



Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

Institut für Meteorologie

# **LOKALKLIMATISCHE UNTERSUCHUNGEN IN WIEN**

Masterarbeit zur Erlangung des DI  
an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von:  
Zita Kerestes, BSc

Semester:  
SS 2015 - 2016

Betreuer: Ao. Univ.-Prof. Mag. rer. nat. Dr. rer. nat. Philipp Weihs

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während des Verfassens dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Professor Weihs, der meine Masterarbeit betreut hat und mir während des Schreibens mit Geduld und Hilfsbereitschaft entgegen gekommen ist. Ebenfalls gebührt Dank Herrn Professor Mursch-Radlgruber, sowie dem Techniker Christian Gützer, ohne deren Hilfe die Vorbereitung und der Aufbau der Messungen nicht geglückt wären. Für die hilfreichen Tipps, das technische Know-How und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Vielen Dank möchte ich ebenfalls der Universität für Bodenkultur aussprechen, da ich Messungen auf dem Unigelände des Standortes Türkenschanze durchführen und Messstationen über einen längeren Zeitraum befestigen konnte.

Ein großes Dankeschön geht an meine Kommilitonen Bettina und Marion, die mir während des Schaffensprozesses mit ihrer Motivation, Erfahrung und ihrem Input eine große Hilfe waren.

Natürlich möchte ich mich auch bei meinen Eltern und bei meinem Freund bedanken, für die Beharrlichkeit mich wieder aufzumuntern, falls etwas nicht sofort geklappt hat. Sie haben mich tatkräftigst unterstützt, nicht nur finanziell, sondern auch moralisch und haben es immer wieder geschafft mich zu motivieren. Vielen Dank für die Geduld, ohne euch wäre ich nicht so weit gekommen, danke Mama, Papa und Alex!

Zuletzt möchte ich mich auch noch bei meinen Omas bedanken und dem Rest meiner Familie, bei den zahlreichen Freunden und Bekannten, die mir die ganze Zeit zur Seite gestanden sind.

DANKE!

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Masterarbeit selbstständig von mir verfasst wurde. Es wurden keine weiteren Quellen verwendet bis auf die, die im Literaturverzeichnis angeführt wurden. Diese Quellen wurden wörtlich und inhaltlich übernommen und als solche gekennzeichnet. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

## Kurzfassung

Die weltweiten Auswirkungen, welche der globale Wandel mit sich bringt, sind bereits spürbar. Besonders prägnant sind die globalen Umweltveränderungen, wie zum Beispiel der Klimawandel, die Entwaldung und der Verlust an Biodiversität. Der rasante Anstieg des Bevölkerungswachstums in den letzten Jahrzehnten hat große Nahrungsmittel- und Ressourcenknappheiten hervorgerufen und verursacht eine Flucht vom Land in die Städte. Die Städte sind gewachsen und mussten ausgebaut werden. Die Urbanisierung forderte den Bau von Hochhäusern, großflächige Flächenversiegelungen, den Zuzug von teils schwerer Industrie und den Ausbau von Verkehrsnetzen. Steigende anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen und eine Veränderung der Strahlungsbilanz führten unweigerlich zum urbanen Wärmeinseleffekt. Der Effekt der Aufheizung der Städte, besonders bei windschwachen Strahlungswetterlagen, ist sogar höher, als die erwartete Temperaturerhöhung durch den Klimawandel. Lokale und mikroklimatische Aufheizungseffekte bilden den Kern des Wärmeinseleffektes. Weltweit wird geforscht, wie unterschiedliche urbane Strukturen zum Stadtklima beitragen. Ebenso sind die Folgen des Wärmeinseleffektes auf den Menschen im Fokus der Untersuchungen. Für die Zukunft wird es wichtig sein, Wege zu finden, wie man den Hitzestress in Städten minimieren und vorbeugen kann.

