

Wirkungszusammenhänge Freiraum und Mikroklima

K. Hagen, R. Stiles, H. Trimmel

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Wirkungszusammenhänge Freiraum und Mikroklima

Univ. Prof. Richard Stiles, DI Katrin Hagen, DI Heidi Trimmel
TU Wien, Fachbereich Landschaftsplanung und
Gartenkunst, Institut für Städtebau, Landschaftsarchitektur
und Entwerfen

Wien, November 2010

**Eine Publikation im Rahmen des HdZ-Leitprojektes „aspen Die Seestadt
Wiens – nachhaltige Stadtentwicklung“, erstellt im Subprojekt 1 „Freiraum
und Mikroklima: Grundlagen für Klima sensitive Planung in Aspern“**



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	8
1 Einleitung.....	9
1.1 Der städtische Freiraum - Definition	9
1.2 Funktionen des städtischen Freiraums	9
2 Stadtklima.....	10
2.1 Unterschiede Klima Stadt-Land.....	10
2.2 Faktoren: Stadtstruktur und verwendete Materialien.....	11
2.2.1 Materialien	11
2.2.2 Struktur	12
2.2.3 Weitere Faktoren: Emissionen und Abwärme	14
2.3 Auswirkungen des fortschreitenden Stadtklimawandels	14
2.3.1 Temperatur	15
2.3.2 Wasserhaushalt	15
2.3.3 Luftschadstoffe / Allergien	16
3 Einfluss städtischer Freiräume auf das Stadtklima	16
3.1 Ebene der Gesamtstadt (Stadtklima)	17
3.1.1 Belüftung / Belichtung.....	17
3.1.2 Mitigation der Wärmeinsel	18
3.2 Ebene der einzelnen Freiräume (Mikroklima)	19
3.2.1 Mikroklima.....	19
3.2.2 Strukturelle Begebenheiten	20
3.2.3 Thermische Eigenschaften der verwendeten Materialien	22
3.3 Bezug zum Forschungsprojekt.....	22
4 Thermisches Wohlbefinden.....	23
4.1 Die Wärmebilanz des Menschen.....	24
4.2 Thermisches Wohlbefinden - Definition.....	24
4.3 Berechnung des thermischen Wohlbefindens.....	26
4.4 Bezug zum Forschungsprojekt.....	27
5 Literaturverzeichnis	27

Kurzfassung

Der Fokus des Forschungsprojektes "Freiraum und Mikroklima" liegt auf den klimatischen Aspekten und der dabei bedeutenden Rolle städtischer Freiräume. Hier bestehen enge Wechselbeziehungen zwischen den klimatischen Grundbedingungen, der Bebauung (v.a. der Fassaden) und der Ausgestaltung der einzelnen Freiräume. Diese haben direkte Auswirkungen sowohl auf das (thermische) Wohlbefinden im Sinne der Aufenthaltsqualität als auch auf die Energieeffizienz der angrenzenden Bebauung.

Der vorliegende Bericht dient zur Einführung in die Thematik und stellt Bezüge zu den jeweiligen Workpackages her. Die drei beteiligten Projektpartner werden folgendermaßen angegeben: AIT (Austrian Institute of Technology); TUW-AW (Fachbereich für Bauphysik und Bauökologie am Institut für Architekturwissenschaften, TU Wien); TUW-UDL (Fachbereich Landschaftsplanung und Gartenkunst am Institut für Städtebau, Landschaftsarchitektur und Entwerfen, TU Wien).

Abstract

The main focus of the research project 'Open Space and Microclimate' is on the climatic aspects of urban open space, and thereby on their significant overall contribution to the quality of life in urban areas. In this context there is a close interrelationship between the prevailing climatic conditions, the form of the building (in particular the treatment of the facades) and the design of individual open spaces. Together, these have a direct influence on both the sense of 'thermal well-being' of the open space users, as well as on the energy efficiency of adjoining buildings.

This report takes the form of an overall introduction into the subject matter and makes reference to the various work packages. The three project partners are referred to in the report as follows: AIT (Austrian Institute of Technology); TUW-AW (Department of Building Physics and Building Ecology at the Institute of Architectural Sciences); and TUW-UDL (Department of Landscape Architecture at the Institute of Urban Design and Landscape Architecture), both of Vienna University of Technology (TUW).

1 Einleitung

1.1 Der städtische Freiraum - Definition

Der städtische Freiraum wird allgemein als "nichtbebaute Fläche der Stadt" beschrieben. Dazu zählen sowohl grün- und wasserbestimmte Freiräume wie Parks, Gärten, Flüsse und Seen als auch versiegelte Freiräume wie Plätze, Verkehrsflächen und Höfe. Es wird grundsätzlich zwischen öffentlichen oder privaten Freiräumen unterschieden. Für eine Gesamtbetrachtung ist diese Unterscheidung nur dann entscheidend, wenn es um rechtliche Fragen, z.B. um die Möglichkeit der Einflussnahme durch die öffentliche Hand geht. Unter ökologischen und stadtklimatischen Aspekten ist eine solche Trennung grundsätzlich nicht sinnvoll. Betrachtet man die Struktur der Stadt nicht hinsichtlich einer Aufteilung der Flächen, sondern als Raum, so müssen weitere Flächen hinzugezählt werden: Freiräume, die sich auf und in Gebäuden bilden, also sowohl Dachgärten, Terrassen und Balkone als auch überdachte Freiräume, die einer öffentlichen Nutzung zugeschrieben werden wie z.B. öffentliche Passagen. Unter ökologischen und stadtklimatischen Aspekten werden zudem vertikale Flächen, also Fassaden, als potentielle Freiflächen relevant.

1.2 Funktionen des städtischen Freiraums

Das Central Europe Projekt „UrbSpace“ gliedert die Vielzahl an Funktionen von städtischen Freiräumen in drei Hauptkategorien auf: a) umweltrelevante und ökologische Funktionen, b) soziale und gesellschaftliche Funktionen und c) strukturelle und symbolische Funktionen (UrbSpace 2010).

Unter umweltrelevanten und ökologischen Funktionen werden klimatische Verbesserungen, Lärmfilterung, Einfluss auf den Wasserkreislauf und Oberflächenwassermanagement sowie die Bereitstellung von Lebensraum für Flora und Fauna verstanden.

Als soziale und gesellschaftliche Funktionen werden die Bereitstellung von Raum für Freizeitnutzung und Erholung, die Förderung sozialer Kontakte und Kommunikation, die Schaffung von Zugang zu Naturerlebnissen und den Einfluss auf die physische und psychologische Gesundheit der Menschen zusammengefasst. Diese sozialen Aspekte stellen die wichtigsten Kriterien für das Wohlbefinden dar (z.B. Maderthaner 1995).

Unter die strukturellen und symbolischen Funktionen fallen Ausdruck, Einteilung und Verbindung einzelner Gebiete des Stadtgefüges, Verbesserung der Lesbarkeit der Stadt oder der Umgebung, Schaffung einer örtlichen Identität und die Funktion des städtischen Freiraums als Träger von Identität, Bedeutungen und Werte. Auch hierin sind wichtige soziale Aspekte wie z.B. der Integration verankert.

Vor dem Hintergrund des sich abzeichnenden sozialen Wandels - insbesondere auch mitteleuropäischer Städte -, wird die zunehmende Bedeutung von städtischen Freiräumen vor allem als erweiterter Lebensraum und soziale Schnittstelle deutlich. Städtische Freiräume tragen zudem zur Attraktivität der urbanen Umwelt und somit zu einer Reduktion der „Stadtflucht“ bei. Ein entscheidendes Kriterium stellt neben der allgemeinen Verfügbarkeit und Erreichbarkeit die Gestaltung, Nutzbarkeit und Aufenthaltsqualität dieser Stadträume dar. Letztere sind stark beeinflusst von den lokalen klimatischen Bedingungen.

