Mitt. POLLICHIA	72	163–253	24 Abb.	11 Tab.	Bad Dürkheim/Pfalz 1984
					ISSN 0341–9665

Roland ZIMMERMANN

Klimawirkungen städtischer Freiräume in Ludwigshafen am Rhein

Kurzfassung

ZIMMERMANN, R. (1984): Klimawirkungen städtischer Freiräume in Ludwigshafen am Rhein. – Mitt. POLLICHIA, 72: 163–253, Bad Dürkheim/Pfalz.

Auf der Basis kontinuierlicher Messungen an 21 Meßstellen über den Zeitraum von einem Jahr und temporärer Meßfahrten wurden ausgewählte Bereiche im Stadtgebiet Ludwigshafen/Rhein anhand der klimatischen Parameter Lufttemperatur, -feuchte, Oberflächentemperatur, Ventilation, Schichtung und Bioklima analysiert. Darauf wurden die wichtigsten Klimaparameter mit Daten der Flächennutzung (Unbefestigte Fläche, Grundfläche, Geschoßfläche) über eine Regressions- und Korrelationsrechnung in Beziehung gesetzt, um gesetzmäßige Abhängigkeiten aufzudecken.

Als Ergebnis ließ sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Flächennutzung der Stadt und einer Reihe klimatischer Parameter nachweisen. Dieser Zusammenhang wurde mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die Korrelationswerte gesichert.

Mit Abnahme von Freiräumen, Zunahme der überbauten Fläche und der Bebauungsdichte steigen die Auswirkungen der städtischen Wärmeinsel an. In gleicher Abhängigkeit wird der Luftaustausch gemindert und bioklimatische Belastungen erhöht. An Abweichungen von der Regressionsgeraden werden die Ursachen der klimatischen Güte eines Baugebiets erkennbar (Flächennutzung, Luftaustausch). Der grundlegende Zusammenhang erstreckt sich sowohl auf einzelne Tage als auch auf Mittelwerte und Häufigkeiten. Nur die Steigerung der Regression variiert nach tageszeitlichem und saisonalem Verlauf oder einzelnen Klimaparametern. Die Regressionen können als planerisches Hilfsmittel eingesetzt werden, um klimatische Effekte von Flächenumwandlungen abzuschätzen. Der Aufbau eines Regressionsmodells zum Stadtklima wäre hierzu entwickelbar. Über den Verlauf des städtischen Luftaustauschs konnten weitere Erkenntnisse gewonnen werden, wobei den Wirkungen einer regionalen Strömung besondere Bedeutung zukam.

Abstract

ZIMMERMANN, R. (1984): Klimawirkungen städtischer Freiräume in Ludwigshafen am Rhein [The Effects of Climate of Urban Green Areas in Ludwigshafen am Rhein] . – Mitt. POLLICHIA, 72: 163–253, Bad Dürkheim/Pfalz.

On the basis of measurements taken continuously at 21 points over a period of one year and also on temporary measuring trips, a select number of districts in the urban area of Ludwigshafen on the Rhine were examined with reference to the climatic parameters of air temperature, humidity, surface temperature, ventilation, atmospheric stability and bioclimate. Then the most important climate parameters were related to data of land use types (green areas, built-up area, density of area) by the regression and correlation method, in order to discover regular relationships.

As a result, a linear relation between the land use type and a number of climatic parameters emerged, which could be established with a high degree of probability on the basis of the calculated correlations coefficients.

The effects of the mass of warm air produced in the urban area rise with the decrease in green areas and the increase in built-up areas and areas of high density building. For the same reason there is a decrease in ventilation and an increase in bioclimatic stress. The determinants of the climatic quality of built-up area can be recognized by the deviations from the regression line (land use type, ventilation). This fundamental pattern applies to both single days and the average of several days. Only the gradient of the regression varies according to the time of day, the season or single climatic parameters. The regression can be used for estimating the climatic effect of changes in land use type for the purposes of urban planning. This would require the construction of a regression model of the urban climate. More findings were obtained about the process of urban ventilation, in which the effects of a regional current were of special importance.

Résumé

ZIMMERMANN, R. (1984): Klimawirkungen städtischer Freiräume in Ludwigshafen am Rhein [Effets climatiques des zones vertes urbaines à Ludwigshafen/Rhin]. – Mitt. POLLICHIA, 72: 163–253, Bad Dürkheim/Pfalz.

Pedant une durée d'un an, on a étudié les paramètres climatiques (température de l'air et humidité, température de la surface, ventilation, stratification et bioclimat), en 21 endroits choisis dans les quartiers de Ludwigshafen/Rhin. Des relevés ont également été effectués en voiture de manière plus temporaire.

Les plus importants paramètres climatiques furent mis en rapport avec l'exploitation de la surface (des zones vertes, surfaces de construction, surfaces d'habitation) avec des méthodes de régression et de corrélation pour identifier des dépendances régulières. Comme résultat on a pu prouver une relation linéaire entre l'utilisation de la surface de la ville et quelques paramètres climatiques. Cette relation fut certifiée avec beaucoup de vraisemblance par des valeurs corrélatives.

Avec la diminution des zones vertes, l'augmentation des surfaces construites et la concentration des habitations, les effets des zones de chaleur urbaines grandissent. Par les mêmes effets, l'échange d'air est amoindri et les charges bioclimatiques sont surélevées. On peut reconnaitre les raisons de la qualité climatique d'un territoire construit aux différences des droites de régression (l'utilisation de la surface à l'échange d'air). Le rapport fondamental s'applique aussi bien à des jours particuliers qu'à des valeurs moyennes et des fréquences. L'intensification de la régression varie seulement selon le cours journalier et saisonnier ou selon des paramètres climatiques particuliers. Les régressions peuvent être utilisées comme un moyen pour planifier et estimer les effets climatiques des transformations de la surface. Il serait bon d'élaborer la construction d'un modèle de régression pour le climat urbain. En ce qui concerne le cours de l'échange d'air urbain en possède des résultats plus approfondis. A ce propos les effets d'un courant atmosphérique régional ont une signification spécifique.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung . . . 165
2. Problemstellung 166
3. Ziel der Untersuchung 170
4. Untersuchungszeitraum . 171
5. Untersuchungsmethodik 173
6.0. Analyse der klimaökologischen Funktionsabläufe und Wirkungen in ausgewählten Bereichen der Stadt Ludwigshafen
– Darstellung und Interpretation der Meßergebnisse – 176
6.1.0. Stadtteil Mitte 177
6.1.1. Wärme- und Strömungssituationen am 14./15. 8. 1981 177
6.1.2. Oberflächentemperaturen 183
6.1.3. Häufigkeit und Intensität der Überwärmung 183
6.1.4. Strömungsgeschehen und Ventilation 188
6.1.5. Belüftungsverhältnisse 190
6.1.6. Ventilationsgrad 196
6.1.7. Bioklimatische Verhältnisse 199
6.2.0. Stadtteil West/Hauptfriedhof 203
6.2.1. Wärme- und Strömungssituation am 14./15. 8. 1981 204
6.2.2. Oberflächentemperaturen 208
6.2.3. Häufigkeit und Intensität von Temperaturdifferenzen zum Freiland . . 210
6.2.4. Strömungsgeschehen und Ventilation 214
6.2.5. Belüftungsverhältnisse 216
6.2.6. Ventilationsgrad 222
6.2.7. Bioklimatische Verhältnisse 222
7.0. Numerischer Zusammenhang von Flächennutzungsfaktoren und klimaökologischen Parametern 225
7.1. Flächennutzungsfaktoren 226
7.2. Klimaökologische Parameter 227
7.3. Ergebnisse der Regressions- und Korrelationsanalyse 227
8.0. Ergebnisse und Planungshinweise 239
8.1. Ergebnisse der Regressions- und Korrelationsanalyse 239
8.2. Ergebnisse der Einzelanalyse 242
8.3. Ergebnisse für einzelne Bereiche 246
9. Literaturverzeichnis 248

1. Einleitung

Die klimatische Güte des städtischen Lebensraums wird in hohem Maße von der Bauweise und dem Bestand wirksamer, leistungsfähiger Grün- und Freiräume bestimmt. So wiesen schon die frühen stadtklimatischen Arbeiten nach, daß mit abnehmendem Grünanteil und zunehmender Entfernung zum Stadtrand klimatische Veränderungen in Form höherer Lufttemperaturen und geringerer Ventilation eintreten (BREZINA & SCHMIDT 1937, KRATZER 1956, STEINHAUSER et al. 1959 – Wiener Schule –).

Aufgrund der Bedeutung der stadtklimatischen Verhältnisse für den Luftaustausch und die Luftreinhaltung wurden in der Folge weltweit die Erscheinungen des Stadtklimas untersucht (EMONDS 1954, SCHULZE 1969, HAMM 1969, TYSON et al. 1972, GARSTANG et al. 1975, KAWAMURA 1977, NÜBLER 1979 seien hier als Beispiele genannt).

Auch für die Stadt Ludwigshafen/Rhein (FEZER & SEITZ 1977a) konnten verschiedene stadtklimatische Erscheinungen aufgezeigt werden.

Da sich die zahlreichen Arbeiten zum Stadtklima meist auf lokale Untersuchungen stützten, war es notwendig, die wichtigsten Erkenntnisse, das Stadtklima, seine Ursachen und Wirkungen betreffend, in den letzten Jahren zusammenzufassen (OKE 1973, CHANDLER 1976 oder LANDSBERG 1981).

Aufgrund der physikalischen Wechselbeziehungen war es naheliegend, stadtklimatische Erscheinungen mittels numerischer Simulationen nachzuvollziehen. In Kombinationen von Einwohner- und einfachen Flächennutzungsdaten mit Parametern von Temperatur und Wind wurden kausale Abhängigkeiten der städtischen Wärmeinsel aufgezeigt (SUMMERS 1965, PRESTON-WHITE 1970, OKE 1972, FEZER & SEITZ 1977b). Anhand dieser Simulationen lassen sich eventuell unterschiedliche Städte vergleichen. Eine gesicherte Anwendung für planerische Zwecke können diese wegen ihrer mangelnden Kausalität von Einwohner- und Klimadaten (s. BÖHM 1979) nicht finden.

Weitere allgemeine Modelle wurden auf der Basis von Strahlungs- und Energiebetrachtungen erstellt (MYRUP 1969, OUTCALT 1972, LEE & OLFE 1974). Diese statischen Modelle haben ebenfalls keine planerische Anwendung gefunden, „da einfache Energiebilanzmodelle nicht hinreichend präzise sind, die Energiewirkungen auf die Wärmeinsel zu bestimmen (MYRUP 1969)."

Dynamischere Modelle auf der Basis umfangreicher physikalischer Parameter (z. B. BORNSTEIN 1972, VUKOVICH et al. 1976) sollen auf quantitativer Basis die Wärmeinsel, den potentionellen Flurwind oder die Konzentration von Luftverunreinigungen bestimmen. Dennoch fanden auch diese bisher keine praktische Anwendung, da sie für kleinräumige Problemstellungen schwer anwendbar scheinen. Nach LANDSBERG (1981) ist deren Wert eingeschränkt, da diese Simulationen weitgehendst vom Umfang und der Genauigkeit der eingesetzten physikalischen Parameter abhängen.

Ein anderer Weg, der sich in einigen wenigen Untersuchungen andeutet, wurde nicht konsequent weiterverfolgt. So zeigte sich bei Untersuchungen der städtischen Wärmeinsel, daß die Temperaturverteilung durch den Grünanteil und die Bebauung modifiziert werden (CLARKE & PETERSON 1972, EAGLEMAN 1974, CHANDLER 1976). Auch bei der Analyse der Lufttemperaturverteilung in Ludwigshafen/Rhein (FEZER & SEITZ 1977a) zeichnen sich Unterschiede durch Grünanteil oder Bebauungsdichte ab.

Bei einer quantitativen Typisierung der Flächennutzung zeigte sich am Beispiel von St. Louis (AUER 1978), daß bestimmte Nutzungstypen auch in stadtklimatischen Parametern in Erscheinung treten.

Diese Arbeit will daher den Nachweis zu führen versuchen, ob und wie Faktoren der Flächennutzung und Parameter des Stadtklimas kausal zusammenhängen und welche Bedeutung eine derartige Beziehung für kommunale Planungsträger haben kann.

2. Problemstellung

Die zahlreichen Einzeluntersuchungen von wissenschaftlicher Seite waren darauf gerichtet, mit teilweise nur stichprobenartigen Meßwerten die Bedeutung und das unterschiedliche klimatische Milieu einzelner Grünräume aufzuzeigen (EMONDS 1954, BERNATZKY 1966, PFÜTZNER 1965, WILMERS 1972, TSUCHIYA 1972, SPERBER 1976, PROBALD 1976 etc.) In umfassenderen Stadtklimauntersuchungen wurden verstärkt die stadtklimatischen Belastungen und deren Ursachen analysiert, während die kompensatorischen Wirkungen der Freiräume zwar herausgestellt aber nicht systematisch betrachtet wurden (EDMONDS 1954, ERIKSEN 1964, HAMM 1969, BAND 1969).

Allen diesen zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen ist gemeinsam, daß sie in erster Linie die Wirkungsweise und Bedeutung einzelner Freiräume für die Minderung stadtklimatischer Belastungen aufzeigten. Planerische Empfehlungen wurden so zwar für den räumlich beschränkten Einzelfall erreicht. Eine systematische Analyse einzelner Freiräume oder Flächennutzungsstrukturen unter dem Aspekt der umweltplanerischen Steuerung wurde nach meiner Kenntnis von wissenschaftlicher Seite jedoch nicht vorgenommen.

Auf der planerischen Seite wurde deshalb in verschiedenen Veröffentlichungen der Weg beschritten, „wissenschaftliche Argumente für den Planungs- und Entscheidungsprozeß bereitzustellen" (FINKE 1976: 7).

So wurden die bekannten wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Leistungspotential von Freiräumen systematisch zusammengefaßt, um die Bedeutung der klimaökologischen Wirkungen herauszustellen (FINKE 1976, Freiräume in Stadtlandschaften 1977). Ziel dieser Arbeiten war es, den Planungsträgern so schnell wie möglich planerische Leitbilder zu vermitteln, „daß – allein infolge unzureichender prinzipieller Sachkenntnis – klimatologisch grob fehlerhafte Planungen nicht mehr in Angriff genommen oder verfolgt werden" (KLIMAFIBEL 1977: 8). Die Handlungsunsicherheit im einzelnen Planungsfall, in dem Zielkonflikte zu erwarten sind, wurde nicht aufgehoben, da hierzu auf eine fachgutachtliche Beratung oder Untersuchung verwiesen wird.

Das Ziel dieser Arbeiten bestand in der Hauptsache darin, negative Klimaerscheinungen durch die kompensatorischen Wirkungen von Frei- und Grünräumen zu minimieren. Unabhängig von Lage, Gestalt oder Wirkungsweise wurde dem Grün allgemein positive Klimaeigenschaften zugeschrieben, ohne den gezielten Nachweis hierfür antreten zu können.

Weiterentwickelt wurde allerdings auf planerischer Seite die grundlegende Betrachtungsweise klimatischer Wechselwirkungen unterschiedlicher Räume. Diese wird entsprechend der klimatischen Wirkungsweise in eine räumliche Bezugsbasis umgesetzt. Gestützt wird diese Bezugsbasis

- zum einen, daß die stadtklimatischen Modifikationen in erster Linie durch die Ersetzung „natürlicher Materialien", wie Boden und Vegetation, durch „Stein, Beton und Asphalt" (CHANDLER 1976) bestimmt werden
- zum anderen durch den Dualismus von Grünräumen, die ein klimatisches Potential an Ausgleichsleistungen bereithalten, und bebauten Räumen, in denen bioklimatisch/lufthygienische Belastungen bestehen (s. LESER 1975).

Diese Betrachtungsweise ist deshalb bedeutsam, da für die klimatischen Wechselwirkungen eine räumliche Grundlage gegeben ist, die klar zeigt, durch welche Wirkungsmuster klimatische Erscheinungen verstärkt oder vermindert werden oder räumlich, welche Bereiche einen positiven oder negativen Einfluß ausüben.

In den hierzu grundlegenden Überlegungen und Ausführungen stütze ich mich im wesentlichen auf „das Konzept klimaökologischer Ausgleichsleistungen" in der Studie „Regionale Luftaustauschsprozesse" (Hrsg. Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 1979), in welcher erstmalig in der Konzeption ähnliche grundlegende Betrachtungen formuliert wurden.

Die auf Belastungsreduzierung angewiesenen Räume werden im folgenden als Wirkungsräume bezeichnet.

** Der klimaökologische Wirkungsraum:

Ein Wirkungsraum ist ein bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum, der einem oder mehreren „Ausgleichsräumen" zugeordnet ist, und in dem die dort erzeugten „Ausgleichsleistungen" eine Verminderung oder einen Abbau bestehender bioklimatischer und lufthygienischer Belastungen bewirken.

Die Belastungen im Wirkungsraum haben ihre Ursache in der veränderten klimatischen Wirkungsweise der Bebauung gegenüber dem Freiland. Deutlich wird diese Veränderung in der für zahlreiche Städte nachgewiesenen Wärmeinsel. Aber auch schon sehr kleine Weiler, wie der Grenzhof bei Heidelberg (FEZER & SEITZ 1977b), zeigen diese bebauungsbedingte Überwärmung und verminderte Ventilation. Die Intensität der siedlungsbedingten Beeinflussung liegt dabei wesentlich niedriger als in einer Stadt wie Ludwigshafen. Nach den bisherigen Erkenntnissen läßt sich folgern, daß mit Verringerung des Grüns und zunehmender Bebauung und Verdichtung auch die Intensität der klimaökologischen Belastungen ansteigen. Die Flächennutzung und die Bauweise sind für die klimatischen Erscheinungen im Wirkungsraum daher bestimmend.

Räume, die klimatische Belastungen durch ihre Wirkungen positiv beeinflussen, werden als Ausgleichsräume angesehen.

** Der klimaökologische Ausgleichsraum:

Ein klimaökologischer Ausgleichsraum (Buchwald) ist ein vegetationsbestandener Freiraum, der einem oder mehreren benachbarten, bebauten Räumen zugeordnet ist, um in diesem Raum bestehende bioklimatisch/lufthygienische Belastungen aufgrund seiner Lage und der zwischen beiden Räumen stattfindenden Luftaustauschprozesse zu vermindern oder abzubauen.

Gemäß der Definition können alle ausgedehnteren stadtrandlichen Freiräume als potentielle Ausgleichsräume betrachtet werden. Innerstädtische Grünflächen sind ebenfalls mit einzubeziehen, wenn sich an ihnen kompensatorische Wirkungen feststellen lassen.

Im Regelfall sollten Freiräume mit Ausgleichsfunktionen bioklimatisch/lufthygienisch nicht vorbelastet sein. In Verdichtungsräumen kann dieser Grundsatz jedoch in Folge der Zersiedlung nur mehr bedingt Anwendung finden.

Ausgleichsraum und Wirkungsraum stehen über das Luftaustauschgeschehen funktional in Beziehung. Diese Beziehung wird von der klimaökologischen Wirkungsrichtung (Strömungsrichtung) bestimmt. Ist die Richtung des Luftaustauschs nicht auf den Wirkungsraum gerichtet, ergeben sich für dieses definierte Ausgleichsraum-Wirkungsraum-Paar auch keine klimaökologischen Ausgleichsleistungen. Die Klimawirkung geht mit dem Vektor des Luftaustauschs auf einen anderen Raum über. Die Häufigkeitsverteilung von Strömungsgeschehen und Ventilation ist für Ausmaß und Intensität der Luftaustauschprozesse deshalb von zentralem Stellenwert.

** Die klimaökologische Ausgleichsleistung:

Die klimaökologische Ausgleichsleistung besteht in der Folgewirkung des Luftaustauschs, in dem die aktive oder passive Beeinflussung der Luftmassen bioklimatisch/lufthygienische Belastungen im Wirkungsraum vermindert oder abbaut.

Ausgleichsleistungen bewirken für lufthygienisch belastete Bereiche, daß durch sie oder über sie neue Luftmassen in die Wirkungsräume gelangen, um verunreinigte Luft zu verdünnen und zu ersetzen.

Diese sehr wesentliche Ausgleichsleistung wird in dieser Untersuchung nur im Zusammenhang mit den Wirkungsrichtungen des Luftaustauschs und der Qualität der Ausgleichsräume angesprochen. Ein quantitativer Nachweis lufthygienischer Ausgleichsleistungen konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nicht durchgeführt werden.

Die durch Wärmestrahlung und verringerte Ventilation innerhalb der Bebauung verstärkten bioklimatischen Belastungen können durch Wirkungen von Ausgleichsräumen gemindert oder abgebaut werden.

* In der wärmeren Jahreszeit werden die klimatischen Wirkungen auf den menschlichen Organismus in Form von Wärme- oder Schwülebelastung reduziert.
* In der kälteren Jahreszeit werden durch die erhöhte Ventilation über die Ausgleichsräume Kaltluftstagnation, lokale Inversionsneigung und Naßkälte vermindert, die sich in ihrer bioklimatischen Wirkung ebenfalls negativ auf das Wohlbefinden auswirken.

Wegen der hohen Bedeutung der bioklimatischen Verhältnisse für den menschlichen Organismus werden zur Kennzeichnung der klimatischen Wirkungen auch bioklimatische Parameter untersucht. Da gerade hier Ausgleichsleistungen bedeutsam sind, ist es überraschend, daß sich kaum eine Stadtklimauntersuchung mit den bioklimatischen Modifikationen beschäftigt (nur STEINHAUSER et al. 1959).

Eine grundlegende Ausgleichsleistung der Freiräume besteht in der Verbesserung der Ventilation. Die Ausgleichsleistungen können dabei auf „passive" oder „aktive" Weise erfolgen.

Passiv- und Aktivwirkung können sich innerhalb ein und desselben Raumes entwikkeln. Passivwirkungen sind vor allem am Tage und bei höheren Windgeschwindigkeiten wirksam, während aktive Ausgleichsleistungen in den Nachtstunden sowie bei austauscharmen Wetterlagen am stärksten das Klimageschehen beeinflussen.

* Passive Wirkungen

  Die im Zuge der Großzirkulation herangeführten Luftmassen können mit der allgemeinen Luftströmung über den Ausgleichsräumen bis zum Boden durchgreifen und in die Bebauung eindringen. Die durchdringenden Luftströmungen werden in den Ausgleichsräumen nicht durch Luftverunreinigungen belastet und sind in der Luftgüte besonders hoch zu bewerten.

  Die über eine Siedlung hinwegstreichende Strömung wird im Bereich der Bebauung erwärmt und mit Luftverunreinigungen vermischt, bevor sie von der allgemeinen Windströmung verfrachtet wird. Schließt sich ein größerer Freiraum an, so können Stäube und gasförmige Immissionen ausgefällt werden, und durch Einbeziehen dort lagernder frischer Luftmassen regeneriert werden, so daß sie der nächsten Bebauung noch zugute kommen können.

* Aktive Wirkungen

  Aufgrund des thermischen Gegensatzes zwischen Bebauung und Freiräumen entstehen regionale und lokale Luftströmungen, die zu kleinräumigen, kaum wahrnehmbaren Windbewegungen aber auch zu gut meßbaren Lokalwinden führen (im bergigen Gelände: Hangabwinde, Talabwinde / in der Ebene: Flurwinde). Für die Ausbildung dieser Luftströmungen ist die Kaltluftentstehung und Kaltluftbewegung der treibende Faktor. Gegenüber orographisch gegliedertem Gelände, in dem das natürliche Gefälle eine wichtige Leitlinie und Bewegungsimpuls für die Kaltluftbewegung darstellt, ist in ebenem Gelände die lokale Kaltluftbewegung allein auf den thermischen Gegensatz zwischen Wirkungsraum und Ausgleichsraum oder auf regionale Strömungsimpulse

angewiesen, da die Kaltluft aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften das Bestreben hat, sich zusammenzuziehen und in Senken oder vor Hindernissen zu sammeln und liegenzubleiben (vgl. GEIGER 1961, SCHNELLE 1972, KING 1973).

3. Ziel der Untersuchung

Die Wechselbeziehungen zwischen Klima, Freiräumen und Bebauungsstrukturen sind eine Folge der historischen Stadtentwicklung. Über stadtplanerische Maßnahmen kann die klimatische Güte in belasteten Bereichen verbessert werden. Für die kommunalen Planungsträger sind im Sinne einer klimagerechten Planung Empfehlungen zu entwikkeln, die sich über Bauleit- und Grünfläche auf die Stadtlandschaft übertragen lassen.

Da es für dieses Ziel keine allgemeingültigen Modelle oder Formeln gibt, sind ortsspezifische Klimadaten zu erfassen, die als Grundlage dienen, um die klimatischen Verhältnisse in Freiräumen und Baugebieten zu analysieren. Hierzu werden innerhalb der Stadt Ludwigshafen einige Beispielbereiche ausgewählt und Messungen relevanter Klimaparameter durchgeführt.

Gegenstand der Datenerfassung und der Einzelanalyse ist, die raumzeitlichen Verhältnisse in den Untersuchungsbereichen der Stadt Ludwigshafen zu erfassen. Hierzu wurden an jeden Bereich die gleichen Beurteilungskriterien angelegt. Belastungserscheinungen und Ausgleichsleistungen bilden die Kriterien, die an die ausgewählten Räume angelegt werden. Dadurch verdeutlichen sich, trotz unterschiedlicher Beispiele, auf vergleichbarer Basis Ursachen und Wirkungen. Differenzierte Einblicke in das Luftaustauschgeschehen kann dies an repräsentativen Einzelsituationen ergänzen. Der ortsspezifische Einfluß unterschiedlicher Flächennutzung zeigt sich in der Modifikation der klimatischen Parameter gegenüber den Freilandwerten.

Im Einzelfall ist zu untersuchen:

Welchen Umfang und Intensität die stadtklimatischen Wirkungen in freien und bebauten Bereichen aufweisen?

Welche Wirkungen erreichen innerstädtische Grünbereiche?

Wie weit wirken ausgedehntere, randliche Freiräume in die Stadt hinein?

Welche Abweichungen ergeben sich in den einzelnen Bereichen zum Freiland?

Welche Wirkungseinrichtungen stellen sich bei unterschiedlichen meteorologischen Situationen ein?

Zeigen sich saisonale Unterschiede in der Wirkung der Freiräume?

Wie häufig treten die lokalen Austauschprozesse auf und stellen diese einen Planungsfaktor dar?

Unter welchem Einfluß und über welche Räume verlaufen die lokalen Luftaustauschprozesse?

Welche Wirkungen erreicht der Luftaustausch in den unterschiedlichen Bereichen?

Wie ist die bioklimatische Güte in den einzelnen Räumen?

Haben Freiräume auch bioklimatische Ausgleichsleistungen?

Um auch die Leistungen des vertikalen Luftaustauschs beurteilen zu können, werden nicht nur die bodennächsten Bereiche (2–10 m Höhe), sondern auch die klimatischen Erscheinungen bis ins jeweilige Dachniveau untersucht.

Durch die Analyse der einzelnen Bereiche lassen sich die Ursachen und Wirkungen des lokalen Luftaustauschs belegen. Diese Einzelanalyse mit ihren einheitlichen Kriterien verhindert, daß im folgenden nur wirklich Vergleichbares einfließt.

In einem zweiten Schritt werden die relevanten klimatischen Parameter der Bereiche mit den zugehörigen Flächennutzungsfaktoren auf quantitativer Basis untersucht. Die numerische Analyse soll zeigen, daß zwischen Flächennutzung und klimatischen Erscheinungen ein allgemeiner Zusammenhang besteht. Darüber hinaus wird erwartet, daß die Art und Intensität diese kausalen Beziehung weitere Erkenntnisse bringt.

Die Untersuchung soll für die weitere wissenschaftliche Arbeit aufzeigen, welche grundlegenden Beziehungen zwischen Flächennutzung und klimatischen Parametern bestehen und die stadtklimatischen Erkenntnisse am lokalen Beispiel erweitern.

Aus den Ergebnissen beider Untersuchungsschritte sollen sich sowohl allgemeinere als auch nur ortsspezifische Planungshinweise entwickeln lassen, die dazu beitragen, über Maßnahmen in der Flächennutzung die klimatische Güte der Stadt Ludwigshafen zu verbessern.

4. Untersuchungszeitraum

Die Untersuchung zur klimaökologischen Wirkung von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen basiert auf der Datenerfassung einer circa einjährigen Meßperiode. Die Messungen der kontinuierlich registrierenden Stationen begannen im August 1980 und endeten im Oktober 1981. Meßfahrten und kleinaerologische Sondierungen wurden in verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt.

Als Bezugsbasis wurde, wo nicht ausdrücklich erwähnt, der Jahresgang von September 1980 bis August 1981 dargestellt, da dieser Zeitraum den langjährigen klimatischen Verhältnissen am nächsten kam.

Um die Repräsentanz dieser kurzen Untersuchungsperiode beurteilen zu können, wurden anhand der Großwetterlagen deren Abweichungen von langjährigen Mittelwerten untersucht. Großwetterlagen eignen sich für diese Überprüfung, da ihre Typisierung näherungsweise mit dem Witterungsgeschehen verbunden ist. Antizyklonale und Hochdruck-Wetterlagen begünstigen lokale Klimaabläufe. Zyklonale Wetterlagen und Tiefs hingegen sind meist an höhere Windgeschwindigkeiten, stärkere Bewölkung und Niederschlag gekoppelt, wodurch sich ortsspezifische Klimaprozesse wenig entfalten können. Im langjährigen Mittel werden antizyklonale und Hochdruck-Wetterlagen zu 49 % im Jahr registriert. In der Untersuchungsperiode waren es nur 38.7 %.

In der Tabelle 1 sind die Abweichungen für jede der 29 klassifizierten Großwetterlagen zu den langjährigen Mittelwerten von 1891 bis 1966 angegeben. Wetterlagen mit lokalen Klimawirkungen wurden mit Sternchen (*) gekennzeichnet.

Bei der Analyse des Untersuchungszeitraums stellte sich heraus, daß Wetterlagen wie Süd antizyklonal (Sa), Südost antizyklonal (SEa) sowie Hoch über den Britischen Inseln (HB), immer mit lokalen Klimawirkungen verbunden waren. Die übrigen gekennzeichneten Großwetterlagen wiesen graduell unterschiedlich Häufigkeiten zwischen 10 % und 90 % auf.

Tabelle 1: Wirkungen von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein
Differenzen der Großwetterlagen zwischen dem langjährigen Mittel und dem Untersuchungszeitraum 1980/81

Großwetterlage		mittlerer Anteil 1891–1966 in %	mittlerer Anteil 1980/81 in %	Differenzen in %	Anteil mit Belüftung[1] in %
*Na	Nord antizyklonal	1.1	1.9	0.8	30
Nz	Nord zyklonal	2.9	7.8	−4.9	
*HNa	abgeschlossenes Hoch über dem Nordmeer antizyklonal	3.7	3.5	−0.2	50
HNz	abgeschlossenes Hoch über dem Nordmeer zyklonal	1.4	1.1	−0.3	
**HB	abgeschlossenes Hoch über den Britischen Inseln	3.3	0.5	−2.8	100
TrM	Troglage Mitteleuropa	3.9	1.4	−2.5	
*NWa	Nordwest antizyklonal	4.7	0.8	−3.9	100
NWz	Nordwest zyklonal	4.5	8.4	3.9	40
*Wa	West antizyklonal	5.8	4.3	−1.5	33
Wz	West zyklonal	15.2	14.3	−0.9	20
Ws	südliche Westlage	3.3	2.2	−1.1	
Ww	Winkelwestlage	2.6	1.9	−0.7	30
*SWa	Südwest antizyklonal	2.0	3.0	1.0	45
SWz	Südwest zyklonal	1.6	4.6	3.0	16
**Sa	Süd antizyklonal	2.0	4.1	2.1	100
Sz	Süd zyklonal	0.9	1.4	0.5	20
TB	abgeschlossenes Tief über den Britischen Inseln	2.1	1.6	−0.5	
TrW	Troglage Westeuropa	2.5	3.5	1.0	
**SEa	Südost antizyklonal	2.2	0.8	−1.4	100
SEz	Südost zyklonal	1.5	2.7	1.2	
*HFa	abgeschlossenes Hoch über Fennoskandien antizyklonal	3.7	1.9	−1.8	70
HFz	abgeschlossenes Hoch über Fennoskandien zyklonal	0.8	5.1	4.3	20
*HNFa	abgeschlossenes Hoch über dem Nordmeer und Fennoskandien antizyklonal	1.2	0.8	−0.4	66
HNFz	abgeschlossenes Hoch über dem Nordmeer und Fennoskandien zyklonal	1.5	0.8	−0.7	
*NEa	Nordost antizyklonal	2.7	2.2	−0.5	90
NEz	Nordost zyklonal	2.3	1.9	−0.4	
*HM	abgeschlossenes Hoch über Mitteleuropa	11.0	4.9	−6.1	85
*BM	Hochdruckbrücke über Mitteleuropa	6.0	10.0	4.0	50
TM	abgeschlossenes Tief über Mitteleuropa	2.7	–	−2.7	

* Wetterlagen, die mit lokalklimatischen Wirkungen verbunden waren (40–90 %).
** Wetterlagen, die immer (= 100 %) mit lokalklimatischen Wirkungen verbunden waren.
[1] bezogen auf den Anteil 1980/81 (= 100 %).

Die ausgeprägten Hochdruck-Wetterlagen, Hoch Mitteleuropa (HM) und Brücke Mitteleuropa (BM) waren überraschenderweise nicht immer von lokalen Klimawirkungen begleitet. Klimaanalysen unter alleiniger Berücksichtigung dieser Wetterlagen sind daher nur bedingt aussagekräftig.

In der einjährigen Untersuchungsperiode sind die antizyklonalen Großwetterlagen um 5.8 % und die Hochdruckwetterlagen um 4.9 % gegenüber dem langjährigen Mittel unterrepräsentiert. Dagegen treten zyklonale Wetterlagen, wie nordwestliche und südwestliche, insgesamt um 12.9 % gehäuft auf. Diese Abweichungen führen dazu, daß sich die Häufigkeiten ortsspezifischer Klimawirkungen um über 10 % unterhalb des langjährigen Mittels bewegen.

Zwar entstehen im Lee der Haardt auch bei zyklonalen Wetterlagen durch föhnartige Aufheiterungen windschwache und strahlungsreiche Lokalsituationen, doch ist deren Anteil an lokalen Klimaprozessen mit ca. 5 % Anteil am langjährigen Mittel gering.

Da für planerische Beurteilungen nicht allein das Auftreten einer klimatischen Erscheinung bedeutsam ist, sondern auch deren Wahrscheinlichkeit innerhalb eines längerfristigen Zeitraums, läßt sich an der Betrachtung der Großwetterlagen festhalten, daß die Häufigkeit ortsspezifischer Klimaprozesse um über 10 % unterhalb des langjährigen Mittels liegen.

5. Untersuchungsmethodik

In den Untersuchungsbereichen der Stadt Ludwigshafen wurden die klimatischen Verhältnisse und Ausgleichsleistungen nach folgendem Verfahren untersucht:

* 12 feste Meßstationen registrierten kontinuierlich Lufttemperatur und relative Feuchte,
  9 Meßstationen erfaßten Windrichtung und Windgeschwindigkeit.
* Die Meßstellen wurden sowohl innerhalb der Grün- und Freiräume als auch im angrenzenden Bereich eingerichtet. Über die Erfassung im bodennächsten Bereich (2–10 m Höhe) hinaus, wurden im jeweiligen Bereich Meßstationen im Dachniveau eingerichtet. Wo dies nicht möglich war, wie im Bereich des Hauptfriedhofs, wurde ein 20 m Teleskopmast gestellt, um so auch in größeren Freizonen das vertikale Klimageschehen miteinzubeziehen (s. Abb. 1).
* Zusätzlich wurden Meßwerte weiterer Meßnetze im Stadtgebiet ausgewertet. (Seitz-Klimauntersuchung Oggersheim, BASF-Station E 100, Deutscher Wetterdienst-Station Mannheim und Weinbiet)
* Aus den Originaldaten wurden mit klimatologischen Berechnungsmethoden weitere Parameter wie Luftschichtung, Schwüle etc. abgeleitet.
* Mobile Einrichtungen (Meßfahrzeug, tragbare Sondermeßgeräte, Schwebeballons) erfaßten die räumliche Verteilung von Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Oberflächentemperatur und Luftströmung im Bereich der Grün- und Freiräume sowie in deren Umfeld.
* Daten über die Bebauungsstruktur konnten aus den Erhebungen der Stadt Ludwigshafen entnommen werden. Hier waren baublockweise die Werte über die Geschoßflächenzahl (GFZ), der unbefestigten Flächen und der Grundflächenzahl (GRZ) zu erhalten.
* Durch Einsatz und Eichung elektrischer Datenerfassungssysteme wurde die Meßgenauigkeit auf etwa 1 % reduziert. Die elektronische Weiterverarbeitung ist praktisch ohne Fehlerrate.

Die klimatischen Parameter wurden in einer gesonderten Analyse mit den Flächennutzungsfaktoren auf quantitativer Basis in Beziehung gesetzt. Für den Nachweis eines kausalen Zusammenhangs, wurde die statistische Methode der Regressions- und Korrelationsanalyse verwendet. Diese Methode eignete sich für diese Arbeit in besonderem Maße, da konkrete Ergebnisse über den algebraischen Zusammenhang nicht vorausgesetzt werden konnten und der Umfang der Bereiche für vertiefendere Methodensätze (Faktorenanalyse) nicht tragfähig war. Im Laufe der einjährigen Untersuchung wurden weit über eine Viertel Million Klimadaten erfaßt, die über die elektronische Datenverarbeitung im Stundenrhytmus ausgewertet wurden.

Die Auswahl der Untersuchungsbereiche baute auf den Ergebnissen der Klimauntersuchung von Ludwigshafen auf (FEZER & SEITZ 1977a). Durch den meßtechnisch hohen Aufwand konnte aber nur eine beschränkte räumliche Anzahl untersucht werden. So wurden einerseits ausgedehntere, stadtrandliche Freiräume ($\geq$ 100 ha) und andererseits kleinere, innerstädtische Bereiche mit begrünten und unbegrünten Freiräumen ausgewählt. Zusätzlich wurden Bereiche aufgenommen, die städtebaulich und stadtklimatisch zwischen den Polen lagen. Eine Überprüfung der Bereiche hinsichtlich der Repräsentativität der Flächennutzungsfaktoren für die Stadt Ludwigshafen wurde wegen des geringen Umfangs nicht vorgenommen. (s. Abb. 1)

Um zu gewährleisten, daß die Erkenntnisse der Untersuchung für die lokalen Klimaprozesse repräsentativ sind, wurden die Situationen mit lokalem Klimageschehen ausgefiltert. Kriterien dieses Selektionsverfahrens sind:

- Großwetterlage
- Bewölkungsgang (Stationen Mannheim, Wetterwarte und Neustadt)
- Temperaturamplitude im Freiland
- Windrichtung und -geschwindigkeit im Freiland und in der Stadtmitte
- Windrichtung und -geschwindigkeit in höheren Luftschichten (Station BASF E 100 und Neustadt-Weinbiet 553 m. NN)
- Schichtung der bodennahen Atmosphäre im Freiland – hier 2 m und 60 m Höhe in Oggersheim

Weisen die meisten Kriterien auf lokale Klimaprozesse hin, wird diese Situation (Tag) mittels der elektronischen Datenverarbeitung herausgezogen.

