden, der Anteil an indirekter Strahlung fällt bei den Messungen demnach geringer aus.

Die Variabilität an Einstrahlungsbedingungen aus dem oberen Halbraum, wie sie bei den mobilen Untersuchungen gemessen werden, kann über die durchgeführte Modellierung nicht erfaßt werden. Die verhältnismäßig hohe Variabilität ist auf unterschiedliche Reflexionen an

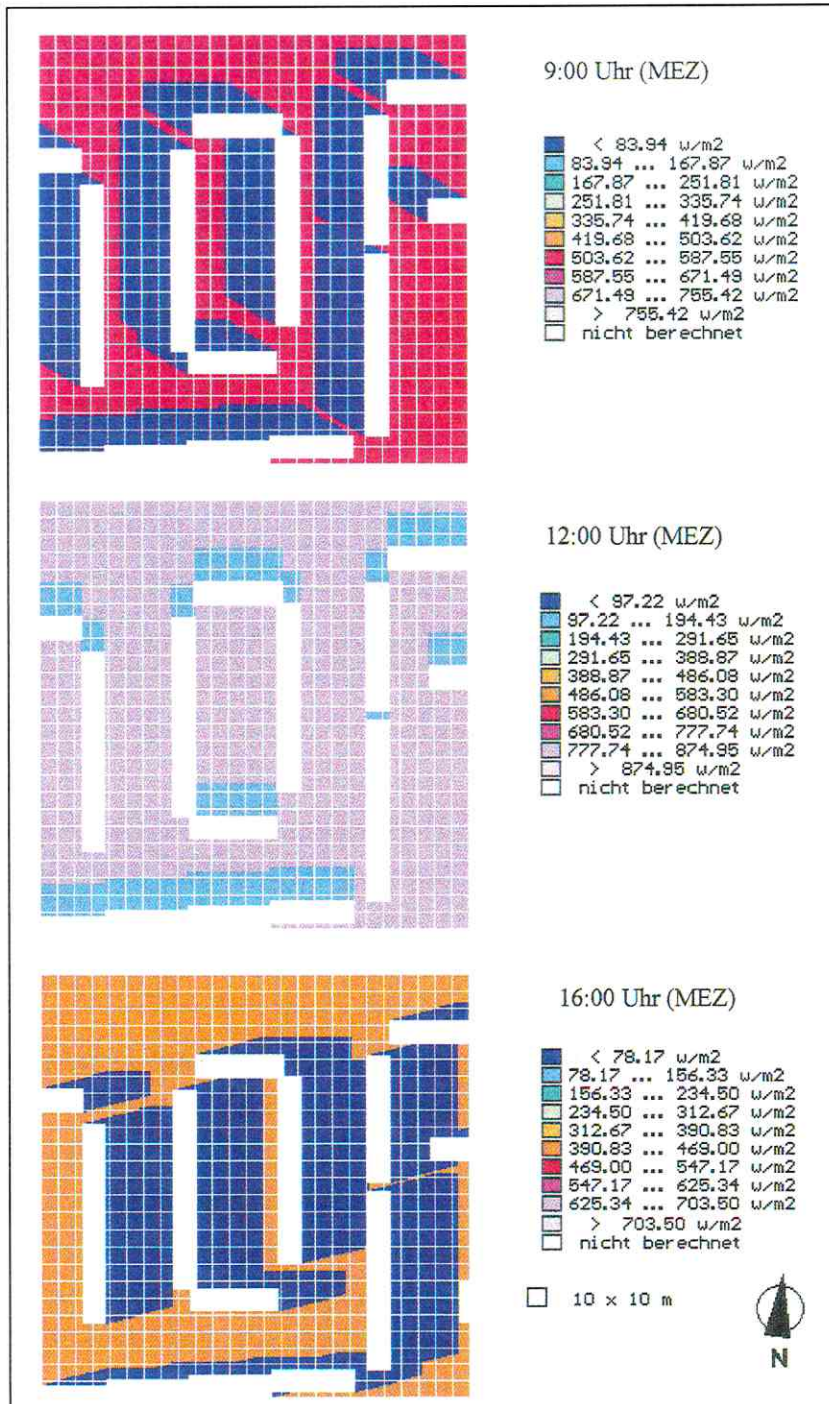


Abb. 43: Berechnung der Globalstrahlung am 19.08.96 zu verschiedenen Tageszeiten in einem Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau (vgl. Anhang Karte 2 und Abb. 39 in Kap. 7; Berechnung für 1m Höhe über Grund) (Berechnet mit SHADOW Version 2.2)

Meßpunkte	Uhrzeit (MEZ)	KW-O W/m ²	Uhrzeit (MEZ)	Modellierung KW-O W/m ²
Umlandstation	9:00	515		
MP1	9:00	43	9:00	84 - 168
MP2	9:15	52	9:00	84 - 168
MP3	9:25	583	9:00	504 - 588
MP4	9:40	609	9:00	504 - 588
Umlandstation	12:00	755		
MP1	12:15	703	12:00	778 - 875
MP2	12:20	26	12:00	97 - 194
MP3	12:25	746	12:00	778 - 875
MP4	12:30	832	12:00	778 - 875
Umlandstation	16:00	385		
MP1	16:00	480	16:00	391 - 469
MP2	16:10	43	16:00	0 - 78
MP3	16:20	43	16:00	0 - 78
MP4	16:25	352	16:00	391 - 469

Tab. 10: Vergleich Modellierung und mobile Messungen der Globalstrahlung am 19.08.96 in einem Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig Grünau (vgl. Anhang; Karte 2 und Abb. 39)

Hausfassaden zurückzuführen. So zeigen im Vergleich besonders jene Meßpunkte höhere Werte, die vor jenen Hausfassaden liegen, die der Sonne zugewandt sind (z.B. Tabelle 10: MP 4 südexponiert mit 832 W/m² 12:30 Uhr und MP 1 westexponiert mit 480 W/m² 16:00 Uhr). Auch können durch diese Mehrfachreflexionen höhere Einstrahlungswerte auftreten als sie auf einer Freifläche im Stadtumland gemessen werden (vgl. Kap. 3.2.1).

Nähere Angaben über die mögliche Sonnenscheindauer zu verschiedenen Jahreszeiten werden über Horizontdiagramme mit eingezeichneten Sonnenbahnen gewonnen. Die in Abbildung 44 gezeigten Diagramme des nordexponierten Meßpunktes 2 und des südexponierten Innenhofbereiches bei Meßpunkt 4 veranschaulichen recht deutlich, daß beide Meßpunkte zwar über eine ähnliche Größenordnung der Horizonteinengung verfügen, aber durch ihre unterschiedliche Gebäudeexposition völlig verschiedene Einstrahlungsbedingungen aufweisen. Meßpunkt 2 liegt fast ganzjährig im Gebäudeschatten, so daß eine zusätzliche Beschattung durch Baumvegetation in diesem Bereich zu vermeiden ist. Die potentielle Sonnenscheindauer bei Meßpunkt 4 zeigt am längsten Tag des Jahres (21.6.) etwa 8 Stunden am Tag, zum Teil mit einer Unterbrechung durch eine Beschattung des im Westen liegenden

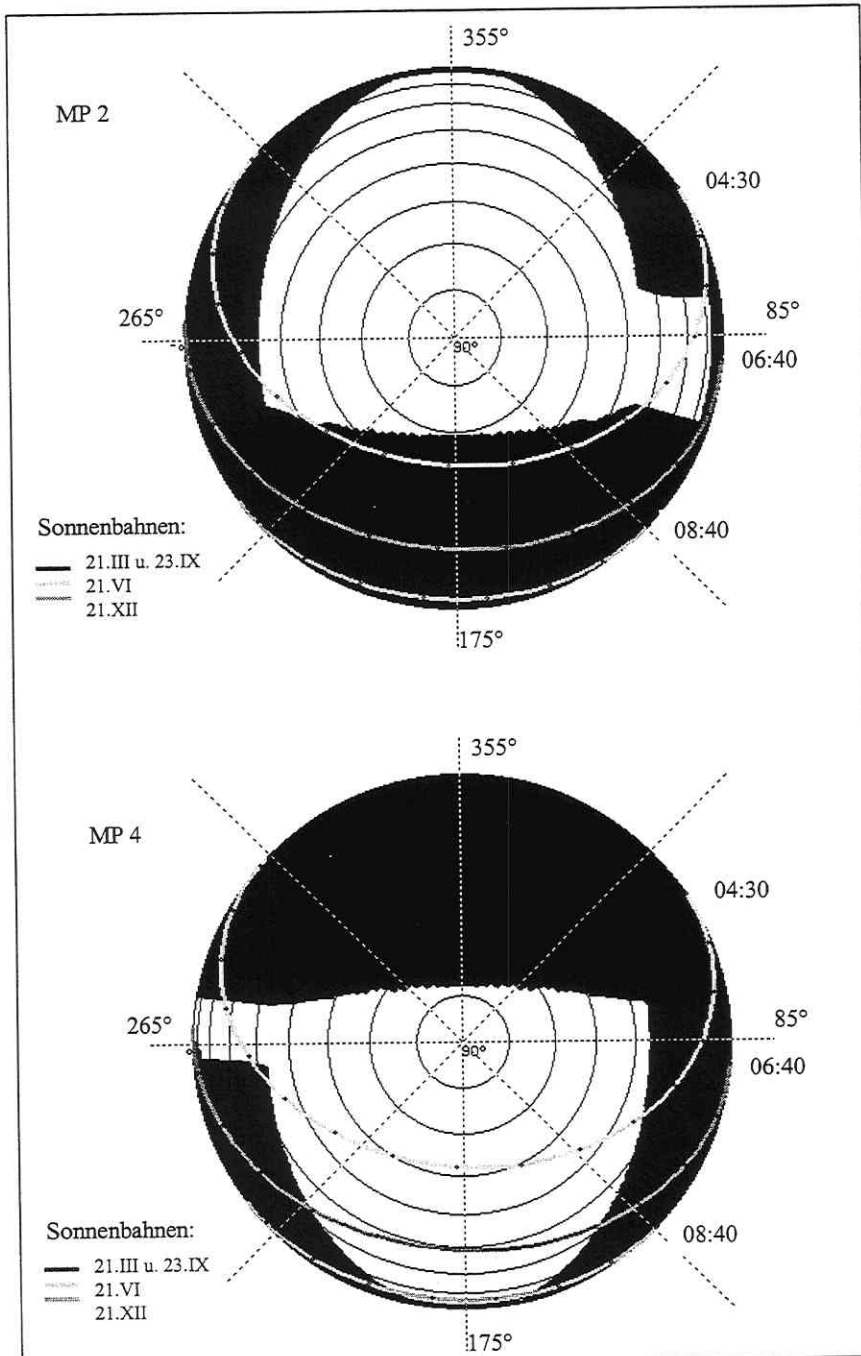


Abb. 44: Horizonteinengung durch seitliche Bebauung am Beispiel von Meßpunkt 2 und 4 des untersuchten Innenhofes der Großwohnsiedlung in Leipzig - Grünau (vgl. Anhang Karte 2 und Abb. 39 in Kap. 7; Berechnung für 1m Höhe über Grund) (Berechnet mit SHADOW Version 2.2)

Gebäudes. Dies zeigen auch die Messungen der kurzwelligen Einstrahlung bei MP 4 in Abbildung 39. In den Wintermonaten reduziert sich die mögliche Sonnendauer durch die Innenhofsituation auf bis zu 2 Stunden am Tag (z.B. 21.12.), was vor allem an der Nord-Süd-Ausrichtung des Innenhofes liegt. Hier wird deutlich, daß während der heißen Sommermonate eine partielle Beschattung durch einzelne sommergrüne Bäume durchaus erwünscht ist, in den Wintermonaten aber zusätzliche Beschattung vermieden werden muß.

8.1.2 Gründerzeitliche Blockrandbebauung

In Abbildung 45 werden die Ergebnisse der Einstrahlungsmodellierung für das Untersuchungsgebiet in der gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarisdorf (vgl. Anhang, Karte 3 und Abb. 40) dargestellt. Die Globalstrahlung wurde für den 20.08.1996 berechnet. Die Meßwerte beziehen sich, wie schon im vorangegangenen Beispiel, auf eine Höhe von 1 m über Grund. Die Gebäudehöhe wird mit 20 m angegeben. Die Ergebnisinterpretation bezieht sich auf den Innenhof in der Mitte der Grafiken (Abb. 45).

Bei der Modellierung werden zur Mittagszeit die beschatteten Innenhofbereiche um eine Klasse größer angegeben als bei den Messungen ermittelt wurde (Tab. 10), was auf eine Überbewertung der indirekten Strahlung schließen läßt. Als Input für die Modellierung wurde zu diesem Zeitpunkt ein Dampfdruck von 12 hPa angenommen (vgl. Abb. 39 gemessene Dampfdruckwerte zum 12:00 Uhr-Termin).

Die Größenordnungen der Modellergebnisse (Abb. 45 und Tab. 11) liegen bei den besonnten Bereichen zum 12:00 Uhr-Termin in einer Klasse von 700-800 W/m². Dies ist vergleichbar mit den gemessenen Werten, bei denen zu diesem Zeitpunkt je nach Lage im Innenhof an besonnten Stellen zwischen 712 und 780 W/m² festzustellen sind. Die Differenzen sind, wie schon am Beispiel zuvor zu sehen, auf Reflexionen der Hausfassaden zurückzuführen und werden über die Modellierung nicht erfaßt. Den größten gemessenen kurzwelligen Strahlungsfluß aus dem oberen Halbraum (KW-0) findet man in den Mittagsstunden bei dem vor der südexponierten Wand liegenden Meßpunkt 5 mit 780 W/m². In den Nachmittagsstunden zeigt der westexponierte Meßpunkt 1 mit fast 500 W/m² die größeren Werte (Tab. 11).

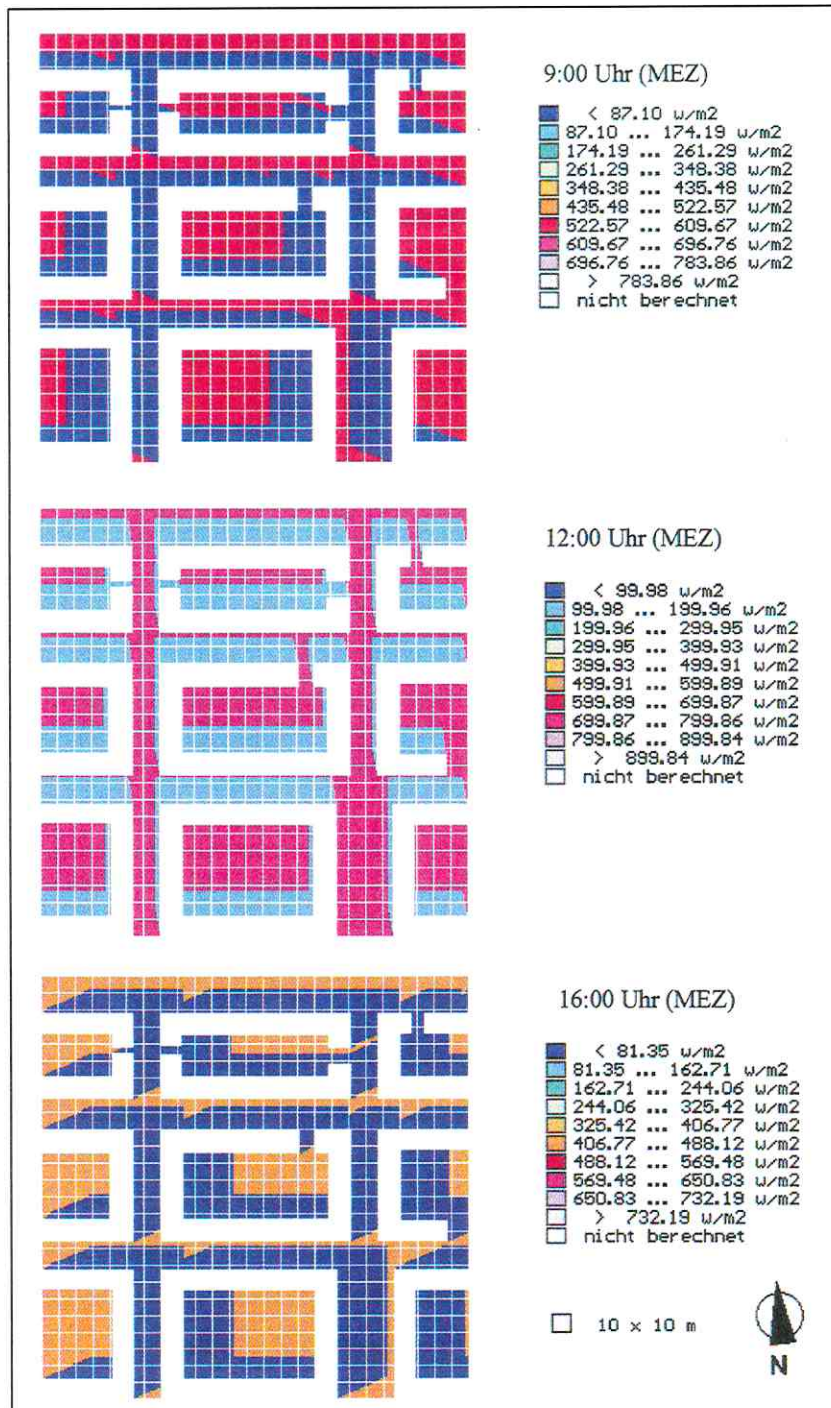


Abb. 45: Berechnung der Globalstrahlung am 20.08.96 zu verschiedenen Tageszeiten in Innenhöfen und Straßenschluchten einer Gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf (vgl. Anhang Karte 1 und 3; Abb. 29 und 40 in Kap. 7;) Berechnung für 1m Höhe über Grund) (SHADOW 2.2)

Meßpunkte	Uhrzeit (MEZ)	KW-O W/m ²	Uhrzeit (MEZ)	Modellierung KW-O W/m ²
Umlandstation	9:00	525		
MP1	9:00	26	9:00	0 - 88
MP2	9:15	51	9:00	0 - 88
MP3	9:20	592	9:00	523 - 610
MP4	9:25	575	9:00	523 - 610
MP5	9:30	583	9:00	523 - 610
Umlandstation	12:00	740		
MP1	12:00	60	12:00	100 - 200
MP2	12:15	52	12:00	100 - 200
MP3	12:20	746	12:00	700 - 800
MP4	12:25	712	12:00	700 - 800
MP5	12:30	780	12:00	700 - 800
Umlandstation	16:00	385		
MP1	16:00	497	16:00	407 - 488
MP2	16:15	26	16:00	0 - 81
MP3	16:20	10	16:00	0 - 81
MP4	16:25	60	16:00	0 - 81
MP5	16:30	352	16:00	407 - 488

Tab. 11: Vergleich Modellierung und Messungen am 20.08.96 in einem Innenhof einer gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarisdorf (vgl. Anhang Karte 3; und Abb. 40)

Die beiden Horizontdiagramme in Abbildung 46 beziehen sich auf die Mitte des untersuchten Innenhofes der gründerzeitlichen Blockrandbebauung (Anhang Karte 3 MP 4) und auf einen südexponierten Meßpunkt (Anhang Karte 1; ebenfalls MP 4) einer benachbarten von Ost nach West orientierten Straßenschlucht. Trotz unterschiedlicher Horizonteinengung zeigen beide Meßpunkte einen ähnlichen Verlauf in der Sonnenscheindauer. Durch die Ost-West Ausrichtung des Innenhofes und der Straßenschlucht erhalten beide Meßpunkte während der Sommermonate bis zu 10 Stunden am Tag direkte Sonneneinstrahlung, was zum Beispiel an dem südexponierten Meßpunkt 4 der Straßenschlucht zu mittleren Strahlungstemperaturen von fast 70 °C führen kann (siehe Abb. 29 in Kap. 7.2). In den Wintermonaten, wenn Sonne erwünscht ist, ist durch die enge Bebauung eine permanente Beschattung gegeben.

