

Zeitschrift: Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft Bern
Herausgeber: Geographische Gesellschaft Bern
Band: 55 (1983)

Artikel: Die Grundstrukturen der städtischen Klimamodifikation und deren Bedeutung für die Raumplanung
Autor: Wanner, Heinz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-960258>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.05.2025

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

Die Grundstrukturen der städtischen Klimamodifikation und deren Bedeutung für die Raumplanung

HEINZ WANNER*

1. Einleitung und Zielsetzung

Trotz der im letzten Jahrzehnt beobachteten Abwanderung der Bevölkerung aus den zentralen Bereichen vieler grosser Städte, wird in Kürze die Hälfte der Erdbevölkerung in Städten oder städtischen Agglomerationen wohnen. Die sehr oft mit «Verstädterung» oder «Versiegelung» bezeichneten Veränderungen der Bodenoberfläche führen in diesen Ballungsgebieten zu einer markanten Modifikation der Grundstrukturen und Prozesse vor allem innerhalb der bodennahen Luftschicht (in der Folge als Planetare Grenzschicht oder PBL bezeichnet). Der Begriff der städtischen Klimamodifikation schliesst in der Regel alle meteorologischen (prozessbezogenen), klimatologischen (zustands- und strukturbezogenen) und lufthygienischen Veränderungen dieser im Mittel etwa 1000 m mächtigen Luftschicht mit ein, wobei zunächst nicht zur Diskussion stehen soll, ob diese Veränderungen nun als positiv oder negativ zu bewerten sind.

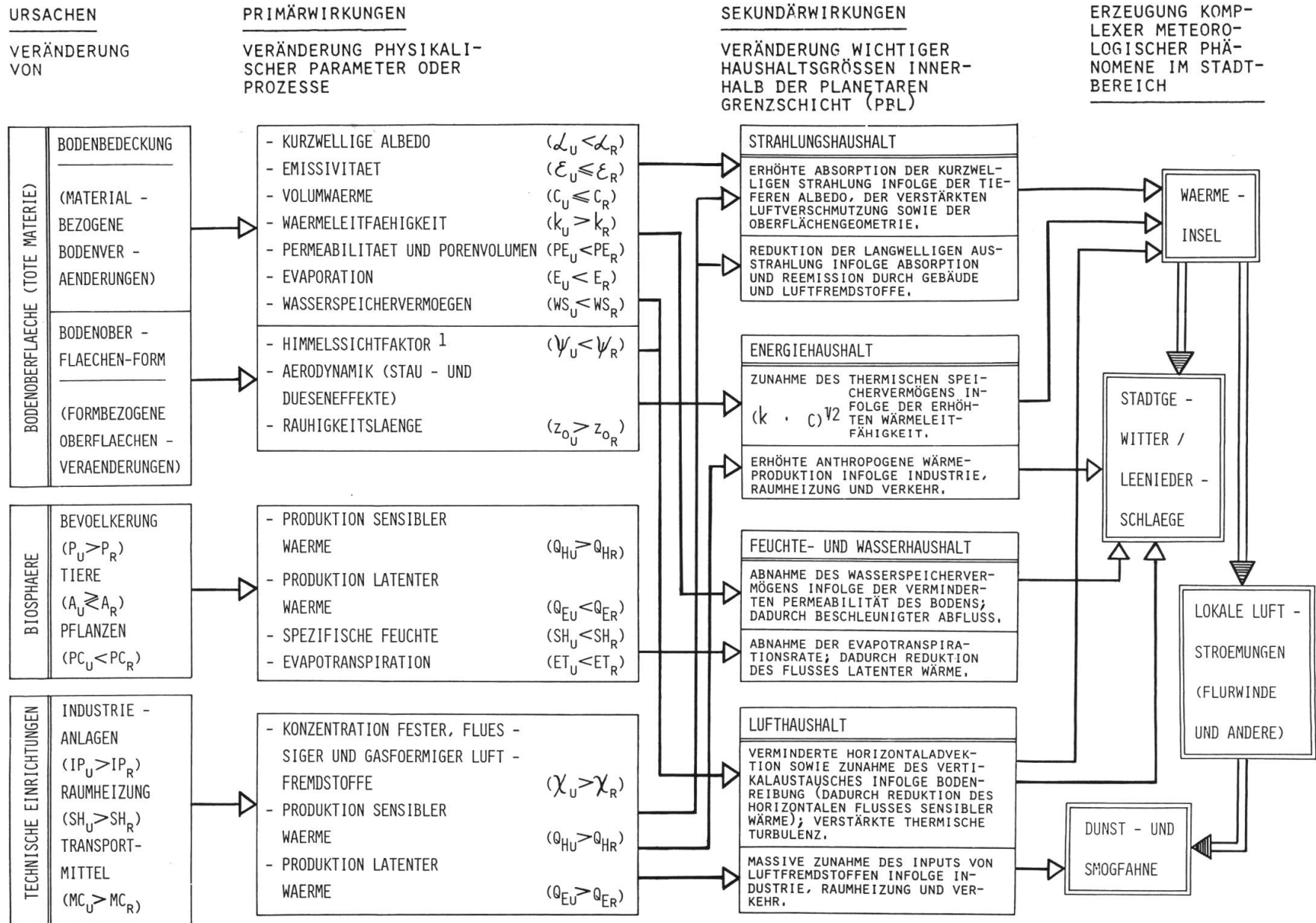
Der vorliegende Aufsatz möchte im ersten Teil einen Überblick über die wichtigsten, stadtbedingten Veränderungen der PBL geben sowie nach deren Bedeutung für die Raumplanung fragen. Nach einer kurzen Beschreibung der vertikalen und horizontalen Struktur der städtischen PBL soll anhand von Beispielen auf die Eigenschaften schweizerischer Städte sowie deren Wirkung auf die Zustandsgrössen und Prozesse innerhalb der unteren Troposphäre eingegangen werden. Im letzten Teil der Arbeit sollen die Massnahmen besprochen werden, welche sich zur Zeit in mitteleuropäischen Städten aus raumplanerischer Sicht anbieten (SCHIRMER, 1984).

2. Die stadtbedingten Klimamodifikationen und deren Bedeutung für die Raumplanung

2.1 Darstellung der städtischen Klimamodifikation in einem heuristischen Wirkungsgefüge

Am Anfang steht die Frage nach den Ursachen der städtischen Klimamodifikation. In Figur 1 werden die wichtigsten Ursachen-Wirkungs-Beziehungen dargestellt (heuristisches Wirkungsgefüge). Im *Ursachenbereich* lassen sich drei typische Gruppen von Veränderungen abgrenzen:

* PD Dr. Heinz WANNER, Geographisches Institut der Universität Bern, Hallerstrasse 12, 3012 Bern



Figur 1: Heuristisches Wirkungsgefüge zur Entstehung der städtischen Klimamodifikation

¹Himmelssichtfaktor Ψ = Fläche des sichtbaren / Fläche des potentiell sichtbaren Himmels (bei astronomischem Horizont)

1. Veränderung der Oberflächenbedeckung («Versiegelung») und der Oberflächenform (Erhöhung der Rauigkeit);
2. Veränderung der Art und der Anzahl an Individuen aus dem Bereich der Biosphäre (Mensch, Fauna, Flora);
3. Zunahme der Zahl und der Grösse technischer Einrichtungen im weitesten Sinn.

Aus diesen Ursachen kann eine grössere Zahl von *Primärwirkungen* in Form der Veränderung wichtiger physikalischer Zustandsgrössen oder Prozesse abgeleitet werden. All diese Modifikationen tragen mehr oder weniger zur Entstehung von *Sekundärwirkungen* bei, welche sich in der Veränderung der vier fundamentalen atmosphärischen Haushaltsgrössen (Strahlungshaushalt, Energiehaushalt, Feuchte-/Wasserhaushalt und Lufthaushalt) ausdrücken lassen. Dabei dürfte die Modifikation der Strahlungsverhältnisse und deren Kopplung mit dem Lufthaushalt (u.a. Absorption der kurzwelligen Strahlung an Aerosolteilchen und damit verbundene Erwärmung der oberen PBL) eine immer grössere Bedeutung erlangen (GASSMANN et al., 1984). HÄNEL et al. (1985) messen in Frankfurt wasserdampf- und partikelbedingte, tägliche Aufheizraten von bis zu 2.7 K (mit partikelbedingten Anteilen von über 2 K!).

Von besonderem Interesse sind schliesslich jene *komplexen Phänomene* oder «Stadteffekte», welche sich aus der gegenseitigen Wechselwirkung aller Haushaltsveränderungen ergeben (Kolonne ganz rechts in Figur 1): Im Vordergrund steht die städtische Wärmeinsel (hier zunächst verstanden als oberflächennahes Phänomen der «canopy layer» oder der Gebäudehülle), deren Entstehung je nach Stadtstruktur, Tages- und Jahreszeit auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden kann. Im Vordergrund stehen (OKE, 1982):

- die erhöhte Wärmeleitfähigkeit;
- die veränderte Oberflächengeometrie;
- die Zunahme atmosphärischer Luftfremdstoffe;
- das verminderte Feuchteangebot (dadurch höherer Anteil an fühlbarer oder sensibler Wärme);
- die erhöhte anthropogene Wärmeproduktion sowie
- die veränderten aerodynamischen Eigenschaften der Stadtoberfläche (v.a. Windabbremsung in Bodennähe).