In dieser Arbeit wurden lokalklimatische Untersuchungen im Sommer 2015 an acht Standorten am Gelände der Universität für Bodenkultur in Wien durchgeführt. Mini-Wetterstationen haben über mehrere Monate die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit aufgezeichnet. Nebenbei wurden die Windstärke, Oberflächentemperaturen, die Beleuchtungsstärke und der Hitzestress mit mobilen Messungen während Hitzeperioden untersucht. Thermalaufnahmen der Messstandorte wurden gemacht und die Sonnenbahnen wurden bestimmt. Die Standorte wurden ihren Eigenschaften nach lokalen Klimazonen zugeordnet. Werte der BOKU-Met Wetterstation dienen zum Vergleich und zur Erweiterung der Messdaten.

Die Ergebnisse zeigen deutliche Einflüsse unterschiedlicher baulicher und meteorologischer Elemente auf die Lufttemperatur. Der Hitzestress am BOKU-Gelände ist an heißen Tag nicht vernachlässigbar, wodurch körperlich anstrengende Aktivitäten während Hitzeperioden unterlassen werden sollten. Durch die lokalen Standorteigenschaften wurden Temperaturdifferenzen von bis zu 4,5 °C erreicht.

## Executive Summary

The worldwide impacts, which are triggered by global change, are already noticeable. Particularly striking are global environmental changes such as climate change, deforestation and biodiversity loss. The rapid rise of population growth in recent decades caused great food and resource scarcity. This problem led to a migration from rural areas into the cities. Cities grew and had to be expanded. The urbanization demanded the construction of skyscrapers, the modification of land surfaces, the settlement of industries and the expansion of transportation networks. Increasing anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions and a change in the radiation balance inevitably led to the urban heat island effect. The warming up effect of cities, especially when winds are weak, is higher than the expected increase in temperature due to climate change. Local and micro-climatic heating effects form the core of the heat island effect. There are researches worldwide, how and to what extent different urban structures contribute to urban climate. Equally the impacts of urban heat islands on human bodies are the focus of investigations. For the future it will be important to find ways to limit and prevent heat stress in cities.

Within the scope of this thesis local climatical investigations were conducted during summer 2015 on eight different sites at the campus of the University of Natural Resources and Life Sciences in Vienna. Mini-weatherstations recorded the air temperature and relative humidity over several months. Besides, the wind speed, surface temperatures, the illumination intensity and the heat stress were quantified with mobile measurements during heat waves. Infrared-images of the measurement locations were made and the sun orbits were determined. The sites were assigned to local climate zones according to their properties. Data from the university's weather station was used for comparison and to expand the measurement values.

The results show clear influences of different structural and meteorological elements on the air temperature. The heat stress on BOKU-terrain is not negligible on hot days, whereby physically demanding activities during heat waves should be avoided. Due to local characteristics temperature differences of up to 4.5 °C were recorded.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>8</b>
1.1 Problemstellung.....	8
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	9
<b>2. Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>11</b>
2.1 Mikrometeorologie .....	11
2.2 Einflussfaktoren auf die Temperatur.....	11
2.2.1 Meteorologische Einflüsse .....	12
2.3 Aufbau der urbanen Atmosphäre .....	13
2.3.1 Stadt-Umland-Windsystem .....	14
2.3.2 Straßencanyon .....	15
2.4 Energieerhaltungssatz .....	16
2.5 Strahlungsbilanz Erde.....	17
2.5.1 Treibhauseffekt .....	18
2.5.2 Globalstrahlung .....	19
2.5.3 Albedo .....	19
2.5.4 Strahlungsbilanz kurz- und langwellig .....	20
2.5.5 Städtische Energiebilanz .....	20
2.6 Inhomogenitäten in städtischen Strukturen .....	21
2.6.1 Advektive Effekte .....	22
2.6.1.1 Clothesline-Effect .....	22
2.6.1.2 Leading-edge effect bzw. Fetch-Effekt .....	23
2.6.1.3 Footprint .....	24
2.6.1.4 Oasis-Effect bzw. Oaseneffekt .....	24
2.7 Wärmeinseleffekt.....	25
2.7.1 Klimaverbesserung in den Städten .....	28
2.8 Das Konzept der LCZ nach Stewart und Oke (2012) .....	28
2.9 Universeller Thermischer Klimaindex (Universal Thermal Climate Index, UTCI) .....	32
<b>3. Methodik</b> .....	<b>36</b>
3.1 Standort der Messungen.....	36
3.1.1 Das Klima Wiens .....	36
3.2 Versuchsaufbau.....	37
3.2.1 Stationäre Messungen .....	37
3.2.1.1 BOKU-Met Wetterstation .....	39
3.2.2 Mobile Messungen (Tagesgänge).....	39

