Zeitschrift: Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 163 (1983)

Artikel: Stadtklimatologie und Stadtklimastudien in der Schweiz

Autor: Wanner, Heinz

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-90910

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Stadtklimatologie und Stadtklimastudien in der Schweiz

Heinz Wanner

Zusammenfassung

Im ersten Teil der Arbeit wird auf die vielschichtigen Ursachen und Wirkungen stadtinduzierter Klimaveränderungen eingegangen. Als wichtigste Ursachen können genannt werden: die erhöhte Wärmeleitfähigkeit, die Modifikation der Strahlungsverhältnisse infolge der veränderten Oberflächengeometrie und der Zunahme atmosphärischer Luftfremdstoffe, das verminderte Feuchteangebot (höheres Bowen-Verhältnis), die erhöhte anthropogene Wärmeproduktion sowie die veränderten aerodynamischen Eigenschaften der Stadtoberfläche (v. a. erhöhte Bodenrauhigkeit). Aus dem Zusammenwirken dieser Faktoren, welche je nach Tages- und Jahreszeit oder Baucharakter der Stadt sehr stark schwanken können, lässt sich eine Reihe komplexer meteorologischer Stadtphänomene ableiten: Wärmeinsel – lokale Windsysteme – Dunstfahne – Leeniederschläge. Im zweiten Teil wird auf die Eigenart schweizerischer Städte und Stadtklimastudien eingegangen: Die mittleren maximalen Wärmeinselintensitäten (Lufttemperatur, 2 m) betragen je nach Stadt zwischen 3 und 7°C. Lufthygienische Probleme treten in den Schweizer Städten vor allem aus zwei Gründen auf: Zum ersten weisen diese Städte bei schmalen Strassen hohe Verkehrsfrequenzen auf, und zum zweiten liegen praktisch alle Stadtstandorte in Muldenlagen, wodurch die Stagnation der Luft begünstigt wird. Weiter wird versucht, die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem synoptisch bedingten Temperatur- und Stromfeld, den stadterzeugten Klimaeinflüssen sowie den reliefinduzierten Zirkulationsstrukturen in Form einer Modellvorstellung darzustellen. Zukünftige Stadtklimastudien sollten sich in erster Linie mit den physikalischen Grundlagen der letztgenannten, durch das Relief erzeugten regionalen bis lokalen Zirkulationssysteme und den damit gekoppelten Fragen des Transportes und der turbulenten Diffusion, aber auch mit den Veränderungen und der Deposition mitgeführter Luftfremdstoffe befassen.

Résumé

Les causes et les effets très variés des changements climatiques dans les régions urbaines sont envisagés dans la première partie du travail. Les causes importances sont les suivantes: l'élévation de la conductivité thermique, la modification des conditions de rayonnement, qui est due à la géométrie complexe de la surface et à l'accroissement de la teneur en polluants atmosphériques, la réduction de l'humidité spécifique (augmentation du rapport de Bowen), l'accroissement des rejets thermiques anthropogènes et finalement la modification des propriétés aérodynamiques de la surface urbaine (avant tout: rugosité plus élevée de la surface). La combinaison de tous les facteurs, que peuvent varier considérablement en fonction de l'heure de jour, de la saison et de la structure architectonique, engendre divers phénomènes météorologiques très complexes et typique cu climat urbain: l'îlot de chaleur – les systèmes de vents locaux – la plume de smog – les précipitations urbaines. Dans la deuxième partie du travail, les villes suisses sont caractérisées et quelques études de climatologie urbaine sont présentés. Les intensités maximales moyennes des îlots de chaleur (température de l'air à 2 m) fluctuent entre 3 et 7°C. Les villes de Suisse posent des problèmes d'hygiène de l'air pour deux raisons principales: d'une part, les rues sont généralement étroites et la fréquence du trafic y est très élevée; d'autre part, presque toutes les villes sont situées dans des cuvettes qui favorisent la stagnation de l'air. On représente schématiquement les

interactions complexes entre les champs de température et de courant d'origine synoptique, les influences de la ville sur le climat et les structures de circulation induites par le relief. A l'avenir les études de climatologie urbaine en Suisse devraient se concentrer sur les phénomènes typiques déjà mentionnés: les principes physiques régissant les systèmes de circulation locaux et régionaux, les questions de transport et de diffusion turbulente qui en découlent, mais également la modification et la déposition des polluants transportés.

Einleitung und Zielsetzung

Das im Jahre 1818 von Luke Howard veröffentlichte Werk über das «Klima von London anhand meteorologischer Beobachtungen» (zit. in Landsberg, 1981) darf als der erste Versuch einer Darstellung des stadteigenen Klimas bezeichnet werden. Entsprechend der fortschreitenden Verstädterung hat in der Folge auch die stadtklimatologische Literatur zugenommen. Das wachsende Umweltbewusstsein bewirkte zudem in den 70er Jahren dieses Jahrhunderts einen sprunghaften Anstieg stadtklimatologischer und lufthygienischer Studien sowie Publikationen (Oke, 1979). Musste man sich am Anfang auf die Beschreibung von Stationsdaten oder im besten Fall auf eine Analyse statistischer Zusammenhänge beschränken, so förderte die Entwicklung integral einsetzbarer und zum grossen Teil auch mobiler Messeinrichtungen (Messzüge, neuartige Sondiersysteme, Flugzeuge) das Verständnis für die ablaufenden Prozesse ganz beträchtlich. Zusammen mit der Entwicklung leistungsfähiger Rechenanlagen stiegen damit auch die Möglichkeiten der mathematischen Modellierung und der Prognose stark an. Die genannten Fortschritte ändern jedoch nichts an der Tatsache, dass das Stadtklima in Raum und Zeit derart vielfältig und komplex ist, dass die massgebenden meteorologischen und lufthygienischen Prozesse auch heute nur rudimentär verstanden werden.
Dieser Aufsatz verfolgt drei Zielsetzungen:

1) Er soll eine knappe Übersicht über das komplexe Wirkungsgefüge «Stadtklima» geben;
2) die spezifischen Eigenschaften der Schweizer Städte sollen in Kurzform aufgezählt werden;
3) nach einer Diskussion der Untersuchungsmethoden sollen einige wichtige Ergebnisse präsentiert werden.

Generell sei darauf hingewiesen, dass dem Begriff «Stadtklima» in den folgenden Ausführungen nicht nur klimatologische und meteorologische, sondern auch lufthygienische Gesichtspunkte untergeordnet werden.

Das Stadtklima – ein komplexes Wirkungsgefüge

Jeder Messwert eines Wetterelementes im Stadtbereich kann empirisch als Summe dreier Komponenten aufgefasst werden (Lowry, 1977):

$$M_{itx} = R_{itx} + L_{itx} + S_{itx} \quad (1)$$

M: Messwert eines Wetterelementes (bei der Wetterlage i, während des Zeitraumes t, an der Station x)
R: Regionalklimaanteil (synoptische und grossregionale Beeinflussung)
L: Lokalklimaanteil (Beeinflussung durch Topographie und natürliche/nichtstädtische Bodenbedeckung)
S: Stadtklimaanteil (Beeinflussung infolge Verstädterung)

Fragen wir nach den vielfältigen Ursachen, welche zur Herausbildung eines mehr oder weniger ausgeprägten Stadtklimaanteils führen, so lassen sich diese in einem heuristischen Wirkungsgefüge zusammenfassen (Abb. 1). Als Ausgangsgrössen dienen dabei die wichtigen stadtbedingten Veränderungen, welche sich grob in die drei Gruppen Bodenoberfläche (material- und formbezogene Veränderungen), Biosphäre und technische Einrichtungen einteilen lassen (siehe Spalte ganz links). Von diesen Veränderungen werden sogenannte Primärwirkungen in Form bekannter und wichtiger physikalischer Parameter oder Prozesse aus den Bereichen Meteorologie und Lufthygiene abge-

