

SONDERDRUCK AUS:

Urbane Gewässer
Herausgegeben von:
Helmut Schuhmacher
und *Burkhard Thiesmeier*

 WESTARP
WISSENSCHAFTEN

Essen 1991

Zum klimatischen Potential urbaner Gewässer¹

Abstract

Water surfaces, as compared to soil, exert quite a different influence on the climatic character of an urban system. In the vicinity of a water body, physical properties such as the windfield, mass and heat transfer are altered, characteristic areas of varying humidity and evapotranspiration affect the neighbourhood, and water surfaces may act as major sinks for various airborne impurities. The magnitude and influence of these parameters are discussed in consideration of size and shape of a running water supply or a water reservoir, respectively. Furthermore, some studies are introduced which examine beneficial influences on a city climate depending on density and orientation of structures along the banks of rivers and lakes.

Kurzfassung

Wasserflächen weisen aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften im Vergleich zu festem Boden zahlreiche Unterschiede in klimatischer Hinsicht auf. Hierzu zählen die durch die geringe Rauigkeitslänge von Wasserkörpern hervorgerufene Beeinflussung des Windfeldes und des Massenaustausches, das veränderte Verhalten der Globalstrahlung und der Reflexion, die Ausbildung charakteristischer Luftfeuchtigkeits- und Evapotranspirationsfelder sowie die vorhandene Affinität zur Anlagerung und Bindung gas- und partikelförmiger Luftinhaltsstoffe.

Die Ausprägung der genannten Parameter ist dabei nicht nur von der Größe und der Form des Wasserkörpers abhängig, sondern im wesentlichen auch von seinem Typus, was zu einer Unterscheidung in offene Fließgewässer und geschlossene stagnierende Wasserflächen führt. Anhand einiger Modellstudien werden die klimatischen Wohlfahrtswirkungen offener und geschlossener Gewässer für den urban-industriellen Raum in Abhängigkeit von der Dichte und Ausrichtung der Randbebauung beschrieben.

Schlagworte

Gewässer, Stadtklima, Randbebauung, Windzirkulation, Planungsmodelle.

Einleitung

Städtische Agglomerationsgebiete beeinflussen im Vergleich zu ihrem unbebauten Umland in vielfältiger Weise das Mikro- und Mesoklima.

Verursacht wird diese als »Stadtklima« bekannte Modifikation durch die großflächige Umgestaltung der natürlichen Bodenoberfläche (LANDSBERG 1981, KUTT-
LER 1988).

Hierbei spielen das Ausmaß der Versiegelung, die Anordnung und Struktur der Bausubstanz und die Lage abgasemittierender Gewerbebetriebe eine ebenso große

1 Herrn Prof. Dr. rer. nat. Detlef Schreiber zu seinem 65. Geburtstag gewidmet

Rolle wie der Verlauf und die Breite von Straßenzügen sowie die Dichte und die Zusammensetzung des Kfz-Verkehrs.

Die von der Stadtbevölkerung überwiegend als nachteilig empfundenen bioklimatischen und lufthygienischen Auswirkungen lassen sich insbesondere während des Vorherrschens austauscharmer Wetterlagen verstärkt beobachten.

Ziel einer stadtoökologisch orientierten Planung sollte es daher sein, den Anteil und die Qualität naturbelassener Ausgleichsflächen in den urban-industriellen Verdichtungsräumen zu vergrößern. Dieser Vorsatz dürfte jedoch nachträglich in den seltensten Fällen zu realisieren sein.

Aus diesem Grunde erscheint es für Abwägungsprozesse im Planungsbereich notwendig, die in Städten bereits vorhandenen natürlichen bzw. quasinatürlichen Flächen, wie Park- und Grünanlagen, Luftleitbahnen sowie Still- und Fließgewässer daraufhin zu untersuchen, in welchem Maße diese zu einer Verbesserung des Bioklimas und der Lufthygiene beitragen und wie derartige Erkenntnisse in die Planung künftiger Bauvorhaben einbezogen werden können.

Über die als günstig einzustufenden klimaökologischen Auswirkungen von Grünflächen und die Wirkung von Luftleitbahnen in Stadtgebieten liegen bereits verschiedene Untersuchungen vor (z.B. von v. STÜLPNAGEL 1987, HORBERT et al. 1983, FUKUOKA et al. 1979, BARLAG & KUTTLER 1991).

Arbeiten hingegen, die sich mit den klimatischen Nah- und Fernwirkungen innerstädtischer Gewässer auf die bebaute Umgebung beschäftigen, sind in der Fachliteratur nur spärlich zu finden. Auch in neu geschaffenen Forschungsprojekten der öffentlichen Hand zum Bereich »Stadtökologie« sind solche Fragestellungen bisher nicht berücksichtigt worden.

Nachfolgend soll deshalb versucht werden, das klimatische Verhalten von Gewässern darzustellen, daraus resultierende Auswirkungen auf den städtischen Raum zu übertragen und anhand verschiedener Fallbeispiele die erzielten Ergebnisse zu diskutieren.

Klimatisch wirksame Parameter von Wasserkörpern

Das klimatische Verhalten eines Wasserkörpers unterscheidet sich im Vergleich zu natürlichem Boden oder zu Baustoffen wie sie in Städten überwiegend verwendet werden, in vielfacher Hinsicht (Tab. 1):

Bezüglich der strahlungsklimatischen Aspekte kann festgestellt werden, daß in einen Wasserkörper die auftreffende Globalstrahlung in Abhängigkeit seines Trübungsgrades, der Wellenlänge der einfallenden Strahlung und des Sonnenstandes mehr oder weniger tief eindringt und deshalb von einem relativ großen Volumen absorbiert werden kann.

Aufgrund der sich bei einem Sonnenstand von über 30 Grad im kurzwelligen Bereich mit $\alpha = 0,03$ bis $0,1$ und im langwelligen Bereich mit $\alpha = 0,04$ ergebenden geringen Albedowerten verhalten sich Wasserkörper annähernd wie Schwarzstrah-

Tab. 1 *Physikalische und klimatische Eigenschaften von Gewässern unter Berücksichtigung ihrer Lage im städtisch bebauten Raum (aus Zusammenstellungen bei TOMCZAK 1939, REITER 1955, GEIGER 1961, BUSCH und KUTTLER 1990, OKE 1990)*

