

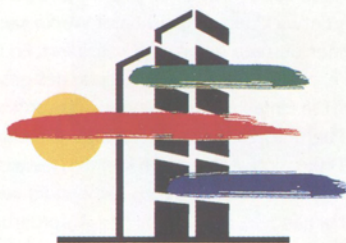
Geowissenschaften

6

14. Jahrgang

Juni 1996

ISSN 0933-0704



ICUC'96

International Conference on
Urban Climatology

June 10-14, 1996
Essen, Germany



INITIATIVKREIS RUHRGEBIET



Universität GH Essen



Bundesumwelt-
ministerium

Aspekte der Angewandten Stadtklimatologie

Abstract

The contribution describes briefly general characteristics of urban climatology and goes into the measuring methods employed in urban climatology studies. Using the example of a case-study, it will be explained which problems arise in the ventilation of a town during a stable weather situation. With the help of a tracer (SF_6) it is possible to report the depth of cold air penetration in built-up urban areas.

1 Einführung

Der städtisch-industrielle Siedlungsraum führt im Vergleich zu seiner nicht bebauten Umgebung zu mikro- und mesoklimatischen Veränderungen, deren charakteristische Merkmale allgemein unter dem Begriff „Stadtklima“ zusammengefaßt werden [1-4].

Die Gründe für diese vom Menschen nicht beabsichtigte Klimabeeinflussung sind vielschichtig; sie lassen sich jedoch auf einige als wesentlich erkannte Faktoren zurückführen. Hierzu zählen u. a.:

- die Reduzierung der natürlichen Bodenoberfläche, an deren Stelle ein weitgehend versiegelter, meist aus künstlichen Materialien bestehender, dreidimensional gegliederter bebauter Raum tritt,
- der geringe Anteil der mit Vegetation bedeckten Fläche sowie
- die durch technische Vorgänge verursachten Abwärme- und Luftschadstoffemissionen, die in erster Linie dem Kraftfahrzeugverkehr, aber auch dem Hausbrand, Kleingewerbe und der Industrie entstammen.

Durch die aufgeführten Faktoren werden die Strahlungs- und die Energiebilanz der städtischen Oberflächen und der bodennahen Atmosphäre, das Wasserspeichervermögen der Stadtböden, deren Verdunstungsmöglichkeit sowie das Windfeld derart beeinflußt, daß sich Städte im allgemeinen durch höhere

Lufttemperaturen, niedrigere relative Luftfeuchtigkeiten, schlechtere Durchlüftung und Ansammlungen partikel- und gasförmiger Luftbeimengungen auszeichnen. Zu einer Modifikation dieser stadtklimatischen Gegebenheiten kann es sowohl durch kleinräumig wirkende Klimafaktoren – zum Beispiel durch das Relief – wie auch durch die Lage von Städten in verschiedenen geographischen Breiten kommen.

Grundsätzlich resultieren hieraus für den aktinischen und thermischen sowie den luftchemischen Wirkungskomplex überwiegend als negativ zu beurteilende human-bioklimatische Beeinträchtigungen [5-8], die auch unter dem Aspekt einer vorausgesagten globalen Erwärmung der Erdatmosphäre durch den zusätzlichen Treibhauseffekt gesehen werden müssen und in ihrem Auftreten verstärkt oder vermindert werden können [9,10]. Klimagerechtes Bauen kann infolge einer intelligenteren Nutzung der Sonnenstrahlung und durch bessere Wärmedämmung dazu beitragen, zum Beispiel den heizungsbedingten Schadstoffausstoß zu reduzieren [34].

Die Komplexität der das Stadtklima bestimmenden Faktoren, ihre Interdependenz sowie ihre unterschiedliche Einflußgröße auf Mikroklima und Lufthygiene sind in den Grundzügen schon seit dem vergangenen Jahrhundert bekannt [11,12]. Es war der englische Chemiker Luke Howard (1772-1864), der als erster eine Monographie zum Klima Londons vorlegte [13].

Schon früh entwickelte sich neben der anfänglich rein akademisch orientierten Fachdisziplin „Stadtklimatologie“ ein mehr pragmatisch orientierter Forschungszweig, der die planerischen Elemente als Gestaltungsmöglichkeiten der stadtklimatologischen Komponenten berücksichtigte. Der Meteorologe Kassner hat hierzu bereits im Jahre 1910 mit seiner Arbeit über „Die meteorologischen Grundlagen

des Städtebaus“ eine richtungsweisende Publikation vorgelegt [14].

Dieser Zweig der Stadtklimatologie, der die Planungsrelevanz stärker berücksichtigt, hat sich während der vergangenen Jahrzehnte außerordentlich stark weiterentwickelt. Dazu trugen insbesondere in jüngster Zeit entsprechende Verankerungen klimatischer und lufthygienischer Belange in Verordnungen und Gesetzen bei [15-20].

Zu den Aufgaben der Angewandten Stadtklimatologie zählen die Durchführung von Analysen und Modellierungen des Ist- und Planzustandes sowie Bewertungen hinsichtlich der bioklimatischen Güte der verschiedenen städtischen Klimatope, um daraus entsprechende Nutzungsempfehlungen für die Entscheidungsträger in den Städten und Gemeinden ableiten zu können [36].

Durchzuführende Stadtklimaanalysen haben deshalb die Erfassung des thermischen Verhaltens der städtischen Oberflächen, die horizontale und vertikale Analyse des Windfeldes sowie der Lufttemperatur zu berücksichtigen. Darüber hinaus sollte besonderes Augenmerk der innerstädtischen Immissionssituation gewidmet werden, die in erster Linie durch den Kfz-Verkehr geprägt wird. Diesem entstammen – bezogen auf die Gesamtemission im früheren Bundesgebiet – über 70 % der Kohlenmonoxid- und Stickstoffoxid-Emissionen sowie fast 50 % der flüchtigen Kohlenwasserstoffe und immerhin 20 % des Kohlendioxids [21]. Niedriggelegene Quellhöhen und ein engmaschiges Straßennetz, das unterschiedlich große tägliche Verkehrsmengen aufweist, lassen spurenstoffspezifisch und flächennutzungstypabhängig ein außerordentlich heterogenes Muster der Immissionsverteilung auf kleinem Raum entstehen. Abbildung 1 enthält für den Bereich Autobahnen, Hauptverkehrs- und Neben-

straßen sowie für Wohngebiete und innerstädtische Grünflächen Werte von Immissionskonzentrationen, die durch kontinuierliche Messung während der Fahrt auf einsekündlicher Basis erfaßt wurden. Hinsichtlich der NO-Konzentrationen kann festgestellt werden, daß auf Autobahnen und Hauptstraßen die mit Abstand höchsten Werte ($420 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. $174 \mu\text{g}/\text{m}^3$) auftreten. Die ebenfalls hohen Standardabweichungen werden durch kurzfristig verändernden Verkehrsfluß verursacht. Das für die Ozonproduktion wichtige NO_2/NO -Verhältnis erreicht einen Wert von nur 0,2 bzw. 0,5. Die Ozonkonzentrationen spielen in diesen beiden Straßentypen noch keine Rolle. In Nebenstraßen macht sich eine deutliche Abnahme der NO_x -Konzentrationen, und – bei einem NO_2/NO -Verhältnis von 0,7 – eine ansteigende Ozonkonzentration bemerkbar.