Neben den sozialen sind die Städte besonders stark von klimatischen Veränderungen betroffen. Der globale Klimawandel und das 'Phänomen' des Stadtklimas verstärken sich gegenseitig. Städtische Freiräume, insbesondere Grünräume und Wasserflächen, spielen sowohl im Umgang mit den Auswirkungen des Klimawandels (Adaption) als auch hinsichtlich einer Verbesserung des Klimas (Mitigation) eine entscheidende Rolle. Dies betrifft soziale Aspekte wie die oben erwähnte Aufenthaltsqualität, ökologische Aspekte wie die Lebensbedingungen für Flora und Fauna und der Wasserhaushalt der Stadt und auch ökonomische Aspekte wie Gesundheitsvorsorge und Energieeffizienz. Bollund und Hunhammar sprechen dabei von der allgemeinen Bedeutung der urbanen Ökosysteme für den Menschen und benutzen den von Constanza (1997) eingeführten Begriff *ecosystem services* definiert als „*the benefits human populations derive, directly or indirectly, from ecosystem functions*“ (in Bollund und Hunhammar 1999: 295).

Der städtische Freiraum und sein spezielles Mikroklima können als entscheidende Faktoren für eine (zukünftige) nachhaltige Stadtentwicklung angesehen werden (dazu auch Hagen 2010). Dabei sind folgende Aspekte festzuhalten:

- Der städtische Freiraum ist in seiner Gesamtheit zu betrachten.
- Klimatische Aspekte müssen bereits frühzeitig in den Planungsprozess eingebunden werden.
- Wichtige Voraussetzung für eine effektive und nachhaltige Stadtplanung ist ein integrativer Planungsansatz.
- Eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschung und Planung fördert die Entwicklung neuer und innovativer Strategien.

2 Stadtklima

2.1 Unterschiede Klima Stadt-Land

Städtische Strukturen unterscheiden sich klimatisch stark von der Umgebung. Kennzeichnend sind Unterschiede in der Temperatur, den Windverhältnissen und der Niederschlagsverteilung sowie ein sehr viel höherer Grad an Luftverschmutzung. Am deutlichsten ist der Einfluss gebauter Strukturen durch die Ausbildung einer städtischen

Wärmeinsel. Die Intensität einer Wärmeinsel wird als Temperaturdifferenz zwischen dem Stadtzentrum und dem Umland Tu-r (Temperature urban-rural) dargestellt. Sie unterliegt Jahres- und Tagesschwankungen. Die Stadt erwärmt sich langsamer als das Freiland, kühlt nachts aber auch deutlich langsamer ab. Die Wärmeinsel ist daher während der Nachtstunden (zwischen Mitternacht und Sonnenaufgang am intensivsten ausgeprägt. Im Jahresgang wirkt sich eine stabile Hochdrucklage verstärkend auf die Wärmeinsel aus, womit in unseren Breiten der Spätwinter und Hochsommer zu den intensivsten Perioden gehören.

Laut Oke (1981) können die Stadt-Land Temperaturunterschiede bis zu 12 °C betragen (in Eliasson 2000: 31). Auch innerhalb der Stadtstrukturen können Unterschiede bis zu 7°C entstehen. Jede Stadt hat dabei ihre individuelle Wärmeinsel, abhängig von ihrer Klimazone, Orographie (also Topographie, Geomorphologie und Hydrologie), Bebauungsstruktur, Bevölkerung und Wirtschaftsstruktur (Brandt 2005: 94). Die wichtigsten meteorologischen Faktoren sind Strahlung und Wind, wobei ein hoher Bewölkungsgrad (Fezer spricht von einer deutlichen Veränderung ab 5/8 Bedeckung) und eine Zunahme an Windgeschwindigkeit abschwächende Effekte erzielen können.

Die neu entwickelten thermal oder urban climate zones (Stewardt I, Oke, T.R 1998) untergliedern das Stadtklima weiter anhand folgender Faktoren:

- Rauigkeitslänge der Oberfläche
- Anteil der versiegelten Flächen
- Sky view faktor
- Wärmeaufnahmefähigkeit
- Albedo
- menschliche Wärmeproduktion

2.2 Faktoren: Stadtstruktur und verwendete Materialien

Die Gründe für diese Temperaturunterschiede sind vielseitig, lassen sich aber in erster Linie auf die Stadtstruktur bzw. die Gestalt als auch auf die Oberflächenbeschaffenheiten zurückführen. Eine entscheidende Ursache für die starke Überwärmung der Stadtstrukturen ist die massive Umwandlung natürlicher Oberflächen in künstliche Oberflächen mit ungünstigeren thermischen Eigenschaften und zudem eine starke Vergrößerung der städtischen Gesamtoberfläche durch die Menge an vertikalen Flächen.

2.2.1 Materialien

Die Erwärmung und Abkühlung der Luftmassen sowie das Entweichen und Versickern von Wasser in die Atmosphäre geht zum Großteil vom Boden aus. Besonders in Strukturen hoher Rauigkeit, in der Advektion nur eine geringe Rolle spielt sind die Oberflächen Hauptverursacher des Mikroklimas.

Die Bodenoberfläche wird durch Strahlung erwärmt und gibt diese Wärme dann sowohl an die Luft als auch an den Boden weiter. Bei der Erwärmung der Oberflächen spielen folgende Faktoren eine Rolle: Reflexions- bzw. Absorptionsgrades der Strahlungsenergie, Wärmespeicher- und Wärmeleitfähigkeit, Oberflächenstruktur und im Falle von Bodenoberflächen die Wasserspeicherfähigkeit der Materialien.

Der Reflexionsgrad ist stark abhängig von der Farbe der Oberfläche, deswegen ändert er sich bei unterschiedlichem Wassergehalt. Ebenso verändert sich der Adsorptionsgrad sowie die Wärmespeicher und -leitfähigkeit bei unterschiedlicher Feuchtigkeit.

Zusätzlich haben die meisten der oben genannten Größen einen ausgeprägten Tages und Jahresgang. Für praktische Anwendungen und Simulationen werden im allgemeinen Mittelwerte verwendet.

Die natürlichen Materialien werden innerhalb der Stadt größtenteils durch künstliche Materialien ersetzt, die Unterschiede in den oben genannten thermischen Eigenschaften aufweisen und sich häufig verstärkend auf die Wärmeinsel auswirken.

2.2.2 Struktur

Durch die Stadtgestalt wird die (Boden)oberfläche in Form von gebauten, meist vertikalen Flächen vervielfacht und somit eine zusätzliche Erwärmung dieser Oberflächen und der Luft geschaffen. So wirken sich z.B. sonnenausgerichtete Fassaden verstärkend auf die Wärmeinsel aus. Derart aufgeheizte Fassaden können zusätzlich Mikrozirkulationen der Luft verursachen (Fezer 1995: 99).

Neben dem Einfluss auf die eintreffende Strahlung beeinflussen die genannten Faktoren auch die emittierte Strahlungsenergie und können so vor allem der nächtlichen Abkühlung förderlich oder hinderlich sein.

Der sky view factor ist ein Maß für die Öffnung eines städtischen Freiraums und der Fassaden zum offenen Himmel und somit der Ein und Ausstrahlung, ebenso die Größe H/B als Verhältnis von der Höhe der Bebauung zur Weite des angrenzenden Freiraums. Brandt spricht von einer starken Horizontüberhöhung durch die Gebäude in der Stadt und hebt hinsichtlich der nächtlichen Ausstrahlung hervor, dass bei breiten Straßen mit niedriger Bebauung (5:1) über 90% der Energie ausgestrahlt und nur 10% zurückgehalten werden, während bei einem Verhältnis von 0,5:1 nur noch 30% ausgestrahlt werden und eine Rückhaltung der Wärmeenergie um 70% zu verzeichnen ist (Brandt 2005: 90). Ali-Toudert simulierte in ihrer Arbeit unterschiedliche Straßenquerschnitte (z.B. 2005)

Einfluss auf Wind

Die Stadt stellt in ihrer Gesamtheit eine geschlossene Struktur dar, die sich innerhalb dieser Gesamtstruktur in eine Vielzahl an kleineren räumlichen Strukturen untergliedert. Oke

vergleicht die Stadtstruktur und die Struktur bzw. das klimatische Verhalten eines Waldes her und unterteilt den Aufbau der Stadtatmosphäre in zwei unterschiedliche Schichten: den Urban Canopy Layer als gebäudenahe Luftschicht (UCL) und den Urban Boundary Layer (UBL = tagsüber 1000m, nachts 200m) als Stadtgrenzschicht. Durch die Stadtstruktur in Ihrer Gesamtheit wird das beständige Windprofil des Umlandes auf die Dachebene angehoben. Innerhalb der kleinräumigeren Stadtstrukturen finden sich dadurch einerseits geringere Windgeschwindigkeiten, andererseits führen Hindernisse wiederum zu Verwirbelungen, die gerade zwischen hohen Gebäuden Böen verursachen können. Die Stadtstruktur bedingt also eine grundsätzliche Veränderung der natürlichen Windstrukturen. Eine Besonderheit stellen Flurwinde dar, die durch Temperatur- und Luftdruckunterschiede zwischen Stadt und Umland entstehen und so für Ausgleich der Luftmassen zwischen Stadt und Umland sorgen.