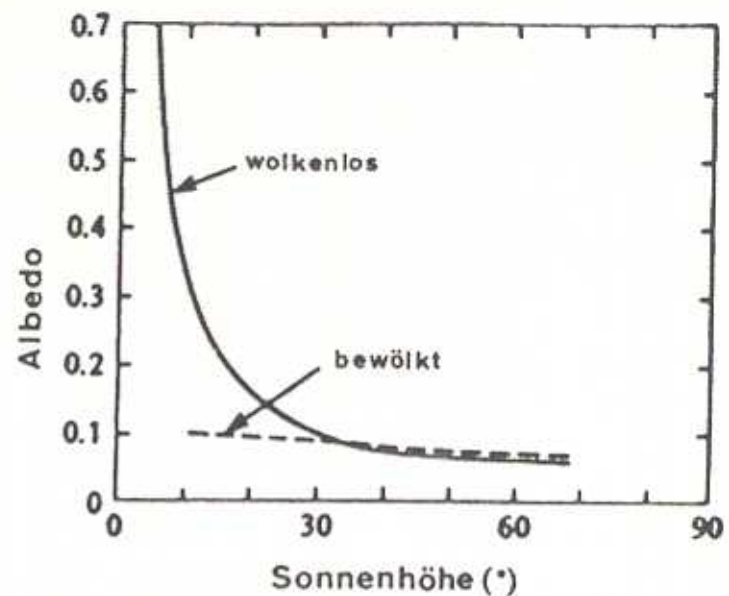
<u>Parameter</u>	<u>typische Werte bzw. Eigenschaften</u>
Strahlung	kann in Abhängigkeit von Sonnenstand, Wellenlänge und Trübungsgrad des Wassers mehr oder weniger tief eindringen
Strahlungsabsorption	im kurzwelligen Bereich 90 - 97 %, im langwelligen Bereich 95 %
Albedo	<u>gerichtete Reflexion</u> : niedrig bei Einstrahlungswinkeln kleiner 30°, groß bei Einstrahlungswinkeln größer 30°; <u>diffuse Reflexion</u> : unabhängig von den Einstrahlungswinkeln niedrig
Oberlicht	durch spiegelnde Reflexion
Unterlicht	durch Streustrahlung an den Wassermolekülen und ggf. durch Reflexion am Gewässergrund
Wärmespeicherfähigkeit	hoch; Wasser: 4,2 kJ/kg K, Beton: 0,9 kJ/kg K
Wärmeleitfähigkeit	gering; Wasser: 0,6 W/m K, Beton: 4,6 W/m K
Oberflächentemperatur-schwankung (Δt)	abhängig von der Tiefe (T) $\Delta t = T^{-1/4}$
BOWEN-Ratio (B)	niedrig; Wasser: - 0,2; bebautes Gebiet: 1-2
Massenaustausch	durch Reibungs- und Konvektionsaustausch
Rauhigkeit (z_0)	sehr gering; z_0 Wasser = 1-2 cm, kaum Reibungswiderstände; z_0 Stadtgebiet = 1-3 m
Oaseneffekt	Verbrauch an latenter Energie (LE) größer als Strahlungsbilanz (Q); Ausgleich durch advective Zufuhr von sensibler Energie (H) aus bebauter Umgebung
Randeffekt	Einfluß des Ufers auf das Gewässer und umgekehrt, z. B. durch Pflanzen
Lokalzirkulation	hängt von der Größe des Gewässers ab und von der Bebauungsdichte des Uferbereichs; tagsüber eher wahrscheinlich als nachts
Luftmassentransport	bei Schwachwindlagen durch Mitführgeschwindigkeit des Fließgewässers
Verdunstung (LE)	hoch; bei Windrichtung parallel zur Längsachse des Gewässers jedoch deutlich niedrigere Verdunstung als bei Windrichtung senkrecht dazu
Lage im bzw. zum Stadtgebiet	kann als Luftleitbahn Frischluftzufuhr aus dem Umland begünstigen aufgrund geringer Reibungswiderstände der Oberfläche
Platzhaltereffekt	da diese Fläche nicht für weitere Verdichtung des Stadtgebietes zur Verfügung steht

ler. Sie stellen somit außerordentlich gute Absorber von Strahlungsenergie dar (OKE 1990). Bei Sonnenhöhen unter 30 Grad steigt der Anteil der direkten Reflexion exponentiell an, während sich derjenige der indirekten Reflexion in Abhängigkeit vom Sonnenstand nur wenig ändert (Abb. 1). Bei tiefstehender Sonne kann deshalb z.B. für bebaute Uferbereiche sowohl durch spiegelnde Reflexion in Form des »Oberlichts« als auch durch Streustrahlung an den Wassermolekülen in Form des »Unterlichts« ein zusätzlicher Strahlungsgewinn resultieren (GEIGER 1961). Paradox erscheint in diesem Zusammenhang, daß bei maximaler Strahlungsabsorption die Tagstemperaturamplituden an der Oberfläche von Gewässern mit ausreichender Tiefe nur gering ausgeprägt sind. Dieses ist u.a. zurückzuführen auf:

- o den Massenaustausch, d. h. auf den durch Konvektion und Advektion verursachten Ersatz kühleren Oberflächenwassers durch wärmeres Wasser aus tieferen Schichten,
- o die relativ große spezifische Wärme, deren Wert mit 4,2 kJ/kg K über viermal größer ist als die von Beton mit 0,9 kJ/kg K sowie

Abb. 1

Zusammenhang zwischen Sonnenhöhe und Albedo einer Wasseroberfläche für bewölkte und wolkenlose Tage über dem Ontario-See (nach NUNEZ et al. 1972, aus OKE 1990).



- o die geringe Wärmeleitfähigkeit, die für Wasser nur 0,6 W/m K beträgt, für Beton jedoch mit 4,6 W/m K den 7,5 fachen Wert erreicht.

Von den in der Energiebilanz zusammengefaßten Energietransporten innerhalb von Wasserkörpern und durch deren Grenzflächen zur Umgebung erfolgt der größte Teil des Energieaustausches bei Strahlungswetterlagen über den turbulenten latenten Wärmetransport (LE) und den turbulenten fühlbaren Wärmetransport (H).

Ein zahlenmäßiger Vergleich der beiden Größen zeigt für Gewässer mit hinreichender Tiefe, daß rund 80% der Energie über die latente Wärme, d. h. die Verdunstung, und 20% über die sensible Wärme transportiert werden können. Das BO-WEN-Verhältnis ($\beta = H/LE$) erreicht deshalb für Gewässer Werte von $\beta \ll 1$ (OKE 1990).

Für den angrenzenden bebauten Raum können in Abhängigkeit von der jeweiligen Oberflächennutzung um bis zu eine Größenordnung höhere β -Werte auftreten (GARSTANG et al. 1975). Dieses ist darauf zurückzuführen, daß im bebauten Gebiet der sensible Wärmetransport aufgrund fehlender Vegetation oder anderer evaporationsbereiter Oberflächen die entscheidende Energieaustauschgröße ist und nicht der latente Wärmetransport. Die für letzteren nicht benötigte Energie wird deshalb als sensible Wärme und somit auch für den daraus resultierenden städtischen Wärmeinseleffekt zur Verfügung gestellt.

Zum Zeitpunkt des nachmittäglichen Eintretens der höchsten Wasser- und Lufttemperaturen erreichen die Wasserdampfättigung an der Wasseroberfläche und das Sättigungsdefizit in der Luft — mithin ihr »Dampfhunger« — höchste Werte. Das bedeutet, daß die Evaporation der Wasseroberfläche ein Maximum erreicht. Aufgrund des hierdurch bedingten Wärmeverlustes stellt sich in der Mittagszeit die oberste Wasserschicht etwas kühler dar als die unmittelbar darunterliegende Schicht (GEIGER 1961).

Die kühlere Wasseroberfläche läßt im Vergleich zur bebauten Umgebung einen »Oaseneffekt« entstehen, der sich dadurch auszeichnet, daß der Verbrauch an latenter Energie über der Wasseroberfläche größer ist als der Zahlenwert der für das Gewässer

berechneten Strahlungsbilanz. Die zusätzlich verbrauchte Energie über der Wasseroberfläche wird durch advective Zufuhr sensibler Wärme aus dem bebauten Gebiet kompensiert. So konnten KATAYAMA et al. (1987) im Rahmen von Untersuchungen zum Energietransport im Stadtgebiet von Fukuoka, Japan, über einem 12 ha großen See inmitten der bebauten Stadtfläche einen fühlbaren Wärmestrom von -200 W/m^2 feststellen, der die gleiche Größenordnung erreichte, wie der über der bebauten Fläche gemessene fühlbare Wärmetransport, der $1/3$ der Globalstrahlung ausmachte.

Einen Einfluß auf die Höhe der Verdunstung hat nicht nur die Temperatur des Gewässers, sondern u.a. auch seine Form und — insbesondere — bei länglichen Wasserkörpern, deren Längs- und Querachsenlage zur Hauptwindrichtung.

Da die Verdunstung mit wachsender Entfernung vom Luv-Ufer und in Abhängigkeit vom Turbulenzgrad (n) abnimmt (Abb. 2), spielt es bei langgezogenen Gewässerformen für die Menge des Wasserdampftransportes in die bebaute Umgebung hinein eine Rolle, ob der Wind parallel oder senkrecht zur Längsachse des Gewässers weht.

Herrscht eine Luftströmung in paralleler Richtung zur Längserstreckung des Gewässers vor, so nimmt nach Abb. 3 die Verdunstung, z.B. bei einem 100 mal so langen wie breiten Gewässer auf fast die Hälfte (60%) desjenigen Wertes ab, den man für eine Luftströmung erhält, die parallel zur Querachse der Wasseroberfläche gerichtet ist.

Will man z.B. den Feuchtetransport in die angrenzende bebaute Umgebung berechnen bzw. abschätzen, so ist eine windrichtungsabhängige Verdunstungsmessung notwendig. Besteht bei der Planung eines neu anzulegenden innerstädtischen Gewässers die Möglichkeit der Einflußnahme auf die Gestaltung seiner Form und Lage, so sollte man zur Erhöhung eines Wasserdampftransportes in das bebaute Gebiet hinein die Gewässerlängsachse parallel zu derjenigen Hauptwindrichtung orientieren, über die überwiegend trockene Warmluft herantransportiert wird.