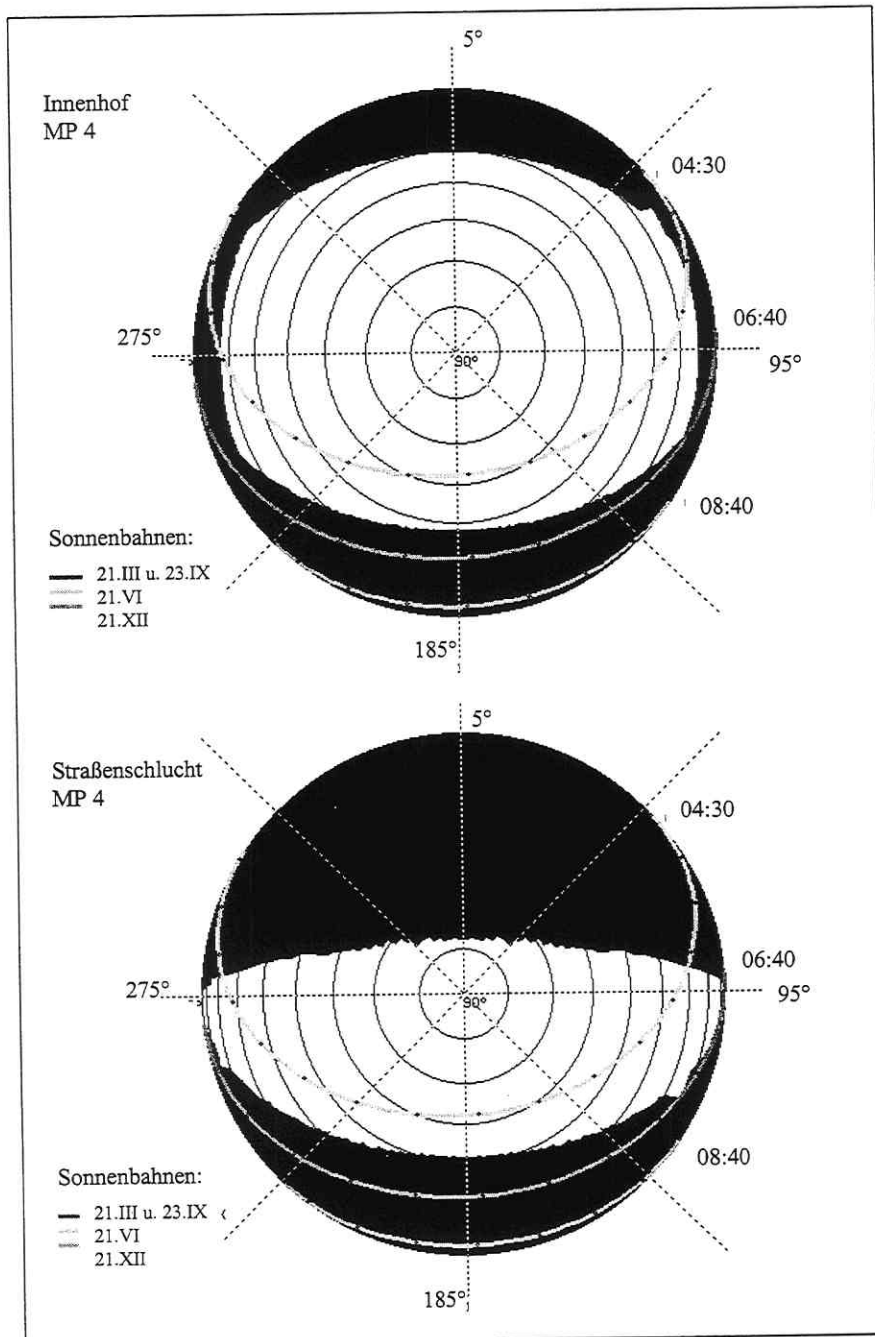


Abb. 46: Horizonteinkung durch seitliche Bebauung am Beispiel eines Innenhofes (Hofmitte) (vgl. Anhang Karte 3, MP4; und Abb. 40 in Kap. 7) und einer Straßenschlucht (südexponierter Meßpunkt) (vgl. Anhang Karte 1, MP4; und Abb. 29 in Kap. 7) in einer Gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarisdorf (Berechnung für 1m Höhe über Grund) (Berechnet mit SHADOW Version 2.2)

Nimmt man an Hand der modellierten Globalstrahlungsergebnisse eine Abschätzung von PET vor, so wird man die PET-Maxima in dem Innenhof der gründerzeitlichen Bebauung auf die besonnten Bereiche während der Mittagsstunden legen. Die mobilen Untersuchungen belegen, daß die Maxima aber vor der westexponierten Wand in den Nachmittagsstunden zu finden sind (vgl. Kap. 7.3.2, Abb. 40). Eine Abschätzung von PET über besonnte und beschattete Bereiche (ermittelt über SHADOW) in Kombination mit der Lufttemperatur, wie sie in der Korrelationsanalyse in Abbildung 20 (Kap. 7.1.2) beschrieben ist, kann nur grobe Größenordnungen aufzeigen. Bei einer Lufttemperatur von 28 °C würde man im beschatteten Bereich PET- Werte zwischen 20 °C und 30 °C, und für die sonnigen Abschnitte 35 °C bis 50 °C PET annehmen. Eine höhere Auflösung der PET-Werte ist über eine SHADOW-Modellierung nicht möglich. Demnach können mit Hilfe von SHADOW sehr gut die Besonnungsverhältnisse in ihrer räumlichen Verteilung aufgezeigt und gut die Größenordnung der Globalstrahlung berechnet werden. Eine Abschätzung von PET ist allerdings nur unter Vorbehalt möglich, da zu viele Aspekte des Strahlungshaushaltes wie Reflexionen kurzwelliger Strahlung und die langwelligen Strahlungsflüsse unberücksichtigt bleiben.

Abschließend läßt sich anmerken, daß durch die benutzerfreundliche und einfache Handhabung von SHADOW schnell und mit geringem Aufwand grundlegende Informationen zu den Einstrahlungsbedingungen in Stadtstrukturen gewonnen werden und so auch gute Prognosemöglichkeiten bei Planungsvorhaben bestehen.

Im Vergleich von SHADOW mit anderen Strahlungshaushaltsmodellen (vgl. Kap 3.4.2), lassen sich folgende Anmerkungen anführen. Für detaillierte Modellierungen des Strahlungshaushaltes muß man auf komplexere Modelle, wie sie zum Beispiel von ARNFIELD 1982 oder SIEVERS und ZUNDOWSKI (1986) entwickelt wurden, zurückgreifen. Diese können nur einfache Geometrien wie Straßenschluchten berechnen. Eine räumliche Betrachtung, wie sie mit SHADOW möglich ist, kann damit nicht erreicht werden. Gute Modellergebnisse zum Strahlungshaushalt in Stadtstrukturen lassen sich auch mit dem Programm HelioDat von MERTENS (1997) erzielen, allerdings ist auch hier der langwellige Strahlungshaushalt nicht berücksichtigt und es sind nur Punktanalysen möglich. Wesentlich höher aufgelöste modellierte Informationen zum kurz- und langwelligen Strahlungshaushalt sind mit dem neu entwickelten Energiebilanz-Modell ENVI-met (BRUSE 1998) zu erwarten. Eine Einbindung des Mitte des Jahres 1998 vorgestellten Modells in die bestehende Arbeit ist aus Zeitgründen nicht mehr möglich gewesen.

8.2 Windfeldmodellierung

Wichtige Eingangsgrößen für die Windfeldberechnungen mit dem Modell MISKAM (EICHHORN 1989) sind die Anströmgeschwindigkeit und Anströmrichtung bezogen auf die Anemometerhöhe. Eingesetzt werden die Daten der Windmessungen aus dem stationären Klimameßnetz. Anders als bei den Strahlungshaushaltssimulationen, die für ausgewählte Tageszeiten berechnet sind (Kap. 8.1), wird die Windfeldberechnung im Rahmen dieser Arbeit wegen der größeren Inhomogenität der Strömungsverhältnisse nicht auf bestimmte Tageszeiten, sondern auf Mittelwerte bezogen. Es bietet sich an, wegen der besseren Vergleichbarkeit zwischen Modellierung, mobilen und stationären Messungen den Bezugszeitraum auf 7:00 Uhr bis 18:00 Uhr (MEZ) festzulegen. In diesem Zeitraum treten meist bei Strahlungswetterlagen konvektionsbedingt höhere Luftströmungen auf (siehe Beispiel in Abb. 17, Kap. 7.1.1), deshalb würde eine Auswertung, inklusive der windschwächeren Nachtstunden, Inputwerte liefern, die mit den mobilen Untersuchungen nicht mehr vergleichbar wären. Die Windmessungen der mobilen Untersuchungen werden ebenfalls in Bezug zu den jeweiligen Meßpunkten gemittelt. Zur besseren Einordnung der Windgeschwindigkeiten sind in den Vergleichstabellen (Tab. 12 und 13) die Minima und Maxima mit angegeben.

Die Darstellung der Strömungsfelder (Vektorfelder) erfolgt mit WinMISKAM (Version 1.23), die Klassifizierung der absoluten Windgeschwindigkeit in % des Einströmwertes (Skalarfelder) mit MISKAM (DOS-Version 3.4). Als Modellebene wurde jeweils eine Übersichtsdarstellung und eine Detaildarstellung des Untersuchungsstandortes gewählt.

8.2.1 Großwohnsiedlung

In Abbildung 47 sind die Ergebnisgrafiken der Windfeldberechnung mit WinMISKAM für den untersuchten Innenhof in einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau zusammengestellt (vgl. Anhang Karte 2; und Abb. 39). Als Inputwerte werden eine Anströmgeschwindigkeit von 3 m/s und eine Anströmrichtung von 120° eingesetzt, die sich aus der Auswertung der Klimastationen Schkeuditz (Umlandstation) und Leipzig-Grünau für den 19.08.96 zwischen 7:00 und 18:00 Uhr (MEZ) ergeben (vgl. Tab. 12). Die Windgeschwindigkeiten in 10 m über

Grund erreichten in diesem Zeitraum an der Umlandstation Schkeuditz Werte zwischen 1,0 m/s und 4,5 m/s. Der Mittelwert wurde mit 2,9 m/s berechnet, weshalb als Eingangsgröße für die Modellierung 3 m/s gewählt wird. Die ermittelten Windrichtungen waren ziemlich konstant aus Ost-Süd-Ost und reichten von 82° bis 138° bei einer mittleren Windrichtung von 115°. Die Eingangsgröße für die Modellierung wurde auf 120° festgelegt. Zur besseren Übersicht sind in Tabelle 12 noch die Windgeschwindigkeiten für 2,6 m über Grund in Schkeuditz und die Windgeschwindigkeit und -richtung der Station Leipzig-Grünau angegeben, die aber an dieser Stelle nicht weiter dokumentiert werden.

Betrachtet man die Strömungsfelder des untersuchten Innenhofes in der Übersichts- und Detaildarstellung in Abbildung 47, so ist in beiden Grafiken ein ähnliches Strömungsmuster zu erkennen. Der Innenhof wird entsprechend der übergeordneten Windrichtung und den vorhandenen Öffnungen von Süd-Osten her durchströmt. Deutlich wird die Abschirmung durch die südlichen und östlichen Gebäudezeilen und die erhöhten Windgeschwindigkeiten im Bereich der schmalen Gebäudedurchgänge. Entlang der westexponierten Wand und in den beiden geschlossenen Innenhofecken hingegen reduziert sich die Windgeschwindigkeit erheblich. Dies zeigt auch die Klassifizierung der Windgeschwindigkeit in % des Einstromwertes in Abbildung 48.

Für einen Vergleich zwischen modellierten und den gemessenen Ergebnissen wird die Detailgrafik (Abb. 48 unten) des Innenhofes herangezogen, da diese eine leichtere Zuordnung der Meßpunkte ermöglicht. Bei der Interpretation ist allerdings zu berücksichtigen, daß durch die zusätzliche Abschirmung von umgebenden Gebäuden in der Übersichtsdarstellung (Abb. 48 oben) die Windgeschwindigkeiten in dem Innenhof im Verhältnis niedriger einzuschätzen sind.

Die größten Windgeschwindigkeiten sind während der mobilen Untersuchungen vor der ostexponierten Hausfassade bei Meßpunkt 3 gemessen worden (vgl. Abb. 39). Dies geht auch aus der Windfeldberechnung mit MISKAM hervor. In diesem Bereich und in der Innenhofmitte haben die Strömungsgeschwindigkeiten eine ähnliche Größenordnung wie die Anströmgeschwindigkeit (Tab. 11; Abb. 48). Niedrige Werte sind vor der westexponierten Wand bei Meßpunkt 1 ermittelt worden.

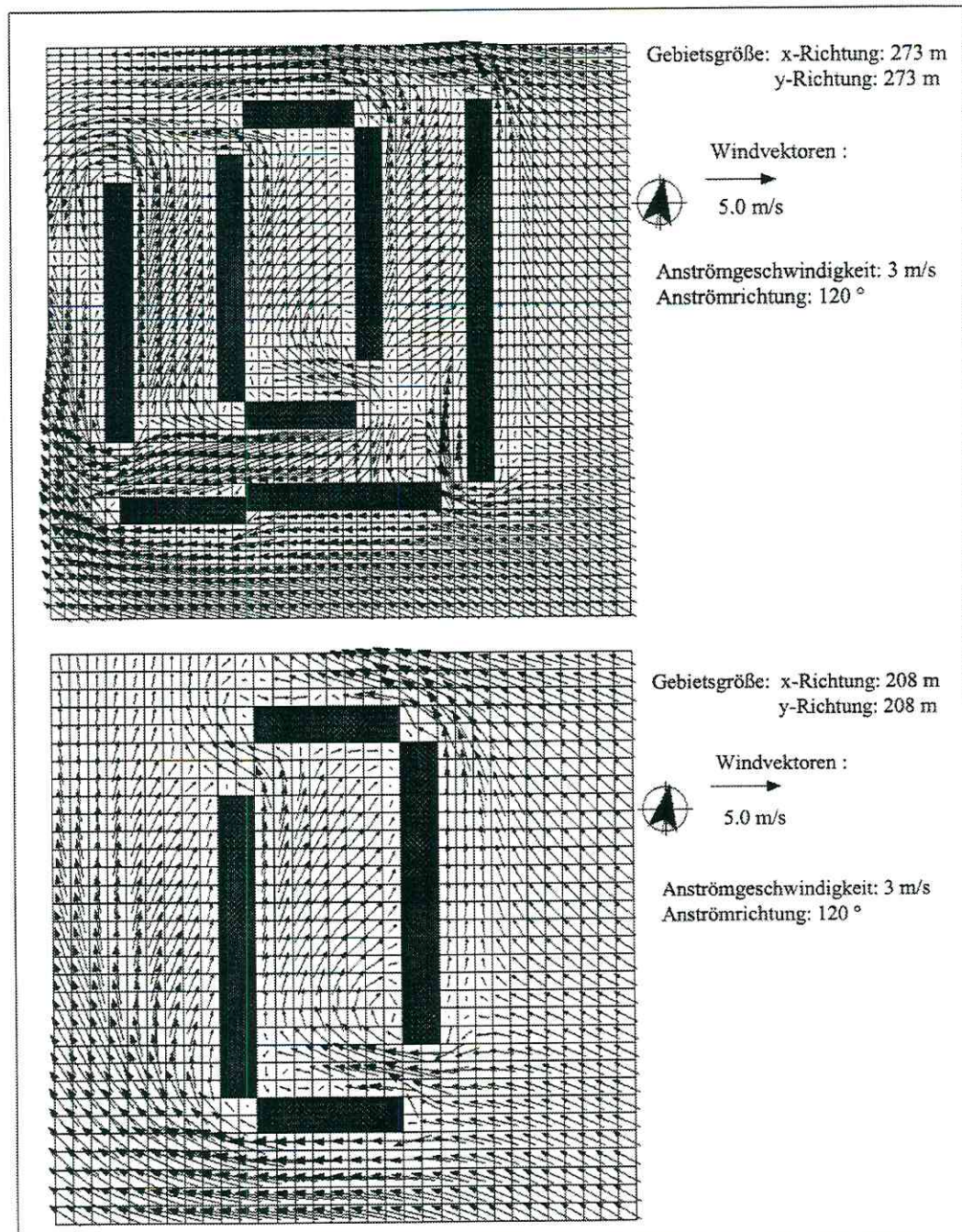


Abb. 47: Windfeldberechnung (Vektorfelder) für den Untersuchungsstandort Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau für 2,5 m über Grund (WinMISKAM Version 1.35) (vgl. Anhang Karte 2)

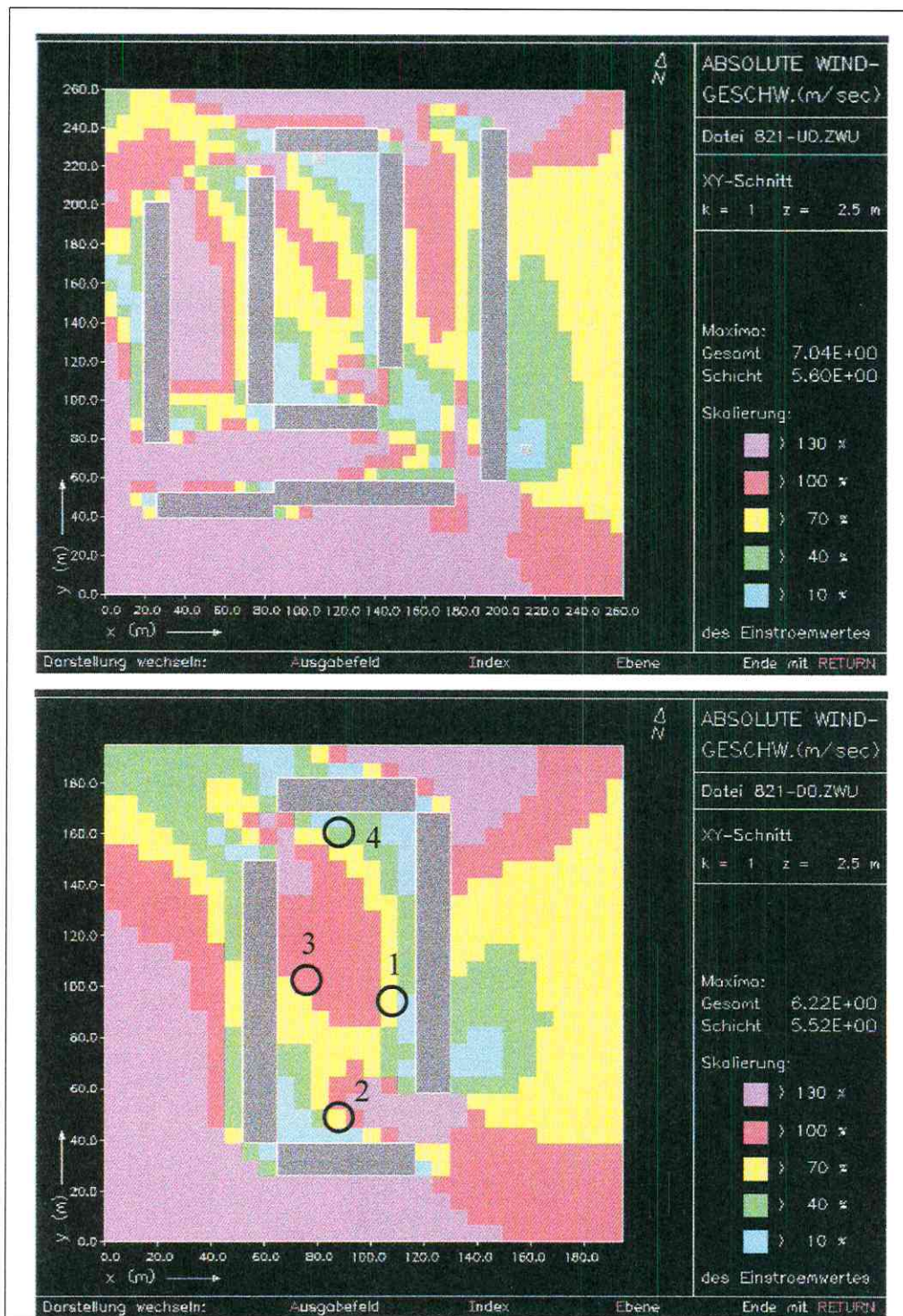


Abb. 48: Windgeschwindigkeit in % des Einstromwertes (Skalarfelder) für einen Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau (Einstromgeschwindigkeit 3m/s; Einstromrichtung 120°; MISKAM 3.4) (vgl. Anhang Karte 2 und Kap. 7, Abb. 39)

Meßpunkt	Mittelwert	Min.	Max.	Modellierung	Modellierung
	v in m/s (WR in °)	v in m/s (WR in °)	v in m/s (WR in °)	% des Einstromwertes (Input: 3m/s aus 120°)	absolute v- Klassen in m/s
Umlandstation 10 m	2,9 (115°)	1,0 (82°)	4,5 (138°)		
Umlandstation 2.6 m	2,3	0,9	3,7		
Station Grünau	1,6 (126°)	0,7 (102°)	2,3 (156°)		
MP1	1,4	0,7	2,6	70 - 100	2,1 - 3,0
MP2	2,1	0,9	3,6	70 - 100	2,1 - 3,0
MP3	3,1	1,7	5,0	100 - 130	3,0 - 3,9
MP4	2,1	1,0	2,9	40 - 70	1,2 - 2,1

Tab. 12: Angaben über Windgeschwindigkeiten ausgewählter Klimastationen und Vergleich von Modellierung (MISKAM) und mobilen Messungen am 19.08.96 in einem Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau (vgl. Anhang Karte 2; und Kap. 7 Abb. 39) (Alle Werte sind auf den Zeitraum von 7:00 Uhr bis 18:00 Uhr MEZ am 19.08.96 bezogen)

Zwar sind in Tabelle 12 für Meßpunkt 1 die Windgeschwindigkeiten der Modellierung um eine Klasse höher angegeben, aber die Grafik (Abb. 48 unten) zeigt, daß bei Meßpunkt 1 drei Windklassen in unmittelbarer Nachbarschaft liegen und die Tendenz eher zu geringeren Windgeschwindigkeiten in diesem Teil des Hofes geht. Bei Meßpunkt 2 und 4 finden sich Mittelwerte um 2,1 m/s, was etwa 70 % des Einstromwertes entspricht. Für diese Bereiche gilt ebenso, daß hier Übergänge von verschiedenen Windklassen vorhanden sind und deshalb die Variabilität entsprechend groß ist.