3.2.2.1 Thermalbildaufnahmen .....	41
3.2.2.2 WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) – Hitzestress.....	42
3.2.2.3 Beleuchtungsstärke (LUX) .....	44
3.2.2.4 Oberflächentemperaturen .....	45
3.2.2.5 Windstärke .....	46
3.2.3 Fischaugenaufnahmen .....	47
3.2.4 Datengrundlagen.....	49
3.2.5 Auswertungshilfen .....	49
<b>4. Ergebnisse .....</b>	<b>54</b>
4.1 Standorte zuordnen .....	54
4.2 Charakterisierung BOKU-Standort Türkenschanze.....	63
4.3 Witterung.....	65
4.4 Einfluss meteorologischer Elemente auf die Lufttemperatur .....	72
4.4.1 Relative Luftfeuchtigkeit.....	72
4.4.2 Windstärke .....	75
4.4.3 Globalstrahlung .....	77
4.5 Infrarot-Aufnahmen.....	79
4.6 Sonnenbahn über den Standorten.....	87
4.7 Der Straßencanyon-Effekt .....	93
4.8 Hitzestress.....	98
4.9 UTCI.....	100
4.10 Sensorenvergleich.....	107
<b>5. Diskussion und Schlussfolgerung.....</b>	<b>111</b>
<b>6. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>113</b>
<b>7. Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>118</b>
<b>8.Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>121</b>
<b>9. Formelverzeichnis .....</b>	<b>122</b>

# 1. Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Der globale Wandel erregt in den letzten Jahrzehnten sehr viel politische und mediale Aufmerksamkeit. Es gibt kaum jemanden auf dieser Erde, der sich mit den Auswirkungen des globalen Wandels nicht beschäftigt oder zumindest etwas davon gehört hat. Ganz besondere Aufmerksamkeit wird dem Klimawandel zuteil. Spätestens wenn Oscar-Preisträger an die Menschheit appellieren, etwas zu ändern, dann weiß man, dass es nicht rosig um die Zukunft des Planeten bestellt ist.

Das „Intergovernmental Panel on Climate Change“, kurz IPCC, veröffentlicht alle paar Jahre einen Assessment Report über den aktuellen Wissens- und Forschungsstand über den Klimawandel. Im November 2014 wurde der „5th Assessment Report“ veröffentlicht. Dieser Bericht ist in 3 Teile oder „Working Groups“ aufgeteilt und soll politische Entscheidungsträger über die Ursachen, Auswirkungen, zukünftigen Risiken und über die Adaptations- und Mitigationsoptionen informieren. Der IPCC wurde 1988 durch die „World Meteorological Organization“ WMO und das „United Nations Environment Programme“ UNEP gegründet. Laut dem Bericht ist der menschliche Einfluss auf das Klimasystem eindeutig: die jüngsten anthropogenen Treibhausgasemissionen sind die höchsten seit Anbeginn der Geschichte. Es steht außer Zweifel, dass sich das Klimasystem erwärmt. Die Atmosphäre und die Weltmeere sind wärmer geworden, die Schnee- und Eismassen sind zurückgegangen und der Meeresspiegel ist angestiegen (IPCC 2014).