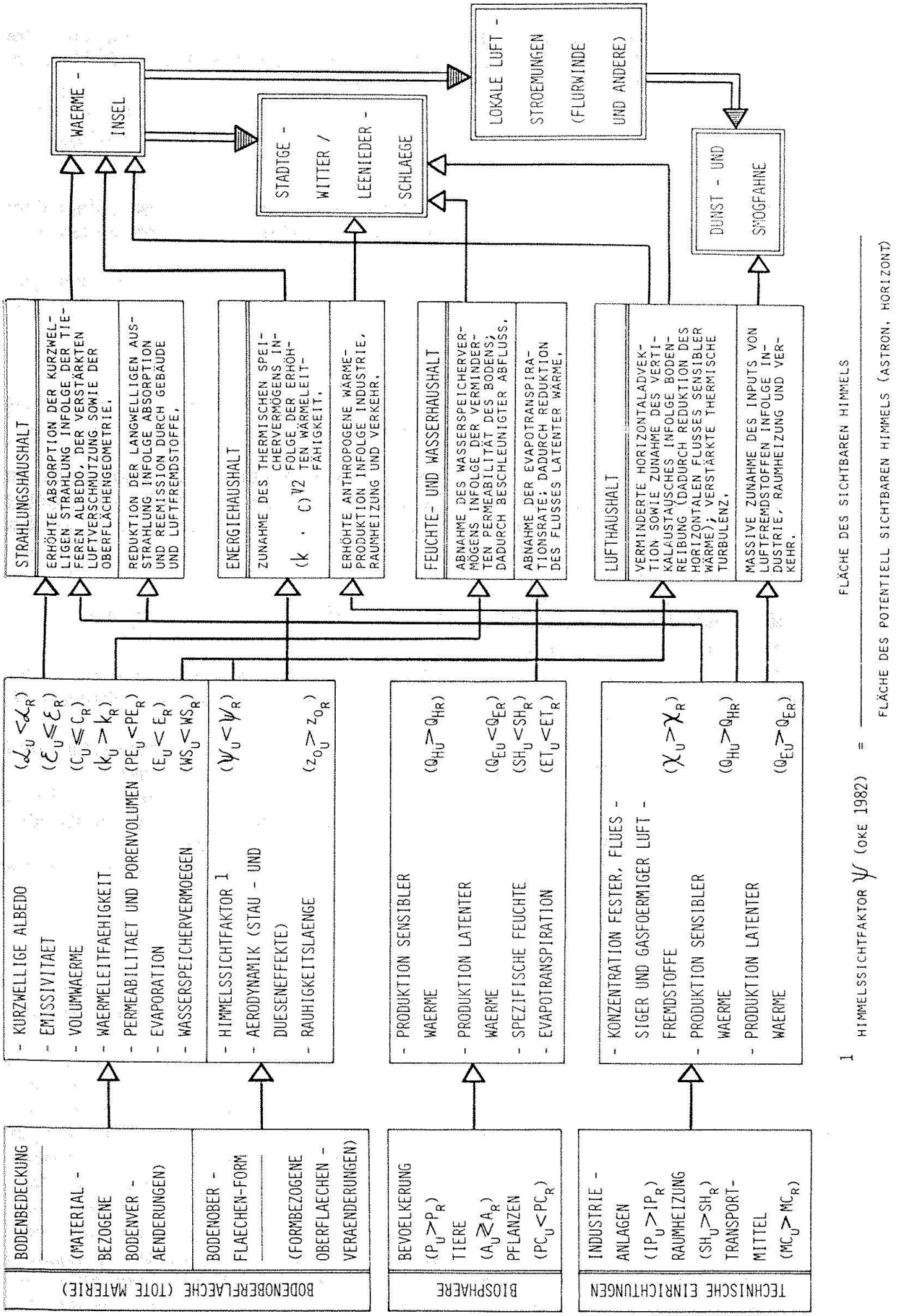

Abb. 1. Heuristisches Wirkungsgefüge zur Entstehung des Stadtklimas.

Tab. 1. Typische physikalische Grössen für Stadt- und Umlandgebiete der mittleren Breiten.

Physikal. Grösse	Stadt	Umland	Literatur
Albedo	-Asphalt 0.03–0.20 -Beton 0.10–0.35 -Teer/Kies 0.08–0.18 -Glas (Zenitwinkel 40–80°) 0.09–0.52 -Ziegeldach 0.10–0.35	-Naturstr. 0.10–0.35 -Ackerland 0.30 -Mais 0.12–0.38 -Wiese 0.20–0.32 -Wald 0.08–0.20 -Wasser 0.03–1.00 (Zenitwinkel!)	Möller 1973 Oke 1978 Winiger et al. 1978 Nübler 1979 Enders 1980
Emissivität ε	-Asphalt 0.95 -Beton 0.71–0.90 -Teer/Kies 0.92 -Glas (Zenitwinkel 40–80°) 0.87–0.92 -Ziegeldach 0.90	-Normalboden 0.90–0.98 -Gras 0.90–0.95 -Wald 0.90–0.99 -Wasser 0.96	Möller 1973 Oke 1978 Nübler 1979
Volumwärme C $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1} \cdot 10^6)$	-Asphalt 2.0 -Beton 1.7–2.0 -Sandstein 1.8 -Ziegelstein 1.4 -Stahl 3.93 -Glas 1.66	-Sand trocken 1.25 -Sand nass 2.5 -Humus 2.2 -Lehmboden (15 % Wasser) 2.5 -Wasser (ruhig) 4.19	Oke 1978 Kraus 1979 Enders 1980
Wärmeleitfähigkeit k $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	-Asphalt 0.71 -Beton 1.0–1.3 -Sandstein 1.7 -Ziegelstein 0.85 -Stahl 53.3 -Glas 0.74	-trockenes Moor 0.1 -Sand trocken 0.35 -Sand nass 1.67 -Humus 1.3 -Lehmboden (15 % Wasser) 0.9 -Wasser (ruhig) 0.6	Oke 1978 Kraus 1979 Nübler 1979 Enders 1980
Evapotranspiration ET $(mm \cdot d^{-1}$; Sommer)	< als Umland!	-Obstgarten mit Wiese 4.8 -Gerstenfeld 4.9 -Wald 3.8	Oke 1978
Himmelssichtfaktor ψ (ebene Gebiete)	Typische Werte: 0.3–0.8	Typische Werte: 0.8	Oke 1981
Rauhigkeitslänge z_0 (m)	Typische Werte: 0.05–10.0	-Wasser $0.1–10.0 \cdot 10^{-5}$ -Äcker, Felder und und Gras 0.002–0.1 -Wald 1.0–5.0	Oke 1978 Landsberg 1981 Wanner et al. 1982
Bowens Verhältnis (Q_H/Q_E)	Typische Werte: 0.5–3.0	-Grasland 0.4–0.8 -Wald (Sommer) 0.5–1.7 -Ozeane 0.1	Oke 1978 Oke 1980
Anthropogene Wärmeproduktion Q_F $(W \cdot m^{-2})$	Typische Werte: 5–100	Typische Werte: < 5	Oke 1978 Nübler 1979
Luftfremdstoffkonzentration $\overline{\chi}$ $(\mu g \cdot m^{-3}$; Jahresmittelwerte)			
SO_2	50–120	10–20	Seinfeld 1975
CO*	0.5–10 mg. m^{-3}	0.5 mg. m^{-3}	Bundesamt für
CO_2	350–700 ppm	310–350 ppm	Umweltschutz 1983
NO*	150	15–20	Rat von Sachver-
NO_2	50–100	25–30	ständigen für Umwelt-
O_3	sommerliche Episoden:	> 150	fragen 1982
HF	0.5	0.1	
HCl	< 25	10	
Schwebestaub	50–90	30–40	

* Stark von der Lage der Messstation abhängig (hohe Werte vor allem in Strassennähe).

leitet (zweite Spalte in Abb. 1). Diese werden in Tab. 1 quantitativ dargestellt. Obschon das Stadtklima raumzeitlich sehr fein differenziert ist und von Fall zu Fall andere Faktoren massgebend die stadtbedingte Klimamodifikation bestimmen, können anhand von Abb. 1 und Tab. 1 die folgenden, vorläufigen Schlüsse gezogen werden:

1) Die Albedowerte der Stadtgebiete liegen leicht unter den Umlandwerten. Aufgrund der starken tages- und jahreszeitlichen Schwankungen muss ihre Bedeutung von Fall zu Fall abgeschätzt werden, und wesentliche Unterschiede dürften nur selten ins Gewicht fallen.
2) Ähnliches gilt für die Emissivität und die Volumwärme: Aufgrund der derzeit vorliegenden Literatur (Zitate in Tab. 1) lassen sich nur unwesentliche Stadt-Umland-Unterschiede erkennen, und genaue quantitative Abschätzungen sind aufgrund des Fazettenreichtums der Stadtoberflächen nur mit Riesenaufwand zu bewerkstelligen.
3) Neueste Studien (Oke, 1982) bestätigen die oftmals vermutete Tatsache, wonach im thermalen Bereich die Wärmeleitfähigkeit eine bedeutende Rolle spielen kann. Die in Tab. 1 gezeigten Werte deuten darauf hin, dass diese Differenzen vor allem im Sommer, wenn die Böden sehr trocken sind, recht bedeutend sein können.
4) Über die formbedingten Unterschiede zwischen Stadt und Umland bestehen kaum Zweifel: Bildet der Himmelssichtfaktor in erster Linie ein empirisches Mass für die Charakterisierung der komplizierten, kurz- und langwelligen Strahlungsgänge im Strassencanyon, so stellt die Rauhigkeitslänge eine Grösse dar, welche den reibungsbedingten Einfluss des Stadtkörpers charakterisiert.
5) Im Bereich der biosphärischen Veränderungen ist in erster Linie auf das innerhalb der Stadt abnehmende Feuchteangebot hinzuweisen, welches sich vor allem in der Zunahme des Bowen-Verhältnisses und in der Abnahme der spezifischen Feuchte widerspiegelt.
6) Die technischen Einrichtungen bewirken nicht nur einen sehr massgebenden Anstieg der Luftfremdstoffe und der sensiblen Wärmeproduktion. Sie können zuweilen zu einer beträchtlichen Korrektur des Stadt-Umland-Feuchtedefizits beitragen.