In Wohngebieten und in innerstädtischen Grünflächen nehmen wegen der Quellferne sowohl die NO_x -Konzentrationen als auch die Standardabweichungen dieser Meßwerte ab. Die Ozonkonzentrationen erreichen in den Grünflächen die höchsten Werte.

In diesem Zusammenhang spielt der Nachweis von stadtklimarelevanten Ventilationsbahnen eine wichtige Rolle. Über diese kann bei Vorherrschen einer austauschenden Wetterlage möglichst saubere Luft aus dem Umland in den Stadtkörper geführt werden. Hierdurch ist eine Verbesserung der mikroklimatischen und lufthygienischen Verhältnisse möglich [22].

2 Meßmethodik

Für die qualitative und quantitative Erfassung der notwendigen Informationen wird in der Regel auf ein differenziertes Methodenspektrum zurückgegriffen (Tabelle 1).

Neben einem intensiven Studium vorhandener thematischer und topographischer Karten in möglichst großem Maßstab stellt die Geländebeobachtung, durch die mit Hilfe der Analogieschlußbetrachtung und Plausibilitätsprüfung auf das Verhalten und auf die Auswirkung verschiedener Stadtklimaelemente geschlossen werden kann, eine unabdingbare Arbeitsvoraussetzung dar. Einen flächendeckenden Überblick, zum Beispiel über die Oberflächenstrahlungstemperaturen, erhält man als differenziertes Ergebnis durch die Interpretation eines meist unter Einsatz eines Flugzeuges während Strahlungswetterlagen aufgenommenen Infrarotthermalbildes [23].

Die entsprechend angefertigten Luftbilder stellen, insbesondere wenn diese durch kontrastreiche Falschfarben wiedergegeben werden, bequem auswertbare, flächendeckende Informationen über die Strahlungseigenschaften des abgeleiteten Stadtgebietes dar. Allerdings dürfen diese Daten nicht überinterpretiert werden, da sie ausschließlich die Flächenprojektion eines dreidimensionalen, heterogen genutzten Raumes widerspiegeln, sofern nicht eine Weiterverarbeitung der Daten mit flächenbezogener Differenzierung, zum Beispiel auf der Grund-

lage eines Geographischen Informationssystems (GIS), möglich ist. Hinzu kommt von strahlungsphysikalischer Seite, daß die auf einem Thermalbild abgebildeten Oberflächentemperaturen kaum mit den Lufttemperaturen der bodennahen Atmosphäre übereinstimmen.

Schließlich muß darauf hingewiesen werden, daß mit Hilfe von Thermalaufnahmen nur ein Teilaspekt des gesamten städtischen Strahlungshaushaltes erfaßt wird. So lassen sich für die Planung wichtige Aussagen zur bodennahen Strömungsdynamik kaum ableiten. Die Auswertung eines Thermalbildes kann dennoch bei einer Stadtklimauntersuchung als zusätzliches Hilfsmittel wertvolle Dienste leisten, da eine Generalisierung und eine eventuelle Zusammenfassung thermisch ähnlich reagierender Flächen für eine erste Einschätzung vorgenommen werden können.

Zur Erfassung der einzelnen Klimaelemente im städtischen Raum ist es wegen der geringen Stationsdichte der von den nationalen Wetterdiensten betriebenen Meßnetze notwendig, die sich insbesondere kleinräumig einstellenden städtischen Klimaverhältnisse mit einem entsprechend eingerichteten Sondermeßnetz zu erfassen. Dieses besteht in der Regel aus temporären Feststationen, die in repräsentativen Klimatopen eingerichtet werden. An diesen Stationen werden mit möglichst hoher zeitlicher Auflösung die meteorologischen Meßwerte über einen Zeitraum von wenigstens einem Jahr erfaßt, ergänzt um eventuell durchzuführende Immissions- und Depositionsmessungen luftgetragener Spurenstoffe.

Die Möglichkeit einer flächendeckenden Datenerhebung, die mit Hilfe des alleinigen Einsatzes von Feststationen nicht lösbar ist, kann über zusätzlich durchzuführende mobile Messungen (Meßgänge und Meßfahrten auf vorher festgelegten Routen) erfolgen. Derartige Meßfahrten, die zum Beispiel mit einem wie in Abbildung 2 dargestellten Meßfahrzeug durchgeführt werden können, ermöglichen die zeitgleiche Aufnahme der wichtigsten klimatologischen und lufthygienischen Größen bei engmaschig gewähltem Meßnetz und sorgen bei hoher Datenaufnahmedichte für große Interpretationssicherheit.

Besonders häufig besteht die Notwendigkeit festzustellen, wo während

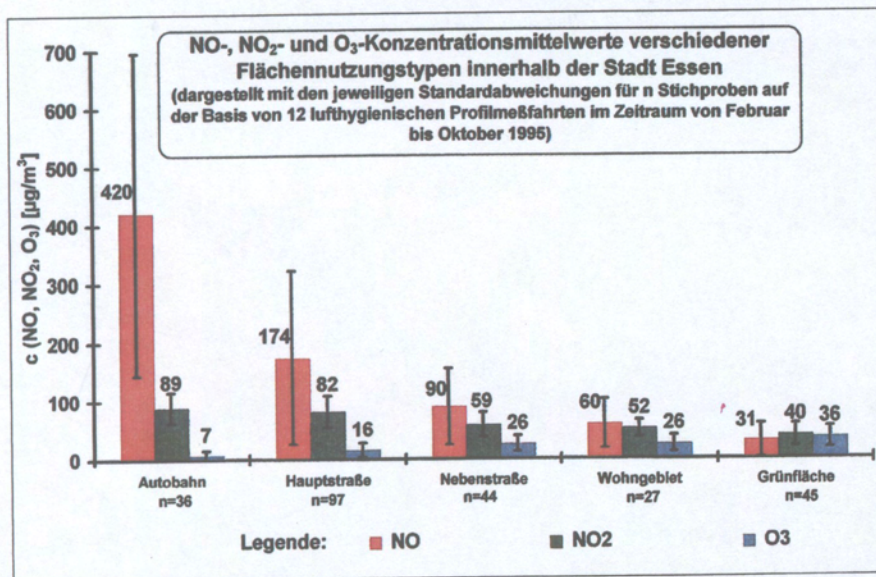


Abb. 1. NO-, NO₂- und O₃-Konzentrationsmittelwerte für verschiedene Flächennutzungstypen innerhalb der Stadt Essen.

Strahlungswetterlagen das Stadtklima verbessernde Luftleitbahnen auftreten, durch die zum Beispiel ein nächtlich vorherrschender Flurwind oder ein durch die Geländeform bedingter Kaltluftabfluß kühle und möglichst saubere Umlandluft in den erwärmten Stadtkörper transportiert [24,25].

