

Klimawandel und Städte - Stadtklimatischer Einfluss von Bäumen

Prof. Dr. Andreas Matzarakis, Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Werthmannstr. 10, D-79085 Freiburg,

email: andreas.matzarakis@meteo.uni-freiburg.de

1 EINLEITUNG

Obwohl Stadtflächen weltweit derzeit nur 0.2 % der Erdoberfläche beanspruchen (FEZER, 1995), ist die Bedeutung des Stadtklimas ansteigend und nicht nur im Hinblick auf die Klimawandeldiskussion. Wesentliche Gründe dafür liegen zum einem in der Zunahme der Weltbevölkerung, zum anderen im Anwachsen der Anzahl der in Ballungsgebieten lebenden Menschen und der damit verbundenen stärkeren Urbanisierung von natürlichen Landoberflächen sowie in der Ausprägung des zusätzlichen Treibhauseffektes in Städten.

Der Begriff des Stadtklimas ist, wie HELBIG ET AL. (1999) erläutern, nicht an den politischen Begriff der Stadt gebunden, da dieser hauptsächlich durch die Einwohnerzahl bzw. die Verleihung der Stadtrechte vorgegeben ist. Es gab früher keine eindeutige Definition des Begriffs „Stadtklima“. Erst im Jahr 1981 hat die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) durch ihre Kommission für Klimatologie das Stadtklima wie folgt definiert (WMO, 1983):

Das Stadtklima ist das durch die Wechselwirkung mit der Bebauung und deren Auswirkungen (einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen) modifizierte Klima.

Daraus geht hervor, dass durch die Charakteristika der Landnutzungsart Stadt das großräumig vorgegebene Klima und die lufthygienische Hintergrundsituation des Raumes, in dem sich eine Stadt befindet, verändert werden. Das bedeutet auch, dass das Stadtklima prinzipiell kein Schönwetterphänomen ist, auch wenn die urbane Wärmeinsel als bekanntestes Stadtklimaphänomen bei schönem Wetter, d.h. bei windschwachem Strahlungswetter, am markantesten ausgeprägt ist.

Eine Stadt besitzt spezifische meteorologische Eigenschaften (VDI, 1988; FEZER, 1995). Sie ist:

- Strömungshindernis,
- Gebiet mit unregelmäßig erhöhter aerodynamischer Oberflächenrauigkeit,
- Wärmeinsel (bzw. Wärmearchipel),
- erhebliche Emissionsquelle

(Emissionen von gasförmigen Luftverunreinigungen, Aerosolen und Wasserdampf aus den Schadstoffquellengruppen Verkehr, Industrie, Kraftwerke, Gewerbe und Hausbrand).

In Erweiterung eines Ansatzes von LOWRY (1977) lässt sich das komplexe meteorologische und lufthygienische Wirkungsgefüge „Stadt“ wie folgt beschreiben:

$$M_{i,t,x} = C_{i,t,x} + L_{i,t,x} + U_{i,t,x} \quad (1)$$

$M_{i,t,x}$: Messwert oder berechneter Wert einer meteorologischen oder lufthygienischen Größe

bei der Wetterlage i zur Zeit t am Ort x in der Stadt,

$C_{i,t,x}$: Regionalklima-Anteil

großräumiges Wetter, großräumige Witterung, großräumiges Klima
lufthygienische Hintergrundbelastung

bei der Wetterlage i zur Zeit t am Ort x in der Stadt,

$L_{i,t,x}$: Lokalklima-Anteil

Einflüsse durch die natürliche, d.h. nicht urbane, Bodenbedeckung und durch die topografischen Verhältnisse

bei der Wetterlage i zur Zeit t am Ort x in der Stadt,

$U_{i,t,x}$: Stadtklima-Anteil

Einflüsse durch die eigentliche Urbanisierung

bei der Wetterlage i zur Zeit t am Ort x in der Stadt,

Daraus wird deutlich, dass alle Stadtklimaphänomene und -prozesse von

- der Wetterlage,
- der Zeit,
- dem Standort in der Stadt

abhängen.

Infolge der unterschiedlichen Oberflächenbedeckungstypen und Baukörperstrukturen bilden sich innerhalb des Mesoklimaraumes „Stadt“ verschiedene urbane Mikroklimata aus, wie z.B. das Mikroklima in Straßenschluchten, das Mikroklima in verschiedenen Typen von Innenhöfen, in Parkanlagen, innerhalb von Blockbaubereichen oder innerhalb von Einfamilienhaussiedlungen. Mikroklimata waren schon häufig das Objekt von experimentellen und theoretischen Untersuchungen zum Stadtklima (siehe Zusammenstellungen bei OKE, 1974, 1979, 1983, 1990, MATZARAKIS, 2001).

Für viele Zwecke der Angewandten Stadtklimatologie (u.a. Berücksichtigung des Stadtklimas als Planungsfaktor oder bei der Bewertung des Stadtklimas) ist es sinnvoll, das Stadtklima in seine zwei bedeutendsten Komponenten zu unterteilen (MAYER, 1992):

- *thermische Komponente:*

Sie umfasst die gesamte Energetik der Stadtluft, d.h. Strahlung, fühlbare und latente Wärme, Gebäudewärme, Bodenwärme, anthropogen erzeugte Wärme.

- *lufthygienische Komponente:*

Sie umfasst die chemisch und physikalisch bedingte Qualität der Stadtluft auf dem Weg von der Emission (Freisetzung von Luftverunreinigungen) über die Transmission (Ausbreitung und Verdünnung von Luftverunreinigungen sowie ihre eventuelle Umwandlung) und Immission (Konzentrationen der

Luftverunreinigungen am Einwirkungsort in der Stadtatmosphäre) zur Deposition (Ablagerung von Luftverunreinigungen infolge gasförmiger, nasser oder feuchter Prozesse).

Zwischen beiden Komponenten bestehen Verbindungen, so z.B. über den turbulenten Luftmassenaustausch.

In den gemäßigten Breiten (z.B. Mitteleuropa) hat die lufthygienische Komponente des Stadtklimas meistens eine größere Bedeutung als die thermische Komponente gehabt. Allerdings bekommt die thermische Komponente im Zuge des Klimawandels einen höheren Stellenwert.

Die Bedeutung von Bäumen und des „Grüns in der Stadt“ ist schon seit Beginn der stadtklimatischen Forschung auf der Tagesordnung und eines der Felder, die immer im Vordergrund stehen. Generell, ist viel über die qualitativen Wirkungen von Bäumen in der Stadt, aber wenig über die quantitative Bedeutung und Wert von Stadtbäumen und Grünflächen (KUTTLER, 2004a, b, MATZARAKIS, 2001, 2005, STREILING UND MATZARAKIS, 2003) bekannt.

2 URSACHEN UND PHÄNOMENE

Untersuchungen zum Stadtklima lassen sich prinzipiell unter den zwei folgenden Aspekten durchführen:

- a) Eine Stadt stellt eine Störung im physikalischen und chemischen Zustand der atmosphärischen Grenzschicht dar, deren Ausmaß und die dafür verantwortlichen Prozesse zu beschreiben, modellieren und prognostizieren sind (physikalisch/chemische Stadtklimatologie).
- b) Das Stadtklima stellt einen Faktor in der Stadtplanung und -sanierung dar (planungsrelevantes Stadtklima).

Planungsrelevant und somit bedeutend für die Grünplanung sind nach REISS-SCHMIDT (1987) diejenigen thermischen und lufthygienischen Phänomene des Stadtklimas, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten bzw. Ausprägungen

- von den allgemeinen Klimaverhältnissen (Mesoklima),
- der großräumigen lufthygienischen Situation (Hintergrundbelastung)

signifikant abweichen und

- Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Gesundheit von Menschen, auf die Lebensbedingungen von Pflanzen und Tieren sowie auf Gebäude oder andere Anlagen technisch-baulicher Art und deren Benutzung haben.

Daraus folgt, dass die Planungsfaktoren „thermische Komponente des Stadtklimas“ (Klima) und „lufthygienische Komponente des Stadtklimas“ (Luft) in einer für das Wohlbefinden und die Gesundheit der Menschen relevanten Weise zu berücksichtigen sind. Die dabei anzuwendende Methodik stammt aus dem Fachgebiet Human-Biometeorologie, das sich mit den Wirkungen von Wetter, Witterung, Klima und Luftqualität auf den menschlichen Organismus beschäftigt.

Ziel der Berücksichtigung der thermischen und lufthygienischen Komponente bei Stadtplanungs- und -sanierungsmaßnahmen ist es, ein ideales Stadtklima zu erreichen. Auf einem interdisziplinär besetzten Workshop des Fachausschusses Biometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft im Jahr 1988 (MAYER, 1989) wurde das ideale Stadtklima wie folgt definiert:

Das ideale Stadtklima

- ist ein räumlich und zeitlich variabler Zustand der Atmosphäre in urbanen Bereichen,
- bei dem sich möglichst keine anthropogen erzeugten Schadstoffe in der Luft befinden,
- und den Stadtbewohnern in Gegend (charakteristische Länge: ca. 150 m, charakteristische Zeit: ca. 5 Minuten) eine möglichst große Vielfalt an Atmosphärenzuständen (Vielfalt der urbanen Mikroklimata) unter Vermeidung von Extremen (z.B. extreme Wärmebelastung) geboten wird.

Da ein solches „ideales Stadtklima“ realistisch nicht erreicht werden kann, besteht die Aufgabe der angewandten bzw. planungsrelevanten Stadtklimatologie darin, diesem Ideal durch die Empfehlung von Maßnahmen zur Minimierung der thermischen und lufthygienischen Belastungen sowie zu stadtklimatisch wirksamen Umfeldverbesserungen möglichst nahezukommen bzw. mindestens ein „tolerables Stadtklima“ zu erreichen.

Aus den energetischen Kenngrößen der für Städte typischen Materialien und Stoffe sowie aus weiteren Merkmalen von Städten wie die charakteristische Anordnung urbaner Baustrukturen oder Verbrennungsprozesse resultieren gegenüber dem ländlichen Umland Modifikationen am unteren Rand der Stadtatmosphäre, die sich auf den Impuls-, Strahlungs-, Wärme-, Wasser- und Stoffhaushalt auswirken. Sie sind in der Tab. 1 in allgemeiner Form zusammengestellt.