Die Grafiken in den Abbildungen 47 und 48 veranschaulichen, daß bei den gegebenen Anströmungsbedingungen besonders die Bereiche in den geschlossenen Innenhofecken und vor der westexponierten Wand erheblich reduzierte Windgeschwindigkeiten aufweisen und in diesen Bereichen deshalb auch mit höheren PET-Werten gerechnet werden muß. Unter gestalterischen Gesichtspunkten läßt sich ableiten, daß die Öffnungen des Innenhofes von Großvegetation freizuhalten ist, um die Durchströmung zu gewährleisten. Ebenso ist eine dichte Strauch- oder Baumbepflanzung in den geschlossenen Ecken zu vermeiden, um die Reduktion der Strömung nicht noch stärker zu fördern. Ganz allgemein kann für Großwohnsiedlungen angemerkt werden, daß vielfach sehr stark variierende Strömungsverhältnisse vorliegen, die durch Kanalisierungseffekte und Abschirmung verursacht werden.

8.2.2 Gründerzeitliche Blockrandbebauung

In der Abbildung 49 und 50 sind die Ergebnisse der Windfeldmodellierung für den untersuchten Innenhofbereich in der Gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf (vgl. Anhang Karte 3 und Abb. 40) dargestellt. Aus der Auswertung der Klimastation in Schkeuditz wird für den 20.08.96, bezogen auf den Zeitraum von 7:00 bis 18:00 Uhr (MEZ), eine mittlere Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s in 10 m Höhe ermittelt (Tab. 13). Die aufgezeichneten Windrichtungen reichen von 98° bis 146° und ergeben im Mittel eine Anströmung aus Süd-Ost mit 130°. Als Eingangsgrößen für die Windfeldberechnung wurden deshalb 3,5 m/s aus 130° gewählt.

Zur besseren Einordnung sind zusätzlich die Windgeschwindigkeiten für Schkeuditz (2,6 m Höhe) und Volkmarsdorf (2,6 m Höhe) angegeben. Die Klimastation in Volkmarsdorf befindet sich in dem untersuchten Innenhof in der Nähe des Meßpunktes 2 (vgl. Anhang Karte 3), was sich an den Größenordnungen der Windgeschwindigkeiten widerspiegelt.

Die Überblicksdarstellung (Abb. 49 oben) zeigt die verschiedenen Strömungsverhältnisse für Innenhöfe und Straßenschluchten einer typischen Gründerzeitlichen Blockrandbebauung. Deutlich zu sehen ist vor allem die starke Reduktion der Windgeschwindigkeit in den geschlossenen Innenhöfen. Die Straßenschluchten hingegen sind in Abhängigkeit der Anströmrichtung durch eine wesentlich stärkere Variabilität in den Strömungsgeschwindigkeiten gekennzeichnet. Für den untersuchten Innenhof gilt, daß sowohl in der Übersichts- als auch in der Detaildarstellung ähnliche Strömungsverhältnisse ermittelt werden.

Betrachtet man die Klassifizierung der Windgeschwindigkeit in % der Anströmgeschwindigkeit (Abb. 50), so ist zu sehen, daß vor allem in den zentralen Bereichen des Innenhofes Windgeschwindigkeiten zwischen 40 und 70 % des Anströmwertes berechnet werden, was einer Klasse von 1,4 bis 2,5 m/s absoluter Windgeschwindigkeit entspricht. In den Ecken und vor der westexponierten Wand reduziert sich die Windgeschwindigkeit auf 10 bis 40 % bei absoluten Werten von 0,4 bis 1,4 m/s. Dies sind Bereiche, in denen durch niedrigere Windgeschwindigkeiten höhere PET-Werte zu vermuten sind (vgl. Abb. 40 in Kap 7.3.2).

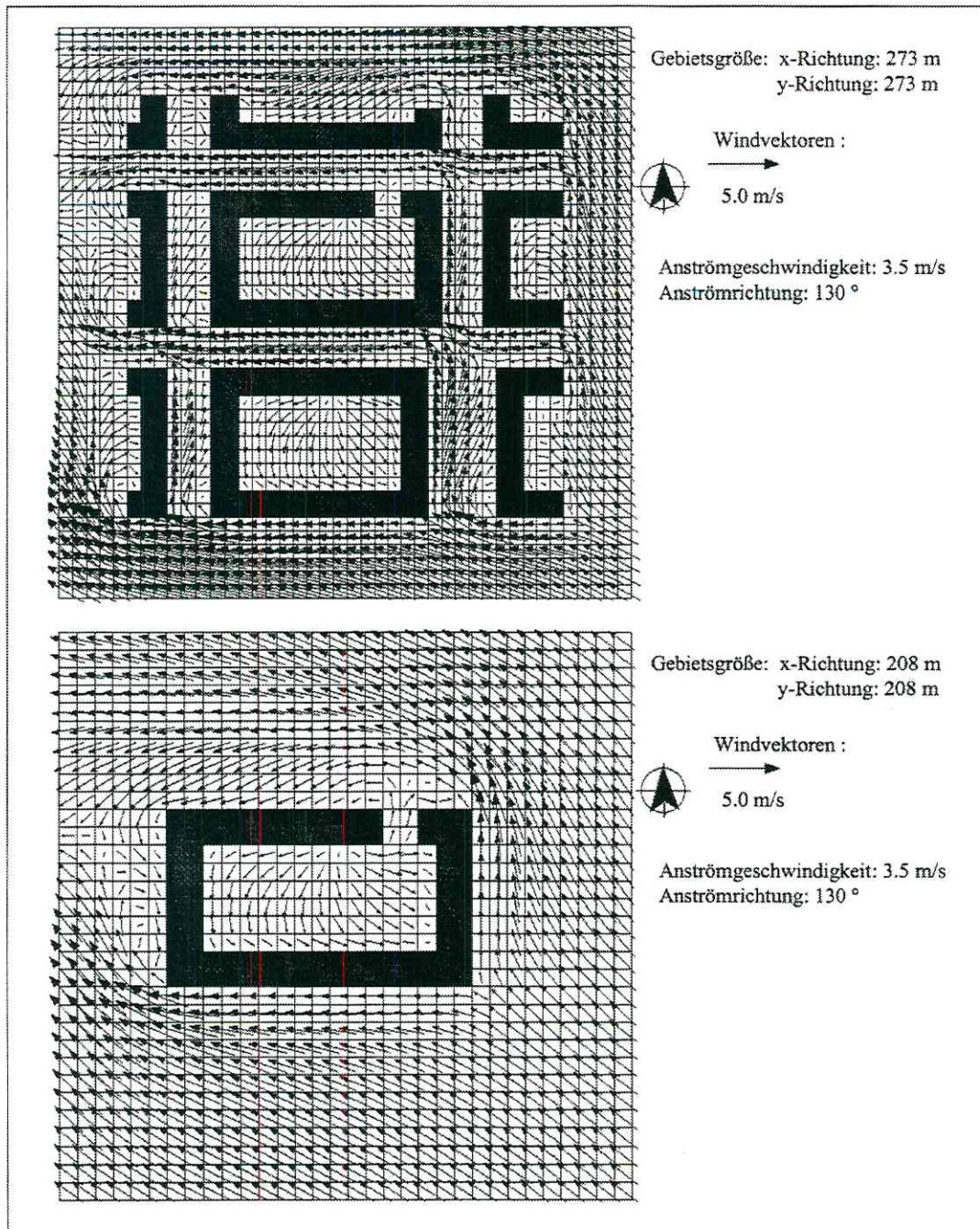


Abb. 49: Windfeldberechnung (Vektorfelder) für den Untersuchungsstandort Gründerzeitliche Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarisdorf (WinMISKAM Version 1.35) (vgl. Anhang Karte 3)

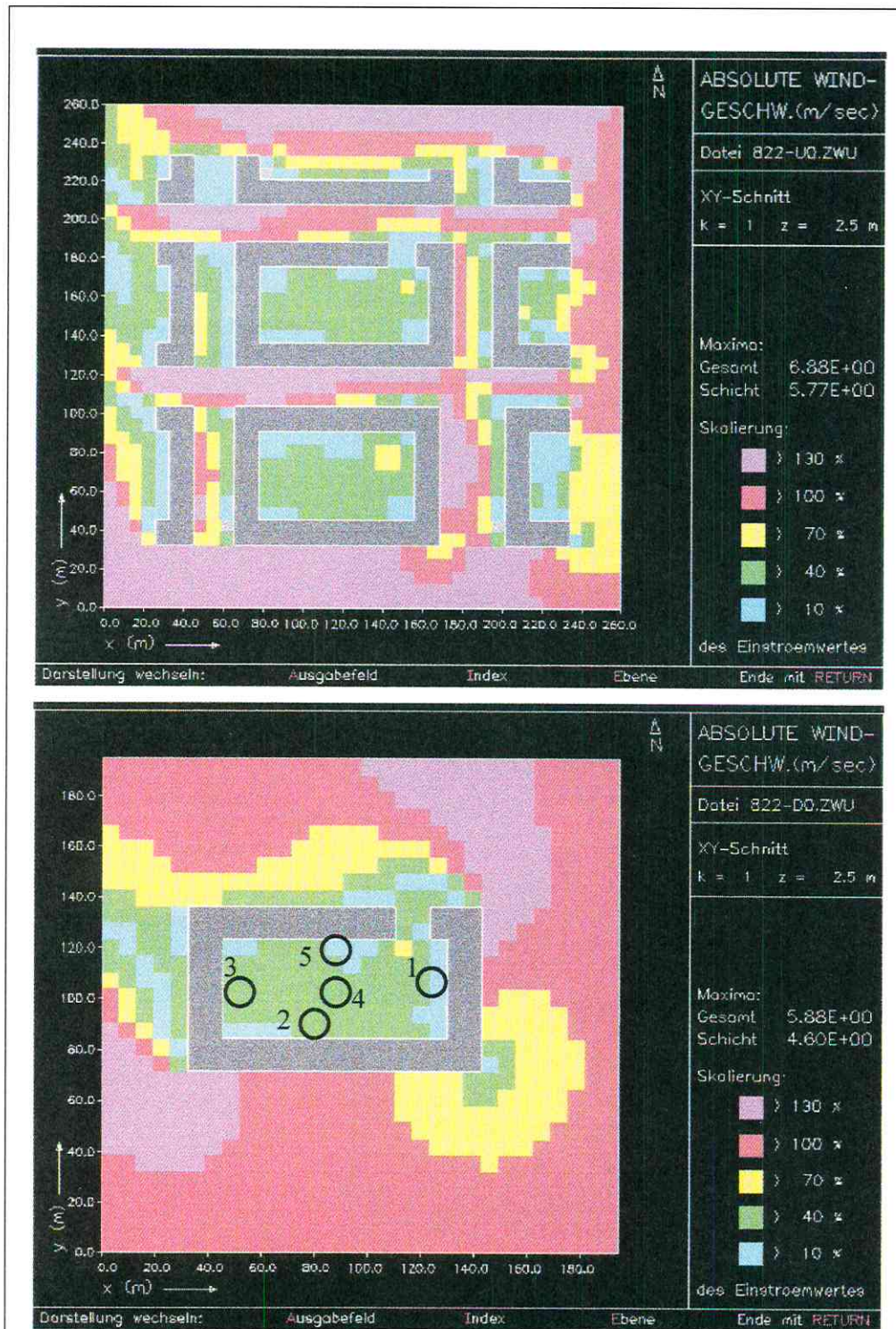


Abb. 50: Windgeschwindigkeit in % des Einstromwertes (Skalarfelder) für einen Innenhof einer Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarisdorf (Einstromgeschwindigkeit 3,5m/s; Einstrom-richtung 130°; MISKAM 3.4) (vgl. Anhang Karte 3 und Kap. 7, Abb. 40)

Meßpunkt	Mittelwert	Min.	Max.	Modellierung	Modellierung
	v in m/s (WR in °)	v in m/s (WR in °)	v in m/s (WR in °)	% des Einstromwertes (Input: 3,5 m/s aus 130°)	absolute v- Klassen in m/s
Umlandstation 10 m	3,6 (130°)	1,4 (98°)	5,5 (146°)		
Umlandstation 2.6 m	2,8	1,2	4,4		
Station Volkm.	1,2	0,3	1,8		
MP1	0,4	0,1	0,6	10 - 40	0,4 - 1,4
MP2	1,0	0,4	1,4	40 - 70	1,4 - 2,5
MP3	2,2	0,7	3,3	40 - 70	1,4 - 2,5
MP4	1,3	0,5	2,3	40 - 70	1,4 - 2,5
MP5	1,8	0,7	3,1	10 - 40	0,4 - 1,4

Tab. 13: Angaben über Windgeschwindigkeiten ausgewählter Klimastationen und Vergleich von Modellierung (MISKAM) und mobilen Messungen am 19.08.96 in einem Innenhof einer Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarisdorf (vgl. Anhang Karte 3; und Kap. 7.3.2 Abb. 40) (Alle Werte sind auf den Zeitraum von 7:00 Uhr bis 18:00 Uhr MEZ am 19.08.96 bezogen)

Im Vergleich zu den mobilen Messungen läßt sich allgemein eine relativ gute Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Größenklassen erkennen, wobei bei einzelnen Meßpunkten durchaus Abweichungen festzustellen sind (vgl. Abb. 40 in Kap. 7, Abb. 50 und Tab.13). Dies betrifft besonders Meßpunkt 5, der bei den mobilen Messungen zu den Bereichen mit verhältnismäßig hohen Windgeschwindigkeiten (im Mittel 1,8 m/s) zählt, während in der Windfeldberechnung die niedrigste Klasse (0,4-1,4 m/s) ermittelt wird. Genau umgekehrt ist es bei Meßpunkt 2, hier werden geringere Strömungsgeschwindigkeiten (im Mittel 1,0 m/s) gemessen, laut Modellierung wird aber die Klasse von 1,4-2,5 m/s erreicht. Bei beiden Meßpunkten ist anzumerken, daß sie in Bereichen liegen, wo beide Klassen eng beieinander liegen.

Anhand der Modellergebnisse zeigt sich, daß relativ geschlossene Innenhöfe, wie hier am Beispiel der gründerzeitlichen Blockrandbebauung, eine erhebliche Reduktion der Windgeschwindigkeit aufweisen. Gerade bei windschwachen Strahlungswetterlagen mit vorrangig östlichen Windrichtungen sind besonders die westorientierten Innenhofbereiche durch niedrigere Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet und weisen dadurch potentiell höhere PET-Werte auf. Eine dichte Bepflanzung mit Sträuchern, die zu einer zusätzlichen Strömungsreduktion beitragen, ist in den windschwachen Hofbereichen grundsätzlich zu

vermeiden. Die vorhandene, nach Norden orientierte Öffnung des Innenhofes hat bei dieser Anströmrichtung kaum Einfluß auf die Durchlüftung des Innenhofes.

Abschließend sei angemerkt, daß mit dem Strömungsmodell MISKAM schnell und mit geringem Aufwand Informationen zu den Strömungsverhältnissen in kleinräumigen Stadtstrukturen gewonnen werden, wobei zu beachten ist, daß die randlichen Bereiche der Modellebene nicht zur Auswertung herangezogen werden. Für die Interpretation der Ergebnisse unter human-biometeorologischen Aspekten, bietet sich eine Klassifizierung der Windgeschwindigkeit in % des Einstromwertes an. Anhand dieser Klassifizierung lassen sich Bereiche mit potentiell höheren PET-Werten ausweisen. Als Eingangsgrößen für die human-biometeorologische Modellierung sind diese Windklassen zwar geeignet, aber für eine genaue PET-Berechnung zu grob. Für eine PET-Abschätzung reichen die Windgeschwindigkeiten alleine wegen ihrer geringen Korrelation zu PET (vgl. Kap.7.1.2) nicht aus, hier ist die Kombination mit den Strahlungsbedingungen erforderlich.

8.3 Zusammenfassung

Wie aus den experimentellen Untersuchungen in Kapitel 7 hervorgegangen ist, sind für die mikroskalige Modellierung in kleinräumigen Stadtstrukturen besonders der Strahlungshaushalt und die Strömungsverhältnisse von Interesse. Für die Modellierung der kurzwelligen Einstrahlungsbedingungen kommt das Modell SHADOW (BRUSE 1995) und für die Windfeldberechnung das Modell MISKAM (EICHHORN 1989) zum Einsatz.

Bei den Modellergebnissen zeigt sich, sowohl am Beispiel der Großwohnsiedlung als auch am Beispiel der Gründerzeitlichen Blockrandbebauung, daß mit dem Modell SHADOW die Größenordnung der Globalstrahlung in Abhängigkeit der Gebäudestruktur und ihres Schattenwurfes flächendeckend berechnet werden kann, was auch durch den Vergleich mit den mobilen Untersuchungen bestätigt wird. Die große Variabilität kurzweilliger Einstrahlungsbedingungen, wie sie durch die Reflexion an Gebäudefassaden gegeben ist, kann über die Modellierung nicht erfaßt werden. Eine Abschätzung von PET-Werten ist nur unter Vorbehalt möglich, da zu viele Aspekte des Strahlungshaushaltes unberücksichtigt bleiben. Trotz der relativ generalisierten Information über die Strahlungsintensitäten, die mit dem

Strahlungshaushaltsmodell SHADOW gewonnen werden, lassen sich über die Darstellung der Schattengrenzen einstrahlungsintensive beziehungsweise einstrahlungsarme Bereiche räumlich sehr gut abgrenzen. Das Modell liefert dadurch wichtige Hinweise für die Gestaltung kleinräumiger Stadtstrukturen.

Die Windfeldberechnungen mit dem Modell MISKAM zeigen die räumliche Variabilität der Strömungsverhältnisse in kleinräumigen Stadtstrukturen. Am Untersuchungsbeispiel der Großwohnsiedlung ist zu sehen, daß durch die beidseitige Öffnung des Innenhofes die Durchlüftung zum großen Teil gewährleistet ist. Bei dem fast geschlossenen Innenhof der Gründerzeitlichen Blockrandbebauung ist die Windgeschwindigkeit im gesamten Hofbereich erheblich reduziert. Bei den Straßenschluchten wird die Abhängigkeit zur Einströmrichtung deutlich. Das Modell MISKAM eignet sich sehr gut zur Abgrenzung windintensiver und windschwacher Bereiche in Stadtstrukturen, was durch den Vergleich mit den mobilen Untersuchungen bestätigt wird. Eine Abschätzung von PET ist über die Windgeschwindigkeit alleine nicht möglich, die Modellergebnisse können demnach Hinweise zu Bereichen mit potentiell höheren PET-Werten liefern.

In der abschließenden Diskussion ist zu prüfen, welche Vor- und Nachteile experimentelle und modellhafte Methoden aufweisen, wie die Anwendbarkeit der Methoden unter stadtplanerischen Gesichtspunkten zu beurteilen ist, ob eine Übertragbarkeit auf andere Untersuchungsgebiete gegeben ist und welche stadtklimatischen Verbesserungspotentiale in kleinräumigen Stadtstrukturen von den ausgeführten Untersuchungen abgeleitet werden können.

9 Diskussion

In der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 (1998) „Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung, Teil 1: Klima“ werden Methoden zusammengefaßt, die es ermöglichen, durch einheitliche Bewertungsverfahren human-biometeorologische Belange in der Stadtplanung stärker zu berücksichtigen. Mit den in Kapitel 4.3 beschriebenen human-biometeorologischen Modellen, dem Münchener Energiebilanzmodell für Individuen (MEMI) und dem Klima-Michel-Modell (KMM), stehen Instrumentarien zur Verfügung, die es erlauben, unter stationären Bedingungen thermophysiological Bewertungen über die Kenngrößen PET (MEMI) und PMV (KMM) vorzunehmen (MAYER 1997).

Bei MERTENS (1997) wird darauf verwiesen, daß diese Richtlinie hinsichtlich ihres Anwendungsbezuges für stadtplanerische Fragestellungen noch Defizite aufweist, so sind zum Beispiel die Bewertungsmöglichkeiten komplexer Stadtstrukturen und ihrer meteorologischen Differenzierungen noch zu wenig eingearbeitet.

Unter stadtplanerischen Gesichtspunkten liegt das Problem weniger bei den in der Praxis bewährten human-biometeorologischen Modellen als vielmehr in der räumlichen Erfassung der meteorologischen Eingangsgrößen, die für eine thermophysiological Bewertung notwendig sind. Gerade für Stadtgebiete mit ihren vielfältigen mikroklimatischen Bedingungen erscheint dies besonders schwierig. In diesem Zusammenhang stellen sich die Fragen, welche Aussagekraft die eingesetzten Methoden zur Beschreibung mikroklimatischer Bedingungen in Stadtstrukturen haben, ob mit der Infrarotthermographie und den Modellen Informationen für eine human-biometeorologische Bewertung bereitstehen und inwieweit der Modelleinsatz die Messungen ersetzen kann. Dazu ist es notwendig, die Vor- und Nachteile der eingesetzten experimentellen (Messungen) und modellhaften Untersuchungsmethoden vergleichend zu diskutieren.