Für diesen Nachweis werden neben Raucherzeugern, die zwar eine visuelle Verfolgung der strömenden Luft ermöglichen, jedoch nicht deren Quantifizierung zulassen, seit einiger Zeit chemisch einfach zu handhabende und analytisch ohne großen Aufwand nachzuweisende Tracer (z. B. SF₆, [31]) eingesetzt, mit deren Hilfe genauere Aussagen über die Menge und Fließrichtung der Kaltluft, insbesondere jedoch über deren Eindringtiefe in bebauten Gebiet, gemacht werden können. Hierauf wird später exemplarisch näher eingegangen.

Aufschluß über das dreidimensionale Verhalten von Kaltluftbewegungen kann durch die Aufnahme von Vertikalprofilen klimatologischer Elemente gewonnen werden. Hierzu werden Fesselballonsonden eingesetzt, die mit hoher zeitlicher Auflösung die einzelnen Daten an die betreffende Bodenstation funken (Abbildung 3). Die Meßergebnisse lassen Rückschlüsse auf die Kaltluftmächtigkeit und ihre dreidimensionale Verlagerung zu. Die hier exemplarisch vorgestellten Meßmethoden eignen sich für aussagefähige Bestandsanalysen zum klimatischen und lufthygienischen Istzustand eines Stadtgebietes. Hingegen lassen

Tabelle 1. Untersuchungsmethoden der planungsorientierten Stadtklimatologie.

1. Geländebeobachtung (Plausibilitätsprüfung, Analogieschlußbetrachtungen)
2. Datenerfassung im Rahmen von Sondermeßnetzen (Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windrichtung, -geschwindigkeit, Luftschadstoffe)
– Stationäre Messungen (Klimastationen)
– Mobile Messungen (Meßfahrzeuge, Meßgänge)
– Aufnahme von Vertikalprofilen (Fesselballonsonden, SODAR)
– Nachweis bodennaher Strömungssysteme
– Visuell (Rauchkerzen, Driftballons)
– Meßtechnisch (Thermische Anemometer; Tracer, z.B. Schwefelhexafluorid [SF ₆])
3. Ermittlung der Oberflächenausstrahlungstemperaturen mittels IR-Thermographie
4. Einsatz von Modellen
– Numerische Modelle (Nachweis dynamischer, thermischer, aktinischer, humanphysiologischer Bedingungen; lufthygienische Ausbreitungsrechnungen)
– Physikalische Modelle (Wasser-, Windkanal)

sich Prognosen über die Auswirkung geplanter Baumaßnahmen mit den bisher dargelegten Methoden nicht machen. Wird für den Planzustand eine detaillierte mikroklimatische oder lufthygienische Vorhersage benötigt, muß auf Simulationen mit Hilfe numerischer Modelle [26] oder auf Windkanalanalysen [27, 35] zurückgegriffen werden. Hiermit lassen sich sowohl Aussagen über die zu erwartenden strömungsdynamischen Verhältnisse treffen als auch zum Beispiel Hinweise über die für den Stadtbewohner wichtigen bioklimatischen Auswirkungen auf den thermischen und windklimatischen Komfort geben.

Die aus Stadtklimauntersuchungen resultierenden Ergebnisse, die im Rahmen einer praktischen Anwendung weiter genutzt werden sollen, werden häufig in sogenannten synthetischen

Klimafunktionskarten und darauf basierenden Planungshinweiskarten flächendeckend dargestellt [33]. Meist werden auch Bewertungen zum Bioklima und zur Lufthygiene in die Karten mit aufgenommen, wodurch eine rasche Differenzierung in klimaökologische Gunst- und Ungunsträume möglich ist. Synthetische Klimafunktionskarten liegen mittlerweile für zahlreiche urbane Agglomerationsgebiete vor (Zusammenstellung in [28]) [29, 30].

Die nach Auf- und Grundriß zum Teil äußerst heterogenen Erscheinungsformen unserer Städte und die sich daraus ergebende, kaum mögliche Übertragbarkeit der meist den Einzelfall berücksichtigenden Meßergebnisse, werfen eine Vielzahl von Fragen auf, die Gegenstand intensiver angewandter Forschung sind. Darunter finden sich allerdings zahlreiche Pro-



Abb. 2. Meßfahrzeug zur Erfassung von Klima- und Lufthygieneparametern.



Abb. 3. Fesselballonsondierungsanlage zur Messung von Lufttemperatur, relativer Feuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

Tabelle 2. Luftleitbahnen und ihre Eignung für den Kaltlufttransport (aus: [20]).

Ein- und Ausfallstraßen

- Überwiegend niedrige Rauigkeitswerte
- Tagsüber starke Aufheizung mit entsprechender Labilisierung der bodennahen Luftschicht
- Nachts relativ warm mit neutralen bis labilen Schichtungsverhältnissen in Bodennähe und niedrigeren Reibungswiderständen als am Tage
- Freisetzung von Kfz-Emissionen (tagsüber stärker als nachts)
- Vorbelastung durch Hausbrandemissionen der straßenbegleitenden Randbebauung insbesondere im Winter möglich

Bewertung: Nutzung als Ventilationsschneise nicht ohne weiters zu empfehlen; Luftqualitätsanalyse hinsichtlich der Kfz- und Hausbrandemissionen notwendig; Verbesserung der Luftqualität durch Ventilationsschneise zu erwarten.

Bahntrassen

- Überwiegend niedrige Rauigkeitswerte
- Tagsüber Aufheizung mit entsprechender Labilisierung der bodennahen Luftschicht und dadurch bedingte hohe Rauigkeitswiderstände gegenüber horizontalen Luftströmungen
- Nachts Abkühlung der Schotteroberflächen; neutrale bis stabile Schichtungsverhältnisse in Bodennähe und kleinen Reibungswiderständen
- Wenn kein Diesellokbetrieb, dann kaum Freisetzung von Schadstoffen

Bewertung: Nutzung als Ventilationsschneise nur dann zu empfehlen, wenn keine Lokomotivabgase verursacht werden; Verbesserung der Luftqualität durch Ventilationsschneise nicht zu erwarten.

Grünflächen

- Überwiegend niedrige, jedoch vegetationsabhängige Rauigkeitswerte
- Tagsüber kaum Aufheizung; stabile Schichtungsverhältnisse in Bodennähe und kleine Reibungswiderstände gegenüber horizontalen Luftströmungen (abhängig von Typ und Dichte der Vegetation)
- Nachts Zunahme der stabilen Schichtungsverhältnisse
- Entwicklung kleinräumiger Zirkulationen in der unmittelbaren Umgebung
- Keine Freisetzung von Schadstoffen
- Filterwirkung gegenüber Aerosolen und Gasen

Bewertung: Nutzung als Ventilationsschneise sehr zu empfehlen; Verbesserung der Luftqualität durch Ventilationsschneise zu erwarten.