Die Größe eines Gewässers bestimmt auch dessen Randeffekte, worunter die mikroklimatischen Verhältnisse an der Grenzfläche zwischen Gewässerrand und Uferbereich verstanden werden.

Bei kleinen seichten Wasserkörpern können diese, z.B. für die Wärmeleitung zwischen Wasser und Gewässerboden sowie zwischen Wasser und Ufer, eine wichtige Rolle in der Energiebilanz spielen.

Sind die Uferbereiche eines Gewässers mit Vegetation bestanden, so kann diese — je nach Bestandsgröße und -aufbau — bei Schönwetterperioden im Vergleich zur freien Wasseroberfläche mehr als jene verdunsten. Nach einer Zusammenstellung bei LARCHER (1976) verdunsten Schilf- und Röhrichtbestände nach Messungen in Deutschland annähernd zweimal soviel Wasser wie der Jahresniederschlagssumme entspricht. Eine Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit im Uferbereich ist dann letztenendes auf die Transpiration der Ufervegetation und weniger auf die Evaporation der Wasseroberfläche zurückzuführen, wie WILLER (1950) für Phragmites-Bestände am Ufersaum des Müggelsees nachweisen konnte (Abb. 4).

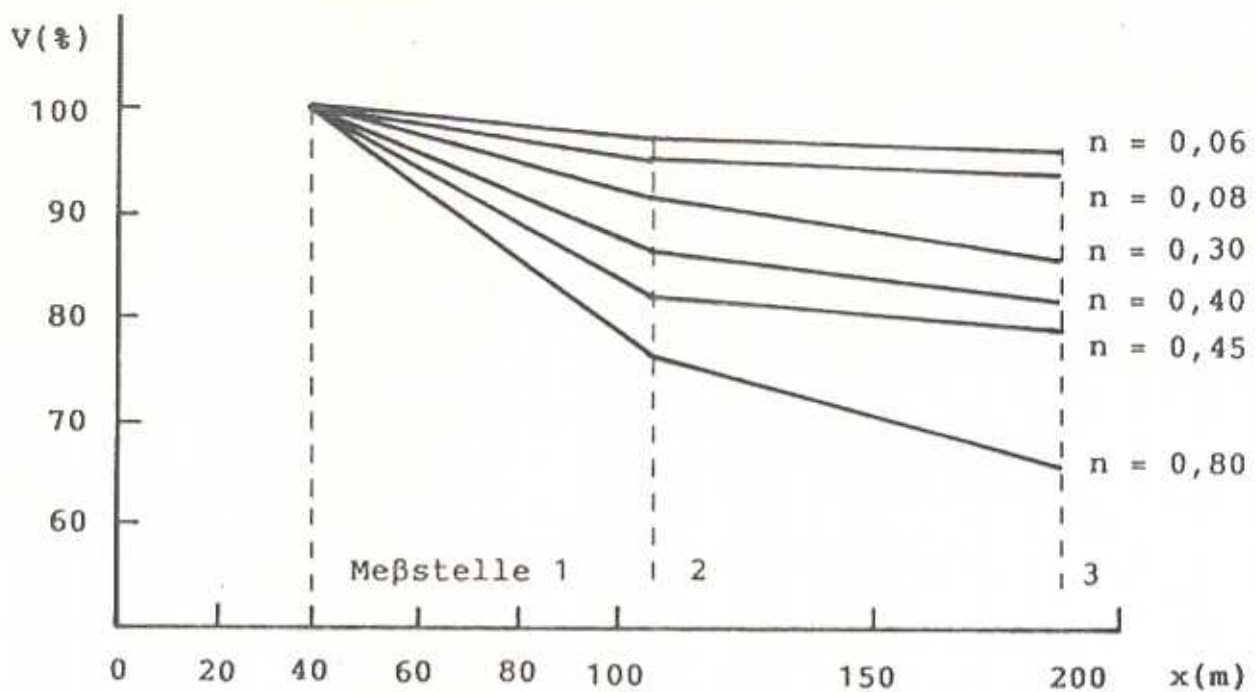


Abb. 2 Abnahme der Verdunstung mit wachsender Entfernung vom Luvufer, dargestellt in Prozenten des Betrages bei $x = 40$ m; n bezeichnet die Turbulenzzahl, wobei ein kleiner Wert einen hohen Turbulenzgrad, ein großer Wert einen niedrigen Turbulenzgrad angibt (nach TOMCZAK 1939)

Die Größe des vegetationsbestimmten und des durch die Wasseroberfläche hervorgerufenen Einflusses ist jedoch ferner abhängig von der den Randeffect mitbestimmenden Uferentwicklung. Im Sinne von THIENEMANN (1955, S. 21) wird hierunter das »Verhältnis der Uferlinie eines Gewässers zum Umfang eines seiner Fläche entsprechenden inhaltsgleichen Kreises« verstanden. Ein hoher Wert — mithin eine große Uferlänge — führt deshalb zu einer stärkeren Beeinflussung der genannten Komponenten als ein kleiner Wert.

Ob sich zwischen einem innerstädtischen Wasserkörper und seiner bebauten Umgebung bei strahlungsstarken Wetterlagen eine »Gewässer-/Stadtwindzirkulation« entwickelt — vergleichbar den im mesoskaligen Bereich zu beobachtenden Verhältnissen an Meeres- oder Seenküsten —, hängt von der Größe des Wasserkörpers ab.

Verfügt dieser über eine ausreichende Fläche und auch Tiefe, die eine im Tagesverlauf auftretende Oberflächentemperaturschwankung nicht zulassen, — nach GEIGER (1961) gilt dies für Seentiefen von 1 bis 2 m — dann sollte die Ausbildung eines solchen Systems zumindest tagsüber mit der Entwicklung eines in das bebauten Gebiet hineinwehenden »Gewässerwindes« als wahrscheinlich angenommen werden können. Nachts hingegen ist eher davon auszugehen, daß sich aufgrund der nur sehr geringen Abkühlung des Stadtkörpers und der relativ hohen Temperatur des Wasserkörpers kaum eine für die Entstehung eines »Stadtwindes« notwendige Temperaturdifferenz zwischen bebautem Gebiet und dem angrenzenden Wasserkörper aufbauen kann und deshalb die Voraussetzung eines abendlich einsetzenden »Stadtwindes« in Richtung See eher unwahrscheinlich sein dürfte.