9.1 Bewertung experimenteller und modellhafter Untersuchungsmethoden

Wie in Kapitel 7 dargestellt, richtet sich bei human-biometeorologischen Untersuchungen das Augenmerk vorrangig auf die Erfassung von mittlerer Strahlungstemperatur und Windgeschwindigkeit, da diese beiden Kenngrößen innerhalb von Stadtstrukturen sehr variabel sind, während Lufttemperatur und Luftfeuchte kleinräumig eher als homogen mit nur geringen Differenzierungen einzustufen sind. Deshalb bezieht sich die folgende Diskussion hauptsächlich auf die experimentelle und modellhafte Erfassung des Strahlungshaushaltes und der Strömungsverhältnisse in Stadtstrukturen, wobei zu beachten ist, daß die bedeutendste, aber auch am schwierigsten zu erfassende Inputgröße für die human-biometeorologische Bewertung die mittlere Strahlungstemperatur ist (JENDRITZKY 1990).

Die in dieser Arbeit eingesetzte mobile Meßmethodik (nach HÖPPE 1992) mit integralen kurz- und langwelligen Strahlungsmessungen mittels drehbar angeordnetem Pyranometer und Pyrgeometer (vgl. Kap. 4.2.2.4) hat, wie die Untersuchungsergebnisse in Kap. 7 belegen, folgende Vorteile:

- Eine sehr gute Auflösung der einzelnen Strahlungsflüsse und daraus abgeleitet eine gute Bestimmungsmöglichkeit der mittleren Strahlungstemperatur ist gegeben.
- Durch gleichzeitige Messungen aller relevanten meteorologischen Kenngrößen ist eine relativ genaue standortbezogene Berechnung von PET möglich.
- Sämtliche Umgebungsbedingungen sind durch Messungen vor Ort berücksichtigt.

Als nachteilig sind bei den mobilen Messungen folgende Punkte anzusehen:

- Die Messungen sind sehr personal-, zeit- und materialaufwendig und deshalb mit hohen Kosten verbunden.
- Die Durchführbarkeit der Messungen im Rahmen dieser Fragestellung ist von Wetterlagen abhängig und dadurch zeitlich schwer zu planen.
- Aufgrund der Punktmessungen ist die räumliche Auflösung der Ergebnisse relativ gering.
- Durch die Messungen wird nur der Istzustand erfaßt, daher sind Prognosemöglichkeiten nur eingeschränkt möglich.

Die bodengestützte Infrarotthermographie als weitere meßtechnische Untersuchungsmöglichkeit zum terrestrischen Strahlungshaushalt liefert detaillierte Hinweise darüber, welche der Umgebungsflächen zu erhöhten langwelligen Strahlungsflüssen beitragen (WILMER 1986). Der große Vorteil der bodengestützten Infrarotthermographie liegt vor allem in der räumlichen Visualisierung der langwelligen Ausstrahlung. Besonders wichtig dabei ist, daß durch den bodengestützten Einsatz der Infrarottechnik die vertikalen Umgebungsflächen mit erfaßt werden und so eine dreidimensionale Betrachtung der langwelligen Strahlungsverhältnisse möglich ist (vgl. Abb. 32 in Kap. 7.2.2). Eine andere Variante sind luftgestützte Schrägaufnahmen, die zur besseren Auflösung aus geringer Höhe aufgenommen werden, wie sie beispielsweise durch VOOGT und OKE (1997) beschrieben werden. Der Vorteil bei dieser Vogelperspektive liegt in der zusätzlichen Erfassung des Dachniveaus, was allerdings mit einem viel höheren Aufwand durch den Einsatz eines Flugzeuges verbunden ist. Die bodengestützte Anwendung hingegen ist relativ unkompliziert anwendbar und trotzdem können alle Flächen, die für mikroklimatische Bedingungen in Bodennähe relevant sind, erfaßt werden. Bisher findet die Infrarottechnik hauptsächlich in Bereichen der Baukörperklimatologie bei Fragen der Wärmedämmung Anwendung. Das bedeutet, daß die Meßtechnik in vielen Ingenieurbüros vorhanden ist und problemlos auch für Untersuchungen bei sommerlicher Überwärmung von Stadtstrukturen eingesetzt werden kann. Eine grobe Abschätzung der mittleren Strahlungstemperatur anhand von Thermalbildern der Umgebungsflächen ist mit Einschränkungen möglich, wenn Stationswerte über kurzwellige Strahlung vorhanden sind und die Schattengrenzen ermittelt werden. Die kurzwelligen Reflexionen an den Umgebungsflächen kann mit diesem Ansatz nicht berücksichtigt werden (vgl. Kap. 7.2.2). Ebenso liefert die bodengestützte Infrarotthermographie Inputwerte, die für detaillierte Strahlungshaushaltsmodelle notwendig sind, wie zum Beispiel für das Strahlungshaushaltsmodell für Straßenschluchten von ARNFIELD (1992 und 1994). Fazit ist, daß es über die Infrarotthermographie relativ schnell möglich ist, räumliche Aussagen über die thermischen Bedingungen in Stadtstrukturen zu gewinnen und Bereiche mit starken Überwärmungen zu erkennen.

Die Modellierung und Berechnung einzelner Strahlungsflüsse in Stadtstrukturen ist durchaus machbar (VDI-Richtlinie 3789, Blatt 2 1994), allerdings beschränken sich diese eher auf einfache Geometrien (z.B. Straßenschluchtmodell ARNFIELD 1982). Eine Berücksichtigung

sämtlicher Umgebungsbedingungen ist auszuschließen. Darüber hinaus sind wegen der komplexen Berechnung der Strahlungsflüsse über Raumwinkelanteile ebenfalls nur Einzelfallberechnungen möglich (JENDRITZKY 1990), so daß der Vorteil gegenüber der Messung nicht unbedingt größer ist.

Die räumliche numerische Modellierungen der kurzwelligen Einstrahlungsbedingungen mit SHADOW (BRUSE 1995) und der Strömungsverhältnisse mit MISKAM (EICHHORN 1989) haben gegenüber den mobilen Untersuchungen folgende Vorteile:

- Die räumliche Auflösung der Ergebnisse ist auf eine mikroskalige Maßstabebene bezogen, aber durch die Eingabe der Modellebene innerhalb dieser Maßstabebene variabel wählbar, also für kleinräumige Untersuchungen in Stadtstrukturen geeignet.
- Beide Modelle sind benutzerfreundlich gestaltet, so daß für Personen, die mit den Modellen vertraut sind, die Bearbeitungszeiten nicht so aufwendig sind wie Messungen. Der Materialaufwand ist ebenfalls als wesentlich geringer einzustufen.
- Die Modellierungen sind grundsätzlich wetterunabhängig und damit jederzeit durchführbar.
- Durch entfernen oder hinzufügen von Bebauungsstrukturen können ohne größeren Aufwand Prognosesituationen analysiert werden.

Als nachteilig können bei den Modellergebnissen folgende Aspekte angeführt werden:

- Es werden nicht alle Umgebungsbedingungen berücksichtigt. So ist die Einbindung von Vegetationsstrukturen ist beiden Modellen nur sehr generalisiert möglich.
- In den Modellen sind nicht alle meteorologischen Effekte einbezogen, weshalb Details vernachlässigt werden. Bei der Strahlungshaushaltssimulation mit dem Modell SHADOW wird keine kurzwellige Reflexion von Hausfassaden erfaßt, ebenso fehlt die Berücksichtigung langwelliger Strahlungsflüsse. Bei der Windfeldberechnung mit dem Modell MISKAM werden zum Beispiel thermisch induzierte Strömungen vernachlässigt.
- Durch die Modellergebnisse ist keine exakte PET-Berechnung möglich, was vor allem an den zu ungenauen Angaben zu den Strahlungsflüssen liegt und deshalb die Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur über Modellergebnisse von SHADOW nicht ermöglicht.

Fehlerquellen existieren sowohl bei den experimentellen als auch bei den modellhaften Untersuchungsmethoden. Während bei den Messungen Meßfehler oder eine ungünstige Standortwahl Ursache für Fehlerquellen sein können, ist es bei der numerischen Modellierung möglich, daß fehlerhafte Inputvorgaben oder falsche Gebäudeprojektionen zu Fehlinterpretationen führen (vgl. RÖCKLE 1990).

Betrachtet man die aufgezählten Vor- und Nachteile, so wird deutlich, daß man unter wissenschaftlichen Aspekten weder den Messungen noch den Modellen den Vorzug geben sollte (vgl. RÖCKLE 1990). Eine sinnvolle mikrometeorologische Analyse kleinräumiger Stadtstrukturen erhält man am besten über ein Kombination aus beiden methodischen Ansätzen.

9.2 Anwendbarkeit der Methoden unter stadtplanerischen Gesichtspunkten

Bei stadtplanerischen Anwendungen steht weniger ein wissenschaftliches Interesse im Vordergrund, als vielmehr die Forderung möglichst schnell und ohne großen finanziellen Aufwand zuverlässige Informationen zu gewinnen, die eine Berücksichtigung stadtklimatischer Belange in der Stadtplanung und Stadtgestaltung ermöglichen. Sehr häufig ist das mit Fragestellungen über Prognosesituationen verbunden. Hier haben die Modellierungen gegenüber den Messungen, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, die wesentliche Vorteile. Aber nicht nur für den Prognosefall, sondern auch für die Analyse vorhandener Strukturen leisten die Modelle gute Dienste.

Mit Hilfe von SHADOW ist es ohne großen Aufwand möglich, über den Schattenwurf der Gebäude einstrahlungsintensive und einstrahlungsarme Bereiche auszuweisen. Die Modellergebnisse mit Informationen zu Schattenwurf und potentieller Sonnenscheindauer können beispielsweise aufzeigen, wo der Einsatz schattenspendender Vegetation sinnvoll ist und wo nicht.

Bezogen auf die Strömungsverhältnisse können mit MISKAM ohne zeitaufwendige Messungen Aussagen zu strömungsintensiven und windschwachen Bereichen in Stadtstrukturen gemacht werden. Dadurch lassen sich zum Beispiel Bereiche ausweisen, in denen zusätzliche Bebauung oder Großvegetation die Durchlüftung beeinträchtigen würde.

Obwohl alleine durch die eingesetzten Modelle keine genauen Aussagen über PET möglich sind, können die Modellergebnisse dazu beitragen Problembereiche mit potentiell hohen PET-Werten aufzuzeigen. Die Problembereiche, in denen Extremsituationen erwartet werden, können anschließend gezielt durch bodengestützte Infrarotthermographie und mobile Einzelfallmessungen analysiert werden. Dadurch kann der meßtechnische Aufwand bei der mikrometeorologischen Analyse von kleinräumigen Stadtstrukturen erheblich reduziert werden. Bevor aufwendige Meßkampagnen starten, kann mit Hilfe der Modelle eine sinnvolle Standortauswahl getroffen werden. Eine Kombination aus Messung und Modellierung ist daher auch unter stadtplanerischen Gesichtspunkten zu empfehlen.

9.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungsergebnisse über den Einfluß von technogenen und natürlichen Umgebungsflächen auf mikrometeorologische Bedingungen in Kapitel 7 haben sicherlich in Grundzügen allgemeingültigen Charakter, sofern man die Interpretation auf mitteleuropäische Städte und ähnliche Stadtstrukturen bezieht. Dies zeigt sich gleichfalls in der guten Übereinstimmung der eigenen Untersuchungsergebnisse mit Resultaten der Arbeit von MAYER und SUPPAN (1990) in München.

Eine uneingeschränkte Übertragung der Untersuchungsergebnisse ist dennoch nicht möglich, da Städte und ihre Strukturen viel zu komplex sind, als daß man sie unter meteorologischen Aspekten vereinheitlichen könnte (KATZSCHNER 1994). Sogar innerhalb des gleichen Strukturtyps, können die Unterschiede so groß sein, daß eine Übertragung der Ergebnisse unmöglich wird. Zu erwähnen sind hier die vielfältigen Innenhofstrukturen der gründerzeitlichen Bebauung. Hinzu kommen die relevanten lokalklimatischen Bedingungen und die Lage der Untersuchungsgebiete im Gefüge der Stadtstrukturen. Einzelfallanalysen sind deshalb in der Regel nicht zu umgehen. Die beschriebenen Untersuchungsmethoden sind selbstverständlich übertragbar und nicht auf einen speziellen Untersuchungsraum festgelegt.

9.4 Stadtklimatische Verbesserungspotentiale kleinräumiger Stadtstrukturen

Im folgenden Kapitel wird versucht, einige allgemeingültige Verbesserungsmöglichkeiten zu formulieren, wie sie aus den gezeigten Ergebnissen und Erfahrungen in der Literatur abgeleitet werden können. Beachtet werden muß, daß es sich dabei um allgemeine Betrachtungen handelt, die nicht explizit auf jeden Einzelfall zutreffen müssen.

Die Untersuchungen wurden entsprechend der Zielstellung (Kap. 2) für sommerliche Strahlungswetterlagen mit zu erwartenden höheren thermischen Belastungen in Stadtgebieten durchgeführt. Bei der Ableitung von Verbesserungsvorschlägen, die diesen Extremsituationen entgegenwirken können, sind aber grundsätzlich weitere ganzjährig aktuelle stadtklimatische Problemfelder wie beispielsweise ausreichende Lichtverhältnisse, passiver Energiegewinn im Winter, Lärmschutz und Lufthygiene zu berücksichtigen, um Konfliktsituationen zu vermeiden.

Die Ausführungen in diesem Kapitel beziehen sich auf die Maßstabsebene von Stadtstrukturen und Strukturelementen (vgl. Abb. 2), weshalb Verbesserungsmöglichkeiten, die das gesamte Stadtgebiet betreffen und regional-klimatischen Bezug haben, an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden. Was die gesamtstädtische stadtklimatologische Situation Leipzigs angeht, wird auf die Arbeiten der STADT LEIPZIG 1998 und MÜLLER 1995 verwiesen.

Um Mißverständnisse zu vermeiden, wird zu Beginn der Ausführungen darauf aufmerksam gemacht, daß in Stadtgebieten bei Strahlungswetterlagen zwar erhöhte thermische Belastungen auftreten können, aber grundsätzlich gilt, daß in städtischer Bebauung ganzjährig möglichst viel Sonne erwünscht ist. Es kann daher nicht sinnvoll sein, den maximalen Strahlungsumsatz durch enge und hohe Bebauung ins Dachniveau zu verlegen, um während kurzer aber oft temperaturintensiver Perioden mit sommerlichen Strahlungswetterlagen die PET-Werte gering zu halten, aber dafür in Kauf zu nehmen, daß ganzjährig in Bodenniveau große Areale durch Gebäudeschatten verdunkelt werden. Der Grundsatz muß deshalb lauten, daß im Winter möglichst gute Einstrahlungsbedingungen mit positiven bioklimatischen und energetischen Effekten und im Sommer partielle thermische Entlastung durch schattenspendende Vegetation und natürliche Oberflächen vorhanden sein soll. Welche Verbesserungsmöglichkeiten durch **Vegetationsstrukturen** möglich sind, wird im ersten Teil dieses Kapitels besprochen.

Bäume

Wie die Untersuchungen in Kapitel 7 belegen, können im Bereich schattenspendender Vegetation die PET-Werte in Bodenniveau (1,1 m) durchaus um etwa 10 K niedriger liegen. Ähnliche Untersuchungsergebnisse werden auch in Untersuchungen von HÖPPE und MAYER 1987 und MAYER 1993 publiziert. Hauptursache ist die Verlagerung des maximalen Energieumsatzes in den Kronenraum, was in Bodennähe räumlich begrenzt eine Reduktion kurzwelliger Strahlungsflüsse und damit einen geringeren langwelligen Strahlungsfluß von der Bodenoberfläche zur Folge hat. Während der Abendstunden verringert sich unterhalb des Kronenraumes die effektive Ausstrahlung an der Bodenoberfläche, wodurch die Abkühlung verzögert wird.

Der Einsatz von Bäumen als Steuerungsinstrument mikrometeorologischer Bedingungen ist vor allem dann sinnvoll, wenn es sich um Standorte handelt, an denen tagsüber durch Beschattung die PET-Werte gesenkt werden sollen und in den Abendstunden eine rasche Abkühlung nicht erwünscht ist, um eine mögliche Aufenthaltsdauer im Freien zu verlängern (LIEBER und SCHRÖDER 1982). Das Beispiel macht deutlich wie wichtig die Standortwahl bei Baumpflanzungen in Stadtstrukturen ist. Da Bäume viele weitere stadtoökologische Funktionen wahrnehmen, darf daraus unter keinen Umständen abgeleitet werden, daß alter Baumbestand entfernt werden soll, nur weil er aus mikroklimatischen Gesichtspunkten eher ungünstig steht.

Folgende Kriterien sollten allerdings bei Neuanpflanzungen Berücksichtigung finden:

- Es sollten nur sommergrüne möglichst einheimische Baumarten verwendet werden, um während der Wintermonate möglichst viel Sonne in Bodenniveau zu erhalten (passive Energienutzung).
- An Standorten, an denen zum größten Teil des Tages Gebäudeschatten vorherrscht, ist eine Anpflanzung von Bäumen wenig sinnvoll, da die Lichtverhältnisse und eventuell die Durchlüftung noch zusätzlich verschlechtert werden.
- In Bereichen mit geringer Durchlüftung sollten Bäume und vor allem Sträucher möglichst sparsam und wenn nur vereinzelt eingesetzt werden.

Wiesen- und Rasenflächen:

Die Bedeutung von Wiesen- und Rasenflächen darf nicht nur auf die nächtliche Kaltluftproduktion und ihre Reichweite in die Bebauung beschränkt bleiben. Auch tagsüber haben selbst kleine Rasenflächen gegenüber versiegelten Flächen bioklimatische Vorteile, die zwar räumlich eher begrenzt sind, aber doch zur Erholungsfunktion beitragen, wie die Untersuchungen in Kapitel 7 belegen. Über der Rasenflächen konnten bis zu 5 K geringere PET-Werte nachgewiesen werden als über Asphalt. Ursache hierfür ist sind die geringere Oberflächentemperaturen der verdunstungsaktiven Rasenfläche mit einem höheren Anteil an latenten Wärmeflüssen (vgl. Kap. 3.2.1). Das heißt auch kleinere Rasenflächen tragen zur thermischen Entlastung in Stadtstrukturen bei.

Die Standortfrage ist bei Rasenflächen und Wiesen weniger relevant als bei Großvegetation, da Rasenflächen weder die Durchlüftung noch die nächtliche Ausstrahlung verringern, also grundsätzlich erwünscht sind. Da Entsiegelungsmaßnahmen teuer und aufwendig sind, sollte im Vorfeld von Bebauungsvorhaben genau geprüft werden ob eine Vollversiegelung unbedingt erforderlich ist.

Fassadenbegrünung:

Ein weiteres Gestaltungskriterium für mikroklimatische Verbesserungen mit Hilfe von Vegetationsstrukturen ist die Fassadenbegrünung. Die stadtklimatische Bedeutung der vertikalen Umgebungsflächen wurde an den Untersuchungsbeispielen in Kapitel 7.2.2 eindeutig belegt. Eine sehr ausführliche Arbeit zu den mikroklimatischen Auswirkungen von Fassadenbegrünung ist bei (BARTFELDER und KÖHLER 1987) zu finden.

Unter human-biometeorologischen Aspekten sind für die positiven Auswirkungen von Fassadenbegrünung vorrangig die geringeren langwelligen Strahlungsflüsse während der Tagesmaxima (vgl. Infrarotbilder in Abb. 33 und 34 in Kapitel 7.2.2) ausschlaggebend. Vor einer begrünten Fassade ist damit zu rechnen, daß die PET-Werte zum Tagesmaximum etwa 2-3 K niedriger ausfallen. Eine so große Wirkung auf PET, wie sie durch Baumvegetation gegeben ist, wird durch begrünte Wände allerdings nicht erzielt.

Die Behinderung der Austauschbedingungen durch erhöhte Oberflächenrauigkeit dürfte eher gering sein (BARTFELDER und KÖHLER 1987), insbesondere weil die Fassadenbegrünung selten ganze Hausfronten einnimmt und meist auf Teilbereiche beschränkt bleibt, so daß es

gegen eine Begrünung von Wänden keine klimatischen Bedenken gibt. Aus thermophysiologischer Sicht sind vor allem süd- und westexponierte Fassaden für eine Begrünung geeignet. Große fensterlose Hausfronten eignen sich besonders gut zur Begrünung. Eine sehr gute Übersicht über die verschiedenen Möglichkeiten der Fassadenbegrünung und welche Pflanzenarten sich für welche Exposition eignen ist bei KRUPKA (1992) zu finden. Neben vielen anderen ökologischen Funktionen haben Fassadenbegrünungen noch wärmedämmende Wirkung und sind so ebenfalls für Winterzeiten geeignet, wobei in diesem Fall eher die Begrünung nordexponierter Wände zu empfehlen ist. Auch Dachbegrünungen haben wichtige ökologische und stadtklimatische Funktionen (KRUPKA 1992), so leisten sie sicherlich einen Beitrag zum Abbau der nächtlichen Wärmeinsel, ihr mikrometeorologischer Einfluß in Bodennähe dürfte allerdings eher gering sein und ist schwer nachzuweisen.