Fließ- und Stillgewässer

- Sehr niedrige Rauigkeitswerte
- Tagsüber kaum Aufheizung; stabile Schichtungsverhältnisse in Bodennähe
- Entwicklung kleinräumiger Zirkulationen in der unmittelbaren Umgebung (See-/Stadtwindssystem bzw. Fluß-/Stadtwindssystem)
- Keine Freisetzung von Emissionen bei biologisch intakten Gewässern
- Senke für Gase und Aerosole

Bewertung: Nutzung als Ventilationsschneise sehr zu empfehlen; Verbesserung der Luftqualität durch Ventilationsschneise zu erwarten.

blemfälle, deren Lösung von übergeordnetem fachlichen Interesse ist:

Eine nach wie vor aktuelle Frage, die es bei fast jeder Stadtklimauntersuchung in Zusammenhang mit dem Auftreten autochthoner Kaltluft-Dynamik zu beantworten gilt, ist die nach einer möglichst genauen Angabe über die Eindringtiefe thermisch und lufthygienisch unbelasteter Umlandluft in bebauten Gebiet. Nachfolgend soll hierauf näher eingegangen werden.

3 Fallbeispiel

Während autochthoner Wetterlagen bildet sich über denjenigen Flächen Kaltluft, die sich aufgrund ihrer thermophy-

sikalischen Eigenschaften stark abkühlen können. Es handelt sich hierbei meist um größere naturbelassene Freiflächen im Stadtumlandbereich. Der Antrieb zum Transport der hier gebildeten Kaltluft erfolgt in topographisch ebenem Gelände überwiegend thermisch oder bei vorhandenem Relief gravitativ als katabatischer Wind. Der thermische Antrieb resultiert aus dem Temperaturgegensatz zwischen Stadt und Umland. Diese Strömung wird Flurwind genannt.

Mit der katabatisch angetriebenen Strömung wird die in morphologisch gegliedertem Gelände auf Talhangschultern und im Bereich eines Tal-schlusses gebildete Kaltluft der

Schwerkraft folgend transportiert. Für beide Transportsysteme gilt, daß diese nur dann eine das Stadtklima verbessernde Wirkung aufweisen, wenn die transportierte Luft sauber, d. h. nicht bereits an Immissionen aus dem Umland vorbelastet ist und ein möglichst weit in die bebauten Fläche hineinreichendes Eindringen der Kaltluft gegeben ist.

Luftleitbahnen, die das Kaltluftproduktionsgebiet mit einer Stadt verbinden und sich ferner durch eine geringe aerodynamische Oberflächenrauigkeit auszeichnen, sind daher dem Stadtplaner zu empfehlen.

Tabelle 2 enthält eine Zusammenstellung potentiell nutzbarer Luftleitbahnen, die in Stadtgebieten weit verbreitet sind. Diese Ventilationsschneisen schaffen zwar die Voraussetzung für den Transport von Kaltluft, lassen jedoch noch keine Aussage darüber zu, wie weit die Umlandluft letztendlich in ein Stadtgebiet eindringt. Dieses Problem soll anhand einer exemplarisch in der Stadt Mülheim (Ruhr) durchgeführten Untersuchung erläutert werden.

Im Innenstadtbereich von Mülheim mündet der zunächst einen östlichen, dann einen südöstlichen Verlauf nehmende Ruhmbach in die Ruhr. Die Fläche seines Einzugsgebietes beträgt etwa 8 km², wovon 3 km² im oberen Talbereich aufgrund der Flächennutzung als Kaltluftproduktionsgebiet ausgewiesen werden konnten. Die Talachse weist ein durchschnittliches Gefälle von 1,3 Grad in Richtung Innenstadt auf, die Neigung der Talhänge beläuft sich auf etwa 3 Grad. Der Strömungsverlauf und die Eindringtiefe der Kaltluft in das Stadtgebiet von Mülheim wurde mit Hilfe des Einsatzes von Rauchkörpern und Schwefelhexafluorid (SF₆) als Tracersubstanz untersucht. SF₆ ist ein geruch- und farblos, in den verwendeten Konzentrationen nicht umweltschädigender Spurenstoff, der als natürlicher Inhaltsstoff der Atmosphäre nicht auftritt und dessen Hintergrundkonzentration deshalb vernachlässigt werden kann [32]. Das chemisch inerte Gas wird im Zentrum der Kaltluftentstehungsfläche bodennah mit definiertem Volumenstrom in die Luft emittiert und fließt zusammen mit der Kaltluft hang- und talabwärts auf das Stadtgebiet zu.

Angaben zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften sowie zum Meßverfahren von SF₆ enthält die Tabelle 3.

Tabelle 3. Methodische Hinweise zum Einsatz von Schwefelhexafluorid (SF₆) als Tracersubstanz.

Gaschromatographische Ausstattung		Physikalisch-chemische Eigenschaften von SF ₆	
Gaschromatograph	HNU-Systems, Modell 311 / ECD	Molekulargewicht	146,05 g/mol
Trennsäule	1/8" Edelstahlrohr, 2 m	Dampfdruck bei 20 °C	21 bar
Säulenfüllung	Molekularsieb 5 Å, 80 mesh	Siedepunkt bei 1 bar	- 64 °C
Trägergas	ECD- Stickstoff; 20 ml/min	Schmelzpunkt bei 1 bar	- 50,7 °C
Ofentemperatur	45 °C	kritische Temperatur	45,5 °C
Injektionstemperatur	105 °C	kritischer Druck	37,6 bar
Detektortemperatur	270 °C	nicht brennbar, chemisch inert, farb-, geruch- und geschmacklos, ungiftig, pharmakologisch unbedenklich	
Probenaufgabe	eingebaute Pumpe mit 1 ml-Probenschleife oder gasdichte Spritze	kein natürliches Vorkommen (Hintergrundkonzentration < 50 ppt)	
Detektor	ECD, mit 370 mBq ⁶³ Ni beschichtet	geringes absolutes Treibhauspotential aufgrund eines niedrigen Emissionsmassenstroms	
Kalibriergas	0,11 ppm SF ₆ in N ₂ 5%;	Umrechnungsfaktoren für 1013 hPa und 20 °C	
Nachweisgrenze	1 ppb	1 ppm = 6,070 mg/m ³	1 mg/m ³ = 0,165 ppm
Relative Standardabweichung	14 % (im Bereich der Nachweisgrenze)	Analysen	
Durchführung der Messungen		Probennahme mit Hilfe von evakuierten Gassammelrohren aus Glas oder unter Einsatz eines in einem Fahrzeug installierten Gaschromatographen	
Gewährleisten eines konstanten SF ₆ -Emissionsmassenstroms durch Einsatz von Schwebkörperdurchflußmessern		eigene Untersuchungen zeigten keine Wandreaktionen des SF ₆ mit den verwendeten Gassammelgefäßen	
im Entfernungsbereich von < 1 km vom Auslaßpunkt eignen sich Massenströme von 1 - 2 g/s			

Abbildung 4 zeigt das Untersuchungsgebiet mit der Lage der jeweiligen SF₆-Emissionsstandorte, den drei temporär eingerichteten Klimameßstationen sowie den Meßpunktstandor-

ten des zum Nachweis von SF₆ eingesetzten mobilen Gaschromatographen. Die vertikale Verteilung der SF₆-Konzentrationen und damit der dreidimensionale Strömungsverlauf der

Kaltluft wurde mit entsprechender Probennahmetechnik (Gassammelrohre) auf dem Dach eines etwa 60 m hohen innenstadtnah gelegenen Hochhauses ermittelt. Die Messungen wur-