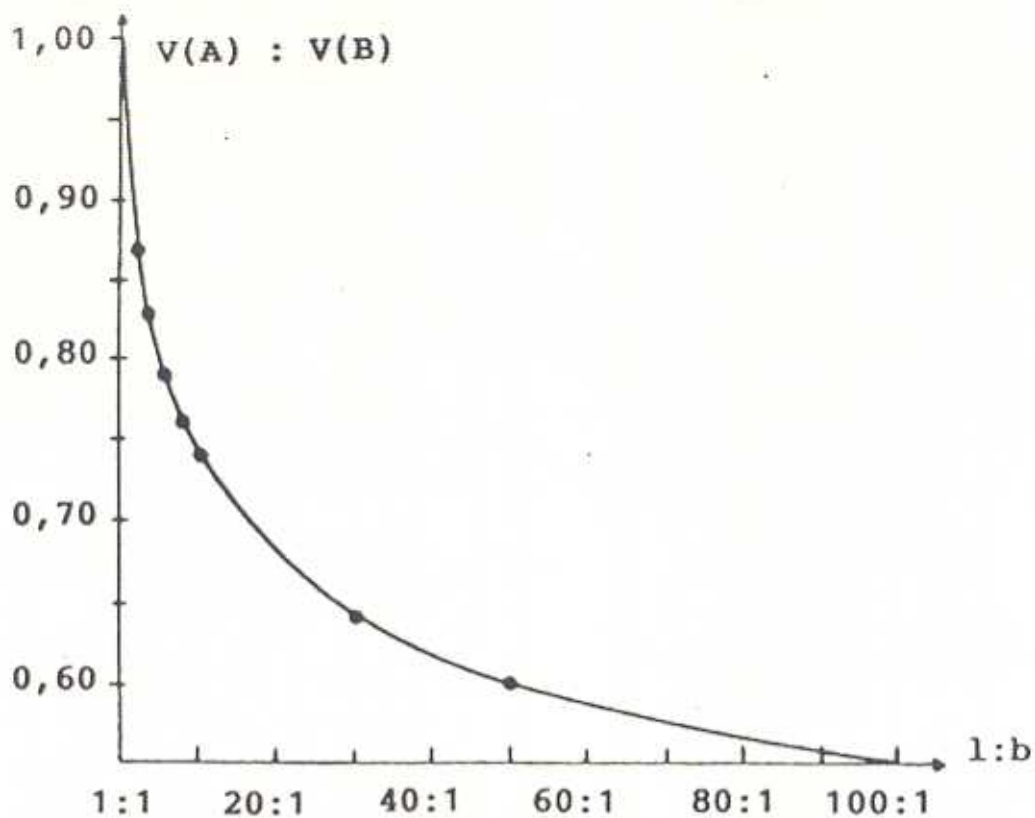


Abb. 3 Verhältnis der Verdunstung einer freien Wasserfläche $V(A) : V(B)$, wobei bei (A) der Wind parallel, bei (B) senkrecht zur Längsachse weht, in Abhängigkeit vom Verhältnis Länge : Breite des Sees ($l:b$) (nach TOMCZAK 1939).

Auf die Problematik einer von den Jahreszeiten beeinflussten Zirkulation, die durch das thermische Verhalten eines innerstädtischen Gewässers auf seine Umgebung verursacht wird, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden. Hinweise hierzu sind in den Arbeiten von FUKUOKA et al. (1979) sowie KIKUCHI (1971) enthalten.

Während gradientschwacher Wetterlagen setzen Wasseroberflächen wegen ihrer äußerst geringen Rauigkeitslängen einer Luftströmung kaum Reibungswiderstände entgegen. Für die Belüftung eines Stadtgebietes kann daher die Lage, Form und auch der Verlauf eines Gewässers im Hinblick auf seine Nutzung als Luftleitbahn für das Heranführen von Frischluft aus der unbebauten Umgebung eine wichtige Rolle bei austauscharmen Wetterlagen spielen.

Tagsüber kann sich — bei überwärmtem Stadtgebiet und relativ kühler Wasseroberfläche — hierdurch ein temperatursenkender Effekt im angrenzenden bebauten Gebiet einstellen.

Nachts hingegen dürfte dieser Einfluß aufgrund der im Vergleich zum kühlen Umland wärmeren Wasseroberfläche geschwächt werden, weil sich die herantransportierte Kaltluft beim Überströmen der Wasserfläche erwärmen wird und sich somit nur noch ein geringerer Kühleffekt für das Stadtgebiet ergeben dürfte.

Selbst wenn davon auszugehen ist, daß die vom Umland über das Wasser zuströmende Luft leicht erwärmt wird und sich deshalb eine gewünschte Abkühlung im

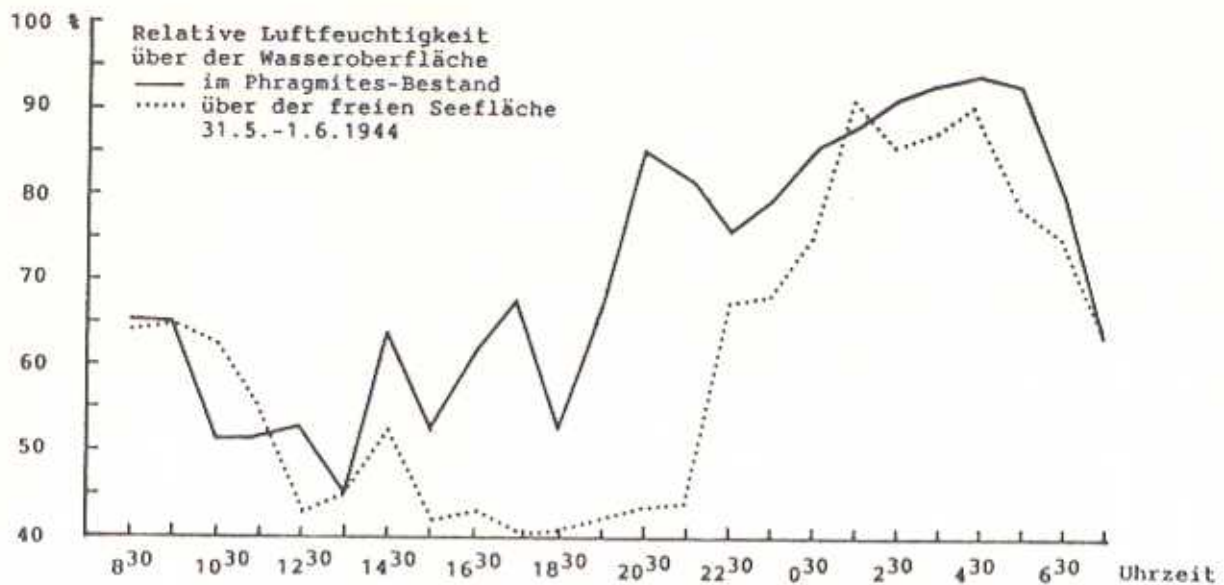


Abb. 4 Tagesgang der Luftfeuchtigkeit bei klarem Frühsommerwetter (Standort: Müggelsee) (nach WILLER 1950).

bebauten Gebiet nur gering auswirkt, ist in lufthygienischer Hinsicht ein solcher stadteinwärtsgerichteter Flurwind als außerordentlich positiv zu bezeichnen:

Denn ein biologisch intaktes Gewässer stellt keine relevante Emissionsquelle für Schadstoffe dar und übt im lufthygienischen Sinne einen Platzhaltereffekt aus. Es ist darüber hinaus — im Gegenteil — in Abhängigkeit von seiner Temperatur, seinem pH-Wert und den Stabilitätsverhältnissen innerhalb der Mischungsschicht über der Wasseroberfläche eine Senke für eine Vielzahl in der Luft enthaltener gas- und partikelförmiger atmosphärischer Spurenstoffe. LODGE (1979) führt aus, daß sich die Depositionsgeschwindigkeit von Teilchen des Submikrometerbereichs über einer Wasseroberfläche erhöht und erklärt diesen Effekt mit verstärktem Wachstum der Teilchen in der feuchten wassernahen Luft.

Aus diesem Grunde sind Luftströmungen, die dem Gewässerverlauf in das bebaute Gebiet folgen, von der Qualität her wesentlich höher einzustufen als solche, die durch breite Ein- und Ausfallstraßen mit entsprechender Freisetzung von Kfz-Emissionen oder über Eisenbahnschneisen als Luftleitbahnen in die Stadtgebiete führen.

Flüsse, die durch Städte fließen, können darüber hinaus bei gradientschwachen windarmen Wetterlagen in Strömungsrichtung zu einer Mitführung der wassernahen Luftschichten führen. REITER (1955) konnte durch Messungen über dem Inn nachweisen, daß während solcher Wetterlagen die Wasseroberfläche als »rauhe Grenzfläche« mit einem Rauigkeitsparameter z_0 von etwa 1 cm zu betrachten ist und daß der Mitführungseffekt der über dem Wasser liegenden Luftschicht sich bis in eine Höhe von 3 m erstreckt. Prinzipiell bestätigt werden diese Ergebnisse durch vergleichbare Untersuchungen am Main und Rhein, bei denen allerdings die durch die Mitführungsgeschwindigkeit der beiden Flüsse beeinflusste Luftschicht nur eine Höhe von maximal 1,5 m erreichte (WEGNER 1956). Bei höheren Windgeschwindigkeiten ($v > 5$ m/s) stellen sich mit $z_0 = 4 \times 10^{-6}$ cm (REITER 1955) schlagartig sehr kleine

Werte des Rauigkeitsparameters ein, so daß eine Mitführung der gewässernahen Luft nicht mehr zu beobachten ist.

Gerade bei austauscharmen Wetterlagen könnte dieser Effekt eine unterstützende Rolle beim An- und Abtransport von Luftmassen innerhalb von Stadtgebieten spielen.