Weiterführend ist es wichtig, auf die Verbesserungspotentiale bestehender **Stadtstrukturen** einzugehen, wie sie vorrangig durch die physiognomischen Merkmale der einzelnen Strukturen abgeleitet werden können (vgl. BREUSTE 1996 und WICKOP et al. 1998). Jede Stadtstruktur verfügt über stadtklimatische Verbesserungspotentiale, die genutzt werden können, ohne die Funktion oder Eigenschaft der Struktur als solches zu verändern.

Eine sehr detaillierte und graphisch anschauliche Darstellung der mikroklimatischen Bedingungen verschiedener Stadtstrukturen in Abhängigkeit ihrer Bebauungsdichte ist in der Arbeit von KATZSCHNER 1994 zu finden.

Die **gründerzeitliche Block- und Blockrandbebauung** (siehe Anhang Karte 1 und 3) mit ihren engen Straßenschluchten und geschlossene Innenhöfen, die im Fall der reinen Blockbebauung auch im Innenhofbereich bebaut sind, können je nach Bebauungsdichte durch sehr hohe Versiegelungsgrade mit eingeschränkten Durchlüftungsverhältnissen gekennzeichnet sein (vgl. Kap.3.1). Die mikroklimatischen Bedingungen sind dabei hauptsächlich durch das Verhältnis zwischen Gebäudehöhe und Hofgröße, der Ausrichtung des Innenhofes und durch den Versiegelungsgrad bestimmt. Entsprechend groß ist die Variabilität an Innenhofsituationen. Es lassen sich daher nur allgemeingültige Anmerkungen machen, die Verbesserungspotentiale innerhalb dieses Strukturtypes aufzeigen.

- Bei sehr kleinen geschlossenen Innenhöfen (z.B. bei fast ganzjähriger und vollständiger Beschattung der Hofffläche durch die umliegenden Gebäude) sind die eingeschränkte Durchlüftung und ganzjährig geringe Sonneneinstrahlung die wesentlichen mikroklimatischen Probleme. Deshalb ist darauf zu achten, daß die Sonneneinstrahlung an der südexponierten Fassade ungehindert einfallen kann, um bei windschwachen Wetterlagen thermisch induzierte Luftbewegungen (Konvektion) zu fördern und einen Luftaustausch zu gewährleisten (SCHMALZ 1984; KATZSCHNER 1993). Eine Begrünung mit großkronigen Bäumen würde die Einstrahlungsbedingungen und Austauschmöglichkeiten zusätzlich behindern.
- Bei Innenhöfen mittlerer Größe (z.B. bei Sonnenhöchststand wird mehr als die Hälfte der Hofffläche besonnt, wie am Untersuchungsbeispiel des Innenhofes in Volkmarsdorf zu sehen ist (siehe Anhang, Karte 3)), kann es bei sommerlichen Strahlungswetterlagen zu größeren PET-Werten in den süd- und westexponierten Hofbereichen kommen. Vereinzelte Bäume können in diesen Bereichen für partielle Entlastung sorgen, eine größere Einschränkung der thermisch induzierten Luftbewegungen ist dadurch nicht zu erwarten. Im Bereich von Gebäudeschatten ist auf Großvegetation zu verzichten. Eine zu dichte Baumbepflanzung behindert zusätzlich die gewünschte nächtliche Abkühlung, die durch die relativ große Horizonteinengung der Gebäude schon stark eingeschränkt ist.
- Bei sehr großen Innenhöfen (Gebäudeschatten nimmt nur noch einen geringen Teil der Hofffläche ein, wie am Untersuchungsbeispiel der Meyerschen Häuser in Kleizschocher zu sehen (siehe Anhang, Karte 4)) wird der Anteil mikroklimatischer Einflüsse durch Gebäude geringer. In den süd- und westexponierten Hofbereichen sind kleinräumig höhere PET-Werte zu erwarten. Baumpflanzungen sind in diesem Teil der Innenhöfe zur Entlastung uneingeschränkt möglich. Eine zu dichte Bepflanzung mit geschlossenen Kronendächern trägt allerdings zu einer starken Verringerung der Windgeschwindigkeiten bei wie am Untersuchungsbeispiel zu sehen ist. Eine größere freie Rasenfläche in der Mitte der Innenhöfe fördert die nächtliche Abkühlung und sorgt zusammen mit den Bäumen für eine hohe Variabilität an Mikroklimaten (vgl. Kap.3., Definitionen Stadtklima)
- Grundsätzlich ist eine Entsiegelung von Innenhöfen unter stadtklimatischen Aspekten immer zu begrüßen, eine Neubebauung und Nachverdichtung bereits entkernter Innenhofbereiche sollte möglichst vermieden werden.

- In den engen Straßenschluchten der gründerzeitlichen Bebauung können auf den sonnenexponierten Straßenseiten hohe PET-Werte auftreten. Baumreihen mit größeren Abständen können hier für partielle Beschattung sorgen, allerdings ist bei Neuanpflanzung zu empfehlen, Straßenbäume nicht zu dicht an die Hausfassaden zu stellen, da sonst zwar die Hausfassade aber nicht der Gehsteig beschattet wird. Baumscheiben sind daher eher vor dem Gehsteig anzulegen (z.B. als Parkbuchtabgrenzung).

Die typische Anordnung von **Großwohnsiedlungen** (siehe Beispiel Anhang, Karte 2) sind geprägt durch große Innenhöfe und breite Straßenschluchten (vgl. Kap.3.1). Die Innenhofgestaltung ist im Normalfall recht homogen und meist auf einfaches Abstandsgrün reduziert. Ein alter Baumbestand wie in der gründerzeitlichen Bebauung ist in der Regel nicht anzutreffen. Trotzdem kann je nach Bauzeitpunkt eine unterschiedliche Grünausstattung vorhanden sein. Allgemein lassen sich zu den Verbesserungspotentialen folgende Anmerkungen machen:

- Dadurch, daß die Innenhöfe und Straßenschluchten der Großwohnsiedlungen weiträumiger angelegt sind, ist die Variabilität an Innenhofformen geringer als bei der gründerzeitlichen Blockbebauung. Kleine ganztägig und vollständig beschattete Hofflächen sind nicht anzutreffen. Die süd- und westexponierten Hofbereiche können deshalb ohne größere Probleme durch einzeln stehende Bäume bepflanzt werden, was zu einer Auflockerung der homogenen Abstandsgrüngestaltung und zur thermischen Ausgleichswirkung beitragen könnte. Eine starke Reduzierung der Durchlüftung ist bei Einzelbäumen nicht zu erwarten, da die meisten Innenhöfe der Großwohnsiedlung nicht vollständig geschlossen sind und dadurch eine Durchströmung unterstützt wird. Die Bereiche der Gebäudeecken sollten von Großvegetation ausgenommen werden.
- An den Durchgängen zwischen den Gebäude kann es zu Düseneffekten mit erhöhten Windgeschwindigkeiten kommen. Eine Entschärfung der Situation durch Vegetationsstrukturen ist, wenn möglich, durch Einzelfallanalysen zu überprüfen, um nicht die Durchlüftung ganzer Hofbereiche zu beeinträchtigen.
- Die fensterlosen Stirnseiten der Plattenbauten eignen sich sehr gut für eine Fassadenbegrünung, was sicher nicht nur zu einer mikroklimatischen, sondern auch zu einer optischen Aufwertung beitragen würde.

- Fast alle Parkplätze im Untersuchungsgebiet sind vollversiegelt, wobei Rasengittersteine in vielen Bereichen durchaus ausreichend wären. Der fühlbare Wärmestrom könnte so zu Gunsten des latenten Wärmestromes verringert werden. Wie aus dem Beispiel des CIR-Luftbild 2 im Anhang zu sehen ist, gibt es sehr lange Parkplatzreihen ohne eine Auflockerung durch Vegetationsstrukturen. Wenn nur jeder zwanzigste Parkplatz für eine Baumanpflanzung zur Verfügung gestellt würde, könnte sowohl auf den Parkplätzen als auch auf den Fußwegen eine thermische Ausgleichswirkung erzielt werden.
- Eine Nachverdichtung innerhalb der Großwohnsiedlung ist zu vermeiden.

Unter den Wohngebieten sind die Strukturen der Einzelhaus- und Villenbebauungen, durch ihren relativen geringen Versiegelungsgrad aus stadtklimatischer Sicht sicher am problemlosesten. Eine detaillierte Untersuchung wurde aus diesem Grund für diese Stadtstrukturen nicht durchgeführt. Dies bedeutet nicht, daß Einzelhausbebauung in Stadtgebieten als Lösung für stadtklimatische Probleme anzusehen ist. Die Flächeninanspruchnahme pro Person ist bei dieser Bebauungsstruktur weitaus am größten. Vor allem bei Neuausweisung von Baugebieten im Stadtrandbereich kann es zur Beeinträchtigung klimatischer Ausgleichsflächen kommen.

Die stadtklimatische Bedeutung von städtischen **Parkanlagen** und Grünflächen sind in der Literatur vielfach beschrieben worden (z.B. STÜLPNAGEL 1987; HORBERT 1992). Wie schon bei den Rasenflächen angesprochen, darf bei innerstädtischen Parkanlagen und Grünflächen die stadtklimatologische Wirkung nicht nur auf die Reichweite nächtlicher Kaltluftproduktion bezogen werden, sondern es muß zusätzlich auch die Erholungsfunktion während der Tagesstunden Berücksichtigung finden.

Obwohl größere unversiegelte Freiflächen, bedingt durch ihre geringe Horizonteinschränkung, während der Tagesstunden sogar höhere PET-Werte aufweisen können als Bebauungsstrukturen (vgl. Kap. 7.3.3), zeichnen sie sich durch ihre höheren nächtlichen Abkühlungsraten aus. Einzelbäume und Baumgruppen hingegen sorgen während der Tagesstunden für eine ausgleichende thermische Wirkung. Daraus läßt sich für die Gestaltung von Parkanlagen ableiten, daß eine Kombination aus größeren Freiflächen, gemischt mit kleineren Baumgruppen und Einzelbäumen unter stadtklimatischen Aspekten als sehr günstig

anzusehen ist (KIESE 1995; HORBERT 1993). Städtische Wälder tragen zu einem wichtigen thermischen Temperatenausgleich bei (vgl. Kap. 6 und 7.2.3), allerdings sollte beachtet werden, daß geschlossene Kronendächer nicht für kleinere Freiflächen, die von Baukörperstrukturen umgeben sind, geeignet sind. Dadurch würde sowohl die Durchlüftung als auch die nächtliche Abkühlung beeinträchtigt.

Abschließend bleibt anzumerken, daß bestehende Grünstrukturen zu bewahren und die Schaffung neuer Grünräume zu fördern ist, wobei die kleinräumige Wirkung von Vegetationsstrukturen nicht außer Acht gelassen werden darf, da diese ein erhebliches Potential an stadtklimatischen Verbesserungsmöglichkeiten beinhalten, wie die vorliegenden Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit zeigen.

10 Schlußbetrachtung

Die mikrometeorologischen Bedingungen in Stadtstrukturen sind so komplex und vielfältig, daß eine Erfassung über meßtechnische Untersuchungsmethoden immer auf Einzelfallanalysen beschränkt bleiben wird. Zwar liefern die Messungen vor Ort die detaillierteren und den Umgebungsbedingungen am besten angepaßten Ergebnisse, sind in ihrer räumlichen Differenzierung aber eingeschränkt und immer mit hohem Zeitaufwand verbunden. Wie die Messungen gezeigt haben, sind relative Luftfeuchte und Dampfdruck innerhalb der Stadtstrukturen recht einheitlich, so daß in diesem Fall Stationswerte ausreichen und mobile Messungen kleinräumig nicht zwingend erforderlich sind. Wesentlich schwieriger zu erfassen sind die Strömungsverhältnisse und Strahlungshaushaltskomponenten. Hinsichtlich ihrer Variabilität kommt ihnen in der mikroklimatischen Analyse von Stadtstrukturen aber die größere Bedeutung zu.

Die Thermalbildaufnahmen und die mikroskaligen Modellierungen zu Windfeld und kurzweiliger Einstrahlung liefern mit relativ geringem Aufwand Informationen, die Rückschlüsse auf human-biometeorologische Fragestellungen zulassen. Durch den Einsatz dieser Methoden kann der meßtechnische Aufwand erheblich reduziert werden, was letztendlich auch zu einer höheren Akzeptanz bei Umweltbehörden und Planungsbüros beiträgt.

Die Anpassung des Untersuchungskonzeptes an eine räumliche Gliederung nach physiognomischen Stadtstrukturtypen hat sich als vorteilhaft erwiesen. Eine rein nutzungsbezogene Betrachtung reicht für stadtklimatische Analysen nicht aus.

Was innerhalb dieser Arbeit aus Kapazitätsgründen nicht geleistet werden konnte, aber durchaus wünschenswert und effizient wäre, ist die stärkere Verknüpfung stadtklimatischer Themenstellungen, die kleinräumige Maßstabebenen (Stadtstrukturen) betreffen. Eine Gesamtbetrachtung von passiver Energienutzung, Lichtverhältnissen, Lärmbeeinträchtigungen sowie thermischen und lufthygienischen Aspekten könnte dazu beitragen, mikroklimatische Beziehungen stärker aufeinander abzustimmen. Die Schaffung von fächerübergreifenden Projektgruppen ist für diese komplexe Aufgabenstellung empfehlenswert. Viele der Fragestellungen lassen sich methodisch verknüpfen, da sie vielfach auf die gleichen meteorologischen Informationen wie Einstrahlungsbedingungen oder Strömungsverhältnisse angewiesen und immer an die Physiognomie der Stadtstruktur gebunden sind.

Abschließend bleibt nur auf die Notwendigkeit stadtklimatologischer Belange hinzuweisen. Es ist ein Unterschied, ob man in einer schlecht durchlüfteten, stickigen und überwärmten Betonwüste oder einem mit bedacht gestaltetem Umfeld lebt, das sich durch eine sinnvolle Kombination aus Vegetations- und Bebauungsstrukturen hervorhebt, und so für ein abwechslungsreiches nebeneinander von mikroklimatischen Bedingungen sorgt. Die Stadtklimatologie leistet wie viele andere stadtoökologische Arbeitsfelder einen wichtigen Beitrag zur Gestaltung „lebensfreundlicher“ Städte.

11 Zusammenfassung / Summary

Ziel der Arbeit ist es, die räumliche und zeitliche Variabilität mikrometeorologischer Bedingungen in verschiedenen gestalteten Stadtstrukturen in der Stadt Leipzig zu untersuchen und unter human-biometeorologischen Aspekten zu bewerten. Die Untersuchungsschwerpunkte beziehen sich auf den thermischen Wirkungskomplex während sommerlichen Strahlungswetterlagen, um Extremsituationen thermischer Wärmebelastung in Siedlungsräumen zu erfassen.

Neben kontinuierlichen Klimamessungen an 5 Referenzstandorten werden vor allem kleinräumig mobile Messungen durchgeführt, wobei alle für den Wärme- und Energiehaushalt des Menschen wichtigen meteorologischen Kenngrößen wie Lufttemperatur, Dampfdruck, Windgeschwindigkeit und mittlere Strahlungstemperatur erfaßt werden. Zusätzlich wird bodengestützte Infrarotthermographie eingesetzt, um den Einfluß vertikaler und horizontaler Umgebungsflächen auf den langwelligen Strahlungshaushalt zu zeigen. Zur human-biometeorologischen Bewertung des thermischen Wirkungskomplexes werden die Methoden der VDI-Richtlinie 3787 Blatt 2 1998 (Teil 1 Klima) verwendet.

Die ausgewählten Untersuchungsgebiete liegen in Stadtstrukturen, die für das Stadtbild von Leipzig typisch sind, gezeigt werden Untersuchungsbeispiele innerhalb einer gründerzeitlichen Blockbebauung, einer Großwohnsiedlung und einer städtischen Parkanlage. Die mobilen Untersuchungen fanden in den Sommermonaten 1996 und 1997 statt.

Bei der human-biometeorologischen Bewertung ist eine hohe Dominanz des kurz- und langwelligen Strahlungshaushaltes und daraus abgeleitet der mittleren Strahlungstemperatur zu erkennen. Bezüglich der Variabilität meteorologischer Kenngrößen in den untersuchten Stadtstrukturen wurde deutlich, daß selbst bei autochtonen Wetterlagen während der Tagesstunden die Lufttemperatur und der Dampfdruck kleinräumig relativ homogen verteilt sind. Windgeschwindigkeit und mittlere Strahlungstemperatur hingegen sind in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen durch eine große Differenzierung gekennzeichnet. In den bebauten Strukturen besonders vor süd- und westexponierten Hausfronten hohe PET-Werte ermittelt, was die stadtklimatische Bedeutung von vertikalen Umgebungsflächen unterstreicht.

Mit Hilfe der Infrarotaufnahmen wird eine Visualisierung der horizontalen und vertikalen Oberflächenstrahlungstemperaturen möglich. Es können relativ schnell und unkompliziert räumliche Aussagen über die thermischen Bedingungen in Stadtstrukturen gewonnen und Bereiche mit starken Überwärmungen und erwartungsgemäß hohen PET-Werten erkannt werden.

Für die räumliche Betrachtung von Windfeld und Strahlungshaushalt bietet sich die Unterstützung numerischer Modelle an. Eine flächendeckende Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur ist wegen der Komplexität der Strahlungsflüsse schwer möglich und bleibt ebenfalls auf Einzelsituationen beschränkt. Als Indikator wird deshalb die kurzwellige Einstrahlung mit dem Modell SHADOW simuliert. Für die Windfeldberechnung steht das Modell MISKAM zur Verfügung.

Obwohl alleine durch die eingesetzten Modelle keine genauen Berechnungen von PET möglich sind, können die Modellergebnisse dazu beitragen, Problembereiche mit potentiell hohen PET-Werten aufzuzeigen, und machen so deutlich, wo der Einsatz klimatischer Ausgleichsmaßnahmen erforderlich sein kann. Dadurch läßt sich der Meßaufwand bei der human-biometeorologischen Analyse kleinräumiger Stadtstrukturen erheblich reduzieren. Bevor aufwendige Meßkampagnen starten, kann mit Hilfe der Modelle eine sinnvolle Standortauswahl getroffen werden. Eine Kombination aus Modellierung und Messung ist deshalb zu empfehlen.

Wie die vorliegende Arbeit gezeigt hat, darf man die kleinräumige Wirkung von Vegetationsstrukturen nicht außer Acht lassen, da diese ein erhebliches Potential an stadtklimatischen Verbesserungsmöglichkeiten beinhalten. Der Grundsatz muß deshalb lauten, daß während der Wintermonate möglichst gute Einstrahlungsbedingungen mit positiven bioklimatischen und energetischen Effekten erwünscht sind, in den Sommermonaten aber durch schattenspendende Vegetation und natürliche Oberflächen ein thermischer Ausgleich vorhanden sein sollte.

Summary

The aim of the project is to investigate the spatial and temporal variability of micro-meteorological conditions in urban areas with different structural compositions in Leipzig and to evaluate these from the human-biometeorological point of view. The investigations chiefly focus on the complex of thermal effects during clear summer sky conditions in order to record extreme situations of heat stress.

In addition to continuous climatic measurements at 5 reference locations, small scale mobile measurements were carried out. The important meteorological parameters which are relevant for the heat balance of humans, such as air temperature, vapour pressure, wind velocity and mean radiation temperature, were recorded. Ground-based infrared-thermography was used to show the influence of surrounding horizontal and vertical structures on the longwave radiation fluxes. The methods of the VDI-Guideline 3787 Page 2 1998 (part 1) were used for the human-biometeorological assessment.

The study areas are situated in typical urban structures of Leipzig. Examples are given here of measurements in large slab construction housing estate, old apartment buildings and an urban park. The investigations took place in the summer months of 1996 and 1997.

A high dominance of the short- and longwave radiant budget and the related mean radiation temperature is found in the human-biometeorological assessment. The variability of the meteorological parameters within the investigated urban structures shows that the air temperature and the vapour pressure are relatively homogenous during the daytime but wind velocity and mean radiation temperature are found to have a high variability correlating to the surrounding area. High PET-values were measured in front of south and west exposed house facades which emphasises the important influence of vertical surrounding areas on the urban climate.

A visual documentation of the horizontal and vertical surface radiation temperature is possible with the help of infrared thermography, this provides a relatively simple method to show areas where high PET values can be expected.

Numerical models are useful for the spatial examination of the wind field and radiation budget. A complete area cover of the mean radiation temperature is difficult due to the complexity of the radiation fluxes thus this remains restricted to single situations. The short wave radiation is simulated using the model SHADOW and thus can be used to indicate the mean radiation temperature. The model MISKAM can be used for the calculation of the wind field.