Der Mensch verändert durch seine Handlungen die Umwelt und zwar in solch einem Ausmaß, dass es nicht nur lokale sondern auch globale Auswirkungen mit sich zieht. Durch sein Einwirken wird die Energiebilanz der Erde verändert, wodurch die vorher genannten Phänomene erst möglich werden. Der weltweite Bevölkerungsanstieg führt zu einer Ressourcenknappheit und zur Not, sodass immer mehr Menschen vom Land in die Städte ziehen. Die Städte müssen in weiterer Folge ausgebaut werden, um dem Zustrom an Menschen gerecht zu werden. Dadurch kommt es zu Flächennutzungsänderungen und zur Versiegelung von natürlichen Oberflächen. Aufgrund der erhöhten Versiegelung innerhalb der Stadt wird die Albedo verändert. Das Reflexionsvermögen wird vermindert, wodurch es zu einer erhöhten Wärmespeicherung und letztendlich zur Wärmefreisetzung innerhalb der Stadt kommt. Niederschlagswasser kann durch die Versiegelung nicht in den Boden sickern, sondern fließt größtenteils in die Kanalisation. Dies hat zur Folge, dass das restliche Wasser verdunstet und es zur Freisetzung von latenter Wärme kommt. Der Grundwasserspiegel sinkt, da kein Zufluss durch Regenwasser erfolgt.

Ein erhöhtes Verkehrsaufkommen und Zuzug von Industrie führen zu anthropogenen Emissionen. Durch dichte Bebauung und Verlust an Grünflächen, staut sich die Wärme in den engen Straßenschluchten und die Durchlüftung der Stadt wird behindert. Wegen des immer notwendiger werdenden Einsatzes von Klimaanlage im Sommer, kommt es zur Entstehung von Abwärme. In weiterer Folge macht sich ein thermischer Unterschied zwischen Stadt und Umland bemerkbar.

Das Stadtklima erfährt durch all diese Faktoren eine Veränderung, wodurch die neuen thermischen und optischen Eigenschaften zu einer Erwärmung der Stadt führen. All diese Veränderungen fangen klein und lokal an und wachsen mit den Jahren. Zusammengeführt wird die Wirkung verstärkt und so entsteht ein urbaner Wärmeinseleffekt. Die Lufttemperaturen sind in der Stadt, vor allem bei windschwachen Strahlungswetterlagen, um einige Grad höher als im Umland. Besonders in der Nacht macht sich der Temperaturunterschied bemerkbar, da die versiegelten Böden und Oberflächen noch langwellige Wärmestrahlung emittieren. Die erwartete Erhöhung der Lufttemperaturen durch den Klimawandel fällt geringer aus, als die durch die städtischen Strukturen bedingte Erwärmung. Der Wärmeinseleffekt wäre nichts ohne die lokalen Faktoren, die den Ursprung des Problems bilden (Mursch-Radlgruber 2009).

Besonders in den letzten Jahren wurden überdurchschnittlich warme Sommer in Österreich registriert. In Wien werden regelmäßig Temperaturrekorde geknackt. Es liegt an den Einwohnern, dass sie gemeinsam etwas gegen den Wärmeinseleffekt unternehmen. Um ein Problem lösen zu können, muss klein angefangen werden. Schließlich birgt der Hitzestress ein Risiko für Kinder und für ältere Personen, geschweige denn die verminderte Lebensqualität während Hitzeperioden, die alle gleichermaßen belastet.

## **1.2 Zielsetzung der Arbeit**

Wie es bereits in der Einleitung beschrieben wurde, entsteht der Wärmeinseleffekt aus einer Gesamtheit an lokalklimatischen Beeinflussungsmechanismen, die miteinander wechselwirksam sind. Wegen der Komplexität der physikalischen Zusammenhänge, der sich gegenseitig beeinflussenden klein und großskaligen Prozesse und der extrem inhomogenen Stadtstrukturen wird noch immer an der Entwicklung von genauen urbanen Klimamodellen gearbeitet.

Im urbanen Bereich Wien gab es bereits Projekte, die sich mit der Charakterisierung der urbanen Landschaft beschäftigen. Ein Beispiel ist das Projekt „Urban Fabric Types and Microclimate Response – Assessment and Design Improvement (Urban Fabric + Microclimate)“ der Technischen Universität Wien (Dauer 05.2011- 01.2014). Der Fokus liegt auf der Untersuchung der Interaktion städtischer Oberflächen mit dem Mikroklima (TU Wien 2016).