Die urbane Wärmeinsel und andere stadtklimatische Phänomene haben vielfältige Auswirkungen auf Organismen (u.a. MATZARAKIS, 2001, KUTTLER, 2004a, b), Stoffe (u.a. TRAUP, 1993), Materialien (u.a. MANIER, 1998) und den Energieverbrauch (u.a. SHEAFFER UND REITER, 1988; MCPHERSON, 1992). Dazu zählen z.B. erhöhte Wärmebelastung für Menschen im Sommerhalbjahr, Verlängerung der jährlichen Vegetationszeit für Pflanzen, Erhöhung der Verdunstung und Reduzierung der Heizkosten. Die Auswirkungen der urbanen Wärmeinsel sind qualitativ schon seit längerem bekannt, jedoch sind sie bisher nicht immer quantifiziert.

Der Begriff urbane Wärmeinsel bezieht sich grundsätzlich auf die thermische Charakterisierung einer Stadt, wenn sie als Ganzes im Vergleich zum ländlichen Umland betrachtet wird. Im Fall einer stärkeren innerstädtischen Flächendifferenzierung lassen sich einzelne Wärmeelemente (u.a. OKE UND EAST, 1971; GERTIS ET AL., 1983; BAUMGARTNER ET AL., 1985; BRÜNDL ET AL., 1987) nachweisen, die unter den Bezeichnungen urbanes Wärmemosaik (AHRENS, 1981) oder urbanes Wärmearchipel (ERIKSEN, 1976; MAYER, 1987) zusammengefasst werden.

Tab. 1: Stadtmerkmale und dadurch bedingte Modifikationen am unteren Rand der Stadtatmosphäre gegenüber dem ländlichen Umland (nach MAYER, 1986, 1987)

Stadtmerkmale	Modifikationen gegenüber dem ländlichen Umland
Typische Anordnung urbaner Baustrukturen (Hochbauweise mit zahlreichen vertikalen Flächen verschiedener Exposition; weitgehend versiegelter Untergrund)	größere absorbierende und emittierende Fläche für Strahlungsflüsse, Mehrfachreflexion der solaren Strahlung, Abschattungseffekte, Verminderung vegetationsbedeckter bzw. offener Flächen, Wasserableitung in die Kanalisation, reduzierte Verdunstung, größere aerodynamische Oberflächenrauigkeit, erhöhte Turbulenz, Düseneffekte
Eigenschaften der vorwiegenden Materialien (Ziegel, Beton, Asphalt, Kies, Granit, Glas, Metalle, ...)	veränderte Reflexion der solaren Strahlung, veränderte Emission der terrestrischen Strahlung, größere Wärmekapazität, größere Wärmeleitfähigkeit, Wasserundurchlässigkeit
Verbrennungsprozesse (Verkehr, Industrie, Kraftwerke, Gewerbe, Hausbrand, ...)	Freisetzung von Wärme, Freisetzung von Wasserdampf, Freisetzung von Luftverunreinigungen, geringere Durchlässigkeit der Stadtatmosphäre für solare Strahlung, stärkere Absorption und Emission von langwelliger Strahlung in der Stadtatmosphäre, erhöhte photochemische Aktivität

Als Resümee einer Untersuchung über die energetischen Grundlagen der urbanen Wärmeinsel stellte OKE (1982) die Stadt-Kennzeichen mit ihren energetischen Auswirkungen zusammen, die für die Ausbildung der urbanen Wärmeinsel in der *Urban Canopy Layer (UCL)* verantwortlich sind (Tab. 2).

Sie lassen sich auch auf das urbane Wärmearchipel in der *UCL* übertragen. Allerdings ließ sich generell keine Reihenfolge dieser Stadt-Kennzeichen ableiten. Es ergab sich lediglich, dass die Ausbildung von urbaner Wärmeinsel bzw. urbanem Wärmearchipel in der *UCL* am nachhaltigsten von der größeren Horizonteinengung, d.h. dem reduzierten *sky view factor*, sowie der größeren Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der typischen Baumaterialien in der Stadt abhängen. Diese Ergebnisse von OKE (1982) wurden von OKE ET AL. (1991) über Modellrechnungen zur urbanen Energiebilanz spezifiziert:

Tab. 2: Energetische Ursachen der urbanen Wärmeinsel bzw. des urbanen Wärmearchipels in der *Urban Canopy Layer* (nach OKE, 1982)

Stadt-Kennzeichen	Energetische Auswirkungen
<i>I. Straßenschlucht-Geometrie</i>	
a) größere Oberfläche	Mehrfachreflexion von kurzwelliger Strahlung ⇒ größere Absorption von kurzwelliger Strahlung
b) größere Horizonteinengung	geringere effektive Ausstrahlung
c) verminderte Windgeschwindigkeit	geringerer turbulenter Wärmetransport
<i>II. Luftverunreinigung</i>	
größere atmosphärische Gegenstrahlung	
<i>III. Wärmeemissionen von Gebäuden und aus Verbrennungsprozessen</i>	
anthropogen erzeugte Wärme	
<i>IV. Baumaterialien</i>	
a) größere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität	erhöhte Wärmespeicherung
b) größere Wasserundurchlässigkeit	geringere Verdunstung (geringerer turbulenter Strom latenter Wärme)

- a) Die Auswirkungen der Straßenschlucht-Geometrie auf die langwellige Strahlung reichen schon allein aus, um eine nächtliche Wärmeinsel zu erzeugen.
- b) Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität von städtischen und ländlichen Flächen können ebenfalls allein eine Wärmeinsel verursachen. Die Werte des ländlichen Umlands sind für die maximale Intensität der urbanen Wärmeinsel und ihre jahreszeitliche Variabilität verantwortlich.
- c) In allen, außer extremen, Klimaten dominieren die Faktoren a) und b) bei der Ausbildung der urbanen Wärmeinsel. Dabei sind die Faktoren a) und b) gleichbedeutend.
- d) Die Freisetzung anthropogener Wärme von Gebäuden hat selbst bei kalter Witterung nur eine untergeordnete Wirkung auf die urbane Wärmeinsel.
- e) Die Einflüsse von urbanem „Treibhauseffekt“ und unterschiedlichem Emissionsvermögen in der Stadt und der ländlichen Umgebung auf die Ausbildung der urbanen Wärmeinsel sind relativ unbedeutend.
- f) Durch zunehmende Himmelsbedeckung sowohl über der Stadt als auch über dem ländlichen Umland wird die Intensität der urbanen Wärmeinsel reduziert. Nebel über dem ländlichen Umland, aber nicht über der Stadt, führt zum Abbau der urbanen Wärmeinsel und sogar zum Aufbau einer schwachen urbanen Kälteinsel.

Im Jahresmittel liegt die Intensität der urbanen Wärmeinsel in der *UCL* zwischen 1

und 3 °C. Um die mittlere Intensität der urbanen Wärmeinsel etwas zu veranschaulichen, sei ein zugegebenermaßen sehr einfacher Vergleich für die Stadt Freiburg in mittlerer nördlicher geografischer Breite gebracht, wobei nur die bodennahe Lufttemperatur, jedoch kein Relief usw. berücksichtigt ist:

- Eine mittlere jährliche Wärmeinsel von 1 °C entspricht den klimatischen Bedingungen eines ländlichen Ortes, der sich ca. 170 km südlich von Freiburg etwa auf der Höhe des Nordufers des Genfer Sees befindet.
- Eine mittlere jährliche Wärmeinsel von 3 °C entspricht den klimatischen Bedingungen eines ländlichen Ortes, der sich ca. 560 km südlich von Freiburg bzw. 70 km nördlich von Rom befindet.

Die maximale Intensität der urbanen Wärmeinsel (UHI_{max}) in der *UCL* liegt deutlich über der mittleren Intensität der urbanen Wärmeinsel (UHI_{mit}) in der *UCL*. UHI_{max} tritt in der Nacht bei windschwachem Strahlungswetter (u.a. MATZARAKIS, 2001) kurzzeitig auf, d.h. innerhalb von 30 Minuten. In Städten, die in mittlerer geografischer Breite liegen, wird UHI_{max} wenige Stunden (3 bis 5 Stunden) nach Sonnenuntergang beobachtet (u.a. LANDSBERG, 1981; MATZARAKIS, 2001), wenn

- der Verlust an fühlbarer Wärme von städtischen Oberflächen minimal ist (windschwache Wetterlage),
- das ländliche Umland rasch Strahlungsenergie verliert (wolkenloser Himmel),
- die Freisetzung von Wärme, die urbane Straßenschluchten tagsüber speichern, groß ist.

Daraus resultiert insgesamt, dass die urbane Wärmeinsel dann ihr Maximum erreicht, wenn die Abkühlungsrate der Luft in der ländlichen Umgebung größer als im urbanen Raum ist (u.a. HAEGER-EUGENSSON UND HOLMER, 1999).

Neben der urbanen Wärmeinsel existieren andere Phänomene wie die urbane Feuchteinsel und kleinskalige Modifikationen des Klimas, die ebenfalls eine Rolle beim Stadtklima und dessen Einflusses spielen (u.a. CHANDLER, 1965, KUTTLER, 2004a, b, MATZARAKIS, 2001, MAYER ET AL., 2003, CHANDLER, 1967). In dem vorliegenden Artikel wird allerdings auf den Einfluss der Bäume bzw. Vegetation in der Stadt eingegangen (u.a. BARADAS ET AL., 1999, BASSUK UND WHITLOW, 1987, BAUMÜLLER ET AL., 1993, BERNATZKY, 1982, MATZARAKIS UND STREILING, 2004, Mc PHERSON et al., 1997, STREILING UND MATZARAKIS, 2005).

3 ROLLE VON BÄUMEN FÜR DAS STADTKLIMA

Die Vegetation, insbesondere der Wald, übt eine große Wirkung auf das Stadtklima aus. So hat z.B. die Waldluft 200 bis 1000mal weniger Staub und Rußpartikel als die Luft in Städten. Auch zeigen sich in innerstädtischen Parkanlagen deutlich geringere Staubbelastungen als in den bebauten Gebieten. Dies unterstreicht die hohe stadtklimatische Bedeutung von innerstädtischen Grünflächen. (www.staedtebauliche-klimafibel.de). Alle atmosphärischen Wirkungskomplexe, mit denen der Einfluss der atmosphärischen Bedingungen auf Menschen quantifiziert wird, sind davon betroffen (thermisch, lufthygienisch, aktinisch, Lärm und Gerüche) (VDI, 1998, MATZARAKIS, 2001, MATZARAKIS et al., 2008).