Although an exact calculation of PET is not possible with the applied model alone, the results of the modelling can help to show areas with potentially high PET-values and thus where climatic compensations measures are necessary. In this way the work involved in the measurement of human-biometeorological analysis in small urban structures is greatly reduced. The models can be used to select study areas before commencing with the field observations, a combination of modelling and measuring is recommended.

The presented work shows that the microclimatic effect of vegetation structures in small areas should not be neglected since this has a considerable potential for the improvement of the urban climate. In principle, during the winter months good incoming radiation conditions with positive bioclimatic and passive energetic effects are required whereas in the summer months a thermal compensation through shade-providing vegetation and natural ground cover is necessary.

LITERATURVERZEICHNIS

- ALEXANDER, J.** (1992): Die Rolle der Biometeorologie bei Umweltverträglichkeitsprüfungen. *Annalen der Meteorologie* 28 Internationale Tagung für Human-Biometeorologie vom 16.-18.10.92 in Freiburg. H. 28; S.3-5.
- ARNFIELD, A.J.** (1982): An approach to the estimation of the Surface Radiative Properties and Radiation Budgets of cities. *Physical Geography*. Bd. 3. H. 2, S. 97-122.
- ARNFIELD, A.J.; MILLS, G.M.** (1994): An analysis of the circulation characteristics and energy budget of a dry, asymmetric, east-west urban canyon. II. Energy budget. *International Journal of Climatology* 14, S. 239-261.
- AULICIEMS, A.; DE DEAR, R.** (1998): Thermal Adaption and Variable Indoor Climate Control. In: *Bioclimatology 5 - Human Bioclimatology*. Berlin, Springer-Verlag.
- BALTRUSCH, M.; SCHÜTZ, G.** (1988): in: *Stadtklima und Luftreinhaltung*, Hrsg. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Berlin, Springer-Verlag
- BANZHAF, E.** (1994): Die Regionalisierung der Wärmebelastung in Mainfranken anhand von Geofaktoren. Dissertation Universität Freiburg i. Br.
- BARLAG, A.-B.** (1993): Planungsrelevante Klimaaanalyse einer Industriestadt in Tallage. Dissertation Universität Essen.
- BARLAG, A.-B.** (1997): Möglichkeiten der Einflußnahme auf das Stadtklima. VDI-Bericht Nr 1330, S. 127-146.
- BARLAG, A.-B.; KUTTLER, W.** (1991): The significance of country breezes for urban planning. *Energy and Buildings*. H. 15/16, S. 291-297.
- BARTELS, H.** (1980): *Klimatologie der Ausbreitungsverhältnisse*. Promet. Jg. 10. H. 3, S.7-12.
- BARTFELDER, F.; KÖHLER, M.** (1987): Experimentelle Untersuchungen zur Funktion von Fassadenbegrünungen. Fachbereich 14 Landschaftsentwicklung der TU Berlin.
- BARUCH, G.** (1992): Comfort, climate analyses and building design guidless. *Energy and Buildings*. H. 18, S.11-23.
- BAUER, B.** (1998): Mikrometeorologische Untersuchung und humanbiometeorologische Bewertung kleinräumiger Stadtstrukturen. *Meteorolog. Zeitschrift*. N.F. 7, S. 36-40.
- BAUMÜLLER, J. et al.** (1992): Klimauntersuchung des Nachbarschaftsverbandes Stuttgart. In: *Klimaatlas Stuttgart*.
- BAUMÜLLER, J.; HOFFMANN, U.** (1993): in: *Lufthygiene und Klima*, Hrsg: VDI-Kommission Reinhaltung Der Luft, Düsseldorf, VDI-Verlag.
- BAUMÜLLER, J.; HOFFMANN, U.; REUTER, U.** (1993): Städtebauliche Klimafibel. Stuttgart, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg.
- BECKRÖGE, W.** (1990): in: *Stadtklima und Luftreinhaltung*, Hrsg. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Berlin, Springer-Verlag

- BECKRÖGE, W.** (1990): Dreidimensionaler Aufbau der städtischen Wärmeinsel am Beispiel der Stadt Dortmund. Materialien zur Raumordnung. S.1-239.
- BREUCKMANN, B.** (1993): Bildverarbeitung und optische Messtechnik in der industriellen Praxis. München, Franzis-Verlag GmbH.
- BREUSTE, J.** (1994): Ökologische Aspekte der Stadtentwicklung Leipzigs. Geographische Rundschau. Jg. 46. H. 9, S.508-514.
- BREUSTE, J. et al.** (1996): Stadtökologie und Stadtentwicklung: Das Beispiel Leipzig. Berlin, Analytica Verlagsgesellschaft.
- BROWN, R.D.; GILLESPIE, T.J.** (1995): Microclimate Landscape Design. New York. JohnWiley & Sons, Inc.
- BRÜNDL, W.; MAYER, H.; BAUMGARTNER, A.** (1987): Abschlußbericht zum Teilprogramm „Klimamessungen München“ von STADTKLIMA BAYERN. StMLU-Materialien 43.
- BRUSE, M.** (1995): Handbuch „Shadow“ Version 2.1. Universität Bochum.
- BRUSE, M.** (1997): Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen kleinräumiger Umweltgestaltung und dem Mikroklima. Berichte aus der AG Klimaforschung. Universität Bochum. S.1-35.
- BRUSE, M.** (1998): „ENVI-met 1.0“ Basic Instructions and Technical Reference. Universität Bochum.
- DANZEISEN, H.H.** (1983): Experimentelle Untersuchung bodennaher Lufttemperatur- und Feuchteverteilungen in Stadtgebieten mit Hilfe eines Meßwagens. Beiträge Landespflege Rheinland-Pfalz. Bd. 9, S.7-34.
- DAUNKE, R.** (1997): Untersuchungen und Modellierung des Stadtklimas einer Großstadt am Beispiel von Leipzig. Institut für Meteorologie der Universität Leipzig. (unveröffentlichter Projektbericht)
- DEUTSCHER WETTERDIENST** (1996): Monatliche Witterungsberichte 01/96-12/96. Offenbach.
- DEUTSCHER WETTERDIENST** (1997): Monatliche Witterungsberichte 01/97-12/97. Offenbach.
- DOSCH, F.** (1993): Geographische Informationssysteme in der kommunalen Planungspraxis am Beispiel einer stadtklimatologischen Raumanalyse und Raumbewertung. Dissertation Universität Mainz.
- EICHHORN, J.** (1989): Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Klimamodells. Dissertation Universität Mainz.
- ELIASSON, I.** (1992): Infrared thermography and urban patterns. International Journal of Remote Sensing. Bd. 13. H. 5, S.869-879.
- ELIASSON, I.** (1993): Urban Climate Related to Street Geometry. University of Gothenburg, Department of Physical Geography.

- ERIKSEN, W.** (1978): Klimatologisch-ökologische Aspekte der Umweltbelastung Hannovers - Stadtklima und Luftverunreinigung. Hannover und sein Umland. Geographische Gesellschaft zu Hannover. S.251-273.
- FANENBRUCK, O.** (1996): Die humanbiometeorologische Bewertung der Thermophysiologischen Komponente des Stadtklimas am Beispiel von Leipzig. Institut für Meteorologie der Universität Leipzig. (unveröffentlichter Projektbericht)
- FANGER, P.O.** (1972): Thermal Comfort. Analysis and applications in Environmental Analysis. New York, McGraw-Hill. S.244ff.
- FEZER, F.** (1975): Lokalklimatologische Interpretation von Thermalluftbildern. Bildmessung u. Luftbildw., Karlsruhe, 43: S.152-158.
- GEHRKE, A.; NÜBLER, W.; WEISCHET, W.** (1977): Oberflächen- und Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Baukörperstruktur (Beispiel Freiburg i. Br.). Annalen Meteor. N.F. 12, S.193-196.
- GEIGER, R.** (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig, Vieweg Verlag.
- GEROLD, G.** (1989): Immissionsbelastung in der Stadt und Stoffumsatz in einem innerstädtischen Waldbiotop. Landschaft und Stadt. Bd. 22/3, S.115-119.
- GERTIS, K.; WOLFSEHER, U.** (1977): Veränderungen des thermischen Mikroklimas durch Bebauung. Gesundheits-Ingenieur. Bd. 98. H. 1/2, S.1-10.
- GRÄTZ, A.; JENDRITZKY, G.** (1995): Preliminary Climatic Study of the Karlsruhe Area Part 1 - UBKLIM, A tool for Climatologically-Related Planning in Urban Environment. Zentrale Medizin-meteorologische Forschungsstelle Freiburg. Wissenschaftliche Berichte FZKA 5579. Forschungszentrum Karlsruhe.
- GRUNDMANN, L.; TSCHASCHEL, S.; WOLLKOPF, M.** (1996): Leipzig-Ein Geographischer Führer durch Stadt und Umland. Leipzig, Institut für Länderkunde.
- HELBIG, A.** (1987): Beiträge zur Meteorologie der Stadtatmosphäre. In: Abhandlungen des meteorologischen Dienstes der DDR Nr. 137.
- HOLMER, B.** (1992): A simple operative method for determination of sky view factor in complex urban canyons from fisheye photographs. Meteorologische Zeitschrift. N.F. 1. H. Oktober/92, S.236-239.
- HÖPPE, P.** (1984): Die Energiebilanz des Menschen. Münchner Universitätsschriften - Wissenschaftliche Mitteilungen. Nr. 49.
- HÖPPE, P.** (1985): Anwendungsmöglichkeiten eines instationären Energiebilanzmodells zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit. Annalen der Meteorologie. Bd. 22, S.17-18.
- HÖPPE, P.** (1992): Ein neues Verfahren zur Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur im Freien. Sonderdruck aus Wetter und Leben. Bd. 44. H. 1-3, S.147-151.
- HÖPPE, P.** (1993): Heat balance modelling. Experientia. Bd. 49, S.741-746.
- HÖPPE, P.** (1995): Der Mensch im Mittelpunkt des Interesses - Trends in der Human-Biometeorologie. Sonderdruck Wetter und Leben. Bd. 47. H. 2-4; S.215-223.
- HÖPPE, P.; MAYER, H.** (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. In: Landschaft und Stadt. H. 19, S.22-30.

- HORBERT, M.** (1992): Das Stadtklima. Schriftenreihe des Deutschen Rates für Landespflege. H. 61, S.64-73.
- HORBERT, M.** (1993): Freiraumplanung in hochverdichteten älteren Wohngebieten (Berlin). In: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI (hrsg.) Lufthygiene und Jklima, S. 187-201, VDI-Verlag, Düsseldorf
- HÖSCHELE, K.** (1992): Planning applications of urban and building climatology. Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung der Universität Karlsruhe.Bd. 16. H. März/92, S.1-180.
- JENDRITZKY, G.** (1991): Zur räumlichen Darstellung der thermischen Umgebungsbedingungen des Menschen in der Stadt. In: Freiburger Geographische Hefte. H. 32, S.1-18.
- JENDRITZKY, G.** (1993): Das Bioklima als Gesundheitsfaktor. Geographische Rundschau. Bd. 45. H. 2, S.107-114.
- JENDRITZKY, G. et al.** (1990): Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen. Hannover, Verlag der ARL.
- JENDRITZKY, G.; SÖNNING, W.; SWANTES, H.-J.** (1979):Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung. Beiträge Akademie für Raumforschung und Landesplanung. Hannover.
- KAMINSKE, V.** (1984): Bioklimatisch orientierte Stadtplanung und der Nutzwert einzelner Maßnahmen - Das Beispiel der Stadt Karlsruhe. Raumforschung und Raumordnung. Bd 42. H. 4/5, S.200-208.
- KATZSCHNER, L.** (1993): Klimatische Wirkung des Stadtgrüns. Naturschutz in Kassel. H. 8, S.4-8.
- KATZSCHNER, L.** (1994): Stadtklima und städtebauliche Struktur. Dissertation Universität Kassel.
- KATZSCHNER, L.** (1998): Designation of urban climate qualities and their implementation in the planning process. Environmentally Friendly Cities. H. 6, S.75-78.
- KERSCHGENS, M. J.** (1987): Die Energetik der Stadt. Berlin, Dümmlers Verlag.
- KERSCHGENS, M.J.** (1988): Praktische Anwendungen von Stadtklimamodellen. Fachtagung Umweltmeteorologie Wissenschaftlich Mitteilungen. H. 61, S.57-64.
- KIESE, O.** (1995): Die bioklimatische Funktion innerstädtischer, insbesondere baumbestander Grünflächen. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie. Jg. 24, S.395-401.
- KOTZ, A.** (1984): Humanbiometeorologische Bewertung des thermischen Milieus innerhalb verschiedener Stadtstrukturen. Ludwig - Maximilians - Universität München. S.1-131.
- KUTTLER, W.** (1985): Stadtklima. Geographische Rundschau. Bd 37. H. 5, S.226-233.
- KUTTLER, W.** (1988): Spatial and temporal structures of the urban climate - a survey. Environmental Meteorology. S.305-333.

- KUTTLER, W.** (1991): Zur Anwendung von Windkanaluntersuchungen bei der Lösung immissionsklimatischer Probleme in Stadtgebieten. Beiträge zur regionalen und angewandten Klimatologie 32, S. 55-70.
- KUTTLER, W.** (1993a): Planungsorientierte Stadtklimatologie. Geographische Rundschau. Jg. 45. H. 2, S.95-106.
- KUTTLER, W.** (1993b): Stadtklima. in: Stadtökologie. (Hrsg.: H. Sukopp & R. Wittig) S.113-153.
- KUTTLER, W.** (1997): Städtische Klimamodifikation. VDI-Bericht Nr. 1330, S. 87-108
- KRUPKA, B.** (1992): Dachbegrünung - Pflanzen- und Vegetationsanwendung an Bauwerken; Handbuch des Landschaftsbaues; Ulmer-Verlag, Stuttgart
- LANDSBERG, H.E.** (1981): The Urban Climate. New York, Academic Press.
- LEBER, U.; SCHRÖDER, A.** (1982): Mikroklimatische Bedingungen unterschiedlich strukturierter Freiräume. In: Das Gartenamt; 31; S.457-463
- MAHLER, G.; STOCK, P.** (1981): Oberflächentemperaturverhalten städtischer Flächen. Stadtbauwelt. H. 55, S.1218.212-1221.215.
- MATZARAKIS, A.; MAYER, H.** (1996): Another kind of environmental stress: thermal stress. WHO Newsletter No. 18, S. 7-10.
- MAYER, H.** (1993): Urban bioclimatology. Experientia. H. 49, S.957-963.
- MAYER, H.** (1996): Human-biometeorologische Probleme des Stadtklimas. Geowissenschaften. Bd.14. H. 6, S.233-235.
- MAYER, H.** (1997): Biometeorologische Auswirkungen des Stadtklimas. VDI-Bericht Nr. 1330, S. 109-126.
- MAYER, H.; SUPPAN, P.** (1990): Untersuchung der kleinklimatischen Wirkung urbaner Strukturen (Forschungsvorhaben KLIWUS). Abschlußbericht LfBAM.
- MERTENS, E.** (1997): Das Bioklima städtischer Baustrukturen. Berlin, Köhler Verlag.
- MILLS, G.M.** (1993): Simulation of the energy budget of an urban canyon - I.model structure and sensitivity test. Atmospheric Environment. Bd. 27B. H. 2, S.157-170.
- MÜLLER, U.** (1997): Beziehungen zwischen urbanen Flächennutzungsstrukturen und klimatischen Verhältnissen am Beispiel der Stadtregion Leipzig. Ufz Leipzig-Halle GmbH-Sektion Expositionsforschung und Epidemiologie, S.1-42.
- MÜNCHOW, B. et al.** (1996): Erfassung und Bewertung des Versiegelungsgrades befestigter Flächen. Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH-Projektbereich Urbane Landschaften.
- NAUMANN, M.** (1986): Mobile Erfassung von Temperatur und Luftfeuchte in ausgewählten Bereichen von Mainz und Wiesbaden. Mainzer Geographische Studien.H. 27, S.1-110.
- NIKOLOPOULOU, M.; BAKER, N.; STEEMERS, K.** (1998): Thermal comfort in outdoor urban spaces. Environmentally Friendly Cities. H. 6, S.179-182.
- NYC, J.** (1978): Grundlagen und Aspekte des Mikroklimas von Wohnhöfen. Meteorologische Abhandlungen. Bd. 3. H. 2, S.1-267.

- OKE, T.R.** (1987): Boundary Layer Climates. New York, Routledge.
- OKE, T.R.** (1988): Street Design and Urban Canopy Layer Climate. Energy and Buildings. H. 11, S.103-113.
- PLATE, E.J.** (1982): Wind Tunnel Modelling of Wind Effects in Engineering. Engineering Meteorology. Fundamentals of Meteorology and their Applications to problems in Environmental and Civil Engineering. S.573-639.
- PLATE, E.J.** (1996): Der Einsatz des Windkanals bei der Lösung stadtklimatischer Probleme. GEO-Wissenschaften. Jg. 14. H.6, S. 240-244.
- PRECHTEL, N.** (1992): Ein Modell des solaren Strahlungsempfanges für Bebauungsmuster in Theorie und Anwendung. in: Inaugural-Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften an der Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität zu München.
- RATH, J.** (1988): in: Stadtklima und Luftreinhaltung, Hrsg. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Berlin, Springer-Verlag
- RÖCKLE, R.** (1990): Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen. Dissertation TH Darmstadt.
- RÖCKLE, R.** (1992): Einsatz mikroskaliger Strömungsmodelle bei Planungsfragen. Annalen der Meteorologie 28 Internationale Tagung für Human-Biometeorologie vom 16.-18.10.92 in Freiburg. H. 28, S.43-45.
- ROEDEL, W.** (1994): Physik unserer Umwelt - Die Atmosphäre. Berlin, Springer-Verlag.
- SCHATZMANN, M.; KÖNIG, G.; LOHMEYER, A.** (1986): Physikalische Modellierung mikrometeorologischer Vorgänge im Windkanal. Meteorologische Rundschau. Jg.39. H. 2, S.44-59.
- SCHIRMER H.** (1988): in: Stadtklima und Luftreinhaltung, Hrsg. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Berlin, Springer-Verlag
- SCHMALZ, J.** (1984): Das Stadtklima. Karlsruhe, Verlag C.F. Müller GmbH.
- SIEVERS, U.; MAYER, I.; ZDUNKOWSKI, W.G.** (1987a): Numerische Simulation des urbanen Klimas mit einem zweidimensionalen Modell. Teil I:Die Modellgleichungen und ihre numerische Behandlung. Meteorologische Rundschau Jg.40. H. 2, S.40-52.
- SIEVERS, U.; MAYER, I.; ZDUNKOWSKI, W.G.** (1987b): Numerische Simulation des urbanen Klimas mit einem zweidimensionalen Modell- Teil II:Modellergebnisse. Meteorologische Rundschau. Jg.40. H. 3, S.65-83.
- SIEVERS, U.; ZDUNKOWSKI, W.G.** (1986): A Microscale Urban Climate Model. Beitr. Phys. Atm. 59, S. 13-40.
- STADT LEIPZIG** (1991): Umweltbericht 1991.Leipzig, Amt für Umweltschutz.
- STADT LEIPZIG** (1993): Stadtklimauntersuchung Leipzig. Leipzig, Amt für Umweltschutz. (unveröffentlichter Bericht)
- STADT LEIPZIG** (1994): Flächennutzungsplan Erläuterungsbericht. Leipzig, Dezernat Planung und Bau.
- STADT LEIPZIG** (1995): Umweltbericht 1995.Leipzig, Amt für Umweltschutz.

- STADT LEIPZIG** (1996): Statistisches Jahrbuch 1996. Leipzig, Amt für Statistik und Wahlen.
- STADT LEIPZIG** (1998): Stadtklimauntersuchung Leipzig. Leipzig, Amt für Umweltschutz. (unveröffentlichter Bericht)
- STOCK, P.** (1992): Synthetische Klimafunktionskarte Ruhrgebiet. Kommunalverband Ruhrgebiet, S.1-68.
- STÜLPNAGEL, A. V.** (1987): Klimatische Veränderungen in Ballungsgebieten unter besonderer Berücksichtigung der Ausgleichswirkung von Grünflächen, dargestellt am Beispiel von Berlin (West). Dissertation. FB Landschaftsentwicklung TU Berlin.
- SUPPAN, P.** (1986): Modellrechnungen zum Einfluß eines Innenhofes auf das thermische Milieu. Institut für Meteorologie und Klimaforschung der Universität Karlsruhe. S.1-92.
- SWAID, H.** (1993): Numerical investigation into the influence of geometry and construction materials on urbanstreet climate. Physical Geography. Bd. 14. H. 4, S.342-358.
- SWAID, H.; BAR-EL, M.; HOFFMANN, M.E.** (1993): A Bioklimatic Design Methodologie for Urban Outdoor Spaces. Theoretical and Applied Climatology. H. 48, S.49-61.
- TUROWSKI, E.** (1995): Stadtbioklima - Bewertung des Klimas für den Menschen in städtischen Ballungsräumen. Prospects for climat-oriented planning in European cities. Berlin, Europäische Akademie für Städtische Umwelt. S.50-53.
- VDI 3782 Blatt 8 (Entwurf)** (März 1998): Umweltmeteorologie-Ausbreitungsrechnung für Kfz-Emmissionen.
- VDI 3786 Blatt 4** (Juli 1985): Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung - Luftfeuchte.
- VDI 3787 Blatt 2** (Januar 1998): Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung Teil 1: Klima.
- VDI 3787 Blatt1 (Entwurf)** (Oktober 1994): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.
- VDI 3789 Blatt 2** (Oktober 1994): Umweltmeteorologie - Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen - Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlung.
- VDI-KOMMISSION REINHALTUNG DER LUFT** (1988): Stadtklima und Luftreinhaltung. Berlin, Springer-Verlag.
- VDI-KOMMISSION REINHALTUNG DER LUFT** (1993): Lufthygiene und Klima. Düsseldorf, VDI-Verlag.
- VOGT, J.** (1994): Lokale Windsysteme in der angewandten Klimatologie. Geographische Rundschau. Bd. 46. H. 6, S.335-343.
- VOOGT, J.A.** (1995): Thermal Remote Sensing of Urban Surface Temperatures. Dissertation University of British Columbia Vancouver, Canada.
- VOOGT, J.A.; OKE, T.R.** (1997): Complete Urban Surface Temperatures. Journal of Applied Meteorology. Vol. 36. H. 9/97, S.1117-1132.