Tabelle 2: Klimawirkungen von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein

Häufigkeitsverteilung unterschiedlicher Belüftungstypen im Untersuchungszeitraum 1980/81 (Tage mit lokal-beeinflußtem Klimageschehen)

	Belüftung mit durchgängigem Höhenwind aus Nordost bzw. Südost	Belüftung mit gegenläufigem Höhenwind	Belüftung mit gleichsinnigem Höhenwind	Gesamt
Sommerhalbjahr (April – Sept.)	6.7 %	19.6 %	13.1 %	39.4 %
Winterhalbjahr (Okt. – März)	9.9 %	9.9 %	14.8 %	34.6 %
Jahr 1980/81	8.2 %	14.4 %	13.9 %	36.5 %

Die lokalen Situationen werden zu einem eigenen Datenkollektiv zusammengefaßt und in den Mittelpunkt der Klimaanalyse gestellt. Störungen durch fremdbürtige Einflüsse können so weitgehendst ausgeschaltet werden.

Da sowohl lokale als auch fremdbürtige Klimawirkungen an eine bestimmte Art des Luftaustauschs gebunden sind, werden diese Situationen terminologisch mit „Belüftung" und „Durchlüftung" unterschieden (aufbauend auf KAPS 1955). Die Bezeichnung vom Luftaustausch her ist wohl gerechtfertigt, da dieser als Schwerpunkt stadtklimatischen Interesses anzusehen ist.

Lokales Luftaustauschgeschehen wird als Belüftungssituation bezeichnet.

Definition „Belüftung"

– Belüftung ist die Durchmischung und horizontale Verlagerung lokal belasteter Luftmassen mit geringen Windgeschwindigkeiten unter neutralen bis stabilen Schichtungsverhältnissen, d. h. gleichbleibende oder zunehmende Temperaturen (Inversion) in der Vertikalen. Der Luftaustausch ist vertikal eingeschränkt und vollzieht sich über einen längeren Zeitraum.

Fremdbürtiges Austauschgeschehen, das lokale Abläufe unterdrückt, wird als Durchlüftungssituation unterschieden.

Definition „Durchlüftung"

– Durchlüftung ist der zügige Austausch lokaler Luftmassen durch reinere und sauerstoffreichere Luft der höheren Atmosphäre. Dies vollzieht sich unter neutralen bis labilen Schichtungsbedingungen, d. h. gleichbleibende bis geringere Temperaturen mit zunehmender Höhe.

Beide Arten des Luftaustauschs bilden die Ventilation, d. h. die Gesundheit der Strömungs- und Luftaustauschprozesse, die bioklimatisch/luftgygienische Ausgleichsleistungen transportieren.

Die begriffliche Unterscheidung der Ventilation ist sicherlich noch verbesserungswürdig. Stadtklimatisch scheint diese Vorgehensweise aber gerechtfertigt, da die Begriffe Luftaustausch, Ventilation oder Belüftung häufig sehr unterschiedlich angewendet werden. Ohne darauf näher eingehen zu wollen, werden diese Begriffe sowohl für autochthone als auch für allochthone Vorgänge verwendet. Die vorgeschlagene Differenzierung der Prozesse bietet dagegen eine sachliche Klarheit.

Setzt man die theoretischen Überlegungen um, kristallisieren sich in Ludwigshafen drei unterschiedliche Belüftungssituationen heraus. Sie wurden in Tab. 2 als Belüftungstypen zusammengefaßt. Sie unterscheiden sich weniger im Aufbau und der Bildung der Wärmeinsel als in Richtung und Intensität des lokalen Luftaustauschs.

6.0 Analyse der klimaökologischen Funktionsabläufe und Wirkungen in ausgewählten Bereichen der Stadt Ludwigshafen/Rhein

– Darstellung und Interpretation der klimatischen Messungen –

Anhand der Bereiche Stadtmitte und Hauptfriedhof werden die einzelnen klimatischen Funktionen und Wirkungen dargestellt. Sie sollen die ortsspezifischen Klimaverhältnisse in Abhängigkeit verschiedener Situationen und klimatischer Parameter erläutern. Der Bereich Stadtmitte steht hier für hochverdichtete Bebauung ohne Grün, während der Hauptfriedhof das Beispiel eines stadtrandlichen Freiraums bildet.

Tabelle 3: Klimawirkungen von Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein
Untersuchungsbereiche – Beschreibung und Flächennutzung

Beschreibung

Bereich	Baustruktur	Freiraumnutzung
1 Stadtmitte	Kerngebiet (Büros, Geschäfte Wohnungen, Stellflächen) 5–8 Geschosse, Rückgebäude niedriger intensivste Flächennutzung	Fußgängerzone, Höfe als Stellplätze Grün meist als Einzel- Bäume und Pflanzkübel
2 Rottstraße	Gründerzeitliches Wohngebiet 5–8 Geschosse, enge Straßenräume, Innenhöfe teilweise bebaut	breitere Straßen mit Alleepflanzungen, Innenhöfe mit privaten Gärten kleinere Rasenflächen und Bäume
3 Parkinsel	Durchgrüntes Wohnviertel 2–5 Geschosse, Reihen- und Einzelhäuser, im Zentrum einige Wohnblocks	Straßen mit Alleepflanzungen, Vorgärten, Rasenflächen und Bäume, angrenzend an Park und Rhein
4 Südwest-Station	Freiraum mit Stadion und Sporthallen, Stellplätze und Sportflächen teilweise versiegelt	ausgedehnte Rasenflächen Abgrenzungen mit Büschen und Bäumen
5 Blies	stadtrandlicher Freiraum mit größerem Badesee, durchbrochen von Ausfallstraßen und Gebäudegruppen	parkartige Eingrünung des Sees, private Gärten, kleine landwirtschaftliche Flächen
6 West / Hauptfriedhof	stadtrandlicher Freiraum, erweitert sich nach Westen ins Freiland, Entwicklungszone	zwischen Bebauung und landwirtschaftlichen Flächen Hauptfriedhof mit Waldcharakter
7 Herdeviertel	kompaktes Wohngebiet mit Reihen- und Doppelhäusern, 2–3 Geschosse	private Gärten mit kleinen Rasenflächen und Bäumen
8 Bebauung westl. Saarlandstraße	Wohnviertel mit 5–8 geschossiger Blockbebauung, größere Abstandsflächen	Abstandsfläche mit Rasen und einzelnen Baum- und Strauchgruppen begrünt
9 Stadtteil West	Mischgebiet mit 5–8 Geschossen, kleine Höfe meist befestigt	Grünfläachen meist am Rande als öffentliche Grünflächen (Schulen, Kirche)
10 V. Bauer-Siedlung	Wohnviertel mit 5 geschossiger Blockbebauung, meist Zeilen	Abstandsflächen als Rasen mit einzelnen Baum und Strauchgruppen
11 Siedlung an der Bayreuther Straße	Wohngebiet solitär im Freiraum gelegen, 4 geschossige Hofbebauung, Hof befestigt	von Freiland umgeben, einige Bäume und Sträucher im Innern

1 – 6 Bereiche mit kontinuierlicher Datenerfassung
7 – 11 Bereiche mit Erfassung durch Meßfahrten

Flächennutzungsfaktoren

Grundfläche in (m^2)	Geschoßflächenzahl GFZ	Grundflächenzahl GRZ	Unbefestigte Fläche UF in (%)
30640	1.8	0.93	1
14860	1.8	0.58	27
18370	0.5	0.32	65
253000	0.03	0.03	66
991730	0.1	0.05	80
1095570	0.03	0.03	91
101720	0.7	0.3	61
209600	0.8	0.5	33
145850	1.2	0.6	31
39310	1.0	0.5	45
20000	1.0	0.3	15

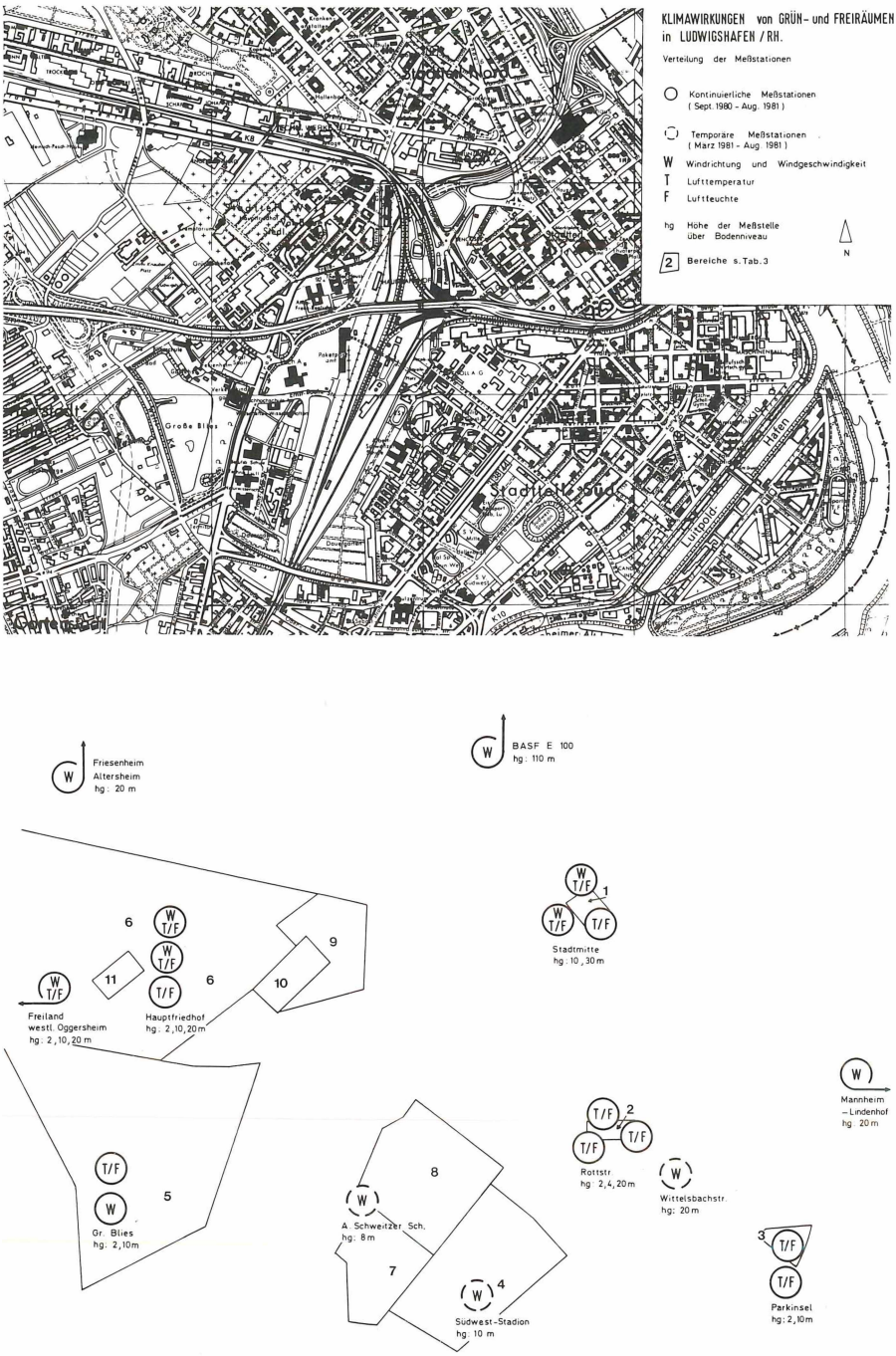


Abb. 1: Verteilung der Meßstationen.

Die räumliche Lage der Untersuchungsbereiche geht aus der Abb. 1 hervor. Gleichzeitig werden in einer Übersicht in Tab. 3 die Nutzung der Bereiche beschrieben. Die Flächennutzungsfaktoren dieser Tabelle fließen später in die Berechnung des Zusammenhangs von Klima und Flächennutzung ein.

6.1.0. Stadtteil Mitte

Innerhalb des klimatisch belasteten Bereichs, dem Stadtteil Mitte, wurde ein Baublock ausgewählt, der einmal für die verdichtete Bebauung der Innenstadt typisch ist und zum anderen die Verhältnisse und Wirkungen in einem nicht begrünten Freiraum verdeutlichen soll. Der Innenhof wird vornehmlich durch zwei- bis dreigeschossige Rückgebäude und Parkflächen genutzt. Gegenüber den umgebenden Straßen wird der Hof durch fünf- bis neunstöckige Gebäude abgeschlossen. Die östlich anschließende Bismarckstraße wurde in den letzten Jahren zur Fußgängerzone umgestaltet und mit Pflanzkübeln und Alleebäumen begrünt. Durch die Begrünung sollten sich gegenüber dem Innenhof klimatisch günstigere Verhältnisse messen lassen (s. Abb. 2).

6.1.1. Wärme- und Strömungssituation

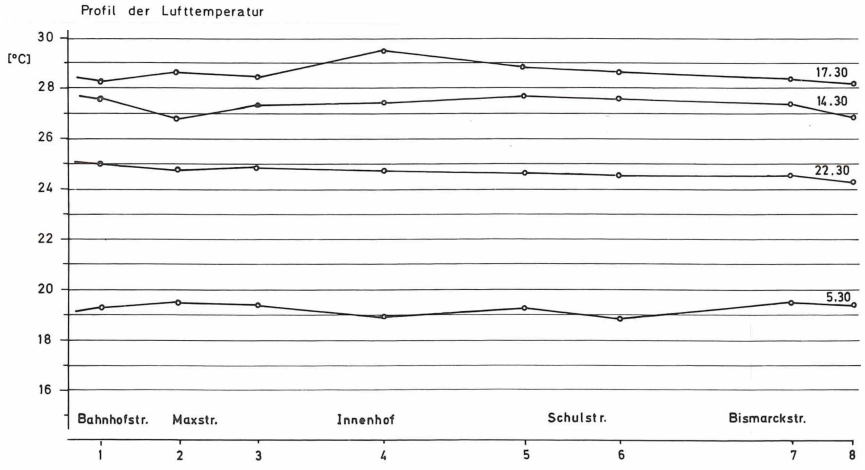
Als Beispiel für eine Belüftungssituation wurde der Tagesgang der Lufttemperaturen am 14./15. August 1981 in Abb. 2 dargestellt.

Die zu verschiedenen Tageszeiten aufgenommenen horizontalen Profile im Straßen- und Innenhofbereich haben jeweils ähnliche Temperaturen. Lediglich am Tage unterscheiden sich durch intensivere Besonnung oder Beschattung, wie um 17.30 Uhr im Innenhof oder um 14.30 Uhr in der Maxstraße die Temperaturen ein wenig. Die maximalen Differenzen zur Bismarckstraße betragen ca. 1 ° C.

Die Tages- und Nachtprofile lassen den normalen Gang von Tag und Nacht erkennen, wobei die Werte des Tagesmaximums 28–30° C erreichen und das Minimum nur geringfügig um 19° C streut. Im Minimum bewegen sich die Temperaturdifferenzen um 0.5° C und zeigen, daß der freiere Innenhof geringfügig kühler ist als die im Umkreis befindlichen Straßenräume, obwohl hier weder Bäume noch Sträucher vorhanden sind. Umgekehrt ist die „begrünte" Bismarckstraße in der gesamten Nacht nicht kühler.

Bei Meßfahrten, die den gesamten Stadtteil Mitte umfaßten, schwankte in diesem Bereich die Lufttemperatur nur wenig. Die gleichen Wärmeverhältnisse herrschten auch im Bürgerhof, einem ähnlich wie die Fußgängerzone begrünten Bereich. Auch hier war im Innenhof trotz des etwas höheren Grünanteils keine verstärkte Abkühlung gegenüber den Straßen feststellbar. Diese einheitliche Lufttemperaturverteilung ist typisch für die homogene Struktur der Ludwigshafener City, innerhalb derer durch die sehr hohe Oberflächenversiegelung und Bebauungsdichte kaum Temperaturunterschiede auftreten.

Betrachtet man sich den gesamten Tagesverlauf in Abb. 3 anhand der kontinuierlich registrierenden Meßstellen im Stadtteil Mitte, ergibt sich ein wesentlich dynamischeres Geschehen. Der Tagesgang ist zunächst typisch für die Verhältnisse an Strahlungstagen mit dem Maximum in den Nachmittagsstunden und dem Minimum am Morgen.



KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN-u. FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Grundriss und Überblick

Bereich : **Stadtmitte**

Profil der Lufttemperatur am 14./15. Aug 81

Wetterlage : West antizyk.

③ Meßpunkt

Ⓣ Temperaturerfassung von Oberflächen

//// **befestigte** Fläche

XXXX bebaute Fläche

N

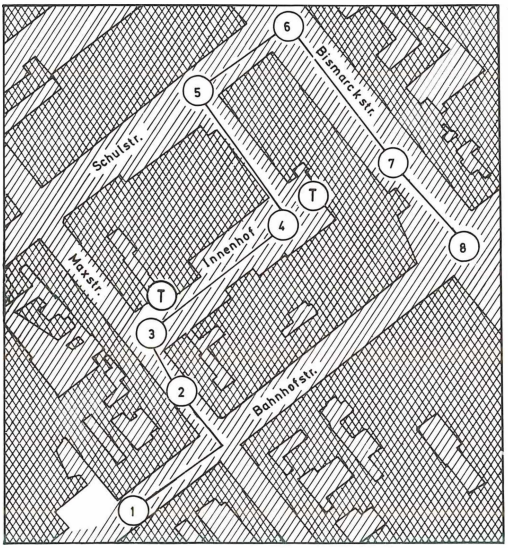


Abb. 2: Überblick und Grundriß im Stadtteil Mitte. Profile der Lufttemperatur am 14./15. 8. 1981.

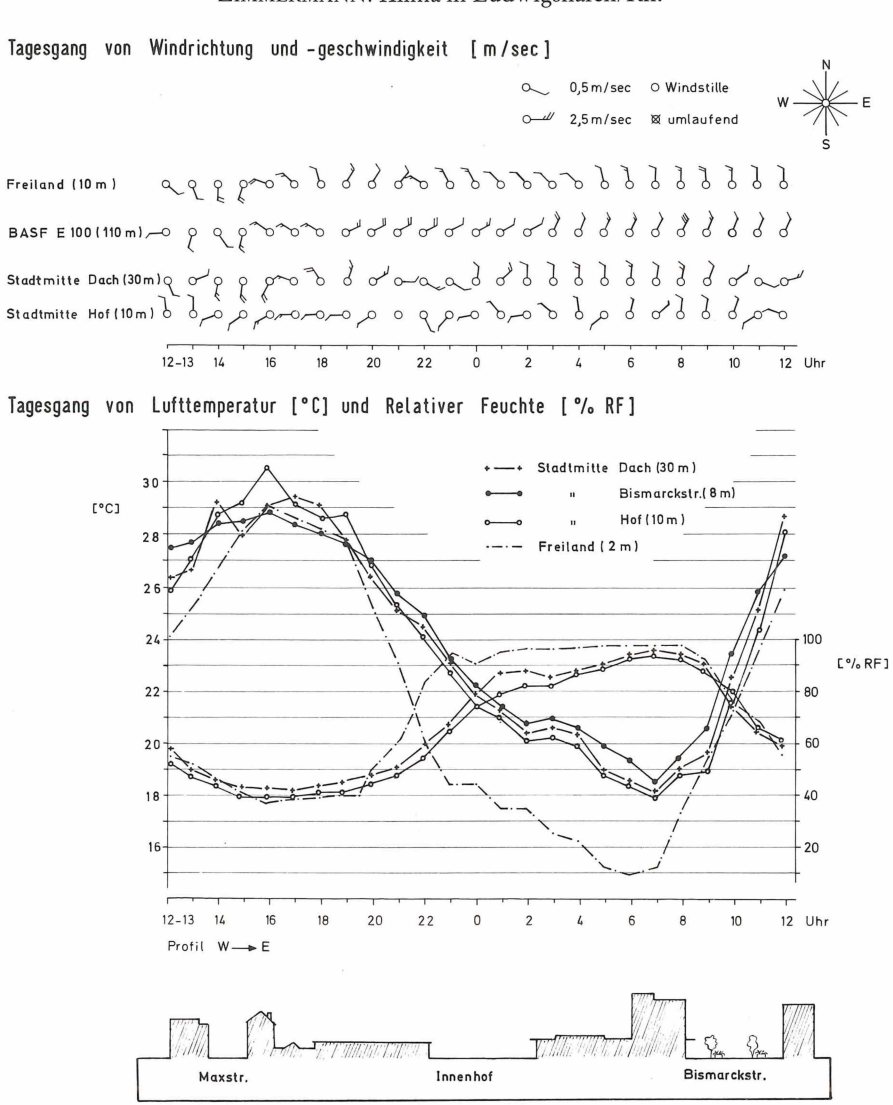


Abb. 3: Wärme- und Strömungssituation im Stadtteil Mitte am 14./15. 8. 1981.

Am späten Nachmittag stellen sich Temperaturunterschiede ein. Intensive Besonnung und mehrfache Reflexion der Strahlung führen im Innenhof zu einem um fast 2° C höheren Maximum als in der schon beschatteten Bismarckstraße (Fußgängerzone). Durch den Wärmestau im Innenhof kommt es um 19.00 Uhr zu einem sekundären Maximum, das die Abkühlung verzögert.

Das Dachniveau zeigt einen leicht veränderten Tagesgang im Maximum. Das Temperaturmaximum tritt mit einer Stunde Verzögerung ein. Die intensivste Erwärmung im Straßen- und Hofbereich mit aufsteigenden Luftquanten setzt sich erst am späten Nachmittag auch im Dachniveau fort. Durch die intensivere Ventilation, die sich an der Windrichtung und Windgeschwindigkeit ablesen läßt, werden im Dachbereich kühlere und wärmere Luftquanten vermischt, so daß erst nach einer gewissen Andauer und Mächtigkeit des vertikalen Luftaustauschs eine Erwärmung der höheren Luftschichten erfolgt, die an diesem Tage noch über das Straßenniveau der Fußgängerzone hinausgeht.

Der Vertikalaustausch der Kernstadt erstreckt sich noch über das Dachniveau hinaus. Anhand des Ganges der Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen läßt sich dies erkennen. Im Mittel nimmt die Windgeschwindigkeit aufgrund der geringeren mechanischen und thermischen Reibung mit der Höhe zu. Nach SEITZ (1975) erreicht die Zunahme im Jahresmittel den Wert von 1.5 in den unteren 100 m Höhe. In Belüftungssituationen können aber häufiger geringere Zunahmen oder gar Abnahmen der Geschwindigkeit durch den vertikalen Luftaustausch eintreten (SEITZ 1975: 56ff.).

Bezogen auf den Jahresfaktor müßte an diesem Nachmittag die Windgeschwindigkeit in 110 m Höhe (Station BASF E 100) mindestens Werte von 2.5 – 3 m/sec erreichen. Registriert werden aber Geschwindigkeiten, die über 1.5 m/sec nicht hinaus gehen. Dies ist nur so zu interpretieren, daß die städtische Aufwärtskomponente noch über 110 m Höhe hinausreicht und hier die horizontalen Strömungen auf 50 – 60 % abbremst.

Nach 17.00 Uhr beginnt in allen Bereichen die Abkühlungsphase. Während der ersten Nachthälfte stellen sich in der Stadtmitte kaum Unterschiede im Temperaturfeld ein. Gegen 2.00 Uhr morgens wird mit einer schwachen nördlichen Strömung zunächst auf horizontalem Wege trockenere und wärmere Luft zugeführt, die die Abkühlung unterbricht. Im Anschluß daran dringen mit der gleichen Strömung kühlere Luftmassen in den Untersuchungsbereich ein. Die Wirkung dieser Luftzuführung ist in ihrer Abkühlung im Innenhofbereich und Dachniveau besonders ausgeprägt.

Über dem Dachniveau können solche Belüftungsschübe rascher strömen als am Boden. Über Freiräumen, wie dem Innenhof, sinken diese scheinbar leichter ab als in den umliegenden Straßen. Die über das Rathauscenter in 20 – 30 m Höhe einfließenden Luftmassen werden von den Baukörpern rasch erwärmt und verlieren ihre Absinkkomponente, die kühleren Luftquanten eigen ist. In die wärmere Bismarckstraße dringen diese Luftmassen während der Nacht daher nur verzögert ein.

Die höhere relative Feuchte dieser eingeströmten Luftmasse wird nicht allein durch die geringere Lufttemperatur bestimmt, sondern auch durch die Wirkung des Rheins, wo sie besonders gut Wasserdampf aufnehmen kann. So ist der Bereich Stadtmitte am frühen Morgen in der relativen Feuchte minimal trockener als das Freiland, aber durch die physikalische Beziehung von Temperatur und Feuchte absolut feuchter, d. h. die Menge des Wasserdampfs ist innerhalb der Stadtmitte höher als im Freiland westlich Oggersheim.

Auf der Meßfahrt konnten im Zuge dieser Belüftung Geruchsimmissionen registriert werden, die diese „frische" Luftmasse als aus dem Bereich Rhein/Friesenheimer Insel stammend auswiesen. Damit wird die hohe Bedeutung des an den Stadtteil Mitte angrenzenden Rheins als Belüftungszone bestätigt. Diese klimaökologisch sehr positive Ausgleichsleistung wird durch Emittenten in diesem Ausgleichsraum allerdings eingeschränkt.

Anhand des Temperatur- und Feuchteverlaufs im Freiland zeigt sich das Ausmaß der städtischen Überwärmung. Sind am Nachmittag die Differenzen noch zwischen 0.5 und 2.0° C, steigen sie in der gesamten Nacht auf 3 – 5° C an, bei Feuchtedifferenzen von bis zu 40 % relativer Feuchte.

Während sich kurz vor Sonnenaufgang durch die eindringende kühlere und feuchtere Luft vom Rhein die relativen Feuchtewerte angleichen, bleibt die Überwärmung um mehrere ° C innerhalb der Bebauung bestehen. Die Ausgleichswirkung vom Rhein her ist demzufolge nicht in der Lage, die bestehende Überwärmung des Stadtteils Mitte abzubauen.

6.1.2. Oberflächentemperaturen

Welche Faktoren diese Überwärmung des Innenstadtbereichs trotz der Frischluftzufuhr bewirken, läßt sich am Tagesgang der Oberflächentemperaturen einiger städtischer Baumaterialien verdeutlichen, die zu verschiedenen Tageszeiten während der Meßfahrten an jeweils derselben Stelle gemessen wurden (s. Abb. 4).

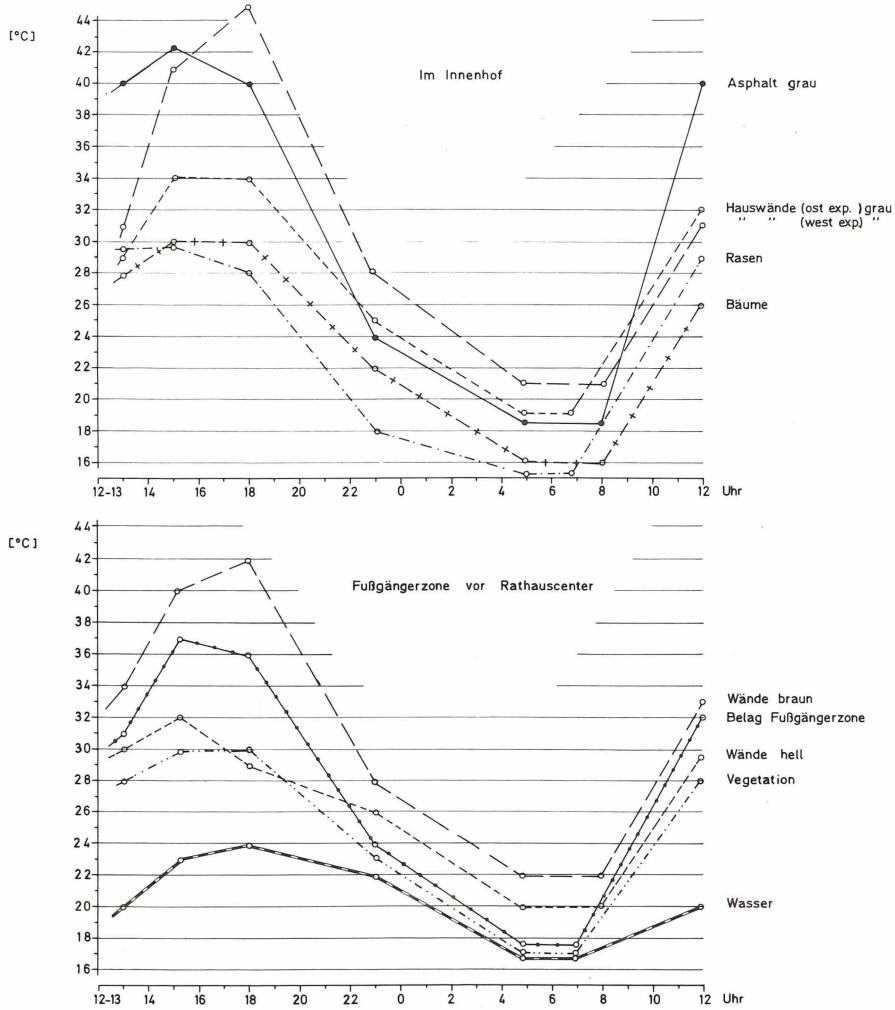
Auffällig ist hier die sehr hohe Aufheizung von Asphaltflächen und Hauswänden mit dunklen Anstrichen gegenüber Wasser- und Vegetationsflächen. Während der Nacht kühlen alle Oberflächen sehr stark ab, doch bleiben gerade die Wandflächen aufgrund ihrer Strahlungsabschirmung und ihrer Wärmespeicherung am wärmsten. Waagrechte Flächen, wie der Asphalt, können demgegenüber besser ausstrahlen und geben mehr an eingestrahlter Energie ab.

Wenn man die Lufttemperaturkurve in dieses Schaubild hineinprojiziert mit einer Minimumtemperatur von ca. 18.5° C, liegt diese noch unter den Werten der befestigten Flächen. Lediglich Rasenflächen oder Blattflächen der Bäume in der Fußgängerzone kühlen sich unter die Lufttemperatur ab. Überraschend verhalten sich die roten Spaltklinkerbeläge der Fußgängerzone. Sie heizen sich weniger auf und kühlen noch geringfügig unter die Minimumtemperatur ab. Diese Klinkerbeläge sind klimaökologisch positiver zu bewerten als Asphalt- oder Betonbeläge.

Gegenüber der Vegetation, die eine Aufheizung durch die Abgabe von Wasserdampf an die Umgebung gerade im Maximum von 10 – 12° C vermindert, sind Wasserflächen ideale Verdunster, so daß die Temperaturen der Wasserbecken rund um das Rathauscenter tags wie nachts durch ihre Verdunstungskälte kühler sind, wobei deren Einfluß auf die Umgebungstemperatur auf kürzeste Distanz nachläßt. (WILMERS 1974). Bedenkt man, daß im Stadtteil Mitte fast 100 % der Flächen und Baumassen aus Beton, Stein und Asphalt bestehen, ist es überraschend, daß die Lufttemperatur im Minimum nicht wesentlich höher liegt, was darauf hinweist, daß dieser Bereich vom Rhein durch einsikkernde kühlere Luftmassen abgekühlt wird.

6.1.3. Häufigkeit und Intensität der Überwärmung

Die am Beispieltag geringeren Unterschiede in den innerstädtischen Wärmeverhältnissen drücken sich auch noch in den für die Untersuchungsperiode berechneten Jahreswerten der Lufttemperatur aus, obwohl in der Tab. 4 alle Tage einbezogen wurden, auch Tage, welche die Ausbildung lokaler Klimaabläufe weitgehend unterdrückten.



KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN - und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Tagesgang von Oberflächentemperaturen [°C] am 14./15. Aug. 1981

Bereich: Stadtmitte

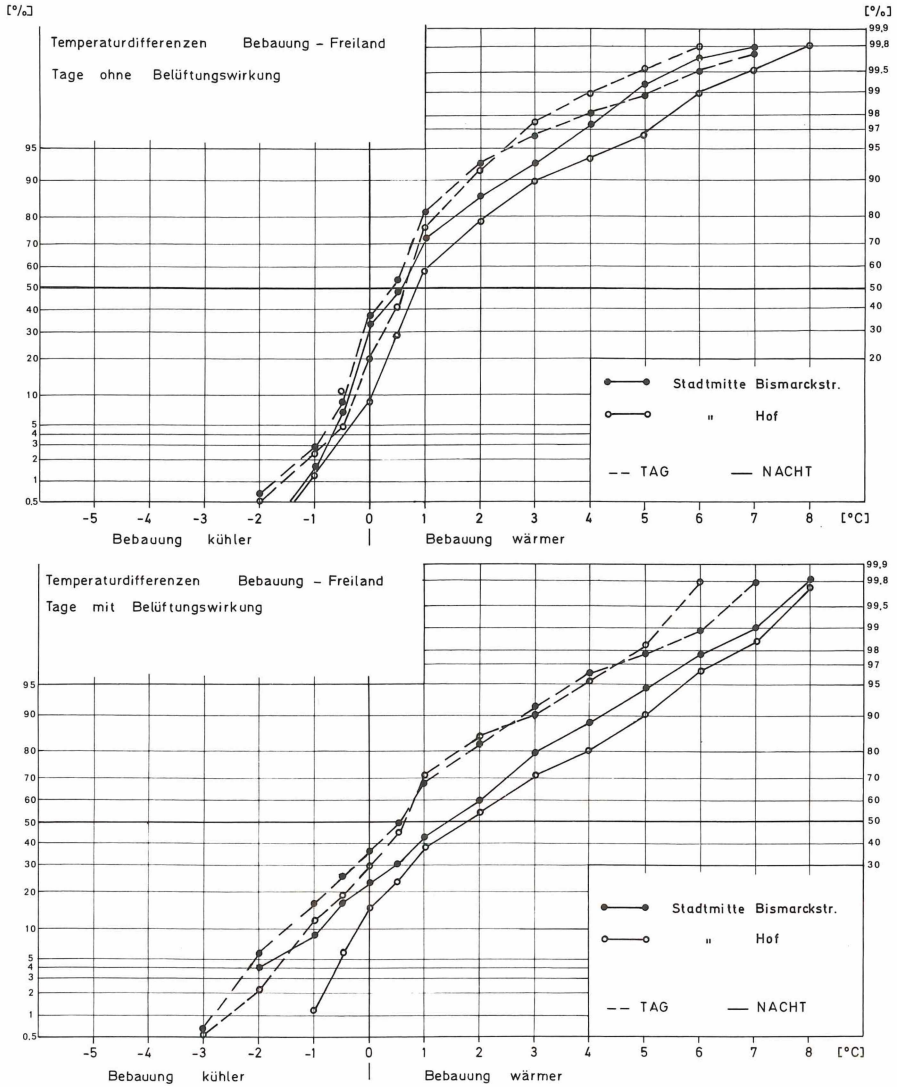
Wetterlage: Wa (Strahlungswetterlage)

Abb. 4: Tagesgang ausgewählter Oberflächentemperaturen im Stadtteil Mitte.

Tabelle 4: Klimawirkungen von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein
Bereich: Stadtmitte

Monatliche Mittel der Lufttemperatur 1980/81

Station	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Jahr
Stadtmitte Dach	16.4	10.3	5.5	2.8	0.4	2.5	10.5	11.5	15.7	18.0	19.4	19.6	11.0
Stadtmitte Hof	16.6	10.0	5.9	3.3	0.9	3.1	10.8	11.6	15.9	17.8	19.1	19.9	11.2
Fußgängerzone	16.7	9.9	5.8	3.2	0.6	2.9	10.7	11.4	15.9	17.9	19.4	20.0	11.2
Freiland westl. Oggersheim	16.2	9.2	3.9	1.0	−0.5	0.6	8.7	9.9	13.8	16.8	18.1	18.6	9.8
Monatliche Maxima der Lufttemperatur 1980/81													
Stadtmitte Dach	20.4	13.4	7.6	4.9	3.1	5.2	13.9	15.6	20.3	22.3	23.4	23.9	14.5
Stadtmitte Hof	21.4	14.1	8.4	5.6	3.5	6.2	14.6	16.5	20.8	22.6	23.5	24.5	15.1
Fußgängerzone	20.5	13.2	7.9	5.2	3.3	5.4	14.2	15.8	20.4	22.1	23.3	24.1	14.6
Freiland westl. Oggersheim	20.7	13.3	7.0	3.6	1.8	4.2	12.7	15.4	19.0	21.6	22.6	23.2	14.0
Monatliche Minima der Lufttemperatur 1980/81													
Stadtmitte Dach	12.7	7.6	3.1	0.6	−0.8	0.0	7.5	7.4	11.2	14.0	15.6	15.6	7.9
Stadtmitte Hof	12.6	7.5	3.5	1.2	−0.5	0.5	7.5	7.2	10.5	13.6	15.3	15.8	7.9
Fußgängerzone	13.1	7.5	3.4	1.2	−0.5	0.5	7.5	7.2	10.6	13.7	15.6	15.9	8.0
Freiland westl. Oggersheim	11.3	5.5	0.5	−1.0	−2.9	−2.2	5.2	5.2	8.5	12.3	13.6	13.2	5.8



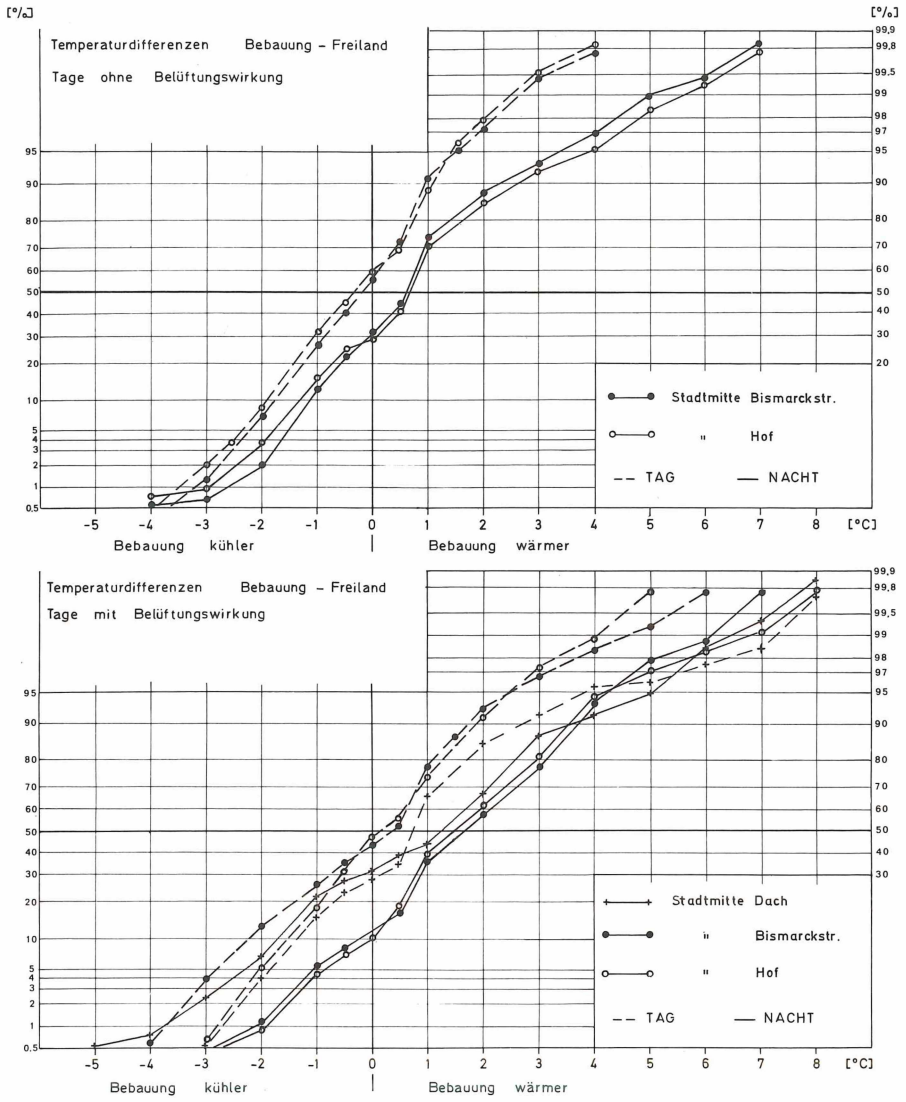
KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN- und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Summenhäufigkeitsverteilung von Temperaturdifferenzen Bebauung - Freiland (auf Stundenbasis)

Bereich : Stadtteil Mitte

Zeitraum : Winterhalbjahr

Abb. 5a: Summenhäufigkeitsverteilung von Temperaturdifferenzen im Winter.



KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN- und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Summenhäufigkeitsverteilung von Temperaturdifferenzen Bebauung - Freiland (auf Stundenbasis)

Bereich : Stadtteil Mitte

Zeitraum : Sommerhalbjahr

Abb. 5b: Summenhäufigkeitsverteilung von Temperaturdifferenzen im Sommer.

Im Jahresmittel ist der Bereich Stadtteil Mitte um 1.2 – 1.4° C wärmer als das vorderpfälzische Freiland westlich Oggersheim. In nahezu allen Monatsmitteln lassen sich in einer Spanne von 0.5 – 2.5° C höhere Temperaturen innerhalb der Bebauung registrieren. Die geringsten Differenzen finden sich mit 0.5 – 1.1° C im Maximum, wobei erstaunlicherweise das Jahresmaximum im Dachniveau geringfügig höher liegt als im bodennächsten Bereich. Differenzen von über 2° C werden im Minimum festgestellt. Dies verdeutlicht nochmals, daß die Stadt besonders in der Nacht überwärmt ist, so daß für die städtische Wärmeinsel die Minimumtemperaturen und die Temperaturamplitude wesentlich mehr aussagen als Mittel- oder Maximalwerte.

Über die Monats- und Jahresmittelwerte hinaus gibt die Häufigkeitsverteilung der Temperaturdifferenzen zwischen dem Stadtteil Mitte und der Freilandstation westlich Oggersheim einen vertiefenden Einblick. Die Werte wurden nach Winter- und Sommerhalbjahr sowie nach Tagen mit Belüftungs- und Durchlüftungssituationen getrennt berechnet und in Abb. 5a, b in Form der Summenhäufigkeitsverteilung dargestellt.

Die Abbildungen verdeutlichen, daß die Stadtmitte vor allem während der Nacht wesentlich häufiger überwärmt ist. Dies gilt sowohl für das Sommerhalbjahr als auch für das Winterhalbjahr. Besonders ausgeprägt ist die städtische Überwärmung an Strahlungstagen mit lokalen Belüftungssituationen. Während am Tage sich negative und positive Temperaturdifferenzen in der Häufigkeitsverteilung fast ausgleichen, ist in der Nacht das Freiland lediglich zu ca. 12 % aller Stunden wärmer als die Bebauung rund um die Fußgängerzone. Rund 80 % der städtischen Wärmeinseln bewegt sich in einem Temperaturbereich zwischen 0 und 4° C. Positive Temperaturdifferenzen über 4° C treten am Tage mit maximal 0,8 % und in der Nacht mit 6 –8 % während des Untersuchungszeitraums auf. Im Winter verschieben sich die Prozentzahlen, ohne den generellen Trend zu ändern. Bedeutsam ist, daß in Belüftungssituationen sich ein wesentlich höherer Prozentsatz (10 – 15 %) über 4° C Temperaturdifferenz ausbildet.

Dies kann nicht allein auf die Erwärmung der Baumassen durch die Sonnenstrahlung erklärt werden, sondern wohl auch in der Hauptsache durch den künstlichen Energieeinsatz. An der winterlichen Häufigkeitsverteilung wird deutlich, daß diese anthropogene Energiezufuhr und Abgabe von Wärme an die umgebenden Luftmassen höher ist als die intensive Einstrahlung der Sonne im Sommer. Die Wärmeinsel bildet sich im Winterhalbjahr (Heizungsperiode) häufiger und intensiver als im Sommer (GEIGER 1974).

Die Wahrscheinlichkeit, daß das Dachniveau in der Stadtmitte gegenüber 20 m Höhe im Freiland wärmer ist, ist im Sommer zu 70 % gegeben, wobei sich Differenzen in der Nacht zwischen 0 und 3° C etwas häufiger ergeben als Temperaturdifferenzen in 2 m Höhe. Die städtische Wärmeinsel beeinflußt also nicht nur die bodennächsten Luftschichten, sondern auch noch die Luftschichten bis über 30 m Höhe.

Betrachtet man die Temperaturdifferenzen unter dem prognostischen Gesichtspunkt, so ist die dicht verbaute und gering durchgrünte Stadtmitte Ludwigshafens zu fast allen Jahres- und Tageszeiten mit einer Häufigkeit zwischen 40 und 90 % wärmer als das Freiland, wobei eine Wärmeinsel mit mehr als 4° C während der Nacht mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % zu erwarten ist.

6.1.4. Strömungsgeschehen und Ventilation

Die Bebauung beeinflußt das bodennahe Windfeld einmal durch Leitlinienwirkung in Freiräumen und Straßen und zum anderen durch die Verwirbelung der Luftströmungen an der rauhen Oberfläche der Stadt, was eine verbesserte Vermischung bodennaher und höherer Luftmassen ebenso bedingt wie eine verminderte Windgeschwindigkeit gegenüber dem Freiland.

In Abb. 6 wird die Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit während des Jahres und der Jahreszeiten für den Bereich der Stadtmitte dargestellt. Im Dachniveau ist die Süd-Südwest- und Nord-Nordostverteilung der Windrichtungen dominierend. Diese Nord-Südverteilung, die sich auch in den einzelnen Jahreszeiten sehr deutlich zeigt, resultiert einmal aus der Lage im Rheingraben. Im Rheingraben werden in den bodennahen atmosphärischen Schichten die Windrichtungen grabenparallel ausgerichtet, so daß westliche und östliche Windrichtungen auf südliche oder nördliche umgelenkt werden. Zum anderen zeigen sich hier im Nordostsektor besonders die Bebauungsverhältnisse. Durch den Rhein als Freiraum im Norden des Stadtteils Mitte können Luftströmungen ungehindert vordringen.

Zusätzlich bewirkt der Sog der wärmeren Bebauung gerade in der Nacht noch eine Zunahme der Nord- und nordöstlichen Windrichtungen, die im Jahresmittel zwar nur ca. 2 % beträgt, in den Jahreszeiten Winter und Sommer stärker bemerkbar ist.

Typisch für weite Teile des Stadtgebietes ist der geringe Anteil östlicher und südöstlicher Winde, der im Jahresmittel 80/81 nur 7,6 % beträgt. Den höchsten Anteil mit 31,6 % zeigen dagegen südliche und südwestliche Windrichtungen, die in der Nacht abnehmen. Gleichzeitig werden in der Häufigkeitsverteilung nördliche Winde zu fast 30 % Anteil registriert, so daß sich nur schwer von einer Hauptwindrichtung in diesem Bereich sprechen läßt.

Die nächtliche Zunahme nordwestlicher bis nordöstlicher Windrichtungen im Jahresmittel und in den Jahreszeiten zeigen, daß die Belüftung der Stadtmitte aus diesem Bereich doch so häufig erfolgt, daß dies noch im Mittel längerer Zeiträume bemerkbar wird.

Betrachtet man die mittleren Windgeschwindigkeiten, so drückt sich hier die typische Windarmut des Rhein-Neckar-Raums aus (vgl. Emissionskataster Mannheim/Karlsruhe 1979). In 30 m Höhe beträgt das Jahresmittel in der Stadt am Tage 2,9 m/sec und in der Nacht 2,7 m/sec. Am freieren Hauptfriedhof betragen die Werte 3,1 m/sec und 2,6 m/sec. Durch die thermischen und mechanischen Turbulenzen werden die Strömungen über den Baukörpern um ca. 10 % geschwächt. In den abgeschirmten Höfen verstärkt sich diese Schwächung durch den Windschutz. Am Tage werden in 10 m Höhe noch 1,4 m/sec (= 48 % des Dachs) und in der Nacht 1,1 m/sec (= 40 % des Dachs) registriert. Rechnet man dies mit der Hellmann-Formel zum Windgeschwindigkeitsprofil (DREYHAUPT 1971) auf das Niveau von 2 m Höhe herunter, so ist noch eine Windbewegung von 0,5 m/sec (= 15 % des Dachs) im Jahresmittel zu erwarten. Im bodennahen Bereich ist die für den Hof festgestellte Windbremsung besonders in den engeren Straßenbereichen noch ausgeprägter.

Die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen im Hof erweckt im Betrachter durch ihre eindeutige Ausrichtung auf den Südwestsektor ein falsches Bild der Windrichtungsverteilung. Der hohe Anteil umlaufender Windrichtungen mit im Mittel 22,5 % verdeutlicht, daß im Hof durch ständige Verwirbelung der Luftströmung eine laufende Windrichtungsänderung einhergeht, die eine Ausrichtung wie in der Abb. 6 eigentlich nicht zuläßt. Der Zwang bei der Auswertung auf ein Stundenmittel ist mit ein Grund für diese Verfälschung. Zum anderen ist der Hof auf allen Seiten von 5–9 geschossigen Gebäuden abgeschirmt. Die durchgängigste Abschirmung ist im Nordsektor vorhanden, was sich auch an der geringen Häufigkeit nördlicher Windrichtungen ersehen läßt. Nördliche Winde können häufig nur in einer Art Walze in den Hof eingreifen. Im Südbereich des Hofs verstärkt diese vertikale Walze in 10 m Höhe südwestliche Winde. Durch Abströmen an den Hauswänden werden auf diese Art nördliche Windrichtungen auf dem Dach in südliche umgelenkt, wie es auch einzelne Schwebeballonversuche zeigten. Am Beispieltag in Abb. 3 ist dieser mechanische Effekt immer wieder zu sehen, wenn die Windgeschwindigkeit auf dem Dach unter 1,5 m/sec sinkt.

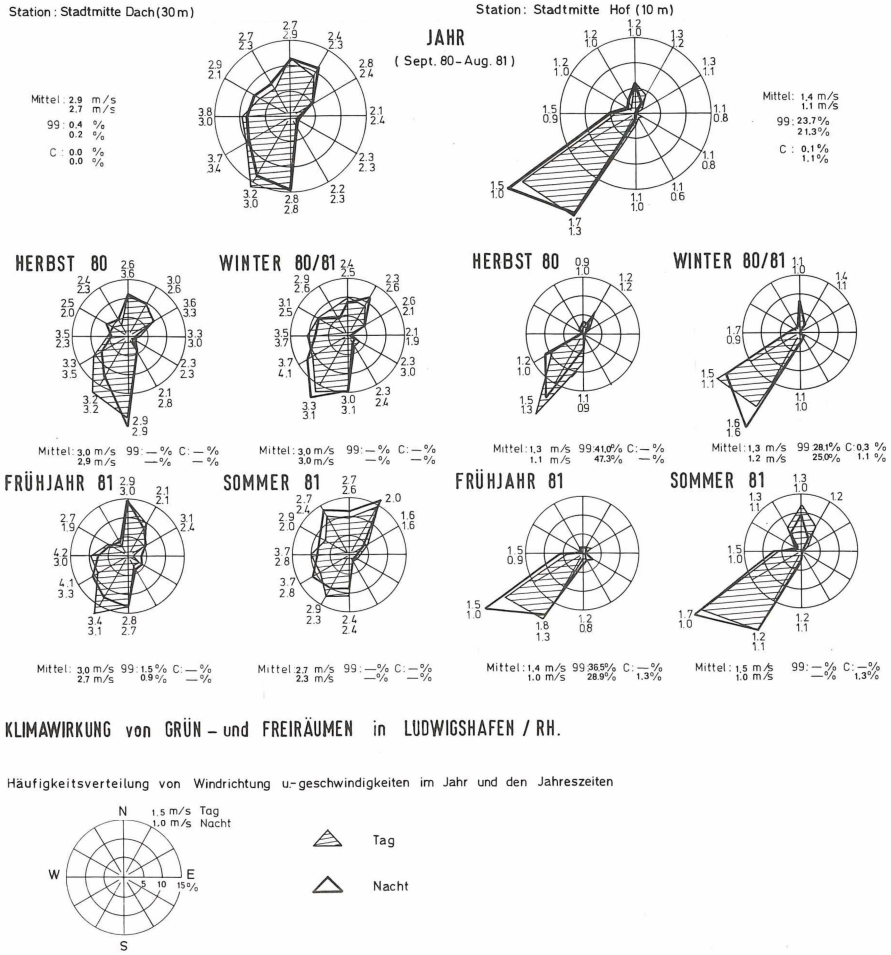


Abb. 6: Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und -geschwindigkeit im Jahr und in den Jahreszeiten.

6.1.5. Belüftungsverhältnisse

Die mittlere Jahresverteilung und die Jahreszeiten können nur einen Überblick über das Ventilationsgeschehen liefern. Zu den für die lokalen Luftaustauschprozesse bedeutsamen Belüftungssituationen zeichnen sich nur Umrisse ab. In der Abb. 7a werden deshalb die Häufigkeitsverteilungen von Windrichtung und -geschwindigkeit unter Belüftungsbedingungen dargestellt.

Bei den Belüftungssituationen mit durchgängigem Höhenwind werden im Sommer in der Hauptsache nördliche Winde und im Winter südliche und südöstliche Winde registriert. Gegenüber den beiden anderen Belüftungssituationen werden im Dachniveau besonders in der Nacht höhere Windgeschwindigkeiten registriert, die sich zum großen Teil auch im Hof mit gleicher Windrichtung bemerkbar machen, obwohl mit ca. 20 %

umlaufender Winde im Sommer und 50 % umlaufender Winde im Winter diese meist stark verwirbeln. Sobald die intensive Konvektion an Strahlungstagen nachläßt, flaut unter stabileren Schichtungsbedingungen in der bodennahen Atmosphäre der Wind am Abend ab.

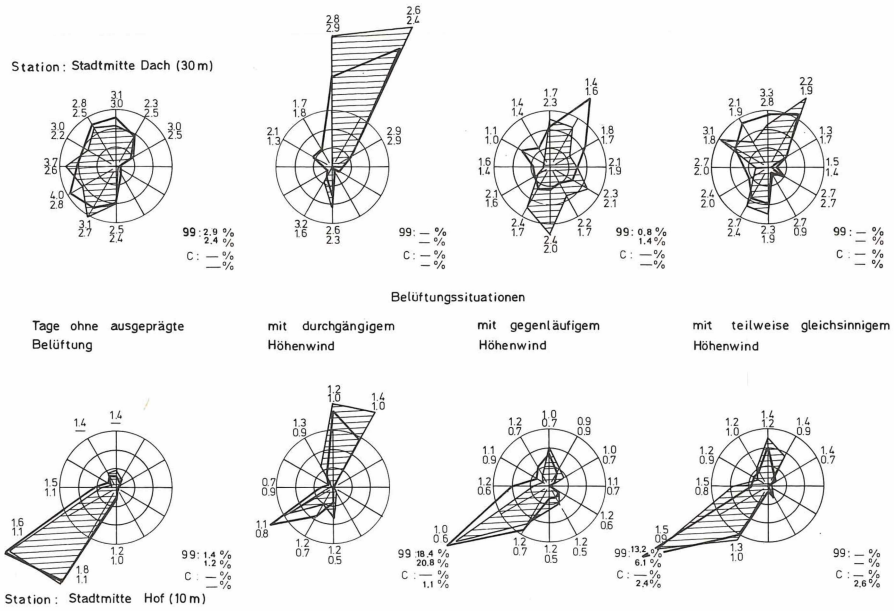
Durch diesen Effekt dreht im Dachniveau die Windrichtung gegen den Uhrzeigersinn. Im Sommer führt dies zu einer 11 %igen Zunahme der nordwestlichen Windrichtungen. Der Hof macht diese Drehung um bis zu 60° nicht mit, sondern wird verstärkt durch die an Hauswänden absinkenden Luftmassen aus der Höhe belüftet.

Durch die höhere Windgeschwindigkeit ist die Belüftungsleistung in diesen Situationen günstiger, da nicht nur bodennahe, sondern auch absinkende Luftmassen der höheren Atmosphäre in den Luftaustausch mit einbezogen werden. Nachteilig wirken sich bei diesen Verhältnissen Luftverunreinigungen aus, die im Winter von Süden und im Sommer aus Nord bis Nordost mit dieser Belüftung in die Stadtmitte transportiert werden, da sie in einer wenig mächtigen Austauschschicht überwiegend horizontal ausgebreitet werden.

Bei der Belüftungsform mit gegenläufigem Höhenwind bei Nacht lassen sich lokale Luftaustauschprozesse in ihrer Genese- und Wirkungsweise besonders verdeutlichen. Durch die großräumige Zirkulation herrschen am Tage vornehmlich südliche bis östliche Luftströmungen, die selbst in 30 m Höhe kaum über 2,0 m/sec mittlerer Windgeschwindigkeit hinausgehen. Zusätzlich werden an diesen Tagen die Ventilationsgeschwindigkeiten durch die thermische Turbulenz der Stadt gemindert, was sich noch an der Station BASF E 100 an den geringen Windgeschwindigkeiten ersehen läßt, d. h., zwischen 30 m und 110 m Höhe ist die vertikale Luftbewegung so stark, daß die horizontale Windkomponente geschwächt wird. In der Nacht bleiben in der Höhe an der Station BASF E 100 die östlichen Windrichtungen bestehen, während sich unterhalb 100 m im Bereich der Stadtmitte eine nordöstliche Belüftungsströmung bildet. Die Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und -geschwindigkeit an der Station BASF E 100 in der folgenden Abbildung zeigt dies im Vergleich zu der Abb. 7 sehr deutlich.

Durch die intensive Abkühlung des Freilandes und durch den Sog der wärmeren Bebauung wird zwischen dem Freiraum Rhein und der Stadtmitte im Laufe der Nacht intensiv Luft ausgetauscht. Um diesen lokalen Prozeß besser verstehen zu können, sei er am Tagesgang in Abb. 8a verdeutlicht. An der Höhenstation BASF E 100 (110 m) hält sich der Süd- und Ostwind des Tages auch noch in der Nacht durch. Gegenüber dem Freiland in 8 m Höhe und in der Stadtmitte in 30 m Höhe sind tagsüber in E 100 die Windgeschwindigkeiten nicht höher, sondern fast gleich, was darauf hinweist, daß die städtische Konvektion noch über diesen Bereich hinausreicht. Die einmal höheren, einmal geringeren Windgeschwindigkeiten in der Nacht resultieren daraus, daß in 110 m Höhe der Grenzbereich der nächtlichen Bodeninversion erreicht ist. Liegt die Inversionsgrenze noch über 110 m, sind in der Nacht in E 100 geringere Windgeschwindigkeiten festzustellen. Sinkt die Inversionsobergrenze auf etwa 100 m Höhe ab, kommt es an dieser Grenzschicht zu Windbeschleunigungen.

Im Dachniveau hält sich der Einfluß der Höhenströmung bis gegen 22.00 Uhr. Danach setzt eine nordwestliche Belüftungsströmung ein, die bis zum Morgen anhält. Diese Belüftung, die im westlichen Freiland schon rund ein bis zwei Stunden früher festzustellen ist, und auf die unteren 100 m der Atmosphäre beschränkt bleibt, bringt die durch die Ausstrahlung entstehenden Frischluftmassen der westlichen Freiräume bis in die Stadtmitte. Am Tagesgang der Temperatur läßt sich erkennen, daß diese kühleren und relativ feuchteren Luftmassen nach 22.00 Uhr eine verstärkte Abkühlung des Innenstadtbereichs bewirken, die die Temperaturdifferenzen zwischen Stadt und Freiland auf maximal 3 – 3,5° C reduzieren. Die Frischluft dringt dabei sowohl im Dachniveau als auch im



KLIMAWIRKUNG von GRÜN - und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Belüftungssituationen

Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und -geschwindigkeit

Zeitraum: Sommerhalbjahr

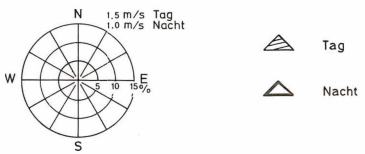
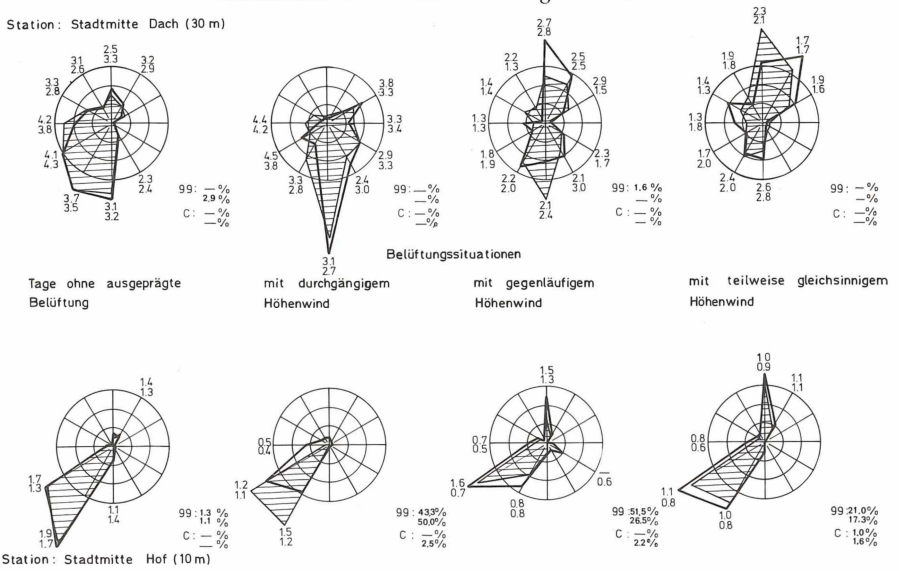


Abb. 7a: Belüftungssituationen im Stadtteil Mitte im Sommer.

Straßenbereich durch. Eine Ventilationszunahme und Drehung der Windrichtung gegen Nord-Nordwest um 2.00 Uhr im Bereich des Dachniveaus bewirkt, daß nicht mehr ganz so kühle Luft in die Stadtmitte transportiert wird, da diese Strömung über den nördlichen Stadtteilen erwärmt wird, während Luftmassen, die über den Hauptfriedhof und den Ebertpark einströmen, eine höhere Kühlleistung haben. In dieser Hinsicht kann sich die künftige Begrünung des Geländes zwischen Bürgermeister-Grünzweig-Straße und Lorientallee bei klimagerechter Anlage für die Stadtmitte positiv auswirken. Die klimaökologisch positivere Wirkung der west-nordwestlichen Belüftung gegenüber der nordöstlichen Belüftung des Stadtteils Mitte wird an den höheren Abkühlungsraten sichtbar. An Tagen mit überwiegender nordöstlicher Belüftung bleibt in der Stadtmitte eine intensivere Wärmeinsel bestehen.



KLIMAWIRKUNG von GRÜN - und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Belüftungssituationen

Häufigkeitsverteilung von Windrichtung und -geschwindigkeit

Zeitraum: Winterhalbjahr

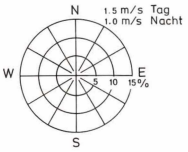


Abb. 7b:
Belüftungssituationen im Stadtteil Mitte im Winter.

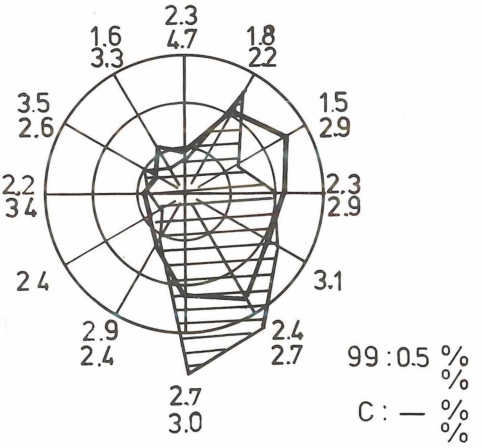


Abb. 7c: Belüftungssituation bei gegenläufigem Höhenwind an der Station BASF E 100 (110 m Höhe).

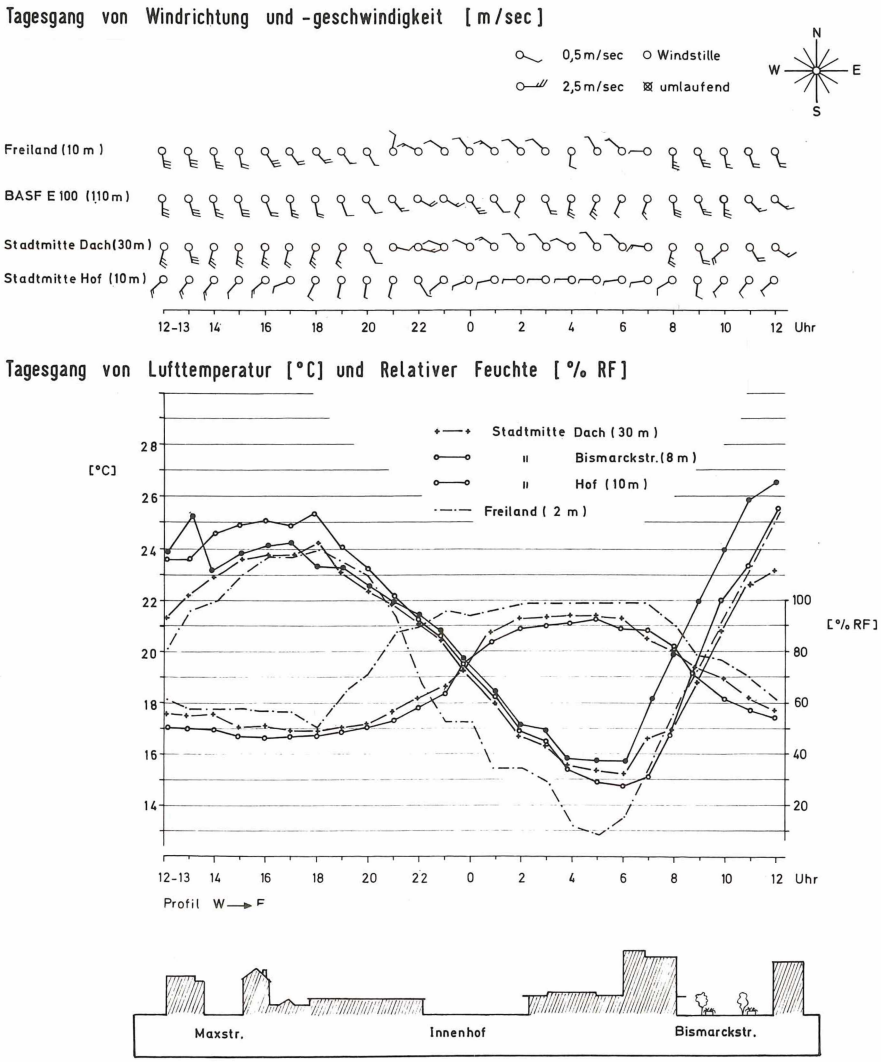


Abb. 8a: Wärme- und Strömungssituation am 30./31. 5. 1981.

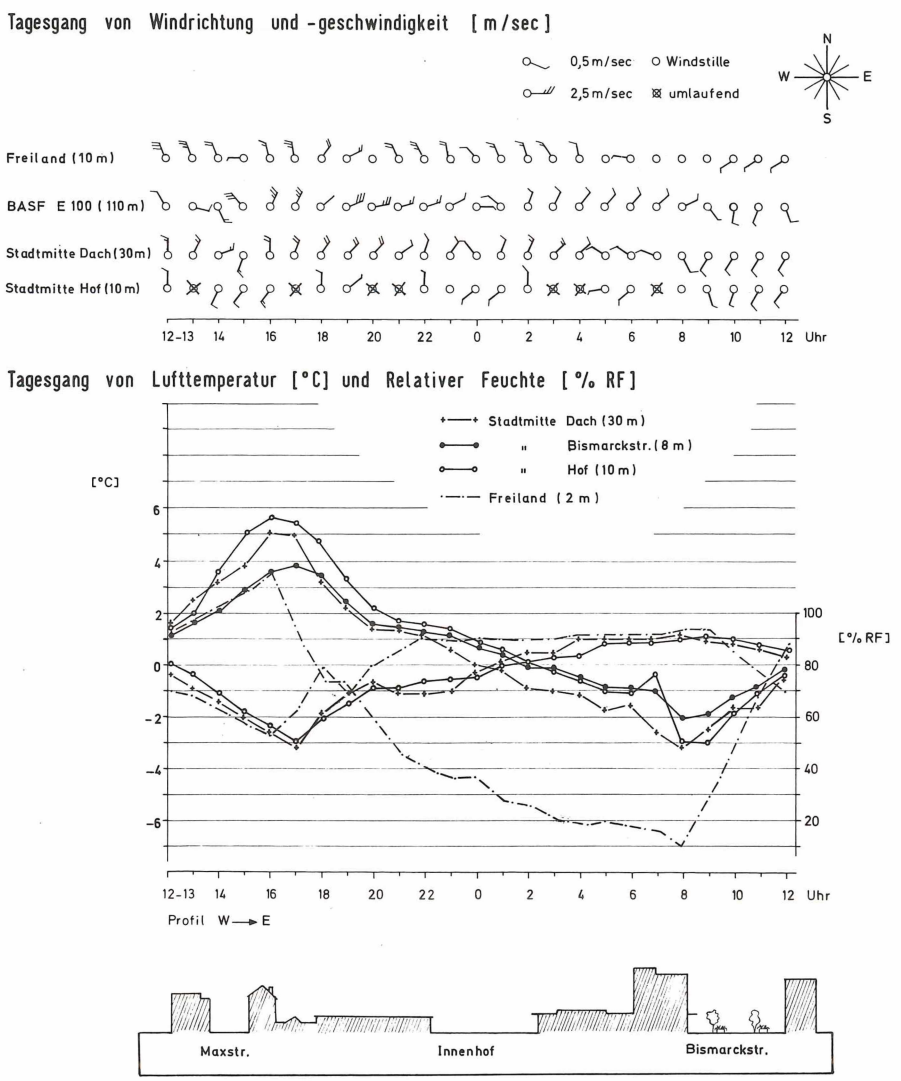


Abb. 8b: Wärme- und Strömungssituation am 14./15. 2. 1981.

Betrachtet man hierzu allerdings die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung und -geschwindigkeit an den Belüftungssituationen, so wird deutlich, daß dieser sehr positive Effekt der westlichen Freiräume für den Stadtteil Mitte fast nur in Belüftungssituationen mit gleichsinnigem (westlichen) Höhenwind eintritt. So ist die Belüftungswirkung des Rheins für die Klimagüte der Stadtmitte dominierend.

Die Belüftungswirkungen, die bisher nur auf sommerliche Verhältnisse bezogen wurden, sind auch in der kälteren Jahreszeit von Bedeutung. Zur Verdeutlichung der winterlichen Verhältnisse sei auf die Abb. 8b verwiesen. Es zeigt sich nämlich, daß an austauscharmen Wintertagen ähnliche Belüftungsprozesse wie im Sommer stattfinden. An einem solchen Tage, der ganztägig von Bodeninversionen im Freiland gekennzeichnet wurde, stellten sich innerhalb der regionalen Bodeninversion schon am Tage die für die Stadtmitte typischen Belüftungsverhältnisse ein. Mit relativ geringen Windgeschwindigkeiten werden von der warmen Stadt die Luftmassen im Dachniveau aus dem Nordostsektor angezogen, wobei die fast gleichsinnige Höhenströmung an der Station BASF E 100 diese Strömungsrichtung begünstigt. Auffällig ist, daß sich sowohl im Freiland als auch im Hof der Stadtmitte eine sehr seltene Luftruhe einstellt. An den Temperaturverläufen ist abzulesen, daß die winterliche Energiezufuhr einen schärferen Stadt – Freiland Gegensatz bewirkt als bei sommerlicher Einstrahlung. Im Winter kann dieser Gegensatz häufiger bis zu 7° C betragen. Auch hier zeigt sich wieder die höhere Effizienz der nordwestlichen Belüftung am morgendlichen Minimum.

Die atmosphärische Schichtung der Stadtmitte (Temperaturschichtung) wird in Abb. 9 dargestellt. Der geringere Anteil stabiler Schichtung verdeutlicht die vertikale Wirkung der Bebauung auf die Austauschbedingungen. Gegenüber dem Freiland werden durch die Wärmespeicherung der Gebäude die bodennahen Luftschichten labilisiert. Dadurch entsteht eine mehrere Dekameter mächtige Mischungsschicht. In dieser Mischungsschicht werden wegen des kleinräumigen Austauschs auch nur selten Luftstagnationen registriert (s. Abb. 10).

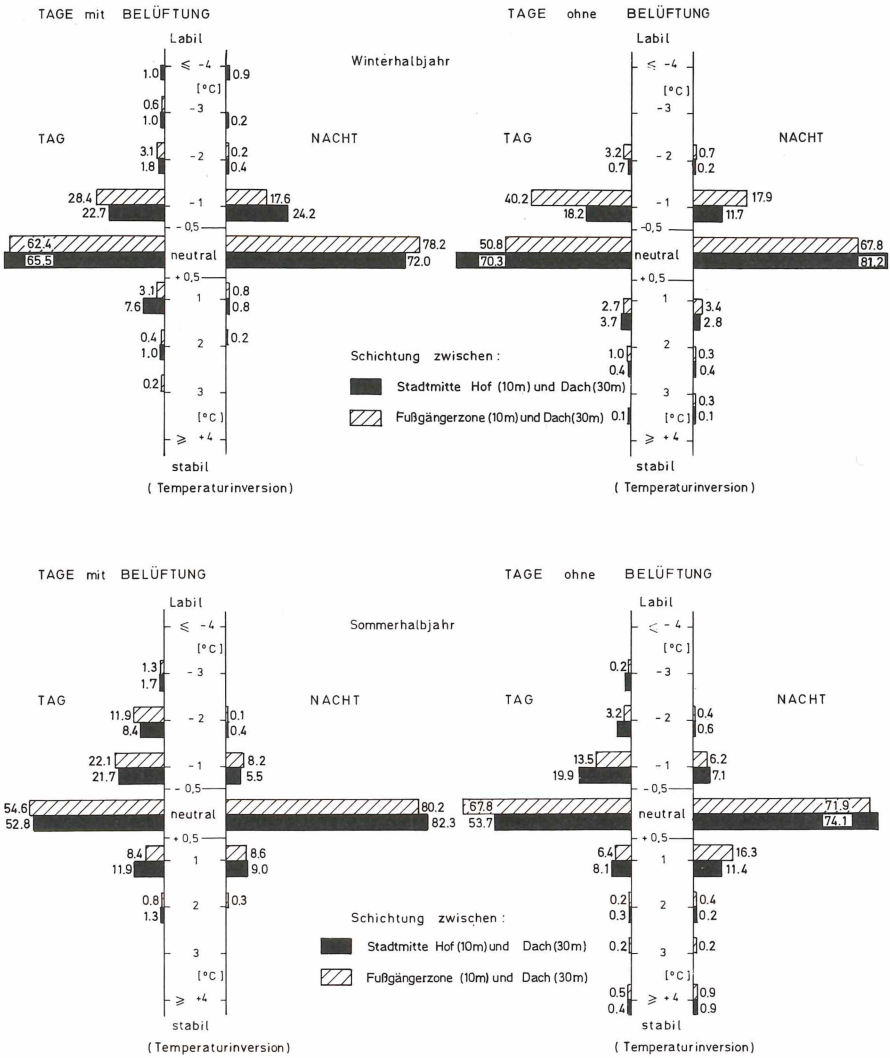
Am gesamten Luftaustausch des Stadtteils Mitte wird deutlich, daß trotz der Luftaustauschprozesse mit randlichen Freiräumen die Wärmeinsel nur teilweise abgebaut wird. Durch die Erhöhung des Grünanteils in Form von Dachträgern auf den Rückgebäuden könnte eine verstärkte Abkühlung den Eingriff der Belüftung fördern. Das Grün müßte allerdings wesentlich ausgedehnter angelegt sein als in der Fußgängerzone, dessen Wirkungen kaum meßbar sind.

Der Luftaustausch muß deshalb von höheren Luftmassen und von Belüftungen über die stadtrandlichen Freiräume getragen werden, wobei gegenüber den engen Straßenräumen größere Freiräume wie der Hof im Anwesen Willersinn besser ventiliert werden, da Strömungen im Dachniveau in diesen Freiräumen bis zum Boden durchgreifen können. Die passive Wirkung derartiger Freiräume ist gerade in Belüftungssituationen immer wieder gegeben.

6.1.6. Ventilationsgrad

Entsprechend der Unterscheidung der Wirkungsweise der Ventilation wurde für die Durchlüftung und Belüftung der jeweilige Anteil am Klimageschehen berechnet und in Abb. 10 getrennt nach Richtungen dargestellt.

Als Grenzwert der Windgeschwindigkeit wird nach den Erkenntnissen des klimatologischen Auswahlverfahrens ein empirischer Wert von 2,5 m/sec angesetzt. Über dieser Windgeschwindigkeit ist die städtische Wärmeinsel nurmehr schwach ausgebildet. Zudem können bei höheren Windgeschwindigkeiten Luftmassen rascher bis zum Boden durchgreifen und lokale Beeinflussungen ausräumen.



KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN - und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Häufigkeitsverteilung in [%] der atmosphärischen Schichtung

Bereich: Stadtmitte

labile Schichtung - Temperaturabnahme mit der Höhe
neutrale " - gleichbleibende Temperatur
stabile " - Temperaturzunahme mit der Höhe

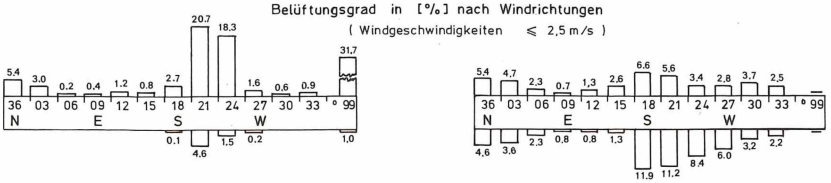
Abb. 9: Häufigkeitsverteilung der atmosphärischen Schichtung im Stadtteil Mitte.