Die dritte Spalte von Abb. 1 befasst sich mit dem Einfluss der soeben genannten Primärwirkungen auf vier, für die planetare Grenzschicht der Stadt grundlegende Haushaltsgrössen. Aus Aufwandgründen kann dabei nur auf die wichtigsten Veränderungen eingegangen werden:

1) Als entscheidende energetische Inputgrösse erweist sich innerhalb der Strahlungsbilanz Q^* die Globalstrahlung:

$$(2) \quad Q^* = (S+D)(1-\alpha) + \varepsilon \cdot \sigma (T_S^4 - T_O^4)$$

S : Direkte Solarstrahlung } Globalstrahlung
D : Diffuse Solarstrahlung } ($W \cdot m^{-2}$)
σ : Stefan-Boltzmann-Konstante ($5.67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)
T_S : Absoluttemperatur des atmosphärischen Himmelsgewölbes (K)
T_O : Absoluttemperatur der Bodenoberfläche (K)

Betrachten wir die budgetmässig ins Gewicht fallenden Stadt-Umland-Differenzen:
Die kurzwellige Strahlung wird wegen der tieferen Stadtalbedo, vor allem aber wegen der erhöhten Luftfremdstoffkonzentration innerhalb der städtischen UBL (Urban Boundary Layer), vermehrt absorbiert und langwellig reemittiert. Innerhalb der UCL (Urban Canopy Layer; Oke, 1976) ist vor allem der mehrfachen Reflexion und somit auch der erhöhten Absorption sowohl der kurz- als auch der langwelligen Strahlung Rechnung zu tragen. Betrachten wir den rechten Teil von Gleichung (2), so muss hier in Rechnung gezogen werden, dass die atmosphärische Aufheizrate tagsüber über der grossstädtischen UBL bis ca. 5,5°K/Tag betragen kann, was zu Differenzen gegenüber dem Umland in der Grössenordnung von 2-3°K führen kann (Hänel et al., 1982).
2) Die Energiebilanz beschreibt die Transformation von Strahlungsenergie und anthropogen produzierter Wärmeenergie in den Bodenwärmestrom Q_G sowie in die Ströme fühlbarer (Q_H) und latenter Wärme (Q_E) und teilweise umgekehrt:

$$(3) \quad Q^* + Q_F = Q_G + Q_H + Q_E$$

Denken wir uns sowohl über der städtischen als auch über der ländlichen Grenzschicht mehrere horizontale Flächen, durch welche die in Formel (3) genannten Energieströme fliessen, so fallen abgesehen von Q^* folgende

Stadt-Umland-Differenzen ins Gewicht: Die anthropogene Wärmeproduktion führt vor allem an Winterabenden mit tiefen Temperaturen (Raumheizung!) und Schneedecke (Isolationswirkung) zu merklichen Stadt-Umland-Temperaturabweichungen (Reiter et al. 1981). Beim Bodenwärmestrom Q_G fällt in erster Linie die im Stadtraum erhöhte Wärmeleitfähigkeit ins Gewicht. Sie ist auch bei Berechnungen der nächtlichen Oberflächentemperaturabnahme von zentraler Bedeutung (z. B. empirische Formel von Brunt, 1941):

(4)

$$\Delta T_0(t) = -\frac{2}{\pi^{1/2}} \cdot \frac{L^*}{\mu} t^{1/2}$$

t : Zeit (sec)
L* : Langwellige Strahlungsbilanz ($W \cdot m^{-2}$)

(5) $$\mu = \sqrt{k \cdot C}$$

L* kann in grober Näherung als konstant angenommen werden. Feldmessungen zeigen zudem, dass die L*-Differenzen zwischen Stadt und Umland sehr oft gering sind (z. B. Rickli und Wanner, 1983). ΔT_0 ist damit - abgesehen von der Zeit - vom «thermischen Speichervermögen» μ abhängig. Da die Stadt-Umland-Differenzen der Volumwärmen C gemäss Tab. 1 ebenfalls gering ausfallen, sind schliesslich noch die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten zu betrachten: Tab. 1 zeigt, dass diese k-Werte in erster Linie bei trockenen Umlandböden tief ausfallen. Die folgenden, durchgerechneten Beispiele zeigen entsprechende Werte des thermischen Speichervermögens μ:

- μ (Asphalt) : 1190 ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2} \cdot K^{-1}$)
- μ (Beton) : 1460
- μ (Sandstein) : 1750
- μ (Ziegelstein) : 1090
- μ (Humus) : 1690
- μ (trockener Sandboden) : 660

Bei der Betrachtung von über 500 Tagesgängen der Stadt-Umland-Temperaturdifferenzen in der Städten Bern und Biel stellt man fest, dass der Wärmeinseleffekt bei Beachtung von Tages- und Jahresgang sehr häufig in den frühen Abendstunden des Winterhalbjahres zu beobachten ist, dass aber der Betrag der Wärmeinselintensität im Sommer nach Trockenperioden für Schweizer Verhältnisse die Maximalwerte erreichen kann (siehe auch Abschnitt «Energiebilanz und Temperaturfeld schweizerischer Städte»). Es darf deshalb die Hypothese aufgestellt werden, dass dieser Effekt zumindest teilweise auf die zu dieser Jahreszeit bedeutenden Stadt-Umland-Differenzen der Wärmeleitfähigkeit k zurückgeführt werden können. Bei der zukünftigen Auswertung des Datenmaterials wird man sich mit dieser Frage noch intensiver beschäftigen müssen!
Auf den bedeutenden Anstieg des Bowen-Verhältnisses im Stadtgebiet wurde bereits hingewiesen. Dabei muss im Zusammenhang mit Flussberechnungen von Q_H und Q_E auch auf die gewaltige raumzeitliche Änderung der turbulenten Diffusionskoeffizienten hingewiesen werden.

(3) Die Wasserbilanz von Stadt- oder Umlandvolumina hat folgende Form (Oke, 1978):

(6) $$p + F + I = E + \Delta r + \Delta S + \Delta A$$

p: Niederschlag
F: Künstlicher Wasserinput (v. a. durch Verbrennung)
I: Wasserzufluss
E: Evapotranspiration
r: Abfluss
ΔS: Feuchtespeicherung
ΔA: Netto-Feuchteadvektion

Quantitative Abschätzungen zeigen, dass die in einem Stadtvolumen vorhandene Wassermenge vor allem nach Niederschlägen (infolge des geringen Speichervermögens und hoher Abflussraten) sehr rasch abnimmt, was dann zu tiefen Evapotranspirationsbeträgen und hohen ß-Werten führt.

4) Der Lufthaushalt spielt im Hinblick auf die Konzentration von Luftfremdstoffen eine entscheidende Rolle (Wanner 1983):

(7) $$\bar{X} = \frac{Q}{b \cdot h^* \cdot \bar{u}}$$

$\bar{X}$: Mittlere Immissionskonzentration ($g \cdot m^{-3}$)
Q: Emissionsrate ($g \cdot sec^{-1}$)
b: Breite des Luftvolumens (durch die Quellenkonfiguration, durch die Meteorologie und/oder durch das Relief bestimmt: m)
h*: Mischungsschichthöhe (m)
$\bar{u}$: Mittlere Horizontalgeschwindigkeit ($m \cdot sec^{-1}$)

Einer starken Zunahme von Q und einer Abnahme von ū steht im Stadtgebiet der Vorteil der sowohl mechanisch als auch thermodynamisch bedingten Erhöhung von h* gegenüber.

In der Spalte rechts aussen von Abb. 1 wird schliesslich versucht, die städtebaulich bedingten Modifikationen der Haushaltsgrössen mit wichtigen, in der Literatur oft genannten «Stadteffekten» zu verknüpfen. Praktisch alle Modifikationen im Bereich der vier Haushaltsgrössen bewirken zumindest zeitweise eine positive Veränderung des städtischen Boden- und Lufttemperaturfeldes. Bei der gewaltigen raumzeitlichen Variabilität der für diesen Effekt verantwortlichen Parameter und Prozesse (Abb. 1, Tab. 1) ist es fast vermessen, wenn für dieses Phänomen einzelne Gründe angeführt werden. Für die Bildung der nächtlichen Wärmeinsel innerhalb der UCL einer mittelgrossen, zentraleuropäischen Stadt (Lufttemperatur in 2 m Abstand von Oberflächen oder Baukörpern) dürften immerhin die Effekte der Veränderung in den Bereichen Strahlungsphysik, thermale Leitfähigkeit, Bowens-Verhältnis, Oberflächenrauhigkeit, Luftchemie und zeitweise die anthropogene Wärmeproduktion im Vordergrund stehen. Die städtische Wärmeinsel als Folge energetischer, chemisch-physikalischer und mechanischer Wirkungen der städtischen Gebäude-Luft-Boden-Körpers wirkt somit als «trigger» für die weiteren, auf Abb. 1 gezeigten Phänomene wie Stadtgewitter/Leeniederschläge, stadtinduzierte Strömungssysteme und Dunst- oder Smogfahnen, wobei letztere aufgrund ihrer optischen Wirkung bewusst an den Schluss der ganzen Wirkungskette gesetzt werden können.