Eine Vielzahl von Untersuchungen bestätigen, dass Bäume unterschiedliche und

überwiegend positive Eigenschaften auf das Klima haben (BAUMBACH, 1994, HELBIG et al., 1999, BRACK, 2002, DWYER ET AL., 1992, GULYÁS ET AL., 2006, HEISLER, 1986, MATZARAKIS, 2001, MATZARAKIS und STREILING, 2004, MC PHERSON, 1998, NOWAK, 1993a, b, 1994, 2000, 2001, NOWAK und CRANE, NOWAK ET AL., 2001, 2006, YANG ET AL., 2005).

Aus der Vielzahl der Untersuchungen kann bezüglich der Eigenschaften Folgendes zusammengefasst werden (u.a. BRACK, 2002, verändert):

- Dämpfung von Klimaextremen,
- Minderung der urbanen Wärmeinsel,
- Speicherung und Absonderung von Kohlenstoff (Kohlenstoffdioxid),
- Reduktion von Lärm,
- Verbesserung der Luft- und Wasserqualität,
- Minderung der Oberflächentemperaturen von geparkten Autos,
- Reduktion von Abgabe von Teer/Asphalt,
- Reduktion von Energieverbrauch für Heizen und Kühlen,
- Reduzierter Bedarf in der Investition von neuen Kraftwerken,
- Ästhetischer Beitrag, Schönheitsbild, optische Annehmlichkeit,
- Architektonische Wertsteigerung von Gebäuden,
- Wertsteigerung von Grundstücken/Anwesen,
- Erhöhung der Privatsphäre, Barriere gegen unangenehme/stressige Situationen,
- Blendschutz,
- Erhöhung der Lebensqualität,
- Erhöhung des Tourismus,
- Schaffung von Möglichkeiten für Erholung und Freizeit,
- Beitrag zur menschlichen Gesundheit und Erholung, Reduktion von Belastungen und Reduktion des Unbehaglichkeitsgrades,
- Anlocken von Vögeln und anderen Lebensformen,
- Bilden Lebensraum für außergewöhnliche und generelle Hölzer.

Es zeigt sich, dass diese Auswirkungen je nach Jahres- und Tageszeit und verbunden mit meteorologischen Kenngrößen positiver als auch negativer Natur sein können (NOWAK, 1998). Neben den positiven Effekten haben Stadtbäume

nachweislich Auswirkungen auf das Stadtklima und auch auf die Psyche des Menschen.

Im Nachfolgenden werden nur die speziellen Auswirkungen auf die thermische und lufthygienische Komponente des Stadtklimas betrachtet.

4 AUSWIRKUNGEN VON BÄUMEN AUF DAS STADTKLIMA

Generell gilt, dass durch Transpiration und Abschattung Bäume die Lufttemperatur vermindern. Dies ist an heißen Tagen als positiv zu bewerten, bei kühlen Wetterlagen eher als negativ. Da Bäume bis zu 500 Liter Wasser pro Tag verdunsten können, haben sie natürlich auch Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit, wobei die Anzahl der Bäume entscheidend ist. Dabei kann die Leistung der Bäume zwischen einer für den Menschen angenehmen Erhöhung der Luftfeuchte, als auch der Erzeugung unangenehmer Schwüle schwanken. Durch ihre Struktur und Form erhöhen Stadtbäume die Rauigkeit der Oberfläche und verringern die Windgeschwindigkeit. An sehr heißen Tagen, die meistens durch schwache Winde begleitet werden, kann ein Baumbestand den Abtransport von warmen Luftmassen fast zum Erliegen bringen. An Tagen mit kalter, windiger Witterung ist eine windverringende Wirkung allerdings erwünscht, die allerdings nicht vorhanden ist. Über den Einfluss auf die thermische Komponente des Stadtklimas, durch die Verminderung der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit, die Interzeption von Strahlung und die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit, haben Bäume auch eine indirekte Wirkung auf die lufthygienische Komponente (HELBIG et al., 1999, MATZARAKIS et al., 2001).

Über die Stomata der Blätter, aber auch über die Stammoberfläche, nehmen Bäume gasförmige Luftverunreinigungen auf (NOWAK et al. 2002). Dies können Stickoxide (NO_x), Ozon (O₃), Schwefeldioxid (SO₂), Kohlenmonoxid (CO) und flüchtige organische Komponenten (VOC) sein (MAYER et al., 1994). Für den Stoffwechsel benötigen Bäume große Mengen des klimarelevanten Gases Kohlenstoffdioxid (CO₂). Dabei wird ein großer Teil davon in der Pflanze gespeichert und Sauerstoff als Stoffwechselendprodukt tagsüber abgegeben. Stadtbäume in den USA speichern 700 Millionen Tonnen Kohlenstoff mit einer jährlichen Speicherungsrate von 22.8 Millionen Tonnen (NOWAK, 2001). Je nach Spezies ist die Filterungsrate gegenüber der Abgabe flüchtiger organischer Komponenten (VOC) ausgeglichen, höher, aber auch niedriger. Das bedeutet, dass Bäume durch die Abgabe von VOC's Ozon bildendes Potenzial besitzen. Bei Pappeln (*Populus spp.*), Eichen (*Quercus spp.*) und Weiden (*Salix spp.*) ist die Wirkung bezüglich der VOC's negativ (Abgabe höher als Filterung), bei Kirsche (*Prunus spp.*) und Linde (*Tilia spp.*) ist die Wirkung positiv.

Untersuchungen in den USA über die Filterwirkung von Stadtbäumen und Stadtwäldern auf Stickoxide (NOWAK, 2001) ergaben Folgendes: Die hier erzielten Verbesserungen der Luftqualität bezüglich Stickoxiden variierte zwischen 0,1 % bis 0,6 %. Dabei zeigte sich, dass die höchsten Werte in Städten mit großen Waldflächen und/oder vielen Einzelbäumen erreicht wurden. Beispielsweise in Portland mit 0,6 % Luftqualitätsverbesserung bei einem Bedeckungsprozent der Baumkronen von 42,0 %. Die geringsten Werte erreichte Tucson/Arizona mit einer Luftqualitätsverbesserung von 0,1 %, bei einem Bedeckungsprozent der Baumkronen von 13,7 % (Sturm, 2006).

Eine Besonderheit stellen Stadtwälder dar, die aufgrund von Struktur und Pflanzenflächenindex als geschlossene Bestände gelten. Hier konnten kurzfristig (1 Stunde) Werte von 8 % gemessen werden. Die Untersuchung von Einzelbäumen ergab, dass die Filterwirkung unter den verschiedenen Spezies variiert (Sommer, 2006). Als besonders effektiv bezüglich Stickoxid zeigten sich *Ulmus procera*, *Tilia europea*, *Populus deltoides* und *Platanus occidentalis*. Die Leistung von Stadtbäumen und -wäldern in den USA hinsichtlich der Filterung von Stickoxiden wird mit 97.000 t/a angegeben, was einem wirtschaftlichen Wert von 660 Millionen US\$ entspricht (NOWAK et al., 2006).

Die Filtrerrate für Kohlenstoffmonoxid ist im Gegensatz zur Reduktion von CO₂ deutlich geringer. Die Verbesserung der Luftqualität hinsichtlich CO liegt in Stadtwäldern (NOWAK, 2000) bei nur 0.03 %. Die gesamte Filterung von Kohlenstoffmonoxid in den USA beträgt aber immerhin 22.600 Tonnen pro Jahr. Baumarten, die besonders viel CO aufnehmen können, sind u.a. *Tilia americana*, *Fagus grandifolia*, *Tilia tomentosa*, *Fagus sylvatica* und *Ulmus procera*.

Es stellte sich heraus, dass Stadtbäume durchaus Auswirkungen auf Ozonkonzentrationen haben. Einzelbäume haben dabei eine geringere Leistung als Stadtwälder. Geschlossene Bestände in Stadtwäldern können Ozonkonzentrationen um bis zu 16 % (kurzfristig) reduzieren, Solitärbäume um 0,45 % (NOWAK, 2000). In den USA entfernen Stadtbäume und Stadtwälder pro Jahr 305.100 Tonnen Ozon aus der Luft. Leider hat diese dem Menschen dienende Leistung Nachteile für die Baumindividuen, die aufgrund der hohen Reaktivität des O₃-Moleküls Schäden in den Blattorganen erleiden. *Ulmus procera*, *Tilia europea*, *Fagus grandifolia* und *Fagus sylvatica* sind nach NOWAK (2000) besonders gute Ozon-Filter. Die Toleranz dieses Gas gegenüber ist bei diesen Baumarten glücklicherweise hoch, Schäden an Blattorganen halten sich demnach in Grenzen (Sommer, 2006).

Hohe Konzentrationen des giftigen Gases Schwefeldioxid wirken sich ebenso wie das Ozon schädlich auf Lunge und Bronchien aus und verursachen Kopfschmerzen und Übelkeit. Das bei Verbrennungsprozessen entstehende SO₂ wird bei der Filterung durch Stadtbäume in ähnlich hohen Konzentrationen wie das O₃ aus der Luft entfernt. Solitärbäume oder Parkbestände reduzieren den Schwefeldioxidgehalt um 0,43 %. Kurzfristig (1 Stunde) können in geschlossenen Beständen von Stadtwäldern sogar Filtrerraten von 16 % erreicht werden (NOWAK und CRANE, 2006). Allerdings haben die SO₂-Konzentration sehr stark abgenommen.

Auch die flüchtigen organischen Verbindungen (VOC's) entstehen bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern. Außerdem emittieren Bäume ebenfalls diese Stoffe. Generell sind VOC's und BVOC's (biogene flüchtige organische Komponenten) Ozonbildner. Allerdings können sie auch O₃ aus der Luft entfernen, wenn die Stickstoffdioxidkonzentration gering ist (aus NOWAK, 2000). Im günstigsten Falle ist das Verhältnis von BVOC-Emission und VOC-Filterung ausgeglichen (NOWAK, 2000, Sommer, 2006, Sturm, 2006). Bäume haben jedoch nicht nur eine isolierte Wirkung auf einzelne Luftbestandteile, sondern auch über Leistungen wie Abschattung und Temperaturminderung kombinierte Effekte. Diese sollen aber im Folgenden eigenständig betrachtet werden. Um erhöhte BVOC-Emission und damit O₃-Bildung in Städten zu verhindern bzw. nicht zu fördern, kann man dies über die Auswahl der Baumarten steuern. Nach NOWAK (2000) gibt es zwischen den Spezies, die vornehmlich als Stadtbäume bevorzugt werden, unterschiedliche Auswirkungen

auf die VOC-Konzentration in der Luft. Da die Filterleistung, wie bereits erwähnt, nicht ausreichend untersucht wurde, sollte man sich zunächst darauf beschränken, Baumarten anzupflanzen oder zu fördern, die wenig BVOC's emittieren bzw. die zu meiden, die bekanntlich starke BVOC-Emittenten sind. Demnach sollte man im Sinne der Luftreinhaltung darauf verzichten, Platanen, Eichen, Pappeln, Robinien und Weiden als Stadtbäume anzupflanzen (NOWAK 2000).