Station : Stadtmitte Hof

Station : Stadtmitte Dach

Winterhalbjahr
(Okt. 80 - März 81)

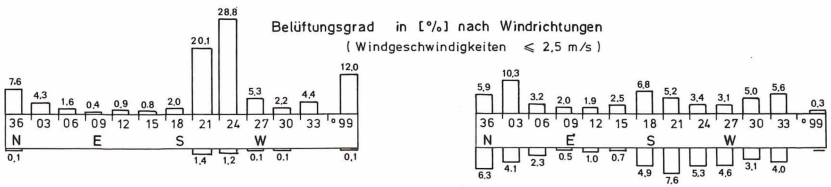
Belüftungsgrad in [%] nach Windrichtungen
(Windgeschwindigkeiten ≤ 2,5 m/s)



Durchlüftungsgrad in [%] nach Windrichtungen
(Windgeschwindigkeiten ≥ 2,6 m/s)

Sommerhalbjahr
(April 81 - Sept. 81)

Belüftungsgrad in [%] nach Windrichtungen
(Windgeschwindigkeiten ≤ 2,5 m/s)



Dürchlüftungsgrad in [%] nach Windrichtungen
(Windgeschwindigkeiten ≥ 2,6 m/s)

		Stadtmitte Hof (10 m)	Dach (30 m)
Gesamtbelüftungsgrad	Winter	87.5 %	42.1 %
	Sommer	91.1 %	55.3 %
Gesamtdurchlüftungsgrad	Winter	7.4 %	57.9 %
	Sommer	2.9%	44.6 %
Gesamtstagnationsgrad (Geschwindigkeit ≤ 0,5m/s)	Winter	5.1 %	— %
	Sommer	6.0 %	0.1 %

KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN - und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Ventilation

- Belüftung / Durchlüftung / Stagnation

Bereich : Stadtmitte

Abb. 10: Ventilationsgrad im Stadtteil Mitte.

Im Hof überwiegt immer und bei allen Richtungen die Belüftung, was sich auch an dem Anteil umlaufender Windrichtungen ablesen läßt. Höhere Windgeschwindigkeiten mit Durchlüftungswirkung werden fast ausschließlich bei südwestlichen Windrichtungen festgestellt, die bevorzugter in den Hof eingreifen können.

Im Dachbereich ist die hohe Durchlüftungswirkung der südlichen und südwestlichen Winde ebenfalls sehr deutlich, da diese im Rheingraben bei austauschintensivem Wetter häufig auftreten. Gleichzeitig sind auch im nördlichen Sektor höhere Durchlüftungsanteile festzustellen. Die nordöstliche Belüftungswirkung tritt besonders gehäuft im Sommerhalbjahr in Erscheinung und führt zum höchsten Anteil einer Belüftungsrichtung überhaupt.

Bezogen auf alle Richtungen wird deutlich, daß die Ventilationsintensität innerhalb des Hofes wesentlich schwächer ist als im Dachbereich. Im Hof kann zu über 90 % von Belüftung gesprochen werden, da er einmal durch die fast 30 m hohe Randbebauung abgeschirmt ist und zum anderen die thermische und dynamische Turbulenz eine Minderung der Ventilation bewirkt. Unter nächtlichen Belüftungsbedingungen treten sogar Stagnationserscheinungen zu 5 – 6 % ein, die im Dachniveau schon keine Rolle mehr spielen.

Im Dachbereich überwiegt im Winterhalbjahr mit 57,9 % die Durchlüftungswirkung. Die prozentualen Werte in der Belüftung zeigen aber auch, daß es neben den gut ventilierten Situationen auch fast gleich häufig zu geringer wirksamen Belüftungssituationen kommt. Im Sommerhalbjahr überwiegen mit 55,3 % diese Belüftungssituationen im Bereich des Dachniveaus.

Der auch im Dachniveau noch sehr hohe Anteil der Belüftung zeigt deutlich, daß die im Rheingraben im Freiland ungünstigen Ventilationsbedingungen innerhalb dichter Bebauung noch weiter geschwächt werden. Die Durchmischung und der Abtransport von belasteten Luftmassen kann daher nur verzögert stattfinden.

6.1.7. Bioklima

In Beckenlagen, wie dem Rheingraben, treten gehäuft bioklimatische Belastungssituationen auf. Nach der bioklimatischen Einteilung der Bundesrepublik (BECKER & WAGNER 1970) zählt der Rhein-Neckar-Raum zu den belastetsten Bereichen. Deshalb werden zur Beurteilung der einzelnen Stadtbereiche auch bioklimatische Parameter herangezogen.

Bioklimatische Parameter beurteilen die Wirkung der klimatischen Güte auf das menschliche Empfinden. Bioklimatische Belastungen und ihre Ursachen sollten daher in keiner stadtklimatischen Beurteilung fehlen. Klimaökologische Ausgleichsleistungen sind für das menschliche Wohlempfinden in diesem Bereich besonders wichtig. Sie sind mit der verminderten Ventilation und der Wärmeinsel gleichrangig zu gewichten, da ihre Häufigkeit und Intensität auch von den lokalen Wärme- und Ventilationssituationen bestimmt werden.

Als bioklimatische Parameter werden in der Untersuchung Schwüle, Wärmebelastung und Abkühlungsgröße analysiert, deren negative Wirkungen zwar auf die wärmere Jahreszeit beschränkt sind, die wegen ihrer ungünstigen Auswirkungen auf den menschlichen Organismus jedoch als wichtige Umweltgrößen einzustufen sind.

Werden definierte Grenzwerte überschritten, so ist das klimatische Milieu nicht mehr in Harmonie mit dem Wärmeregulationsvermögen des Menschen, das thermische

Gleichgewicht läßt sich dann nur schwer aufrechterhalten. Es kommt zu Befindensstörungen und im extremen Fall zu krankhaften Reaktionen (Hitzschlag). Personengruppen mit verminderter körperlicher Kondition wie Asthmatiker, Herz-/Kreislaufkranke, Übergewichtige etc. reagieren schon frühzeitig und stärker als andere auf diese Umweltbelastung.

In den Tabellen 5a, b ist für den Bereich Stadtmitte die Häufigkeit von Schwüle- und Wärmebelastung im Sommer 1981 angegeben. Als Grenzwert für Schwüle gilt ein Dampfdruck von ≥ 14.1 mm Hg (LINKE 1957: 202 ff). Wird dieser Wert überschritten, kann von Schwüle gesprochen werden. Betont wird bei diesem Maß die Wirkung der Luftfeuchte in Abhängigkeit von der Temperatur. Die infrarote Wärmestrahlung und die Ventilation werden bei der Größe des Dampfdrucks nicht direkt berücksichtigt. Neben kurzzeitigen Belastungen am Abend können auch beim Einbruch schwül-warmer Luftmassen ganztägige Grenzwerte überschritten werden, wobei es von der Intensität der Ventilation abhängt, ob dies auch als belastend empfunden wird.

Als Grenzwert für die Wärmebelastung wird ein Wert der Äquivalenttemperatur von ≥ 49° angesehen (FAUST 1978), wobei dieses Kriterium verstärkt die Lufttemperaturverhältnisse herausstellt. Belastungssituationen treten hier im Laufe des Tages hauptsächlich zwischen Mittag und Abend auf. Die Äquivalenttemperatur berechnet sich aus Temperatur + zweimal Dampfdruck. Bei 24° C und 13 mm Dampfdruck wird die Belastungsgrenze mit 50° schon überschritten. Kurorte dürfen z. B. im Jahr nicht mehr als 25 Tage mit Wärmebelastung aufweisen.

Durch den Vergleich mit den Tabellen 5a, b wird deutlich, daß mit der hohen Baudichte der Stadtmitte auch die höchste Anzahl von Tagen mit Schwüle- und Wärmebelastung einhergeht. Von Mai bis August treten zu über 40 % der Tage Schwüle und zu über 60 % der Tage Wärmebelastungen ein. Im Freiland sind die Schwüleverhältnisse mit 43.1 % kaum verschieden von der Kernstadt. Die Wärmebelastung ist hingegen mit 33.3 % deutlich geringer als in der Bebauung, was durch die schnelle Temperaturabnahmen am Abend bedingt ist. Im Bereich der Schwülehäufigkeit wirkt sich die Bebauung nicht verstärkend aus.

Da über die Häufigkeit hinaus auch die Andauer von Belastungen bedeutsam ist, wurde zur Beurteilung aus längerfristiger Andauer (≥ 5 Std.) zu kurzfristiger Andauer (1–4 Std.) ein Quotient gebildet. Übersteigt dieser Andauerquotient 1.0, so überwiegt das längerfristige Auftreten. Für die Schwüle- und Wärmebelastung heißt dies, daß Belastungen nicht schnell abgebaut werden, sondern in 2 von 3 Fällen über mehr als 5 Std. bestehen bleiben.

Die Ursache für die verstärkte Schwülebelastung im Dachniveau ist in der nordöstlichen Belüftung und der vertikalen Wärmeinsel zu sehen. Nach Sonnenuntergang kühlt das Dachniveau durch die Wärmespeicherung der Baumassen nur sehr langsam ab. Die häufige nördliche Belüftung, die im Dachniveau rascher vordringen kann, führt nicht nur warme, sondern auch sehr feuchte Luftmassen in diesen Bereich. Da die bodennahen Luftmassen, die aus diesem Belüftungssektor kommen, über die ausgedehnten Wasserflächen vom Rhein und das Mannheimer Hafenviertel hinwegströmen, können sie sich dort mit Wasserdampf vollsaugen.

Die Belüftungswirkung des Rheins scheint wegen dieser Schwüleverstärkung bioklimatisch nicht allzu günstig. Die etwas höhere Ventilation des Dachniveaus senkt allerdings das Belastungsempfinden, da über die Ventilation eine verbesserte Abkühlung möglich ist.

Tabelle 5a: Klimawirkungen von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein
Bereich: Stadtmitte

Häufigkeit der Schwülebelastung (Dampfdruck ≥ 14.1 mm HG) bezogen auf den Sommer 1981 (Mai – August)

Station	absolute und relative Anzahl der Tage mit Schwüle (Dampfdruck ≥ 14.1 mm Hg)		Andauer der Schwüle in Stunden kurzfristig 1 – 4 Std.	langfristig ≥ 5 Std.	Andauerquotient der Schwüle (Berechnung s. Text)
	Tage	%			
Stadtmitte Dach (30 m)	52	42.3	9	43	4.7
Stadtmitte Hof (10 m)	53	43.1	19	34	1.8
Stadtmitte Fußgängerzone (8 m)	54	43.9	21	33	1.6
Freiland westl. Oggersheim (2 m)	53	43.1	17	36	2.1

Tabelle 5b: Klimawirkungen von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein
Bereich: Stadtmitte

Häufigkeit der Wärmebelastung (Äquivalenttemperatur ≥ 49°) bezogen auf den Sommer 1981 (Mai – August)

Station	absolute und relative Wärmebelastung (Äquivalenttemperatur)		Andauer der Wärmebelastung kurzfristig 1 – 4 Std.	langfristig ≥ 5 Std.	Andauerquotient
	Tage	%			
Stadtmitte Dach (30 m)	80	65.0	25	55	2.2
Stadtmitte Hof (10 m)	75	63.4	24	50	2.1
Stadtmitte Fußgängerzone (8 m)	78	63.4	24	50	2.1
Freiland westl. Oggersheim (2 m)	41	33.3	14	27	1.9

Durch die Abkühlungsgröße (mcal/cm² sec) wird die bioklimatische Güte unbeeinflußt von den lokalen Feuchteverhältnissen ausgedrückt. Die Abkühlungsgröße errechnet sich nach HILL (in LINKE 1957) aus dem Zusammenspiel von Lufttemperatur und Windbewegung. Die Abkühlungsgröße bezieht sich auf die Wärmeabgabe eines Körpers

infolge der Ventilation. Werte dieser Wärmeabgabe werden zur Bewertung des klimatischen Milieus definiert. Je geringer die Wärmeabgabe des Körpers ausfällt, desto höher ist die bioklimatische Belastung. „Belastende" und „schonende" Abkühlungsgrößen gelten in der Klima-Therapie als ungünstig. Reizfaktoren hingegen sorgen für Umweltbedingungen, die das Wohlbefinden positiv beeinflussen und in Erholungsgebieten dominant sein müssen (FAUST 1978).

Tabelle 5c: Abkühlungsgröße im Stadtteil Mitte (in % bezogen auf Stunden)
Zeitraum: Mai – August 1981

Stufe	Dach	Hof	Fußgängerzone	Freiland westl.
belastend 0 – 10 (mcal/cm². sec)	15.8 %	32.8 %	34.0 %	11.1 %
schonend 10 – 20 (mcal/cm². sec)	61.7 %	62.3 %	62.1 %	61.0 %
reizmild 20 – 30 (mcal/cm². sec)	20.9 %	5.9 %	3.8 %	23.9 %
reizstark 30 – 40 (mcal/cm². sec)	1.5 %	–	–	5.1 %
unterkühlend über 40 (mcal/cm². sec)	–	–	–	0.1 %

Belastungswerte unter 10 mcal/cm² sec werden in der Tabelle gerade im Hof und in der Fußgängerzone zu über ⅓ des Sommerhalbjahrs registriert. Auch bei dieser Kenngröße werden in der Stadtmitte die höchste Anzahl der Belastungen festgestellt. Abkühlungsgrößen über 30 m cal/cm² sec treten gar nicht auf. Der Dachbereich, der in der Schwüle so ungünstig abschnitt, verzeichnet durch seine höhere Ventilation geringere Belastungen.

Am Beispiel eines Tages, an dem alle bioklimatischen Parameter die Grenzwerte überschritten, soll die Wirkung des Luftaustauschs auf die bioklimatischen Verhältnisse der Stadtmitte veranschaulicht werden (Abb. 11).

Während in der Fußgängerzone und im Hof der Bereich „belastend" ganztägig nicht verlassen wird, bewirkt die höhere Ventilation im Dachniveau, daß die Belastungen weniger intensiv sind. Zwischen 4.00 und 5.00 Uhr morgens wird kurzzeitig der Belastungsbereich verlassen, was in engem Zusammenhang mit Zufuhr kühlerer Luftmassen vom Rhein her steht (s. Windrichtung). Werden in der ersten Nachthälfte eher warm-feuchte Luftmassen in die Stadtmitte transportiert, können die intensiven Belastungen des Tages und des Nachmittages am Abend kaum verringert werden. Da sich zwischen Hof und Fußgängerzone einerseits und dem Dachniveau andererseits nur geringfügige thermische Unterschiede zeigen – die Fußgängerzone ist am späten Nachmittag eher kühler – werden die extrem geringeren Abkühlungsgrößen hauptsächlich durch die um 70 % verringerte Ventilation verursacht.

Die insgesamt sehr hohe bioklimatische Belastung in Häufigkeit, Andauer und Intensität verdeutlichen die ungünstigen Umweltbedingungen im Bereich Stadtmitte in der wärmeren Jahreszeit. Der Luftaustausch, der sich meist über den Rhein vollzieht,

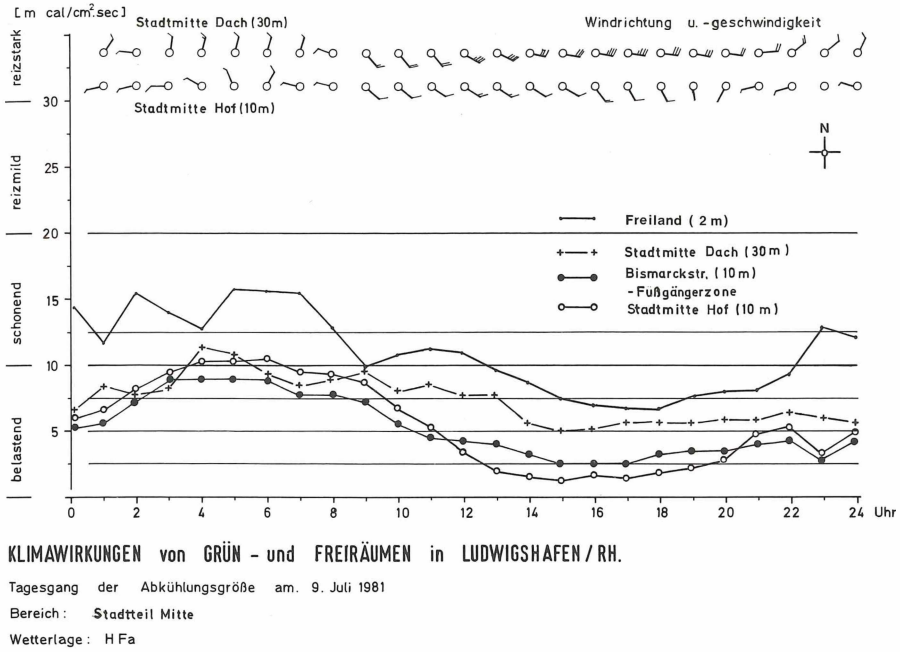


Abb. 11: Tagesgang der Abkühlungsgröße im Stadtteil Mitte am 9. 7. 1981.

bewirkt zwar, daß die Baumassen und die Luft in der zweiten Nachthälfte deutlich abkühlen, seine Wirkung ist im Vergleich zum Freiland westlich Oggersheim nicht ausreichend.

Die im Rheingraben nicht zu vermeidenden bioklimatischen Belastungen werden im Freiland durch stärkere Abkühlung und höhere Windgeschwindigkeit in der Nacht deutlich abgebaut. Im Gang der Abkühlungsgröße ist zu erkennen, daß die Wärmeinsel und die verringerte Ventilation in der Bebauung auch bioklimatische Wirkungen nach sich ziehen.

6.2.0. Stadtteil West – Hauptfriedhof

Westlich des Stadtteils Mitte und der Bahnlinie Ludwigshafen/Mainz liegt zwischen Frankenthaler Straße und A 650 der hoch verdichtete Wohnbereich des Stadtteils West. Über den westlich anschließenden Hauptfriedhof geht dieser Bereich in trichterförmiger Öffnung ins Freiland über. Das landwirtschaftlich genutzte Freiland, das sich bis Oggersheim streckt, stellt zusammen mit dem Hauptfriedhof ein ausgedehntes Grün- und Freiraumpotential dar, dessen Fläche die bebaute Fläche des Stadtteils West bei weitem überwiegt. In der Stadtklimauntersuchung von FEZER/SEITZ wurde diesem Freiraum eine sehr bedeutsame Belüftungsfunktion für die Innenstadt zugesprochen und mit der Forderung nach weitgehendster Freihaltung der westlichen Stadtachse verknüpft. Dennoch ist im Flächennutzungsplan der Stadt Ludwigshafen ein großer Teil der Freiraumfläche für weitere Bebauung vorgesehen.

6.2.1. Wärme- und Strömungssituation am 14./15. 8. 1981

Die beispielhaft für Belüftungssituationen aufgenommenen Profile der Lufttemperatur in Abb. 12 zwischen Oggersheim und dem Stadtteil Mitte verdeutlichen die unterschiedlichen Verhältnisse im Freiraum und im bebauten Raum. Durch intensive Ventilation, die bis zum Boden durchgreift, und dem daraus resultierenden Luftaustausch zwischen wärmeren und kühleren Luftmassen, ist der Freiraum schon am Tage um 1 bis 1,5° C kühler. Wärmespitzen stellen sich am Tage durch die Siedlung an der Bayreuther Straße, am Schlachthofgelände und in der sehr dichten Bebauung des Stadtteils West (Völkerstraße/Waltraudenstraße/V.-Bauerstraße) ein. Der höhere Grünanteil in der V.-Bauersiedlung bewirkt lokal am Tage und auch in der Nacht einen Kühleffekt. Die Auswirkung dieser Wohnumfeldbegrünung bleibt jedoch auf die Fläche und unmittelbaren Straßenräume um die Bruno-Körner-Straße beschränkt. Schon auf der Rückseite der Gebäude in der V.-Bauerstraße ist die Luft meist 1 bis 2° C wärmer.

Im Laufe der Nacht kühlen die landwirtschaftlichen Flächen im Freiraum wesentlich intensiver ab als bebaute Flächen. Von den kältesten Stellen nördlich der Stadtgärtnerei steigt die Temperatur bis in den Stadtteil West um 4 bis 5,5° C und zur Stadtmitte um 5 bis 6° C an.

Der Bereich des Hauptfriedhofs liegt am Übergang. Er ist tags wie nachts um einiges wärmer als das Freiland; allerdings noch wesentlich kühler als die bebauten Bereiche des Stadtteils West. Damit puffert er die beiden Temperaturextreme. Bedingt wird dies durch seinen teilweise alten und dichten Baumbestand, in dem die Gräberfelder wie Lichtungen in einem Wald eingebettet sind. Die bis zu 20 m hohen Bäume erschweren den lokalen Luftaustausch einerseits durch thermische Pufferung (flacher Übergang von warm zu kalt) und zum anderen durch die Bremsung der Luftströmungen aus dem Freiland.

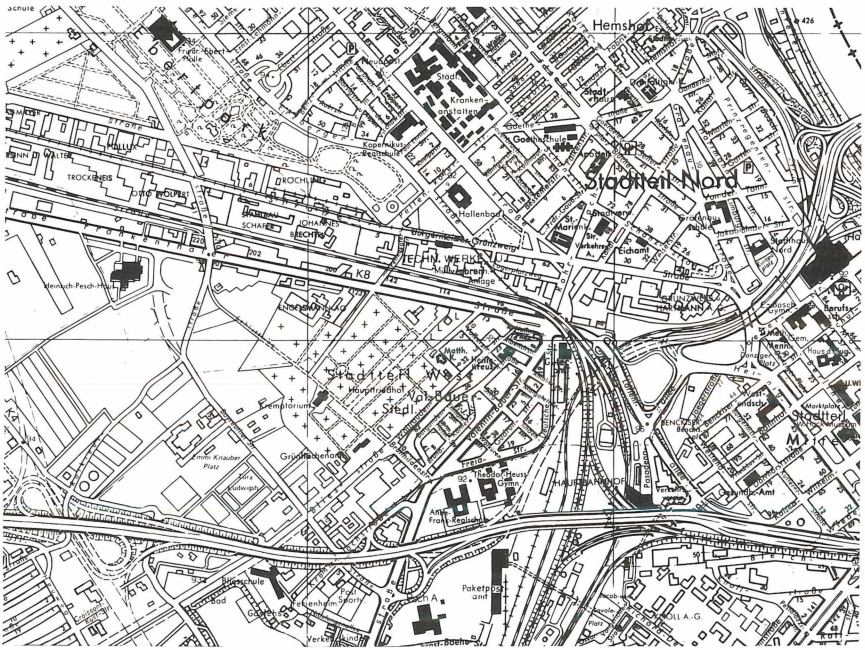


Abb. 12a

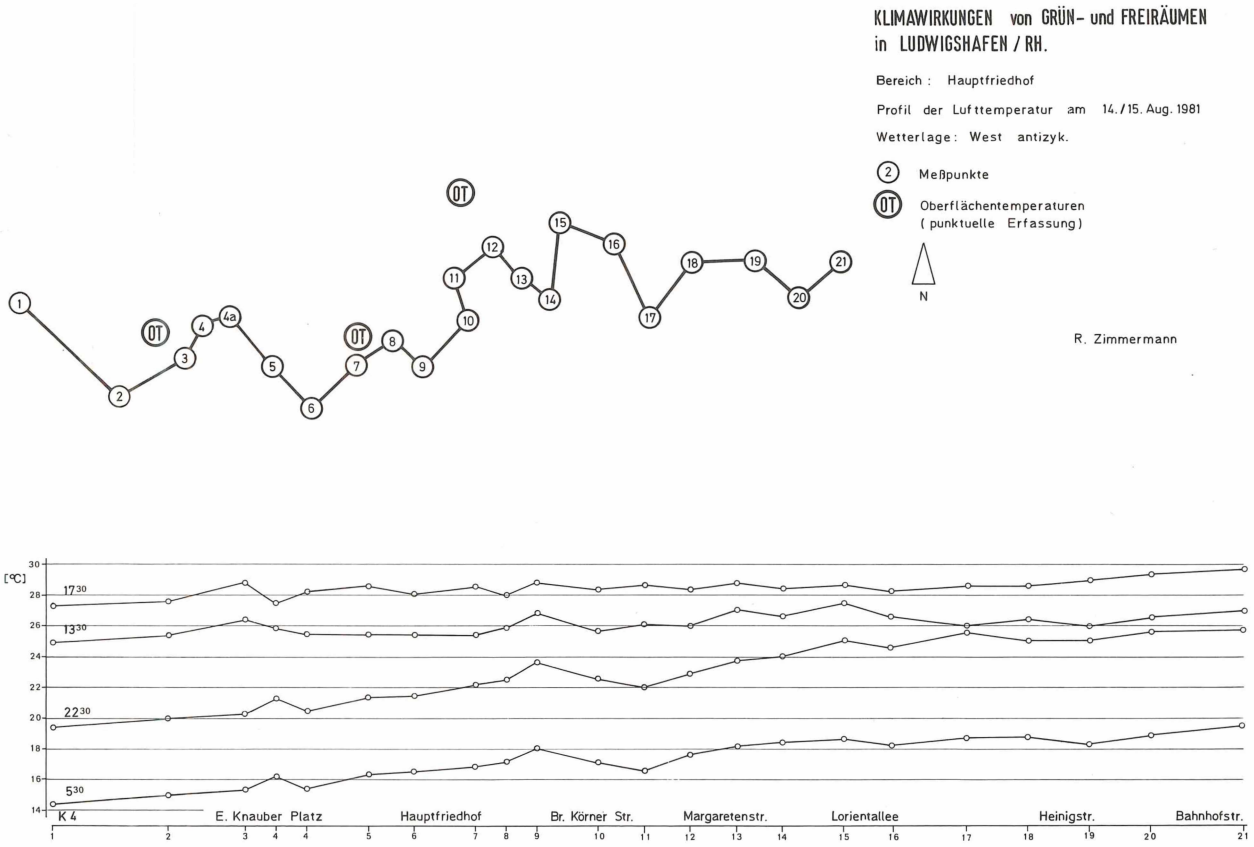


Abb. 12b: Überblick und Grundriß Hauptfriedhof. Profile der Lufttemperatur am 14./15. 8. 1981.

Bemerkenswert an den Temperaturprofilen ist einmal auch die Siedlung an der Bayreuther Straße. Obwohl das rund 2 ha große Gebiet rings von Freiland umgeben ist, wärmt es noch im Bereich des morgendlichen Minimums die umgebende Lufthülle um 1° C auf. Hier verdeutlicht sich, daß schon ein kleiner Siedlungskomplex mit viergeschossiger Bebauung und sehr hoher Versiegelung des Innenhofs als Stellfläche eine Wärmespeicherung besitzt, die im Lee der Siedlung bis in einen Bereich von ca. 80 bis 100 m graduell unterschiedlich die thermischen Eigenschaften der Luft beeinflußt.

Zum anderen wird die Kühlwirkung des Bereichs in Strahlungsnächten auch durch Einflüsse der nordwestlichen Regionalströmung beeinträchtigt. Je nach Geschwindigkeit wird die Wärmeglocke des Industriegebiets an der Frankenthaler Straße in den Freiraum verfrachtet. Diese Wärmefahne erstreckt sich bei Windgeschwindigkeiten von 1 bis 2 m/sec ca. 100 m in den Freiraum hinaus. Bei Geschwindigkeiten von 3 bis 3,5 m/sec in Strahlungsnächten konnte festgestellt werden, daß diese Wärmefahne sogar in 100 bis 200 m Entfernung zu ansteigenden Lufttemperaturen führt. Dies bedeutet, daß die über den Ackerflächen produzierte Kaltluft sich mit den wärmeren Luftmassen aus dem Industriegebiet vermischt, so daß im Laufe der Nacht in 100 bis 200 m Entfernung südlich der Frankenthaler Straße die Luft um 0,5 bis 1,5° C nachweisbar wärmer ist, als bei gleichen Oberflächen am Rotkreuzweg.

Diese Wärmefahne im Lee des Baukomplexes wurde bisher nur von wenigen Untersuchungen erfaßt (BAND 1969). Bei der planerischen Bewertung ist dieser advektive Wärmetransport bedeutsam, da durch ihn der kühlende Flächenanteil – graduell abgestuft um 5- 20 % – eines Freiraum verringert wird. Dementsprechend sind Freiräume unter Einbezug des lokalen Strömungsgeschehens größer zu dimensionieren, will man die gleiche Ausgleichsleistung erreichen.

Diese advektiven Wärmeverlagerungen sind für Wechselbeziehungen zwischen wärmeren und kühleren Bereichen vor allem deswegen von Bedeutung, da sich der Austausch aufgrund einer übergeordneten Strömung von warm zu kalt ergibt und nicht umgekehrt.

Am Tagesgang der Wärme- und Strömungssituation in Abb. 13 bildet sich die Wirkungsweise des Hauptfriedhofs sehr deutlich ab.

An Strahlungstagen erwärmen sich die unteren Luftschichten im Windschutz der Hecken und Baumreihen besonders stark. Gegenüber dem Freiland kühlen diese Schichten schon 2 bis 3 Stunden eher ab und bleiben während der gesamten Nacht noch unter den Freilandwerten. Begünstigt wird dies durch die zeitweise vollständige Luftruhe in den unteren 8 m.

In der höheren Atmosphäre (20 m) ist es am Tage kühler und nachts wärmer als im bodennahen Bereich, wobei sich an der früheren Abkühlung und den geringeren Temperaturen in 10 m Höhe noch ein stärkerer Einfluß der Oberflächen ersehen läßt als in 20 m Höhe. Die unteren 10 m werden von der Höhenluft nur wenig beeinflußt, während sich in der Verzögerung der Abkühlung in den hohen Luftschichten durch Warmluftschübe in der Nacht andere Einflußfaktoren zeigen. Diese Warmluftschübe verfrachten erwärmte und belastete Luftmassen in den Abendstunden mit der regionalen Nordostkomponente in diesen Bereich, wo die warme Luft über den kühleren Freilandflächen absinken kann. In der zweiten Nachthälfte erreichen mit der nordwestlichen Regionalströmung aus dem Gebiet um die Frankenthaler Straße ebenfalls in 20 m wärmere Luftmassen diesen Bereich, ohne sich in den bodennächsten Luftschichten auszuwirken. Infolge der Stagnation im bodennahen Bereich ergibt sich innerhalb des Hauptfriedhofs eine kräftige Temperaturinversion, die den vertikalen Luftaustausch zwischen kühleren und wärmeren Luftquanten unterbindet. Da innerhalb dieser Inversion unterhalb von

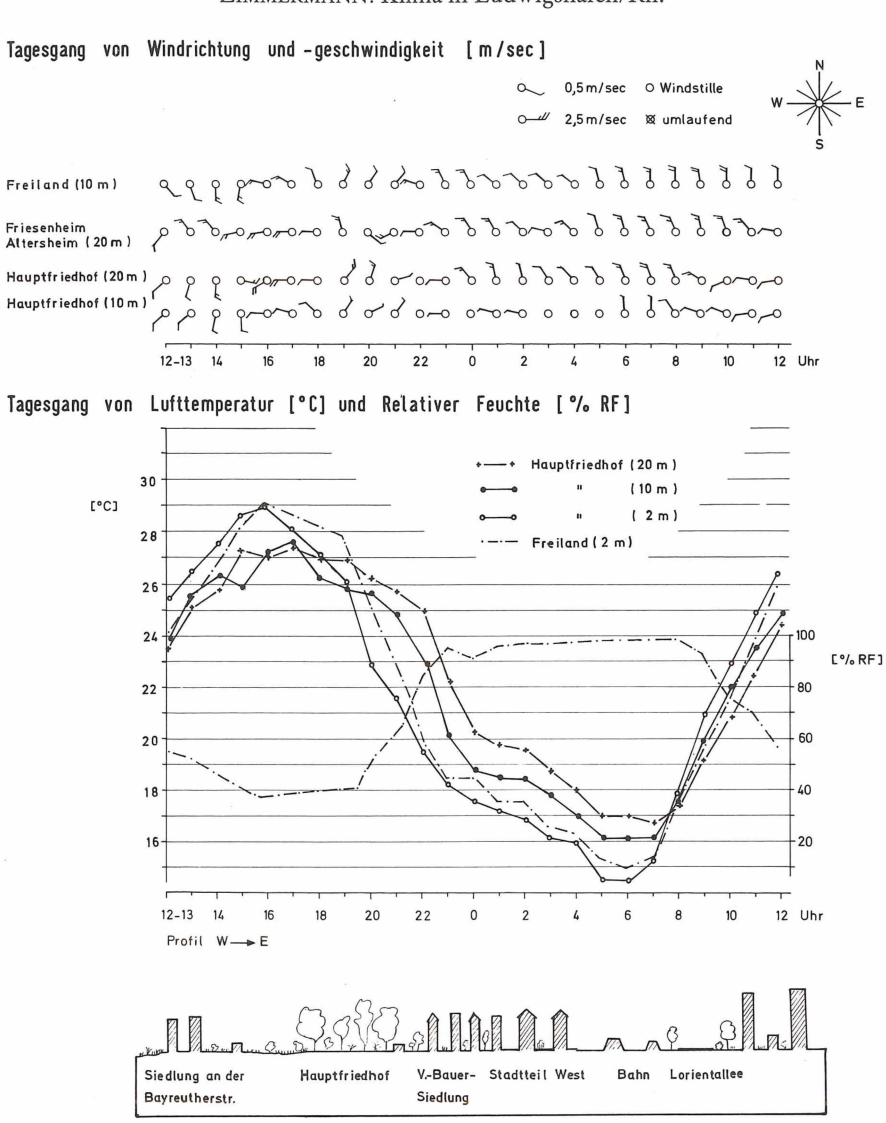


Abb. 13: Wärme- und Strömungssituation am 14./15. 8. 1981 am Hauptfriedhof.

10 m die Luft nur schwach bewegt wird, kann diese Kaltluft in den angrenzenden Stadtteil West schwer eindringen. Im bodennahen Bereich des Stadtteils trägt der Freiraum nur wenig zur Abkühlung über die Frischluftzufuhr bei. Im freieren Bereich des Schlachthofs ist die Luftbewegung günstiger.

Oberhalb des Dachniveaus strömt die frische Luft des Freilands ungehindert und setzt sich über den freieren Bahnanlagen bis zur Heinigstraße fort, wenngleich ihre Kühlwirkung hier deutlich geringer ist. In die dichte Bebauung des Stadtteils West kann diese Strömung im Dachniveau nur wenig eindringen und die Straße und Höfe von oben her belüften, da hier nur sehr geringe Freiräume innerstädtischer Art zur Verfügung stehen.

Aufgrund der strömungsabschirmenden Wirkung des Hauptfriedhofs im bodennahen Bereich kann der bebaute Bereich nur wenig von dem hohen Leistungspotential des angrenzenden Freiraums profitieren. Eine weniger dichte Bebauung mit Freiflächen wie in der V.-Bauer-Siedlung kann durch ihre eigene und durch das noch freiere Abbruchgelände des Schlachthofs wesentlich bessere klimatische Umweltbedingungen schaffen.

6.2.2. Oberflächentemperaturen

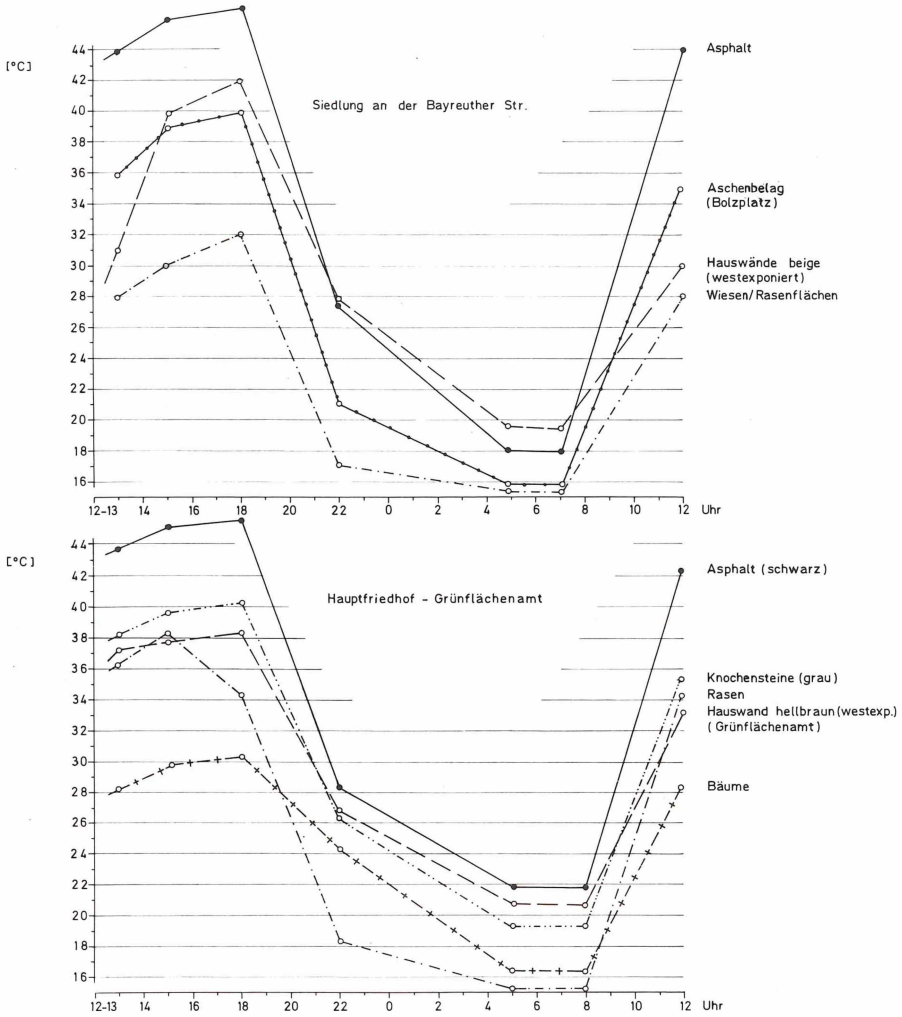
Die bei den Meßfahrten aufgenommenen Oberflächentemperaturen an der Bayreuther Straße und am Hauptfriedhof zeigen wiederum, daß vegetative Oberflächen wie Wiesen und Rasen am Tage sich weniger aufheizen und in der Nacht noch weit unter die Lufttemperaturen abkühlen. Strömungen, die über ausgedehte Grün- und Ackerflächen fließen, werden von dieser Unterlage weiter abgekühlt. Im Gegensatz hierzu liegen die Oberflächentemperaturen fester Materialien wie Asphalt, Hauswände oder Verbundpflaster deutlich über den Lufttemperaturen, so daß von ihnen eher eine Aufwärmung der Luftströmungen erfolgt. Die Massierung dieser Oberflächen gerade an der Siedlung an der Bayreuther Straße führt zu einer Erwärmung, die auch noch die Luft bis 100 m im Lee der Bebauung erfaßt (s. Abb. 14).

Die auf den Meßfahrten beim Hauptfriedhof sich zeigenden erhöhten Temperaturen gegenüber dem inneren Bereich sind ebenfalls durch den Anteil befestigter Flächen bedingt, wobei sich das Verbundpflaster in der Bliesstraße weniger erwärmend auswirkt als asphaltierte Straßenabschnitte.

Im Gegensatz zu allen Flächen verhalten sich auch hier die Aschenbeläge der Sport- und Bolzplätze. Sie heizen sich zwar am Tage stark auf, doch in der Nacht kühlen sie fast auf das Niveau der Rasenflächen ab. Die Aschenbeläge in diesem Bereich zeigen einen ähnlichen Tagesgang wie diejenigen des Südweststadions.

Strömungen, die ausgedehnte Grünbereiche überfließen, werden von der dortigen Unterlage abgekühlt.