Auf eine Auflistung der durch die gezeigten Sekundärwirkungen hervorgerufenen Veränderungen meteorologischer und lufthygienischer Elemente oder Messgrössen kann hier verzichtet werden (Landsberg, 1981). Im Hinblick auf eine praktische Verwendung stadtklimatologischer Untersuchungsergebnisse seien abschliessend die vier Bestimmungsgrössen des Stadtklimas genannt, welchen im Rahmen der Stadtplanung eine Schlüsselfunktion zukommt (Weischet, 1980:

1) das thermische Gefüge:

Beeinflussung
- des Energieverbrauchs für Heizung und Kühlung;
- des menschlichen Wohlbefindens (Hitzestress!);
- der Schneebedeckung und somit der Schneeräumung;
- der Frosthäufigkeit und des phänologischen Jahreszyklus'.

2) die hygrischen Elemente:

Beeinflussung
- des flüssigen und festen Niederschlages;
- der Transpiration;
- der Verdunstungs- und Abflussraten (Stadthochwasser!).

3) das Strömungsfeld:

- Beeinflussung der Durchlüftung und Lufterneuerung (Strömungskonvergenz, Flurwinde) sowie des oben genannten Energieverbrauchs;
- Erzeugung unangenehmer Düseneffekte.

4) die Belastung durch Luftfremdstoffe:

Beeinflussung
- des Wohlbefindens bei Mensch und Tier (Augenreizungen, Atemwegserkrankungen);
- der Vegetationsentwicklung (Waldsterben!);
- der toten Materie (Korrosion und Zerfall von Sandstein, Metallen usw.).

Das Zusammenwirken und die Einflüsse dieser vier, voneinander kaum trennbaren Bestimmungsgrössen wurde in zahlreichen Grossstädten (z. B. St. Louis, Frankfurt) durch ausgedehnte, interdisziplinäre Forschungsprojekte untersucht (Regionale Planungsgemeinschaft Untermain, 1977; Changnon et al., 1981). Dabei hat sich deutlich gezeigt, dass die komplexe Struktur der Bodenbedeckung und Bodennutzung im Stadtraum zu einer derart feingefächerten Verteilung klimatologischer und lufthygienischer Ele-

mente führt, dass die entscheidenden Prozesse des Energie-, Wasser- und Lufthaushaltes stark verwischt werden. Oke (1976) nimmt aus diesem Grund eine Trennung in eine «urban canopy layer» (UCL: Boden bis mittlere Dachhöhe) und eine «urban boundary layer» (UBL: Grundschicht oberhalb der UCL) vor, die dann eine angepasste Behandlung der wichtigen Prozesse zulässt. Er fordert zudem eine verstärkte Berücksichtigung der Strahlungsgeometrie sowie der mikroklimatischen Vorgänge innerhalb der Strassenschluchten (Oke, 1982).
Weischet (1980) äussert sich in gleichem Sinn: Er ist der Ansicht, dass das thermische Gefüge einer Stadt nur mit Hilfe einer «Baukörperklimatologie», welche die Strahlungsenergie- und Wärmeumsätze anhand feinmaschig abgespeicherter Baukörper- und Bodenbedeckungsklassen errechnet, befriedigend erfasst werden kann.

Stadtklimatologische und lufthygienische Eigenschaften von Schweizer Städten

Grösse und Struktur

Die Schweizer Städte unterscheiden sich bezüglich Grösse und Struktur in vier Bereichen ganz wesentlich von den meteorologisch und lufthygienisch gut erforschten Grossstädten wie Frankfurt, Mexiko-City, New York, St. Louis und Tokyo:

1) Es handelt sich mit Ausnahme von Zürich, das zusammen mit den Vororten etwa eine halbe Million Einwohner aufweisen dürfte, generell um Kleinstädte oder Kleinagglomerationen mit Einwohnerzahlen zwischen 30000 und 200000.

2) Die Baustruktur erweist sich als traditionell: Hochbauten im Stadtzentrum weisen selten mehr als 10 – 15 Stockwerke auf. Bestehen die Hauswände in erster Linie aus den Baumaterialien Beton, Backstein, Glas und Stahl, so überwiegen im Dachbereich die Ziegel oder die Kies/Beton-Konstruktionen bei Flachdächern. Als sehr auffällig erweisen sich die engen Strassen, welche sowohl im innerstädtischen Bereich als auch in Vororten anzutreffen sind!

3) Die grosse Zahl an Motorfahrzeugen (ca. 0,5 pro Kopf der Bevölkerung) und die nach wie vor grosse Vorliebe zur Benützung privater Verkehrsmittel führt in den engen städtischen «Strassencanyons» vor allem in den Hauptverkehrszeiten zu einer grossen Verkehrsbelastung.

4) Auch in den zentralen Stadtbereichen sind sehr viele individuelle Hausfeuerungssysteme anzutreffen, deren Emissionen in geringen Höhen abgegeben werden.
Obschon mit Ausnahme der Industrieareale von Zürich und Basel und einzelner Grossemittenten die industrielle Luftfremdstoffproduktion relativ bescheiden ausfällt, kann aus den soeben erwähnten Eigenschaften schweizerischer Städte die Folgerung abgeleitet werden, dass die primär durch den Strassenverkehr und sekundär durch Hausbrand und Industrie hervorgerufene Luftverschmutzung bei winterlichen (Nebelmeerepisoden) und sommerlichen (Smogepisoden) Stagnationslagen zu echten Problemen führen kann. Berechnungen in den Städten Zürich, Bern und Biel zeigen, dass die Motorfahrzeuge zu ca. 70–75 % für die Produktion von Stickstoffmonoxid (NO) sowie 40–45 % für Kohlenwasserstoffe, und die Hausfeuerungen zu ca. 60 % für die SO_2-Emissionen verantwortlich sind.

Topographie

Im Gegensatz zu vielen Grossstädten der Erde sind praktisch alle Schweizer Städte in eine komplexe Topographie eingebettet. Ganz grob lassen sich vier typische Stadtstandorte erkennen:

1) Standorte in Flusstälern

Eine grosse Zahl schweizerischer Städte liegt in Flusstälern. Bevorzugt wurden vor allem Standorte bei Talmündungen und/oder im Grenzbereich zwischen Gebirgs- oder Hügelregionen und benachbarten Vorandsenken (Basel, Bern, Fribourg, Winterthur).

2) Standorte an Flüssen, welche in einen See münden

Mindestens ebenso bevorzugt wurden Seeuferstandorte, bei welchen zusätzlich ein

Fluss ein- oder ausmündet (Biel, Genf, Luzern, Thun, Yverdon, Zürich).

3) Standorte an Hanglagen in Seenähe

Einige Städte liegen ebenfalls im Seeuferbereich, doch ist ihre Lage mehr durch einen Abhang als durch ein Flusstal geprägt (Lausanne, Lugano, Montreux, Neuchâtel).

4) Standorte in höher gelegenen Talregionen oder Tälern

Nur wenige grössere Städte liegen in Alpen- und Juratälern oder in voralpinen Talregionen (Chur, La Chaux-de-Fonds, Sion, St. Gallen).
Gehen wir von der Tatsache aus, dass alle vier Standorttypen auf eine geschützte Muldenlage hinweisen und dass jede grössere Schweizer Stadt in der Nähe höherer Gebirge (Jura oder Alpen) liegt, so kann daraus eine weitere Folgerung abgeleitet werden:
Das grossräumige, synoptische Windfeld wird durch die genannten Gebirgsketten stark modifiziert. Bei Wetterlagen mit erhöhter Schichtungsstabilität und auch mechanisch nur geringer Turbulenz (vor allem gradientschwache Antizyklonallagen) sind die in erster Linie topographisch-thermisch induzierten Regional- und Lokalwindsysteme sehr oft vom synoptischen System abgekoppelt. Der Einfluss der Topographie führt damit zu einer zusätzlichen Verschärfung der oben bereits angedeuteten, ungünstigen lufthygienischen Verhältnisse!