Generell sinkt die Windgeschwindigkeit in Bodennähe in der Stadt, während Turbulenz lokal zunimmt.

Neben der Stadtstruktur und den Materialien sind die Kanalisation von Oberflächenwasser, die Luftverschmutzung durch Emissionen und die Abwärme die stärksten anthropogenen Faktoren für Überwärmung von Städten.

Einfluss auf Wasserhaushalt

Mit der Verwendung von künstlichen Materialien in der Stadt geht meist ein hoher Grad an Versiegelung einher. Oberflächenwasser wird zu einem großen Teil in das Kanalisationsnetz abgeleitet und steht somit nicht für Verdunstungsvorgänge zur Verfügung.

Versickerungsfähige Oberflächen sind zudem oft derart gestaltet, dass sie durch großflächige Verwendung besonders stark versickerungsfähiger Materialien wie Kies das Wasser zu schnell an das Grundwasser durchleiten und somit nicht in der oberflächennahen Bodenschicht halten können.

Die Verdunstung stellt einen wichtigen Faktor für die Kühlung von Oberflächen dar, ein geringer Verdunstungsgrad hingegen fördert die Aufheizung.

Wenn man von Versiegelung spricht darf man neben den sichtbaren Stadtoberflächen wie Bebauung, Straßen, Parkplätze und Wegen die Rede nicht die Unterflurversiegelungen wie z.B. U-Bahn-Trassen, Kanal- und Leitungssystemen außer Acht lassen (Brandt 2005: 88). Laut Krusche (1982) betrug der Abfluss von Niederschlagswasser in das Kanalnetz innerhalb von Wohnvierteln 30-50% und in Geschäftsvierteln sogar 70-95% (in Fezer 1995: 78). Auch aktuelle Studien nach wie vor bedenkliche Werte an (z.B. Gill et al. 2007; Pauleit und Duhme 2000).

Das wirkt sich auf den gesamten Wasserhaushalt der Stadt aus. Tagsüber fällt der innerstädtische Wert in der Regel geringer als im Umland aus, nachts hingegen kann er sogar etwas höher liegen, da nur in einem geringen Maß Tauausbildung stattfindet und unter Umständen auch nachts eine leichte Verdunstung stattfinden kann (Brandt 2005: 95).

Ein Einfluss des Stadtklimas auf die Niederschlagsbildung ist umstritten. Brandt geht von dem wahrscheinlichsten Einfluss der Überwärmung auf die örtliche Niederschlagsverteilung aus, wobei das Niederschlagsmaximum mitteleuropäischer Städte im Osten der Stadt zu erwarten ist (diese Tendenz wird natürlich von den jeweiligen topografischen Bedingungen beeinflusst). Fezer beschreibt die Häufung von Niederschlägen in den Nachmittags- und frühen Morgenstunden und eine deutliche Zunahme im Laufe der Werkstage zum Freitag hin. Er vermutet hier einen Zusammenhang mit arbeitsbedingten Emissionen von PKW-Verkehr und Industrie und der daraus resultierenden Erhöhung des Kondensationskernanteils in der Luft.

2.2.3 Weitere Faktoren: Emissionen und Abwärme

Anthropogene Emissionen stehen in einem engen Zusammenhang mit der Bevölkerungsdichte und der angesiedelten Industrie und sind besonders ab dem 19. Jh. ein signifikanter Faktor des Stadtklimas.

Emissionen in der Stadt haben einen großen Einfluss auf die Strahlungsbilanz durch die Ausbildung einer Dunstglocke, die zwar einerseits eine Reduzierung der Globalstrahlung bewirken kann (Brandt 2005: 90) jedoch andererseits vor allem die nächtliche Abstrahlung verhindert und somit die Wärme des Stadtgebietes einschließt. Wie oben erwähnt bewirken Emissionen auch die Bildung von Kondensationskernen in der Luft und können sich dadurch auf eine Veränderung der Niederschlagsstrukturen und auf die Bildung von Nebel auswirken.

Laut Brandt müssen für Wärmebilanz der Stadt auch noch zwei anthropogene Faktoren berücksichtigt werden: Einerseits die metabolische Wärmeproduktion, wie sie temporär z.B. im Zuge von Groß- und Massenveranstaltungen örtlich gebündelt wird, die jedoch als gering einzustufen ist. Auf der anderen Seite die anthropogene Wärmeproduktion, wie sie z.B. durch Verkehr, Kraftwerke, Industrie, Heizung und Klimaanlage anfällt. Die erzeugte Abwärme ist nicht zu unterschätzen und gilt allgemein als deutlicher Einflussfaktor auf die Erwärmung der Stadt.

2.3 Auswirkungen des fortschreitenden Stadtklimawandels

Das Stadtklima ist besonders stark von dem allgemeinen Klimawandel betroffen. Mehrere Studien stellen einen Bezug zwischen dem zukünftigen Klima europäischer Städte und den aktuellen Klimakarten her. Hallegatte zeigt diesbezüglich eine Karte mit dem für 2030 prognostizierten Klima einiger bedeutender europäischer Städte und verdeutlicht die Tendenz mitteleuropäischer Städte zu mediterranen Klimabedingungen (Hallegatte et al. 2007: 51 Abb.). Brandt bezieht sich in seiner Studie konkret auf die Stadt Bonn und geht von einer klimatischen Verlagerung Bonns um 200-300 km südlich pro 0,5°C Erwärmung aus (Brandt 2007:...).

Im Folgenden sollen einige der prägnantesten Auswirkungen des Stadtklimas im Allgemeinen und hinsichtlich der zu erwartenden Entwicklung angeführt werden.

2.3.1 Temperatur

Aufgrund der allgemeinen Erwärmung kommt es zu verschiedenen Auswirkungen. Einerseits ist eine Verkürzung der Frostperioden zu verzeichnen, was sich positiv auf geringere Heizkosten und seltener auftretendem Kältestress auswirkt. Auf der anderen Seite steht die Zunahme an heißen Tagen im Sommer und dementsprechend die Gefahr von nächtlichem Hitzestress. Damit verbunden sind unter anderem auch höhere Kosten für die Kühlung von Innenräumen, die zudem wiederum eine Erwärmung der Aussenräume bewirkt.

Von Hitzestress spricht man, wenn die nächtliche Temperatur über 25°C beträgt und somit zu schnellerem Herzschlag und Schlafstörungen führt. Städte sind davon besonders betroffen. Es gibt einen klaren Zusammenhang zwischen nächtlichem Hitzestress, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und der Sterblichkeitsrate (z.B. Rudel et al. 2007). Die bisher extremste Hitzewelle in Europa hat im Jahr 2003 stattgefunden, „die nach Schätzungen 20.000 bis 30.000 Menschenleben gefordert hat und damit laut Angaben der Münchner Rückversicherung die größte Naturkatastrophe in Mitteleuropa seit Menschengedenken gewesen ist.“ (Rahmstorf und Schellnhuber 2007: 71).

Es ist zu erwarten, dass sowohl die Anzahl an Hitzetagen als auch die Dauer der Hitzewellen weiter zunehmen.

Auswirkungen hat die Erwärmung auch auf die Verbreitung thermophiler Arten (Flora und Fauna) in der Stadt. Mit einer fortschreitenden Erwärmung sind sowohl Veränderungen des Lebensraums und der Artenzusammensetzung als auch Verschiebungen jahreszeitlicher Ereignisse verbunden. Parallel zu der Verbreitung thermophiler Arten in der Stadt kann im Zuge der stattfindenden Erwärmung auch eine Verbreitung von Krankheitserregern und -überträgern aus wärmeren Regionen verzeichnet werden, z.B. Malaria.