Ackerflächen wurden bei den radiometrischen Messungen nicht berücksichtigt, da diese nach dem Vegetationsstand sich saisonal verändern. Anhand der physikalischen Kenntnis (GEIGER 1961) ist von nacktem Boden und Hackfrucht eine höhere Kühlwirkung zu erwarten als von reifem Getreide.



KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN - und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Tagesgang von Oberflächentemperaturen [°C] am 14 / 15. Aug. 1981

Bereich : Hauptfriedhof

Wetterlage: Wa (Strahlungswetterlage)

Abb. 14: Tagesgang ausgewählter Oberflächentemperaturen im Umfeld des Hauptfriedhofs.

6.2.3. Häufigkeit und Intensität von Temperaturdifferenzen zum Freiland

In den Jahresmitteln in Tab. 6 ist der Hauptfriedhof lange nicht so kühl wie die Blies oder das westliche Freiland. Mit einem Jahresmittel von 10,5° C in 2 m Höhe werden im Hauptfriedhof schon mittlere Temperaturen wie in der Bebauung des Stadtteils Süd erreicht. Verursacht werden diese höheren Temperaturmittel einmal durch die erhöhte Erwärmung im Bestand des Hauptfriedhofs im Zuge der höheren Luftruhe (Windschutz) und zum anderen durch die geringere Abkühlung während der Nacht bei windstärkeren Wetterlagen. Diese Verhältnisse zeigen sich besonders eindeutig an den hohen Maxima und den nicht so tiefen Minima wie im Freiland. Ähnlich wie auf der Parkinsel macht sich der Windschutz des Bestandes besonders in den Wintermonaten bemerkbar. So liegt das Februarmittel um 1,3° C höher als im Freiland.

In 10 m und 20 m Höhe ist der Windschutz noch ebenso deutlich an den höheren Lufttemperaturen abzulesen. Die vertikale Entfernung zu den Oberflächen führt allerdings dazu, daß die Tagesmaxima weniger hoch liegen und die nächtlichen Minima höher liegen als im bodennächsten Bereich, der von den Oberflächen am intensivsten beeinflußt wird.

Vertieft man diese Aussagen anhand der Abb. 15a/b, in der die Summenhäufigkeit von stündlichen Temperaturdifferenzen zum Freiland nach Tagen ohne Belüftung im Winterhalbjahr dargestellt ist, zeigt sich sehr deutlich, daß sich innerhalb des Bestandes kaum Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht einstellen. Ein wesentlicher Unterschied bildet sich jedoch an Tagen mit lokalem Luftaustausch.

An Belüftungstagen ist der bodennächste Bereich im Hauptfriedhof zu ca. 55 % kühler, während an Tagen ohne den Einfluß lokaler Faktoren zu über 85 % aller Stunden der Hauptfriedhof bis zu 5° C wärmer sein kann als das angrenzende Freiland. Berücksichtigt man, daß das Kollektiv mit Belüftungssituationen nur zu 34,6 % im Winterhalbjahr das Klimageschehen steuert, so werden die höheren Temperaturmittel gerade im Winter durch den Windschutz erklärlich. In Jahren, in denen das lokale Klimageschehen einen höheren Anteil einnimmt als in der Untersuchungsperiode, werden dementsprechend die Lufttemperaturmittel des Bereiches Hauptfriedhof geringer ausfallen.

Im Sommerhalbjahr in der Tab. 15b zeigt sich dieser Windschutz wiederum besonders intensiv an Durchlüftungstagen. An diesen Tagen ist der bodennächste Bereich im Hauptfriedhof bei höheren Windgeschwindigkeiten am Tage noch zu 74 % wärmer, während in der Nacht lediglich 35 % aller Stunden wärmer sind. Die höhere Luftruhe der Nacht und die Ausstrahlung der Rasenflächen bewirkt, daß sich der Bereich Hauptfriedhof in den unteren Luftschichten sehr häufig und sehr intensiv abkühlen kann. In der Summenhäufigkeitsdarstellung für die Höhe von 20 m bewirkt die intensivere Ventilation am Tage und die Belüftung der regionalen Nordwestströmung in der Nacht, daß der Kronenraum zu über 75 % wärmer ist als das Freiland westlich Oggersheim und im westlich angrenzenden Freiraum.

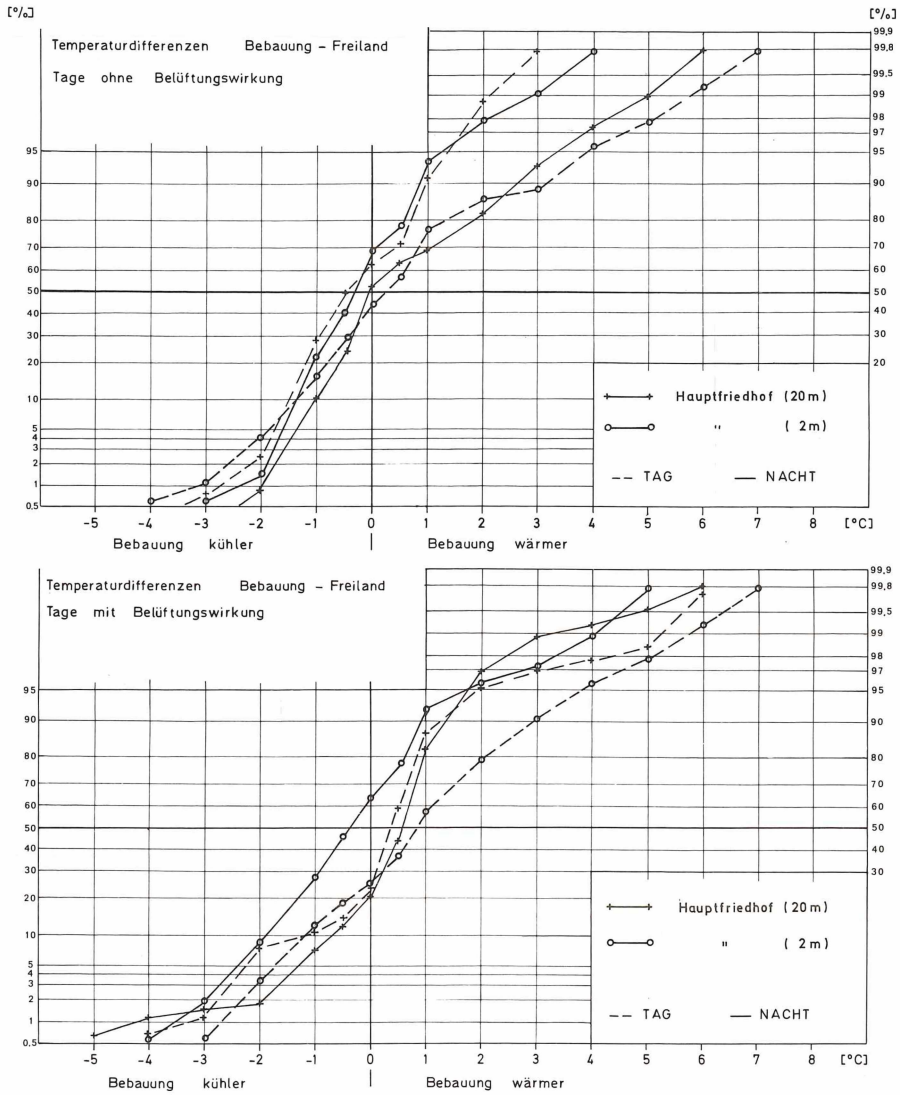
Im bodennahen Bereich kann die nächtliche Abkühlung bis zu 4° C unter die Lufttemperaturen des Freilandes absinken. Wärmere Situationen können maximal 5° C erreichen und über 2° C wärmere Situationen treten zu maximal 3 % auf. Nur selten können sich Situationen ergeben, die um 6° C höhere Temperaturen aufweisen, wobei hohe Temperaturdifferenzen von mehr als 2° C zu maximal 2 −3 % registriert werden können.

Die höchsten Temperaturdifferenzen des Bereichs Hauptfriedhof werden im bodennächsten Bereich vor allem am Tage festgestellt. Durch den zuvor beschriebenen Windschutzeffekt ergeben sich Überwärmungen von bis zu 8° C, wobei die Intensitätsstufe von über 3° C im gesamten ca. 8 − 9 % beträgt.

Tabelle 6: Klimawirkungen von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein
Bereich: Hauptfriedhof

Monatliche Mittel der Lufttemperatur 1980/81

Station	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Jahr
Hauptfriedhof 20 m	17.5	9.9	5.3	3.1	0.8	2.7	8.6	11.0	15.0	17.6	18.5	18.5	10.6
Hauptfriedhof 10 m	17.0	9.7	5.1	2.9	0.7	2.3	8.3	10.8	15.0	17.9	19.0	19.1	10.6
Hauptfriedhof 2 m	16.8	9.5	4.9	2.6	0.5	1.9	8.1	11.6	14.9	18.0	19.0	19.1	10.5
Freiland westl. Oggersheim	16.2	9.2	3.9	1.0	−0.5	0.6	8.7	9.9	13.8	16.8	18.1	18.6	9.8
Monatliche Maxima der Lufttemperatur 1980/81													
Hauptfriedhof 20 m	21.9	13.1	7.9	5.5	2.1	5.2	10.9	15.4	19.6	21.6	22.4	23.0	14.0
Hauptfriedhof 10 m	21.9	13.1	7.9	5.2	2.5	5.0	10.8	15.5	19.9	22.3	23.3	24.1	14.3
Hauptfriedhof 2 m	22.1	13.0	7.9	5.2	3.0	5.4	11.3	16.6	20.9	23.2	24.1	24.6	14.7
Freiland westl. Oggersheim	20.7	13.3	7.0	3.6	1.8	4.2	12.7	15.4	19.0	21.6	22.6	23.2	14.0
Monatliche Minima der Lufttemperatur 1980/81													
Hauptfriedhof 20 m	13.1	6.9	3.1	0.7	−0.6	0.1	6.0	7.0	10.3	13.6	14.8	14.3	7.4
Hauptfriedhof 10 m	12.1	6.5	2.8	0.5	−1.2	0.3	5.7	6.6	10.0	13.7	15.0	14.1	7.1
Hauptfriedhof 2 m	11.5	6.0	2.3	−0.1	−2.0	−1.2	5.2	5.6	9.2	13.3	14.5	13.6	6.4
Freiland westl. Oggersheim	11.3	5.5	0.5	−1.0	−2.9	−2.2	5.2	5.2	8.5	12.3	13.6	13.2	5.8



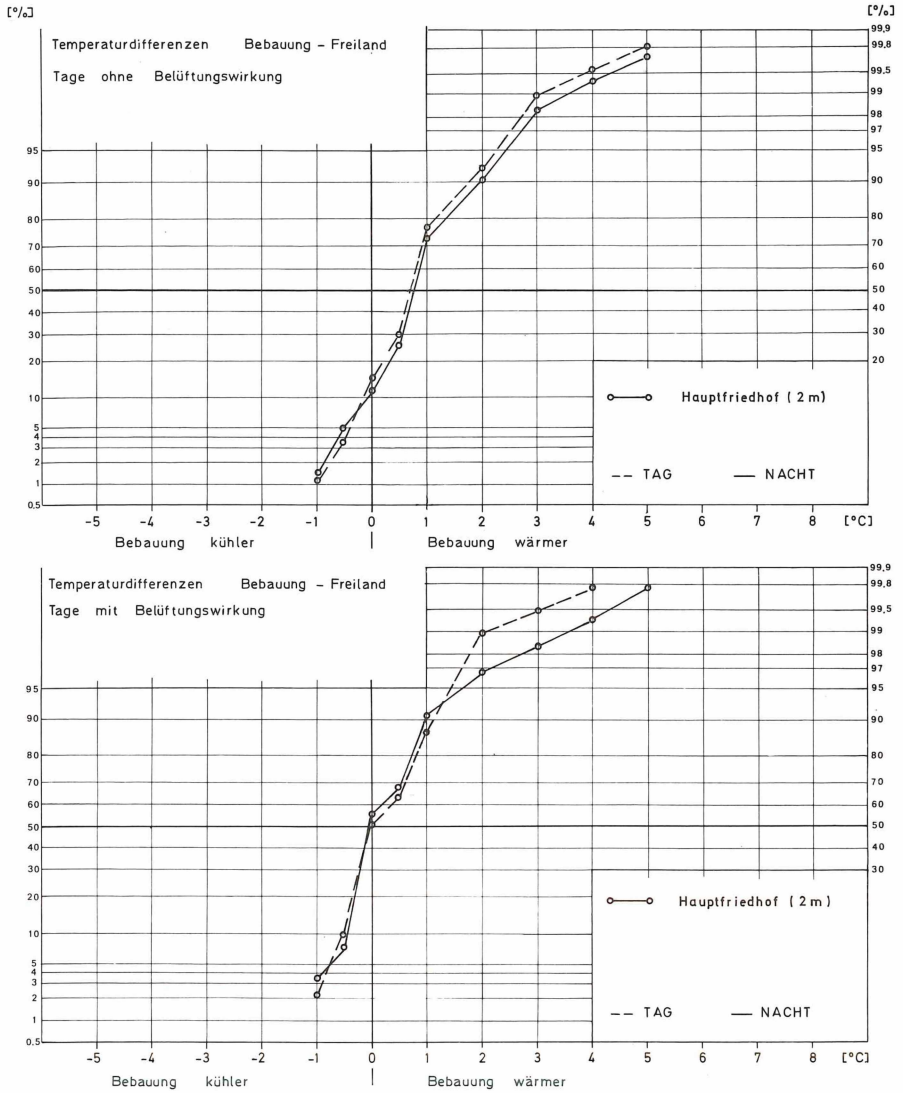
KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN- und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Summenhäufigkeitsverteilung von Temperaturdifferenzen Bebauung - Freiland (auf Stundenbasis)

Bereich : Hauptfriedhof

Zeitraum : Sommerhalbjahr

Abb. 15a: Summenhäufigkeitsverteilung von Temperaturdifferenzen Winter.



KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Summenhäufigkeitsverteilung von Temperaturdifferenzen Bebauung - Freiland (auf Stundenbasis)

Bereich : Hauptfriedhof

Zeitraum : Winterhalbjahr

Abb. 15b: Summenhäufigkeitsverteilung von Temperaturdifferenzen Sommer.

Der Bereich des Hauptfriedhofs verhält sich damit insgesamt sowohl im Temperaturgang als auch in den dargestellten Temperaturdifferenzen weder wie eine Bebauung noch wie ein ausgeprägter Freilandbereich, sondern wie ein kleiner Wald mit Lichtungen. Dadurch ist die Kühlwirkung für die angrenzenden bebauten Bereiche in Belüftungssituationen wesentlich schwächer ausgebildet als bei Grünlandnutzung. Das Bestandsklima des Hauptfriedhofs (vgl. BAUMGARTNER, A. 1956) wirkt in Bodennähe nur wenig positiv auf den örtlichen Luftaustausch. In Höhe des Wipfelraums wird die Nordwest-Strömung thermisch und lufthygienisch positiv beeinflußt.

6.2.4. Strömungsgeschehen und Ventilation

Im westlichen Randbereich des Hauptfriedhofs wurden an einem 20 m hohen Teleskopmast in 8 m und 20 m Höhe über dem Boden Windrichtung und Windgeschwindigkeit aufgezeichnet. Die in Abb. 16 dargestellten jahreszeitlichen Verteilungen und die Jahresverteilung zeigen auf diese geringe vertikale Entfernung in der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen nur eine geringfügige Drehung der Windrichtung gegen den Uhrzeigersinn mit abnehmender Höhe. Wie an allen anderen Stationen im Untersuchungsgebiet treten auch hier östliche Strömungen nur sehr selten auf.

Vergleicht man die Strömungscharakteristik im Nordsektor mit derjenigen in der Stadtmitte, wird die Umströmung der Gesamtstadt bei nördlichen Winden deutlich. Während sich in den unteren 50 m Höhe nördliche Strömungen gegen die Bebauung nicht durchsetzen können, können sie dies über dem Rhein und den westlichen Freiräumen wesentlich strömungsgünstiger und führen hier zu einer Häufung nordöstlicher bzw. nordwestlicher Windrichtungen.

Berücksichtigt man die Lagebeziehung zwischen Freiraum und Bebauung, läßt sich erkennen, daß der Freiraum in der Jahresverteilung zu 39,2 % mit südlichen Ventilationsrichtungen den Bereich der Frankenthaler Straße beeinflußt. Auf den Stadtteil West sind nur 28,5 % der Wirkungen ausgerichtet und 13,5 % wirken auf den Gewerbebereich um das Schlachthofgelände.

Während sich im Winter nur geringfügige Richtungsunterschiede zwischen Tag und Nacht einstellen, steigt dieser Unterschied in der wärmeren Jahreszeit an. Vornehmlich ist hier eine Zunahme nordwestlicher Windrichtungen festzustellen, was, wie an der Großen Blies, in engem Zusammenhang mit nächtlichen Luftaustauschbewegungen zwischen Freiland und Bebauung steht, die sich über den Hauptfriedhof hinweg entwickeln.

Die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen 20 m und 8 m Höhe fallen gerade bei nordwestlichen Belüftungen besonders auf. Bei Nacht treten dadurch in den unteren 10 m häufiger Windstillen auf als im Gipfelraum. Durch den Bestand werden aber nicht nur Stagnationen erzeugt, sondern alle Strömungen geschwächt. Sehr deutlich zeigt sich diese Schwächung im Jahresmittel, wo am Tage in 8 m Höhe nur 61 % und bei Nacht nur 53 % der Geschwindigkeit im Gipfelraum erreicht werden. Bei den nächtlichen Strömungen im Sommer, wenn durch die Belaubung der Bestand recht dicht ist, erreicht die Geschwindigkeitsreduktion im Westsektor bis zu 60 %, d. h. in den unteren 10 m Höhen werden nur noch 40 % der Geschwindigkeit im Gipfelraum registriert. In Absolutbeträgen ausgedrückt bedeutet dies, daß bei einem Jahresmittel der Windgeschwindigkeit am Tage von 3,1 m/sec in 20 m Höhe in der unteren Bodenschicht in 8 m Höhe noch 1,9 m/sec registriert werden. In der Nacht ergeben sich 2,6 m/sec für 20 m Höhe zu 1,4 m/sec in 8 m Höhe.

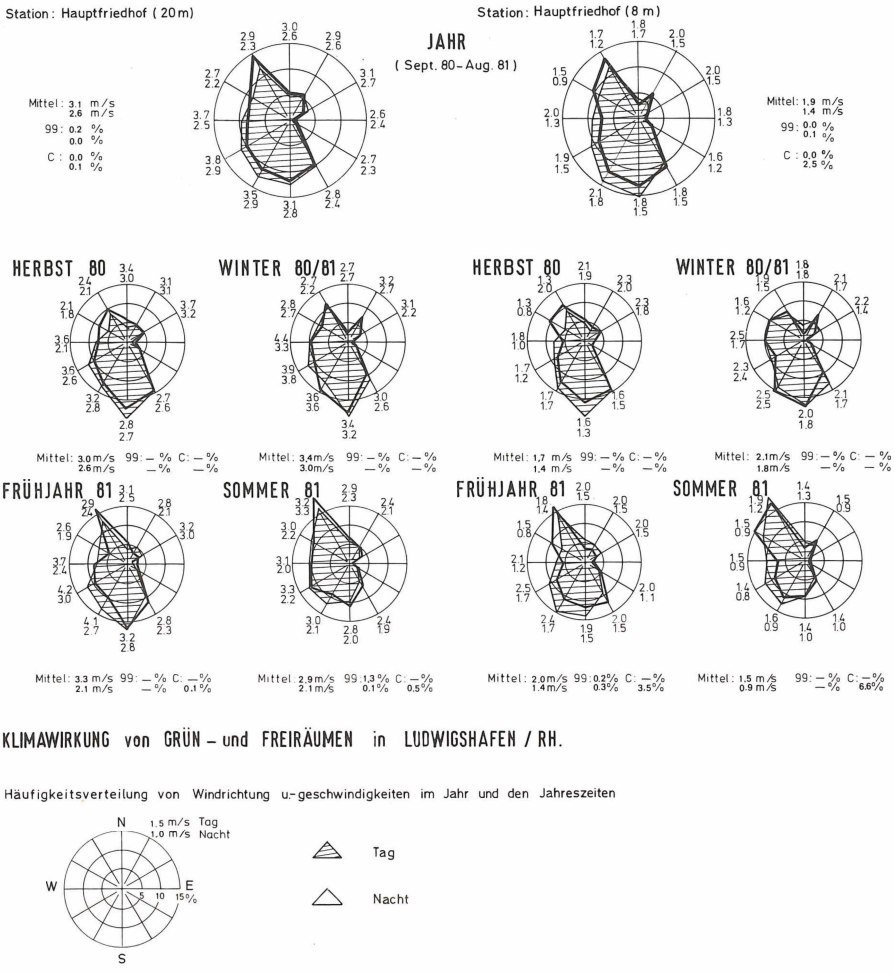


Abb. 16: Häufigkeitsverteilung von Windrichtungen und -geschwindigkeit im Jahr und den Jahreszeiten am Hauptfriedhof.

Die Geschwindigkeitsreduktion des Bestandes fällt allerdings geringer aus als im Stadtteil Mitte. Hier beläuft sich die Minderung auf 48 % tags und 40 % nachts, d. h. sie ist um ca. 15 % höher als am Hauptfriedhof.

Aus diesen Verhältnissen läßt sich eindeutig ersehen, daß der dichte Bestand im bodennahen Bereich ein Strömungshindernis bildet, das gerade sommerliche, schwache Strömungen aus dem westlichen Freiland hindert, zügig in den Stadtteil West einzudringen und dort klimatisch günstig zu wirken.

6.2.5. Belüftungsverhältnisse

Vertiefende Einblicke in den Einfluß des Hauptfriedhofs auf die Belüftungsverhältnisse lassen sich aus den Abb. 17a, b erkennen, die typische Situationen charakterisieren.

An Durchlüftungstagen läßt sich eine Windrichtungsverteilung und Windgeschwindigkeitsverteilung erkennen, die im wesentlichen die Jahres- bzw. Halbjahresverteilungen widerspiegelt, wobei sich kaum Unterschiede zwischen Tag und Nacht ergeben.

In der Belüftungsgruppe mit durchgängigem Höhenwind ist die Belüftung weder im Sommer noch im Winter auf den bioklimatisch/lufthygienisch stark belasteten Stadtteil West gerichtet. Während sich am Tage trotz Geschwindigkeitsunterschieden keine nennenswerten Richtungsdifferenzen ergeben, drehen die Strömungen unter stabileren nächtlichen Schichtungsbedingungen mit abnehmender Geschwindigkeit und Höhe stärker auf West. Ausgesprochen westliche Belüftungsströmungen können in dieser Situation

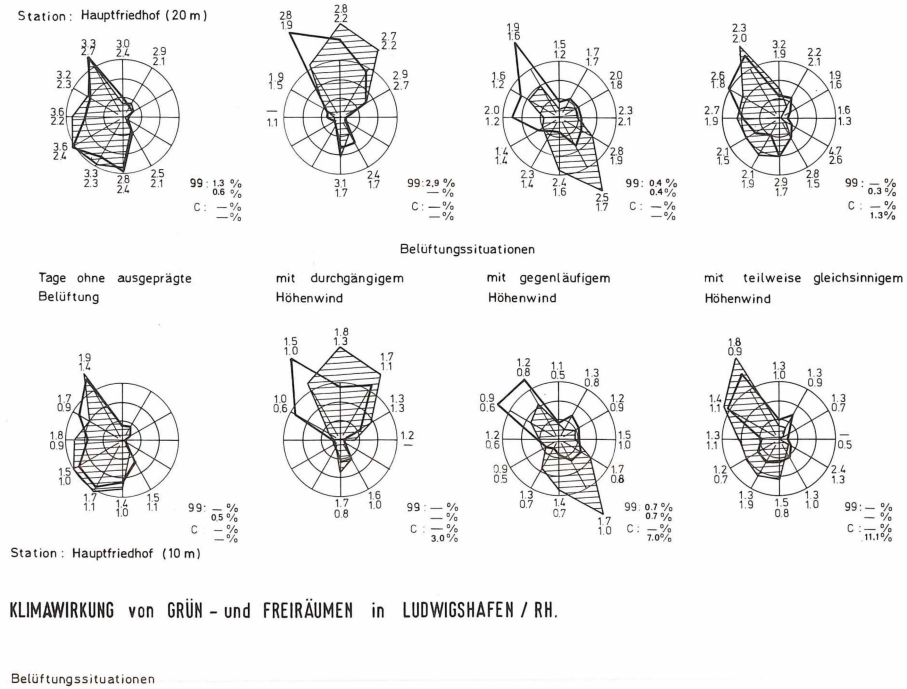


Abb. 17a: Belüftungssituationen Hauptfriedhof Sommer.

als Positiveffekt für den Stadtteil West nicht festgestellt werden. Die Wirkung des Bereiches Hauptfriedhof geht in dieser Situation hauptsächlich in den nördlichen Bereich der Blies und in der Folge in die Blies über.

In den beiden anderen Belüftungssituationen zeichnen sich dagegen häufiger Wirkungen für den Stadtteil West ab. Besonders deutlich werden diese Verhältnisse in der Belüftungsgruppe mit gegenläufigem Höhenwind bei Nacht. Am Tage herrschen unter überwiegend neutralen bis labilen Schichtungsverhältnissen südliche und süd-östliche Strömungen vor, die noch bis nach Sonnenuntergang anhalten. Mit abnehmender Geschwindigkeit und einsetzenden stabileren Schichtungsverhältnissen am Abend stellt sich eine östliche bis nordöstliche Strömungskomponente ein.

Im Zuge dieser schwachen Strömung können einzelne Luftquanten aus der Höhe bis zum Boden absinken und die Abkühlung unterbrechen. Zieht man zu diesen Verhältnissen den Tagesgang einer derartigen Belüftungssituation in Abb. 18a heran, zeigt sich, daß

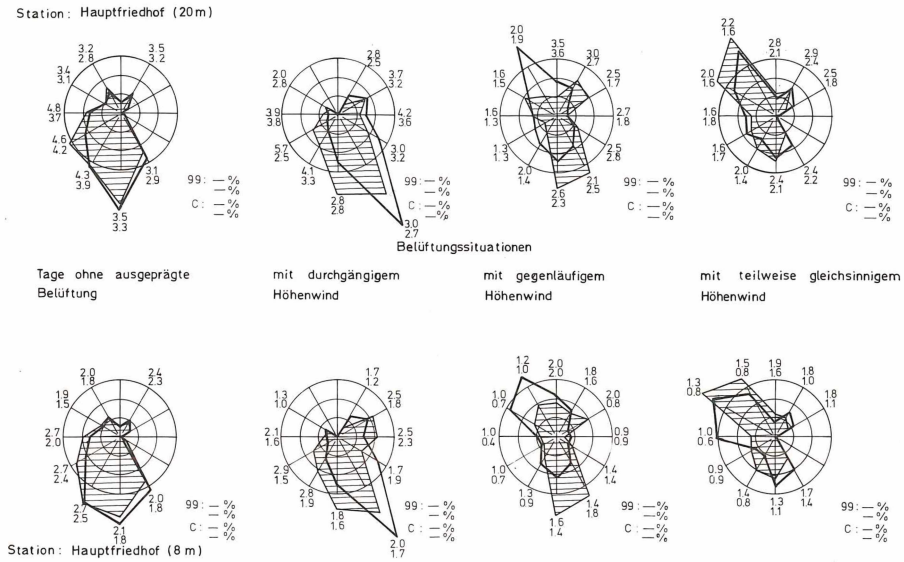


Abb. 17b: Belüftungssituationen Hauptfriedhof Winter.

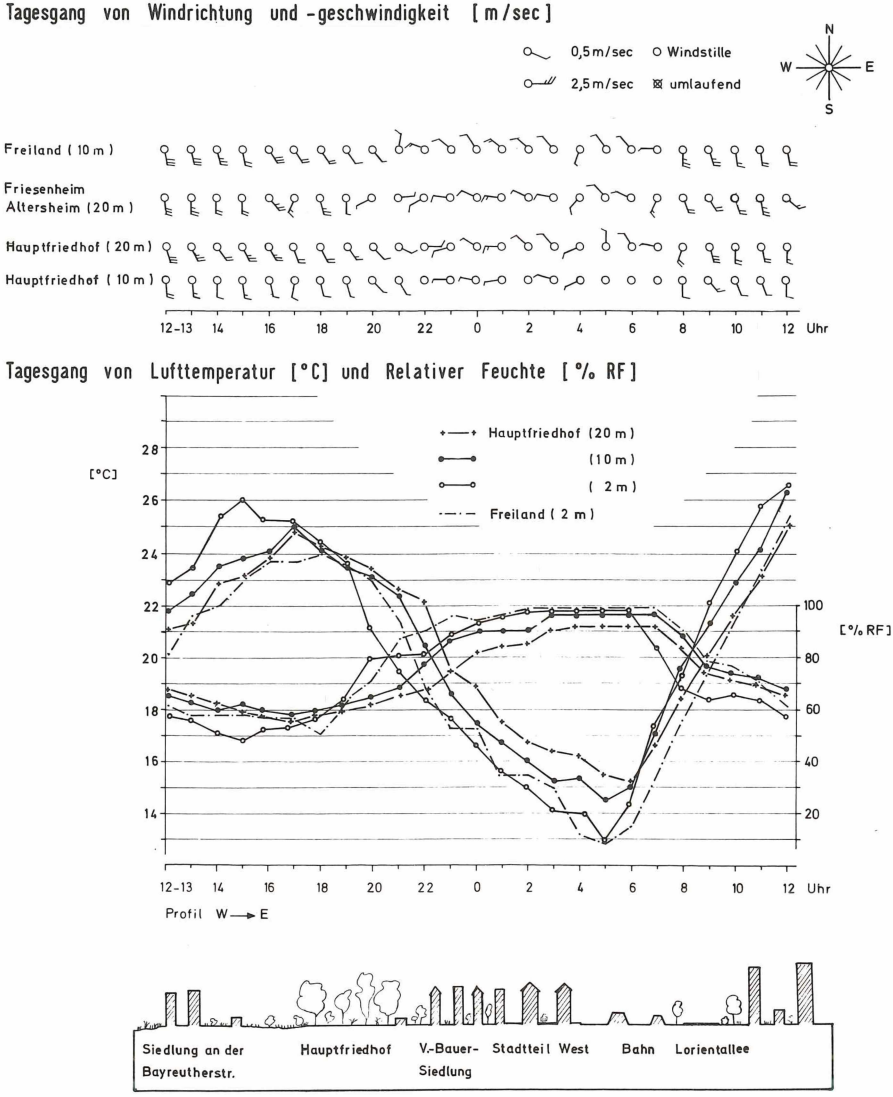
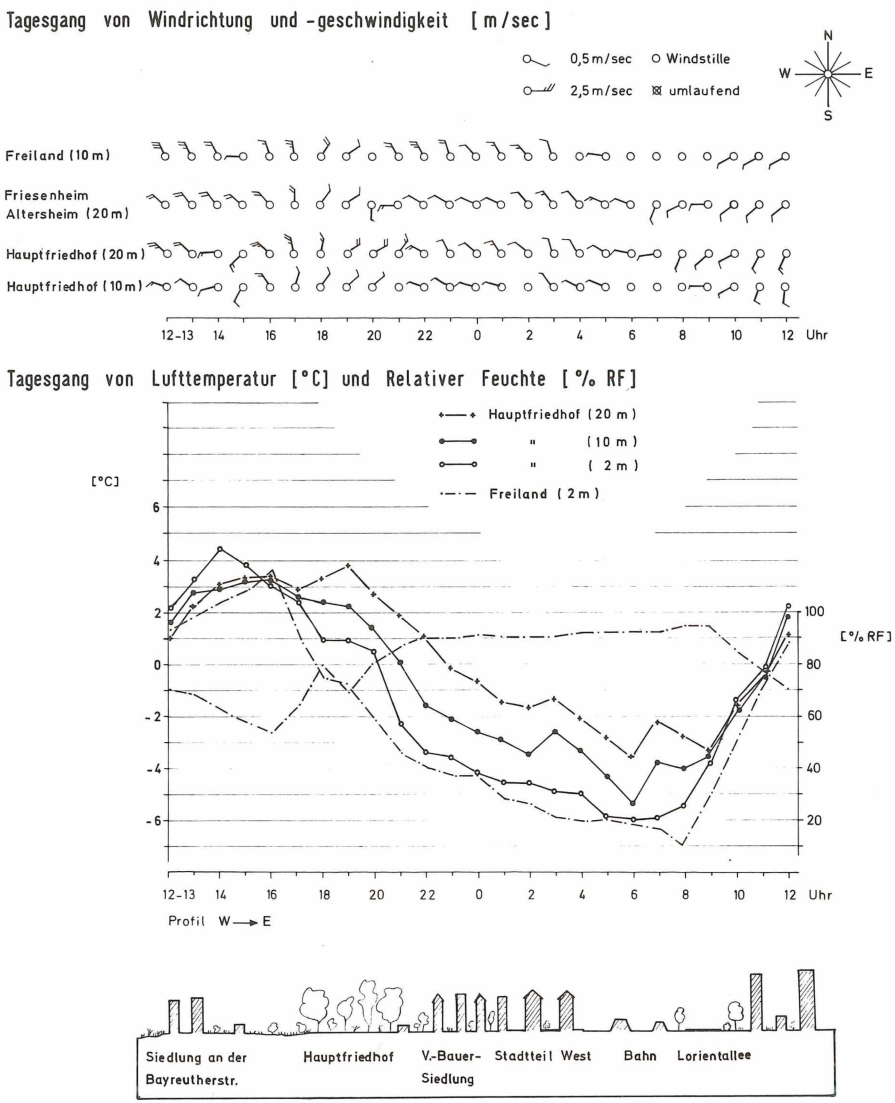


Abb. 18a: Wärme- und Strömungssituationen am 30./31. 5. 1981.



KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN - und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Wärme- und Strömungssituation am 14./15. Feb. 1981

Bereich: Stadtteil West / Hauptfriedhof

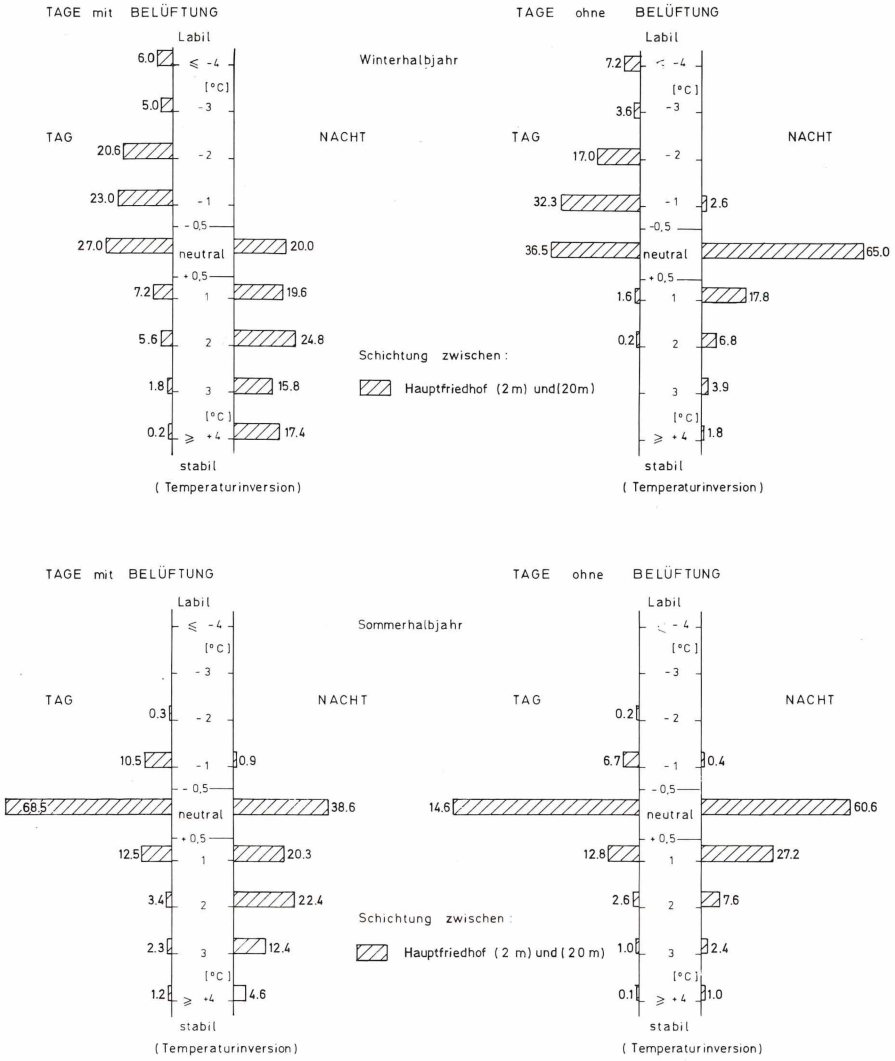
Wetterlage: Hoch Mitteleuropa (Strahlungswetterlage)

Abb. 18b: Wärme- und Strömungssituationen am 14./15. 2. 1981.

die wärmeren Luftmassen auch mit dieser Nordostkomponente nicht mehr bis zum Boden durchdringen können. Nach 22.00 Uhr erfaßt die Abkühlung der unteren Luftschichten auch die höheren. Gleichzeitig setzt mit der mächtigeren bodennahen Kaltluft eine westliche Belüftung ein. Mit diesen Strömungen können sich auch im bodennahen Bereich kühlere und frischere Luftmassen vermischen, indem Luft absinkt. Kommt dieser Austausch gegen Morgen zum Erliegen, sinken die Temperaturen in den bodennächsten Luftschichten sofort intensiv ab. Schon in 10 m Höhe werden während der ganzen Nacht um 1 bis 2° C höhere Lufttemperaturen und in 20 m Höhe 2 bis 3° C höhere Lufttemperaturen registriert. Durch die westliche und nordwestliche Strömung beeinflussen die Bodenoberflächen höhere Luftschichten geringer. Im Gegensatz zu stagnierender Kaltluft ist die bewegte kühle Luft wärmer. In den höheren Luftschichten ist wegen des Bewegungsimpulses und wegen des geringen Einflusses kühler Oberflächen die Luft während der Nacht wärmer. Da wärmere Luft nur schwer zum Boden durchdringen kann, können im Bereich des Hauptfriedhofs diese Luftmassen nur sehr schwer in die Bebauung im bodennahen Bereich eindringen. Im Dachniveau erfolgt die Belüftung des Stadtteils West überwiegend durch Strömungen, die über den Gipfelraum des Hauptfriedhofs hinweggehen. Die kleindimensionierten Hofflächen und das nordöstlich-südwestlich ausgerichtete Straßengitter lassen diese Frischluft nur schwer in den Stadtteil eindringen. In offeneren Bereichen, wie am Ende der Waltraudenstraße und bei Grünflächen im Wohnumfeld wie in der V.-Bauer-Siedlung zeigt die Abkühlung bei Meßfahrten, daß sich hier eine bessere Belüftungswirkung ergeben kann.