Auswirkungen innerstädtischer Gewässer auf das Temperatur- und Feuchtefeld der Umgebung

Um qualitative und quantitative Aussagen zum lufttemperaturmindernden Einfluß eines innerstädtischen Gewässers auf seine bebaute Umgebung machen zu können, wurden im Deltagebiet des Ota-Flusses in Hiroshima, Japan, Lufttemperaturmessungen in Straßen vorgenommen, die senkrecht zu drei Flußarmen verlaufen (MURAKAWA et al. 1988).

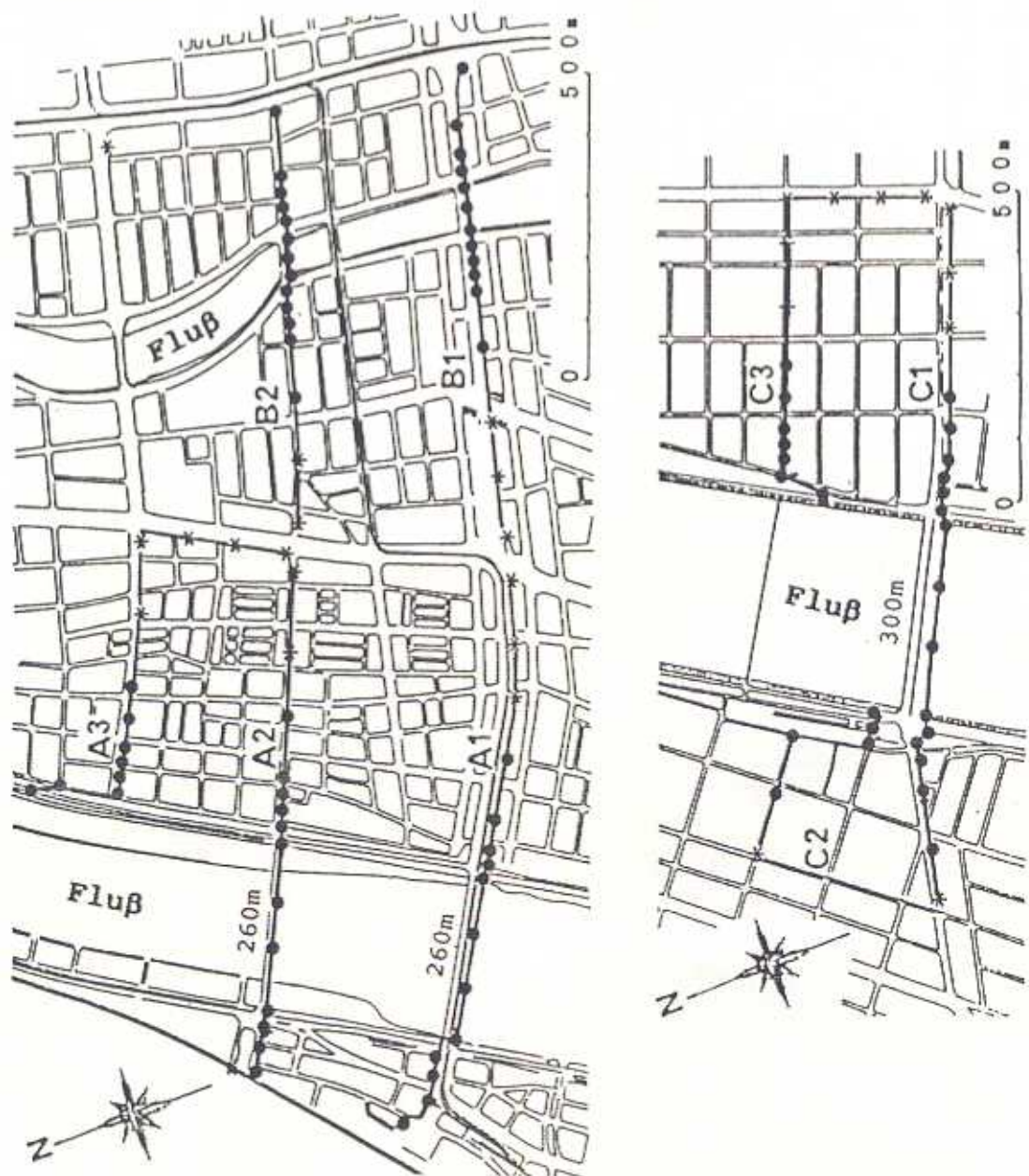


Abb. 5 Lage der Meßstellen und Profile im Stadtgebiet von Hiroshima, Japan (nach MURAKAWA et al. 1988).

Die Untersuchungen — ausnahmslos bei sommerlichen Strahlungswetterlagen durchgeführt — erfolgten sowohl in dicht als auch in aufgelockert bebauten, stärker durchgrüntem Stadtvierteln mit unterschiedlich breiten Straßen (10 m und 100 m) sowie unter Berücksichtigung dreier verschiedener Flußbreiten (56 m, 260 m und 300 m).

Die Lage und der Verlauf der Meßprofile sind Abb. 5 zu entnehmen.

Die Profile A1, A2, B1 und B2 lagen im Stadtzentrum, das Profil C verlief durch ein weniger dicht bebautes Vorstadtgebiet.

Die Straßenbreite für A1 und B1 belief sich auf 100 m, diejenige für A2 und B2 auf 10 m, wobei die beiden letztgenannten Traversen durch stärkeren Verkehr als die beiden erstgenannten charakterisiert waren.

Die Breite der Straßenschluchten besitzt, wie Abb. 6 zeigt, einen erheblichen Einfluß auf die Temperaturreduktion:

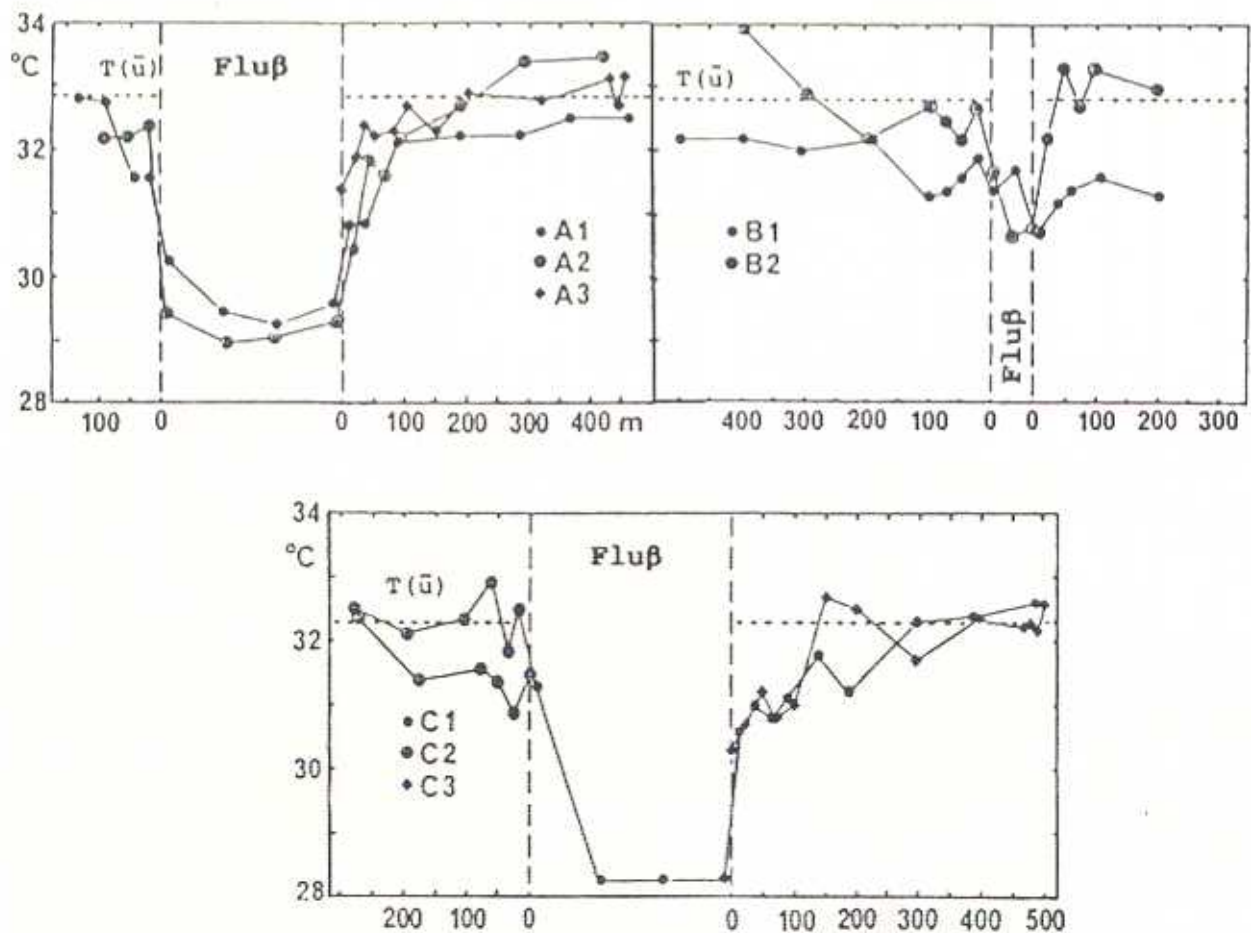


Abb. 6 Verlauf der Lufttemperaturen für die einzelnen Profile im Stadtgebiet von Hiroshima, Japan. $T(\bar{u})$ ist die mittlere Stadtgebietstemperatur (nach MURAKAWA et al. 1988).