2.3.2 Wasserhaushalt

Die Erwärmung hat auch weitreichende Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Stadt. Dazu zählt vor allem die Senkung der relativen Luftfeuchtigkeit. Das Klima der Städte neigt gerade in den Sommermonaten zu Trockenheit, was einerseits mit Trockenheitsstress für die Vegetation verbunden ist, andererseits allgemein Einfluss auf Kühlungsvorgänge durch Verdunstung von den Oberflächen und durch die Transpiration der Pflanzen hat. Hier spielen die veränderten klimatischen Bedingungen, die thermischen Eigenschaften der städtischen Materialien und die Ableitung von Oberflächenwasser in die Kanalisation eine entscheidende Rolle.

Aufgrund heißerer Sommer besteht allgemein ein erhöhter Wasserbedarf der Haushalte. Wilby sieht im Rahmen der Wasserwirtschaft ein großes Konfliktpotential zwischen dem

Wasserbedarf und dem Umweltschutz (Wilby 2007: 39). Besonders im mediterranen Raum ist Wassernot heute schon ein großes Thema und bei der weiteren Entwicklung wird diese Problematik früher oder später auch in unseren Breiten ankommen. Global gesehen geht Wilby auf längere Sicht von der Gefahr eines Einflusses auf die Wasserqualität im Allgemeinen aus, wovon besonders die Städte betroffen sein werden, da hier der größte Bevölkerungsanteil zu verzeichnen ist.

Viele Studien betonen eine Zunahme an Wetterextremen, insbesondere kürzere und intensivere Niederschläge (IPCC). Die oberflächlich anfallenden Wassermassen werden durch die zunehmende Versiegelung nur zu einem geringen Teil vom Boden aufgenommen. Die Kapazität städtischer Entwässerungssysteme ist damit immer häufiger überlastet. Die Auswirkungen waren z.B. im Mai 2010 in Wien zu sehen, wo sich innerstädtische, breite Straßen in reißende Flüsse verwandelt haben. Wilby führt diesbezüglich in seiner Studie für London die mit Überflutungen einhergehenden Schäden und anfallende Folgekosten an (Wilby und Perry 2006).

2.3.3 Luftschadstoffe / Allergien

Neben der Temperatur wirken sich die emittierten Luftschadstoffe besonders stark auf den menschlichen Organismus aus. Fezer gibt einen tabellarischen Überblick über die Auswirkungen der einzelnen Schadstoffe wie Oxide, Pollen, Schwermetalle und elektromagnetische Wellen (Fezer 1995: 111-124). Vor allem bei windschwachen Wetterlagen kann in dichten Siedlungsgebieten, insbesondere in Kessellagen, eine stark erhöhte Luftschadstoffkonzentration auftreten (Smog).

Laut Definition der WHO zählt unter Einbeziehung gesundheitspsychologischer Aspekte die Luftqualität zu den problematischsten Umweltfaktoren in der Stadt. Als weiterer wesentlicher Aspekt wird der Lärm genannt (in Keul 1995: 161).

3 Einfluss städtischer Freiräume auf das Stadtklima

In Bezug auf stadtklimatische (und auch auf ökologische) Aspekte ist die Gesamtheit aller städtischen Grün- und Freiräume von Bedeutung. Große zusammenhängende städtische Freiflächen sind nicht nur hinsichtlich einer Vernetzung von Lebensraum sondern auch aus stadtklimatischen Gründen notwendig. Eine oft stattfindende Trennung zwischen öffentlichen und privaten Freiräumen wäre gerade in dieser Hinsicht kontraproduktiv. Von vielen Autoren wird besonders auf die Bedeutung der Privatgärten der Stadt hingewiesen. Vor dem Hintergrund der Vervielfältigung der städtischen Gesamtoberfläche durch die Stadtstruktur werden unter klimatischen Aspekten Fassaden und Dächer zu wichtigen potentiellen Grünflächen. Diese können einen wichtigen Beitrag zur Kühlung durch Verschattung und

Evapotranspiration sowie zur Verbesserung der Luftqualität und Gebäudeeffizienz erreichen. Gründächer bieten zusätzlich ein großes Versickerungspotential und können somit eine wichtige Rolle für ein nachhaltiges Entwässerungssystem (SUDS: sustainable drainage system) spielen (Wilby 2007: 41; Roehr und Laurenz 2008).

Es ist inzwischen allgemein anerkannt, dass allgemein alle Grünräume der Stadt eine herausragende Stellung einnehmen. In ihnen liegt das größte Potential hinsichtlich einer Mitigation der Wärmeinsel, der Verringerung des Überflutungsrisikos, der Luftverbesserung und des Angebotes bzw. der Verbindung von Lebensräumen. Wasserflächen spielen aufgrund ihrer Ausdehnung und thermischen Eigenschaften ebenfalls eine wichtige Rolle.

Dabei sind innerhalb der Stadt zwei unterschiedliche Maßstabebenen zu betrachten: die großmaßstäblichen Zusammenhänge des Stadtklimas werden insbesondere durch die übergeordnete Stadtstruktur bestimmt (Mesoklima). Die kleinmaßstäblichen Zusammenhänge, also das lokale Klima der einzelnen Freiräume werden neben der Stadtstruktur zusätzlich auch durch lokale Kleinstrukturen und durch die in ihnen angewandten Materialien bestimmt (Mikroklima). Zwischen der übergeordneten und der lokalen Maßstabebenen existieren enge Wechselbeziehungen, da die Gesamtstruktur der Stadt die klimatischen Grundbedingungen für die einzelnen Freiräume bestimmt und das Mikroklima bzw. die Ausgestaltung der einzelnen Freiräume wiederum Einfluss auf das Stadtklima im Allgemeinen hat.

3.1 Ebene der Gesamtstadt (Stadtklima)

3.1.1 Belüftung / Belichtung

Die Freiräume in der Stadt durchschneiden die Gebäudestruktur und bilden in ihrer Gesamtheit zusammenhängende freie, also unbebaute, Flächen. Sie stellen somit grundsätzlich wichtige Belichtungs- und Luftschneisen dar. Lineare Freiraumstrukturen wie Flüsse, Straßenzüge und Bahntrassen funktionieren, besonders nachts, als wichtige großräumige Frischluftschneisen. Bezogen auf den Straßenraum entscheidet dabei die Ausrichtung der Fassaden zur Windrichtung darüber, ob der Wind durchfließt (in Straßenrichtung), in die Gegenrichtung kippt (quer) oder zu Spiralwirbeln gelenkt wird (schräg) (Fezer, 1995: 100).

Bei Grünräumen und Wasserflächen ist die Größe der Flächen ausschlaggebend für ihre Wirksamkeit. Große Wasserflächen können in sich ein eigenes Windsystem entwickeln.

Die Struktur der Vegetation bewirkt eine höhere Oberflächenrauigkeit, was zu Turbulenzen des Windflusses führt und die Konvektion oberflächennaher Wärme steigert.

Ebenfalls durch die Struktur der Vegetation bedingt werden starke Winde abgebremst, Schwachwinde jedoch hindurch gelassen. Neben der allgemeinen Durchlüftung und Kühlung der Stadtstruktur fungieren Grünräume mit ihren Pflanzen somit zusätzlich als wichtige Filter von Luftschadstoffen, Fein- und Grobstaub und von Lärm. Bäume und große Sträucher spielen dabei eine besondere Rolle.

Das Licht ist neben seiner essentiellen Bedeutung für die Vegetation auch für das Wohl der Menschen in mehrerer Hinsicht entscheidend. Durch Licht und Strahlung werden thermische, chemische und psychische Prozesse in Gang gesetzt (Flemming 1990 in Keul 1995: 160).

Die besondere Bedeutung von Luft und Licht für die Gesundheit der Stadtbewohner wurde in der Architektur im Zuge des Funktionalismus erkannt und bildet seitdem eine wichtige Grundlage städtebaulicher Konzepte (z.B. Rotes Wien und Gartenstadtbewegung).

3.1.2 Mitigation der Wärmeinsel

Im Zusammenhang mit den strukturellen Aspekten hinsichtlich der Durchlüftung der Stadt haben die städtischen Freiräume auch durch ihre Oberflächenbeschaffenheit einen Einfluss auf die städtische Wärmeinsel.