Dieser Luftaustauschprozeß ist umso bedeutsamer, da wie in der Abb. 19 dargestellt, gerade an diesen Tagen sich im Hauptfriedhof und noch verstärkt im angrenzenden Freiland überwiegend stabile Schichtungsverhältnisse einstellen, die den vertikalen Luftaustausch sommers wie winters unterdrücken. Bioklimatisch/lufthygienische Belastungen, wie sie durch Heizungen und Straßenverkehr auch im Stadtteil West bestehen, werden an diesen Tagen nur tagsüber bei labilen bis neutralen Schichtungsverhältnissen mit Luftmassen der höheren Atmosphäre vermischt oder mit der großräumigen Strömung abgeführt. Die auch an Tagen ohne Belüftungseffekt während der Nacht häufigen stabilen Schichtungsverhältnisse bedeuten, daß der Belüftungseffekt mit dem horizontalen Luftaustausch durch unbelastete Luftmassen im Stadtteil West von hoher Bedeutung ist. Da sich zu 36,5 % aller Tage im Jahresverlauf der Untersuchungsperiode diese geschilderten Belüftungsverhältnisse einstellen, und daher eher unterrepräsentiert sind, wird die klimatische Güte des Stadtteils West trotz des unmittelbar angrenzenden Grün- und Freiraums nicht ausgeprägt positiv beeinflußt. In diesem Zusammenhang ist bedeutsam, daß die bestehende Wirkung des Freiraums sich aufgrund der derzeitigen Bebauungsverhältnisse nicht positiver auswirken kann.

Wie die Abb. 18b zeigt, treten bei winterlichen, austauscharmen Wetterlagen in der Nacht fast die gleichen Strömungsverhältnisse ein, wie dies bei sommerlichen Strahlungswetterlagen mit Belüftung der Fall ist. Durch die fehlende Belaubung treten Stagnationserscheinungen im Hauptfriedhof aber nicht mehr in so hohem Maße auf wie im Sommer. Im Winter können unter großräumigen stabilen Schichtungsverhältnissen auch schon tags die Baugebiete aus dem westlichen Freiraum belüftet werden, wie dies am Gang des Hauptfriedhofs von 12.00 bis 16.00 Uhr deutlich wird. Dies bedeutet, daß bei austauscharmen Wettersituationen sowohl im Sommer wie im Winter der Freiraum über den Hauptfriedhof in die Bebauung frische Luftmassen im bodennahen Bereich transportiert, die die Belastungen im Stadtteil West vermindern. Durch die dichte geschlossene Bebauung einerseits und den Hauptfriedhof als Strömungs- und Luftaustauschhindernis andererseits lassen sich bioklimatisch/lufthygienische Belastungen nur vermindern und nicht vollständig abbauen, wie die Profile der Lufttemperaturen in Abb. 12 aufzeigten.



KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN - und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Häufigkeitsverteilung in [%] der atmosphärischen Schichtung

Bereich : Hauptfriedhof

labile Schichtung - Temperaturabnahme mit der Höhe
neutrale " - gleichbleibende Temperatur
stabile " - Temperaturzunahme mit der Höhe

Abb. 19: Häufigkeitsverteilung der atmosphärischen Schichtung.

6.2.6. Ventilationsgrad

Die klimatische Situation um den Hauptfriedhof wirkt sich auch auf die Verteilung des Ventilationsgrades aus. Bei fehlender Belaubung und höheren Windgeschwindigkeiten im Winterhalbjahr ergibt sich in 20 m Höhe ein fast 60 %iger Durchlüftungsanteil, der besonders bei südlichen und südwestlichen Windrichtungen ausgeprägt ist und auch noch in 8 m Höhe häufiger durchgreift (s. Abb. 20).

Im Sommer sinkt der Durchlüftungsgrad auf ca. 45 % ab, wobei gerade nord-nordwestliche Winde noch zu 50 % der Richtung einen hohen Durchlüftungsanteil aufweisen. Dies zeigt, daß die Ventilation im Gipfelbereich bei nordwestlichen Winden wesentlich günstiger ist als im bodennäheren Bereich.

Im bodennächsten Bereich treten nicht nur gehäuft Stagnationserscheinungen auf – innerhalb des Bestandes des Hauptfriedhofs sind diese Werte noch höher als im Innenhof der Stadtmitte – sondern auch geringere Durchlüftungswirkungen. Der Luftaustausch vollzieht sich gerade im Sommer sehr verlangsamt bei nahezu allen auftretenden Windrichtungen. Bei den westlichen bis nordwestlichen Windrichtungen ist dies ein wesentlicher Grund, daß im bodennahen Bereich des Stadtteils West bioklimatisch/lufthygienische Belastungen nur verzögert reduziert werden können.

Bei temporären Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsuntersuchungen zeigte sich innerhalb der Bebauung des Stadtteils West, daß auch hier besonders niedrige Windgeschwindigkeiten registriert werden. Die verdichtete Bebauung schwächt im bodennahen Bereich noch weiter die Windströmungen aus dem westlichen Sektor.

6.2.7. Bioklimatische Verhältnisse

Bei der Analyse der bioklimatischen Verhältnisse im Bereich des Hauptfriedhofs ist es nur möglich, die Abkühlungsgröße heranzuziehen. Schwüle- und Wärmebelastung lassen sich statistisch nicht auswerten, da die Feuchtwerte, die zur Berechnung benötigt werden, nicht über den gesamten Sommer zuverlässig waren.

Einzelne Tagesgänge von Dampfdruck und Äquivalenttemperatur lassen aber erkennen, daß in den unteren 10 m des Hauptfriedhofs in den Nachmittag- und Abendstunden sehr häufig und in der Intensität auch sehr hohe hygro-thermische Belastungen eintreten. Bedingt wird dies einmal durch die Luftruhe und zum anderen durch die intensive Verdunstung der Vegetation. Durch die frühzeitige stabile Schichtung am Abend ist die Wasserdampfanreicherung auf die untersten Luftschichten beschränkt, so daß hier sehr hohe Dampfdruckwerte entstehen.

Von der Intensität und der Andauer lassen sich näherungsweise Parallelen zum Bereich der Gärten auf der Parkinsel und des Stadtparks ersehen. Im Zuge der westlichen bis nordwestlichen Belüftungsströmung und der nächtlichen verstärkten Abkühlung über den Rasenflächen werden die Schwüle- und Wärmebelastungen dann innerhalb des Bestandes stärker reduziert wie innerhalb dichterer Bebauung des Stadtteils West.

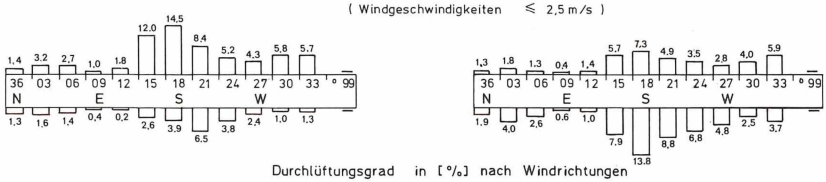
Aufgrund der geringen relativen Feuchte und der höheren Ventilation werden die Belastungen in 20 m Höhe sehr rasch reduziert. Meist werden nach 22.00 Uhr mit einsetzender regionaler Belüftungsströmung die Grenzwerte unterschritten, während im Zuge der abendlichen Nordostkomponente durch Zuströmungen von Luftmassen aus der Bebauung bioklimatische Belastungen oft verstärkt werden.

Für die bioklimatische Wirkungsweise gibt auch hier die statistische Verteilung der Abkühlungsgrößen im Bereich des Hauptfriedhofs einen verbesserten Einblick.

Station : Hauptfriedhof (8m) Station : Hauptfriedhof (20m)

Winterhalbjahr
(Okt. 80 - März 81)

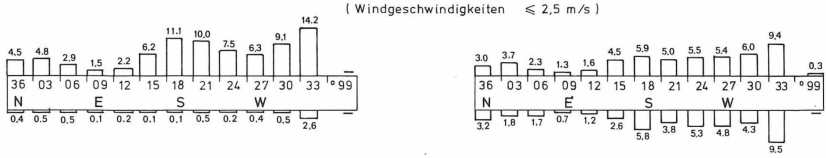
Belüftungsgrad in [%] nach Windrichtungen
(Windgeschwindigkeiten ≤ 2,5 m/s)



Durchlüftungsgrad in [%] nach Windrichtungen
(Windgeschwindigkeiten ≥ 2,6 m/s)

Sommerhalbjahr
(April 81 - Sept. 81)

Belüftungsgrad in [%] nach Windrichtungen
(Windgeschwindigkeiten ≤ 2,5 m/s)



Dürchlüftungsgrad in [%] nach Windrichtungen
(Windgeschwindigkeiten ≥ 2,6 m/s)

		Hauptfriedhof Höhe: 8m	20m
Gesamtbelüftungsgrad	Winter	66.3%	40.1%
	Sommer	80.0%	53.7%
Gesamtdurchlüftungsgrad	Winter	26.7%	59.8%
	Sommer	5.4%	44.6%
Gesamtstagnationsgrad (Geschwindigkeit ≤ 0,5m/s)	Winter	7.0%	0.1%
	Sommer	13.6%	0.9%

KLIMAWIRKUNGEN von GRÜN - und FREIRÄUMEN in LUDWIGSHAFEN / RH.

Ventilation

- Belüftung / Durchlüftung / Stagnation

Bereich : Hauptfriedhof

Abb. 20: Ventilationsgrad Hauptfriedhof.

Tabelle 7: Abkühlungsgröße am Hauptfriedhof (in % bezogen auf Stunden)
Zeitraum: Mai – August 1981

Stufe	Hauptfriedhof (2 m)	Hauptfriedhof (20 m)	Freiland westl. Oggersheim
belastend 0 – 10 (mcal/cm². sec)	27.2 %	19.1 %	11.1 %
schonend 10 – 20 (mcal/cm². sec)	61.4 %	67.3 %	61.0 %
reizmild 20 – 30 (mcal/cm². sec)	3.9 %	9.7 %	23.9 %
reizstark 30 – 40 (mcal/cm². sec)	–	3.5 %	5.1 %
unterkühlend über 40 (mcal/cm². sec)	–	–	0.1 %

Deutlich wird die höhere Belastung in den bodennächsten Luftschichten. Hier treten mit einer prozentualen Häufigkeit von 27,2 % belastender Stunden im Sommerhalbjahr ähnlich hohe Werte auf wie in der Bebauung der Rottstraße und der Parkinsel. Durch die sehr geringe Ventilation des Bestandes und den höheren Wärmegewinn aufgrund des Windschutzes werden reizmilde Situationen nur zu 3,9 % erreicht. Die Abkühlung ist in den bodennächsten Luftschichten deutlich in den negativen Bereich verschoben. Schon im Wipfelraum des Bestandes verursacht die intensivere Ventilation eine bedeutsame Positivierung der Abkühlungsverhältnisse.

Die aufgrund der Ventilation in 20 m Höhe günstigeren Abkühlungswerte zeigen sich auch in der Abb. 21, dem Tagesgang eines bioklimatisch belasteten Tages.

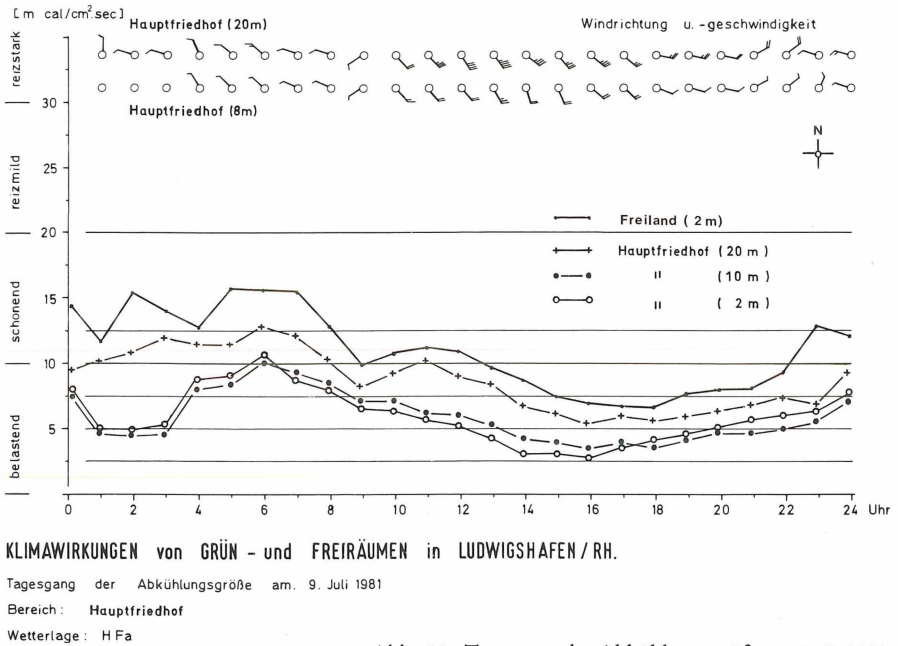


Abb. 21: Tagesgang der Abkühlungsgröße am 9. 7. 1981.

Trotz der nächtlichen höheren Temperaturen werden in fast der gesamten zweiten Nachthälfte in den höheren Luftschichten die Grenzwerte der Belastung eindeutig unterschritten. Bei westlichen und nordwestlichen Windrichtungen mit Windgeschwindigkeiten von über 1 m/sec werden von 1.00 Uhr bis 8.00 Uhr keine Belastungen mehr festgestellt. Auch am Tage sorgt die höhere Ventilation bei südöstlichen Windrichtungen für eine geringere Belastungsintensität.

Zwischen 10.00 Uhr und 11.00 Uhr am Vormittag zeigt die kurzzeitige Minimierung der Belastung einmal das Einsetzen der intensiveren Tagesventilation und zum anderen die vertikalen Erwärmungsverhältnisse, wobei im Zuge der morgendlichen Einstrahlung sich die bodennächsten Luftschichten am schnellsten erwärmen und die kühlere Luft der Nacht in die Höhe drücken, so daß die Erwärmung der höheren Luftschichten am Vormittag verzögert wird.

Der Tagesgang der Abkühlungsgröße zeigt auch die Homogenität der Luftschicht in den unteren 10 m. In der Abkühlungsgröße ergibt sich ein gleichsinniger Verlauf, wobei die Intensität der Belastung in 10 m am Tage etwas geringer ist, während in der Nacht bei stärkerer Abkühlung über den Rasenflächen die unteren 2 m geringere Belastungsintensitäten aufweisen. Insgesamt sind die Differenzen allerdings so gering, daß dieser Wechsel vernachlässigt werden kann.

Zwischen 1.00 Uhr und 3.00 Uhr morgens zeigt sich deutlich die negative Wirkung des Bestandes. Kommt die Ventilation nach Mitternacht innerhalb des Bestandes zum Erliegen, steigt sofort die bioklimatische Belastungsintensität an, obwohl die Temperaturabnahme voranschreitet und die Kühlwirkung der Rasenflächen bis in höhere Luftschichten besonders wirksam wird. Erst das Durchgreifen der regionalen Belüftungsströmung kann die Belastungen minimieren.

In den Abkühlungsverhältnissen des Hauptfriedhofs zeigt sich wieder deutlich die klimaökologische Ausgleichsleistung der Regionalkomponente, wenn sie über der Bebauung vorgelagerte Freiräume zusätzlich abgekühlt und relativ ungehindert strömen kann.

Im weiteren Verlauf der Strömung bestimmen die baulichen Eingriffsmöglichkeiten dieser Belüftung, wieweit bioklimatische Belastungen nur minimiert oder abgebaut werden können.

7.0. Numerischer Zusammenhang von klimaökologischen Parametern und Flächennutzungsfaktoren

Die Analyse der Luftaustauschprozesse ausgewählter Beispielräume in der Stadt Ludwigshafen verdeutlichte, daß der Ablauf des Luftaustauschs vielschichtig ist, und die Wirkungen sehr komplex sind. So wird an Tagen mit lokalem Klimageschehen, das mit einer Häufigkeit von 36,5 % während der Untersuchungsperiode am Klima beteiligt war, der nächtliche Luftaustausch im wesentlichen von einer regionalen Austauschströmung getragen. Diese von Nordwesten kommende Strömung verbindet sich entweder mit den lokalen Prozessen oder überlagert diese.

Dennoch zeigte sich bei diesen austauscharmen Situationen der Einfluß von Grünräumen oder unterschiedlichen Flächennutzungsstrukturen. Stellt man aufgrund der Analyse den Anteil unbefestigter Flächen oder der Bebauungsdichte in eine lokale Rangfolge vom vorderpfälzischen Freiland bis zur Stadtmitte, läßt sich mit abnehmendem Grünanteil überblickmäßig ein klimatischer Zusammenhang erkennen. Trotz der regionalen Ausgleichswirkung nehmen die klimaökologischen Belastungen fast linear mit der

Bebauungsdichte zu. Dies bedeutet auch, daß die Minderung bioklimatisch/lufthygienischer Belastungen mit der Überbauung und dem sinkenden Anteil von Grünflächen abnimmt.

Die empirisch ermittelte Rangfolge, z. B. zwischen dem Grünanteil (= Abnahme der unbefestigten Fläche) und der Jahresmitteltemperatur, ist einmal nicht für alle Bereiche eindeutig und zum anderen noch kein quantitativ gesicherter Nachweis einer numerischen Beziehung. Für einen allgemeinen Zusammenhang ist die Art und Stärke der Wechselbeziehungen von charakteristischen Klimaparametern und Flächennutzungsfaktoren nachzuweisen.

Mittels einer mehrfachen, linearen Regressions-/Korrelationsanalyse wird im folgenden der Versuch unternommen, die Art des Zusammenhangs zwischen Klimaparametern und Flächennutzungsfaktoren auf quantitativer Grundlage aufzuzeigen. Die Stärke der Beziehung zwischen den Variablen wird durch den aus der Regressionsanalyse abgeleiteten Korrelationskoeffizienten ausgedrückt, der in den Ergebnistabellen für jeden Klimaparameter aufgeführt wird. Auf dieser algebraischen Grundlage ist es möglich zu analysieren, wie eine Variable von der anderen abhängt, oder umgekehrt, wie man von einer Größe näherungsweise auf eine andere schließen kann.

Abweichungen von dem errechneten mittleren Zusammenhang verdeutlichen darüberhinaus, daß lokale Einflüsse und Besonderheiten mehr oder minder stark wirken. Aufgrund der vorhergegangenen Analyse der einzelnen Untersuchungsbereiche können die Ursachen und Wirkungen dieser ortsspezifischen Differenzen erläutert werden.

7.1. Flächennutzungsfaktoren

Für die Regressions- und Korrelationsanalyse werden als Variable für die Kennzeichnung der physikalischen Wechselbeziehungen Maßzahlen der Flächennutzung benutzt, da die stadtklimatischen Verhältnisse grundsätzlich durch die Ersetzung vegetativer Flächen mit Stein, Beton und Asphalt gesteigert werden (EMONDS 1972; CHANDLER 1976). Flächennutzungsfaktoren, die diese grundsätzliche Beziehung beinhalten, wurden mit der Geschoßflächenzahl, der Grundflächenzahl und der unbefestigten Fläche herangezogen. In der Tab. 3 sind die Maßzahlen der Flächennutzungsfaktoren für elf ausgewählte Untersuchungsbereiche aufgeführt. Die Untersuchungsbereiche sind in zwei unterschiedliche Gruppen eingeteilt. Die Bereiche 1 – 6 können mit dem Datenmaterial der kontinuierlichen Meßstationen in Beziehung gesetzt werden.

Für eine erweiterte Aussage über die Klimawirkungen werden noch die Bereiche 7 – 11 herangezogen, die auf der Basis aktueller Werte von Meßfahrten zwar nur eine tageweise Analyse erlauben, aber aufgrund der größeren Anzahl eine höhere statistische Genauigkeit der gefundenen Beziehungen ermöglichen, da nach dem mathematischen Gesetz der „großen Zahlen" mit zunehmendem Umfang die Aussagen zuverlässiger werden. Der Umfang von 11 Bereichen ist für eine allgemeine Aussage allerdings immer noch recht gering.

Als Kennzeichen der Bebauungsfaktoren wurden als Variable Maßzahlen benutzt, die die Art und Intensität der Flächennutzung anerkannterweise charakterisieren und gleichzeitig leicht verfügbar oder erhebbar sind. Zusätzlich sind diese Größen unabhängig von der Fläche der Untersuchungsbereiche, so daß auch unterschiedlich große Objekte analysiert werden können (s. ALBACH & UNGERS 1972).

Geschoßflächenzahl (GFZ) und Grundflächenzahl (GRZ) sind dimensionslose Verhältnisangaben. Sie sind Indikator der baulichen Flächennutzung.

Die unbefestigte Fläche (UF) wird in Prozent der Gesamtfläche angegeben. Sie ist die Summe aller nicht versiegelten oder überbauten Flächen, im weitesten Sinne aller Grünflächen.

7.2. Klimaökologische Parameter

Durch die Analyse der Luftaustauschprozesse in den einzelnen Untersuchungsbereichen war es erst möglich, signifikante Maßzahlen auszugliedern, die für den Einfluß der Bebauung und der Flächennutzung bedeutsam sind.

Die Wirkung des Luftaustauschs zeigt sich am Indikator charakteristischer Lufttemperaturverhältnisse. Der abnehmende Grünanteil steigert sowohl die Mittelwerte als auch die aktuellen Temperaturdifferenzen bei flächenhafter Erhebung. Gleichzeitig sind die Temperaturdifferenzen und der prozentuale Anteil von Überwärmungssituationen zwischen den einzelnen Untersuchungsbereichen und der für das Freiland repräsentativen Station westlich Oggersheim aussagekräftig.

Da sich in der Analyse graduelle Unterschiede zwischen den winterlichen und den sommerlichen Verhältnissen zeigten, wird auch diese Tatsache in die Regression miteinbezogen.

Der direkte Luftaustauschvorgang kann allein aus statistischen Überlegungen nicht in der Regressionsanalyse als Maßzahl benutzt werden, da sich in den einzelnen Untersuchungsbereichen gleichzeitig verschiedene Windrichtungsvektoren einstellen. Nordöstliche Windrichtungen im Stadtteil Mitte können nicht mit westlichen Windrichtungen an der Blies oder nordwestlichen Windrichtungen am Hauptfriedhof verglichen werden, da gerade die Analyse zeigte, daß mit der Richtung des Luftaustauschs auch entsprechend unterschiedliche Wirkungen verbunden sind. Darüberhinaus wird auch die Intensität der Luftaustauschbewegung vom Windsektor innerhalb einer Stadt beeinflußt. So entzieht sich die Richtung des Strömungsgeschehens und des Luftaustauschs der direkten Regressionsanalyse.

Als Rahmenbedingung der Durchmischung können daher nur der Ventilationsgrad und die Schichtungsverhältnisse als quantitative Größen herangezogen werden. Die Wirkung des Austauschs läßt sich besser an ihrem Einfluß auf die Temperaturen oder bioklimatischen Belastungen analysieren. Deshalb werden auch die bioklimatischen Parameter in ihrer Häufigkeit und Andauer mit in die Regression aufgenommen.

In die Regressionsrechnung gehen die bodennahen Daten ein. Die Daten des Dachniveaus müßten wegen des Höheneinflusses gesondert betrachtet werden. Der Umfang von nur 4 Stationen im Bereich der höheren Atmosphäre ist für eine Regressionsanalyse allerdings so gering, daß sich keine sicheren Aussagen erwarten ließen, so daß diese Daten in der Regressionsrechnung nicht berücksichtigt werden.

Die einzelnen klimaökologischen Parameter, die als Maßzahl für die Beurteilung herangezogen wurden, werden in den Ergebnistabellen der Regressions- und Korrelationsanalyse aufgeführt.

7.3 Ergebnisse der Regressions- und Korrelationsanalyse

In der für alle Variablen durchgeführten Regressionsanalyse zeigten von 44 kennzeichnenden klimaökologischen Parametern 28 einen signifikanten Zusammenhang mit den Flächennutzungsfaktoren. Die Korrelationskoeffizienten in den Tab. 8 – 11 verdeut-

lichen das Maß des Zusammenhangs. Korrelationswerte gegen 0 bedeuten, daß sich kein Zusammenhang in der Regression einstellt. Je näher die Werte gegen 1,0 heranreichen, desto gesicherter ist der Zusammenhang der Variablen. Die für die Stärke des Zusammenhangs bedeutsamen Korrelationskoeffizienten lagen bei einer Überprüfung von N-2 Freiheitsgraden alle über dem 95 %-Signifikanzniveau, d. h. daß ein kausaler Zusammenhang mit einer Sicherheit von 95 % erklärt wird.

Von den 28 positiv korrelierenden Parametern wurde der häufigste Zusammenhang mit der Grundflächenzahl (GRZ) erreicht, während die Geschoßflächenzahl (GFZ) zwar etwas weniger häufig signifikant war, aber zu 14-mal den höchsten Korrelationswert erreichte. Die unbefestigte Fläche (UB) verhielt sich als Variable fast ähnlich wie die Grundflächenzahl. Allerdings korreliert die unbefestigte Fläche in den meisten Fällen mit einem Minusvorzeichen mit den klimaökologischen Parametern. Dies bedeutet, daß mit abnehmendem Grünanteil auch linear die Luftaustauschwirkungen abnehmen.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, daß alle 3 Variablen der Flächennutzung für den Grad klimaökologischer Erscheinungen und Belastungen von Bedeutung sind.

Im einzelnen ergab sich in der Regressions- und Korrelationsanalyse, die in den folgenden Tabellen dargestellten Korrelationskoeffizienten, wobei Parameter, die signifikant (über 95 %) korrelierten, mit Sternchen gekennzeichnet wurden.

Im Bereich der Wirkungen auf die Lufttemperaturen in Tab. 8 zeigt sich in den mittleren Jahresverhältnissen ein enger Zusammenhang zwischen der Art der Bebauung und der unbefestigten Fläche mit dem Jahresmittelwert, dem Minimum und der Amplitude der Lufttemperatur. Je dichter die Bebauung angelegt ist, desto höher sind die Lufttemperaturen aufgrund der Wärmespeicherung und des geringeren Luftaustauschs. Der geringere Austausch zeigt sich sehr deutlich in den hohen Korrelationswerten zum Minimum und der Amplitude. Die Korrelation zu den mittleren Jahreswerten verdeutlicht, daß der Bebauungseinfluß nicht allein auf die analysierten Belüftungssistuationen beschränkt ist, sondern sich auch, wenn auch nicht so ausgeprägt, bei zyklonalem Wettergeschehen auswirkt.

Am aussagekräftigsten für die charakteristische Überwärmung bebauter Bereiche und die Abhängigkeit der Intesität von der Bebauungsdichte sind zweifelsohne die Minima und Amplituden der Lufttemperatur. Auffällig ist hierbei, daß sich gerade in der winterlichen Jahreszeit wesentlich stärkere Zusammenhänge einstellen als im Sommer. Dies verdeutlicht, daß nicht allein die Art und Dichte der Bebauung für die städtische Wärmeinsel verantwortlich ist, sondern auch die Höhe der in der Heizungsperiode eingesetzten Energie und ihre Abwärme. Während sich im Sommer aussagekräftige Korrelationen nur durch die Wärmespeicherung und geringere Ventilation in der Nacht einstellen, sind durch den Energieeinsatz im Winter, trotz der in dieser Jahreszeit intensiveren Ventilation, ganztags Überwärmungen ausgeprägt, was sich an der signifikanten Korrelation zu den Maxima zeigt. Ansonsten sagen gerade die Maxima wenig aus.

Darüberhinaus können Grünräume innerhalb der Bebauung wegen des winterlichen Zustands der Vegetation wenig Wirkungen auf die klimatischen Verhältnisse erreichen. Im Sommer hingegen ist ihre Wirkung an der Korrelation zum Minimum deutlich abzulesen, da gerade hier GRZ und UF besonders signifikant korrelieren. Trotz des komplexen Luftaustauschs während der Nacht nimmt bei zunehmender Überbauung und abnehmendem Grünanteil die Abkühlungswirkung durch mangelnden Einfluß stadtrandlicher Freiräume oder durch geringen innerstädtischen Grünanteil ab.

Tabelle 8: Klimawirkungen von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein

Korrelation von Flächennutzungsfaktoren und klimaökologischen Parametern auf der Basis statistischer Werte

Wirkungen auf die Lufttemperaturen und die Überwärmung in Belüftungssituationen

Maßzahlen der Lufttemperatur (° C)		Faktoren der Flächennutzung: Geschoßflächenzahl GFZ	Grundflächenzahl GRZ	Unbefestigte Fläche in (%) UF
Jahresmittelwert		* 0.68	0.80	−0.78
Jahresmaximum		0.50	0.50	−0.50
Jahresminimum		* 0.91	0.91	−0.89
Jahresamplitude		* −0.88	−0.78	+0.75
Wintermittel		* 0.72	0.82	−0.78
Wintermaximum		0.56	0.70	−0.65
Winterminimum		* 0.84	0.87	−0.83
Winteramplitude		* −0.91	−0.80	+0.78
Sommermittel		0.52	0.67	−0.62
Sommermaximum		−0.25	−0.03	+0.02
Sommerminimum		* 0.40	0.84	−0.87
Sommeramplitude		* −0.84	−0.75	+0.74
Überwärmung in (%) bei Belüftungssituationen				
Winter	Tag	0.35	0.64	−0.60
	Nacht	* 0.83	0.88	−0.84
Sommer	Tag	−0.05	0.22	−0.30
	Nacht	* 0.88	0.88	−0.88
Intensität der Überwärmung bei Nacht				
Anteil ≥ 3° C in (%)	Sommer	* 0.84	0.93	−0.94
	Winter	* 0.77	0.87	−0.91

* Korrelation zu über 95 % gesichert

Die in der Tabelle 8 korrelierten Flächennutzungsfaktoren mit den Häufigkeiten der Wärmeinselbildung verdeutlichen, daß sich die Flächennutzung auf die mittleren klimaökologischen Erscheinungen im Jahr und in den Jahreszeiten besonders in austauscharmen und windschwachen Situationen auswirkt. Wiederum sind die nächtlichen Verhältnisse zu allen 3 Faktoren signifikant, wobei sich bei Belüftungssituationen nur geringe Unterschiede zwischen Winter- und Sommerhalbjahr ersehen lassen. Dies verdeutlicht auch die Bedeutung der Belüftung von lufthygienisch gering belasteten Grünbereichen, da gerade im Winter lufthygienische Belastungen besonders hoch sind, und in austauscharmen Situationen frische Luft aus den Freiräumen zur Minderung lufthygienischer Belastungen einen wesentlichen Beitrag leisten kann.

Die Wärmespeicherung der Baumassen und die geringere Wirkung des Luftaustauschs mit zunehmender Dichte und abnehmendem Grünanteil wirkt sich nicht nur darin aus, daß die städtische Atmosphäre in der Nacht wärmer ist, sondern auch, daß die

Intensität der Wärmeinsel besonders klar mit der Grundflächenzahl und der unbefestigten Fläche zunimmt. Je geringer der Vegetationsanteil in der Bebauungsstruktur ist, desto häufiger und intensiver ist die Bebauung überwärmt. Umgekehrt bedeutet dies, daß in Ludwigshafen die Häufigkeit und Intensität der Wärmeinsel von der Bebauungsart abhängig ist, und daß zunehmend dichtere Bebauungsstrukturen die Belüftungswirkungen des vor allem regional getragenen Austauschs negativ beeinflussen. Die Abkühlung innerhalb dichterer Bebauung ist damit wesentlich geringer als in Bebauungsstrukturen mit entsprechend hohem Grünanteil.

Beispielhaft für die Art des Zusammenhangs zwischen Wärmeinsel und Grünanteil seien in Abb. 22a, b die Regressionen für die Sommerminima und die Häufigkeit von Überwärmungen (Temperaturdifferenz: Stadt wärmer als Freiland) dargestellt, die auch die lokalen Abweichungen und ihre Ursachen verdeutlichen.

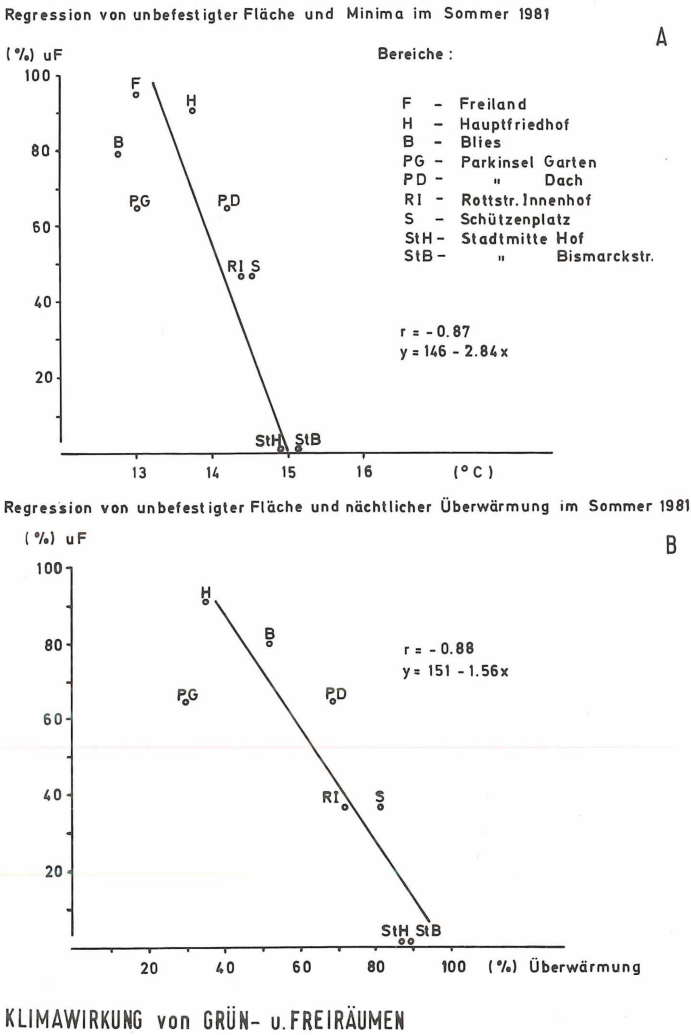


Abb. 22 a/b: Diagramme zur Wechselwirkung von unbefestigter Fläche und Temperaturindikatoren.

In der sommerlichen Jahreszeit verzeichnet der Bereich Stadtmitte die höchsten Minima. Entsprechend des geringen Grünanteils kann dieser Bereich nicht wesentlich geringere Temperaturen aufweisen. In der Rottstraße ist weder die Wirkung des Grüns noch die der nächtlichen Belüftung in der Lage, eine dem allgemeinen Zusammenhang entsprechende Abkühlung zu bewirken. Nach der Analyse ist dies eine Folge der Wärmespeicherung der Baumassen und des geringen Belüftungseingriffs.

Auch der Hauptfriedhof ist wärmer als aufgrund der randlichen Lage und des ausgedehnten Grünanteils zu erwarten wäre. Bedingt wird dies durch die Flächennutzung des Friedhofs mit einem dichten Baumbestand. Aufgrund seines klimatisch verzögerten Tagesgangs kühlt ein Bestand weniger stark aus als die Acker- oder Grasflächen um die Blies, die ein Minimum aufweist, das wesentlich kühler ist als aufgrund der Flächennutzung und des Grünanteils zu erwarten wäre.

Eine größere Differenz zu der Regressionsgeraden ergibt sich auf der Parkinsel. Hier sind die Straßen- und Gebäudeflächen aufgrund der häufigen Warmluftschübe des Stadtteils Süd im Zuge der nordwestlichen Belüftung überdurchschnittlich wärmer. Im Gegensatz hierzu ist die Abkühlung in den Gartenbereichen so ausgeprägt wie im Freiland. Durch die stabilen Schichtungsverhältnisse kann in den Gärten die Luft noch verstärkt abkühlen. Das stagnierende Kaltluftpotential wird deshalb auch nur wenig in die Luftaustauschbewegungen eingebunden, so daß diese Bereiche die Straßenräume der Parkinsel kaum mehr beeinflussen können.

In der Regression zum sommerlichen Minimum wird die Abkühlung ausgedehnter Grünräume an ihrer Abweichung von der Regressionsgeraden offensichtlich, wobei die Bereiche mit über 50 % Grünanteil besonders günstig abschneiden.

Die Wirkung der unbefestigten Flächen beschränkt sich nicht nur auf die Abkühlungsleistung (° C), sondern beeinflußt auch die Häufigkeit der nächtlichen Wärmeinsel. In der Abb. 22b sind die Bereiche unterhalb der Regression bei Belüftungssituationen häufiger kühler als aufgrund des allgemeinen Zusammenhangs (Anteil unbefestigter Flächen) zu erwarten wäre. Bis auf die Stadtmitte handelt es sich hier ausschließlich um Grün- und Freiräume.

Überraschend ist die Stadtmitte zu 11 – 13 % weniger häufig gegenüber dem Freiland überwärmt als der geringe Grünanteil dies bewirken könnte. Sicherlich ist dies eine Wirkung der nächtlichen Belüftung. Rechnet man diese Abweichung auf die Gerade hoch, gleicht der nächtliche Luftaustausch einen fehlenden Grünanteil von ca. 15 % aus. Berücksichtigt man diese Gesetzmäßigkeit, müßte sich mit einem Grünanteil von 20 % die städtische Wärmeinsel in der Stadtmitte von fast 90 % auf ca. 70 % Häufigkeit senken lassen, wobei zusätzlich die Intensität der Überwärmung gemindert würde. Zudem könnten kühlere Luftmassen von randlichen Freiräumen etwa in begrünte Innenhöfe einer entsprechenden Größe wirksamer eingreifen, wie dies die Analyse zeigte.

Trotz eines größeren Grünanteils in der Bebauungsstruktur sind die Straßenräume im Stadtteil Süd häufiger wärmer. Die Abweichung gegenüber dem Innenhof resultiert aus der geringeren Belüftungswirkung und dem ebenfalls geringeren Grünanteil. Trotz des hohen Grünanteils auf der Parkinsel weisen die Straßen- und Dachbereiche durch die leeseitige Verlagerung der Warmluft des Stadtteils Süd in die Zone häufigerer und intensiverer Überwärmung ab.

Gegenüber dem sommerlichen Minimum verhält sich die Blies im Bereich der Überwärmung anders. Die häufigeren, wärmeren Verhältnisse an der Blies gegenüber dem Freiland werden allerdings nicht durch die Bebauung, sondern hauptsächlich durch die weniger rasche Abkühlung am Abend bedingt, was einmal aus einem abendlichen

Wärmestau an der Station und zum anderen an der Warmluftverlagerung aus der Stadt mit der regionalen Nordostkomponente in den Abendstunden liegt. Eliminiert man diese Einflüsse, würde sich die Blies entsprechend der Regressionsgeraden verhalten.

Während die Wirkung des Luftaustauschs auf die Abkühlung und das Temperaturniveau deutlich in Abhängigkeit zur Bauweise und ihrem Grünanteil steht, ergibt sich für die Intensität der Luftaustauschvorgänge am Indikator Ventilationsgrad kein signifikanter Zusammenhang. Weder die sehr negativen Stagnationserscheinungen noch die positiven höheren Windgeschwindigkeiten weisen anhand der Korrelation in Tab. 9 auf Abhängigkeiten hin.

Im Bereich der Belüftungen scheint sich ein nicht erwarteter Zusammenhang zwischen Zunahme des Belüftungsanteils bei abnehmender Bebauungsdichte anzudeuten, doch reicht die Höhe des Korrelationswertes bei einer Anzahl von 5 Strömungsstationen nicht für eine Aussage aus. Zum anderen wird die Ventilationsgeschwindigkeit noch durch andere Faktoren wie Stationshöhe, Aufstellungsorte etc. beeinflußt, die das Ergebnis unter Umständen sehr stark mitbestimmen können.