Feinstaubemissionen die durch Kraftfahrzeugverkehr oder Industrie und Hausbrand entstehen, werden derzeit sehr heftig diskutiert. Da einige Partikelgrößen lungengängig und daher gesundheitsschädlich sind, werden für Verbrennungsanlagen jeglicher Art Filter erforderlich. Stadtbäume spielen bezüglich der Konzentration von Feinstaub wieder eine doppelte Rolle (Sommer, 2006). Zum einen tragen sie zur Erhöhung dieser bei, da sie Pollen in die Luft entlassen, die nicht nur von Allergikern wahrgenommen werden. Andererseits filtern Bäume durch ihre große Oberfläche Feinstäube aus der Luft heraus. Diese lagern sich auf Blättern oder der Rinde von Ästen und dem Stamm ab. Von dort werden die Partikel meist von Niederschlag ausgewaschen und gelangen in den Boden oder in die Entwässerungssysteme der Stadt. Seltener werden sie durch stärkere Windereignisse wieder von der Pflanzenfläche ausgeblasen. In den USA filtern Stadtbäume 0,47 % der PM_{10} aus der Luft heraus, Stadtwälder können kurzfristig bis zu 13 % erreichen (NOWAK et al., 2006). Die Filterleistung von Stadtbäumen und –wäldern in den USA wird mit 214.900 Tonnen pro Jahr angegeben (NOWAK, 2000). Auch in Bezug auf die Feinstaubreduzierung gibt es Empfehlungen zur Baumartenauswahl. Dabei sind vor allem die Baumarten besonders gut geeignet, die durch die Struktur der Oberfläche von Blättern und Rinde viel Feinstaubpartikel binden können. Spezies, deren Blätter groß und stark behaart sind und deren Rinde grob strukturiert ist, sind demnach zu bevorzugen. Beispiele für solche Baumarten sind *Ulmus procera*, *Platanus occidentalis*, *Chamaecyparis lawsoniana*, *Juglans nigra*, *Tilia europea*, und *Abies alba* (NOWAK et al., 2006).

Die klimatischen, lufthygienischen und Wohlfahrtsleistungen von Stadtwäldern und Stadtbäumen können allerdings für einzelne Stoffe, Gase oder Partikel nicht isoliert betrachtet werden. Es treten durch die Auswirkungen von Bäumen synergetische Effekte auf die lufthygienische, thermische und aktinische Komponente auf. Bäume vermindern durch Abschattung die Erhöhung der Lufttemperatur, die ein entscheidender Faktor bei der Entstehung von Ozon in der Troposphäre ist. Die eigentlich negativ zu bewertende Emission von VOC's durch Bäume kann aber zum Abbau von Ozon beitragen, wenn diese gleichzeitig die Lufttemperatur durch Abschattung verringern. Auch die Filterung von Stickoxiden, insbesondere NO_2 , vermindert die Bildung von Ozon. Außerordentlich guten Einfluss auf die Qualität der Luft haben geschlossene Bestände von Stadtwäldern. Wie bereits erwähnt, vermindern sie die Konzentration von Luftschadstoffen teilweise im zweistelligen Prozentbereich. NOWAK und CRANE (2006) stellten eine Verbesserung der Luftqualität unter dem Kronendach von Stadtwäldern um 40 % fest. Dies wird allerdings nicht nur durch die Filterung von Luftschadstoffen erreicht. Als entscheidender Faktor ist hier das geschlossene Kronendach zu nennen. Durch die erhöhte Rauigkeit wirkt es limitierend auf die Mischungsschicht und kann das Absinken von Luftschadstoffen in Bodennähe und den Einfluss auf den menschlichen Organismus verhindern (Sommer, 2006).

4.1 QUANTITATIVE BEISPIELE

Vieles ist über die Wirkung der Vegetation und der Bäume auf das Klima und die Luftqualität bekannt. Die qualitativen Angaben darüber sind allerdings nicht quantitativ untermauert. Anhand von einfachen Beispielen sollen im Folgenden quantitative Aussagen gemacht werden.

4.1.1 THERMISCHE UND LUFTHYGIENISCHE BEDEUTUNG VON BÄUMEN IN DER STADT

Für die Untersuchungen der thermischen Komponente wurde ein speziell entwickelter mobiler Bioklima-Messwagen verwendet. Mit Hilfe des Messwagens wurden die Trockentemperatur T_a und die Feuchttemperatur T_f (Aspirationspsychrometer, PT 100 Sensoren), Windgeschwindigkeit v (Hitzdrahtanemometer der Firma Dantec), Windrichtung dd (kurzer Bindfaden), die kurzwellige Strahlung R_k (Pyranometer, Typ CM 21, Firma Kipp und Zonen) und die langwellige Strahlung L_w (Pyrgeometer, Typ CG 1, Firma Kipp und Zonen) ermittelt. Anhand der gemessenen Parameter wurden der Dampfdruck VP , die relative Luftfeuchtigkeit RH und die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} (fasst den gesamten Strahlungseinfluss, bestehend aus solarer und terrestrischer Strahlung, der auf den Menschen wirkt, zusammen) berechnet. Die meteorologischen Daten wurden zur Berechnung der wichtigen thermischen Bewertungsgröße Größe PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) (VDI, 1998) verwendet. Mit Hilfe von PET wurde eine human-biometeorologische Bewertung der einzelnen Messpunkte vorgenommen. Die Berechnung erfolgte anhand des Strahlungs- und Bioklimaprogramms RayMan, das am Meteorologischen Institut der Universität Freiburg entwickelt wurde (MATZARAKIS et al., 2007). Die mit dem Bioklima-Messwagen angefahrenen Messpunkte MP 1 bis MP 5 sind in Abb. 1 dargestellt.

Zur Untersuchung der lufthygienischen Komponente wurden Passivsammler eingesetzt. Mit ihrer Hilfe wurden die Luftschadstoffe Stickoxide (NO_x) und Ozon (O_3) gemessen. Der Stickoxidmessung liegt die Entfärbung des blau-violetten Farbstoffes 4-Dimethylamino-Antrachinon durch Stickoxide und der Ozonmessung die Entfärbung des hellblauen Farbstoffes Indigocarmin zugrunde. Die Farbstoffe wurden zur Exposition auf Filterpapieren fixiert. Der Grad der Entfärbung zeigt die jeweilige Schadstoffkonzentration an. Die Entfärbung wurde farbmetrisch mit dem „Color Pen“ der Firma Dr. Lange ermittelt. Mittels dieser Methoden wurden MP 2 bis MP 6 untersucht. Diese Messpunkte sind ebenfalls in Abb. 1 dargestellt.

Alle Messungen wurden in einer Höhe zwischen von 1.1 m (Schwerpunkt des Menschen) und 1.5 m (Atemhöhe) durchgeführt. Eine Sonderstellung hatte Messpunkt MP 6. Dieser Messpunkt befand sich innerhalb einer Baumkrone in ca. 6.0 m Höhe und ist als zusätzlicher vertikaler Messpunkt über MP 3 anzusehen. Ziel war ein Vertikalvergleich zwischen MP 3 und MP 6 bezüglich der untersuchten Luftschadstoffen NO_x und O_3 .

Die Untersuchungen wurden am 19.09.2000 und am 29.09.2000 (lufthygienische Messungen nur am 29.09.2000) durchgeführt. Sie hatten eine Dauer von 11 h bzw. 12 h und begannen ca. um 6:00 Uhr MEZ bei Sonnenaufgang und endeten nach Sonnenuntergang ca. um 21:00 Uhr MEZ.

In der Gesamtbetrachtung zeigten die meteorologischen Parameter einen messbaren positiven Einfluss auf das sie umgebende Stadtklima. Die meteorologischen Daten der thermischen Komponente des Stadtklimas sind in etwa vergleichbar mit denen einer Messkampagne, die an denselben Messpunkten ein Jahr zuvor stattgefunden hat (MATZARAKIS und MAYER, 2000, MAYER und MATZARAKIS, 2006).

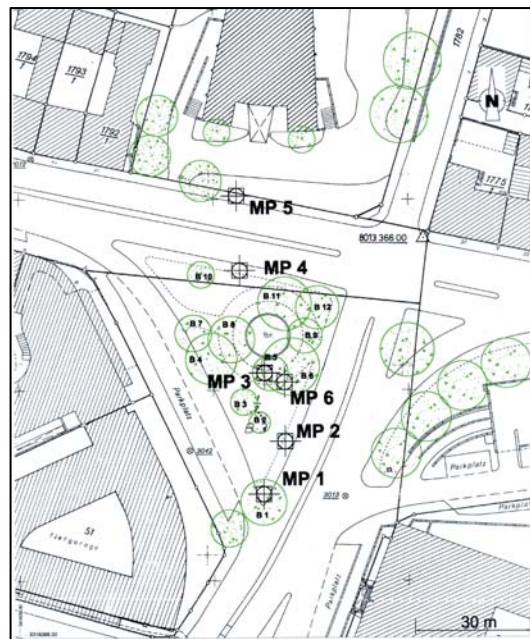
T_a lässt die Unterschiede zwischen baumbeeinflussten und nicht baumbeeinflussten Messstandorten erkennen. Zwischen den zwei Extremstandorten MP 3 und MP 5 konnten im Mittel Unterschiede von 1.0 °C und 0.9 °C gemessen werden. Diese Unterschiede sind vergleichbar mit anderen Untersuchungen (HEISLER, 1977, BERNATZKY, 1978, KIESE, 1985, MAYER und MATZARAKIS, 2006). Die absoluten Lufttemperaturmaxima befanden sich mit 25.2 °C (16:20 Uhr, MEZ) und 23.1 °C (15:19 Uhr, MEZ) an beiden Messtagen an MP 5. Das absolute Tagesminimum konnte an beiden Tagen am Messpunkt „östlich der Baumkronengruppe“ (MP 2) mit 13.8 °C (8:10 Uhr, MEZ) und 14.8 °C (8:05 Uhr, MEZ) ermittelt werden. An beiden Messtagen konnte ein maximaler Lufttemperaturunterschied zwischen zwei Messpunkten von 2.2 °C festgestellt werden (Tab. 3). Hinsichtlich VP und RH konnten nur geringe bis keine Unterschiede festgestellt werden.