Dabei spielen vor allem Vegetationsflächen und Gewässer eine entscheidende Rolle. Die Vegetation wirkt in mehrerer Hinsicht kühlend: z.B. durch Transpiration, Verschattung, Steigerung der Turbulenz, Albedo und Winddurchlässigkeit. Dabei gibt es natürlich große Unterschiede bezüglich der Art, Größe und Struktur der jeweiligen Vegetation.

Wasser besitzt aufgrund der hohen Wärmekapazität (tags und nachts) eine temperaturausgleichende Funktion und bietet eine Verdunstungsfläche.

Laut einer Studie von Dimoudi und Nikolopoulou zur Wirkung von Pflanzen auf das Mikroklima in Beziehung zu unterschiedlichen städtebaulichen Varianten findet die größte Verminderung der Lufttemperatur durch eine Vergrößerung des Grünflächenanteils statt. Es werden nach ihren Berechnungen pro 100m² zusätzlicher Vegetation in einem Park ca. 1K Temperaturabnahme innerhalb von diesem erbracht. Für das untersuchte Fallbeispiel Athen bedeutet das auf die gesamte Stadt bezogen eine Kühlung von 0,8K bei einer Zunahme von 10% mehr Grün (Dimoudi und Nikolopoulou 2003).

Parkflächen können ein ähnliches Eigenklima wie ein Wald entwickeln. Die Ausdehnung dieser Flächen spielen dabei eine große Rolle, da die kühlende Wirkung eines innerstädtischen Parkes bis zu einer Größe von 30 ha linear ansteigt (abhängig von der Temperaturdifferenz zum Umland).

Eine Auswirkung der kühlenden Wirkung von Parkflächen auf ihre Umgebung ist umstritten. Fezer geht bei Windgeschwindigkeiten von über 1 m/s von einer deutlichen Einwirkung in die benachbarten Viertel in Windrichtung aus (Fezer 1995: 141). Zusätzlich entstehen durch das Druckgefälle der Temperaturunterschiede zwischen Park und Stadt Ausgleichswinde. Baumgruppen und -reihen können in Form von breiten Alleen grundsätzlich diesen Transport kühlerer Luft von Parks in die angrenzenden Stadtteile fördern, da auch sie in ihrer Gesamtheit ein ähnliches Temperaturprofil wie ein Wald ausbilden.

3.2 Ebene der einzelnen Freiräume (Mikroklima)

Wie oben erwähnt, haben diese strukturellen Maßnahmen auch direkten Einfluss auf die klimatischen Grundbedingungen der einzelnen Freiräume. Das lokale Klima wird zusätzlich durch lokale kleinstrukturelle Begebenheiten und durch die vor Ort verwendeten Oberflächenmaterialien bestimmt. Alle Faktoren bewirken ein für jeden Freiraum spezifisches Mikroklima, das ausschlaggebend sowohl für die Aufenthaltsqualität und das (thermische) Wohlbefinden in diesen als auch für die Energieeffizienz der angrenzenden Bebauung ist.

3.2.1 Mikroklima

Das lokale Klima (auch Mikroklima oder Kleinklima) ist allgemein definiert durch eine kleinräumige Klimaerscheinung der bodennahen Luftschicht bis etwa 2m Höhe. Es entsteht durch die Wechselwirkungen zwischen dem Makroklima (also den allgemeinen klimatischen Faktoren Strahlung, Wind, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag) und der lokalen Landschaft. Das Mikroklima wiederum ist wichtiger Bestandteil des allgemeinen Klimas: „microclimates are the building blocks of climate“ (Adams 2007: 79).

Erwärmung und Abkühlung geht von der Erdoberfläche aus und wird durch die Solarstrahlung gesteuert. Solarstrahlung (Energie der Sonne), die an die Erdoberfläche gelangt, wandelt sich dort in Wärmeenergie um. Von dort findet eine Wärmeübergabe an Boden und an Luft durch Strahlung, Leitung (Konduktion) und Austausch (Konvektion) statt. Der Boden selbst hat dabei Einfluss sowohl auf die vertikale als auch horizontale Verteilung aufgrund seiner spezifischen thermischen Eigenschaften.

Die speziellen Eigenschaften des Mikroklimas nehmen in der Höhe ab und haben ab 2m über Boden kaum noch Einfluss. Übliche Definitionen gehen daher von diesem Wert als Begrenzung der bodennahen Luftschicht aus. Berényi betont jedoch, dass es sich auch andere Grenzschichten geben kann, dass das Mikroklima „im Berührungsgebiet einer beliebigen Oberfläche und der Luft entsteht, also eine Übergangserscheinung ist, die überall auftritt, wo die Luft mit einem Medium in Verbindung tritt, dessen Aggregatzustand oder Dichte von ihr abweicht.“ (Berényi 1967: 14). Das lokale Klima der Stadträume wird also neben der jeweiligen Ausgestaltung auch stark von ihren vertikalen Raumgrenzen, also den Fassaden, beeinflusst.

Entscheidend sind a) die strukturellen Begebenheiten, die Einfluss auf die allgemeinen klimatischen Bedingungen nehmen und b) die thermischen Eigenschaften der verwendeten Materialien, die den jeweiligen Freiraum bestimmen.

3.2.2 Strukturelle Begebenheiten

Betrachtet man die Gesamtheit der klimatischen Faktoren, so lassen sich Wind, Strahlung und Niederschlag lokal am einfachsten (durch gestalterische Maßnahmen) beeinflussen. Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit sind durch einen hohen Austausch in der Luft geprägt und können deshalb nur bei stark reduziertem Austausch (bzw. bei Windstille) lokal beeinflusst werden.

Strahlung

Unter Strahlung wird meist vor allem die (kurzwellige) Einstrahlung verstanden. Für das Mikroklima ist aber zusätzlich auch die von jedem Objekt ausgehende langwellige Ausstrahlung von Bedeutung, die wiederum abhängig ist von der Oberflächenerwärmung des jeweiligen Objektes. Das Mittel aus allen auf einem Ort eintreffenden Strahlung wird als T_{mrt} (mean radiant temperature) bezeichnet und stellt einen entscheidenden Faktor vor allem im Zusammenhang mit dem thermischen Wohlbefinden dar. Die Ausstrahlung steht in direkter Abhängigkeit zur Einstrahlung. Strahlung kann durch Hindernisse grundsätzlich abgeblockt, reflektiert oder absorbiert werden. Eine Einstrahlung kann also durch die Aufstellung von Objekten vermindert werden. Für eine derartige Verschattung stehen verschiedene Materialien zur Verfügung. Den größten Einfluss auf die Solareinstrahlung haben massive (gebaute) Objekte unter Berücksichtigung ihrer Beschaffenheit, Position und Ausrichtung. Dabei muss jedoch auch die damit einhergehende Erwärmung der jeweiligen Objektflächen betrachtet werden. Pflanzen dagegen wirken einer Erwärmung ihrer Blattoberflächen durch Transpiration entgegen. Sie besitzen zudem die Besonderheit, dass sie einen Teil der Strahlung transmittieren können und sich die Strahlenszusammensetzung dadurch unterhalb der Blätter verändert. Große holzige Pflanzen wie Bäume haben den größten Einfluss auf die Einstrahlung und bieten einen höheren Verschattungsraum an, der den gesamten Bewegungsraum des Menschen abdecken kann. Bei niedrigen Pflanzen betrifft die Verschattung dagegen „nur“ direkt die Oberflächen wie Boden oder Fassade. Bei anderen ‚dünnen‘ Materialien wie Blech oder Tuch bestimmen Dichte und Oberflächenstrukturen (z.B. Öffnungen), wie viel Strahlung durchgelassen wird. Auch hier ist das thermische Verhalten des entsprechenden Materials zu berücksichtigen, da es u.U. trotz Verschattung zu einer Erwärmung beitragen kann. Glas ist ein transmittierendes Material, das die Eigenschaft besitzt, nur die eintreffende, nicht aber die ausgehende Strahlung hindurchzulassen wodurch sich die Wärme unterhalb staut (Treibhauseffekt). Natürlich sind die Ausrichtung der Objekte (Inklination und Exposition) und die Intensität der Einstrahlung entscheidende Kriterien hinsichtlich der Verschattung. Aber auch die Ausrichtung der Oberflächen der Objekte selbst und das damit verbundene Ausmaß an Oberflächenerwärmung ist für das Mikroklima ein wesentlicher Faktor. In der Landwirtschaft kommt dies z.B. bei Geländeformen wie Mulden, Tal und Hang zur Anwendung, wobei auch der Aspekt der Ausstrahlung der Oberflächen Berücksichtigung findet (Brandt 2005: 110).