Diese städtische Wärmeinsel wirkt nun sozusagen als Auslöser weiterer Stadteffekte, welche unter den Begriffen Leeniederschläge, Strömungskonvergenz und Dunstfahne Eingang in die Literatur gefunden haben. Abgesehen von der wichtigen Tatsache, dass die stadtklimatologischen Strukturen gewaltigen raumzeitlichen Veränderungen unterworfen sind, könnte die Stadtatmosphäre in grober Vereinfachung als «trocken- rauhe und überwärmte Dunstfahne» bezeichnet werden.

2.2 Generelle Bedeutung der erwähnten, stadtbedingten Klimamodifikationen für die Stadt- und Raumplanung

Aus den Erkenntnissen des vorangehenden Kapitels 2.1 sowie nach WEISCHET (1980) lassen sich vier allgemeine Bestimmungsgrössen des Stadtklimas unterscheiden, welchen im Rahmen der Stadtplanung eine Schlüsselfunktion zukommt (vgl. auch Tabelle 1):

1. Die thermische Struktur:
Beeinflussung
 - des Energieverbrauchs für Heizung und Kühlung;
 - des menschlichen Wohlbefindens (Kälte- und Hitzestress);
 - der Schneeschmelze 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.
3. Das Strömungsfeld:
 - Beeinflussung der Durchlüftung und Lufterneuerung (Strömungskonvergenz und -divergenz);
 - Erzeugung von Düseneffekten (z.B. in Strassenschluchten).
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, Backstein, Metallen usw.).

Sehr schwierig ist es nun, wenn diese vier Schlüsselgrössen gemäss ihrer Bedeutung und ihrem Nutzwert für die raumplanerische Anwendung gewichtet werden sollen. Bezogen auf die Situation der mitteleuropäischen Stadt lässt sich etwa die folgende Prioritätenordnung aufstellen:

1. Die geringste Bedeutung kann dem *hygrischen Wirkungsbereich* beigemessen werden, da er in unseren Breiten relativ selten zur eigentlichen Schlüsselgrösse wird. Allerdings muss beigefügt werden, dass die Luftfeuchtigkeit als wichtige Inputgrösse in die Formeln zur Berechnung des thermischen Wirkungskomplexes des Menschen eingeht, welcher sehr oft auf der Basis von Wärmebilanzmodellen abgeschätzt wird (z.B. «Klima-Michel-Modell»; JENDRITZKY et al., 1979). Vor allem an Hitzetagen kann die Tatsache eine Rolle spielen, dass nur wenig Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht. Die der Bodenoberfläche zugekommene Energie muss dann vor allem in Form von sensibler Wärme an die Atmosphäre zurückgegeben werden (Bowenverhältnis > 1), d.h. der Stadtkörper überwärmt sich zum Teil beträchtlich.
Auch die Frage der stadtbedingten Niederschlagsmodifikationen muss im Auge behalten werden, obschon entsprechende Ereignisse in zentraleuropäischen Städten eher schwach belegt sind (KRATZER, 1956; DETTWILLER, 1970; BAUMGARTNER et al., 1984).
2. Eine höhere Priorität kommt dem bereits erwähnten, *thermischen Wirkungsbereich oder Wirkungskomplex* zu (JENDRITZKY, 1983). Er bestimmt ganz massgeblich die Wärmebilanz des Menschen und ist so mitverantwortlich für Wärmebelastung und

Kältestress. Sind grössere Wärmebelastungen von zirka Mitte Juni bis Mitte August denkbar, so tritt der Kältestress vor allem in den drei Wintermonaten Dezember bis Februar auf.

Nicht ausser acht zu lassen sind auch die positiven Effekte der Stadtüberwärmung wie etwa die angenehme Temperierung der Stadtareale in den Übergangsjahreszeiten und der damit verbundene, reduzierte Energieverbrauch.

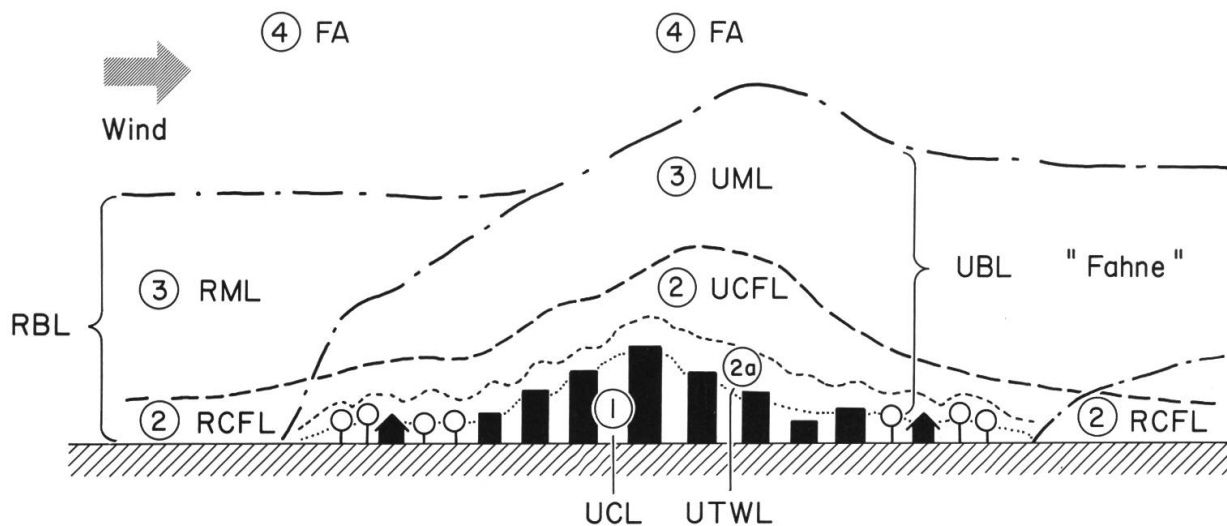
3. Aus verschiedenen Gründen muss dem *Wirkungsbereich Strömungsfeld/Lufthaushalt* in der mitteleuropäischen Stadt die höchste Priorität eingeräumt werden (LANDSBERG, 1981: 259): Zum ersten ist er über die ganze Zeitachse wirksam vorhanden. Zum zweiten sind die Luftfremdstoffemissionen und damit auch die Immissionen in den letzten Jahren so stark angestiegen, dass die schädlichen Wirkungen am Menschen (z.B. Atemwegserkrankungen), an der gesamten Biosphäre (z.B. Waldsterben) und an der toten Materie (z.B. Korrosion und Zerfall von Sandstein) ein alarmierendes Stadium erreicht haben. Die Städte liefern als Flächenquellen den Hauptanteil dieser Luftverschmutzung. Beunruhigend sind besonders die Anzeichen, dass möglicherweise bereits in kleinen Städten eine Wirkung auf die menschliche Gesundheit fühlbar wird (MARTY et al., 1985).

Die soeben gemachten Aussagen geben Anlass dazu, dass der Bereich Stromfeld-Temperaturschichtung-Lufthaushalt in den Mittelpunkt dieser Betrachtungen zur raumplanerischen Bedeutung des Stadtklimas gestellt werden soll.

3. Die Struktur der bodennahen Stadtatmosphäre

Aus raumplanerischer Sicht dürfte es sinnvoll sein, zunächst einmal die räumliche Struktur der Stadtatmosphäre zu beschreiben. Figur 2 versucht dies in dem Sinne, dass die Veränderungen der Planetaren Grenzschicht (Boundary Layer: BL) beim Überströmen eines Stadtkörpers schematisch dargestellt werden. In Form einer ausgedehnten Legende werden dabei die wichtigsten Teilschichten innerhalb dieser Grenzschicht physikalisch charakterisiert.