In der atmosphärischen Schichtung, die für die Belüftung der Bebauung einen wesentlichen Einfluß ausübt, zeigen sich mit labilen Schichtungsverhältnissen weder im Winter-

Tabelle 9: Klimawirkungen von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein
Korrelation von Flächennutzungsfaktoren und klimaökologischen Parametern auf der Basis statistischer Werte
Wirkungen auf Ventilationsgrad und atmosphärische Schichtung

Maßzahlen von Ventilationsgrad und Schichtung	Faktoren der Flächennutzung: Geschoßflächenzahl GFZ	Grundflächenzahl GRZ	Unbefestigte Fläche in (%) UF
Ventilationsgrad im Sommerhalbjahr:			
Gesamtstagnationsgrad (Windgeschw. < 0.5 m/s)	0.02	−0.16	+0.17
Gesamtdurchlüftungsgrad (Windgeschw. > 2.6 m/s)	0.79	0.58	−0.57
Gesamtbelüftungsgrad (Windgeschw. < 2.5 m/s)	* −0.70	−0.75	+0.80
Nächtliche Schichtung bei Belüftungssituationen			
a) Winterhalbjahr:			
– labil	0.25	0.50	−0.57
– neutral	* 0.94	0.78	−0.78
– stabil	* −0.93	−0.87	+0.89
b) Sommerhalbjahr:			
– labil	0.49	0.26	−0.25
– neutral	* 0.88	0.83	−0.84
– stabil	* −0.88	−0.78	+0.55

* Korrelation zu über 95 % gesichert

noch im Sommerhalbjahr Zusammenhänge ab, da sich während der dargestellten nächtlichen Belüftungssituationen nur selten labile Schichtungsverhältnisse aufgrund der physikalischen Prozesse einstellen können.

Neutrale und stabile Schichtung korreliert mit den Flächennutzungsfaktoren unter gegenläufiger Tendenz. Neutrale Schichtung ist eng an verdichtete Bebauung (GFZ) geknüpft. Umgekehrt nimmt die stabile Schichtung ab. Weniger verdichtete und grünere Freiräume und Bebauungsstrukturen weisen einen höheren stabilen Schichtungsanteil bei nächtlichen Belüftungssituationen auf. Durch Belüftung der Bebauung und ihrer Wirkung ist diese Tatsache sehr bedeutsam, wie die Analyse der Belüftungsverhältnisse zeigte. Strömungen aus randlichen Freiräumen, die kälter und stabil geschichtet sind, können in dichterer Bebauung, in der neutrale Schichtung besteht, über das Dachniveau nur schwer eingreifen; während sie in stabil geschichtete Grünbereiche dagegen abzusinken vermögen und Frischluft heranführen. Hier verbindet sich der lokale Abkühlungseffekt von Grünräumen mit der regionalen Belüftungsströmung.

In labil geschichteten Straßenbereichen kann diese Frischluft nur schwer eindringen. Meist ist ihr Eingriff nur dann möglich, wenn sich die Frischluft über vorgelagerten Stadtvierteln aufwärmt und sich mit der neutral geschichteten Luft vermischen kann.

Die bioklimatischen Maßzahlen in Tab. 10 zeigen überraschenderweise nur in einem Fall einen Zusammenhang mit den Flächennutzungsfaktoren auf. Weder ihre Häufigkeit noch ihre Andauer wird in den untersuchten Bereichen von der Bebauung beeinflußt, wie anfangs vermutet worden war.

Dies weist auf den Faktor der Luftfeuchte hin, die in der Schwüle- und Wärmebelastung eine wesentliche Rolle spielt. Die Luftfeuchte wird nicht nur von der Flächennutzung, sondern auch von advektiven Prozessen des Luftaustauschs bestimmt, wie in der Analyse die hohe Luftfeuchtigkeit belasteter Schwülesituationen im Dachniveau des Stadtteils Mitte zeigte. Vollzieht sich nämlich in Ludwigshafen bei bioklimatischen Belastungssituationen der Luftaustausch über den Rhein als Ausgleichsraum, werden sowohl dichtere Bebauung als auch durchgrüntere Bereiche mit feuchtwarmen Luftmassen belastet, die sich bei neutralen Schichtungsverhältnissen in der Stadt besonders intensiv auswirken können.

Darüberhinaus bewirkt geringe Ventilation und stabile Schichtung in Grünbereichen aufgrund der höheren Luftfeuchte sehr intensive bioklimatische Belastungen. Desweiteren können im Zuge des Luftaustauschs durch Warmluftschübe belastete Luftmassen der Stadt oder des Rheins in diese grünreichen Bereiche eindringen und den Abbau kurzfristiger Belastungen verzögern und vermindern. Diese Einflußfaktoren der Luftfeuchte verhindern Korrelationen zwischen den bioklimatischen Parametern Schwüle- und Wärmebelastung mit den Flächennutzungsfaktoren.

Erst bei der Ausschaltung der Luftfeuchte, wie es in der Abkühlungsgröße geschieht, zeigt sich wiederum der Einfluß der Flächennutzungsfaktoren. Die kombinierte Wirkung von Ventilation und Lufttemperatur verdeutlicht den Zusammenhang mit verdichteter Bebauung wesentlich besser. Allgemein kann gefolgert werden, daß die Abkühlungsgröße mit zunehmender Überbauung (GRZ) und abnehmender unbefestigter Fläche linear schrumpft. Wie die Analyse der Abkühlungsgröße verdeutlichte, kann die verbesserte Ventilation in Grün- und Freiräumen die Häufigkeit und Intensität bioklimatischer Belastungssituationen senken. Die Zuordnung und Mischung von begrünten und bebauten Bereichen trägt hier wesentlich zur Güte des klimatischen Umfeldes bei, in dem die Wärmeregulation des menschlichen Organismus erfolgt.

Tabelle 10: Klimawirkungen von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein

Korrelation von Flächennutzungsfaktoren und klimaökologischen Parametern auf der Basis statistischer Werte

Wirkungen auf das Bioklima (thermische Belastung)

Maßzahlen des Bioklimas:	Faktoren der Flächennutzung Geschoßflächenzahl GFZ	Grundflächenzahl GRZ	Unbefestigte Fläche in (%) UF
Anteil der Schwüle in %	0.15	0.55	−0.56
− Andauerquotient	−0.03	0.11	−0.02
Anteil der Wärmebelastung in %	0.17	0.51	−0.53
− Andauerquotient	−0.00	0.05	+0.02
Anteil belastender Stunden in der Abkühlungsgröße	* 0.76	0.82	−0.83

* Korrelation zu über 95 % gesichert

Vertieft man diese statistischen Erkenntnisse anhand von Belüftungssituationen, die repräsentativ für die Wärmeinsel und Belüftung in Ludwigshafen sind, und erweitert die Anzahl der Bebauungsstrukturen aufgrund der Daten von Meßfahrten, so ergibt sich in Tab. 11 ein sehr differenziertes Bild der Leistungen des Luftaustauschs und der Einflüsse der Bebauung.

In allen Situationen korrelieren die eigenständigen Abkühlungsraten, die Gesamtabkühlung und das Abkühlungsniveau (Temperaturminimum) hoch signifikant mit den ausgewählten Flächennutzungsfaktoren. Insgesamt wird also die eigenständige Abkühlung und die Gesamtabkühlung in der Nacht durch den Grünanteil verstärkt oder bei zunehmender Verdichtung verringert.

Mit der Wirkung der nordwestlichen Regionalströmung nach 22.00 Uhr läßt sich zwischen Bebauung und Abkühlungsrate kein Zusammenhang mehr feststellen. Der durch diese Strömung intensivierte Luftaustausch bewirkt in fast allen Bereichen eine gleichmäßige Abkühlung, wobei die Bebauungswirkungen nicht nivelliert werden, wie die Korrelation der Gesamtabkühlungsrate und des Minimums zeigt.

Die Nichtkorrelation verdeutlicht einen wirksamen Luftaustausch in allen Bereichen, dessen Leistungsfähigkeit die höheren Wärmebelastungen in der dichteren Bebauung aber nicht überdurchschnittlich zu mindern vermag. Die Wirkung ist überall in der gleichen Größenordnung, da diese Belüftung vornehmlich über das Dachniveau strömt und hier nicht ganz so kühle Luftmassen in die Bebauung bringt, wie dies am Rande in bodennahen Bereichen geschieht.

Trotz dieser Belüftungsströmung ist der Wärmeabbau innerhalb der Bauviertel entscheidend vom Grünanteil und den überbauten Flächen abhängig. Die Wirkung der Vegetation wird durch die regionale Belüftung nicht unterbunden, sondern kann sich nur nicht weiter entsprechend intensiv entfalten, so daß die Abkühlungsdifferenzen vor Einsetzen der Regionalströmung bis zum nächsten Morgen in etwa fortbestehen.

Tabelle 11: Klimawirkungen von Grün- und Freiräumen in Ludwigshafen/Rhein

Korrelation von Flächennutzungsfaktoren und klimaökologischen Parametern auf der Basis von Meßfahrten (erweiterter Umfang)

Abkühlungsleistungen ausgewählter Belüftungssituationen

Maßzahlen der Abkühlung	Faktoren der Flächennutzung: Geschoßflächenzahl GFZ	Grundflächenzahl GRZ	Unbefestigte Fläche in (%) UF
Belüftungssituation am 14./15. 8. 1981			
eigenständige Abkühlungsrate (18 – 22 Uhr)	* −0.38	−0.62	+0.69
Abkühlungsrate mit regionaler Belüftung (22 – 5 Uhr)	0.08	−0.05	−0.05
Gesamtabkühlungsrate (Amplitude)	* −0.79	−0.80	+0.80
Niveau des Abkühlungsendes (Minimum)	* 0.80	0.84	−0.83
Belüftungssituation am 30./31. 5. 1981			
eigenständige Abkühlungsrate (18 – 22 Uhr)	* −0.71	−0.57	+0.54
Abkühlungsrate mit regionaler Belüftung (22 – 5 Uhr)	0.19	0.24	−0.39
Gesamtabkühlungsrate (Amplitude)	* −0.69	−0.61	+0.56
Niveau des Abkühlungsendes (Minimum)	0.07	0.53	−0.40
Belüftungssituation am 14./15. 2. 1981			
eigenständige Abkühlungsrate (18 – 22 Uhr)	* −0.76	−0.65	+0.62
Abkühlungsrate mit regionaler Belüftung (22 – 5 Uhr)	0.26	0.30	−0.33
Gesamtabkühlungsrate (Amplitude)	−0.61	−0.28	+0.15
Niveau des Abkühlungsendes (Minimum)	* 0.79	0.84	−0.71

* Korrelation zu über 95 % gesichert

Die Regressionsdiagramme in Abb. 23a, b verdeutlichen an einem sommerlichen und winterlichen Beispieltag die Art des quantitativen Zusammenhangs zwischen dem Anteil unbefestigter Fläche und dem morgendlichen Temperaturminimum.

Sehr auffällig ist an den Diagrammen der lineare Zusammenhang von höheren Minima bei abnehmendem Grünanteil. Die Abweichungen von der Geraden weisen auf lokale Besonderheiten hin, wobei sich drei unterschiedliche Abkühlungsleistungen erkennen lassen.

- Bereiche auf oder unmittelbar an der Regressionsgraden.
  Ihre Abkühlung ist entsprechend dem Anteil der unbefestigten Fläche.
- Bereiche oberhalb der Regressionsgeraden.
  Die Abkühlung ist geringer als im allgemeinen Zusammenhang zu erwarten wäre. Dies kann einmal durch die Flächennutzung, zum anderen aber auch durch die Wirkungen der regionalen Strömung bedingt sein.
- Bereiche unterhalb der Regressionsgeraden.
  Die Abkühlung ist überdurchschnittlich durch das umgebende Freilandpotential oder durch Leistungen der Belüftung.

Trotz einiger gravierender Abweichungen wird der Gesamtzusammenhang mit der unbefestigten Fläche in den sommerlichen Werten sehr deutlich.

Eine ihrem Grünanteil entsprechende Abkühlung weisen der Stadtteil West (StW), die V.-Bauersiedlung (VB) und die Parkinsel im Gartenbereich auf.

In der V.-Bauersiedlung und dem Stadtteil West wird keine überdurchschnittliche Abkühlung erreicht, obwohl diese Bereiche dem Freiraum Hauptfriedhof unmittelbar benachbart sind. Aufgrund der Einzelanalyse wird dies vom geringen Eingriff der Belüftung verursacht. In die geschlossene Bebauung kann die kühlere Luft des Freiraums nur wenig einfließen. Zusätzlich verhindert der hohe Baumbestand des Hauptfriedhofs eine wirksamere Ausgleichströmung. Durch Fehlen größerer Freiräume innerhalb des Stadtteils kann die Strömung kaum über dem Dach günstigere Wirkungen erzielen. Im unterschiedlichen Temperaturniveau wird die Kühlwirkung des höheren Grünanteils in der V.-Bauersiedlung deutlich, die sich aber auf die Flächen und angrenzenden Gebäude selbst beschränkt.

Zu den Bereichen mit unterdurchschnittlicher Abkühlung zählt die Rottstraße. Am Schützenplatz (RS) ist die geringere Abkühlung gegenüber dem Innenhof (RI) durch die Wärmespeicherung der allseits befestigten Flächen als auch in der schwierigen Belüftung mit kühleren Luftmassen in den labil geschichteten Straßenräumen bedingt. Durch die größere Entfernung zu randlichen Freiräumen kann auch die regionale Belüftung nur mehr schwach wirken. Grünbereiche, wie die Gärten im Innenhof, können hier zeitweise und graduell unterschiedlich etwas günstigere Abkühlungen bewirken.

Trotz der randlichen Lage zum Freiraum Blies kann das Herderviertel wegen des geschlossenen Bebauungsrandes nicht entsprechend seiner Bauweise und seines Grünanteils abgekühlt werden. Die Frischluft des Freiraums bewegt sich um oder über das Viertel hinweg. Bodennahe Öffnungen im Bebauungsrand, wie an der A.-Schweitzer Schule, könnten hier den Luftaustausch steigern und zu einer geringeren nächtlichen Überwärmung beitragen.

Die Wirkungen des Grüns auf der Parkinsel werden im Dachniveau (PD) durch die Warmluftschübe des Stadtteils Süd sehr deutlich eingeschränkt. Die Warmluftfahne führt in der Schwanthaler-Allee zu Abkühlungswerten, als ob eine unbefestigte Fläche von 45 % vorhanden wäre. Mit den Warmluftschüben wird nicht nur die eigenständige

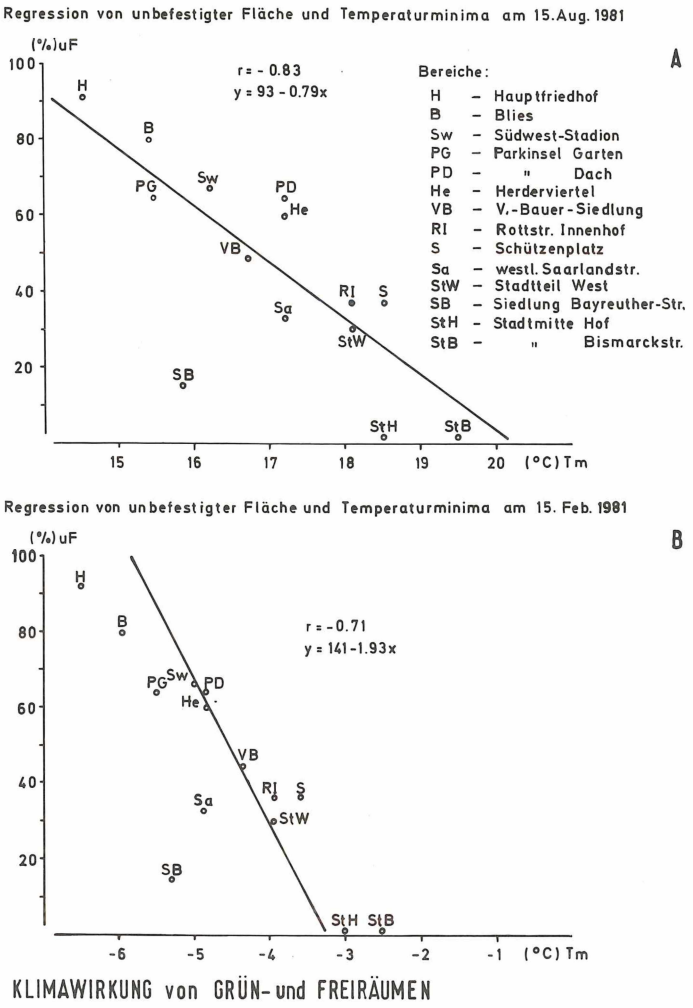


Abb. 23 a/b: Diagramme zur Wechselwirkung von unbefestigter Fläche und Temperaturindikatoren auf der Basis von Meßfahrten.

Abkühlung der Parkinsel vermindert, sondern auch lufthygienische Belastungen in dieses grüne Wohngebiet verfrachtet, wie die Analyse ergab. Ähnliches wie für die Parkinsel gilt auch für das Südweststadion (SW). Obwohl hier 67 % der Flächen unbefestigt sind, kommt durch die regionale Belüftung aus dem Stadtteil Süd erwärmte Luft in diesen Freiraum. Die eigenständige Abkühlung wird durch die Vermischung der einströmenden Luft verringert. Der Freiraum wird durch diese Abwärme mehr eingeschränkt als aufgrund der Flächennutzung und des Abkühlungsverhaltens der Oberflächen in der Einzelanalyse zu erwarten wäre. Für die ausgedehnten Freiräume Blies und Hauptfriedhof muß ergänzend in Rechnung gestellt werden, daß Einflüsse von Siedlungsflächen und Baukörpern gering sind und die klimatisch geringen Abweichungen von der Geraden andere Ursachen haben.

Im Bereich der Blies zeigt sich die Wirkung der regionalen Strömung. Die ständige Luftbewegung und die damit verbundene Abfuhr kühlerer Luftmassen bewirkt, daß eine geringere Gesamtabkühlung zustande kommt als aufgrund des hohen Anteils unbefestigter Flächen zu erwarten wäre.

Bei geringerer Luftbewegung, wie im Hauptfriedhof, kann zwar eine noch stärkere Abkühlung entstehen, doch schwächt auf der anderen Seite der dichte Baumbestand eine wesentlich intensivere Gesamtabkühlung ab. Würde anstelle des Hauptfriedhofs eine der Blies ähnliche Freilandsituation herrschen, ist anzunehmen, daß die regionale Belüftung fast ähnliche Abkühlungsverhältnisse wie an der Blies entstehen ließe.

In bebauten Gebieten, die unterhalb der Regressionsgeraden liegen, zeigen sich überdurchschnittliche Abkühlungen, die außer von der Bauweise auch von der topographischen Lage und dem Einfluß des Luftaustausches bestimmt werden.

Zwar weist der Bereich Stadtmitte im Niveau immer noch die geringste Abkühlung auf, doch ist das Temperaturminimum geringer als es der Anteil unbefestigter Flächen annehmen ließe. Deutlich zeigt sich die in der Analyse festgestellte Belüftung an der stärkeren Abkühlung des Hofs (StH) gegenüber der Fußgängerzone (StF). Die Abkühlung erreicht ein Niveau, das aufgrund der Regression bei 10 % oder 25 % unbefestigter Fläche entstehen würde. Durch die Belüftung über das Dachniveau kann der fehlende Grünanteil kompensiert werden. Ein begrünter Hof mit Rasenstellplätzen und Dachgärten auf den niedergeschossigen Gebäuden könnte die klimatischen Verhältnisse nochmals um 10 – 20 % verbessern. Die tägliche Aufheizung würde dadurch verringert, und die abendliche rasche Abkühlung würde für ein angenehmeres klimatisches Milieu sorgen.

Die Siedlung an der Bayreuther Straße (SB) wird durch ein nicht verbautes Umfeld beeinflußt. Die 2 ha große, hoch verdichtete und befestigte Siedlung kann durch das Ausgleichspotential der Umgebung stärker abgekühlt werden. Die Wirkung der Belüftung und der Abkühlung gleicht hier einen Anteil von 40 % unbefestigter Fläche aus, was aber nur möglich ist, da dieser Bereich völlig frei gelegen ist. Innerhalb einer umgebenden Bebauung und mit vergrößerter Entfernung zu stadtrandlichen Freiräumen würde diese Abkühlungswirkung um mehrere ° C schrumpfen.

Die randliche Lage und die eigenständige Abkühlung der Grünflächen innerhalb der Bebauung westlich der Saarlandstraße (Sa) bedingt ebenfalls eine intensivere Abkühlung im Zuge des Luftaustauschs, als aufgrund der Regressionsgeraden bei dieser Baustruktur zu erwarten wäre. Wie die Analyse der Luftaustauschprozesse an diesem Tage zeigte, ist diese positive Wirkung zum einen durch den Grünbereich innerhalb der Bebauung bedingt und zum anderen durch den Eingriff bodennaher kühlerer Luftmassen aus dem Bereich der Blies.

Die winterlichen Verhältnisse in der Abb. 23b zeigen einen steileren Zusammenhang und in einigen Bereichen Veränderungen gegenüber dem Sommer.

So sind die ausgedehnten Freiräume wohl aufgrund der Stagnationserscheinungen wesentlich kühler als im Sommer, während die dichter bebauten Bereiche innerhalb der Stadt wie der Stadtteil West, Mitte und Süd überdurchschnittlich wärmer sind. Im Winter dürfte der anthropogene Energieeinsatz und seine Abwärme die Hauptursache für diese wärmeren Verhältnisse sein. Die geringere Ventilation in diesen Bereichen kann diese zusätzliche Energie kaum kompensieren. Flächennutzungsstrukturen mit geringem Grünanteil, die innerhalb von Freiräumen oder an deren Rand liegen (westlich der Saarlandstraße und Siedlung an der Bayreuther Straße) verhalten sich ähnlich wie im Sommer.

Obwohl im winterlichen Zustand von der Vegetation nur sehr schwache Wirkungen ausgehen, sind die innerstädtischen Freiräume gegenüber den Straßenräumen kühler. Die Verhältnisse in der Stadtmitte oder an der Rottstraße gleichen fast dem Sommer, wenn auch die Differenzen etwas geringer sind.

Dies verdeutlicht, daß ausreichend große Freiräume innerhalb der Bebauung nicht nur durch die Wirkungen des Grüns, sondern auch durch günstigere Ventilationsverhältnisse klimatisch bedeutsam sind. Am Beispiel der Saarlandstraße zeigt sich, daß die Belüftung zu besonders positiven Abweichungen führt, wenn der Luftaustausch sich sowohl über das Dachniveau als auch bodennah vollziehen kann. Der Einfluß auf den Luftaustausch, d. h. daß Strömungen im Dachbereich in diese Freiräume bis zum Boden eingreifen können, ist dabei ganzjährig wirksam. Die Luftaustauschwirkung innerstädtischer Freiräume eines gewissen Umfangs sollte bei planerischen Entscheidungen daher nicht vernachlässigt werden.

8.0. Ergebnisse und Planungshinweise

Über den einzelnen Bereich hinaus läßt sich nach der numerischen Analyse der ausgewählten Freiräume und Flächennutzungen festhalten, daß ganz allgemein ein kausaler Zusammenhang zwischen stadtklimatischen Erscheinungen und Faktoren der Flächennutzung besteht.

Als Beispiel für die Stadt Ludwigshafen/Rhein sei auf die Regression zwischen Temperaturminimum und unbefestigter Fläche in Abb. 23 hingewiesen. An diesem repräsentativen Sommertag reduziert ein 20 % höherer Grünanteil das morgendliche Minimum im Mittel um 1° C. An diesem Tag wird im Stadtteil West mit 30 % Grünanteil ein Minimum von 18,2° C registriert, während im Bereich der Valentin-Bauer-Siedlung bei 50 % Grünanteil ein Minimum von 16,8° C und im Freiland 14,1° C erreicht werden. Übertragen auf den nächtlichen Luftaustausch bedeutet dies, daß er die gespeicherte Wärme in den Baumassen nur entsprechend der Flächennutzung auszugleichen vermag.

8.1. Ergebnisse der Regressions- und Korrelationsanalyse

Für eine Reihe stadtklimatischer Parameter ist ein kausaler Zusammenhang mit Faktoren der Flächennutzung gegeben. Die Form der Beziehung entspricht einer Geraden. Über die Art und Intensität läßt sich kurz zusammenfassen:

- Die Flächennutzung steigert mit zunehmender Überbauung (GRZ) und Verdichtung (GFZ) mehrere klimatische Parameter.
- Zunehmender Grünanteil (UF) kompensiert die Wärmespeicherung der Gebäude.
- Die Wirkungen der Baumassen zeigt sich besonders anhand der Wärmeinsel. Die Temperaturen nehmen nicht einfach vom Stadtrand zur Stadtmitte zu, wie manche Autoren folgern (CHANDLER 1976, AUER 1978), sondern sind eng an die jeweilige Flächennutzung gebunden. So entstehen einzelne Wärmegipfel und -senken. Der homogen gedachte Begriff der städtischen Wärmeinsel ist durch die Regressionsanalyse überdenkenswert.
- Die Flächennutzung wirkt sich nicht nur auf die Intensität der Wärmeinsel aus, sondern überraschenderweise auch auf deren Häufigkeit. Sie beeinflußt dadurch nicht nur Belüftungssituationen, sondern auch die mittleren Verhältnisse der Jahreszeiten und des Jahres.
- Durch die anthropogene Energiezufuhr in der Heizperiode ist dieser Einfluß auch für den Winter deutlich nachweisbar, gerade weil hier Grün- und Freiräume wenig kompensieren können.

- Die Regression zeigt sich besonders an den nächtlichen Temperaturverhältnissen, dem Minimum und der Amplitude. Die Tagestemperaturen und die Maxima entziehen sich weitgehendst einem rechnerischen Zusammenhang. Dies ist nur über den Luftaustausch zu erklären. Der intensivere Luftaustausch am Tage durchmischt die Luft, so daß nur geringe Temperaturunterschiede entstehen. Der schwächere nächtliche Luftaustausch kann dies nicht leisten. Er ist abhängig von der Flächennutzung.
- Die Art der Flächennutzung wirkt sich auch auf die atmosphärische Schichtung zwischen 2 m Höhe und dem jeweiligen Dachniveau aus. Mit zunehmender Bebauung ist die Luft neutral geschichtet, während Grünräume vermehrt stabile Schichtungsverhältnisse (Temperaturinversionen) aufweisen.
- Eine lineare Regression stellte sich auch zu dem bioklimatischen Parameter der Abkühlungsgröße ein. Höhere Ventilation und Abkühlung in den Freiräumen verbessert die bioklimatische Luftgüte.

Verschiedene klimatische Parameter wiesen keinen rechnerischen Zusammenhang mit den Faktoren der Flächennutzung auf.

- Durch unterschiedliche Windrichtungen zur gleichen Zeit wurde die Richtung des Luftaustauschs gar nicht in die Regression einbezogen.
- Die Intensität des Luftaustauschs anhand des Kriteriums Ventilationsgrad deutete auch keinen Zusammenhang an.
- Für Windrichtung und Windgeschwindigkeit als direkte Kennzeichen des lokalen Luftaustauschs ist anzumerken, daß sich mit einem erweiterten Meßnetz und einer verfeinerten Datenverarbeitung sicherlich ähnliche Regressionen nachweisen lassen werden.
- Für die bioklimatischen Parameter Schwüle und Äquivalenttemperatur ergab sich ebenfalls kein kausaler Zusammenhang. In beiden Parametern spielt die Luftfeuchte in Form des Dampfdrucks eine wesentliche Rolle. Durch das hohe Wasserdampfangebot längs des Rheins wird über den lokalen Luftaustausch das Feuchtefeld so verändert, daß dicht bebaute Bereiche feuchter sind als die westlichen Freiräume.

  Diese besonderen lokalen Verhältnisse waren auch mit ein Grund, den Parameter Luftfeuchte nicht zu korrelieren.

Zur Gültigkeit der Aussagen muß methodisch noch angemerkt werden: Die Erkenntnisse der Regressions- und Korrelationsanalyse beziehen sich ausschießlich auf das lokale Beispiel der Stadt Ludwigshafen. Die Entwicklung allgemeiner, auch auf andere Räume übertragbarer Aussagen hat den geringen Umfang der Regressionspaare (N = 9 bis 16) zu berücksichtigen. Für eine wissenschaftlich völlig sichere Aussage wäre ein Mindestumfang von N = 25 anzustreben, was in dieser Arbeit meßtechnisch nicht zu bewältigen war.

Die Höhe der Korrelationswerte und ihre mehrfache Überprüfung zeigen jedoch, daß sich dadurch am kausalen Zusammenhang zwischen klimatischen Parametern und Faktoren der Flächennutzung nichts ändern würde. Durch einen erweiterten Umfang werden die Regressionen nur im Detail noch modifiziert.

Vor der Übertragung auf andere Städte sollten erst weitere Untersuchungen mit diesem Regressionsansatz durchgeführt werden. Die Regressionen sollten sich erst noch in anderen Landschaftsräumen erhärten.

Für die Stadtentwicklung und Stadtplanung der Stadt Ludwigshafen/Rhein lassen sich aus den Ergebnissen verschiedene Planungsempfehlungen zur Bauleit- und Grünplanung entwickeln.

Planungshinweise

– Über Flächennutzungs- und Grünplanung können eine Reihe stadtklimatischer Parameter beeinflußt werden.

- Bereiche mit hohem Gründefizit bilden die Zentren der intensivsten Wärmeinsel und bioklimatischen Belastung. Der lokale Luftaustausch reicht nicht aus, um die Wärmespeicherung der Gebäude zu kompensieren. Begrünungen können hier eine berechenbare Minimierung erzielen.
- Das Verhältnis von bebauter zu begrünter Fläche läßt sich durch den regressiven Zusammenhang nicht als allgemein gültigen Grenzwert festlegen. Die Schaffung von Freilandverhältnissen als optimales klimatisches Ziel ist nach den Regressionen nicht möglich. Die Bauleitplanung kann nur in Abhängigkeit von den individuell gegebenen Möglichkeiten positiv wirken.
- Durch die Regression haben die kommunalen Planungsträger die Möglichkeit, den klimatischen Effekt einer Maßnahme abzuschätzen. Für die Stadt Ludwigshafen lassen sich die Regressionen analytisch und prognostisch einsetzen.

Analytisch:
Setzt man in die Regressionsrechnung die Faktoren der Flächennutzung eines nicht untersuchten Bereichs ein, lassen sich näherungsweise eine Reihe klimatischer Größen bestimmen.

Beispiel:
Ein Baublock im Stadtteil Nord mit einem Anteil unbefestigter Fläche von 15 %, einer GRZ von 0,8 und einer GFZ von größer 1,5 müßte an einem repräsentativen Sommertag (Abb. 23) ein Minimum von 18,5 – 19,0° C aufweisen. Dies Minimum wäre um 4,5 – 5,0° C höher als die Werte zur gleichen Zeit im Freiland.

Prognostisch:
Verändert sich die Flächennutzung eines städtischen Bereichs (durch Verdichtung oder Begrünung), lassen sich die künftigen klimatischen Werte abschätzen.

Beispiel:
Werden im obigen Baublock bei Sanierungsmaßnahmen die Grünanteile auf 40 % gesteigert, so ist am Beispieltag ein Minimum von 17,5° C zu erwarten. Bezogen auf eine Stadt-Freiland-Differenz von 5,0° C wird durch die Begrünung im Minimum eine Reduzierung der Wärmeinsel um 20 % erreicht.

Die Ergebnisse der Regression eröffnen meines Erachtens eine weitere Anwendung. Langfristig scheint die Entwicklung eines Regressionsmodells zum Stadtklima in den Bereich der Möglichkeiten gerückt zu sein. Gegenüber Modellen auf der Basis von Einwohnerzahlen (SUMMERS 1965, OKE 1972, FEZER 1977b: s. auch Kritik BÖHM 1979) ist sowohl sachlich als auch rechnerisch der kausale Zusammenhang zwischen Klima und Bebauung nachgewiesen. Zu den Einwohnerzahlen gibt es sicher keinen kausalen Zusammenhang.

Darüberhinaus bietet ein planungsorientiertes Regressionsmodell den Vorteil, daß durch die Flächennutzungsfaktoren ein eindeutiger, räumlicher Bezug induziert wird, der auch exakte kleinräumige Aussagen ermöglicht.

Ein derartiges Modell muß sicherlich noch um eine Reihe von Parametern und Faktoren erweitert werden (z. B. Rauhigkeit, Lagebeziehungen, Wechselwirkungen etc.). Unterschiedliche Baustrukturen und Freiraumgestaltungen müssen die verbliebenen Lücken füllen. Korrekturfaktoren für Lagebeziehungen zu Ausgleichsräumen oder Wirkungen von Ausgleichsströmungen müssen die Basisregressionen ergänzen.

Ein solches Modell könnte mit wenigen lokalen Eingangsdaten für jeden Baublock die quantitative Größe der stadtklimatisch relevanten Klimaparameter hinlänglich genau angeben. Da ein Regressionsmodell immer einige lokale Werte benötigt, wird es auch immer auf den Untersuchungsraum bezogen sein.

Modelle, die auf der Schätzung oder Berechnung physikalischer Parameter (z. B. Strahlungsbilanz) aufbauen, können jedoch eher zu unstimmigen Ergebnissen kommen. Hier sei als Beispiel auf die Simulationen von OUTCALT (1972) verwiesen, der mittels physikalischer Parameter (Strahlung, Albedo, Rauhigkeit etc. – insgesamt 16 Parameter) modellhaft Tagesgänge der Temperatur für Stadt und Freiland errechnete. Es stellten sich hohe Temperaturdifferenzen am Tage und sehr geringe in der Nacht ein. Die Differenzen

sind für den Sommer größer als für den Winter. Die Regressionen für die Stadt Ludwigshafen/Rhein aber zeigen, daß gerade am Tage durch die Nicht-Regression keine Differenzen und in der Nacht sehr hohe und auch systematische Differenzen entstehen. An winterlichen Strahlungstagen können durch den anthropogenen Energieeinsatz höhere Differenzen entstehen als im Sommer. Dies trifft die tatsächlichen Gegebenheiten, die sich im Zuge des lokalen Luftaustauschs ergeben.

Ein Regressionsmodell wird daher verläßlicher sein als Simulationen, die unabhängig von den räumlichen Bezügen auf physikalischen Berechnungen aufbauen.

Auch umfangreichere, dynamische Modelle, wie sie eingangs erwähnt wurden, zielen zunächst auf die physikalischen Prozesse. Planungsaussagen können erst über die physikalische Auswirkung abgeleitet werden. Ein Regressionsmodell weist schon durch die Flächennutzungsfaktoren auf planerische Möglichkeiten hin.

Planungshinweis

Die Entwicklung eines mathematischen Modells zum Stadtklima scheint über den Weg der Regression möglich zu werden. Der hohe Aufwand lokaler Untersuchungen ließe sich dann reduzieren.

8.2. Ergebnisse der Einzelanalyse

Ein Teil der Einzelanalyse bestand auch in der Aufnahme von Oberflächentemperaturen verschiedener städtischer Materialien, da durch diese Wärme aufgenommen und gespeichert wird (s. CHANDLER 1976). Die Wahl der Materialien ist eine der Ursachen der städtischen Wärmeinsel. Neben Asphalt verhielten sich in Ludwigshafen/Rhein auch die häufig anzutreffenden dunklen Fassaden besonders negativ. So heizen sich dunkle süd- und westexponierte Hauswände höher auf als helle Fassaden. Nach Testversuchen (KÜNZEL 1978) liegen hellere Wandflächen im Maximum um 10° C unter den Oberflächentemperaturen kräftiger Farben. Gerade Hauswände stellen flächenmäßig den größten Anteil unbefestigter Fläche dar.

Planungshinweis

- Süd- und westexponierte Fassaden sollten nicht zu dunkle Farbtöne (grau, schwarz, braun) aufweisen. Rein weiße Töne sollten wegen der unangenehmen Reflexion höchstens in Nordexposition verwendet werden.
- Stellplätze und Fußgängerbereiche sollten durch Rasengittersteine oder Tonmaterialien (Fußgängerzone) wegen ihrer stadtklimatisch nachgewiesenen günstigeren Wirkung gestaltet werden.
- Asphalt und grauer Sichtbeton sollten wegen ihrer hohen Wärmeaufnahme nur Verwendung finden, wo dies unumgänglich ist.
- Eine Umgestaltung dieser Oberflächen ist schrittweise durch einen städtischen Fassadenwettbewerb zu erreichen, in dem neben den gestalterischen Kriterien auch die klimagerechte Fassadenausführung zur Prämierung heranzuziehen ist.

Als Ergebnis sind auch die Häufigkeiten und Intensitäten der Ludwigshafener Wärmeinsel erwähnenswert, da diese bisher bei Stadtklimauntersuchungen kaum berücksichtigt wurden (bisher nur in Wien: BÖHM 1979). In Belüftungssituationen ist die Stadt zu ca. 80 % aller Nachtstunden wärmer als das westliche Freiland. Hohe Stadt-Freiland-Differenzen von über 3° C treten zu 20 % ein. Im Extremfall bildet sich durch das veränderte Klimaverhalten der Stadt eine Differenz von 8° C aus. Situationen sehr hoher Wärmeinselintensität von über 5° C, wie sie von FEZER & SEITZ (1977a) in der Isothermenkarte dargestellt werden, treten in den Untersuchungsperiode nur zu 5 % auf.

Die häufigste Wärmeinsel bildet sich mit einer Differenz bis zu 3° C aus. Gerade für diese häufigste Form wäre durch grünordnerische Maßnahmen in Bereichen mit hohem Gründefizit Verbesserungen möglich. Durch lokal gezielte Flächenumwandlungen (Dachbegrünung, Innenhofbegrünung) könnten günstigere Wärmeverhältnisse erreicht werden.

Auch in Durchlüftungssituationen kann sich kurzzeitig eine Wärmeinsel bilden, was nach Erkenntnissen im klimatologischen Auswahlverfahren vor allem an windschwache und austauscharme Situationen gebunden ist. Durch die anthropogene Energiezufuhr und Abwärme der Gebäude ist der Anteil hoher Überwärmungen gegenüber dem Sommer im Winter noch gesteigert.

Planungshinweis

Die häufigste städtische Wärmeinsel bildet eine Differenz von 3° C zum Freiland aus. Sehr hohe Überwärmungen kommen zu 20 % vor. Die extremste Wärmeinsel kann sich bis auf 8° C belaufen. In Bereichen mit hohem Gründefizit sollten zur Kompensation der Überwärmung lokale Begrünungen eingesetzt werden (Innenhöfe/Dachbegrünung auf niederen Rückgebäuden) (vgl. auch die Regressionsergebnisse).

Die für alle Untersuchungsbereiche errechneten bioklimatischen Parameter zeigen hohe Belastungswerte an, die kein Erholungsort aufweisen dürfte. Beckenlandschaften, wie der Rheingraben, zählen nach der bioklimatischen Einteilung der Bundesrepublik (BECKER & WAGNER 1970) zu Gebieten mit den höchsten bioklimatischen Belastungen.