Wind

Wind kann grundsätzlich durch massive Objekte abgeblockt, abgelenkt oder durch weniger dichte Objekte abgebremst werden: Je dichter das Material des Hindernisses, desto stärker die Auswirkungen der Bremsung in einem kleineren Bereich. Hierbei entstehen Turbulenzen, die an anderer Stelle wiederum zu einer Zunahme der Windgeschwindigkeit führen. Entscheidend ist das Verhältnis von windgeschützter Fläche zur Verminderung der Windgeschwindigkeit. Auch hier spielen Größe, Beschaffenheit, Position und Ausrichtung ebenso eine Rolle wie die Durchlässigkeit und die Entfernung zur betroffenen Fläche. Vegetation hat dabei die Besonderheit, dass sie Starkwinde abbremst, Schwachwinde jedoch hindurch lässt. Der Windschutz reduziert nicht nur die Windgeschwindigkeit sondern dadurch auch den Grad an Verdunstung und hat somit positiven Einfluss auf hohe Bodenfeuchte und geringe Temperatur auf den direkt hinter dem Hindernis angrenzenden Bereich. Für die bewusste Schaffung von Turbulenz zur Steigerung der Konvektion ist die Gesamtoberflächenstruktur entscheidend, also nicht nur wie oben erläutert das Material selbst sondern z.B. auch die Höhe, Ausdehnung und Abfolge von Objekten bzw. 'Hindernissen'.

Strahlung und Wind haben einen besonders großen Einfluss auf den Wärmehaushalt der Oberflächen: Strahlung als Hauptlieferant der Wärmeenergie und somit als Hauptfaktor für die Oberflächentemperatur und Wind als wichtiger Faktor für die Abgabe von Wärme durch Konvektion.

Niederschlag

Zum Niederschlag sei nur erwähnt, dass dieser durch Objekte abgeblockt und abgelenkt werden kann. Es kann also gezielt Einfluss darauf genommen werden, wo das anfallende Wasser auf die Erdoberfläche trifft und in welchem Ausmaß dieses anfallende Oberflächenwasser durch eine bewusste Auswahl der Bodenmaterialien dann für eine Versickerung und/oder eventuelle Wasserspeicherung zur Verfügung steht. Durch die Ausrichtung und Modellierung der Bodenoberflächen kann der Abfluss zusätzlich gelenkt und beeinflusst werden.

Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit

Sowohl die Lufttemperatur als auch die Luftfeuchtigkeit sind im hohen Maße abhängig von der Durchmischung der Luft, also vom Austausch, der in der Atmosphäre stattfindet. Sie sind daher schwer lokal zu beeinflussen. Dabei gilt: Je weniger Luftbewegung desto weniger Austausch. Die Luftbewegung und der somit der Luftaustausch in der Nähe der Bodenoberfläche tendieren gegen 0, was lokale Unterschiede in der bodennahen Luftschicht möglich macht. In höheren Luftschichten kann es nur in stark isolierten Freiräumen die

Möglichkeit geben, Einfluss auf Lufttemperatur und -feuchtigkeit zu nehmen. Brown und Gillespie führen dazu das Beispiel von ummauerten Gärten (walled gardens) an (Brown und Gillespie 1995: 139).

3.2.3 Thermische Eigenschaften der verwendeten Materialien

Das DL 2.2 behandelt diesen Aspekt ausführlicher und definiert konkrete Werte für eine Auswahl an für die Stadt typischen Materialien. An dieser Stelle soll lediglich kurz zusammenfassend festgehalten werden:

Jedes Material hat seine spezifischen thermischen Eigenschaften. Kennt man diese Eigenschaften, so kann durch eine bewusste Auswahl und Verwendung von Materialien direkt Einfluss auf das Mikroklima genommen werden.

Die Intensität der Erwärmung steigt mit Abnahme des Albedo-Wertes (Reflektionsgrad) einer Oberfläche und mit Zunahme der Leitfähigkeit und Wärmekapazität des entsprechenden Oberflächenmaterials. Der direkteste und unkomplizierteste Eingriff zur Wärmereduzierung von bestehenden Oberflächen ist eine Anpassung ihres Albedos durch Farbwahl und Veränderung der Oberflächenstruktur.

Es besteht bei allen Oberflächen, also sowohl baustofflichen Materialien als auch Vegetation, eine starke Abhängigkeit vom Wasserangebot als Bedingung für die Evapotranspiration. Als Regelfall für die Feuchtigkeitsverhältnisse in unseren Breiten gilt tagsüber der Nasstyp, nachts dagegen herrscht der Trockentyp vor, d.h. der Boden nimmt Feuchtigkeit aus der bodennahen Luftschicht auf (Kondensation). Die starke Erwärmung der städtischen Oberflächen und die Veränderungen im Wasserhaushalt vor allem während der heißen und trockenen Sommermonate können hier zu gravierenden Verschiebungen führen.

Die 'Materialien' Vegetation und Wasser stellen mikroklimatisch ein großes Potential dar. Vegetation verteilt sowohl die Wärme als auch die Feuchtigkeit des Bodens vertikal in den Raum (höhere Luftschichten). Sie hat in mehrfacher Hinsicht eine kühlende Wirkung auf die bodennahe Luftschicht: durch Verschattung und durch Transpiration und Photosynthese. Sie verändert zudem Bodenbeschaffenheit, Albedo und Gestalt des Bodens. Die kühlende Wirkung steigt mit der Größe einer Vegetationsfläche an. Wasserflächen wirken als eigenständiges Material temperatur-ausgleichend im Tages- und Nachtgang und sorgen für eine höhere Luftfeuchtigkeit durch eine ständig stattfindende Verdunstung.

3.3 Bezug zum Forschungsprojekt

Die großmaßstäbliche Ebene der Seestadt Aspern wird im Rahmen des Forschungsprojektes im WP1 und im WP5 untersucht.

Das WP1 befasst sich mit den allgemeinen makroklimatischen Rahmenbedingungen und die zu erwartenden Veränderungen in den kommenden 30 Jahren.

Im WP5 werden Simulationen auf den unterschiedlichen Maßstabsebenen durchgeführt. Dazu wurden im Rahmen des WP3 gemeinsam Referenzräume festgelegt und die Auflösung der jeweiligen Simulationen daraufhin abgestimmt. Hinsichtlich der großmaßstäblichen Aspekte untersucht der Projektpartner AIT dabei die Auswirkungen struktureller/städtebaulicher Varianten auf das Stadtklima der jeweiligen Siedlungsbereiche und der Seestadt Aspern im Ganzen. Die Auflösung variiert je nach Größe des Referenzraumes. Vorschläge zu den zu untersuchenden Varianten wurden im DL 2.1 entwickelt und in das DL 3.1 integriert. Sie betreffen Ausrichtung, Höhe und Dichte der Bebauung, aber auch das Entfernen eines vollständigen Baublocks zur Öffnung einer neuen Belüftungsschneise für die gesamte Seestadt.

Die kleinmaßstäbliche Ebene der Seestadt Aspern wird im Rahmen des Forschungsprojektes im WP5 untersucht.

Im WP5 werden Simulationen auf den unterschiedlichen Maßstabsebenen durchgeführt (s.o.). Auf der Ebene der einzelnen Freiräume konzentriert sich das WP5 auf die Beeinflussung des Mikroklimas durch Varianten in der Materialwahl aller den Freiraum beeinflussenden Oberflächen und durch gestalterische strukturelle Interventionen anhand von raumbildender Vegetation wie Hecken und Bäume.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde vorab im DL 2.2 eine Auswahl an für die Stadt charakteristischer Materialien getroffen, die in einem Materialkatalog mit den jeweiligen thermischen Eigenschaften zusammengefasst sind.

Diese Materialien stellen die Grundlage für die in WP5 vom Projektpartner TUW-UDL durchgeführten Simulationen ausgewählter Detailbereiche innerhalb der Referenzräume dar. Die Simulationen werden in einer Auflösung von 2m durchgeführt.