Die Annahme lautet, dass eine Stadt von links nach rechts durch eine neutral geschichtete Luftmasse überströmt wird. Vor dem Anströmen des Stadtkörpers ist die bodennahe Luft in ein «Wechselwirkungsgleichgewicht» mit der glatten Landoberfläche getreten. Durch den Übertritt auf die Stadtoberfläche wird dieses Gleichgewicht gestört, das heisst die Planetare Grenzschicht muss sich an die veränderten aerodynamischen, energetischen, hygrischen und lufthygienischen Haushaltsbedingungen anpassen und ein neues Gleichgewicht «suchen». Lässt sie sich über einer relativ glatten Oberfläche (z.B. Wasser, Gras, Ackerland) – abgesehen von der laminaren Bodenschicht – in die zwei klassischen Schichten «Constant Flux Layer» (CFL) und «Mixed Layer» (ML) unterteilen, so nehmen diese Schichten im Stadtgebiet nicht nur an Mächtigkeit zu, sondern sie werden in Bodennähe durch zwei weitere, für die Stadt typische, relativ dünne Schichtpakete erweitert. Unmittelbar über dem Boden bildet sich in Strassenschluchten (aber beispielsweise auch über baumbedeckten Parkanlagen) die sogenannte Canopy Layer (CL), eine «Lufthaut», deren Dynamik von der restlichen Grenzschicht bis auf etwa $\frac{2}{3}$ der Objekthöhe (Gebäude, Bäume) abgekoppelt ist. Diese



Figur 2: Modifikation der Planetaren Grenzschicht (PBL) durch einen Stadtkörper

Legende: U: Stadt (urban) / R: Land (rural)

Begriffe:

- 1) Canopy Layer (CL) oder durch Objekte eingeschlossene Lufthülle

- 2) Surface Layer / Constant Flux Layer (CFL) oder Bodenschicht / PRANDTL-Schicht

- 2a) Turbulent Wake Layer (TWL)

- 3) Mixed Layer (ML) oder EKMAN-Schicht / Drehungsschicht

- 4) Free Atmosphere (FA) oder freie Atmosphäre

Eigenschaften:

- 1) Eigenes meteorologisches Regime: Sehr turbulent, kontrolliert durch Schubspannung und Rauigkeitselemente (Gebäudeform, -höhe) sowie Oberflächen-Energiebilanzen

- 2) - Mächtigkeit: Ca. 10% der gesamten BL;
- Quasikonstante Flüsse von Impuls, Wärme und Feuchte;
- Windrichtung ungefähr gleichbleibend;
- Schubspannung dominiert über Gradient- und Corioliskraft;
- über komplexer Topographie: Beeinflusst durch Lokalwindssysteme.

- 2a) Sehr turbulente Übergangszone (OKE, 1984)

- 3) - Mächtigkeit: 100 m - einige 100 m;
- Höhenabhängige Änderung von Impuls-, Wärme- und Feuchtefluss;
- Dominanz der Schubspannung nimmt zugunsten von Gradient- und Corioliskraft ab;
- über komplexer Topographie: Beeinflusst durch Regionalwindssysteme.

- 4) Keine thermische und mechanische Beeinflussung mehr; d.h. Windfeld wird durch Gradient- und Corioliskraft bestimmt.

Canopy Layer geht im Dach- oder Baumkronenniveau in einen etwa die zwei- bis dreifache Gebäudebreite (in Anströmrichtung gemessen!) mächtigen «Turbulent Wake Layer» (TWL) über (OKE, 1984), welcher sozusagen das «dynamische Scharnierelement» zwischen UCL und CFL darstellt und physikalisch dem CFL unterzuordnen ist.

Eine Abschätzung der in Figur 1 dargestellten Haushaltsgrössen kann nur dann Erfolg haben, wenn auf die soeben beschriebenen Strukturen Bezug genommen wird. Das gleiche gilt auch für die Modellierung meteorologischer oder lufthygienischer Prozesse im Stadtgebiet.

Figur 2 lehnt sich stark an die physikalischen Prozesse innerhalb der Stadtatmosphäre an. Für stadtplanerische Betrachtungen sind sehr oft Vereinfachungen notwendig. Dabei erweist sich in der Regel eine Zuordnung stadtklimatologischer und -meteorologischer Phänomene zu räumlichen Einheiten verschiedener Grösse als zweckmässig. Dieses Vorgehen soll im übernächsten Kapitel (Nr. 5) anhand von Tabelle 1 gewählt werden.

4. Der Wirkungskomplex Temperaturschichtung – Strömungsfeld – Lufthaushalt – Luftverschmutzung, gezeigt am Beispiel schweizerischer Städte

4.1 Die Eigenschaften schweizerischer Städte

Zunächst sei die Frage nach den gemeinsamen und für das schweizerische Gebiet typischen Eigenschaften der vorhandenen Städte gestellt. Aus klimatologisch-lufthygienischer Sicht sind etwa die folgenden Tatsachen von Bedeutung;

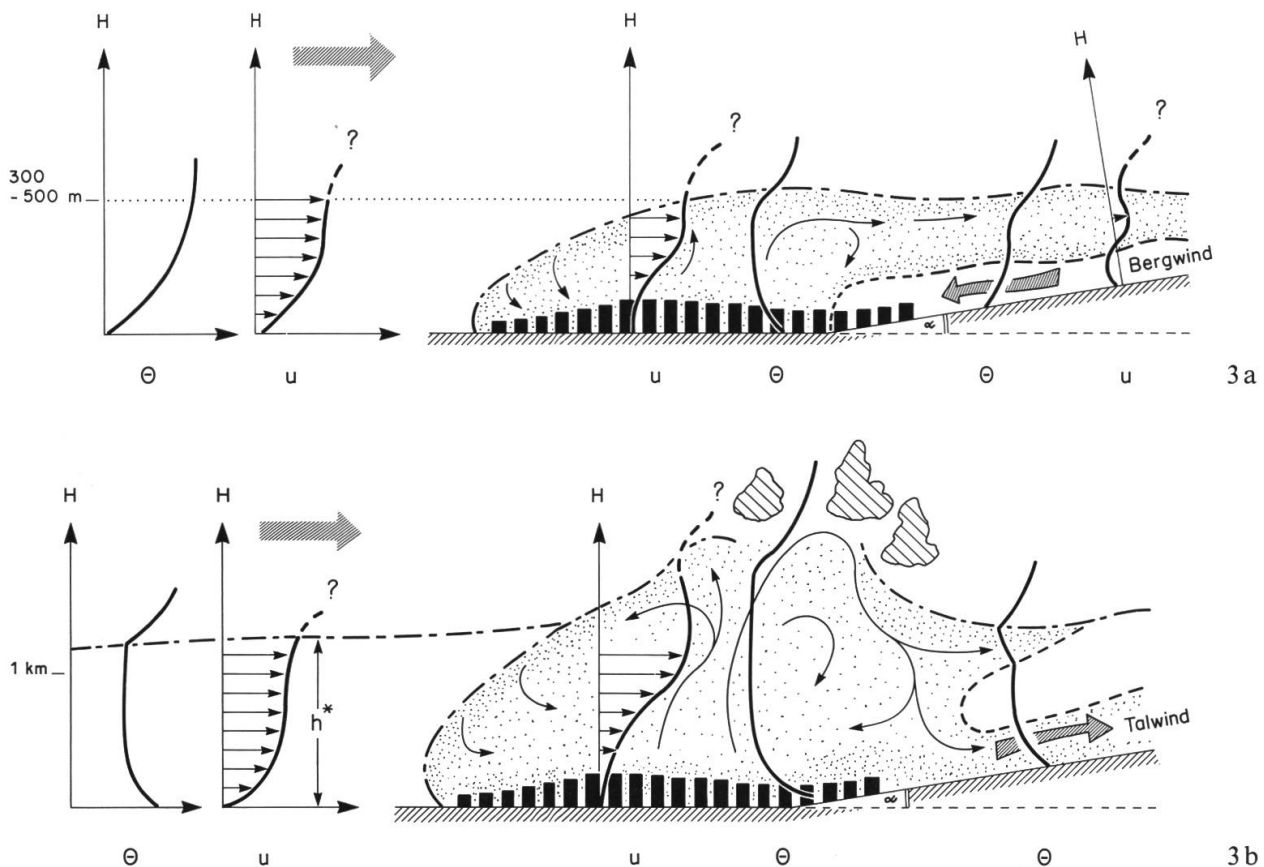
1. Mit Ausnahme von Zürich handelt es sich um *Kleinstädte und Kleinagglomerationen* mit Einwohnerzahlen zwischen 30 000 und 200 000.
2. Die *Baustruktur entspricht dem traditionellen Stil*, d.h. als Baumaterialien stehen Beton, Backstein, Glas und Stahl im Vordergrund. Die Dächer sind vor allem mit Ziegeln oder Kies/Beton (Flachdächer) bedeckt. Die Stockwerkhöhe überschreitet nur selten den Bereich von 10–15 Stockwerken.
3. Die meisten Städte sind an *topographisch geschützter Lage* errichtet worden. Grundsätzlich sind vier Standorttypen zu unterscheiden:
 - a) Standorte in Flusstälern (an Talmündungen oder an der Grenze Gebirge/Hügelregion – Vorland): Basel, Bern, Fribourg, Winterthur.
 - b) Standorte an Flüssen, welche in einen See ein- oder von diesem ausmünden: Biel, Genf, Luzern, Thun, Yverdon, Zürich.
 - c) Standorte an Hanglagen in Seenähe: Lausanne, Lugano, Montreux, Neuchâtel.
 - d) Standorte in höher gelegenen Talregionen oder Tälern des Juras und der Alpen: Chur, La Chaux-de-Fonds, Sion, St. Gallen.
4. Aus klimatischer Sicht führen diese Tal-, Hang- oder Muldenstandorte zu einer markanten Beeinflussung des lokalen Klimas durch orographisch-thermisch bedingte Strömungssysteme, welche sehr oft von der synoptischen Strömung abgekoppelt sind. Die Wärmeinselintensitäten sind entsprechend der Stadtgrösse gering und betragen für die mittleren maximalen Lufttemperaturabweichungen Stadt – Umland (2 m über Boden) zirka 3–7°C und für die mittleren maximalen Oberflächentemperaturabweichungen zirka 10–13°C.