Untersuchungsschwerpunkte und Untersuchungsmethoden schweizerischer Stadtklimastudien

Thematische Schwerpunkte

Vor der Beschreibung spezifisch-schweizerischer Forschungsansätze sei kurz auf die drei generellen Forschungsbereiche der Stadtklimatologie hingewiesen:

1) Forschungsbereich «Energiebilanz - Druckfeld - Stromfeld»

Ein Grossteil stadtklimatologischer Studien geht von den fundamentalen Prozessen aus, welche die Energiebilanz bestimmen (Gleichung (3)). Via Energiebilanz wird dann auf Bodenoberflächentemperaturen und bodennahe Lufttemperaturen geschlossen. Aufgrund der davon abgeleiteten Wärme- und Dichteunterschiede werden schliesslich die Luftdruckunterschiede geschätzt, welche eine Berechnung der Windgeschwindigkeit erlauben. Als relativ schwierig abschätzbar erweist sich dabei der reibungsbedingte Effekt der rauhen Stadtoberfläche.
Die erwähnte Kopplung zwischen Temperatur-, Druck- und Stromfeld dient in erster Linie als Basis für die Berechnung des städtischen Stromfeldes (Hjelmfelt, 1982), welches die Luftfremdstofftransporte im mesoskaligen Stadt-Umlandbereich bestimmt.

2) Forschungsbereich «Atmosphärenchemie -Lufthygiene»

In modernen Grossprojekten werden grosse Anstrengungen unternommen, um via Emission, Transport und turbulente Diffusion, chemisch-physikalische Stoffveränderungen und Abbauprozesse sowie Konzentrations- und Depositionsmessungen oder -berechnungen genauere Angaben über die Wirkung der Luftfremdstoffe auf Mensch, Biosphäre und «tote Materie» zu erhalten. Abgesehen von grossräumigen Studien über den sauren Regen konzentrieren sich die lufthygienisch ausgerichteten Stadtklimastudien in erster Linie auf die Erfassung winterlicher und sommerlicher Smoglagen (photochemischer Wirkungskomplex), auf die Untersuchung der flüchtigen, anorganischen Halogenverbindungen, auf die Abschätzung der Wirkung von Schwermetallen und anderen toxischen Spurenelementen sowie auf organische Verbindungen (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, 1983).

3) Forschungsbereich «Niederschlagsmodifikation»

Die Schwerpunkte von Studien, welche sich mit der stadtinduzierten Niederschlagsmodifikation befassen, liegen in erster Linie auf der Abschätzung des Einflusses der luftchemischen (Zunahme der Zahl und Veränderung der Art der Kondensationskerne) und der thermodynamischen (stadtbedingte Instabilität - verstärkte Konvektion) Eigen-

schaften von Grossstädten. Im Mittelpunkt stehen Untersuchungen über Stadtgewitter und Leeniederschläge (Chandler et al., 1981).

Betrachten wir bisherige Schweizer Stadtklimastudien, so stand eindeutig Forschungsbereich (1) im Vordergrund (Schlatter, 1975; Mathys et al., 1980).

In neuester Zeit wurden jedoch verschiedene Projekte gestartet, bei welchen Forschungsbereich (2) eine wichtige Rolle spielen wird: Beschränkt man sich in Fribourg (Roten et al., 1982) auf die Wirkungskette Emission-Transmission-Immission, so werden in Biel (Wanner et al., 1982) auch Folgewirkungen in Form von Atemwegserkrankungen bei Kindern sowie Einflüsse auf Flechten studiert. Angesichts der wichtigen Rolle, die der photochemische Smog im Zusammenhang mit dem Waldsterben spielen dürfte, ist es als erfreulich zu bezeichnen, dass dieser Problemkomplex neuerdings in der grössten Schweizer Stadt (Zürich) untersucht wird (siehe Beiträge von Broder und Gassmann).

Abgesehen von den Untersuchungen im Raum Basel (CLIMOD, 1981), welche generell den menschlichen Klimaeinwirkungen gewidmet war, blieb Forschungsbereich (3) bis heute in der Schweiz unbeachtet. Der Grund liegt darin, dass erstens die Städte relativ klein sind und sich zweitens die Stadteffekte kaum losgelöst von den markanten Reliefeinflüssen studieren lassen.

Methodische Schwerpunkte

Tab. 2 gibt einen vorläufigen Überblick über die bei Schweizer Stadtklimastudien angewendeten Methoden. Angesichts des aufgrund des kleinen Landes geringen Forschungspotentials darf es als erfreulich bezeichnet werden, dass trotzdem eine für die gegebenen Fragestellungen günstige Diversifikation der Methoden beobachtet werden kann. So wird u. a. auch versucht, ein günstiges Gleichgewicht zwischen Feldbeobachtungen und Modellstudien zu erhalten. Bei Feldexperimenten wird in der Regel angestrebt, integrale Messsysteme einzusetzen: Feste und mobile Bodenstationen, Zeitraffer-Kamerasysteme, Sondieranlagen, Messtürme, Flugzeuge, Satellitendaten (Rickli und Wanner, 1983). Im Modellbereich sind verschiedene Forschergruppen tätig, die sich methodisch recht gut ergänzen (Hertig et al., 1978; Haschke et al., 1980).

Geographische Schwerpunkte

Wie bereits erwähnt wurde, verfügen neben den grossen Zentren auch zahlreiche Kleinstädte der Schweiz über lufthygienische Untersuchungen. Meteorologische Studien, welche grosse Teile von Städten oder sogar die ganze Stadt betreffen, wurden bisher in den fünf Städten Basel, Bern, Biel, Fribourg und Zürich durchgeführt. Die erste breit angeleg-

Tab. 2. Methodische Schwerpunkte von Schweizer Stadtklimastudien.

Methode	Anwendung in
1. **Feldbeobachtungen**	
1.1. Meteorologische Feldexperimente	Basel, Bern, Biel, Fribourg, Zürich
1.2. Lufthygienische Messnetze oder Messkampagnen	In zahlreichen Schweizer Städten
2. **Modellstudien**	
2.1. Empirische Modelle (z. B. digitale Geländeraster)	Basel, Bern, Biel, Fribourg
2.2. Empirisch-statistische Ausbreitungsmodelle für Flächenquellen (z. B. Gauss-Typ)	Biel, Zürich
2.3. Numerische Modelle	Basel, Zürich
2.4. Physikalische oder Hardware-Modelle	Basel, Biel, Fribourg

te Stadtklimastudie war unseres Wissens die in den Jahren 1972-1980 in Bern durchgeführte KLIMUS-Untersuchung (Mathys et al., 1980). Ein Blick auf die räumliche Verteilung zeigt, dass sich die bisherigen Arbeiten auf das höhere und tiefere Mittelland sowie die Juranordseite konzentrieren. Bei der Planung künftiger Aktivitäten müsste somit ein grösseres Gewicht auf die Westschweiz, auf inneralpine Talregionen sowie auf die Alpensüdseite gelegt werden.
Die aktuelle lufthygienische Situation in den Stadtzentren, aber auch der alarmierende Zustand in den Schweizer Wäldern lassen es als denkbar und wünschbar erscheinen, dass in den kommenden Jahren in weiteren Städten der Schweiz interdisziplinäre Forschungsprojekte in Angriff genommen werden.

Einige Ergebnisse schweizerischer Stadtklimastudien

Energiebilanz und Temperaturfeld schweizerischer Städte

Aus Platzgründen kann hier nur auf einige wenige Resultate schweizerischer Stadtklimastudien eingegangen werden. Wie erwähnt, konzentrierten sich diese Arbeiten auf die Wirkungskette Energiebilanz–Temperaturfeld–Stromfeld. Leider beschränkten sich die bisherigen Energiebilanzmessungen auf einige wenige Punkte, an denen vor allem die Strahlungsbilanzanteile bestimmt wurden. Am besten dokumentiert dürfte zur Zeit die Stadt Basel sein. Ein Blick auf die vergleichsweise tiefen Bevölkerungszahlen sowie auf die relativ kleinen Baukubaturen schweizerischer Städte zeigt, dass auch die entsprechenden energiebilanzmässigen Unterschiede zwischen Stadt und Umland relativ gering sein dürften.
Tab. 3 gibt einen Überblick über maximale Temperaturdifferenzen zwischen Stadtzentrum und Umland schweizerischer Städte. In der Literatur wird sehr oft der Fehler gemacht, dass die Messgrundlagen nicht definiert werden. Im vorliegenden Fall wurden einerseits mehrere Stationen gemittelt oder Daten von Messfahrten benützt (Lufttemperatur, 2 m) und andererseits nur Radiometerdaten verwendet, deren Werte auf eine Fläche von mindestens 0,25 km^2 umgerechnet worden waren. Die Abweichungen der Lufttemperaratur zeigen, dass sich die Differenzen in dem Rahmen bewegen, wie er von Oke (1976) aufgrund empirischer Formeln für europäische und amerikanische Städte festgelegt wurde.
Abb. 2 gibt anhand von vier Beispielen einen Eindruck vom energetisch induzierten thermalen Regime dreier schweizerischer Städte. Dargestellt wurden nicht nur die Tagesgänge der Wärmeinselintensität, sondern auch die Kurven der stündlichen Abkühlungs- oder Aufheizgrössen ausgewählter Stadt- und Umlandstandorte. Ganz grob lassen sich die folgenden Tatsachen herauslesen:

A) Temperaturunterschiede: Diese Beträge halten sich in den in Tab. 3 angegebenen Schranken. Abweichungen in der Grössenordnung 10° oder mehr können nicht erwartet werden.