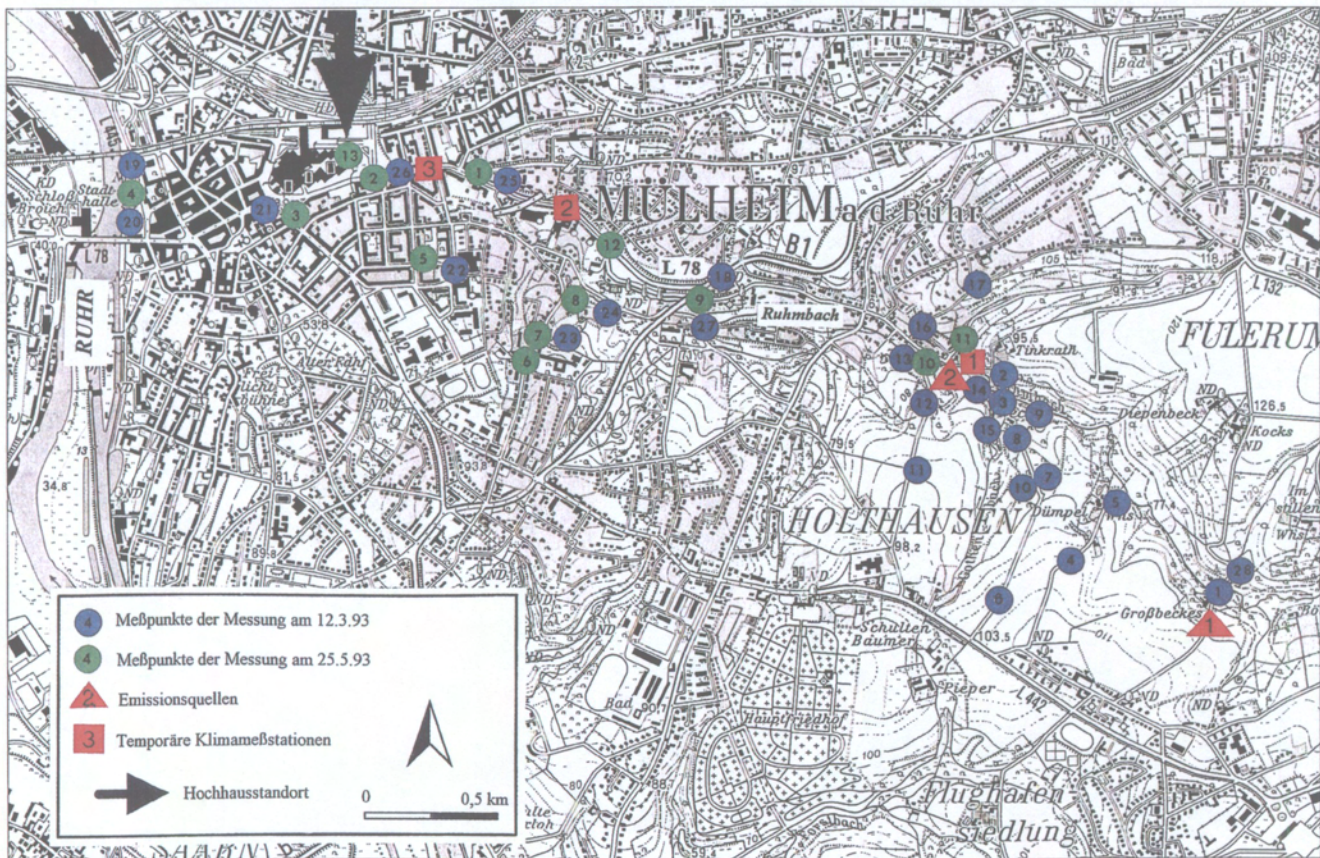


Abb. 4. Untersuchungsgebiet Ruhmbachtal/Mülheim (Ruhr). (Meßpunkte = Tracerprobennahmestandorte; Emissionsquelle = Tracergasquelle) Kartengrundlage: Top. Karte 4507.

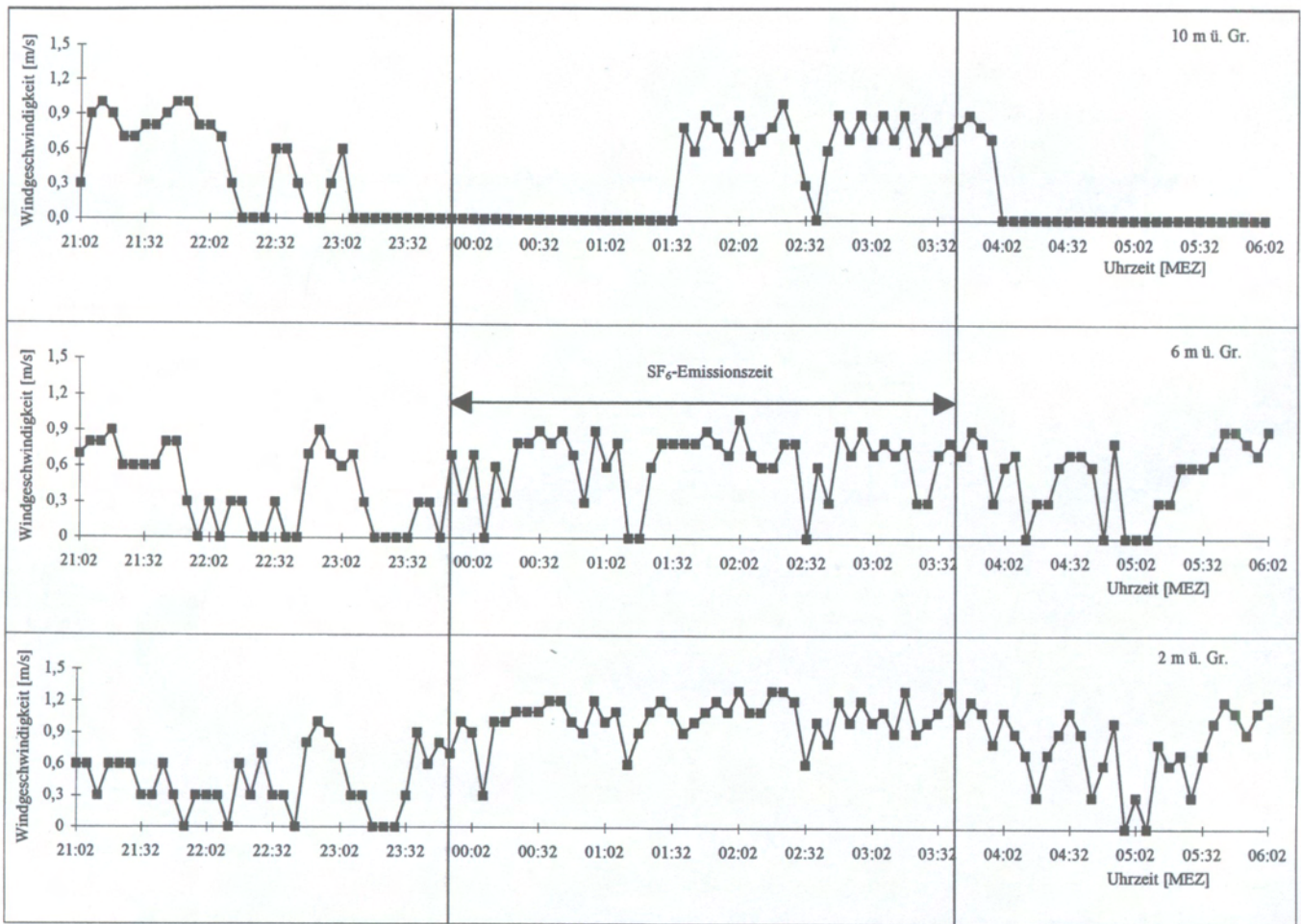
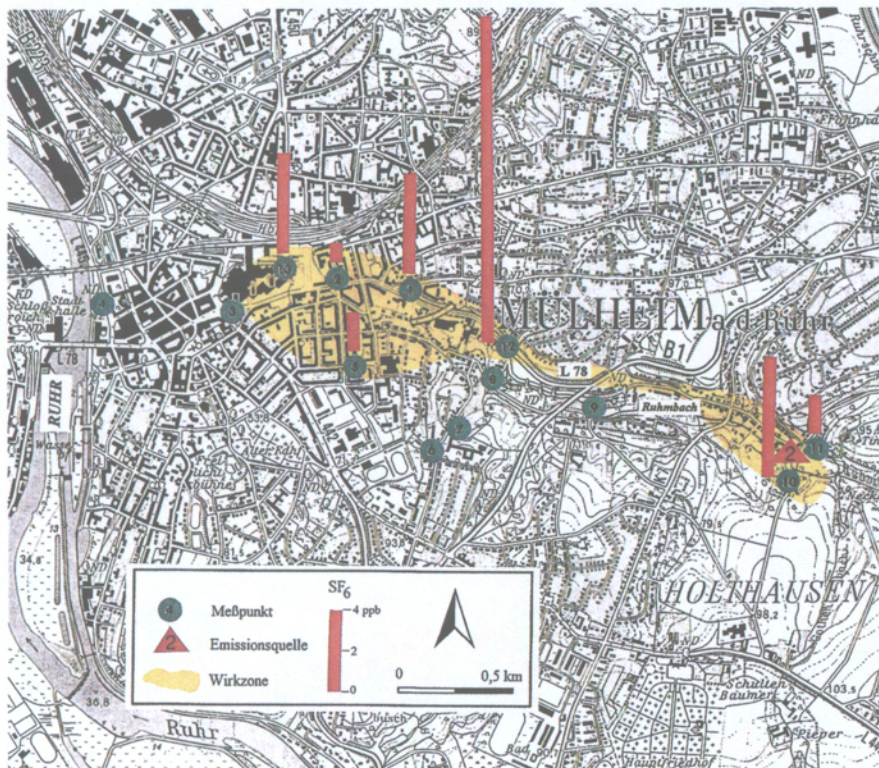