5. Aus lufthygienischer Sicht ist vorerst kurz auf die Quellenverhältnisse (Emittentengruppen) einzutreten: Mit Ausnahme weniger, industrieller Punktquellen (Gross-emittenten) werden die Luftfremdstoffe auf sehr tiefem Niveau abgegeben. Zusammen mit der aus meteorologisch-lufthygienischer Sicht eher ungünstigen topographischen Lage führt die Tatsache, dass sehr viele individuelle Hausfeuerungs-systeme anzutreffen sind und dass in den schmalen «Strassencanyons» ein sehr dichter Verkehr herrscht (0.5 Motorfahrzeuge pro Einwohner), bei austauscharmen Wetter-lagen zu einer erheblichen lufthygienischen Belastung. Die erwähnten Hausfeue-rungen sind etwa zu 60% für die SO₂-Emissionen, der Motorfahrzeugverkehr zu zirka 70–75% für die Produktion von NO sowie zu 50–60% für jene der Kohlenwas-serstoffe verantwortlich (nach Berechnungen für Bern, Biel und Zürich). Die Luft-fremdstoffkonzentrationen ausgewählter Leitkomponenten erreichen in den zentra-len Stadtgebieten der Schweiz etwa die folgenden Jahresmittelwerte (BACHMANN et al., 1983; BUS, 1984):
- SO₂: 40–80 µg · m⁻³;
 - NO₂: 50–100 µg · m⁻³;
 - Schwebestaub: 40–60 µg · m⁻³.

4.2 Schematische Darstellung von Strömung, Schichtung und Lufthaushalt in einer schweizerischen Modellstadt

Anhand der Figuren 3a und b wird versucht, den Wirkungskomplex Vertikaltempera-turschichtung – Horizontalwinde – Lufthaushalt/Luftverschmutzung für eine typi-sche Schweizer Stadt schematisch darzustellen. Angenommen wird wiederum (vgl. Fig. 2), dass ein Stadtkörper von links durch synoptisch induzierte Winde überströmt wird. Unter der Voraussetzung, dass dieser Stadtkörper zusätzlich in einer Wechselwir-kung mit einem benachbarten Gebirgshang steht, sind folgende Phänomene erkenn-bar:

1. Die weltweit vorhandene, fahnenförmige Struktur des städtischen Temperaturfeldes (OKE, 1979) lässt sich aufgrund von Feldexperimenten auch bei uns feststellen (ABEGGLEN, 1982; WANNER et al., 1982). Anhand der Profile der potentiellen Tempe-ratur (θ) ist sichtbar, dass sich die Wärmeinsel auf einige 10 bis etwa 200 m be-schränkt, dass jedoch die strichpunktiierte Obergrenze der städtischen Grenzschicht (UBL gemäss Fig. 2), welche sehr oft auch der Mischungsschichtobergrenze ent-spricht, an einem schönen Spätsommertag auf etwa 300 m (Nacht) bis 1300 m (Tag) über der Bodenoberfläche zu liegen kommt.
2. Das Windprofil (u ; siehe horizontale Pfeile) wird durch die rauhe Stadtoberfläche in Bodennähe erheblich modifiziert (Abbremsung). Knapp über der Canopy Layer (UCL gemäss Fig. 2) ist jedoch eine leichte Geschwindigkeitszunahme gegenüber dem Umland zu beobachten.
3. Vor allem tagsüber lässt sich über dem Stadtgebiet ein komplexes Konvektionszel-lenmuster feststellen (gekrümmte Pfeile), welches wohl die universelle Form der stadterzeugten, thermischen Schichtungsinstabilität darstellt. Aus der komplizier-ten Verknüpfung zwischen mechanischen (vor allem Windabbremsung) und ther-mischen Effekten (Bildung einer bodennahen, neutralen Schicht mit darüberliegen-



Figur 3: Hypothetische Modellvorstellung zur Strömungs- und Schichtungsstruktur sowie zur Verteilung der Luftfremdstoffe in der bodennahen Atmosphäre einer Schweizer Stadt

- a) Situation am Ende einer Spätsommernacht
 b) Situation während eines Spätsommernachmittags
 θ : potentielle Temperatur ($^{\circ}\text{K}$)
 u : Windgeschwindigkeit ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 h^* : Mischungsschichthöhe (m)

der Grenzschichtinversion) ergibt sich eine entsprechend komplizierte Verteilung der Luftfremdstoffe mit hohen Konzentrationen

- a) innerhalb und knapp oberhalb der Urban Canopy Layer UCL (CO und NO vor allem in Strassenschluchten) und
 b) an der Obergrenze der städtischen Grenzschicht oder Urban Boundary Layer UBL.
4. Im komplexen schweizerischen Relief werden die soeben beschriebenen Strukturen zusätzlich modifiziert. Dabei wird die Planetare Grenzschicht (BL) infolge der Muldenlage der Schweizer Stadt sehr oft nicht nur von den grossräumigen, synoptischen Winden abgekoppelt, sondern der städtische Lufthaushalt wird zusätzlich durch orographisch-thermisch induzierte Hang- oder Berg- und Talwindssysteme beeinflusst. Figur 3a zeigt, dass in Strahlungs Nächten an geneigten Hängen gravitativ induzierte, in der Regel pulsierende Dichteströme (auch als Kaltluftabfluss oder «Drainage Flow» bezeichnet) auftreten, deren Mächtigkeit einige 10 m und deren Geschwindigkeit über das ganze Höhenprofil integriert zirka $1\text{--}4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ca. $6\text{--}10 \text{ km} \cdot \text{Std}^{-1}$) beträgt. Können diese Hangab- oder Bergwinde in den Nachtstunden in

gewissen Stadtteilen eine reinigende, also lufthygienisch günstige Wirkung erzeugen, so transportieren sie tagsüber bei neutraler bis labiler Temperaturschichtung in Form von Hangauf- oder Talwinden mächtige Luftpakete in Richtung der Massenerhebungen (vor allem Jura und Alpen). Während Sommersmog-Wetterlagen mit vermehrter Bildung von Ozon (O_3) und anderen photochemischen Produkten werden im Bereich der Planetaren Grenzschicht (BL) ohne weiteres Transportdistanzen von 10–15 km · Std⁻¹ erreicht.

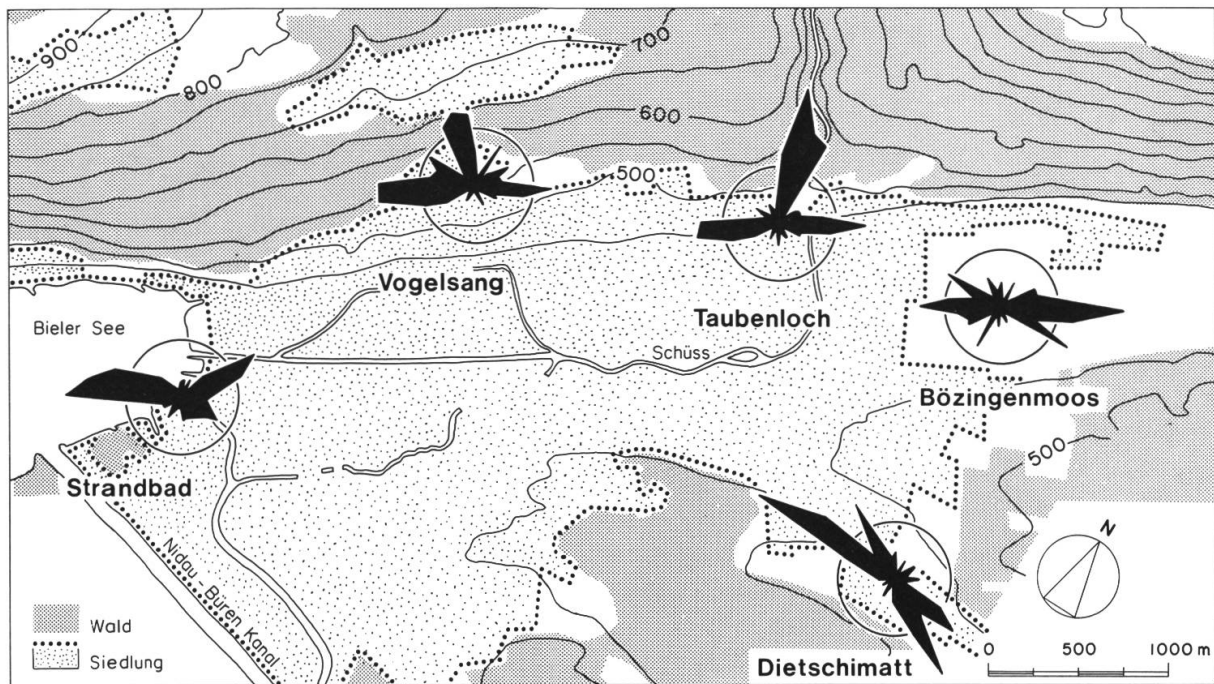
4.3 Ausbreitungsklima und SO₂ – Tagesgang im Raum Biel

Die soeben gemachten, allgemeinen Feststellungen sollen am Beispiel der Kleinstadt Biel (ca. 54 000 Einwohner) belegt werden. In dieser Stadt läuft zur Zeit eine interdisziplinäre, meteorologisch-lufthygienische Studie, bei der auch Folgewirkungen der Luftverschmutzung (Schäden an Baumflechten, Atemwegserkrankungen bei Kindern) untersucht werden.