Im Jahr 2009 hat Herr Prof. Mursch-Radlgruber einen Bericht für die MA 22 über „Räumliche Differenzierung der mikroklimatischen Eigenschaften von Wiener Stadtstrukturen und Anpassungsmaßnahmen“ verfasst. Bei diesem Projekt wurden in Wien einige Standorte lokalklimatisch untersucht, um den Beitrag der unterschiedlichen Stadtstrukturen zur Erwärmung bestimmen zu können.

In dieser Masterarbeit werden lokalklimatische Untersuchungen durchgeführt, da der Untersuchungsgegenstand „Stadt“ ein zu umfangreiches Gebiet für einen so kurzen Zeitraum dargestellt hätte. Für großräumige Untersuchungen hätte man außerdem Genehmigungen seitens der Stadt Wien gebraucht, um Messgeräte über einen längeren Zeitraum aufstellen zu können. Ein Risiko wären die aufgestellten Mini-Messstationen gewesen, da man sie nicht 24h lang beobachten und betreuen kann. Es wäre beinahe unmöglich zu verhindern gewesen, dass sie beschädigt oder gestohlen werden. Die Ressourcen für solch ein Unterfangen waren nicht vorhanden. Das Gelände der Universität für Bodenkultur wurde somit für die Messungen ins Auge gefasst. Auf dem BOKU-Gelände des Standorts Türkenschanze war es möglich Mini-Wetterstationen über einen längeren Zeitraum zu befestigen und ganztags ungestört mobile Messungen durchzuführen.

Das Ziel dieser Arbeit ist, mithilfe von lokalklimatischen Untersuchungen während Hitzeperioden, Einflüsse unterschiedlicher meteorologischer und struktureller Faktoren auf die Lufttemperatur festzustellen und den Hitzestress, dem Personen auf dem Gelände ausgesetzt sind, zu quantifizieren. Außerdem sollen die Messstandorte „Lokalen Klima Zonen“ zugeordnet werden, damit für den Vergleich mit anderen Studien und Untersuchungen der Weg geebnet ist. Zuletzt sollen noch Maßnahmen zur Mitigation, Adaptation und Möglichkeiten zur Steigerung des Wohlbefindens während Hitzewellen aufgezeigt werden. Die mobilen Messungen wurden im Juli und August 2015 durchgeführt. Beide Monate haben sich als ideal für die Untersuchungen erwiesen, da es beachtliche Hitzeperioden gegeben hat und Rekordtemperaturen erreicht wurden.

Die Masterarbeit ist in vier weitere Abschnitte aufgeteilt. Im nächsten Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen der klimarelevanten Prozesse erläutert. Danach folgt im Kapitel Methodik die Beschreibung des Messstandortes, des Versuchsaufbaus, der Messgeräte und Messprinzipien. Die Ergebnisse der lokalklimatischen Untersuchungen werden daraufhin erläutert. Zum Abschluss gibt es eine Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen werden gezogen.

## **2. Theoretische Grundlagen**

### **2.1 Mikrometeorologie**

Lokalklimatische Untersuchungen (Lokaler Maßstab:  $10^2 - 5 \times 10^4$  m) gehören zum Gebiet der Mikrometeorologie. Die Mikrometeorologie (Mikro-Maßstab:  $10^{-2} - 10^3$  m) nimmt einen speziellen Stellenwert in der Meteorologie ein, da sie als Untersuchungsgegenstand unter anderem den Lebensraum und die Umgebung des Menschen hat. Dabei werden die untersten 5-10% der atmosphärischen Grenzschicht (0,5 - 2 km) untersucht. Diese Schicht wird auch atmosphärische Bodenschicht genannt (Foken 2006). Die Makro- und Mesometeorologie (Meso-Maßstab:  $10^4 - 2 \times 10^5$  m und Makro-Maßstab:  $10^5 - 10^8$  m) beschäftigen sich mit Prozessen in der Atmosphäre im Allgemeinen (Oke 1987) (Foken 2006).