T_{mrt} stellt eine wichtige Eingangsgröße bei der Ermittlung von PET dar. Über den gesamten Tagesverlauf gesehen, wies T_{mrt} im Mittel an MP 3 die geringste thermische Belastung mit 32.1 °C (19.09.2000) bzw. 24.5 °C (29.09.2000) auf. Dies ist auf den Einfluss der südlich von MP 3 postierten Baumgruppe zurückzuführen. MP 5 wies mit 51.4 °C (19.09.2000) bzw. 45.5 °C (29.09.2000) die höchsten Werte auf. Sehr markante Unterschiede zu den genannten zwei Messpunkten zeigten sich an MP 2 und an MP 5. Diese beiden Messpunkte wiesen auch die höchste mittlere kurzweilige Strahlung aus dem oberen Halbraum auf. Das Tagesmaximum von T_{mrt} lag an beiden Tagen an Messpunkt MP 5, betrug in beiden Fällen knapp 60 °C und wurde in den frühen Nachmittagsstunden erreicht.

PET zeigte sehr deutliche Unterschiede zwischen den stark baumbeeinflussten und den eher schwach baumbeeinflussten Standorten. So wies MP 3 an beiden Messtagen die günstigsten Bedingungen für PET auf. Die Mittelwerte für PET betrugen 19.5 °C und 22 °C, was einer thermophysiologicalen Belastung von „keine thermische Belastung“ entspricht. Der sehr stark durch urbane Strukturen geprägte Messpunkt MP 5 wies für den gleichen Zeitraum PET-Werte von 29 °C und 29.5 °C auf. Dies entspricht einer „mäßigen Wärmebelastung“. Die absolut gesehen höchsten PET-Werte innerhalb des Messverlaufs wurden an MP 5 mit 40.5 °C und 36.6 °C errechnet. Die absolut geringsten PET-Werte konnten innerhalb der frühen Morgenstunden (ca. 8:00 Uhr MEZ) an MP 1 mit 16 °C und mit 12 °C an MP 2 ermittelt werden. Die höchsten Unterschiede wurden am 19.09.2000 mit einem Wert von 17.6 °C zwischen MP 3 und MP 2 gemessen. Am 29.09.2000 zeigten sich die größten Unterschiede zwischen MP 3 und MP 5. Beispielhaft hierfür sind die Ergebnisse vom 29.09.2000 in Abb. 2 dargestellt. Die Tagesgänge von PET sind an beiden Messtagen ähnlich.

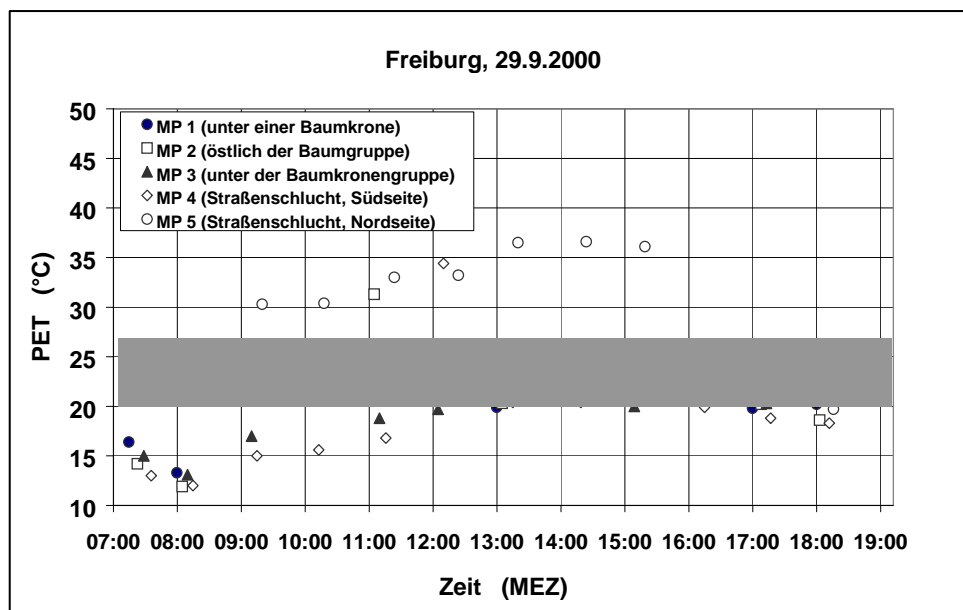
Die Untersuchungen zur lufthygienischen Komponente wiesen am 29.09.2000 ein mittleres Reduktionspotenzial für Stickoxide von 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ auf, vergleicht man MP 6 mit MP 4. Führt man denselben Vergleich für Ozon durch, so ergibt sich ein mittleres Reduktionspotential von 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dies entspricht im Mittel einer Minimierung der Stickoxidbelastung um 45 % und der Ozonbelastung um 55 %. In Abb. 3 werden die jeweiligen mittleren Stickoxid- und Ozonkonzentrationen für den 29.09.2000 dargestellt. Die erzielten Ergebnisse sind ein deutlicher Hinweis auf die

schadstoffminimierende Funktion von Bäumen, wie sie auch bei HEGGESTED (1978) und für Stickoxide und bei DE SANTO ET AL. (1976) für Ozon genannt wird. Laut HEGGESTAD (1972) liegt die Stickstoffdioxidreduktion bei einer NO_2 -Konzentration von



0.02 ppm und einer geschätzten Vegetationsabdeckung von 85 % bei ca. 0.18 kg/(ha * d). Nach Laboruntersuchungen von DESANTO et al. (1972) kann die Ozonreduktion durch Bäume zwischen 34.7 und 111.5 kg/(ha * d) betragen.

Abb. 1: Lage der Messpunkte (MP) und der Bäume (B 1 – B 12) auf dem Fahnenbergplatz (Auszug der Liegenschaftskarte (FK 5) der Stadt Freiburg, Flurstücks-Nr.: 1/7, Stand: 06.10.2000) (aus MATZARAKIS und



STREILING, 2004)

Abb. 2: Tagesgänge der PET-Werte an den fünf Messpunkten am Fahnenbergplatz/Freiburg während des 29.09.2000 (grauer Balken = „thermische Behaglichkeit“) (aus MATZARAKIS und STREILING, 2004)

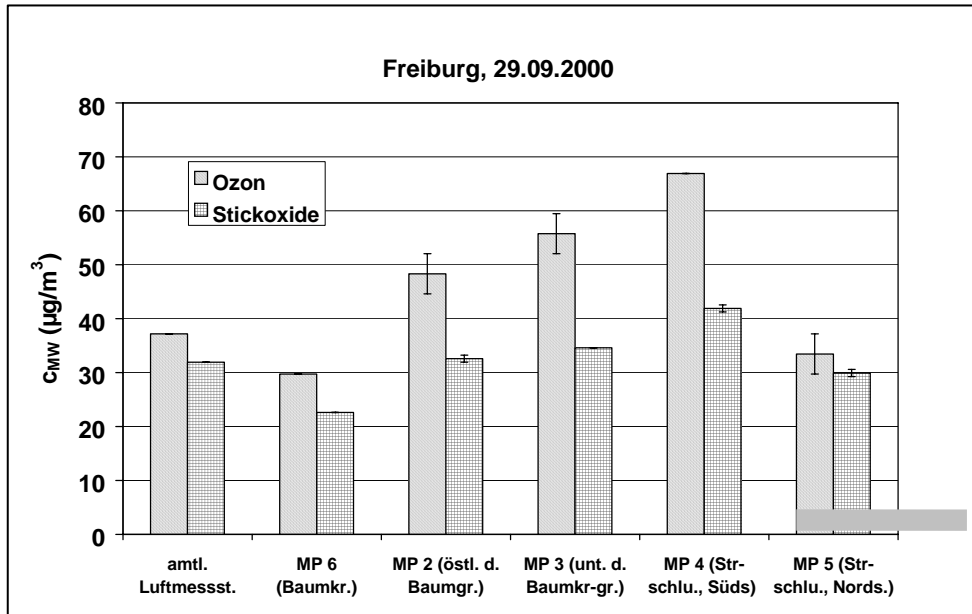


Abb. 3: Mittlere Stickoxidkonzentrationen und mittlere Ozonkonzentrationen an den fünf Messpunkten am Fahnenbergplatz/Freiburg während des 29.09.2000 (die Fehlerindikatoren zeigen die einfache Standardabweichung; „amtliche Luftmessstation“ und MP 6 weisen für NO_x und O₃ jeweils einen Fehler von Null auf!) (aus MATZARAKIS und STREILING, 2004)

Tab. 4: Gesamtübersicht der maximalen Unterschiede zwischen baumbeeinflussten und baumunbeeinflussten Messpunkten (aus MATZARAKIS und STREILING, 2004)

	19/09/2001	29/09/2001
max. ΔT_a (°C)	2.2	2.2
max. ΔRH (%)	8.2	24.0
max. ΔT_{mrt} (°C)	30.8	34.1
max. ΔPET (°C)	17.6	16.6
max. ΔNO_x (µg/m ³)	-	19
max. ΔO_3 (µg/m ³)	-	37

Welcher Anteil der Schadstoffreduktion innerhalb der Baumkrone (MP 6) auf eine Filterwirkung durch Absorption von Stickoxiden und Ozon oder auf die erhöhte Oberflächenrauigkeit des Blattwerks gegenüber Windbewegungen zurückzuführen ist, kann durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht geklärt werden. In MP 6, der leider keine Windrichtungs- und Windgeschwindigkeitsmessungen aufwies, ist aber davon auszugehen, dass die Windgeschwindigkeit durch das dichte Blätterwerk deutlich verringert wurde. Somit dürfte zumindest ein Teil der luftschadstoffreduzierenden Wirkung im Innern der Baumkrone auf die Rückhaltefunktion des Blätterwerks gegenüber anströmenden Luftmassen zurückzuführen sein. Der gemessene Schadstoff minimierende Effekt hatte jedoch kaum Auswirkung und konnte schon unter der untersuchten Baumkrone (MP 3) für die meisten Parameter nicht mehr deutlich nachgewiesen werden. Erklären lässt sich dies dadurch, dass sich gering belastete Luftmassen bei ihrem Austritt aus der Baumkrone durch ständig vorhandene Turbulenz sofort mit den stärker belasteten äußeren Luftmassen mischten und sich außerhalb der Baumkronen kein ausgeprägter Konzentrationsgradient ausbilden konnte. Dieses Bild spiegelt sich in den ständig wechselnden Windrichtungen und den Windgeschwindigkeiten für alle Messpunkte wieder, die im Mittel nie geringer als 0.6 m/s waren.