Abb. 5. Windgeschwindigkeiten an Klimastation 1 (Lage s. Abb. 4) in drei Höhen am 25./26.5.93 im Ruhmbachtal/Mülheim (Ruhr).



226 Abb. 6. Verteilung des Tracergases im Ruhmbachtal/Mülheim (Ruhr) am 25./26.5.93. Die gelbe Fläche repräsentiert die „Wirkzone“ der Kaltluft (= maximaler Kaltluftnachweis).

den in zwei von der Wetterlage her geeigneten Nächten während des Frühjahrs 1993 durchgeführt. Da während beider Nächte gut übereinstimmende Meßergebnisse erzielt wurden, bezieht sich die Ergebnisdarstellung nur auf eine Meßnacht.

Die bodennahe Kaltluftverlagerung im oberen Talbereich (Klimastation 1, Abbildung 4) konnte anhand der Analyse der Windgeschwindigkeiten in drei verschiedenen Höhen über Grund (2 m, 6 m, 10 m) nachgewiesen werden. Während das Anemometer in 10 m Höhe Windstille oder sehr niedrige Werte anzeigte, ließen sich für 2 m und 6 m Höhe permanente, relativ starken Schwankungen unterlegene Kaltluftabflüsse ermitteln (Abbildung 5).

Die daraus abzuleitenden Kaltluftpulsationen konnten auch durch gleichzeitig erfolgende Beobachtung im Gelände bestätigt werden. Das mit der abfließenden Kaltluft transportierte SF₆ strömte in Bodennähe mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 1,1 m/s in Richtung auf das Stadtgebiet zu. Wie der Verteilung der

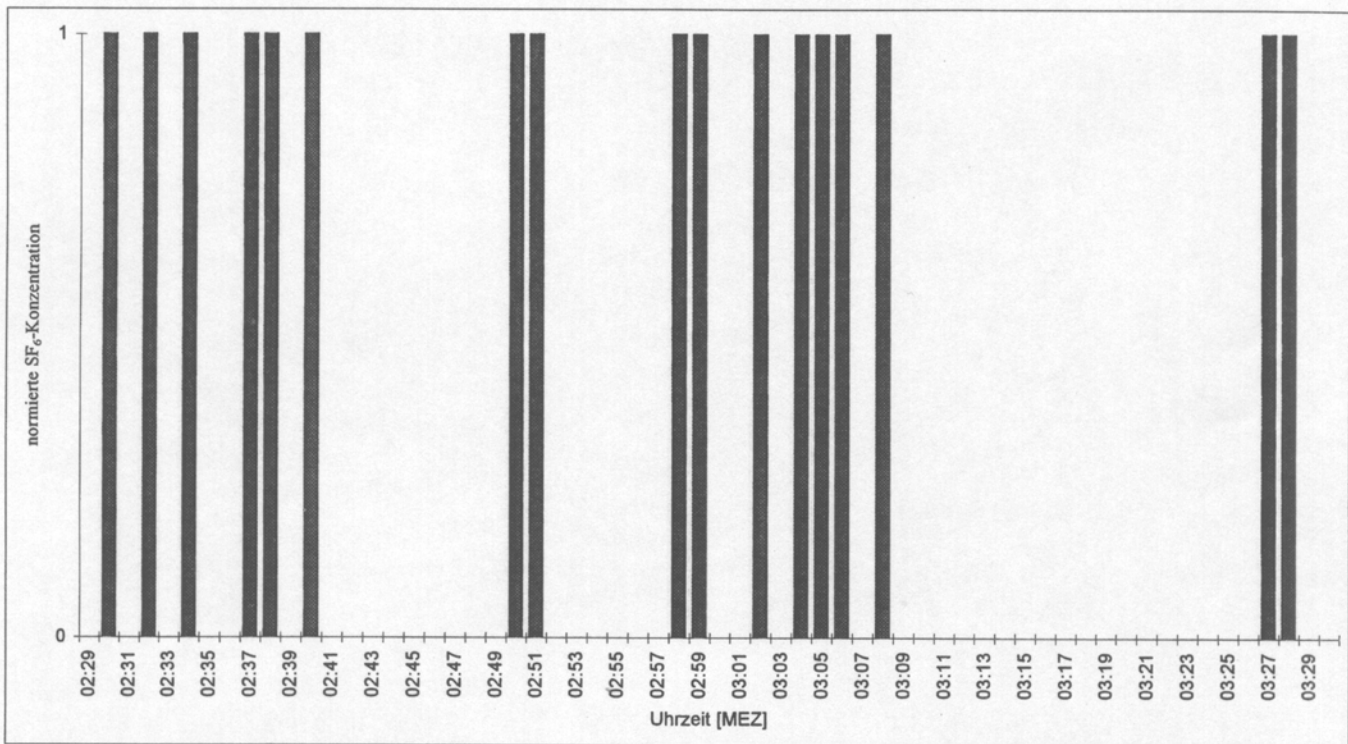


Abb. 7. Zeitliche Abfolge genormter Tracergaskonzentrationen in 60 m Höhe (= Hochhausdach, Lage s. Abb. 4) am 25./26.5.93 in der Innenstadt von Mülheim (Ruhr).