B) Jahresgang: Abb. 2a zeigt, dass hohe Differenzbeträge vor allem im Sommer auftreten, wenn die Energieumsätze entsprechend grösser sind.

C) Tagesgang: Das Wärmeinselmaximum tritt sehr oft am Abend (18–24 Uhr) und eher

Tab. 3. Einwohnerzahl (ohne Agglomerationen), Meereshöhe und mittlere maximale Stadt-Umland-Temperaturdifferenzen von fünf Schweizer Städten.

Stadt	Einwohnerzahl	Meereshöhe	$\Delta \bar{T}_{u-r}$, °C (Max., Luft, 2m)	$\Delta \bar{T}_{u-r}$, °C (Max., Boden)
Basel	180 000	270	5–6	10–12
Bern	140 000	540	5–6	10–13
Biel	57 000	440	4–5	—
Fribourg	38 000	620	3–5	—
Zürich	375 000	420	5–7	—

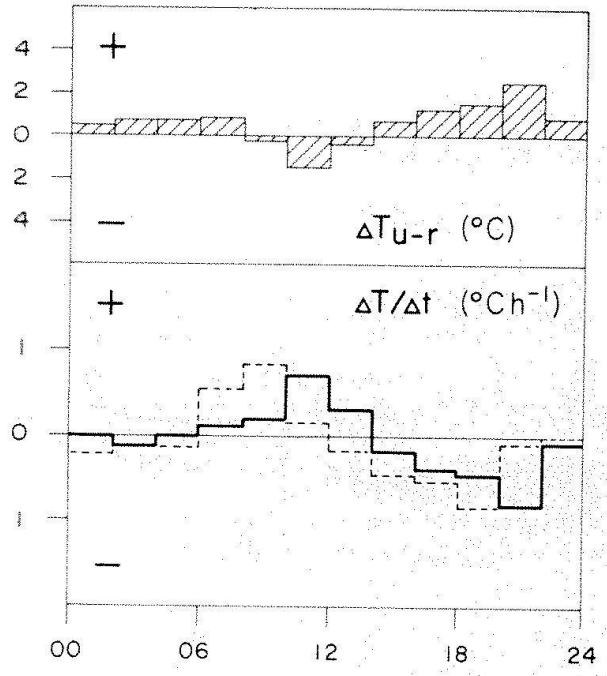

Abb. 2a)

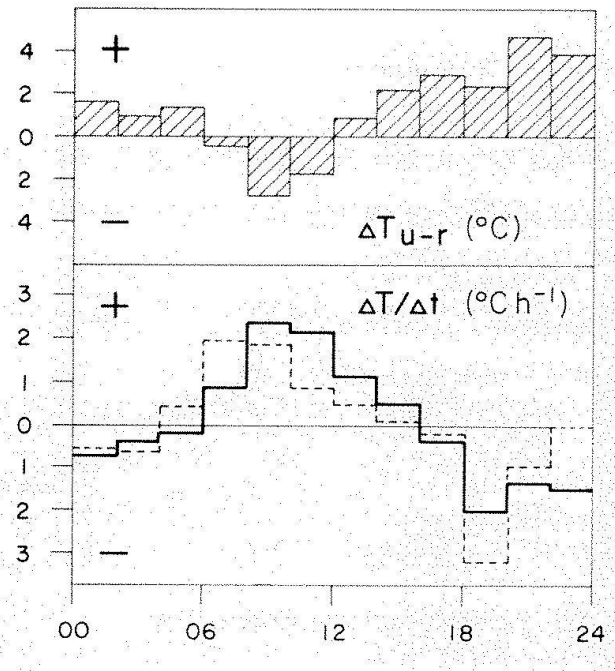

Abb. 2b)

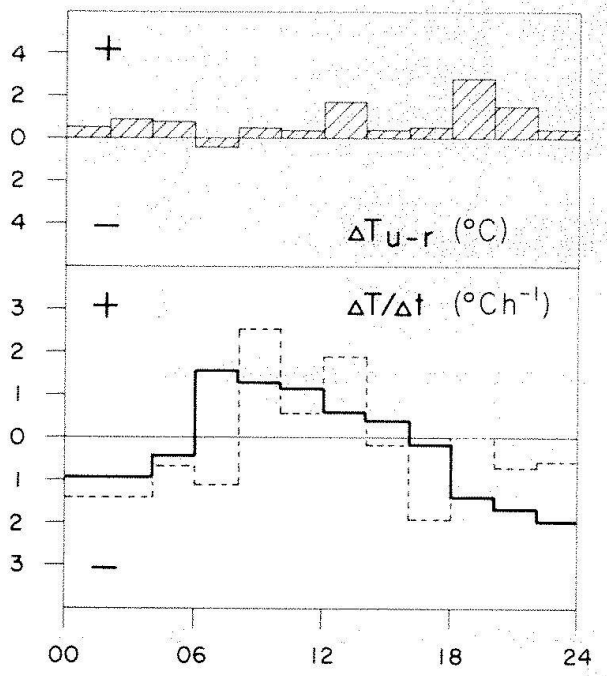

Abb. 2c)

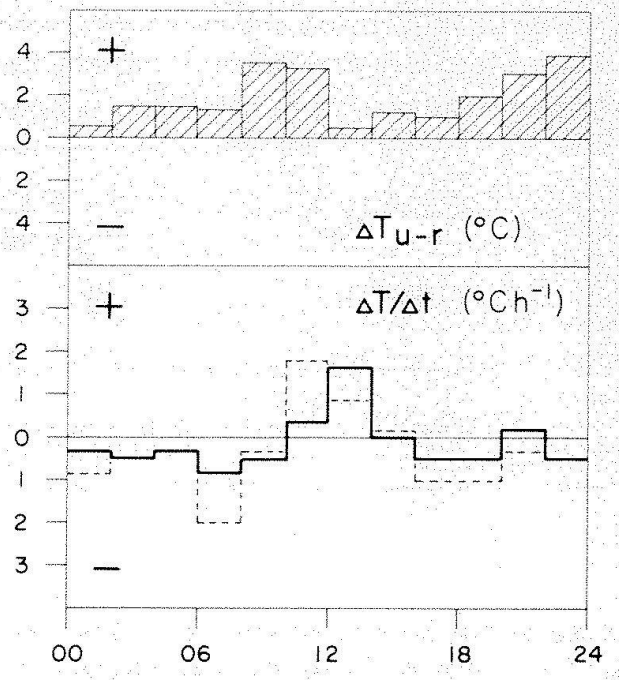

Abb. 2d)

Abb. 2. Stadt-Umland-Temperaturdifferenzen (Luft, 2 m; obere Hälfte der Figuren) sowie Abkühlungs- oder Aufheizraten (untere Hälfte der Figuren) von Stadtstationen (durchgezogene Linien) und Umlandstationen (gestrichelte Linien), dargestellt anhand einer Auswahl von vier typischen Beispielen:

Abb. 2 a) Stadt Bern, sommerliche Hochdrucklage (17. 8. 1973), Landstation talabwärts;

Abb. 2 b) Stadt Bern, winterliche Bisenlage mit Hochnebel (22. 2. 1974), Landstation talaufwärts;

Abb. 2 c) Stadt Fribourg, sommerliche Hochdrucklage (8. 7. 1982), Landstation talabwärts;

Abb. 2 d) Stadt Biel, winterliche Hochdrucklage (8. 1. 1981), Landstation in der Ebene östlich der Stadt.