4.1.2 BIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG VON STADTNAHEN WÄLDERN WÄHREND HITZEPERIODEN

Eine besondere Bedeutung kommt den Wäldern bzw. den stadtnahen Wäldern hinsichtlich des Einflusses auf stadtklimatische Phänomene aber auch auf die Erholungsfunktion und dem Klimawandel zu. Für den Sommer 2003, der Sommer der in ganz Europa viele Todesopfer und andere Folgen hatte, sind verschiedene Simulationen im Hinblick auf die bioklimatische Bedeutung durchgeführt worden.

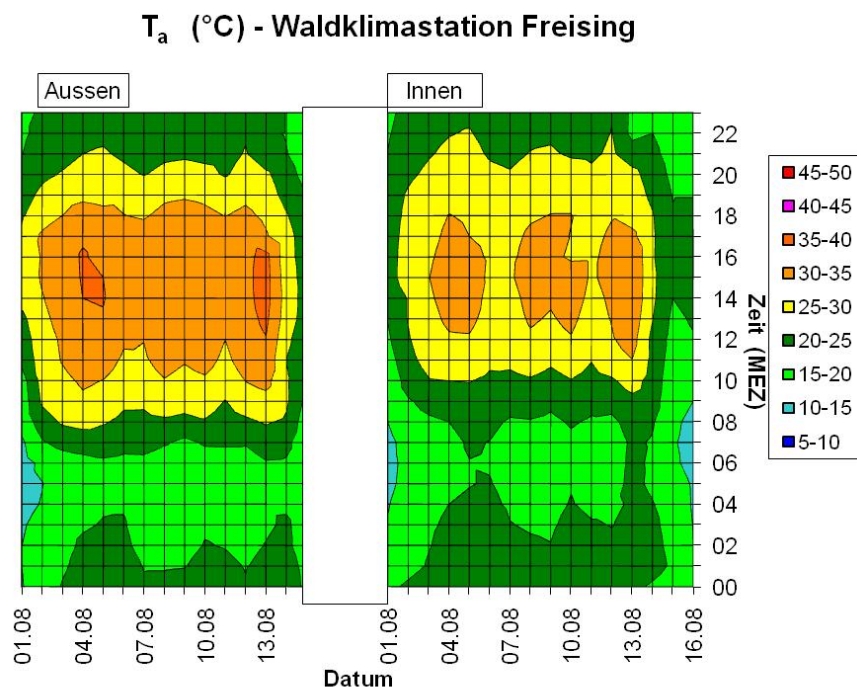


Abb. 4: Verteilung der Lufttemperatur im Wald (Innen) und auf einer Freifläche

(Aussen) an einer Waldklimastation der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft in Freising vom 1.8.2003 bis 16.8.2003

RH (°C) - Waldklimastation Freising

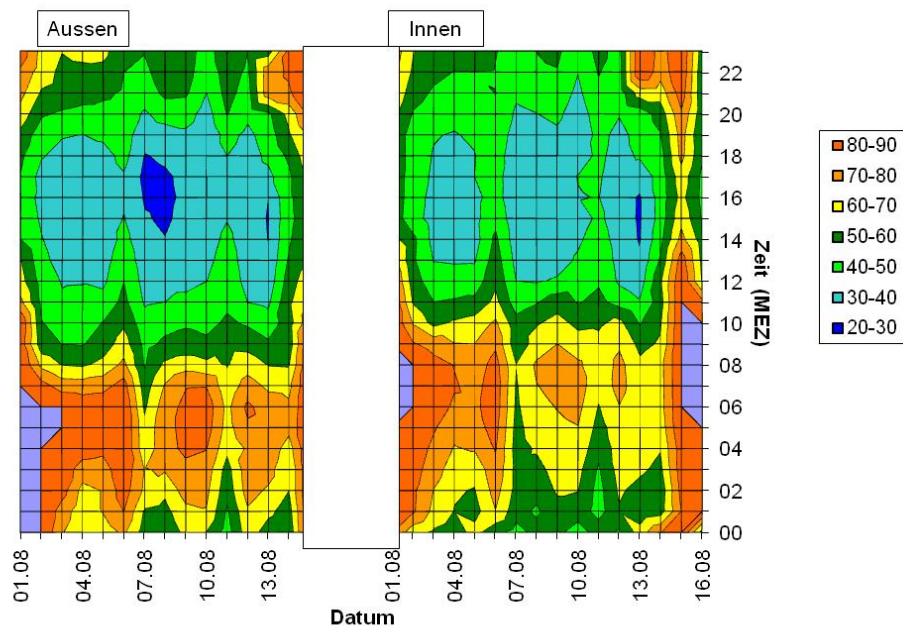


Abb. 5: Verteilung der relativen Luftfeuchte im Wald (Innen) und auf einer Freifläche (Aussen) an einer Waldklimastation der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft in Freising vom 1.8.2003 bis 16.8.2003

Die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft betreibt mehrere Waldklimastationen, die Messungen in den Wäldern Bayerns durchführen. Für eine Station in der Nähe von Freising wurden für die erste Augushälfte die Messungen bioklimatisch analysiert. Abb. 1 zeigt den tageszeitlichen Verlauf für den untersuchten Zeitraum (1. bis 16. August 2003) der Lufttemperatur im und außerhalb des Waldes. Im Großen und Ganzen können in der Lufttemperatur keine großen Unterschiede festgestellt werden. Tagsüber sind die Lufttemperaturen im Wald niedriger als außerhalb. Nachts hingegen ist die Lufttemperatur im Waldbestand höher als im Freiland. Hinsichtlich der relativen Luftfeuchte (Abb. 5) sind die Bedingungen im Wald tagsüber höher als auf der Freifläche. Nachts ist es außerhalb – aufgrund der geringeren Lufttemperatur – feuchter als im Wald. Betrachtungen der Lufttemperatur und der relativen Feuchte geben allerdings kein vollständiges Bild der bioklimatischen Bedingungen und somit der möglichen Effekte von Wäldern auf das thermische Empfinden von Menschen. Abb. 6 gibt die Verteilung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur (PET), mit der man den Einfluss der thermischen Umgebung auf Menschen beschreiben kann, unter Berücksichtigung der Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windverhältnissen und Strahlungsflüssen (solar und terrestrisch). Werte zwischen 18 und 23 °C bedeuten thermische Neutralität bzw. thermische Behaglichkeit und über 35 °C hohe thermische Belastung für Menschen (VDI, 1998, MATZARAKIS et al., 1999). Ein Vergleich mit der Lufttemperatur zeigt, dass PET viel höhere Werte annimmt als die Lufttemperatur. Bei PET ergibt sich ein

differenziertes Bild hinsichtlich der bioklimatischen Bedingungen. Tagsüber sind die PET Werte außerhalb des Waldes um ca. 10 bis 15 °C höher als im Wald, was eine Folge der deutlich geringeren Strahlung im Wald ist. Nachts kehren sich die Verhältnisse um. Die höheren Werte sind innerhalb des Waldes und die Unterschiede betragen teilweise mehr als 5 °C, was einer thermo-physiologischen Belastungsstufe entspricht (MATZARAKIS et al., 1999). Insgesamt zeigt sich, dass schon durch die Reduktion der Lufttemperatur und der strahlungs minderten Funktion der Waldbäume ein angenehmeres Bioklima im Wald anzutreffen ist. Nachts ist die Situation nicht so günstig für den Wald, weil durch die dichten Kronen und den geringeren Wind keine große Abkühlung entstehen kann.

PET (°C) - Waldklimastation Freising

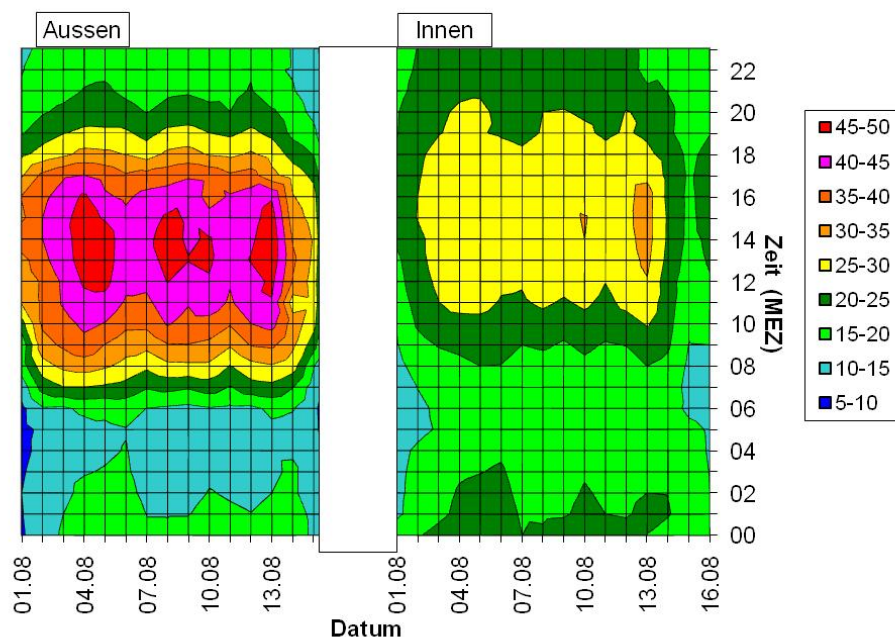


Abb. 6: Verteilung der Physiologisch Äquivalenten Temperatur im Wald (Innen) und auf einer Freifläche (Außen) an einer Waldklimastation der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft in Freising vom 1.8.2003 bis 16.8.2003.