SF₆-Konzentrationen im Untersuchungsgebiet zu entnehmen ist (Abbildung 6), übernimmt die auf der Talsohle verlaufende, im oberen Bereich zum Teil vierspurig ausgebaute Landstraße (L 78) als Einfallstraße in das Stadtgebiet eine gewisse Leitfunktion gegenüber der abfließenden Kaltluft.

Die hohen SF₆-Konzentrationen an den Meßpunkten 12 und 1 belegen dieses. Die "Einschnürung" der als „Wirkzone“ bezeichneten Fläche maximaler Kaltluftausbreitung im Bereich der Meßpunkte 8 und 12 dürfte darauf zurückzuführen sein, daß von den hier südlich gelegenen Hängen ein Kaltluftnebenstrom ins Haupttal abfließt und dadurch eine größere Flächenausdehnung des von ESE kommenden, dem Ruhmbachtal folgenden Kaltlufthauptstromes verhindert. Gleiches gilt für Meßpunkt 9, was jeweils durch ergänzende Rauchpatronenversuche im Gelände bestätigt werden konnte.

Für diese wie auch für die hier nicht dargestellten Ergebnisse der ersten Meßnacht gilt, daß die mit dem Tracergas versetzte Kaltluft nicht bis zur Mündung des Ruhmbaches in die Ruhr, d. h. nicht bis ins Stadtzentrum (Meßpunkt 4) vordrang, sondern östlich der Innenstadt (Meßpunkt 3) ihre weiteste bodennahe Verbreitung fand (gelbe Fläche in Abbildung 6).

Die im Stadtgebiet nachgewiesenen sehr niedrigen SF₆-Konzentrationen wichen deutlich nach unten im Vergleich zu der mit Hilfe eines einfachen Boxmodells berechneten theoretischen Konzentrationsverteilung ab; sie waren durchschnittlich um einen Faktor 20 zu niedrig. Da seitliche Verluste aufgrund der Morphographie des Tales ausgeschlossen werden konnten, mußte davon ausgegangen werden, daß die das Tracergas enthaltene Kaltluft östlich der Innenstadt angehoben und über die dort beginnende 3- bis 5-geschossige Bebauung transportiert wurde. Parallel zu den SF₆-Tracermessungen durchgeführte Rauchpatronenversuche bestätigten diese Vermutung, denn der Rauch hob sich in Luv der meist quer zum Tal stehenden Gebäude ab und begann, den Innenstadtbereich jenseits des Dachniveaus – mit hin oberhalb der Urban Canopy Layer (= UCL, „Stadthindernisschicht“) zu überströmen.

Die bodennah nicht mehr nachzuweisende „Wirkzone“ der Kaltluft im Stadtgebiet dürfte deshalb nicht auf ein Nachlieferungsdefizit der Kaltluft produzierenden Flächen zurückzuführen sein, sondern aus dem erzwungenen Aufstieg des größten Teils der Kaltluft bei Annäherung an die Innenstadt resultieren. Diese Hypothese konnte durch die auf dem genannten 60 m ho-

hen Hochhaus durchgeführten SF₆-Messungen bestätigt werden. Die mit zeitlichen Unterbrechungen von jeweils einigen Minuten nachgewiesenen SF₆-Konzentrationen deuten auf einen schubweisen Transport der tracermarkierten Luft hin (Abbildung 7), was für Kaltluftpulsationen typisch ist.

Während dieser Messungen wurde gelegentlich beobachtet, daß ein geringer Teil der in der Höhe transportierten Luft durch gebäudebedingte Turbulenzen bis in Bodennähe heruntergemischt wurde; allerdings konnte hierdurch kein wesentlicher Beitrag zur klimaökologischen Verbesserung der bodennahen Luft geleistet werden, da diese Vorgänge jeweils nur von kurzer Dauer waren.

Das Schema in Abbildung 8 faßt zusammen, wie man sich die Dynamik der von den Talhängen und der Talsohle abfließenden Kaltluft und deren überwiegendes Aufgleiten auf die UCL vorzustellen hat.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß selbst bei Vorhandensein einer als Luftleitbahn zu nutzenden breiten Einfallstraße die transportierte Kaltluft nicht unbedingt bodennah in den Innenstadtbereich eindringen muß, sondern bei Übertritt in dichtbebautes Gebiet – durch mechanische und thermische Turbulenz verursacht – angehoben und über dieses hinwegge-

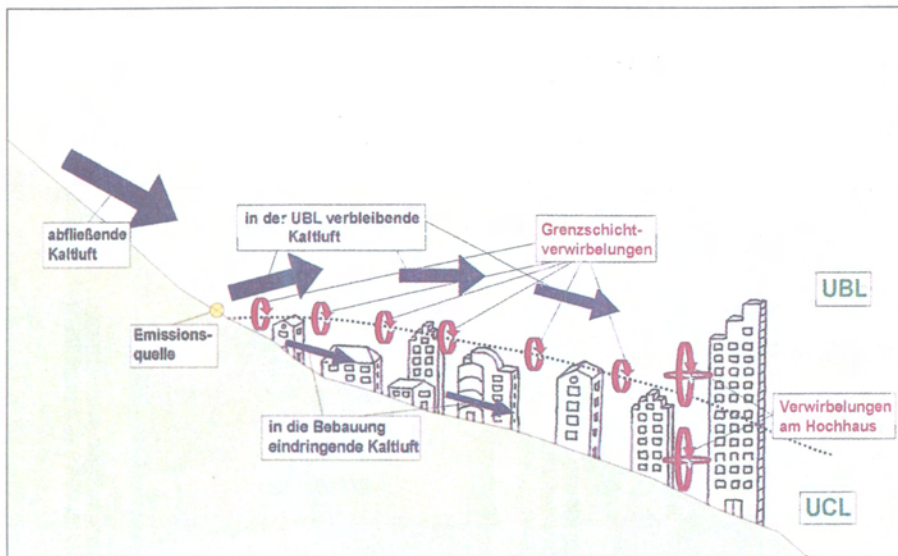


Abb. 8. Schematische Darstellung des Kaltluftabflusses am 25./26.5.93 im Ruhmbachtal/Mülheim (Ruhr) (stark vereinfacht und überhöht dargestellt).

leitet werden kann. Für die Lage des Aufgleitpunktes können keine allgemein verbindlichen Angaben gemacht werden, da diese sowohl von bodenthermischen Einflußgrößen und vom horizontalen Temperaturgradienten zwischen Stadt und Umland abhängen als auch durch die aerodynamische Oberflächenrauigkeit der Luftleitbahnen und – bei katabatischen Strömungsvorgängen – vom Geländegefälle bestimmt werden.