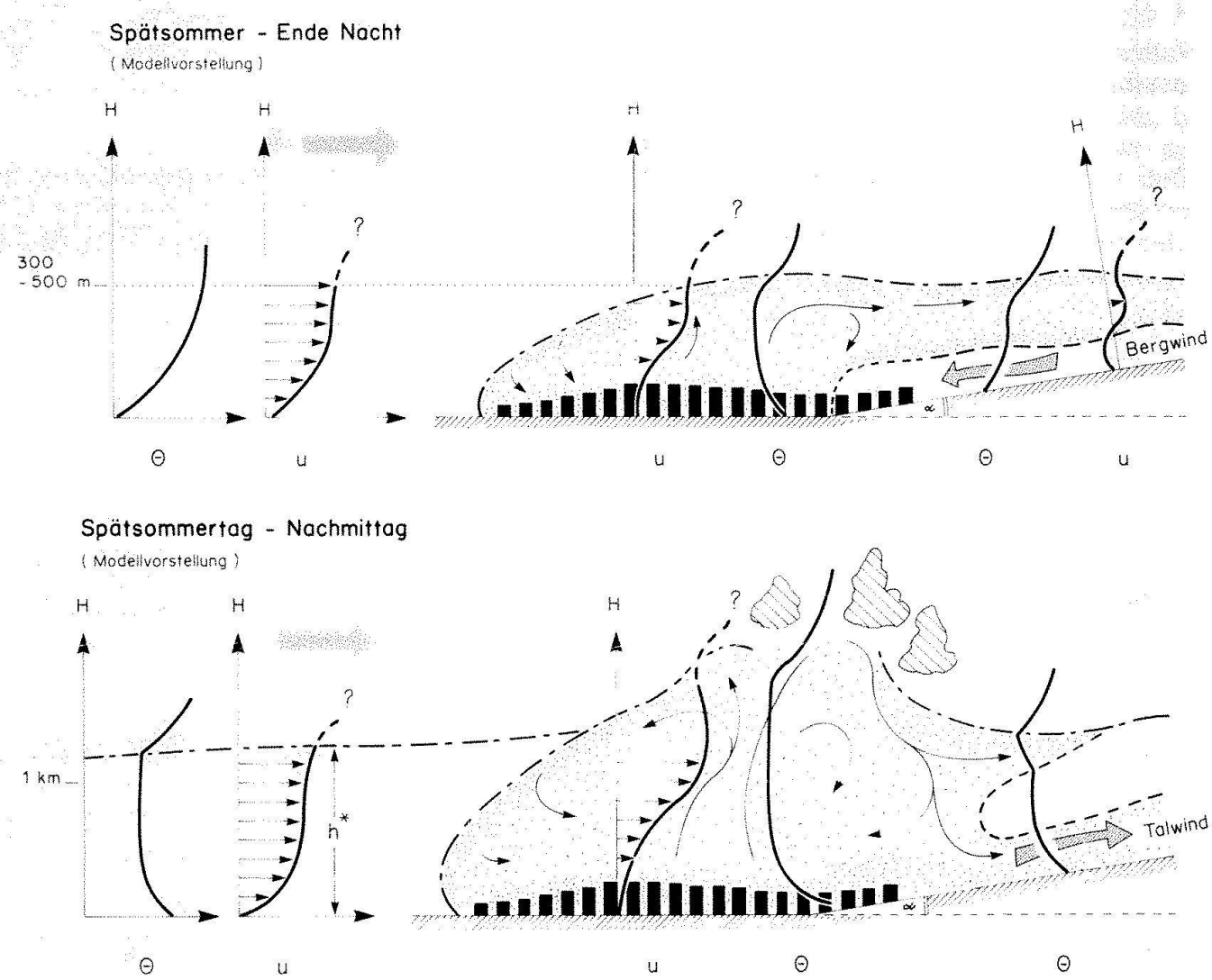

Abb. 3 Hypothetische Modellvorstellung zur Strömungs- und Schichtungsstruktur über Schweizer Städten:

Abb. 3 a) Situation am Ende einer Spätsommernacht;

Abb. 3 b) Situation während eines Spätsommernachmittags.

selten vor Sonnenaufgang auf. Die Abkühlungs- und Aufheizraten deuten darauf hin, dass die relativ kleinen Städte ihren gespeicherten Energieüberschuss bereits in der ersten Nachthälfte an die bodennahen Luftschichten abgeben und ab ca. 20 Uhr im Vergleich zum benachbarten Umland gleiche oder höhere Abkühlungsraten ($°C \cdot h^{-1}$) aufweisen als das Umland. Im Winter könnte eventuell auch die anthropogene Wärmeproduktion eine Rolle spielen (siehe Stadt Biel; Abb. 2d). Auf den Abb. 2a-c ist zudem der Effekt der «negative heat island» zu beobachten, welcher je nach Jahreszeit (Sonnenaufgang) um ca. 7–12 Uhr auftreten kann.

D) Regionalwindeinfluss: Tagesgänge der Wärmeinselintensität können beim komplexen schweizerischen Relief nicht interpretiert werden, ohne den Einfluss der tagesperiodisch auftretenden, thermodynamisch induzierten Regionalwindsysteme zu beachten. Da diese Strömungssysteme das dreidimensionale Temperaturfeld ganz erheblich deformieren (Abb. 3), müssen vor allem die Standorte der Landstationen beachtet werden. Beim Studium des Windfeldes kann

nämlich festgestellt werden, dass die Wärmeinselintensität sehr oft dann ansteigt, wenn das «thermal forcing» der mesoskaligen Strömungssysteme besonders schwach ist (zur Zeit der Windwechsel Tag-Nacht und Nacht-Tag).

E) Einfluss der synoptischen Situation: Das genaue Studium der Kopplung zwischen Temperatur- und Windfeld zeigt, dass synoptische Einflüsse auch bei relativ tiefen Windgeschwindigkeiten auftreten können (v. a. Deformation der stadtinduzierten thermischen Struktur und der damit verbundenen «Dunstfahne»; vgl. Abb. 3). Von grosser Bedeutung sind erwartungsgemäss auch Veränderungen des Strahlungshaushaltes in Form von Bewölkung oder Nebel, welche die Stadt-Umland-Unterschiede ganz erheblich dämpfen können (Abb. 2b).

Grundsätzliche Überlegungen zum Temperatur- und Strömungsfeld schweizerischer Städte

Abb. 3 stellt den Versuch dar, die bisherigen Resultate der Feldexperimente (v. a. Sondierungen und Messfahrten) verschiedener Schweizer Städte schematisch zusammenzufassen. Dargestellt werden in erster Linie hypothetische Felder der Temperatur und der Strömung. Ganz grob lassen sich die folgenden Strukturen erkennen:

1) Die sehr oft auch optisch sichtbare, fahnenförmige Struktur des Temperatur- und Stromfeldes lässt sich auch bei den von uns untersuchten Städten ausmachen (Abegglen, 1982). Beschränkt sich die Wärmeinsel in der Regel auf eine bodennahe Schicht von einigen 10 m bis vielleicht 200 m, so dürfte die auf Abb. 3 dargestellte, strichpunktierte Mischungsschichtobergrenze im Sommer am Tag ca. 1300-1500 m und in der Nacht ca. 300-500 m über der städtischen Bodenoberfläche liegen.

2) Abgesehen von der dargestellten Modifikation des vertikalen Verlaufs von potentieller Temperatur (Θ) und Horizontalwindgeschwindigkeit (u) lässt sich auch über Schweizer Städten ein äusserst komplexes Konvektionszellenmuster ausmachen, welches wohl eine universell gültige Form der stadterzeugten, thermischen Schichtungsinstabilität darstellt (siehe gekrümmte Pfeile innerhalb der dargestellten Stadtatmosphäre). Die komplizierte Kopplung zwischen dem synoptisch induzierten Stromfeld und den thermisch und mechanisch induzierten Strömungsmustern über der Stadt führt schliesslich zu einem Verteilungsmuster der Luftfremdstoffe, wie es in Abb. 3 durch kleine Punkte angedeutet wird. Dabei muss betont werden, dass diese Modellvorstellung nur ein mittleres Bild vermittelt, das nicht auf die sehr unterschiedlich ablaufenden Mechanismen des Transportes, der turbulenten Diffusion und der dabei ablaufenden Stoffveränderungen eingehen kann. Dreidimensionale Messungen verschiedener Luftfremdstoffe lassen aber doch den Schluss zu, dass sich hohe Konzentrationen vor allem innerhalb der austauschschwachen UCL (speziell im Konvergenzbereich bodennaher Strömungen) sowie an der Mischungsschichtobergrenze finden lassen (Wanner et al., 1982).