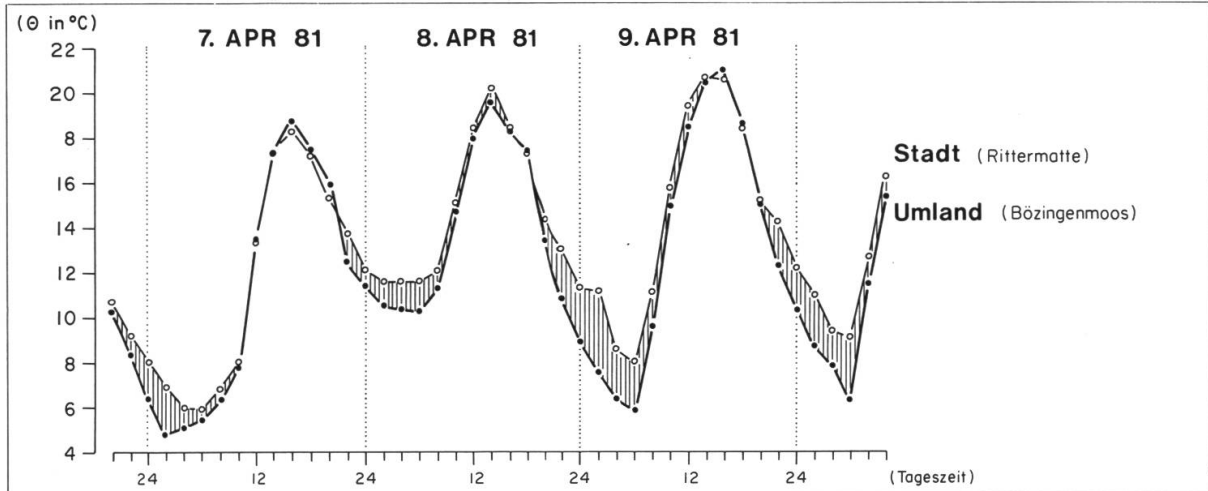
Figur 4 gibt zunächst einen Überblick über die topographische Lage und die generelle Struktur der bodennahen Felder von Temperatur und Strömung. Die topographische Lage ist aus Figur 4a ersichtlich: Die Siedlung liegt angelehnt an den Jurasüdhang im Norden und eingebettet in eine Ebene, welche im Westen durch den See und im Süden durch zwei bewaldete Molassehügel begrenzt wird. Entsprechend bildet sich das mittlere Windregime aus: Am Jurahang (Vogelsang) ist eine klare Dreiteilung in Westwinde (überwiegend bei Tiefdrucklagen auftretend), Ostwinde (Bise; oft verbunden mit Hochdruck) und Hangabwinde aus NNW (nächtliche Strömung vor allem bei gradientschwachen Strahlungswetterlagen ausgebildet) zu erkennen. Der soeben erwähnte nächtliche Kaltluftausfluss oder «drainage flow» aus dem Südjura (Schüsstal) tritt anhand eines markanten NNE-Astes der Station Taubenloch (am Ausgang der gleichnamigen Schlucht gelegen) besonders deutlich hervor. Die Stationen im Westen (Strandbad) und Osten (Bözingenmoos) der Stadt weisen auf eine gegen das Stadtzentrum gerichtete, thermisch und mechanisch begründete Strömungskonvergenz hin, wobei im Falle des Strandbades auch der See-Land-Effekt eine Rolle spielen dürfte. Die zwischen den Molassehügeln Längholz (im Westen) und Büttenberg (im Osten) gelegene Station Dietschimatt deutet auf die klare Ventilwirkung innerhalb dieses ehemaligen Durchflusstales der Schüss hin.

Figur 4b zeigt die Wärmeinseldynamik, aufgezeichnet für eine Schönwetterperiode im Frühling. Dabei kann das für diese Jahreszeit typische Wärmeinselmaximum – mit Abweichungsbeträgen Stadt-Umland von 2–3°C – in den Nachtstunden zwischen 24 und 06 Uhr beobachtet werden. Vor allem aufgrund des unterschiedlichen thermischen Speichervermögens von Stadt und Umland kehrt sich diese Temperaturdifferenz jeweils in den frühen Nachmittagsstunden in eine schwach sichtbare «negative heat island» um (höhere Temperaturen im Umland: Bözingenmoos).

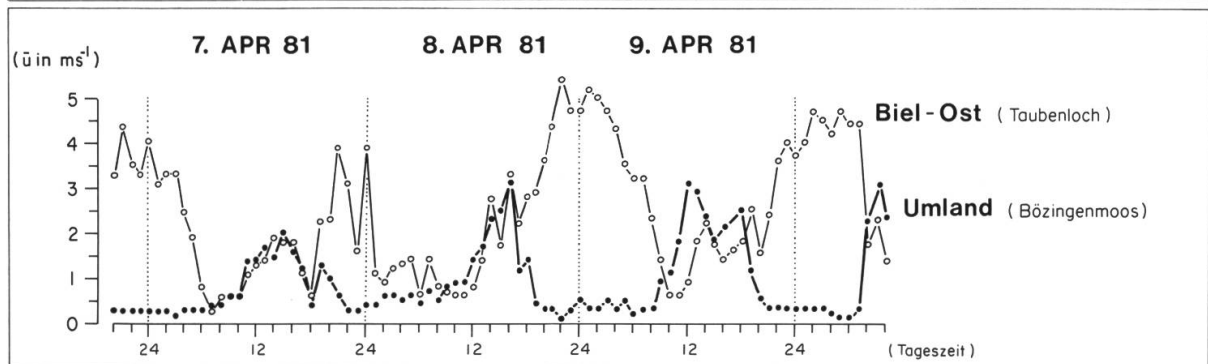
Figur 4c weist mit aller Deutlichkeit auf den Umstand hin, dass das bodennahe Windregime über komplexer Topographie je nach Lage der Station stark ändern kann. Dabei weicht der Tagesgang der Windgeschwindigkeit an Stationen in der Ebene (Bözingenmoos: Maxima in den frühen Nachmittagsstunden) deutlich vom Verlauf ab, wie er für den Einflussbereich des «drainage flow» aus dem Südjura als typisch gelten darf (Taubenloch: Maxima um Mitternacht).



4a



4b



4c

Figur 4: Topographie, Temperatur- und Windregime der Stadt Biel.

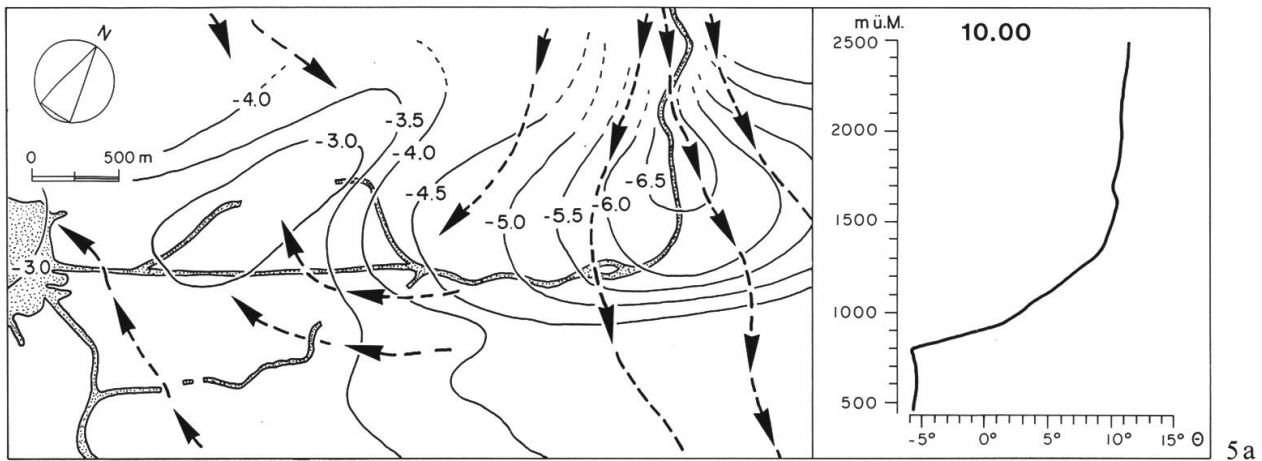
- Topographische Lage der Stadt Biel sowie über 17 Monate (Strandbad und Dietschimatt nur 4 Wintermonate!) gemittelte Windrosen der fünf Haupt-Messstationen (dargestellt für 5%-Richtungsanteile).
- Dreitägige Temperatur-Tagesgänge einer Strahlungswetterlage im Frühling, dargestellt für je eine zentrale Stadtstation (Rittermatte; Standort siehe Ballonsymbol auf Fig. 5b) sowie eine typische Umlandstation (Bözingenmoos; schraffierte Zone: Bereich der städtischen Wärmeinsel).
- Tagesgänge der Windgeschwindigkeit an den gleichen Tagen wie auf Figur 4b, dargestellt für je eine typische Umlandstation in der Ebene (Bözingenmoos) sowie eine vom nächtlichen Kaltluftstrom aus dem Taubenloch beeinflusste Station.