Gegenüber dem schon vorbelasteten Freiland zeigen alle bioklimatischen Parameter durch die Bebauung eine weitere Belastungssteigerung. Hiervon ist sowohl die Häufigkeit und Intensität als auch die Andauer der Belastung betroffen. Durch den hohen Wasserdampfgehalt am Rhein sind über den lokalen Luftaustausch gerade die rheinnahen Stadtteile besonders durch Schwüle belastet.

Der Parameter der Abkühlungsgröße, der auch in Regression mit der Flächennutzung steht, veranschaulicht, daß die bioklimatische Belastung auch durch die Bebauung verstärkt wird. Zwei Quellen sind hierfür die Ursache: Die städtische Überwärmung und die geringe Luftbewegung. So wünschenswert höhere Temperaturen im Winter vielleicht in der Stadt sein mögen, sie sind gleichzeitig an bioklimatische Belastungen gekoppelt. Personengruppen mit verminderter körperlicher Leistungsfähigkeit (Asthmatiker, Herz-/Kreislaufkranke etc.) reagieren äußerst negativ auf diese Umweltbelastungen.

Könnte man die direkte Wärmestrahlung der Gebäude in der bioklimatischen Bewertung noch berücksichtigen, würde die bioklimatische Güte der dicht bebauten Bereiche noch ungünstiger ausfallen.

Planungshinweis

Erhöhung des Grünanteils zur Minimierung der Wärmeinsel haben auch für die bioklimatische Güte positive Wirkungen. Je umfangreicher das Grün, desto geringer die bioklimatische Belastung. Verbesserte Abkühlung und höhere Ventilation beeinflussen die bioklimatischen Verhältnisse positiv. Abkühlung ist durch Begrünung zu erreichen. Höhere Ventilation ist durch Grünverbindungen zu den Freiräumen unter den Erkenntnissen des lokalen Luftaustauschs zu erzielen.

Ein bedeutsames Ergebnis der Untersuchung ist, daß sich der Luftaustausch weiter Bereiche Ludwigshafens oberhalb der Dachebene vollzieht, was in der Einzelanalyse mehrfach erläutert wurde.

In der beiliegenden schematischen Darstellung wird in einem Schnitt der städtischen Atmosphäre der Luftaustauschvorgang in vereinfachter Form wiedergegeben. Das Schema lehnt sich an das lokale Geschehen zwischen den westlichen Freiräumen über den Stadtteil Süd bis hin zum Südweststation an. Das Geschehen ist typisch für eine nächtliche Situation 2–3 Stunden nach Einsetzen der nordwestlichen Strömung. Die Werte für Temperatur und Windgeschwindigkeit entsprechen einer sommerlichen Situation.

Die Skizze veranschaulicht, daß die Richtung des Luftaustauschs in der Luftschicht unter 100 m Höhe gegen der darüberliegenden Höhenströmung um fast 180° entgegengesetzt ist. Die städtische Mischungsschicht dürfte in der Nacht daher auf diese Bodenschicht beschränkt sein.

In der bodennahen Atmosphäre strömt die kühle Luft von den westlichen Freiräumen auf die Bebauung zu. Öffnungen zwischen den Gebäuden durch Straßen oder Grünverbindungen (schon 30 m von Hauskante zu Hauskante zeigen hier eine positive Wirkung) strömt die Frischluft schubweise mit Geschwindigkeiten von 0,2–0,5 m/sec weiter, wie punktuelle Strömungsmessungen am Bebauungsgrad anzeigten. Ist dagegen der Bebauungsrand geschlossen, staut sich die kühle Luft, kühlt weiter ab und bleibt liegen. Reicht die abgekühlte Luftmasse bis in die Firsthöhe der Gebäude, beginnt sie, unterstützt von einer regionalen Nordwestströmung, sich im Dachniveau wie ein Flurwind fortzusetzen. Durch Kontakt mit der wärmeren Luft in der Bebauung und durch Verwirbelungen an Kanten etc. erwärmt sich die Strömung mit zunehmender Entfernung von den westlichen Freiräumen. Über kühleren Grünräumen, wie begrünten Innenhöfen, scheren Luftquanten von der Strömung ab, sinken ab und vermischen sich mit der bodennahen Luft.

Diese Belüftung in Höhe des Dachniveaus und darüber geht meist wie die bodennahen Strömungen ebenfalls schubweise vor sich.

Sind die Straßen strömungsparallel, kann die Strömung langsam eingreifen, indem sie absinkt und sich mischt. In quer zur Strömung verlaufenden Straßen greift die kühlere Luft fast nicht ein. Bei etwas höheren Windgeschwindigkeiten von ca. 1,5 m/sec kann Luft vom Dachniveau in Form einer Walze bis zum Boden eingreifen und die Luft austauschen.

Skizze des städtischen Luftaustauschs — Belüftung bei gegenläufigem Höhenwind

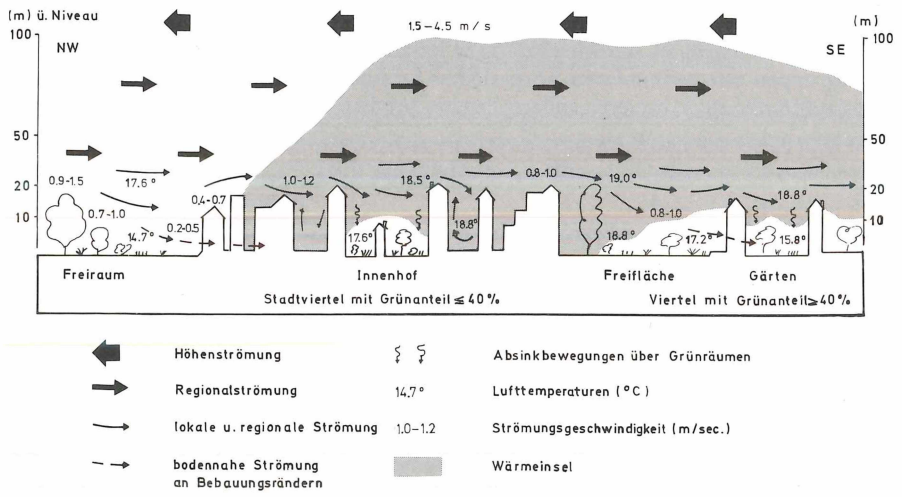


Abb. 24: Skizze des städtischen Luftaustauschs.

In einem ausgedehnteren, innerstädtischen Freiraum, wie etwa dem Südweststadion, sinkt die Strömung bis zum Boden ab. Durch die Vermischung kühlerer Luft des Grünbereichs mit der zustömenden wärmeren Luft entsteht im Freiraum eine insgesamt etwas kühlere Luftmasse als in der Bebauung. Derartige Freiräume sind dann allerdings wärmer als aufgrund ihrer Flächennutzung zu erwarten wäre. In Fortsetzung der nordwestlichen Strömung kann diese Luft über den Freiraum in die angrenzende Bebauung ähnlich wie am Stadtrand einfließen. Die Qualität dieser Luftmasse ist allerdings weniger gut als in stadtrandlichen Freiräumen, da sie in der Bebauung thermische und luftverunreinigende Emissionen aufgenommen hat. Für die Wirkung und Güte der Strömung ist entscheidend, ob sie über Grünbereiche (Abkühlung der Strömung) oder über bebaute Bereiche (Aufwärmung der Strömung) erfolgt. Je kühler die regionale Strömung ist, desto höher ist ihre Ausgleichsleistung innerhalb der Stadt.

Im Zuge dieser Strömung aus dem westlichen bis nordwestlichen Sektor wird die städtische Wärmeinsel vom Rande her abgebaut. Gleichzeitig wird im Lee von Baugebieten oder Stadtteilen diese Luft als Wärmefahne in die Freiräume verlagert. Durch die Aufwärmung und Verfrachtung wärmerer Luftmassen in der Bebauung können im Zuge der regionalen Luftaustauschbewegungen die Ausgleichswirkungen der innerstädtischen Grün- und Freiräume vermindert oder gar aufgehoben werden, was sich in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung im Stadtteil Mitte besonders deutlich auf der Parkinsel zeigte. Durch den Luftaustausch kann dichte, überwärmte Bebauung daher nicht nur die eigene Luftgüte beeinflussen, sondern auch die angrenzende Güte positiverer Klimabereiche.

Schon kleine Baukomplexe, die hoch verdichtet sind und eine umfangreiche Anzahl befestigter Flächen aufweisen, beeinflussen im Lee die Luftgüte bis zu 80 und 100 m Entfernung, wie das Beispiel der Siedlung an der Bayreuther Straße zeigte. Die Wärmefahne eines größeren Siedlungskomplexes geht dementsprechend noch weiter ins Lee hinaus, wie das Beispiel der Wärmefahne des Stadtteils Süd auf der Parkinsel darstellt. Diese Wärmefahnen im Lee einer Siedlung wurden bisher nur von wenigen Autoren angesprochen (vgl. BAND 1969).

Von einem stadteigenen Flurwindsystem allein kann diese Reichweite und Mächtigkeit des Luftaustauschs wohl nicht erreicht werden. Ein Flurwind eines etwa 100 ha umfassenden Freiraums, wie der Blies, könnte in der Ebene mit Sicherheit nur einige 100 m in die Bebauung eindringen und käme nach geraumer Zeit zum Erliegen.

Da diese Ausgleichsströmung sich sowohl in Oggersheim (SEITZ: Klimauntersuchung Oggersheim) als auch in allen westlichen Bereichen der Stadt nachweisen läßt, handelt es sich gleichzeitig um eine Strömung regionaler Erstreckung, die sich mit den Flurwinden der Freiräume verbindet. Wie die vereinfachte Darstellung zeigt, ist sie für die Belüftung der ganzen Stadt von hoher Bedeutung, da sie im Laufe der Nacht in Abhängigkeit von den Eingriffsmöglichkeiten über das Dachniveau neue Luftmassen in die Stadt bringt. Freiräume, die für die Entwicklung dieser Belüftung besonders vorteilhaft sind, sollten daher möglichst frei von Emissionen sein. Ist die Strömung mit Schadstoffen belastet, reichern sich diese in den Grünräumen bei stabilen Schichtungsbedingungen an.

Mehrfach ist in dieser Arbeit darauf hingewiesen worden, daß die regionale nordwestliche Belüftung der Stadt Ludwigshafen/Rhein von besonderer Bedeutung ist. Die Ursache, Entstehungsweise und Erstreckung der nächtlichen Strömung sollte durch eine entsprechende Untersuchung geklärt werden, da deren Wirkung nicht nur für die Stadt Ludwigshafen/Rhein von Bedeutung ist, sondern auch für die gesamte Region, wobei die Stadt Ludwigshafen/Rhein auf die Strömung bei austauscharmen Wetterlagen besonders angewiesen ist. Die seltene Grenzwertüberschreitung bei Schadstoffregistrierungen an winterlichen Belastungswetterlagen ist sicherlich mit durch die Belüftung von den west-

lichen Freiräumen bedingt. Die Regionalströmung führt neue Luftmassen in die Stadt, die die Klimaverhältnisse insgesamt günstiger gestalten als dies durch die Wechselbeziehung zwischen Stadt und ihren Grünräumen allein möglich wäre.

Planungshinweis

- In Belüftungssituationen wird der Luftaustausch ganz Ludwigshafens von einer regionalen Nordwest-Strömung getragen. Ihre vertikale Mächtigkeit geht häufig über 100 m Höhe nicht hinaus.

  Die Strömung hat sehr positive Wirkungen:

  a) wenn sie über Freiräume und Grünzüge weit in die Stadtteile im bodennahen Bereich eindringen kann,

  b) wenn sie über größeren innerstädtischen Freiräumen (Südwest-Stadion) absinken kann.
- Bebauungsränder sind durch mindestens 50 m breite Lücken im bodennahen Bereich zu öffnen.
- Mehrere nordwestlich-südöstlich verlaufende Grünzüge sind in der Flächennutzungsplanung auszuweisen.
- Die positive Wirkung der Nordwest-Strömung kann im Lee eines Siedlungskomplexes durch die Wärmefahne negativ wirken. Dieser Effekt läßt sich durch Begrünung im Siedlungskomplex und durch ausgedehntere Freiräume minimieren.
- Da selbst ausgedehnte Freiräume, wie das Südwest-Stadion mit 25 ha Fläche, keinen eigenen Luftaustausch mit der umgebenden Bebauung haben, der meßbar wäre, sind Freiräume besonders wegen ihres positiven Einflusses auf die Nordwest-Strömung bedeutsam. Sind diese Freiräume begrünt, ist ihr Einfluß gesteigert.
- Eine Mindestgröße dieser für den Luftaustausch absolut notwendigen Freiräume kann aus der Untersuchung nicht abgeleitet werden. Sicher ist nur, daß sich noch bei den Innenhöfen von ca. ½ ha Freifläche im Stadtteil Süd und Mitte Luftwechsel im Laufe der Nacht nachweisen ließen. Der Luftaustausch ist allerdings wesentlich geringer als beispielsweise im Bereich des Südwest-Stadions.

8.3. Ergebnisse für einzelne Bereiche

STADTTEIL MITTE

Der Stadtteil Mitte weist die größte Baudichte und ein hohes Gründefizit auf. Dementsprechend werden hier die höchsten Überwärmungen und bioklimatischen Belastungen registriert. Die Belüftung erfolgt überwiegend über die Grünzüge Rhein (Nordost) und Ebertpark (Nordwest). Quantitativ ist der Rhein doppelt so häufig wirksam wie der Bereich Nordwest, obwohl qualitativ die nordwestliche Belüftung günstiger ist. Im Einzugsbereich des Rheins wirken sich Immissionen einschränkend auf den Wert der Belüftung aus (Geruch, Wasserdampf).

Planungshinweis

- In Zusammenarbeit mit der Industrie und den zuständigen Stellen beiderseits des Rheins sollte die Stadt Ludwigshafen/Rhein bewirken, daß die Qualität ihrer Belüftung verbessert wird.
- Bestehende Innenhöfe sollten unter keinen Umständen verdichtet werden. Sie sind für die Belüftung von hoher Bedeutung.
- Durch die Begrünung der Innenhöfe und Flachdächer von Rückgebäuden wie Parkhäusern, Lagerhallen etc., kann einmal das Hofklima verbessert werden und zum anderen bei ausreichender Fläche auch Wirkungen für den ganzen Stadtteil erzielt werden.
- Die Umgestaltung ließe sich schrittweise durch einen Hofwettbewerb erreichen, wie ihn andere Städte zur Verbesserung der Wohnumwelt praktizieren.

STADTTEIL SÜD

Trotz des höheren Grünanteils im Stadtteil Süd können in der Bebauung noch hohe Überwärmungen und bioklimatische Belastungen festgestellt werden. Durch die entfernte Lage zu den westlichen Freiräumen kann sich die regionale Nordwest-Strömung nur schwach entfalten. Die Dimensionen der Innenhöfe lassen nur selten die Belüftung bis zum Boden durchgreifen. Die Wärmefahne des Stadtteils wirkt sich auf der Parkinsel und im Südwest-Stadion nachteilig aus. Das vorhandene Grün und die Belüftung können die Wärmespeicherung der häufig dunkelgrauen Fassaden nur wenig kompensieren.

Planungshinweis

- Die Begrünung sollte, wo noch möglich, ergänzt werden.
- Die Tieflage der Gärten ist für die Abkühlung besonders vorteilhaft. Durch den Höhenunterschied und die abschirmende Randbebauung tritt jedoch kein Luftaustausch mit den wärmeren Straßen und Plätzen ein.
- Baulücken in den Baublöcken wären hier einem lokalen Luftaustausch förderlich (in Nordwest-Exposition).
- Der angesprochene Fassadenwettbewerb könnte gerade im Stadtteil Süd zur Minimierung der Überwärmung beitragen.
- Die klimatische Wirkung des Grüns kann auf der Parkinsel nicht mehr gesteigert werden.

SÜDWEST-STADION, HERDERVIERTEL, BEBAUUNG WESTL. DER SAARLANDSTRASSE

Durch die angrenzenden Freiräume und hohen Grünanteile treten hier nur mehr geringe Überwärmungen und bioklimatische Belastungen auf. Im Zuge der nordwestlichen Belüftung verbindet sich über die Bebauung hinweg der Freiraum Blies mit dem Südwest-Stadion. Wo Öffnungen in den Bebauungsrändern sind, ergibt sich eine höhere und weitreichendere Abkühlung im bodennahen Bereich. Das Herderviertel wirkt in dieser Hinsicht negativ. Das Südwest-Stadion hat seine hauptsächlichste Belüftungswirkung für den Stadtteil Mundenheim. Der Bereich zeigt exemplarisch, wie größere innerstädtische Freiräume die Ventilation im Stadtgebiet steigern können.

Planungshinweis

- Erhaltung des Freiraums Südwest-Stadion wegen seiner positiven Ventilationswirkung.
- Mindestens 50 m breite Grünverbindungen zwischen Südwest-Stadion und Blies entlang der A. Stifter-Straße und nordwestlich der von Weber-Straße.

BLIES

Über diesen städtischen Ausgleichsraum wird die regionale Nordwest-Strömung besonders intensiv abgekühlt. Der hohe Anteil mit Schrebergärten, die im Sommer beregnet werden, erweist sich hier als Nutzung von positiver klimatischer Wirkung. Im unteren Bereich (5–10 m Höhe) dreht die Strömung verstärkt auf West und sickert über die ausgedehnten Bahnanlagen ins Herderviertel und die Bebauung westl. der Saarlandstraße ein. Dabei schwächt sich die Strömung rasch ab.

Planungshinweis

- Der Freiraum sollte wegen seiner klimatischen Wirkung möglichst zusammenhängend erhalten werden.
- Eine weitere Zersiedelung (z. B. Wollstraße) sollte über die Flächennutzung so geordnet werden, daß umfangreiche Freiräume und nicht kleine Freiflächen entstehen.
- Eine weitere Bebauung zwischen den Bahnanlagen und der Bruchwiesenstraße sollte wegen der Einflüsse auf die Belüftung und ihre zu erwartende Wärmefahne nicht ausgewiesen werden.

STADTTEIL WEST / HAUPTFRIEDHOF

Über diesen westlichen Freiraum kann sich die regionale Belüftung fast ungehindert entwickeln. Die landwirtschaftlichen Flächen sind dieser Belüftung förderlich und kühlen bis auf die Reifezeit die Strömung ab.

Der bewaldete Hauptfriedhof bildet ein Waldklima mit all seinen Schonfaktoren. Für die Belüftung des Stadtteils West ist diese Nutzung als Strömungshindernis anzusehen. Solch dichte Baumpflanzungen sollten erst in einigem Abstand vom Bebauungsrand erfolgen. In Zusammenhang mit Öffnungen des Bebauungsrandes müssen waldartige Bestände durchlässiger sein, um ihre Wirkung auf die Bebauung zu übertragen.

Dem Stadtteil West fehlen Belüftungsöffnungen im Westen und Nordwesten. Dadurch wird nur sehr zögernd Luft ausgetauscht. Die Abkühlung wird bis auf die V.-Bauer-Siedlung durch fehlende Grünbereiche im Innern nicht ergänzt. Die meisten Höfe sind zu klein dimensioniert um eine intensive Belüftung über die Dächer zuzulassen. Trotz der Nähe und günstigen Exposition zum westlichen Freiraum kommen Ausgleichsleistungen in diesem Stadtteil nur wenig zum Tragen.

Planungshinweis

- Die Pufferung des Hauptfriedhofs verdeutlicht, daß dichte Bepflanzungen (fast geschlossene Kronenfläche) erst in einiger Entfernung von der Bebauung angelegt werden sollten.
- In Zusammenhang mit Öffnungen der Bebauungsränder wäre aus klimatischer Sicht auch zu überlegen, ob im Nordbereich des Hauptfriedhofs entsprechende „Auslichtungen" vorgenommen werden können.
- Für die weitere städtebauliche Entwicklung des westlichen Freiraums sollte zur Minimierung des klimatisch negativen Einflusses einer Bebauung eine nordwestlich-südöstlich verlaufende Grünverbindung angelegt werden. Ausgehend von der Anne-Frank-Realschule sollte sich dieser Grünzug bis zum Unfallkrankenhaus trichterförmig öffnen. Im Konzept städtischer und regionaler Grünzüge würde dieser Freiraum den Grünzug Rathaus – Ebert-Park – Roßlache parallel ergänzen.
- Durch die Materialwahl befestigter Flächen und umfangreiche Grüngestaltung (s. obige Planungshinweise) sollte die Erwärmung der Belüftung möglichst gering gehalten werden.

9. Literaturverzeichnis

AHRENS, D. (1970): Vergleich der Windrichtung in der freien Atmosphäre und am Boden in der Oberrhein-Ebene. – Meteorol. Rundschau.

– (1974): Der Höllentäler. – Landesanstalt f. Arbeitsmedizin u. Arbeitsschutz, Karlsruhe.

– (1975): Temperatur-, Feuchte- und Windmessungen im mittleren Neckarraum. – LfU Karlsruhe Nr. 27.

– (1980): Untersuchungen über die Wärmeinsel und die Mischungsschicht einer Großstadt. – Arch. Geophys. Biokl. Ser. B.

ALBACH & UNGERS (1969): Optimale Wohngebietsplanung I. – Wiesbaden.

AMMER, U. et al. (1978): Entscheidungshilfen für die Freiraumplanung. – Dortmund.

ARBEITSGRUPPE FREIBURG (1974): Untersuchungen der klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse der Stadt Freiburg i. Br.

AUER, A. H. (1978): Correlation of Land Use and Cover with Meteorological Anomalies. – J. Applied Meteorol., **17**.

BAND, G. (1969): Der Einfluß der Siedlung auf das Freilandklima. – Mitt. Inst. Geophys. Meteorol. Köln, 4.9.

BAHRENBERG, G. & GIESE, E. (1972): Statistische Methoden und ihre Anwendung in der Geographie. – Münster.

BAUMGARTNER, A. (1956): Untersuchungen über den Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes. – Ber. DWD Nr. 28, **5**, Offenbach.

BAUR, F. (1948): Einführung in die Großwetterkunde. – Wiesbaden.

– (Hrsg., 1957): Linke's Meteorologisches Taschenbuch. – 3 Bde., Leipzig.

BERG, H. (1947): Einführung in die Bioklimatologie. – Bonn.

BERNATZKY, A. (1966): Klimawirkungen von Grünflächen und ihre Beziehungen zur Städteplanung. – Anthos, **5**.

– (1970): Grünflächen und Stadtklima. – Städtehygiene.

BLUSKOWA, D. (1961): Über den Einfluß des Reliefs auf die Lufttemperatur. – Angew. Meteorol., **5**.

BOER, W. (1964): Technische Meteorologie. – Potsdam.

BORNSTEIN, R. D. (1975): The Two-Dimensional URBMET Boundary Layer Model. – J. Applied Meteorol., **14**.

BÖHM, R. (1979): Stadtentwicklung und Trend der Wärmeinselintensität. – Arch. Geophys. Biokl. Ser. B. **27**.

– (1979): Meteorologie und Stadtplanung in Wien – ein Überblick. – Wetter u. Leben, **31**.

BÖHM, R. & GABL, K. (1978): Die Wärmeinsel einer Großstadt in Abhängigkeit von verschiedenen meteorologischen Parametern. – Arch. Geophys. Biokl. Ser. B. **26**.

BRAHE, P. (1975): Zur Bepflanzung von Parkplätzen in städtischen Bereichen. – Diss. TH Aachen.

BREZINA, A. & SCHMIDT, W. (1937): Das künstliche Klima in der Umgebung des Menschen. – Stuttgart.

BUCHWALD, R. & ENGELHARDT, W. (Hrsg., 1968–69): Handbuch für Landschaftspflege und Naturschutz. – München - Basel - Wien.

CHANDLER, T. J. (1976): Urban Climatology and its Relevance to Urban Design. – WMO Tech. Note Nr. 149, Genf.

CLARKE, J. F. (1969): Nocturnal Urban Boundary Layer over Cincinatti, Ohio. – Mon. Wea. Rev., **97**.

CLARK, J. F. & PETERSON, J. T. (1972): The Effects of Regional Climate and Land Use on the Nocturnal Heat Island. – Preprints Conf. Urban. Environ. and Second Conf. Biometeorol. Amer. Meteorol. Soc.

DAMMANN, W. (1960): Die Windverhältnisse im Rhein-Maingebiet. – Erdkunde.

DREYHAUPT, F. J. (1971): Luftreinhaltung als Faktor der Stadt- und Regionalplanung. – 4 Bde., Köln.

EAGLEMAN, J. R. (1974): Comparison of Urban Climatic Modifications in Three Cities. – Atmosph. Environment, **8**.

EMONDS, H. (1954): Das Bonner Stadtklima. – Arb. z. Rhein. Landeskunde, Bonn.

– (1972): Einlüsse von Grünflächen auf das Stadtklima und Wirkungen von Grünflächen auf verunreinigte Luft. – Schriftr. Bund dt. Gartenarchitekten, Bonn.

ERIKSEN, W. (1975): Probleme der Stadt- und Geländeklimatologie. – Darmstadt.

FAUST, V. (1978): Biometeorologie. – Stuttgart.

FELKEL, H. (1980): Meteorologie und Stadtplanung in Wien – ein Überblick. – Wetter u. Leben, **32**.

FEZER, F. (1974): Klimatologie und Regionalplanung – Untersuchungen im Rhein-Neckar-Raum. – Heidelberg.

FEZER, F. (1975): Lokalklimatische Interpretation von Thermalluftbildern. – Bildmess. u. Luftbildw., **43**.

– (1982): Stadtklima, gegenseitige Beeinflussung von Klima und bebauter Umwelt. – Umschau, **82**.

FEZER, F. & SEITZ, R. (1977a): Gutachten über das Stadtklima von Ludwigshafen. – Inf. Stadtentwicklung Ludwigshafen, 3/77.

– (1977b): Klimatologische Untersuchungen im Rhein-Neckar-Raum. – Heidelb. Geogr. Arb., **47**.

FINKE, L. (Hrsg., 1976): Zuordnung und Mischung von bebauten und begrünten Flächen. – Schriftr. Städtebauliche Forschung, BMBau 03.044, Bonn.

– (1978): Der ökologische Ausgleichsraum – plakatives Schlagwort oder realistisches Planungskonzept. – Landschaft + Stadt **10** (3), Stuttgart.

FORSCHUNGSGES. WOHNEN, BAUEN UND PLANEN (Hrsg., 1975): Klima und humane Umwelt. – CIP-Symposium Zürich, 3 Bde., Wien.

FRANKE, E. (Hrsg., 1977): Stadtklima. – Stuttgart.

FREIRÄUME IN STADTLANDSCHAFTEN (1977), hrsg. v. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt, Stuttgart.

FREIRÄUME IN STADTLANDSCHAFTEN – Modellraum Ludwigsburg (1979), hrsg. v. Ministerium f. Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt, Stuttgart.

FRITSCHE, G. & STANGE, R. (1936): Vertikaler Temperaturverlauf über einer Großstadt. – Beitr. Physik d. Atmosphäre, **23/24**.

GARSTANG, M., TYSON, P. D. & EMITT, G. (1975): The Structure of Heat Islands. – Rev. Geophys. Space Phys., **13**.

GEIGER, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. – Braunschweig.

GEIGER, B. (1974): Energetische Belastung des Stadtklimas. – Klima und humane Umwelt CIP Symposium.

GEORGII, H.-W. (1969): The Effects of Air Pollution on Urban Climates. – B 11. World Health Org., **40**, Genf.

GOSSMANN; LEHNER & STOCK (1981): Wärmekarten des Ruhrgebietes, Satelliten-Thermalbilder der Heat Capacity Mapping Mission (MCMM). – Geogr. Rdsch., **33** (12).

HADER, F. (1969): Die klimatischen Einflüsse der Grünflächen, ihre Eigenschaften als Luftfilter und Ruheschutz. – Wohnbauforsch. Österreich, Wien.

HAMM, J. M. (1969): Untersuchungen zum Stadtklima von Stuttgart. – Tübingen.

HENTSCHEL, G. & LEIDREITER, W. (1960): Die Häufigkeit von Inversionen im bodennahen Luftraum in Abhängigkeit von Jahreszeit, Tageszeit und Windrichtung. – Angew. Meteorol.

HESS, P. & BREZOWSKY, H. (1977): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–1976). – Ber. DWD Nr. 113, **15**, Offenbach.

HEUSELER, H. (1965): Extreme Temperaturdifferenzen Stadt-Land in Strahlungsnächten. – Umschau.

HIRTH, H. & KELLERSMANN, H. et al. (1972): Luftaufnahme, Wärme-Infrarotmessung als neue Informationsquelle für Planungszwecke. – Schriftr. Ruhrkohlenbezirk, **44**, Essen.

HÖSCHELE, K. & SCHMIDT, H. (1974): Klimatische Wirkungen einer Dachbegrünung. – Garten u. Landschaft, H. 6.

INNENMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg., 1977): Städtebauliche Klimafibel. – Stuttgart.

KARPE, H.-J. et al. (1979): Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung. – Schriftr. Raumordnung BMBau 0.6032, Bonn.

KAPS, E. (1955): Zur Frage der Durchlüftung von Tälern im Mittelgebirge. – Meteorol. Rundschau, **8** (3/4).

KARPINSKI, D. (1977): Der Einfluß von Gebäuden und Grünflächen auf das Klima der Stadt Mannheim. – Staatsexamensarbeit Heidelberg.

KALMA, J. D. (1974): An Advective Boundary-Layer Model Applied to Sydney, Australia. – Boundary Layer Meteorol., **6**.

KAWAMURA, T. (1977): Cause and modelling of urban climate. – Kischo-Kenky-Note, 133.

KESSLER, A. (1971): Über den Tagesgang von Oberflächentemperaturen in der Bonner Innenstadt an einem sonnigen Strahlungstag. – Erdk. Arch. wiss. Geogr., **25**.

KING, E. (1973): Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten. – Ber. DWD Nr. 130, **17**, Offenbach.

KIRCHNER, M. (1977): Anthropogene Einflüsse auf die Oberflächenalbedo und die Parameter des Austauschs in der Grenze Erde/Atmosphäre. – Wiss. Mitt. Uni München Meteorol. Inst., Nr. 31.

KRATZER, A. (1956): Das Stadtklima. – Braunschweig.

KREMSER, H. (1969): Zum Verhalten von Außenputzen und ihre Tönungen unter Temperatureinwirkungen. – I-Punkt Farbe, Frankfurt.

KÜNZEL, H. (1977): Fassaden-Farbtöne und ihr Temperaturverhalten. – I-Punkt Farbe, Frankfurt.

LANDSBERG, H. E. (1981): The Urban Climate. – Int. Geophys. Ser., **28**, New York.

LEAHY, D. M. & FRIEND, J. P. (1971): A Model for Predicting the Depth of the Mixing Layer Over an Urban Heat Island with Application to New York City. – J. Applied Meteorol., **10** (6).

LEE, R. L. & OLFE, D. B. (1974): Numerical Calculation of Temperature Profiles Over an Urban Heat Island. – Boundary Layer Meteorol., **7**.

LEE, D. C. (1979): The Influence of Atmospheric Stability and the Urban Heat Island on Urban-Rural Wind Speed Differences. – Atmosph. Environment, **13**.

LESER, H. (1975): Bestimmung der Wirksamkeit großräumiger ökologischer Ausgleichsräume und Entwicklung von Kriterien zur Abgrenzung. – Basel.

– (1976): Landschaftsökologie. – Stuttgart.

LILJEQUIST, G. H. (1974): Allgemeine Meteorologie. – Braunschweig.

LUDWIG, F. L. & DABBERDT, W. F. (1973): Effects of Urbanisation on Turbulent Diffussion and Mixing Depth. – Int. J. Biometeorol., **17** (1).

LOTZE, A. (1978): Innerstädtische Grünflächen und ihr Temperaturtagesgang. – Staatsexamensarbeit Heidelberg.

MACHALEK, A. (1974): Das vertikale Temperaturprofil über der Stadt Wien. – Wetter u. Leben, **26**.

MANIER, G. (1975): Vergleich zwischen Ausbreitungsklassen und Temperaturgradient. – Meteorol. Rdsch., **3**.

MIESS, M. (1974): Planungsrelevante und kausalanalytische Aspekte der Stadtklimatologie. – Landschaft + Stadt, 1/74, Stuttgart.

– (1981): Klimaanalyse Grünzug D. – Hrsg. v. Kommunalverband Ruhrgebiet, Essen.

MYRUP, L. O. (1969): A Numerical Model of the Urban Heat Island. – J. Applied Meteorol., **8**.

MINISTERIUM f. ARBEIT, GESUNDHEIT u. SOZIALORDNUNG BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg., 1979): Emissionskataster Mannheim-Karlsruhe, Stuttgart.

NÜBLER, W. (1979): Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg. – Freiburger geograph. Arb., H. 16.

OKE, T. R. (1973): City Size and the Urban Heat Island. – Atmosph. Environment, **7**.

– (1974): Review of Urban Climatology 1968–1973. – WMO Techn. Note Nr. 134, Genf.

OKE, T. R. & EAST, C. (1971): The Urban Boundary-Layer in Montreal. – Boundary Layer Meteorol., **1**.

OLSCHOWY, G. (1980): Natur- und Umweltschutz in der Bundesrepublik Deutschland. – Hamburg.

– (Hrsg., 1980): Wohnen in gesunder Umwelt. – Deutscher Rat f. Landespfl., H. 35.

– (Hrsg., 1981): Umweltprobleme im Rhein-Neckar-Raum. – Deutscher Rat f. Landespfl., H. 37.

OUTCALT, S. I. (1972): A Synthetic Analysis of Seasonal Influence in the Effects of Land Use on the Urban Thermal Regime. – Arch. Meteorol. Geophys. Bioklim. Ser. B. 20.

PADMANABHAMURTY, B. & HIRT, M. S. (1971): The Toronto Heat Island and Pollution Distribution. – Water, Air and Soil Pollution, **3**.

PETERSON, J. T. (1969): The Climate of Cities: A Survey of Recent Literature. – Nat. Poll. Contr. Adm. Publ. Nr. AP-59, North-Carolina.

PLANUNGSBÜRO GREBE (1976): Landschaftsplan Ludwigshafen am Rhein.

PLATE, E. (1972): Berücksichtigung von Windströmungen in der Bauleitplanung. – Städtebau Uni Karlsruhe.

PFÜTZNER, F.-H. (1965): Über die thermischen Verhältnisse in städtischen Freiflächen. – Schr. gesamte Hygiene und ihre Grenzgebiete, 11. Jg., Berlin.

POTSCHKA, V. (1977): Aufheizungen von Asphaltbefestigungen durch simulierte Sonneneinstrahlung. – Teerbau-Veröffentlichungen.

PRESTON-WHITE, R. A. (1970): A Spatial Model of the Urban Heat Island. – J. Applied Meteorol., **9**.

PROBALD, F. (1976): The Role of Green Areas in Planning the Atmospheric Environment of Cities. – Ann. Univ. Scient. Budapest. Rolando Eötesos Nominat. Sec. Geograph.

QUITT, E. (1964): Methode der Klimaklassifikation der Siedlungen in der Tschechoslowakei. – Angew. Meteorol., **4**.

REGIONALE PLANUNGSGEMEINSCHAFT UNTERMAIN (Hrsg., 1970–77): Luftghygienisch-meteorologische Modelluntersuchung in der Region Untermain.

SCULTETUS, H. R. (1959): Bewindung eines Geländes und vertikaler Temperaturgradient. – Meteorol. Rdsch.

SCHNELLE, F. (1972): Lokalklimatische Studien im Odenwald. – Ber. DWD Nr. 128, **17**.

SCHULZE, P. (1969): Die horizontale Temperaturverteilung in Großstädten, insbesondere West-Berlins in winterlichen Strahlungsnächten. – Meteorol. Abh. Inst. Meteorol. Geophys. FU Berlin, **91**.

SEITZ, R. (1975): Klimatologie und Regionalplanung, Stadtklima Mannheim-Ludwigshafen. – Diss. Heidelberg.

SEITZ, R. & ZIMMERMANN, R. (1980): Klimaökologische Studie in der Verbandsgemeinde Göllheim/Pfalz. – Verbandsgemeindeverwaltung Göllheim.

– (1981): Klimauntersuchung Verwaltungsgemeinschaft Bietigheim-Bissingen/Ingersheim/Tamm. – Stadtplanungsamt Bietigheim-Issingen.

– (1981): Klimaökologische Studie zum Grünordungsplan Stuttgart-Espan (unveröffentl.).

– (1982): Erfassung der Geruchsimmissionen im Stadtgebiet Mannheim, Stadt Mannheim.

SPERBER, H. (1976): Die Bedeutung des Stadtrandbereichs für das nächtliche Stadtklima. – Das Gartenamt, H. 2.

STADT LUDWIGSHAFEN (1972): Probleme der Luftreinhaltung in Ludwigshafen und Mannheim. – Inf. Stadtentwicklung Ludwigshafen.

– (1973): Grünflächen und Freiräume in Ludwigshafen am Rhein. – Inf. Stadtentwicklung Ludwigshafen.

– (1976): Flächennutzungsplan.

– (1978): Stadtentwicklungsplan.

– (1979): Ökologische Studie Maudacher Bruch. – Inf. Stadtentwicklung Ludwigshafen.

STEIN, N. (1979): Zentrale Forschungsfelder einer ökologisch orientierten Stadtklimatologie: Strahlungs-, Energie- u. Wärmehaushalt. – Landschaft + Stadt, **11** (3), Stuttgart.

STEINHAUSER; ECKEL & SAUBERER (1957): Klima und Bioklima von Wien. – Wien.

STODDART, D. R. (1970): Das Ökosystem als Prinzip und Methode in der Geographie. – In: BARTELS (Hrsg.): Wirtschafts- u. Sozialgeographie.

STUMPF, B. (1978): Klimatischer Vergleich zwischen Grünflächen und Siedlungen in Ludwigshafen am Rhein. – Staatsexamensarbeit Heidelberg.

SUKOPP, H. (1979): Ökologische Grundlagen für die Stadtplanung. – Landschaft + Stadt, **11** (4).

– et al. (1979): Ökologisches Gutachten über die Auswirkungen von Bau und Betrieb der BAB Berlin (West) auf den Großen Tiergarten. – 2 Bde., Berlin.

SUMMERS, P. W. (1965): An Urban Heat-Island Model. Its Role in Air Pollution Problems with Application to Montreal. – First Canadian Conference on Micrometeorology, Toronto.

TÜV-RHEINLAND (1977): Emissionskataster Ludwigshafen/Rhein. – Köln.

TERJUNG, W. H. (1974): A Climatic Model of Urban Energy Budgets. – Geogr. Anal.

TSUCHIYA, I. (1972): Greens and Urban Climate-Thermal Characteristics of Natural and Artificial Greens and Rivers in Urban Areas. – Water Science, **16** (1).

TYSON, P. D. et al. (1972): Temperature Structure above Cities: Review and Preliminary Findings from the Johannesburg Urban Heat Islands. – Proj. Atmosph. Environment **6**.

VUKOVICH, F. M. et al. (1976): A Theoretical Study of the St. Louis Heat Island: the Wind and Temperature Distribution. – J. Applied Meteorol., **15** (5).

WILMERS, F. (1972): Temperaturstudien in Gartenhöfen. – Das Gartenamt, **12**.

(Bei der Schriftleitung eingegangen am 25. 6. 1984)

Anschrift des Verfassers:
Dr. Roland ZIMMERMANN, Eisenbahnstraße 85, D-6737 Böhl-Iggelheim