Der Materialkatalog liefert auch einen wichtigen Input für die Simulationen der Gebäudefassaden durch den Projektpartner TUW-AW. Im Rahmen des DL 2.2 wurde eine Matrix von unterschiedlichen Gestaltungsvarianten erstellt, die die Gestalt des angrenzenden Freiraums, der Fassaden und der Dachflächen betreffen und so die mikroklimatischen Rahmenbedingungen für die Simulation der Fassaden bestimmen.

4 Thermisches Wohlbefinden

Die Ergebnisse der Simulationen sollen Aufschluss über effektive Maßnahmen zur Verbesserung des Stadtklimas, insbesondere des Mikroklimas geben (objektiv). Dabei spielt das thermische Wohlbefinden eine bedeutende Rolle, sowohl für die Gesundheit der

Anrainer als auch für die Aufenthaltsqualität innerhalb der einzelnen Freiräume (subjektiv). Im vorliegenden Bericht soll auf dieses Thema näher eingegangen werden. Ein weiterer Aspekt des Forschungsprojektes ist der Einfluss des Mikroklimas auf die Gebäudeeffizienz der angrenzenden Bebauung. Dieser wird von dem Projektpartner TUW-AW behandelt.

4.1 Die Wärmebilanz des Menschen

Das thermische Wohlbefinden basiert auf der Gleichung der menschlichen Wärmebilanz. In die Wärmebilanz werden alle Klimabedingungen, die auf den Menschen einwirken, einbezogen. Die klimatischen Faktoren sind identisch mit den Faktoren des Mikroklimas, der Mensch (wie auch andere Lebewesen) ist grundsätzlich ein Teil in diesem Wirkungsgefüge. Fanger (1970) beschreibt die thermische Behaglichkeit als die Balance des menschlichen Energiehaushaltes, also als Balance der eintreffenden, reflektierten gespeicherten und abgestrahlten Energie. Die einzelnen physikalischen Faktoren zur Erfüllung dieser Gleichung können gemessen und oder durch Berechnung überprüft und angenähert werden.

Auf den Menschen bezogen werden neben den klimatischen Faktoren aber noch weitere Faktoren wirksam, sowohl aktive wie der metabolische Wert aufgrund von körperlicher Aktivität oder der Grad an Bekleidung, als auch passive wie Alter und Geschlecht der jeweiligen Person. Frank (1975) unterscheidet insgesamt zwischen physikalischen, physiologischen und intermediären Einflussfaktoren auf das thermische Wohlbefinden. Unter die physikalischen Bedingungen fallen in erster Linie die äußeren klimatischen Faktoren, aber auch bestimmte Aspekte der Wahrnehmung. Unter den physiologischen Bedingungen fasst Frank personenbezogene Faktoren wie Alter, Geschlecht, Herkunft sowie Ernährung und körperliche Konstitution zusammen. Als intermediäre Bedingungen versteht er Einflüsse durch Wechselbeziehungen zwischen der jeweiligen Person und seiner Umwelt wie Aktivität und Bekleidung sowie Aspekte von Adaption und Akklimatisation und psychosoziale Faktoren.

Die Wärmebilanz des Menschen stellt somit ein sehr viel komplexeres Wirkungsgefüge dar. Die Berechnung der thermischen Behaglichkeit ist daher extrem schwierig und hat vor allem durch die Entwicklung der Computer- und Simulations-Technik Aufschwung erhalten.

4.2 Thermisches Wohlbefinden - Definition

„The maintenance of human thermal comfort represents an essential requirement for efficiency, well-being and health of citizens, i.e. human thermal comfort enhances the quality of life within cities.“ (Mayer 2008: 104).

Das innere Temperatur-Gleichgewicht des Menschen liegt bei 37°C. Die 'Schaltemperatur' der Haut liegt, laut Keul, bei 24-34°C und ermöglicht so eine gewisse Anpassung an Temperaturunterschiede (Keul 1995: 158). Erwärmungs- und Abkühlungsreize lösen Thermoregulationsvorgänge im Körper aus. Darunter fallen z.B. das Zittern bei Kälte und das Schwitzen bei Wärme. Der Körper gibt laufend Wärme ab, wobei sich diese metabolische Wärme in Strahlung (60%), fühlbare Wärme (15%) und latente Wärme über Lunge und Haut (25%) unterteilen lässt (Prozent-Angaben unter Innenraumbedingungen laut Brandt 2005). Der thermische Behaglichkeitsbereich des Menschen liegt in unseren Breiten ungefähr bei einer Lufttemperatur von 18-24 °C.

Das anfangs beschriebene 'heat-balance model' von Fanger geht von der Annahme aus, dass sich die thermische Wahrnehmung (heiß, warm, kühl und kalt) proportional zur Hauttemperatur und dem latenten Wärmeverlust über die Haut bzw. der Hautfeuchtigkeit durch Schweiß verhält. Brager und de Dear benennen dies daher als ein passives Modell (Brager und de Dear 1998: 84). Sie führen als wichtige Ergänzung so genannte 'adapting models' an. Brager und de Dear integrieren dabei alle Ebenen der verhaltenstechnischen, physiologischen und vor allem auch psychischen 'Feedbacks', die Einfluss auf das subjektive Behaglichkeitsempfinden haben. Diese Feedbacks sind in ihrer Gesamtheit nur sehr schwer zu erfassen, können nach ihrer Aussage aber in Kombination mit den physikalischen Faktoren sehr viel genauere Ergebnisse liefern.

Brown und Gillespie vereinfachen die Gleichung der Wärmebilanz für ihren gestalterischen Ansatz einer 'mikroklimatischen Landschaftsarchitektur' und definieren sie als so genanntes 'Energie-Budget' (*energy budget*, Brown und Gillespie 1995: 58). Dabei werden die eintreffende Energie (in erster Linie Solarstrahlung) und die ausgehende Energie in Relation gesetzt. Die ausgehende Energie setzt sich zusammen aus der abgestrahlten Energie aller Oberflächen, der Ableitung von Wärme in die Oberflächenmaterialien (Konduktion), der durch Austausch in die Luft abgegebenen Wärme (Konvektion) und der für den Verdunstungsprozess benötigten Energie (Evapotranspiration). Angestrebt wird das Erreichen eines stabilen Mikroklimas, d.h. die beiden Gruppen des Energie-Budgets sollen möglichst in ein ausgewogenes Verhältnis gebracht werden. Diese Balance ist im Sinne des thermischen Wohlbefindens zu verstehen: „*The purpose of design is the thermal comfort of the majority of people the majority of time*“ (ebd.: 72). Den direkten Einfluss von gestalterischen Maßnahmen auf das Energie-Budget, - wie z.B. die Integration von Vegetation und Wasserflächen zur Steigerung der Evapotranspiration oder die Erzeugung von Turbulenz zur Steigerung der Konvektion -, nennen die Autoren das ‚Aufteilungsprinzip‘ (*partitioning principle*, ebd.: 55). Sie weisen auf eine besondere Komplexität hin, da manche Energiekonsumenten nachts wiederum zu Energielieferanten werden können.

Die unterschiedlichen Gestaltungsmaßnahmen, die in Hinsicht auf eine Beeinflussung des Mikroklimas eingesetzt werden können, sind in Kapitel 2b) bereits erläutert worden: der bewusste Einfluss auf strukturelle klimatische Bedingungen und eine bewusste Auswahl an (Oberflächen)Materialien.

4.3 Berechnung des thermischen Wohlbefindens

Modelle zur Berechnung des thermischen Wohlbefindens basieren auf der Gleichung zur Berechnung des Mikroklimas unter Einbeziehung der genannten persönlichen Faktoren wie Bekleidung und Aktivität. Frühe Ansätze beziehen sich dabei in erster Linie auf Innenraumbedingungen. Als Werte erhält man so z.B. den PMV (Predicted Mean Vote) nach Fanger (1970). Die Behaglichkeit wird dabei auf die ausgeglichene Balance um den Wert 0 gesetzt wird. Das Spektrum geht von -3 (Kältestress) bis +3 (Hitzestress). Als weiteren Wert führte Fanger den Wert PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) als Ausdruck der Wahrscheinlichkeit thermischer Unzufriedenheit an. Jendritzky erweiterte 1990 anhand seines Klima-Michel-Modells und der 'gefühlten Temperatur' den PMV-Index für den Außenraum.