Da nun für Biel ein sehr feinaufgelöster Emissionskataster existiert (Gitterabstand: 100 m; BERLINCOURT, 1984), können die detaillierten meteorologischen Feldmessungen als fundierte Information in Ausbreitungsmodelle eingebracht werden. Neben physikalischen Modellen (Windkanal) werden auch statistische und numerische Ausbreitungsmodelle zur Simulation sommerlicher Smogepisoden sowie winterlicher Inversionslagen eingesetzt. Figur 5 zeigt die typischen Messergebnisse einer winterlichen Nebelmeerlage mit extrem stabiler Schichtung über dem Schweizer Mittelland. Auf den Figuren 5a und b sind vorerst die Darstellungen der bodennahen Temperatur- und Windfelder (knapp über Dachniveau) für einen typischen Wintermorgen und -nachmittag wiedergegeben. Die auf Feinmessungen und Beobachtung basierende Morgendarstellung des 10. Dezember (Fig. 5a) zeigt eine deutliche Zweiteilung des Stadtgebietes in einen warmen West- (Kerngebiet) und einen kühleren Ostteil der Stadt. Strömungsmässig ist im Bereich der Wärmeinsel (Westen) eine leichte Konvergenz zu beobachten, währenddem der Osten durch den auch im Temperaturbild sichtbaren Kaltluftausfluss aus dem Taubenloch dominiert wird. Auf der Nachmittagsdarstellung (Fig. 5b) ist diese lufthygienisch sehr wertvolle «Reinluftströmung» erloschen. Die Stadt wird unterhalb der Inversion und des Hochnebels von einem leichten Südwestwind überströmt, welcher am Jurasüdhang praktisch zu einem Südwind (Hangaufwind) umgelenkt wird. Das Windfeld und die Turbulenzspektren prägen entsprechend auch die SO₂-Konzentration (Halbstundenwerte), welche auf Figur 5c für eine Station im Zentrum (Zentralplatz, 440 m ü.M.) und am Jurasüdhang (Vogelsang, 540 m ü.M.) dargestellt wurde. Klar ist zu erkennen, dass der Pegel am Zentralplatz (geschätzter Jahresmittelwert: 59 µg · m⁻³; SCHÜPBACH, 1984) generell höher liegt als am Jurasüdhang. Anhand der grauen Flächen wird jedoch deutlich gemacht, dass die Werte an der Station Vogelsang, welche noch deutlich unter der winterlichen Strahlungs- und Reibungsinversion liegt (vgl. Fig. 5a und b, rechter Teil), sehr oft beim Einsetzen der Hangaufwinde vor dem Mittag rapide ansteigen und über jene des Zentralplatzes zu liegen kommen. FILLIGER et al. (1984) haben diese hangwindbedingte Verlagerung der «Schadstoffwolke» unter der Inversion mit Hilfe einer Markov-Ketten-Simulation im Modell beschrieben (FILLIGER et al., 1984).

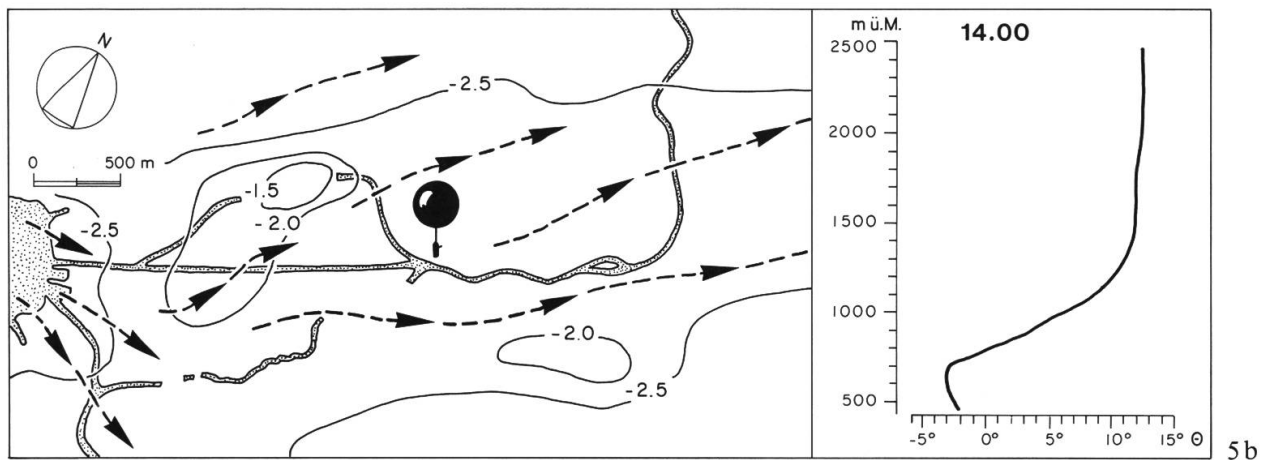
Das Beispiel der Stadt Biel zeigt nicht nur, dass auch in Schweizer Kleinstädten markante lufthygienische Belastungen auftreten können, sondern dass in jedem Fall die lokalspezifischen, topographisch induzierten Zirkulationssysteme in die Betrachtung raumplanerischer Zusammenhänge einzubeziehen sind!

5. Zur Wirksamkeit raumplanerischer Massnahmen

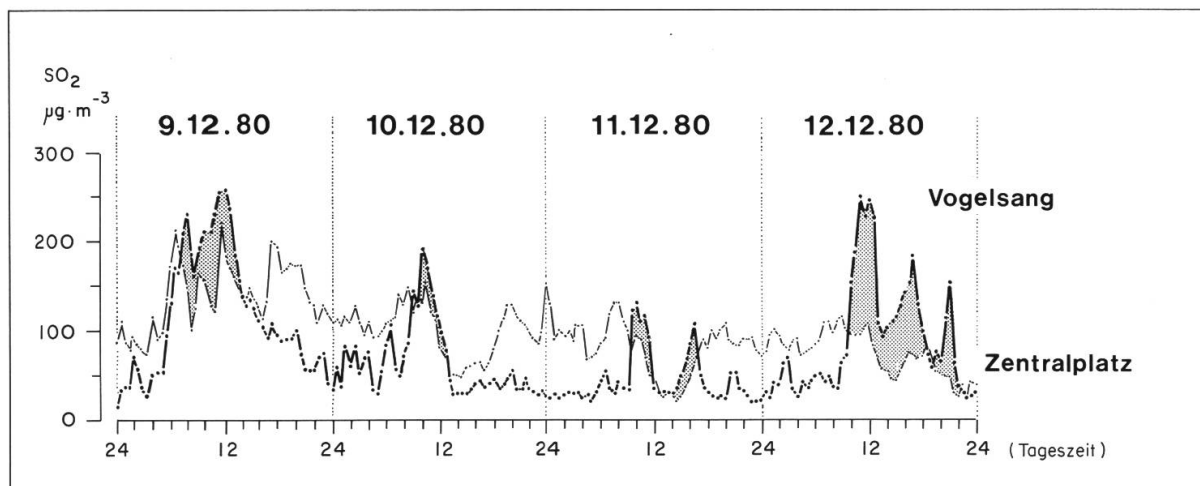
In Kapitel 2.2 wurde eine allgemeine Gewichtung der meteorologisch-lufthygienischen Wirkungsbereiche im Hinblick auf Stadt- und Raumplanung vorgenommen. In diesem Kapitel sollen nun die möglichen Massnahmen einer kritischen Würdigung unterzogen werden. Dabei ist davon auszugehen, dass es sich in der Regel um Sanierungsmassnahmen und nur ganz selten um Neuerschliessungen handeln kann (GENSHEIMER, 1984). Tabelle 1 gibt einen Überblick über mögliche Phänomene oder Massnahmen, welche in den vier stadtklimatologisch-lufthygienischen Wirkungsbereichen in Frage kommen. Sie werden dabei massstäblich gegliedert nach den vier morphologisch unterscheidba-



5a



5b



5c

Figur 5: Die Verknüpfung von Temperaturfeld, Windfeld und SO_2 -Belastung im Raum Biel, gezeigt für eine typische winterliche Inversionslage (10. Dezember 1980).

- Temperaturfeld (Isolinien), Windfeld (Pfeile) und Vertikaltemperaturprofil (potentielle Temperatur; rechte Figur) am frühen Vormittag um 10.00 Uhr.
- Temperaturfeld (Isolinien), Windfeld (Pfeile) und Vertikaltemperaturprofil (potentielle Temperatur; rechte Figur) am frühen Nachmittag um 14.00 Uhr. Das Ballonsymbol zeigt den Sondierstandort Rittermatte.
- Halbstundenwerte der SO_2 -Konzentration von je einer zentralen Stadtstation (Zentralplatz, 440 m ü.M.) sowie einer Jurasüdhangstation (Vogelsang, 540 m ü.M.), gemessen während derselben Inversionslage (SO_2 -Detektoren Philips PW 9700).