4.1.3 ERHOLUNG UND SCHATTENWIRKUNG VON BÄUMEN

Bei der Erholungsfunktion von Wäldern und einzelnen Baumgruppen spielt neben klimatischen und ästhetischen Faktoren auch die Erholungsfunktion eine wichtige Rolle. Ein bedeutender Faktor bei der Erholungsfunktion ist die Schatten spendende Wirkung von Bäumen. Die Schattenwirkung und somit auch die Sonnenscheindauer einer Konstellation von Bäumen in räumlicher Hinsicht sind aus quantitativer als auch aus qualitativer Hinsicht von Bedeutung. Damit können für die Stadt- und Grünplanung wichtige Entscheidungen getroffen werden. Schatten und Sonnenscheindauer kann für jede Konstellation und Formation von Bäumen (und auch Gebäuden) mit dem Bioklima- und Strahlungsmodell RayMan (MATZARAKIS et al., 2007) gerechnet werden Abb. 7a). Abb. 7 zeigt den Einfluss von zwei Bäumen auf die Sonnenscheindauer, die in Osnabrück stehen. Es handelt sich um zwei

Laubbäume (Abb. 7b). Die Sonnenbahn und das Polardiagramm der beiden Konstellationen sind in den Abb. 7c und 7d dargestellt.

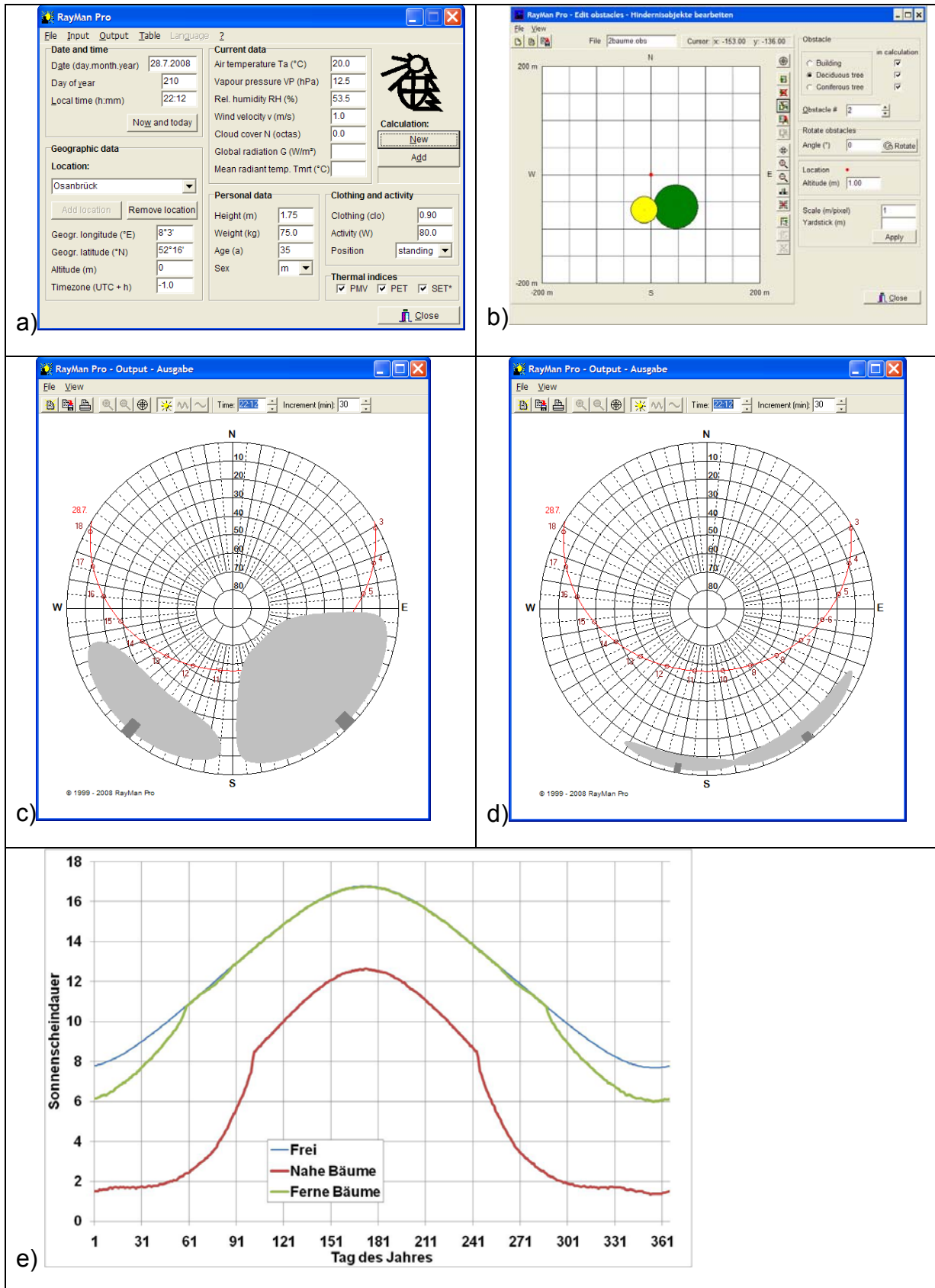


Abb. 7: Simulation der Sonnenscheindauer für zwei Bäume mit unterschiedlicher Entfernung in Osnabrück

Die Sonnenbahn ist für beide Konstellationen für den 29. Juli eingezeichnet. In Abb. 7e ist die tägliche Sonnenscheindauer ohne Bäume und mit Bäumen dargestellt. Die nahen Bäume haben einen deutlichen Einfluss auf die Sonnenscheindauer. Darüber hinaus kann über die Schattenberechnung von RayMan für jede zeitliche Auflösung festgestellt werden, zu welchen Tages- und Jahreszeiten Schatten vorhanden ist.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

In den vergangenen Jahrzehnten wurden Grünflächen in Städten, wie Parks, Stadtwälder und ähnliches, lediglich als Erholungsraum für den Stadt bewohnenden Menschen angesehen. Das Management städtischer Grünflächen sieht sich jedoch seit jüngster Zeit mit einer zusätzlichen Aufgabe konfrontiert. Pflanzen, insbesondere Bäume, haben Auswirkungen auf die Qualität der Luft in städtischen Gebieten. Es gibt zahlreiche Untersuchungen über die Wohlfahrtswirkungen von Stadtbäumen und Stadtwäldern. Doch erst seit relativ kurzer Zeit wird die Filterwirkung auf Luft verunreinigende Stoffe untersucht und beschrieben. Die dabei betrachteten Stoffe werden zum Teil bei Verbrennungsprozessen freigesetzt, manche entstehen durch die freigesetzten Stoffe über Reaktion mit den Komponenten der Luft und anderen meteorologischen Größen. Es stellte sich heraus, dass Bäume durch den Gasstoffwechsel ihrer Blätter, selten durch die Rinde, Schadstoffe aus der Luft herausfiltern. Da diese aber nicht nur schädliche Auswirkung auf den Menschen, sondern auch auf den Organismus des Baumindividuums haben, schädigen sich die Bäume bei der, anthropozentrisch gesehen positiven, Leistung selbst.

Die Verbesserung der Luftqualität durch Stadtwälder ist deutlich höher als die von Einzelbäumen. Bäume können auch durch kombinierte Effekte zur Verbesserung der Luftqualität beitragen. Durch die Filterung von Primärschadstoffen wird die Menge der entstehenden Sekundärschadstoffe gesenkt. Der Einfluss auf die thermische und aktinische Komponente des Stadtklimas durch Beschattung verhindert ebenfalls die Entstehung von Sekundärschadstoffen, beispielsweise die Bildung von Ozon.

Auch wenn die in den Ergebnissen vorgestellten Werte bezüglich der Filterwirkung von Stadtbäumen zunächst gering erscheinen, so kann doch von einer nicht unerheblichen Wohlfahrtsleistung gesprochen werden. Eine Beurteilung über monetäre Werte unterstreicht dies. Eine Filterleistung von Stadtbäumen in den USA für Ozon, Feinstaub, Stickoxide, Schwefeldioxid und Kohlenstoffmonoxid von 711.000 Tonnen pro Jahr, was einem monetären Gegenwert von 3,8 Milliarden US-Dollar entspricht.

Zukünftige Untersuchungen über den Einfluss von Bäumen auf das Stadtklima sollten ein besonderes Augenmerk darauf legen, die einzelnen meteorologischen Parameter, insbesondere die chemischen Parameter, noch genauer zu untersuchen, um das Wechselspiel zwischen Baum und der ihn umgebenden innerstädtischen Atmosphäre noch besser zu verstehen. Auf dieser Grundlage könnte dann eine Gesamtabwägung der positiven Effekte von Bäumen auf das Stadtklima erfolgen, die in eine umweltökonomische Bewertung von Bäumen münden sollte.

Schließlich stellen Stadtbäume nicht nur eine Alibifunktion dar, sondern können einen erheblichen Beitrag beim rezenten und zukünftigen Klimawandel spielen. Die Kenntnis der qualitativen und quantitativen Eigenschaften und deren Einfluss auf das Stadtklima sind nicht nur lokaler Klimaschutz. Stadtbäume werden im Hinblick auf den Klimawandel nicht nur monetär zu bewerten sein sondern auch als Mitigations- und Adaptationspotenzial im mikro- und mesoskaligen Bereich des Klimas eine entscheidende Rolle haben.

DANKSAGUNG

Florian Sommer und Andreas Sturm wird für die Zusammenstellung von vielfältigem Material im Rahmen von Lehrveranstaltungen gedankt.