Danksagung

Herrn Dr. A.-B. Barlag und Herrn Dipl.-Ökol. S. Hofmann danke ich für tatkräftige Unterstützung bei den Gelände- und Auswertearbeiten sowie für kritische Diskussionen. Das Projekt „Ruhmbachtal“ wurde vom Kommunalverband Ruhrgebiet (KVR) finanziell unterstützt.

Literatur

[1] H. E. Landsberg: The urban climate; International Geophysics Series, 28. Academic Press, New York.
 [2] VDI-Kom. Reinh. Luft (Hrsg.): Stadtklima und Luftreinhaltung. Ein wissenschaftliches Handbuch für die Praxis in der Umweltplanung. Berlin: Springer, 1988.
 [3] W. Kuttler: Spatial and temporal structures of the urban climate – a survey; In: K. Grefen & J. Löbel (Eds.): Environmental Meteorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
 [4] G. Jendritzky: The atmospheric environment - An introduction; Experientia 49 (1993) 733–740.
 [5] H. Mayer: Human-biometeorologische Probleme des Stadtklimas; Geowissenschaften 14 (1996) 233–239.
 [6] P. O. Fanger: Thermal comfort. Analy-

ses and applications in environmental engineering. New York: McGraw Hill, 1972.
 [7] G. Jendritzky, G. Menz, H. Schirmer & W. Schmidt-Kessen: Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponenten im Bioklima des Menschen; Beitr. Adad. Raumforsch. Landesplan. 114 (1990).
 [8] H. E. Wichmann, H. W. Schlipkötter & G. Fülgraff: Handbuch der Umweltmedizin. Landsberg/Lech: ecomed, 1992.
 [9] L. S. Kalkstein & K. E. Smoyer: The impact of climate change on human health; Experientia 49 (1993) 969–979.
 [10] G. Groß: Stadtklima und globale Erwärmung; Geowissenschaften, 14 (1996) 245–248.
 [11] P. A. Kratzer: Das Stadtklima. Braunschweig: Vieweg, 1937.
 [12] J. Hann: Über den Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land; Zeitschr. d. österr. Ges. f. Meteor. 20 (1885) 457–462.
 [13] L. Howard: Climate of London deduced from meteorological observations. 3. Edition. London, 1833.
 [14] C. Kaßner: Die meteorologischen Grundlagen des Städtebaus; Städtebauliche Vorträge 3, Berlin, 6 (1910).
 [15] UVP-Gesetz 1990 = Gesetz zur Umsetzung der Richtlinien des Rates vom 27. Juni 1985 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten (85/337, EWG) vom 12. Febr. 1990, Bundesgesetzblatt vom 20. Febr. 1990, 6, 205–214.
 [16] Bundesimmissionsschutzgesetz. Fassung vom 14. Mai 1990.
 [17] Baugesetzbuch, 1986.
 [18] H. Schirmer, W. Kuttler, J. Löbel & K. Weber (Hrsg.): Lufthygiene und Klima. Ein Handbuch zur Stadt- und Regionalplanung. Düsseldorf: VDI, 1993.
 [19] U. Reuter, J. Baumüller & U. Hoffmann: Luft und Klima als Planungsfaktor im Umweltschutz. Ehningen: Expert, 1991.
 [20] W. Kuttler: Planungsorientierte Stadtklimatologie; Geogr. Rdschau 45 (2) (1993) 95–106.

[21] Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen: Umweltgutachten. Stuttgart: Poeschel, 1994.
 [22] W. Kuttler: Stadtklima; In: H. Sukopp & R. Wittig (Hrsg.): Stadtökologie. Stuttgart, Jena, New York: Gustav Fischer, 1993, 113–153.
 [23] H. Gossmann: Grundlegende Probleme der Thermalbildauswertung über Landflächen; Akad. f. Raumfor. und Landesplan. 62 (1982) 5–22.
 [24] A. B. Barlag & W. Kuttler: The Significance of country breezes for urban planning; Energy and Buildings 15/16 (1991) 291–297.
 [25] G. Groß: Influencing an urban heat island by nocturnal cold air drainage: a numerical simulation experiment; Annalen der Meteorologie 20 (1983) 59–61.
 [26] U. Sievers: Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten; In: VDI-Kom. Reinh. Luft (Hrsg.): Umweltmeteorologie. Bd 15. Düsseldorf: VDI, 1990, S. 36–43.
 [27] E. J. Plate: Zum Einsatz des Windkanals bei der Lösung stadtklimatischer Probleme; Geowissenschaften 14 (1996) 240–244.
 [28] W. Kuttler: Zur Anwendung von Windkanaluntersuchungen bei der Lösung immissionsklimatischer Probleme in Stadtgebieten; In: W. Endlicher & H. Großmann (Hrsg.): Beiträge zur Regionalen und Angewandten Klimatologie. Freiburger Geographische Hefte 32 (1991) S. 55–70.
 [29] P. Stock: Synthetische Klimafunktionskarte Ruhrgebiet. Kommunalverband Ruhrgebiet Essen, 1994.
 [30] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI-Richtlinie 3787, Entwurf, 1994.
 [31] R. M. Brown, R. N. Dietz & E. A. Cote: The use of Sulfur-Hexafluoride in atmospheric transport and diffusion studies; Journal of Geophys. Res. 80 (1975) 3393–3398.
 [32] H. B. Singh, L. Salas, H. Shigeishi & A. Crawford: Urban-nonurban relationships of Halocarbons, SF₆, N₂O, and other atmospheric trace constituents; Atmospheric Environment 11 (1977) 819–828.
 [33] A.-B. Barlag: Planungsrelevante Klimaanalyse einer Industriestadt in Tallage. Magdeburg: Westarp, 1993, Essener Ökologische Schriften, Bd. 1.
 [34] W. Kuttler: Klimagerechtes Bauen; In: H. Schirmer, W. Kuttler, J. Löbel & K. Weber (Hrsg.): Lufthygiene und Klima. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN. Düsseldorf: VDI, 1993, 352–364.
 [35] W. Kuttler & E. Romberg: The occurrence and effectiveness of country breezes by means of wind tunnel and in situ-measurements; In: Proceedings of the 9th World Clean Air Congress, Montreal, Quebec, Canada, August 30 - September 4, 1992, IU – 9A.04, 1–12.
 [36] J. Baumüller & U. Reuter: Stadtklimatologische Aspekte am Beispiel von Stuttgart; Geowissenschaften 14, (1996) 229–232.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Wilhelm Kuttler, Fb 9, Institut für Ökologie, Abteilung Landschaftsökologie, D-45117 Essen.