Tabelle 1: Die vier meteorologisch-lufthygienischen Wirkungsbereiche der Stadt und davon abgeleitete Phänomene oder Massnahmen, welche für die Stadtplanung von Bedeutung sind.

Wirkungsbereich	Thermischer	Hygrischer	Windfeld	Lufthygiene
Morphologische Einheit				
(1) Gebäude oder Gebäudekomplex	– Menschliches Wohlbefinden (Kälte- oder Hitzestress) – Energieverbrauch für Heizung oder Kühlung	– Stadttrockenheit? (veränderte Evapotranspiration) – Verminderte Schneelast	– Zirkulation in Strassenschluchten (Düseneffekte) – Windlast im Dachniveau	– Korrosion und Zerfall von Baumaterialien aller Art – Einfluss der Emittentenhöhe (Kamin dimensionierung)
(2) Quartier oder allgemeine Landnutzungseinheit (Vorstadt, City, Park usw.)	– Ausgleich der Wärmelast (Grün- und Wasserflächen) – Reduktion der Wärmeemission durch Fernwärmeproduktion	– Feuchteausgleich infolge von Grün- und Wasserflächen	– Anordnung der Baukuben (Durchlüftungsschneisen)	– Wahl von Einzelkaminstandorten
(3) Stadt	– Beschleunigung der Schneeschmelze infolge Stadterwärmung	– Stadtgewitter, Stadthochwasser	– Innerstädtische Zirkulationsmuster (Konvektionszellen, Ausgleichsströmungen)	– Standorte der Grosse mittlen – Festlegung von Hauptverkehrsachsen
(4) Ganze Stadtregion	– Auswirkung der «Wärmefahne Stadt» – Phänologische Unterschiede Stadt-Umland (vor allem Frosthäufigkeit)	– Leeniederschläge, Stadthagel, Stadtschneefälle	– Stadt-Umland-Zirkulationsstrukturen (Modifikation der Lokal- und Regionalzirkulation)	– Einfluss auf Mensch und Pflanze: Erkennen der Belastungsgebiete und Ergreifen von Gegenmassnahmen – Verminderung der UV-Strahlung

ren Einheiten der Stadt- oder Regionalplanung. Nach FRANKE (1977) sowie ERIKSEN (1979 und 1980) lassen sich die möglichen Massnahmen in den drei folgenden konkreten Forderungen zusammenfassen:

1. Die zeitweise Aufheizung der Stadtkerne muss vermindert werden.
2. Der Luftaustausch innerhalb des Stadtgebietes muss gewährleistet werden.
3. Der Anteil an festen, flüssigen und gasförmigen Luftfremdstoffen muss reduziert werden.

Damit ist die Frage gestellt, in welcher Weise diese Forderungen erfüllt werden können.

Wie in Kapitel 2.1 gezeigt wurde, ist die *Aufheizung der Stadt* ein sehr komplexes Phänomen, welches von den Baumaterialien und der Oberflächengeometrie, aber auch von der Feuchte-, Schadstoff- und Wärmeproduktion im Stadtgebiet abhängig ist. Das Wärmeinselphänomen ist somit untrennbar mit Fragen der Belüftung und der Energieproduktion verknüpft und kann nur bei Beachtung auch dieser Komponenten gelöst werden. Eine oft empfohlene Massnahme zur Verminderung der Wärmelast besteht darin, dass vermehrt Grünzonen und Wasserflächen errichtet werden. Dies ist zweifellos richtig, nur darf deren Wirksamkeit nicht überschätzt werden. HOESCHELE (1977) erwähnt, dass bei einem wachsenden Anteil verdunstender Flächen, welche latente (Verdunstungs-) an Stelle von sensibler (oder fühlbarer) Wärme verbrauchen, der Temperaturüberschuss immer langsamer abgebaut, die Errichtung verdunstender Grün- oder Wasserflächen also immer unwirksamer wird. FEZER et al. (1977) haben diese Tatsache anhand von Temperaturdifferenzen Grünfläche – Umgebung als Funktion der Grünflächengrösse nachgewiesen. Eine Grünfläche von zirka 1 ha ergibt nach ihnen eine Temperaturverminderung von 1 K, eine solche von 250 ha entspricht jedoch nur einer Abnahme von 3 K! ERIKSEN (1979) und KAMINSKE (1984) weisen nach, dass die Fernwirkung der Grünflächen bereits bei 100 m Entfernung extrem abnimmt. Schliesslich darf man sich auch nicht der Illusion hingeben, dass bereits eine Rasenfläche eine grosse Wirkung erzeugen kann (HOESCHELE und SCHMIDT, 1974). Rasenflächen heizen sich tagsüber relativ rasch auf und weisen relativ geringe Verdunstungsraten auf. Als quantitativ wirksamer erweisen sich neben Wasserflächen nur Strauch- und vor allem Baumbestände, welche nicht nur erhebliche Mengen von Wasser verdunsten, sondern durch die Verlagerung der Strahlungsumsätze ins höhere Baumkronenniveau am Erdboden zu einer Temperaturniedrigung von zirka 5 K beitragen (ERIKSEN, 1979). Der gleiche Betrag wird von HOESCHELE und SCHMIDT (1974) auch für die Raumtemperatur angegeben, wenn diese infolge intensiver Dachbegrünung abgesenkt wird. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Anlage von Grünzonen und Wasserflächen sicher sinnvoll ist, dass jedoch deren Wirkung beschränkt bleibt, wenn die dicht bebauten Quartiere nicht sehr massiv aufgelockert und mit Grün- oder Wasserflächen durchsetzt werden können. Aus diesen Gründen muss eine Begrünung immer auch mit den weiter unten dargestellten Massnahmen kombiniert werden.

Als zweite Forderung wurde einleitend die *Sicherstellung eines genügenden Luftaustausches* erwähnt. Als entsprechende Massnahmen kommen in Frage:

- das Freihalten von sogenannten «Frischluftschneisen»;
- die optimale Orientierung der Baukuben gegenüber wichtigen Strömungssystemen (Westwind bei Tiefdrucklagen, Ostwind bei Hochdrucklagen, tagesperiodische Windsysteme);
- die Reduktion der Baukörperhöhe auf wenige Stockwerke (PLATE, 1972).

Allerdings darf auch die Wirksamkeit dieser Massnahmen nicht überschätzt werden, denn der Schritt von der Kosmetik bis zum wirksamen Eingriff ist sehr gross. Als besonders günstig sind jene Konzepte einzustufen, bei welchen grössere Grün- und Wasserflächen miteinander durch Ventilationskanäle verbunden bleiben und die umliegende Bebauung offen gestaltet wird. Damit wird sowohl tags als auch nachts die Zirkulation zwischen verschiedenen temperierten Oberflächen erleichtert. Im weiteren muss darauf geachtet werden, dass topographisch vorgegebene Strömungssysteme (Hangwind-

gebiete, Kaltluftabflussrinnen, Ausmündungen von Bergtälern) nicht zum vorneherein durch Hochbauten verbarrikadiert werden (vgl. Kapitel 4.3; NUEBLER, 1979; MATHYS et al., 1980). Vor allem der ungehinderte Kaltluftabfluss während der Nacht ist zu begünstigen, da diese Kaltluft nicht nur eine höhere kinematische Viskosität (und damit eine erhöhte Zähflüssigkeit) besitzt, sondern sehr oft aus ländlichen Einzugsgebieten mit Reinluftverhältnissen stammt. Im topographisch stark gegliederten Relief Mitteleuropas bieten sich dazu in der Regel die aus dem Hügel- oder Gebirgsland ausmündenden Flusstäler an. Allerdings ist zu beachten, dass sich in weiten, wenig geneigten Tälern nach SCHNELLE (1956) nur dann ein wirksamer Kaltluftabfluss ergibt, wenn das Tal nicht durch Querriegel auf eine Breite von weniger als 450 m eingeengt wird.

Die dritte Forderung betrifft die *Reduktion der Luftfremdstoffe*. Angesichts der in den letzten Jahren aufgedeckten lufthygienischen Folgewirkungen beim Menschen, bei der gesamten Biosphäre sowie bei Bau- und Kunstwerken stellt sie die vordringlichste Forderung dar. Sie steht zudem in vielfacher Wechselwirkung mit dem thermisch-hygrischen Regime und dem Strömungsfeld einer Stadt. Als raumplanerische Massnahme bietet sich heute nur noch die Einschränkung auf der Quellenseite (Industrie, Hausbrand, Verkehr) an. Im Vordergrund stehen dabei nicht mehr nur die rein technischen Massnahmen (Filter- und Katalysatortechnik), sondern es muss überlegt werden, in welcher Form auch griffigere Massnahmen gegenüber den Punktemittenten der Industrie (als wichtige Emittenten von SO_2 und HC), dem Linienemittenten Verkehr (als wichtiger Emittent von NO_x und HC) und dem Flächenemittenten Hausbrand (als wichtiger Emittent von SO_2) eingeleitet werden können: Bessere Reinigung der Abluft grosser Punktemittenten, Einschränkung des Verkehrsvolumens, Konstruktion zentraler Fernheizungsanlagen mit schwefelarmen Brennstoffen und Rauchgasreinigung. Im weiteren müsste im Bereich der grossen Städte auch von der heute gängigen Abfallverbrennung Abstand genommen werden, gehören doch die Kehrlichtverbrennungsanlagen vielerorts zu den Hauptemittenten des städtischen Lebensraumes (z.B. Bern und Biel).