3) Gelten die in (2) und (3) gemachten Aussagen vor allem für ebene Gebiete, so werden die gezeigten Strukturen im komplexen schweizerischen Relief ganz erheblich modifiziert: Thermisch induzierte Hang- oder Berg- und Talwindsysteme, dargestellt am rechten Rand der Abb. 3a und b, können die Temperatur- und Stromfelder im Stadtbereich ganz erheblich modifizieren. Führt eine extrem stabile Schichtung während der Nacht in Ebenen und Mulden zu fast völliger Stagnation, so treten im Hanggebiet während Strahlungsnächten gravitativ induzierte und in der Regel pulsierende Dichteströme auf, deren Geschwindigkeit 10 m über Boden sehr wohl 2-4 $m \cdot sec^{-1}$ erreicht (Abb. 3a). Da praktisch jede Stadt im Einflussbereich derartiger Berg- oder Hangabwinde liegt, werden sehr oft ganze Stadtteile oder sogar die ganze Stadt von dieser Strömung bestrichen. Am Tag (Abb. 3b), wenn die Schichtung über der Stadt ohnehin labiler ist, werden im Hangbereich kräftige Tal- oder Hangaufwinde spürbar, welche wie die Bergwinde oft auch als grossräumigere Systeme die ganze Stadt überströmen können. Es gehört dehalb zu den vordringlichen Aufgaben der Schweizer Stadtklimatologie, den Einfluss derartiger Regionalwindsysteme auf die Struktur des städtischen Temperatur- und Stromfeldes, vor allem aber auf den Transport von Luftfremdstoffen abzuschätzen. Es ist eine

bekannte Tatsache, dass die stadtgemachte Luftverschmutzung in schweizerischen Talgebieten während Wetterlagen mit relativ geringer Konvektion über beträchtliche Distanzen ins Umland transportiert werden kann (Fuhrer, 1980). Stellt man sich am Schluss die Frage, wann denn im Bereich der Schweizer Städte besonders belastende Wettersituationen mit hoher Schichtungsstabilität und schwachen Horizontalwinden auftreten, so ist die Anwort nicht einfach zu finden. Dürften es in Ebenen vor allem gradientschwache Wetterlagen mit schwachen Horizontalwinden sein, so muss im komplexen Relief vor allem jenen Situationen Beachtung geschenkt werden, bei denen das «thermal forcing» infolge Nebel oder Bewölkung sehr gering ausfällt. Tagesgangmässig muss das Augenmerk in Hanggebieten in erster Linie auf die Zeit des strahlungs- und temperaturbedingten Wechsels der Strömungssysteme kurz nach Sonnenauf- und -untergang gelegt werden, da diese in der Regel auch mit den Verkehrsspitzen zusammenfallen.

Überlegungen zu zukünftigen Schweizer Stadtklimastudien

Im Sinne von Schlussfolgerungen seien fünf Grundsätze zur Durchführung zukünftiger Stadtklimauntersuchungen in der Schweiz dargelegt:

1) Es sind grosse Anstrengungen zu unternehmen, um die einzelnen Energiebilanzkomponenten in Raum und Zeit besser definieren zu können. Punktuelle Messungen an Einzelstandorten können über digitale Geländeparameter in den Raum umgesetzt werden.

2) Das sensible Zusammenspiel zwischen den synoptischen Systemen, den stadtinduzierten meteorologischen Effekten und Regional- oder Lokalzirkulationen ist in Feldexperimenten und Modellen speziell zu studieren.

3) Dem Faktor «atmosphärische Chemie» (Stoffveränderungen!) und dessen Wirkungen ist nicht zuletzt im Lichte der stark ansteigenden Waldschäden grosses Gewicht beizumessen.

4) Stadtklimauntersuchungen sind durch gezielte Untersuchungen der Folgewirkungen von Meteorologie und Lufthygiene zu ergänzen. Abgesehen von Waldschäden muss dabei der Mensch eine zentrale Rolle spielen.

5) Ohne die Umsetzung stadtklimatologischer Erkenntnisse in planerische und politische Entscheidungsprozesse nützt der wissenschaftliche und materielle Aufwand wenig: In jedes Projekt müssen betroffene Raumplaner und Politiker integriert werden, welche die Resultate fristgerecht in den Vollzug umsetzen können.

Literatur

Abegglen, R., 1982: Die städtische Wärmeinsel: Eine Literaturstudie und Städtetypisierung mit einem Beitrag zur Wärmeinsel von Bern. Dipl.-arbeit Univ. Bern, 1982, 165 S.

Brunt, D., 1941: Physical and dynamical meteorology. Cambridge Univ. Press, London.

Bundesamt für Umweltschutz, 1982: Luftbelastung 1981, Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Schriftenreihe Umweltschutz, Nr. 6, 25 S.

Changnon, S. A. Jr., Semonin, R. G., Auer, A. H., Brahem, R. R. Jr. und Hales, J. M., 1981: METROMEX: A review and summary. Meteor. Monogr., 18, Nr. 40, 1981, 181 S.

Enders, G., 1980: Die Siedlung als klimatisch differenzierter Lebensraum. Berichte der ANL, Nr. 4, 1980, 104-110.

Fuhrer, J., 1980: Der Ozongehalt der bodennahen Luftschicht in der Region Bern. Wasser, Energie, Luft, Nr. 5/6, 1980, 167-171.

Haschke, D., Gassmann, F., Jacobs, C. A. und Pandolfo, J. P., 1980: Computer simulation of mesoscale meteorological effects of waste heat disposal through cooling towers. Paper pres. at EPRI Workshop, San Francisco, Sept. 1980, 34 S.

Hertig, J.-A., Choulat, C., Giovannoni, J.-M., Keller, J.-C. und Liska, P., 1978: Simulation aéraulique des effets des activités humaines sur les écoulements de la région du Haut Rhin/Rhin supérieur. IENER, Techn. Ber. Nr. N 501.100, 1978, 158 S.

Hjelmfelt, M., 1982: Numerical simulation on the effects of St. Louis on mesoscale boundary-layer airflow and vertical air motion: simulation of urban vs non-urban effects. J. Clim. Appl. Meteor., 21, 1982, 1239-1257.

Kalanda, B. D., Oke, T. R. und Spittlehouse, D. L., 1980: Suburban energy balance estimates for Vancouver, B. C., using the Bowen ratio-energy balance approach. J. Appl. Meteor., 19, 1980, 791-802.

Landsberg, H. E., 1981: The urban climate. Academic Press, New York.

Lowry, W. P., 1977: Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. J. Appl. Meteorol., 16, 1977, 129-135.

Lyons, T. J., 1983: Comments on «canyon geometry and the nocturnal heat island: comparisons of scale model and field observations». J. of Climatol., Vol. 3, 1983, 95-97.

Mathys, H., Messerli, B., Maurer, R., Wanner, H. und Winiger, M., 1980: Klima und Lufthygiene im Raum Bern. Veröffentl. d. Geogr. Kommission SNG, Nr. 7, 1980, 40 S.

Möller, F., 1973: Einführung in die Meteorologie, Bände 1 + 2. BI-Hochschulbücher, Bibliographisches Institut, Mannheim.

Nübler, W., 1979: Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg. Freiburger Geogr. Hefte 16, 1979, 113 S.

Oke, T. R., 1976: The distinction between canopy and boundary-layer heat island. Atmosphere, Vol. 14, Nr. 4, 1976, 268-277.

Oke, T. R., 1978: Boundary layer climates. Methuen, London.

Oke, T. R., 1979: Review of urban climatology 1973-1976. WMO Tech. Note No. 169, World Meteor. Organiz., Genf.

Oke, T. R., 1981: Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. J. of. Climatol., Vol. 1, 1981, 237-254.

Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 188, 1982, 1-24.

Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, 1983: Waldschaden und Luftverunreinigungen. W. Kohlhammer, Stuttgart.

Regionale Planungsgemeinschaft Untermain 1977: Lufthygienisch-meteorologische Modelluntersuchung in der Region Untermain - Abschlussbericht. RPU, Frankfurt am Main.

Reiter, E. R., Burns, C. C., Cochrane, H., Johnson, G. R., Leong, H. und Sheaffer, J.D., 1981: The effects of atmospheric variability on energy ultilization and conservation. CSU Env. Res. Papers 31, 1981, 59 S.

Rickli, R. und Wanner, H., 1983: Feldexperimente im Raum Biel - Datenkatalog. Inform. u. Beitr. z. Klimaforschung, Nr. 19, 1983, 146 S.

Roten, M., Ruffieux, D. und Fallot, J.-M., 1982: Le climat de Fribourg et les variations spatiales de la qualité de l'air urbain. Rapp. destiné au Fonds National, Univ. de Fribourg, 1982, 39 S.

Schlatter, B., 1975: Zum Stadtklima von Zürich. Dipl.arbeit Univ. Zürich, 1975, 113 S.

Seinfeld, J. H., 1975: Air pollution, physical and chemical fundamentals. Mc Graw-Hill, New York.

Wanner, H., 1983: Das Projekt «Durchlüftungskarte der Schweiz» - Methodik und erste Ergebnisse. Inform. u. Beitr. z. Klimaforschung, Nr. 18, 1983, 66 S.

Wanner, H., Berlincourt, P. und Rickli, R., 1982: Klima und Lufthygiene der Region Biel - Gedanken und erste Resultate aus einer interdisziplinären Studie. Geogr. Helvetica. 37. Jg., Heft 4, 1982, 215-224.

Weischet, W. 1980: Stadtklimatologie und Stadtplanung. Klima und Planung 79. Veröffentl. der Geogr. Komm. d. Sz. Naturf. Ges., 6, 1980, 73-95.

Winiger, M., Volz, R. und Witmer, U., 1978: Meteorologische Datenbeschaffung mittels Fernerkundungsmethoden. Beitr. z. 2. Zwischenber. der Studie CLIMOD, 1978, 35 S.

Dr. Heinz Wanner
Geographisches Institut
Angewandte Klimatologie
Hallerstrasse 12
CH-3012 Bern