LITERATUR

- Ahrens, D., 1981: Untersuchungen über die Wärmeinsel und die Mischungsschicht einer Großstadt. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 29, 29-36.
- Barradas, V.L.; Tejeda-Martinez, A.; Jauregui, E., 1999: Energy balances measurements in a suburban vegetated area in Mexico-City. Atmospheric Environment 33, 4109-4113.
- Bassuk, N.; Whitlow, T., 1987: Environmental stress in street trees. Acta Hortic. No. 195, 49-57.
- Baumbach, G., 1994: Luftreinhaltung - Entstehung und Wirkung von Luftverunreinigungen. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Baumgartner, A.; Mayer, H.; Noack, E.-M., 1985: STADTKLIMA BAYERN - Abschlußbericht zum Teilprogramm „Thermalkartierungen“. Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Reihe Materialien Nr. 39.
- Baumüller, J.; Hoffmann, U.; Reuter, U., 1993: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung Folge 2. Stuttgart, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg.
- Bernatzky, A., 1982: The contribution of trees and green spaces to a town climate. Energy and Buildings 4, 301-310.
- Brack, C. L., 2002: Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. Environmental pollution 116, 195-200.
- Bründl, W.; Mayer, H.; Baumgartner, A., 1987: STADTKLIMA BAYERN - Abschlußbericht zum Teilprogramm „Klimamessungen München“. Bayer. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Reihe Materialien Nr. 43.
- Chandler, T.J., 1965: The climate of London. London, Hutchinson.
- Chandler, T.J., 1967: Absolute and relative humidities in towns. Bull. Am. Meteorol. Soc. 48, 394-399.
- DeSanto, R.S.; Glaser, R.A.; McMillen, W.P.; MacGregor, K.A.; Miller, J.A., 1976: Open space as an air resource management measure. Volume II: design criteria. EPA – 450/3-76-0286. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- Dwyer, J. F., McPherson, E.G., Schroeder, H. W., Rowntree, R.A., 1992: Assessing the benefits and costs of the urban forest. J. Arboriculture 18, 227-234.
- Eriksen, W., 1976: Die städtische Wärmeinsel. Geogr. Rdsch. 28, 368-373.
- Fezer, F., 1995: Das Klima der Städte. Gotha, Justus Perthes Verlag.

- Gertis, K.; Hauser, G.; Rath, J., 1983: Besonnungs- und Temperaturverhältnisse in Innenhöfen. *Bauphysik* 5, 157-168.
- Gulyás, Á., Unger, J., Matzarakis, A., 2006: Assessment of the microclimatic and thermal comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. *Building and Environment* 41, 1713-1722.
- Haeger-Eugensson, M.; Holmer, B., 1999: Advection caused by the urban heat island circulation as a regulating factor on the nocturnal urban heat island. *Int. J. Climatol.* 19, 975-988.
- Heggestad, H.E., 1972.: How plants fight „man made“ pollution. *The Science Teacher* (April), 1-24.
- Heisler, G.M., 1977.: Trees modify metropolitan climate and noise. *Journal of Arboriculture*, 3, 201-207.
- Heisler, G. M., 1986. Energy savings with trees. *J. Arboric.* 12 (5), 113–125.
- Helbig, A.; Baumüller, J.; Kerschgens, M.J., 1999: Stadtklima und Luftreinhaltung. 2., vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin, Springer-Verlag.
- Kiese, O., 1985: Die bioklimatische Funktion innerstädtischer, insbesondere baumbestandener Grünflächen. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* 24, 395-401.
- Kuttler, W., 2004: Stadtklima, Teil 1: Grundzüge und Ursachen. *UWSF - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 16, 187-199.
- Kuttler, W., 2004: Stadtklima, Teil 2: Phänomene und Wirkungen. *UWSF - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 16, 263-274.
- Landsberg, H.E., 1970: Climates and urban planning. In: *Urban climates*. WMO-No. 254, 366-374.
- Litschke, T., Kuttler, W., 2008: On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review. *Meteorologische Zeitschrift* 17, 229-240.
- Lowry, W.P., 1977: Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. *J. Appl. Meteorol.* 16, 129-135.
- McPherson, E.G., 1992: Shading urban heat islands in U.S. desert cities. *Wetter und Leben* 44, 107-123.
- McPherson, E. G., 1998. Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *J.arboric.* 24 (4), 215–223.
- McPherson, E.G.; Nowak, D.; Heisler, G.; Grimmond, S.; Souch, C.; Grant, R.; Rowntree, R., 1997: Quantifying urban forest structure, function, and value: the Chicago urban forest climate project. *Urban Ecosystems* 1, 49-61.
- Manier, G., 1998: Meteorologische Einflüsse auf Materialien. *Schriftenreihe Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN*, Band 28, 120- 129.
- Matzarakis, A., 2001: Die thermische Komponente des Stadtklimas. *Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg* 6.
- Matzarakis, A., 2005: Urban climate research in Germany. *IAUC-Newsletter* 14, 4-6.
- Matzarakis, A.; Mayer, H. 2000: Atmospheric conditions and human thermal comfort in urban areas. In: 11th Seminar on Environmental Protection "Environment and Health". 20.-23. November 2000, Thessaloniki, Greece, 155-166.
- Matzarakis, A., Streiling, S., 2004: Stadtklimatische Eigenschaften von Bäumen - Falluntersuchung in Freiburg im Breisgau. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 64, 307-310.
- Matzarakis, A.; Mayer, H.; Iziomon, M., 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Int. J. Biometeorol.* 43, 76-84.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2007: Modelling Radiation fluxes in simple and

- complex environments – Application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 51, 323-334.
- Matzarakis, A., Röckle, R., Richter, C.-J., Höfl, H.-C., Steinicke, W., Streifeneder, M., Mayer, H., 2008: Planungsrelevante Bewertung des Stadtklimas – Am Beispiel von Freiburg im Breisgau. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 68, 334-340.
- Mayer, H., 1986: Zielsetzung und Konzeption des Forschungsvorhaben STADTKLIMA BAYERN. *Mitt. Geogr. Gesellschaft München* 71, 21-39.
- Mayer, H., 1987: Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben STADTKLIMA BAYERN. *Mitt. Geogr. Gesellschaft München* 72, 119-160.
- Mayer, H., 1989: Workshop „Ideales Stadtklima“ am 26. Oktober 1988 in München. *DMG-Mitteil.* 3/89, 52-54.
- Mayer, H., 1992: Planungsfaktor Stadtklima. *Münchner Forum, Berichte und Protokolle* Nr. 107, 167-205.
- Mayer, H., Matzarakis, A., 2003: Zukunftsperspektiven der Umweltmeteorologie. *Promet* 30, 61-70.
- Mayer, M., Matzarakis, A., 2006: Impact of street trees on the thermal comfort of people in summer. A case study in Freiburg (Germany). *MERCHAVIM* 6, 285-300.
- Mayer, H., Schmidt, J., Matzarakis, A., 1994: Lufthygienische Kennzeichen von stadtnahen Wäldern. *Wetter und Leben* 46, 49-65.
- Mayer, H., Matzarakis, A., Iziomon, M. G., 2003: Spatio-temporal variability of moisture conditions within the Urban Canopy Layer. *Theor. Appl. Climatol.* 76, 165–179.
- Nowak, D. J., 1993a. Atmospheric carbon reduction by urban trees. *J. Environ. Manage.* 37(3), 207–217.
- Nowak, D. J., 1993b. Historical vegetation change in Oakland and its implications for urban forest management. *J. Arboric.* 19(5), 313–319.
- Nowak, D. J., 1994. Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. In: McPherson, E. G., Nowak, D. J., Rowntree, R. A. (Eds.), *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. USDA Forest Service General Technical Report NE-186, Radnor, PA, pp. 83-94.
- Nowak, D.J., 2000: Tree species selection, design and management to improve air quality. *Proceedings American Society of Landscape Architects*, Washington D.C.
- Nowak, D.J., 2001: *The effects of urban trees on air quality*, 5 Moon Library, Syracuse.
- Nowak, D.J., Crane, D.E., 2002: Carbon Storage and Sequestration by urban trees in the USA. *Elsevier Science Ltd., Environmental Pollution* 116, 381-389.
- Nowak, D.J., Crane, D.E., Stevens J.C., 2006: Air pollution removal by urban trees and shrubs in the US. *Urban forestry & urban greening* 4, 115-123. Elsevier Science Ltd., Syracuse.
- Nowak, D. J., Noble, M. H., Sisinni, S. M., Dwyner, J. F., 2001. Assessing the US urban forest resource. *J. Forestry* 99(3), 37–42.
- Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7, 769-779.
- Oke, T.R., 1974: Review of urban climatology 1968-1973. *WMO Tech. Note No.* 134.
- Oke, T.R., 1979: Review of urban climatology 1973-1976. *Tech. Note No.* 169.
- Oke, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. R. Met. Soc.* 108, 1-24.

- Oke, T.R., 1983: Bibliography of urban climate 1977-1980. WMO WCP-45.
- Oke, T.R., 1990: Bibliography of urban climate 1981-1988. WCAP-15. WMO/TD-No. 397.
- Oke, T.R.; East, C., 1971: The urban boundary layer in Montreal. *Boundary-Layer Meteorology* 1, 411-437.
- Oke, T.R.; Johnson, G.T.; Steyn, D.G.; Watson, I.D., 1991: Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology* 56, 339-358.
- Reiss-Schmidt, S., 1987: Klima und Lufthygiene in der Regional-, Stadtentwicklungs- und Rahmenplanung. In: *Klima und Lufthygiene als Planungsfaktoren* (Hrsg. Kommunalverband Ruhrgebiet), 41-71.
- Sheaffer, J.D.; Reiter, E.R., 1988: Urban climate effects of energy demand for space heating. *Meteorol. Atmos. Phys.* 38, 202-214.
- Sommer, F., 2006: Filterwirkung von Stadtbäumen und Stadtwäldern auf luftverunreinigende Stoffe. Hausarbeit im Vertiefungsblock "Klima in urbane Räumen". Fak. für Forst- und Umweltwissenschaften. Universität Freiburg.
- Streiling, S., Matzarakis, A., 2003: Influence of singular trees and small clusters of trees on the bioclimate of a city – a case study. *Journal of Arboriculture* 29, 309-316.
- Sturm, A., 2006: The economic value of urban trees. Hausarbeit im Vertiefungsblock "Klima in urbane Räumen". Fak. für Forst- und Umweltwissenschaften. Universität Freiburg.
- Traup, S., 1993: Simulation der Strahlungs- und Energiebilanz von technischen Oberflächen in bebautem Gelände. VDI Berichte Nr. 1060, 421-430.
- WMO, 1983: Commission for Climatology and applications of Meteorology. Abridged final report 8th session. WMO-No. 600.
- VDI (Hrsg.), 1988: *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Berlin, Springer-Verlag.
- VDI, 1998: *Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima*. KOMMISSION REINHALTUNG DER LUFT (KRdL), VDI 3787, Blatt 2, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Yang, J., McBride, J., Zhou, J. and Sun, Z., 2005: The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry and Urban Greening* 3(2), 65-78.