Vor allem gilt es auch, von der Politik der hohen Schornsteine (und damit von der möglichst guten Verteilung der Schadstoffe über grosse Gebiete) wegzukommen. Es ist wohl nicht mehr zu empfehlen, die grossen Emittenten im Stadtbereich räumlich zu konzentrieren. So stelle man sich zum Beispiel im Schweizer Mittelland die Frage, auf welcher Seite einer Stadt ein neues Industriequartier erstellt werden müsste. Wird es im Westen errichtet, so werden die emittierten Schadstoffe bei Schlechtwetterlagen mit starkem Westwind und labiler Temperaturschichtung «heruntergewaschen» und relativ nahe bei der Quelle mit hoher Konzentration deponiert. Umgekehrt sind die Verhältnisse bei einem Standort östlich, nördlich oder südlich einer Stadt: Nun erfolgt der Transport Richtung Stadt eher bei stabiler Schichtung, d.h. die Diffusion der Schadstoffe erfolgt langsamer, und hohe Konzentrationen sind über wesentlich grössere Distanzen feststellbar.

Müsste man die zu treffenden Massnahmen in kürzester Form charakterisieren, so geht es doch darum, dass in erster Priorität alle möglichen Anstrengungen unternommen werden müssen, um sowohl die Baustrukturen aufzulockern (keine dicht bebauten Areale grösser als 1 km^2 !), die natürliche Belüftung zu begünstigen (vor allem bezüglich Lokal- und Regionalwinden aus Quasi-Reinluftgebieten) und den Ausstoss von Luftfremdstoffen abzubauen. Wie in Kapitel 4.3 gezeigt wurde, sind die spezifischen

Verhältnisse einer Stadt in jedem Fall gesondert zu untersuchen, und es ist heute kaum mehr verantwortbar, wenn mittlere und grössere Städte den Gang der Luftbelastung nicht kontinuierlich verfolgen!

Verdankung

Der Verfasser dankt herzlich:

- Herrn P. Filliger für die kritische Durchsicht des Manuskripts;
- Herrn R. Rickli für die Reinzeichnung der Figuren;
- Frau E. Schüpbach für die Reinschrift des Manuskripts.

Literaturverzeichnis

- ABEGGLEN, R., 1982: Die städtische Wärmeinsel: Eine Literaturstudie und Städtetypisierung mit einem Beitrag zur Wärmeinsel von Bern. Diplomarb. Geogr. Inst., Bern.
- BACHMANN, R., WANNER, H.U., EGGLI, R., MARGULIES, H.P. und SOMMER, H., 1983: Luftreinhaltung im Kanton Zürich. Amt f. techn. Anlagen u. Lufthygiene, Zürich.
- BAUMGARTNER, A., MAYER, H., BRUENDL, W. und NOACK, E.-M., 1984: Stadtklima Bayern, Kurzmittlg. 7, Lehrstuhl für Bioklim. u. Angew. Meteor., München.
- BERLINCOURT, P., 1984: Le cadastre d'émission de la région biennoise. Inform. u. Beitr. z. Klimaforschung 20, 7-15.
- BUS (Bundesamt für Umweltschutz), 1984: Luftbelastung 1983. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Schriftenreihe Umweltschutz, Nr. 30.
- DETTWILLER, J., 1970: Incidence possible de l'activité industrielle sur les précipitations à Paris. WMO, Tech. Note 108, 361-362.
- ERIKSEN, W., 1979: Grundlagen und städtebauliche Bedeutung des Stadtklimas. Techn. Mittlg. 72: 77-81.
- ERIKSEN, W., 1980: Klimamodifikationen im Bereich von Städten. Grundlagen und städtebauliche Aspekte. Veröff. Joach. Jungius-Ges. Wiss. Hamburg 44: 161-175.
- FEZER, F., FRIESE, B., SASINSKI, K.-J. und SEITZ, R., 1977: Empfehlungen zur Gestaltung von Baukörpern, Verkehrs- und Grünflächen. Heidelberger Geogr. Arb. 47: 217-233.
- FILLIGER, P., BERLINCOURT, P. und RICKLI, R., 1984: Applied study on urban air pollution climatology (Biel-Bienne, Switzerland). Applied climatology. 25th Int. Geogr. Congress. Zürcher Geogr. Schriften 14, 93-94.
- FRANKE, E. (Hrsg.), 1977: Stadtklima. Ergebnisse und Aspekte für die Stadtplanung. Stuttgart.
- GASSMANN, F., BÄTTIG, R., BÜRKI, D., HUTTER, M., MOSER, W., RUDIN, F. und TINGUELY, M., 1984: Profilmessungen in der planetaren Grenzschicht über Zürich während einer herbstlichen Hochdrucklage. EIR-Bericht Nr. 514.
- GENSHEIMER, P., 1984: Klimatische und lufthygienische Aspekte der Stadtplanung. Referat SIA-Tagung «Stadtklima und Luftverschmutzung».
- HAENEL, G., BUSEN, R. und SCHLOSS, R., 1985: Absorption of solar radiation by atmospheric particles and water vapour - results of measurements in tabular form. Manuskript Inst. f. Meteorologie u. Geophysik Frankfurt.
- HOESCHELE, K., 1977: Konkurrierende Gesichtspunkte der Zielvorstellungen für das Stadt- und Landschaftsklima. Ann. d. Meteorol. 12: 197-200.
- HOESCHELE, K. und SCHMIDT, H., 1974: Klimatische Wirkungen einer Dachbegrünung. Garten und Landschaft 84: 334-337.
- JENDRITZKY, G., 1983: Die thermische Komponente im Bioklima einer Stadt. Ann. d. Met. 20, 110-112.
- JENDRITZKY, G., SOENNING, W. und SWANTES, H.-J., 1979: Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt- und Landschaftsplanung («Klima-Michel-Modell»). Beitr. d. Akad. Raumforsch. Landesplanung, 28.
- KRATZER, A., 1956: Das Stadtklima. Vieweg, Braunschweig, 2. Aufl.
- LANDSBERG, H.E., 1981: The urban climate. Academic Press, New York.

- MARTY, H., KÜMMERLI, H., ZURBRÜGG, R.P., BERLINCOURT, P., FILLIGER, P., RICKLI, R., RICKLI, B. und WANNER, H., 1985: Der Einfluss meteorologischer und lufthygienischer Faktoren auf akute Erkrankungen der Atemwege bei Kindern – am Beispiel der Region Biel. Erscheint in: Sz. Med. Wochenschrift, 13 S.
- MATHYS, H., MESSERLI, B., MAURER, R., WANNER, H. und WINIGER, M., 1980: Klima und Lufthygiene im Raum Bern. Veröffentl. d. Geogr. Komm. SNG, 7.
- NÜBLER, W., 1979: Konfiguration und Genese der Wärmeinsel der Stadt Freiburg. Freiburger Geogr. Hefte, 16.
- OKE, T.R., 1979: Review of urban climatology 1973–1976. WMO, Tech. Note 169, World Meteor. Organiz., Genf.
- OKE, T.R., 1984: Methods in urban climatology. Applied climatology. 25th Int. Geogr. Congress. Zürcher Geogr. Schriften 14, 19–29.
- PLATE, E., 1972: Berücksichtigung von Windströmungen in der Bauleitplanung. Sem. ber. Rahmenthema «Umweltschutz», Inst. f. Städtebau u. Landesplanung, Karlsruhe: 201–229.
- SCHIRMER, H., 1984: Climate and regional land-use planning. Energy and Buildings 7: 35–53.
- SCHNELLE, F., 1956: Ein Hilfsmittel zur Feststellung der Höhe von Frostlagen in Mittelgebirgstälern. Meteorol. Rundschau 9: 180–182.
- SCHÜPBACH, E., 1984: Lufthygiene Biel. Statistische und computergestützte Auswertung von Immissionsdaten der Stadt Biel 1980–1982 und ihre Abhängigkeit von meteorologischen Parametern. Zweitarbeit Geogr. Inst., Bern.
- WANNER, H., BERLINCOURT, P. und RICKLI, R., 1982: Klima und Lufthygiene der Region Biel – Gedanken und erste Resultate einer interdisziplinären Studie. Geogr. Helv. 37: 215–224.
- WEISCHET, W., 1980: Stadtklimatologie und Stadtplanung. Klima und Planung 79. Veröffentl. d. Geogr. Komm. d. Sz. Naturf. Ges. 6, 73–95.