- WEISCHET, W.** (1979): Problematisches über die städtische Wärmeinsel und die Notwendigkeit einer Baukörperklimatologie. Siedlungsgeogr. Studien. S.407-423.
- WEISCHET, W.; NÜBLER, W.; GEHRKE, A.** (1977): Der Einfluß von Baukörperstrukturen auf das Stadtklima am Beispiel von Freiburg/Br. In: Stadtklima (Hrsg. E. Franke), Stuttgart, Karl Krämer Verlag.
- WICKOP, E.; BÖHM, P.; EITNER, K.; BREUSTE, J.** (1998): Qualitätszielkonzept für Stadtstrukturtypen am Beispiel der Stadt Leipzig. Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH-Projektbereich Urbane Landschaften.
- WILMERS, F.** (1986): Der Einfluß von Vegetation in Gartenhöfen auf das Bioklima des Menschen bestimmt durch Oberflächentemperaturmessung mit Infrarotscanner. Freiburger Geographische Hefte Nr. 26, S.155-164.

ANHANG

Untersuchungsgebiete:	Seite:
Legende zu Karte 1 bis 5: Oberflächen- und Vegetationsstrukturen	I
Karte 1: Straßenschluchten einer Gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf	II
Karte 2: Innenhof einer Großwohnsiedlung in Leipzig-Grünau	III
Karte 3: Innenhof einer Gründerzeitlichen Blockrandbebauung in Leipzig-Volkmarsdorf	IV
Karte 4: Innenhof der Meyerschen Häuser in Leipzig-Kleinzschocher	V
Karte 5: Parkanlage Mariannenpark in Leipzig-Schönefeld	VI
Karte 6: Übersichtskarte der Untersuchungsgebiete und Klimastationen	VII

Legende zu Karte 1 bis 5

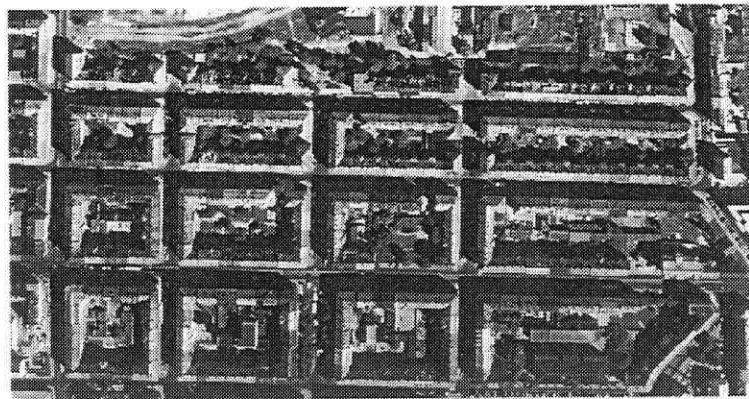
Oberflächen- und Vegetationsstrukturen

	Gebäude
	gebundene Decken (Asphalt)
	Großformplatten
	Mosaikpflaster
	ungebundene Decken
	Betongittersteine
	Kopfsteinpflaster
	Plattenbelag
	Lockermaterial
	vegetationslose Böden

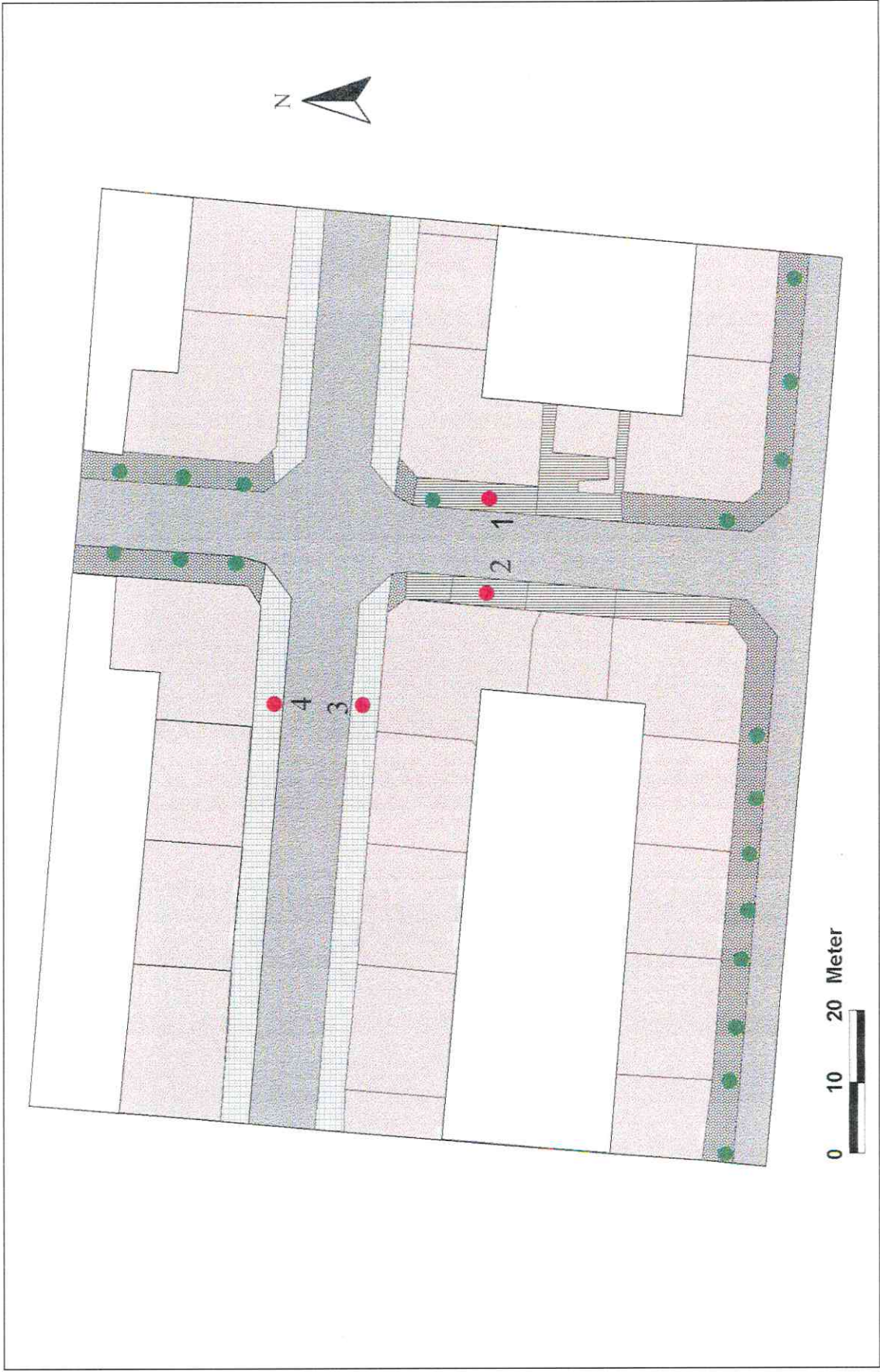
	Wiese/Rasen
	Beete
	Sträucher
	Baumgruppen
	Baum
	Meßpunkt
	Klimastation

Zu Karte 1:**Straßenschluchten einer Gründerzeitlichen Blockrandbebauung
in Leipzig-Volkmarsdorf**

Photo 1: Straßenschlucht (Mariannenstraße, Leipzig-Volkmarsdorf) mit Blick Richtung Westen; linke Straßenseite Meßpunkt 3, rechte Straßenseite Meßpunkt 4 (siehe Karte 1)



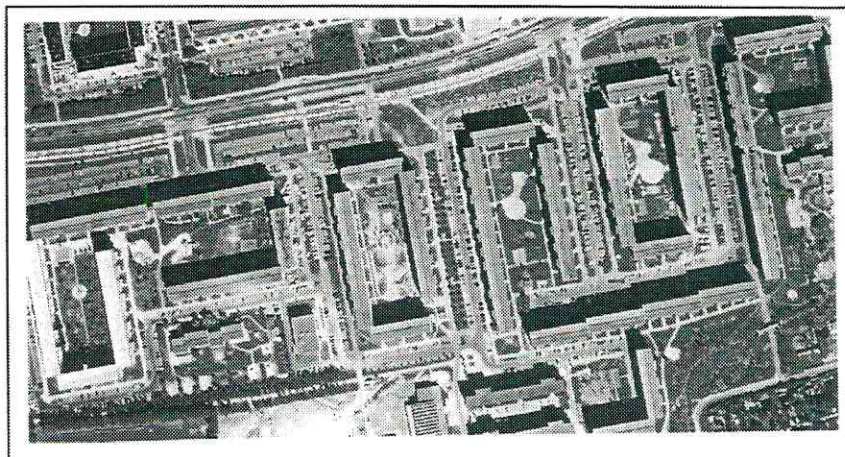
CIR-Bild 1: Ausschnitt CIR-Luftbild von Leipzig-Volkmarsdorf (1:5000) vom 13.08.97
Streifen 14-865 (HANSA Luftbild Nr.: 1/12626)



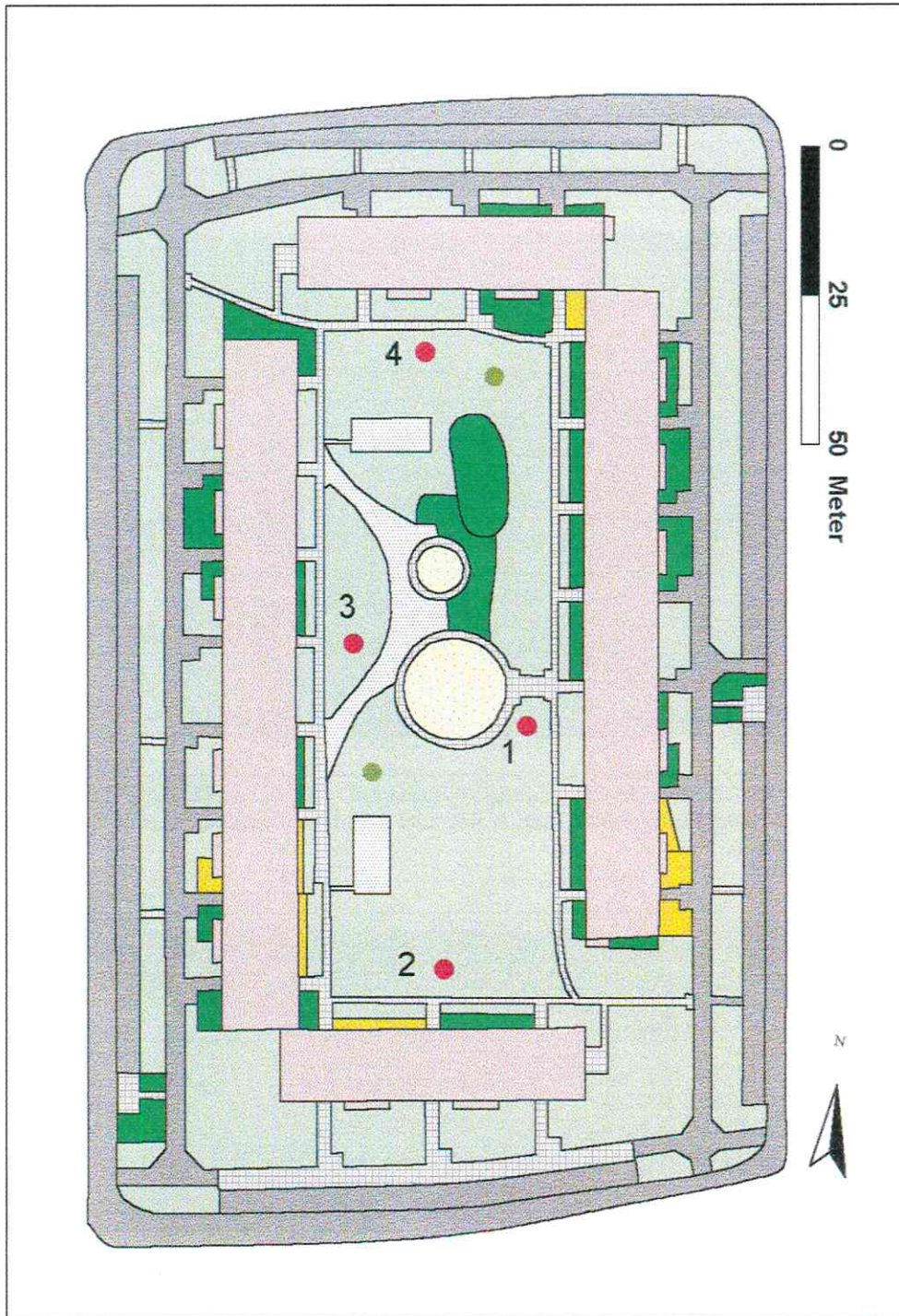
Karte 1: Straßenschluchten Gründerzeitliche Blockbebauung Leipzig-Volkmarisdorf

Zu Karte 2:**Innenhof einer Großwohnsiedlung
in Leipzig-Grünau**

Photo 2: Innenhof (Basteistraße, Leipzig-Grünau) mit Blick Richtung Norden auf Meßpunkt 4, rechte Hofseite Meßpunkt 1, linke Hofseite Meßpunkt 3, Standort Meßpunkt 2 (siehe Karte 2)



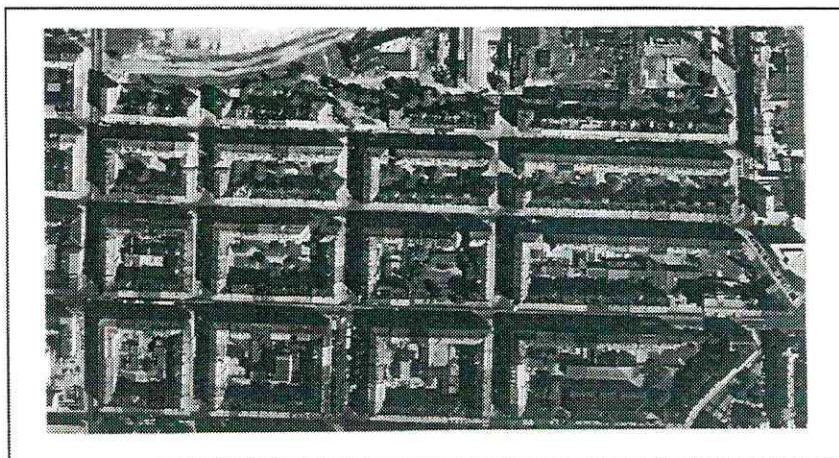
CIR-Bild 2: Ausschnitt CIR-Luftbild von Leipzig-Grünau (1:5000) vom 13.08.97 Streifen 20-199 (HANSA Luftbild Nr.: 1/12626)



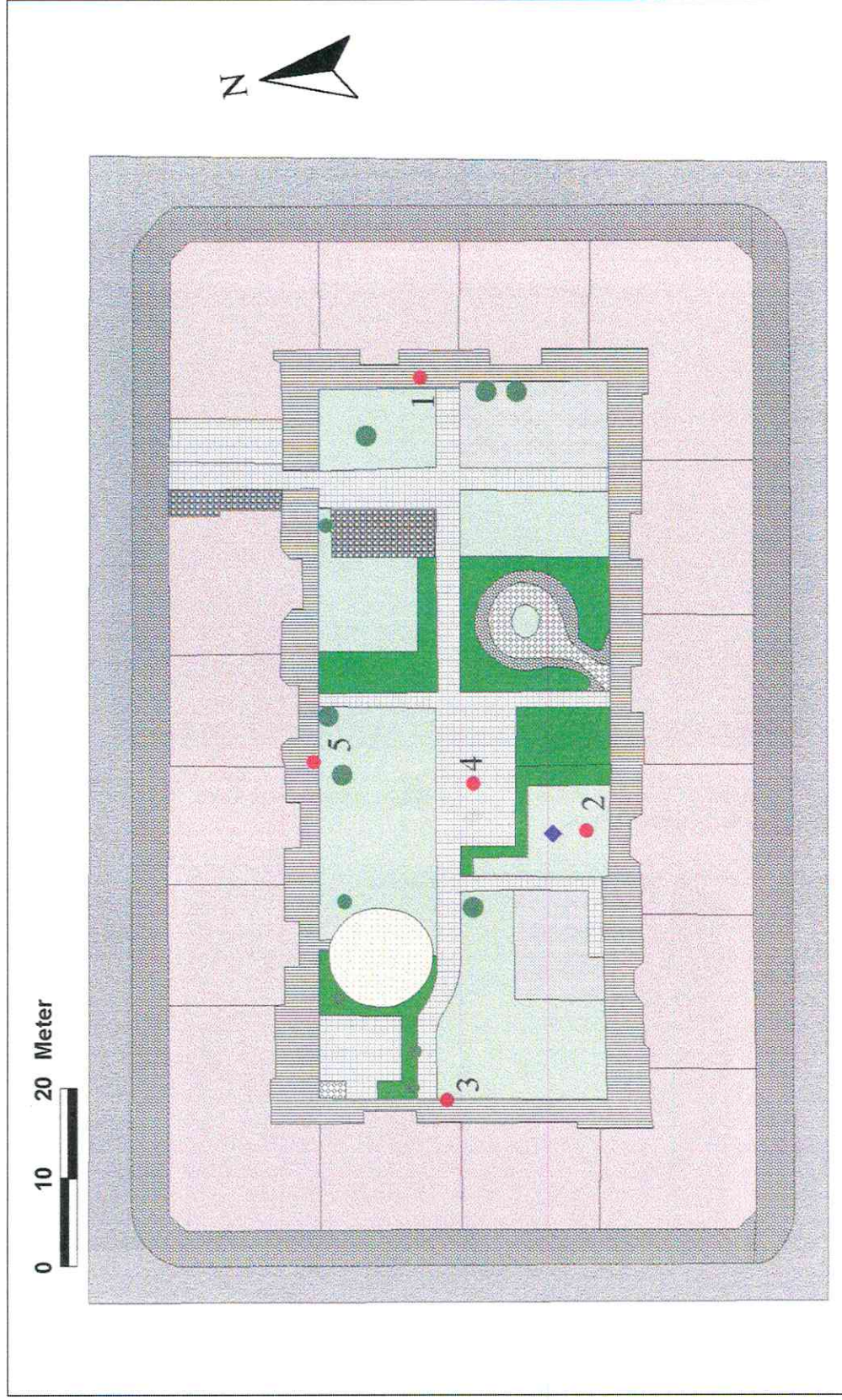
Karte 2: Innenhof Großwohnsiedlung Leipzig- Grünau:

Zu Karte 3:**Innenhof einer Gründerzeitlichen Blockrandbebauung
in Leipzig-Volkmarsdorf**

Photo 3: Innenhof (Ludwigstraße, Leipzig-Volkmarsdorf) mit Blick Richtung Westen auf Meßpunkt 3, linke Hofseite Meßpunkt 2, Hofmitte Meßpunkt 4, rechte Hofseite Meßpunkt 5 (siehe Karte 3)



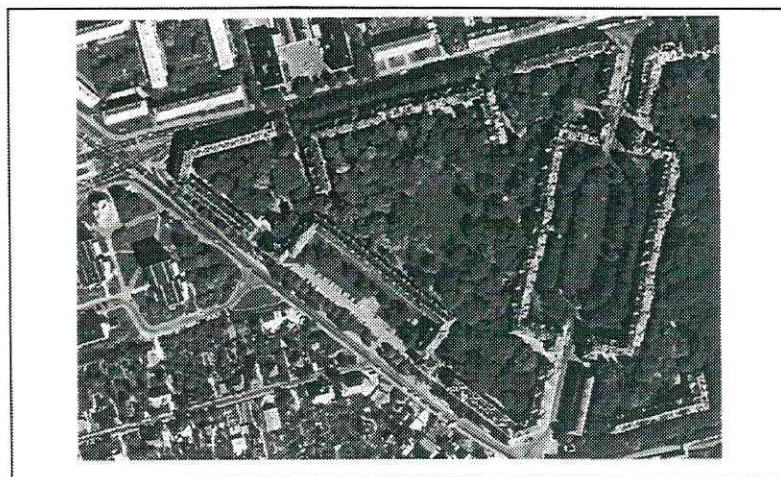
CIR-Bild 3: Ausschnitt CIR-Luftbild von Leipzig-Volkmarsdorf (1:5000) vom 13.08.97
Streifen 14-865 (HANSA Luftbild Nr.: 1/12626)