Auf der Basis des PMV integrierte Gagge in seine Gleichung die thermoregulierenden Prozesse des menschlichen Körpers und unterscheidet dabei den Körper an sich und die äußere Hautschicht (two-node model). Als Ergebnis erhält man so die auf den Innenraum anwendbaren Indexe ET* (new effective temperature) und SET* (standard effective temperature). Letzterer wurde 1999 durch Pickup und de Dear als Index OUT-SET* für den Außenraum erweitert.

Speziell für die thermische Behaglichkeit im Außenraum wurde 1984 das MEMI-Programm von Mayer und Hölpe entwickelt, das den sogenannten PET-Wert (physiological equivalent temperature) berechnet. Das MEMI Modell basiert auf dem Modell von Gagge. Es unterscheidet neben dem Körper an sich und der Hautschicht zusätzlich die Kleidungsschicht und behandelt die jeweiligen Energieflüsse zwischen diesen.

Mit Hilfe der Computer- und Simulationstechnik sind inzwischen sehr komplexe Berechnungen durchführbar. Die entsprechenden Programme befinden sich in laufender Weiterentwicklung und sind so in der Lage, sich den Außenraumbedingungen immer genauer anzunähern. Es gilt aber hier ebenso wie bei Simulationen zu Klimawandelszenarien, dass es sich um Annahmen und Annäherungen handelt, die nicht alle Einflussfaktoren ausreichend berücksichtigen können. Es handelt sich immer um eine vereinfachte Darstellung von Wahrscheinlichkeiten. Unterschiedliche Berechnungsmodelle und deren Indexe können dabei für ähnliche Untersuchungen abweichende Ergebnisse liefern.

In den gängigen Berechnungen zum thermischen Wohlbefinden wird zur Vereinfachung oft ein Standard-Wert für die verschiedenen Faktoren angenommen. Das betrifft vor allem die physiologischen und verhaltensbedingten Faktoren wie Alter, Geschlecht, Bekleidung und Aktivität. Ein Beispiel dafür ist das Klima-Michel-Modell von Jendritzky, das von einer Standardperson (männlich, 35 Jahre, 1,75 m Körpergröße und 75 kg Körpergewicht) und einem standardisierten Verhalten (Gehen mit konstanter Geschwindigkeit von 4 km/h und witterungsbedingter Anpassung von leichter Sommer- und warmer Winterbekleidung) ausgeht. Je mehr Informationen zu den vorhandenen oder angestrebten Nutzerstrukturen eines Freiraumes bekannt sind und diese in die Berechnungen integriert werden, desto

spezifischer kann auf die speziellen Bedürfnisse reagiert und eingegangen werden. Es handelt sich jedoch grundsätzlich immer nur um Annäherungen an gewisse Durchschnittswerte.

Computersimulationsprogramme stellen eine Vereinfachung dar. Es bleibt dem Forscher dabei überlassen, welche Faktoren als konstant und welche als veränderbar definiert werden. Die Auswahl des Simulationsprogrammes entscheidet darüber, mit welchem Index gearbeitet wird.

4.4 Bezug zum Forschungsprojekt

Die Simulationen im WP5 des Projektpartners TUW-UDL untersuchen die mikroklimatischen Auswirkungen unterschiedlicher Gestaltungsvarianten auf den jeweiligen Freiraum. Dabei werden die Mittel der Landschaftsarchitektur angewandt, das Mikroklima zu beeinflussen. Das für die Simulationen verwendete Programm ENVI-met berechnet unter anderem Werte für einzelne atmosphärische Parameter wie Windgeschwindigkeit, potentielle Lufttemperatur, Tmrt und relative Luftfeuchte. Die aktuelle Version 3.1 gibt zudem den PMV als Wert für das thermische Wohlbefinden an. Die Ergebnisse der Simulationen stehen in WP6 als wichtige Grundlage für die Erstellung eines Maßnahmenkataloges zur Verfügung, dessen Inhalte direkt in die Bauträgerwettbewerbe als Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Seestadt Aspern einfließen sollen. Der Fokus liegt dabei auf dem Streben nach einem möglichst angenehmen Mikroklima in den Freiräumen und nach einer hohen Energieeffizienz der angrenzenden Gebäude.

5 Literaturverzeichnis

Adams, J. (2007) *Vegetation-climate interaction: how vegetation makes the global environment*. Berlin: Springer.

Ali-Toudert, F. (2005) *Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate*. Dissertation am Meteorologischen Institut, Universität Freiburg.

Berényi, D. (1967) *Mikroklimatologie*. Stuttgart: Fischer.

Bollund, P. and S. Hunhammar (1999) "Ecosystem services in urban areas." *Ecological Economics* **29**: 293-301.

Brandt, K. (2005) *Mikroklima. Meteorologie in der Nähe des Erdbodens*. Bonn: Eigenverlag.

Brandt, K. (2007) *Treibhaus Deutschland. Der Klimawandel in Deutschland und seine Auswirkungen*. Bonn: Bouvier.

- Brager, G. S. and R. J. d. Dear (1998) "Thermal adaptation in the built environment: a literature review." *Energy and Buildings* **27**: 83-96.
- Brown, R. D. and T. J. Gillespie (1995) *Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency*. New York: Wiley.
- Dimoudi, A. and M. Nikolopoulou (2003) "Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits." *Energy and Buildings* **35**(1): 69-76.
- Eliasson, I. (2000) "The use of climate knowledge in urban planning." *Landscape and Urban Planning* **48**(1-2): 31-44.
- Fanger, P. O. (1970) *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Fezer, F. (1995) *Das Klima der Städte*. Gotha: Perthes.
- Frank, W. (1975) *Raumklima und thermische Behaglichkeit*. Berlin: Ernst.
- Geiger, R. (1961) *Das Klima der bodennahen Luftschicht*. Braunschweig: Vieweg.
- Gill, S. E., J. F. Handley, et al. (2007) "Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure." *Built Environment* **33**(1): 115-133.
- Hagen, K. (2010) "Freiraum im Freiraum. Mikroklimatische Ansätze für die städtische Landschaftsarchitektur". In: Frey, O., Koch, F. (in Druck) *Positionen zur Urbanistik I*. Berlin: LIT-Verlag
- Hallegatte, S., J. C. Hourcade, et al. (2007). "Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas." *Climatic Change* **82**(1-2): 47-60.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Keul, A. G., Ed. (1995) *Wohlbefinden in der Stadt: umwelt- und gesundheitspsychologische Perspektiven*. Weinheim: Beltz.
- Maderthaner, R. (1995) Soziale Faktoren urbaner Lebensqualität. Wohlbefinden in der Stadt. In: A. G. Keul. (1995): 172-197.
- Mayer, H. (2008) "KLIMES - a joint research project on human thermal comfort in cities." *Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs Universität Freiburg* 17: 101-117.
- Oke, T. R. (1990) *Boundary layer climates*. London: Routledge.
- Stewart, I., Oke, T.R. (1998) *Newly developed "Thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer*. The Timothy R Oke Symposium,

American Meteorological Society Annual Meeting Phoenix AZ:
<http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/150476.pdf>

Pauleit, S. and F. Duhme (2000) "Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning." *Landscape and Urban Planning* **52**(1): 1-20.

Rahmstorf, S. and H. J. Schellnhuber (2007) *Der Klimawandel*. München: Beck.

Roehr, D. and J. Laurenz (2008) "Living skins: environmental benefits of green envelopes in the city context." *Eco-Architecture* **113**: 149-158

Rudel, E., A. Matzarakis, et al. (2007) „Bioclimate and mortality in Vienna“. 6. Fachtagung BIOMET, Freiburg: Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg.

UrbSpace (2010) *A guideline for making space*. UrbSpace Project, Central Europe Programme: www.urbSPACE.eu

Wilby, R. L. (2007) "A review of climate change impacts on the built environment." *Built Environment* **33**(1): 31-45.

Wilby, R. L. and G. L. W. Perry (2006) "Climate change, biodiversity and the urban environment: a critical review based on London, UK." *Progress in Physical Geography* **30**(1): 73-98.