Während in der 100 m breiten Straße (A1) ein solcher Effekt noch bis maximal 400 m tief in die bebauten Fläche hinein nachzuweisen war, stellte sich dieser in der

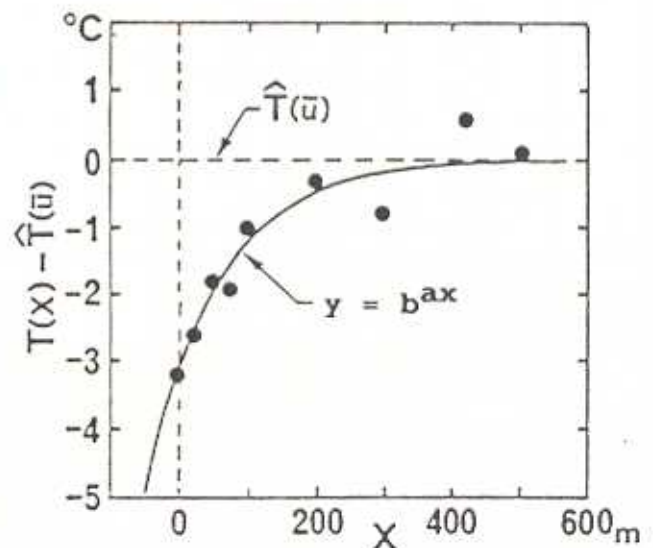
schmalen, stark befahrenen Straße (B1) nur bis zu einer Eindringtiefe von etwa 100 m ein.

Das in A3 dargestellte Temperaturprofil stellt insofern einen Spezialfall dar, als daß der Fluß innerhalb dieses Meßbereiches von einem 4,3 m hohen Damm eingefaßt ist und auch keine Brücke den Fluß — im Gegensatz zu den anderen Profilen — überspannt. Die temperaturmäßigende Wirkung des Flusses wird hierdurch verringert und reicht keine einhundert Meter in das bebauten Gebiet hinein. MURAKAWA et al. (1988) weisen darauf hin, daß ein lufttemperaturdämpfender Einfluß ohne das Vorhandensein des 4,3 m hohen Dammes etwa 70 m tiefer im bebauten Gebiet hätte nachgewiesen werden können.

Auch ein schmales Gewässer kann zu einer Dämpfung hoher Temperaturen in seiner Umgebung beitragen wie die Ergebnisse für Profil B1 zeigen, wonach sich um bis zu 1 K niedrigere Werte beiderseits des Flusses bis zu einer Eindringtiefe von etwa 200 m einstellen. Für schmalere Straßen, deren Meßwerte durch B2 und B3 repräsentiert werden, beschränkt sich dieser Einfluß allerdings nur auf etwa 50 m beiderseits des Gewässers.

Im Vergleich zum dicht bebauten Stadtgebiet wurden im aufgelockert bebauten und stärker durchgrüntes Gebiet (C1) Temperaturabsenkungen bis zu einer Entfernung von 200 m vom Fluß nachgewiesen.

Abb. 7
Reduktion der Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Entfernung zum Fluß (x) im Stadtgebiet von Hiroshima, Japan (nach MURAKAWA et al. 1988).



Für das Profil A2 wurde unter Berücksichtigung von Mittelwertberechnungen aller Meßperioden ein exponentieller Zusammenhang zwischen der durch den Fluß bedingten Temperaturreduktion und den entsprechenden Entfernungen vom Gewässer nachgewiesen. Wie sich zeigt (Abb. 7), kann in diesem Fall davon ausgegangen werden, daß in einer Straßenschlucht mit mittlerer Breite bei senkrechtem Verlauf zum Fluß in Ufernähe eine Dämpfung der Lufttemperatur von 3 K zu erwarten ist, während in einer Entfernung von 200 m nur noch von einem Wert von 0,5 K auszugehen ist.

Die Abhängigkeit der thermischen Verhältnisse von der Windrichtung dokumentiert Abbildung 8. So zeigte sich bei vorherrschendem »Flußwind«, mithin einer

Luftströmung in das bebaute Gebiet hinein, daß die Temperaturabnahme dort stärker ist und über eine größere Eindringtiefe verfügt als bei auftretendem »Stadtwind«.

Auch ein vertikaler thermischer Einfluß ließ sich während Strahlungswetterlagen bis etwa 20 m Höhe über dem Flußbett tagsüber nachweisen. Nachts hingegen stellte sich eine Temperaturreduktion zum bebauten Gebiet wegen der kaum vorhandenen Abkühlung des Flußwassers und der starken nächtlichen Ausprägung der städtischen Wärmeinsel nicht ein.

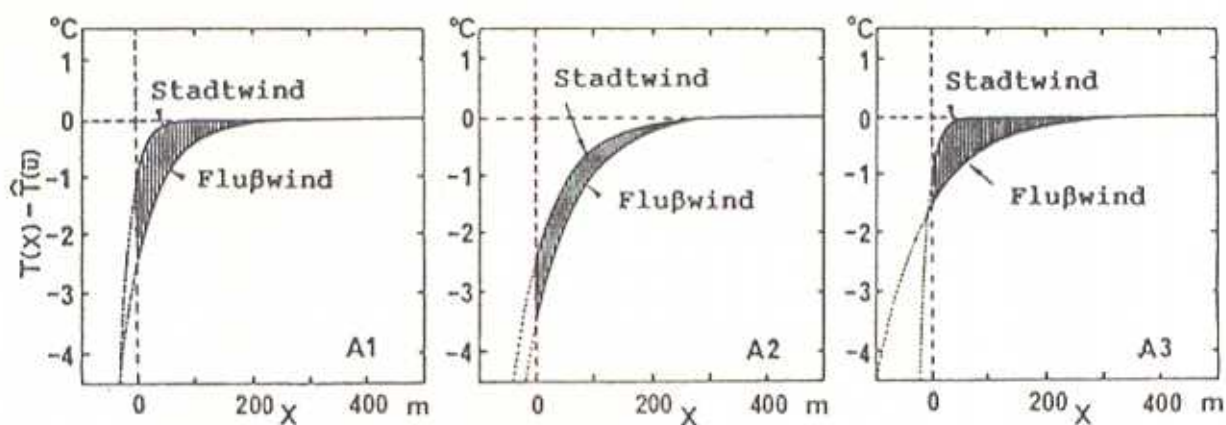


Abb. 8 Reduktion der Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Entfernung zum Fluß (x) und der Windrichtung (Stadtwind, Flußwind) im Stadtgebiet von Hiroshima, Japan (nach MURAKAWA et al. 1988).

Anhand der Auswertung von über einem Jahr durchgeführter Messungen zeigt sich, daß während wolkenloser Sommertage der stärkste temperaturmindernde Effekt von einem Gewässer auf die bebaute Umgebung ausgeht, während bei bedecktem Himmel und im Winter kaum von einem Einfluß gesprochen werden kann (Abb. 9).