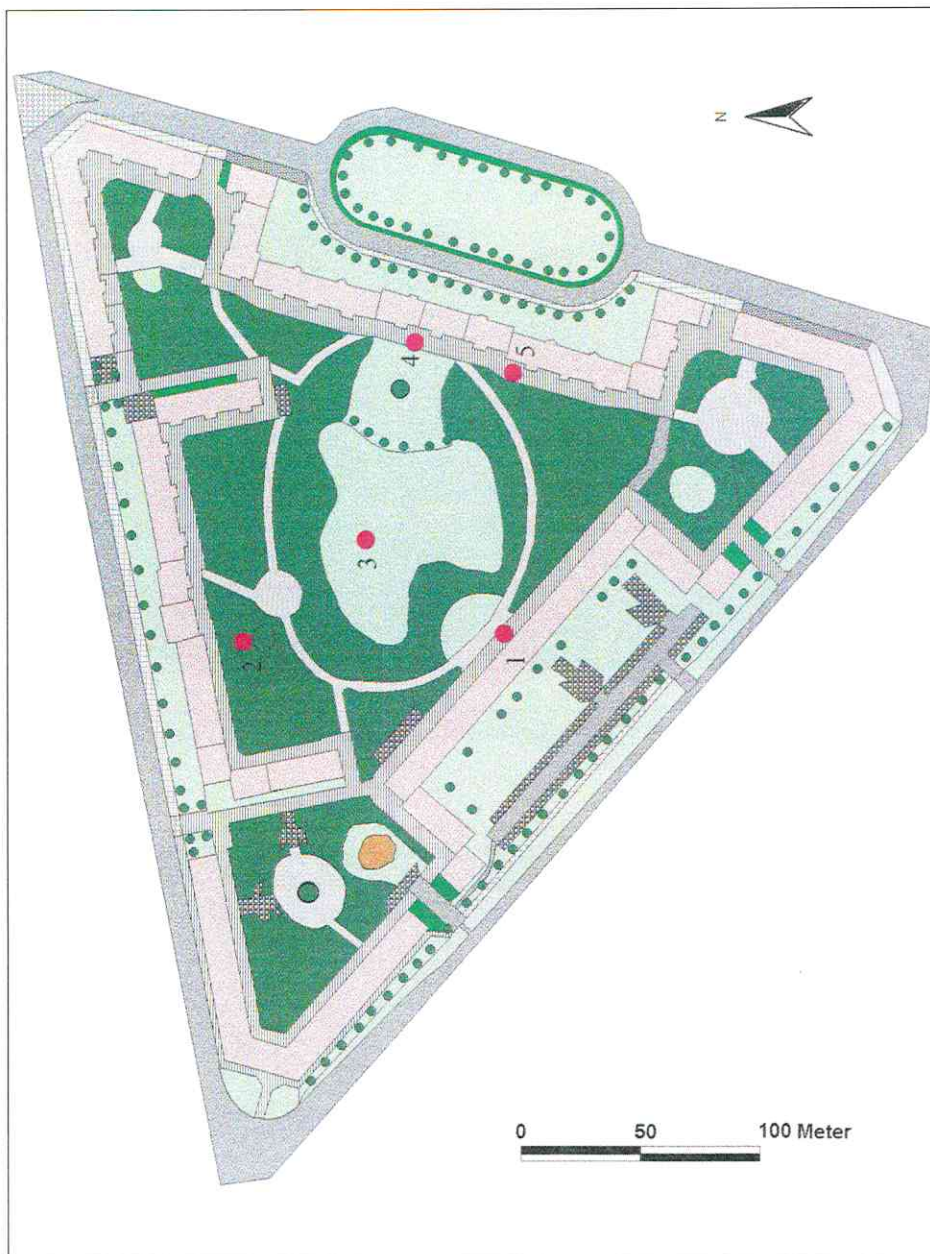
Karte 3: Innenhof Gründerzeitliche Blockrandbebauung; Leipzig- Volkmarisdorf

Zu Karte 4:**Innenhof der Meyerschen Häuser
in Leipzig-Kleinzschocher**

Photo 4: Innenhof (Meyersche Häuser, Leipzig-Kleinzschocher) mit Blick Richtung Norden auf Meßpunkt 2 (siehe Karte 4)



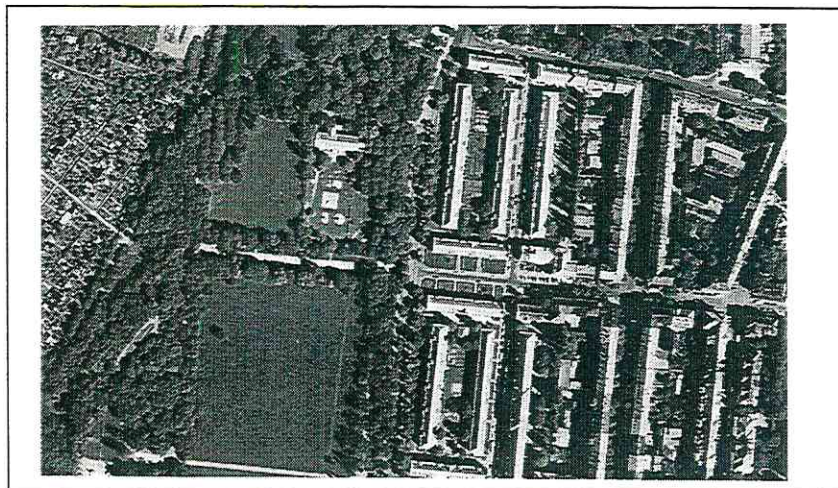
CIR-Bild 4: Ausschnitt CIR-Luftbild Meyersche Häuser Leipzig-Kleinzschocher (1:5000) vom 13.08.97 Streifen 19-118 (HANSA Luftbild Nr.: 1/12626)



Karte 4: Innenhof Meyersche Häuser, Leipzig-Kleinzschocher

Zu Karte 5:**Parkanlage Mariannenpark in
in Leipzig-Schönefeld**

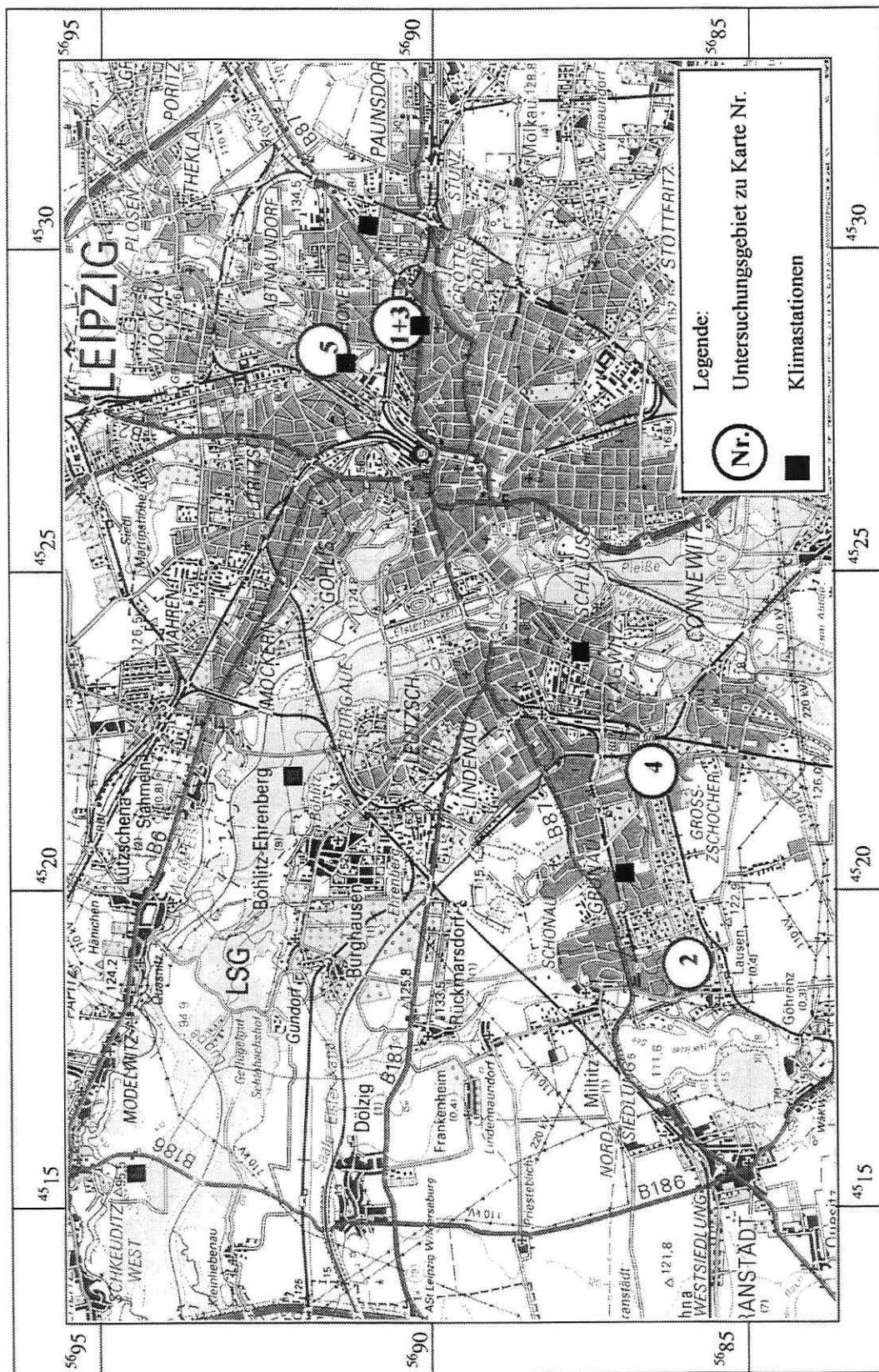
Photo 5: Freifläche (Mariannenpark, Leipzig-Schönefeld) mit Blick Richtung Nord-Westen auf Meßpunkt 2 (siehe Karte 5)



CIR-Bild 5: Ausschnitt CIR-Luftbild von Leipzig-Schönefeld (1:5000) vom 13.08.97 Streifen 13E-825 (HANSA Luftbild Nr.: 1/12626)



Karte 5: Parkanlage mit angrenzender Bebauung; Mariannenpark Leipzig-Schönfeld



Karte 6: Übersichtskarte der Untersuchungsgebiete und Klimastationen

Darstellung auf der Grundlage der Topographischen Karte 1:100.000 N mit Genehmigung des Landesvermessungsamts Sachsen; Genehmigungs-nr. DN 177/98. Änderungen und thematische Ergänzungen durch den Herausgeber. Jede weitere Vervielfältigung bedarf der Erlaubnis des Landesvermessungsamts Sachsen

Danksagung

Die vorliegende Themenstellung wurde im Rahmen des Verbundprojektes „Konzepte zur umwelt- und sozialverträglichen Entwicklung von Stadtregionen“ am Projektbereich Urbane Landschaften, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, in der Zeit von Dezember 1995 bis September 1998 bearbeitet. Dem Umweltforschungszentrum gilt mein Dank für die gute Ausstattung des Arbeitsplatzes und die gewährte finanzielle Unterstützung. Für die wissenschaftliche Hilfestellung und ganz besonders für das gute Arbeitsklima danke ich Herrn **Prof. Dr. J. Breuste** und allen **Kollegen** am Projektbereich Urbane Landschaften.

Ein großes Dankeschön gilt Herrn **Prof. Dr. G. Gerold** für die Betreuung der Arbeit, die am Geographischen Institut der Universität Göttingen eingereicht wurde. Bedanken möchte ich mich besonders für die Motivation, das große Interesse an meiner Arbeit und die gewährten wissenschaftlichen Freiheiten.

Für viele hilfreiche Anregungen und die Übernahme des Korreferates gilt Herrn **Prof. Dr. G. Gravenhorst**, Institut für Bioklimatologie an der Universität Göttingen, mein besonderer Dank.

Bei Herrn **Prof. Dr. H. Mayer** und Herrn **Dr. A. Matzarakis** vom Meteorologischen Institut der Universität Freiburg möchte ich mich recht herzlich für die technische und methodische Hilfestellung bedanken, die mir bei der Durchführung meiner Arbeit sehr hilfreich waren. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn **Dr. L. Katzschner** vom Fachbereich Stadtplanung der Gesamthochschule Kassel für das Interesse an meiner Arbeit und die anregenden Diskussionen.

Herrn **Dr. M. Naumann** und Herrn **P. Heinz**, Amt für Umweltschutz der Stadt Leipzig, Herrn **Dr. U. Müller**, Meteorologisches Institut der Universität Leipzig, Herrn **Dr. W. Richter** von der Sektion Hydrogeologie am UFZ sowie allen Mitgliedern des Arbeitskreises Stadtklima sei für den unkomplizierten und reibungslosen Daten- und Informationsaustausch gedankt.

Dem **DAAD** sei an dieser Stelle für die finanzielle Unterstützung eines dreimonatigen Studienaufenthaltes an der University of Western Ontario, London, Canada, gedankt. For the nice time at UWO and for all the help many thanks to **Dr. J. A. Voogt**.

Ein ganz großes Dankeschön geht an **Enrico Zimmer** der mit viel Sorgfalt, Ausdauer und Geduld bei der aufwendigen Geländearbeit und Datendokumentation geholfen hat.

Und ganz zum Schluß, aber nicht weniger herzlich, bedanke ich mich bei meiner Freundin, allen Freunden und meiner Familie für die erholsamen und schönen Stunden fernab der „Doktorarbeit“.

Lebenslauf

Lebenslauf

Bernhard Bauer
geb. am 10.04.63 in Grafenau
nicht verheiratet
Staatsangehörigkeit Deutsch

Beruf

Seit Dez. 95: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle;
Projektbereich Urbane Landschaften

Universität, Fachhochschule

WS 95/96 - Eingeschrieben zur Promotion im Fach Geographie an der Georg-August-
WS98/99: Universität Göttingen; Thema der Dissertation: „Mikrometeorologische Analyse
und Bewertung kleinräumiger Stadtstrukturen“; Promotionsprüfung: 04.11.1998

Sept. 97 - Dez. 97: Studienaufenthalt an der University of Western Ontario, London, Canada;
Stipendiat des Deutschen Akademischen Austauschdienstes DAAD

WS 90/91 - SS95: Diplomstudiengang Geographie mit Schwerpunkt Landschaftsökologie an der
Georg-August-Universität Göttingen:
* Abschluß, November 1995: Diplom-Geograph
* Nebenfächer: Bioklimatologie, Bodenkunde
* Diplomarbeit: „Atmosphärische Stoffeinträge in einem Stadtgebiet unter
Berücksichtigung der Nutzungsdifferenzierung“

WS 91/92 - SS95: Wissenschaftliche Hilfskraft in der Abteilung Landschaftsökologie am
Geographischen Institut der Georg-August-Universität Göttingen

WS 84/85 - SS 89: Diplomstudiengang Betriebswirtschaft an der Fachhochschule Landshut:
* Abschluß Diplom-Betriebswirt (FH);
* Diplomarbeit: „Konfliktsituationen zwischen Umweltschutz und
Wirtschaftswachstum“

Praktika

Juli. 93 - Sept. 93: UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH; Projektbereich Urbane
Landschaften: „Untersuchung von ökologisch wirksamen Belastungen von Boden-
Klima-Luft in städtischen Grünräumen am Beispiel einer Leipziger Parkanlage“

Aug. 92 - Sept. 92: KFA - Forschungszentrum Jülich GmbH; Institut für Chemie der belasteten
Atmosphäre: Teilnahme an Ozonsondierungen zur Erforschung der vertikalen
Ozonverteilung in der freien Atmosphäre

Schulen und Ausbildung

Sept. 82 - Aug. 83: Fachhochschulreife an der Fachoberschule in Regensburg; Fachrichtung Wirtschaft
Sept. 79 - Aug. 82: Kaufmännische Ausbildung; Fa. Lindermayer in Grafenau
Juli 1979: Abschluß der Mittleren Reife; Realschule Grafenau

Stadtökologische Forschungen

Nr. 1 UFZ-Bericht Nr. 5/1996

Winkler, M.:

Untersuchungen zur gepflanzten Vegetation und ihre ökologische Bedeutung

Nr. 2 UFZ-Bericht Nr. 6/1996

Arndt, E., Pellmann, H.:

Ökologische Charakterisierung von Biotopen im urbanen Raum am Beispiel von Modelltiergruppen

Nr. 3 UFZ-Bericht Nr. 8/1996

Frühauf, M., Breuste, I., Breuste, J., Diaby, K., Sauerwein, M., Zierdt, M.:
Hallesche Kleingärten. Nutzung und Schadstoffbelastung als Funktion der sozioökonomischen Stadtstruktur und physisch-geographischer Besonderheiten.

Nr. 4 UFZ-Bericht Nr. 9/1996

Heinz, V.:

Die Flächennutzung der Stadt Leipzig im klassifizierten Landsat-TM-Bild

Nr. 5 UFZ-Bericht Nr. 10/1996

Freyer, K., Popp, P., Treutler, H.C., Wagler, D., Schuhmann, G.: Untersuchungen zu Wechselbeziehungen zwischen Immissionen und Flächennutzung auf strukturtypischen Testflächen in Leipzig

Nr. 6 UFZ-Bericht Nr. 11/1996

Schulte, G.:

Stadtböden - Schadstoffbelastung und -mobilität

Nr. 7 UFZ-Bericht Nr. 12/1996

Breuste, J., Keidel, T., Meinel, G., Münchow, B., Netzband, M., Schramm, M.:

Erfassung und Bewertung des Versiegelungsgrades befestigter Flächen

Nr. 8 UFZ-Bericht Nr. 16/1996

Keidel, T.:

Untersuchungen zur Situation des Wohnumfeldes ostdeutscher Großsiedlungen am Beispiel von Leipzig-Grünau

Nr. 9 UFZ-Bericht Nr. 18/1996

Wagler, D.:

Modellierung der Ausbreitung kfz-bedingter Schadstoffe in der Stadt Leipzig

Nr. 10 UFZ-Bericht Nr. 20/1996

Engewald, W., Knobloch T., Asperger A.:

Analytische Untersuchungen zum Schadstoffeintrag durch den Hausbrand - Auswirkungen des gegenwärtigen Strukturwandels auf die urbane Belastungssituation

Nr. 11 UFZ-Bericht Nr. 2/1997

Müller, U.:

Beziehungen zwischen urbanen Flächennutzungsstrukturen und klimatischen Verhältnissen am Beispiel der Stadtregion Leipzig

Nr. 12 UFZ-Bericht Nr. 7/1997

Breuste, J. (Hrsg.):

2. Leipziger Symposium "Ökologische Aspekte der Suburbanisierung"

Tagungsband der Veranstaltung am 13. 6. und 14. 6. 1996 am

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

Nr. 13 UFZ-Bericht Nr. 16/1997

Geisler, E.:

Aspekte der Sozialverträglichkeit der Mobilitätsentwicklung in Leipzig

Nr. 14 UFZ-Bericht Nr. 25/1997

Popp, P., Feist, B., Niehus, B., Peklo, G., Thuß, U.:

Vorkommen und Verteilung von toxisch relevanten organischen Komponenten und Schwermetallen in ausgewählten Untersuchungsgebieten

Nr. 15 UFZ-Bericht Nr. 9/1998

Kabisch, S., Bamberg, A.:

Interdependenzen von gebauter, sozialer und natürlicher Umwelt und deren Einfluß auf Wohnzufriedenheit und Seßhaftigkeit

Quartiersbezogene stadtsoziologische Untersuchungen

in Leipzig-Stötteritz im Rahmen des Themenschwerpunktes

„Sozialräumliche Differenzierung und stadtökologischer Strukturwandel“

Nr. 16 UFZ-Bericht Nr. 14/1998

Wickop, E., Böhm, P., Eitner, K., Breuste, J.:

Qualitätszielkonzept für Stadtstrukturtypen am Beispiel der Stadt Leipzig

- Entwicklung einer Methodik zur Operationalisierung einer nachhaltigen

Stadtentwicklung auf der Ebene von Stadtstrukturen

Nr. 17 UFZ-Bericht Nr. 19/1998

Sauerwein, M.:

Geoökologische Bewertung urbaner Böden am Beispiel von Großsiedlungen

in Halle und Leipzig - Kriterien zur Ableitung von Boden-Umweltstandards

für Schwermetalle und Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
Projektbereich Urbane Landschaften
Permoserstraße 15
D-04318 Leipzig
Telefon 0341/235-2843
Telefax 0341/235-2534