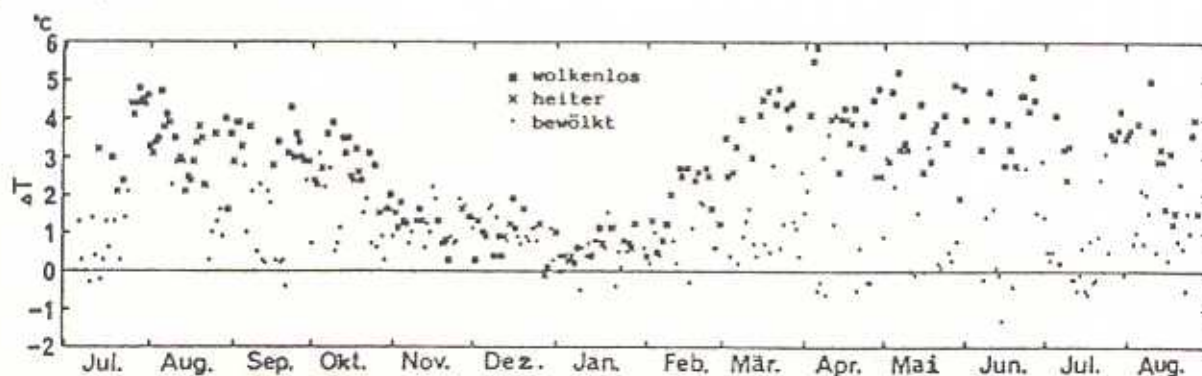


Abb. 9 Jahresgang der Lufttemperaturdifferenzen zwischen Fluß und städtisch bebautem Gebiet für wolkenlose, heitere und bewölkte Tage im Stadtgebiet von Hiroshima, Japan (nach MURAKAWA et al. 1988).

Neben den thermischen Beeinflussungen eines Gewässers auf seine Umgebung lassen sich auch im hygrischen Bereich Veränderungen ermitteln, wie NARITA (o.J.) anhand von Windkanaluntersuchungen belegen konnte, die auf möglichst realitätsnahen Annahmen der bodennahen Austauschverhältnisse im Stadtgebiet von Hiroshima basierten.

Aus diesem Grunde wurden die Modellversuche für entsprechende Bebauungstypen und -strukturen durchgeführt, wobei ausschließlich parallel zum Flußlauf erfolgende Luftströmungen — wie sie im Küstengebiet von Hiroshima als Land-/See-windzirkulationen häufig auftreten — berücksichtigt wurden.

Die Windkanaluntersuchungen erfolgten jeweils an Traversen, die senkrecht vom Flußufer in das bebaute Gebiet hineingelegt waren.

Als Maß für den Wasserdampftransport wurde die Schwankung der relativen Luftfeuchtigkeit gewählt. Exemplarisch sei an dieser Stelle ausschließlich auf diejenigen Ergebnisse eingegangen, die unter Berücksichtigung verschieden breiter Straßenschluchten und aus der unterschiedlichen Lage von Baublocks in Ufernähe resultierten.

Abbildung 10 zeigt, daß ein Wasserdampftransport in dicht bebautes Gebiet (S1) nur bis maximal 50 m nachzuweisen ist, während in weniger dicht bebautem Gebiet (S3) noch ein Einfluß durch das Gewässer festzustellen ist, der etwa 150 m tief in das Stadtgebiet hineinreicht.

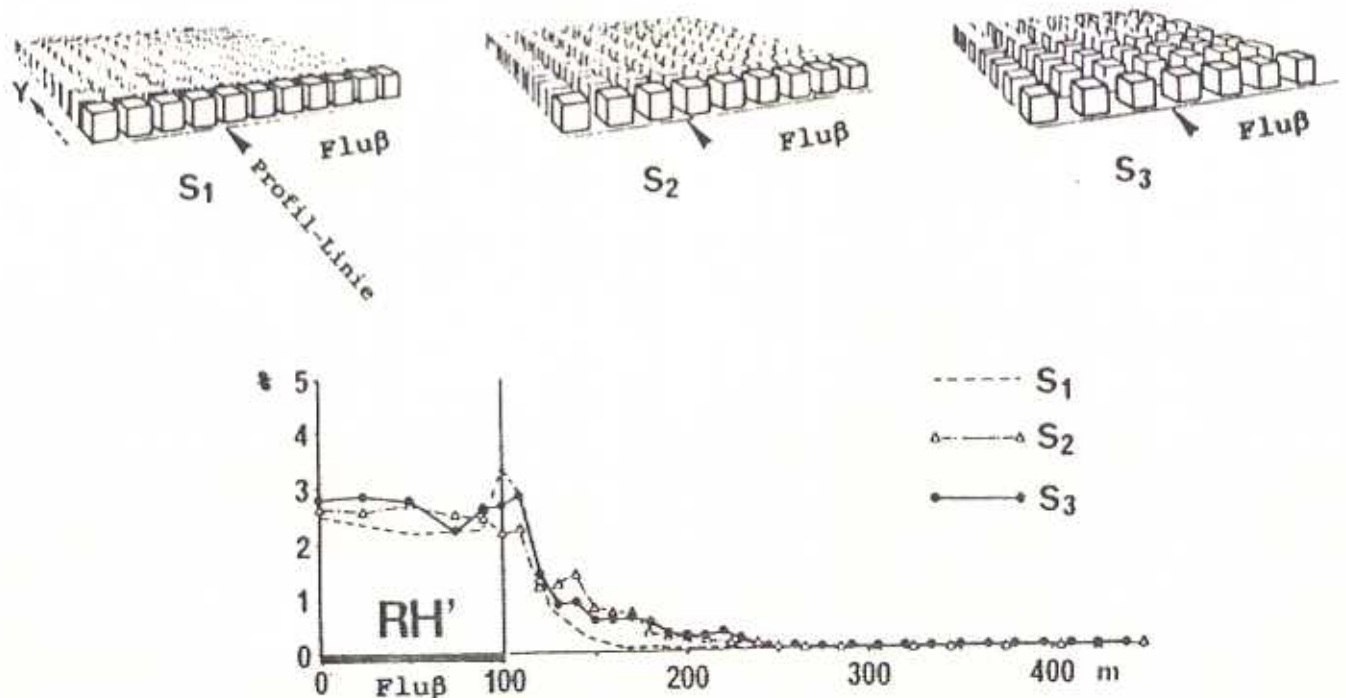


Abb. 10 Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Bebauungsdichte nach Windkanaluntersuchungen (nach NARITA o. J.).

Eine besonders günstige Verteilung der vom Fluß ausgehenden Luftfeuchtigkeit zeigt sich bei aufgelockert angeordneten Gebäudekomplexen, deren Längsachsen senkrecht zum Gewässerrand liegen. Wie man Abb. 11 entnehmen kann, lassen sich Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit und damit ein Feuchtetransport bis über 300 m weit in das bebaute Gebiet hinein verfolgen. Im Gegensatz dazu wird der hygrische Einfluß des Gewässers bei einer Blockbebauung, deren Längsachse parallel zum Flußufer verläuft, außerordentlich stark beeinträchtigt, so daß im Fall des Beispiels H0 (Abb. 11) nur von einer Eindringtiefe von etwa 50 m auszugehen ist.

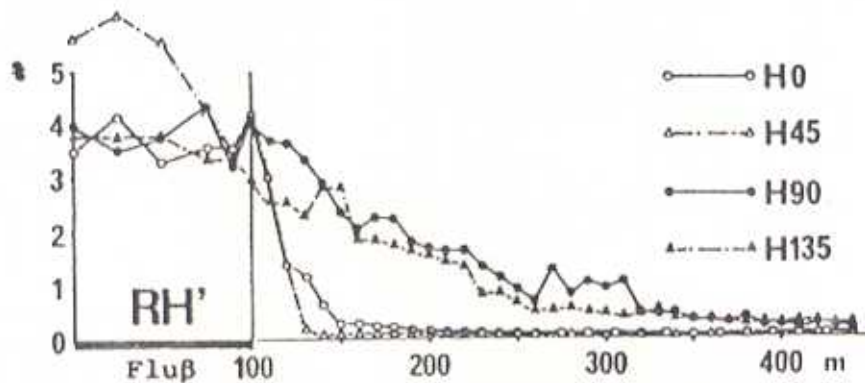
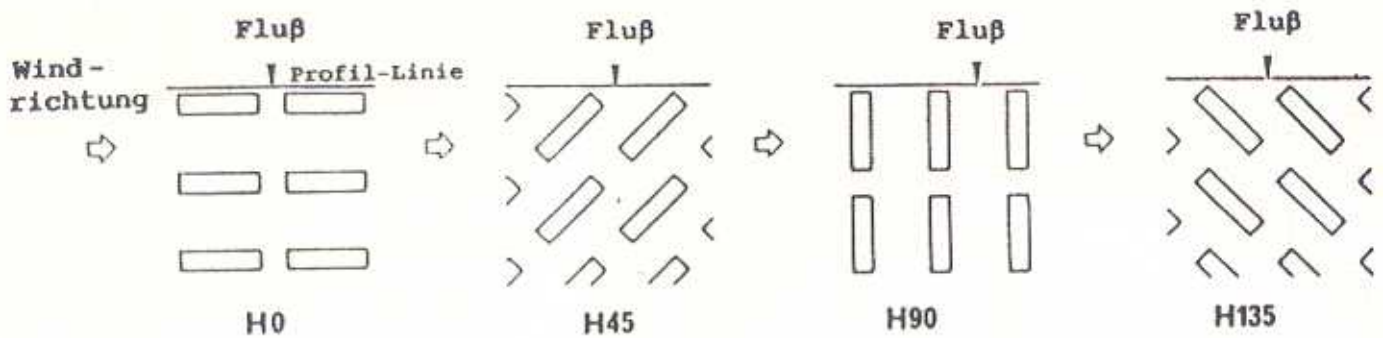


Abb. 11 Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Gebäudestruktur nach Windkanaluntersuchungen (nach NARITA o. J.).

Oben wurde bereits auf die Luftleitfunktion von Gewässern für Stadtgebiete hingewiesen. KIESE und PETERS (1990) konnten anhand ihrer Untersuchungen, die am Aasee in der Stadt Münster erfolgten, feststellen, daß der zwischen 300 und 500 m breite und etwa 3 km lange, sehr weit von SW in das Stadtgebiet hineinreichende See als Frischluftbahn für die im Umland entstehende Kaltluft dient.

Tagsüber erfolgt bei entsprechender SW-Strömung ein Transport kühler Luft über die — im Vergleich zum Stadtgebiet — kühle Seeoberfläche. Nachts hingegen wird die Kaltluft des Umlandes über der dann relativ zur Umgebung warmen Seeoberfläche leicht erwärmt und mit Wasserdampf angereichert, so daß der »bioklimatische Wert« für das Stadtzentrum etwas geschmälert wird. Es muß aber mit KIESE und PETERS (1990, S. 74) darauf hingewiesen werden, daß daraus nicht gefolgert werden darf, daß »der Aasee somit für das Stadtklima (im Tagesverlauf) wertneutral sei«. Im Gegenteil, es ist auf die bereits oben genannten Gründe hinzuweisen, wonach derartige Gewässer wegen ihrer »glatten« Oberfläche und der darauf beruhenden Erhöhung der Windgeschwindigkeit eine wichtige Funktion als Frischluftschneise für die innerstädtische Belüftung übernehmen.

Schlußbemerkung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß aufgrund der wenigen bisher durchgeführten Untersuchungen zum Problem der klimatischen und bioklimati-

schen Auswirkungen innerstädtischer Gewässer auf ihre bebaute Umgebung ein erhöhter Forschungsbedarf im Rahmen der Stadtklimatologie und Stadtökologie besteht.

Die dargestellten Ergebnisse belegen nicht nur den positiven mikro- und mesoklimatischen Einfluß im Hinblick auf die Verbesserung der thermischen und hygri-schen Verhältnisse, sondern machen insbesondere auch deutlich, daß innerstädti-schen Gewässern ein besonderes Gewicht als Frischluftbahn während austauschar-mer Wetterlagen im Rahmen der bodennahen Austauschprozesse in Stadtgebieten zufällt.

Literatur

- BARLAG, A. B. & W. KUTTLER (1991): The significance of country breezes for urban planning — In: *Energy and buildings* 15, Nr. 3-4: 291-297.
- BUSCH, P. & W. KUTTLER (1990): *Klimatologie Teil I. — Grundriß Allgemeine Geographie*, 2. Aufl., Paderborn (Schöningh), 96 S.
- FUKUOKA, Y., K. NARITA & K. MATSUURA (1979): Urban climate and airquality of Hiroshima city.— *Chirikagaku* 32 (12): 24-32.
- GARSTANG, P.D., G. TYSON & D.EMMITT (1975): The structure of heat islands. — *Reviews of Geophysic and Space Physics*, 13: 139-165.
- GEIGER, R. (1961): *Das Klima der bodennahen Luftschicht. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie*. 4. Aufl. — Braunschweig (Vieweg & Sohn), 646 S.
- HORBERT, M., A. KIRCHGEORG & A. v. STÜLPNAGEL (1983): *Ergebnisse stadtklimatischer Untersuchungen als Beitrag zur Freiraumplanung*. — Texte 18/83 Umweltbundesamt, Berlin.
- KATAYAMA, T., J. TSUTSUMI, A. ISHII, M. NISHIDA, & M. HASHIDA (1987): Observations of heatflux in an urban area with a large pond by kytoons.— 7th Intern. Conf. on Wind Engineering, Aachen, Vol. 1: 149-158.
- KIESE, O. & A. PETERS (1990): *Stadtklimauntersuchung Münster: Die klimatische Funktion der Grünflächen und Grünelemente*.— Inst. f. Geogr. d. Westf. Wilh. Univ. Münster. — Unveröffent. Manuskript.
- KIKUCHI, R. (1971): Distribution of air temperature over the river at the downstream of the Natori and the Abukuma.— In: *Annals of the Tohoku Geogr. Assoc. (Tohoku-Chiri)*, 26 (1): 22-29
- KUTTLER, W. (1988): Spatial and temporal structures of the urban climate — a survey.— In: GREVEN, K. and J. LÖBEL (eds.) (1988): *Environmental Meteorology; Proc. Intern. Symp. Würzburg, 29.09.- 01.10.1987*: 305-334.
- LANDSBERG, H. E. (1981): *The Urban Climate*.— Int. Geophys. Ser. Vol. 28 (Academic Press), New York, 275 S.
- LARCHER, W. (1976): *Ökologie der Pflanzen*. — Stuttgart (Ulmer), 320 S.
- LODGE, J.P. Jr. (1979): An estimate of deposition velocities over water.— *Atm. Env.* 12: 973-974.
- MURAKAWA, S., T. SEKINE, K. NARITA & D. NISHINA (1988): Study on the effect of river on thermal environment in urban area.— *Nihon Kenchiku Gakkai* 396: 25-34.
- NARITA, K. (o. J.): *Windtunnel experiments about the effects of building arrangement on the extent of river effect in urban area*. — Unveröffent. Manuskript.
- OKE, T. R. (1990): *Boundary Layer Climates*.— London, New York (Methuen), 435 S.
- REITER, E. R. (1955): Der mitführende Einfluß einer Flußoberfläche auf die darüber liegenden Luftschichten.— In: *Arch. für Met., Geoph., Biokl. A. Bd. 8, H. 4*: 384-396.
- v. STÜLPNAGEL, A. (1987): *Klimatische Veränderungen in Ballungsgebieten unter besonderer Berücksichtigung der Ausgleichswirkung von Grünflächen, dargestellt am Beispiel von Berlin (West)*. — Diss. TU Berlin, 173 S.
- THIENEMANN, A. (1955): *Die Binnengewässer in Natur und Kultur. Eine Einführung in die theoretische und angewandte Limnologie*.— Berlin, Göttingen, Heidelberg (Springer), 156 S.
- TOMCZAK, G. (1939): *Verdunstung freier Wasserflächen*.— *Veröffentlichungen des Geophys. Inst. d. Univ. Leipzig. Bd. XII, H. 2*, Leipzig: 111-174.

- WEGNER, K. O. (1956): Windprofilmessungen über Flußoberflächen bei schwachem Wind.- Arb. d. Met. Inst. Univ. Köln.
- WILLER, A. (1950): Kleinklimatische Untersuchungen im Phragmites-Gelege.- In: Intern. Assoc. of Theor. and Appl. Limnology, 10: 566-574.