Die mittleren Zustände in der Atmosphäre und die Klimatologie fallen ebenfalls in den Zuständigkeitsbereich der Makrometeorologie. Wenn es um Wettervorhersagen und Modelle geht, werden diese im mesoskaligen Bereich entwickelt und in den Makrobereich eingebettet.

Die Mikrometeorologie untersucht somit kleinräumige Prozesse auf einem Maßstab von 1 km und innerhalb eines Tages. Wichtig für diese Untersuchungen sind Austauschprozesse zwischen der Atmosphäre und der Erdoberfläche. Dazu gehören der Austausch von Gasen und Energie zwischen Boden, Wasserflächen, Pflanzen und Atmosphäre (Foken 2006). Die Untersuchung des Stadtklimas fällt in den Zuständigkeitsbereich der Mikro- und Mesoklimatologie, da das lokale und regionale Klima untersucht werden. In diesem Zusammenhang muss auch die Umweltmeteorologie genannt werden, die anthropogene Einflüsse und Wechselwirkungen mit der Atmosphäre beobachtet und untersucht.

Das Klima eines Siedlungsraumes muss als eine Gesamtheit von vielen eigenständigen Mikroklimaten und lokalen Prozessen angesehen werden und hängt von der Klimazone, der Bebauung, dem Umland und der topografischen Lage ab (Zmarsly et al. 2007).

### **2.2 Einflussfaktoren auf die Temperatur**

Die Temperatur (T) ist im Grunde genommen eine Zustandsgröße, so wie Druck (p) und Volumen (V), die die Eigenschaften eines einfachen isotropen Körpers beschreibt. Der Wärmeinhalt eines thermodynamischen Systems wird durch die Temperatur wiedergegeben. Es existieren unterschiedliche Temperaturformen wie z.B. Luft-, Wasser-, Boden-, Oberflächen- und Feuchttemperatur bzw. Trockentemperatur (Zmarsly et al. 2007).

Die Lufttemperatur bzw. das Stadtklima hängt von bestimmten Einflussfaktoren ab, die in unterschiedlichen Größenordnungen wirken können: makro-, meso- und mikroskalig. Die Klimazone und Breitenlage in der sich die Stadt befindet, wirkt makroskalig auf das urbane Klima. Die Topografie eines Ortes, sowie die Entfernung zu Seen, Flüssen oder Meeren, bestimmt ebenfalls das Wettergeschehen im Makrobereich.

Auf kleineren Ebenen wirken folgende Einflussfaktoren: die Größe der Stadt, die Einwohnerzahl, der Grad der Bodenversiegelung, Form und Intensität von Flächennutzungen im urbanen und ruralen Bereich, kleinräumige topografische städtische und ländliche Gegebenheiten, Größe und Form dreidimensionaler Strukturierung eines Stadtkörpers, sowie fühlbare und latente Abwärme aus anthropogenen technischen Prozessen ( $Q_{\text{anthr}}$ ) und die Emission von gasförmigen, festen und flüssigen Stoffen in die Atmosphäre (Kuttler 2004,a). Es wurde durch statistische Methoden belegt, dass die makroskalig wirkenden Größen nachrangig, hinter den Prozessen auf Mikro- und Mesoskala-Ebene, wirken (Wienert 2002).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wichtige Steuerungsgrößen des Stadtklimas auf thermischen und hydrologischen Verhalten der Bebauung, sowie auf Oberflächenbilanzen beruhen. Dazu kommt der Versiegelungsgrad, die Anzahl der Grünflächen und Parks, Abwärme und Wasseremissionen und die Art und Menge an Luftverunreinigungen (Kuttler 2004,a).

### **2.2.1 Meteorologische Einflüsse**

Nicht zu vergessen sind die meteorologischen Einflüsse, die auf die Lufttemperatur wirken. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden diese Größen und ihr Einfluss auf lokalklimatischer Ebene untersucht. Die Sonneneinstrahlung und die Bewölkung spielen eine große Rolle. Diese Größen wurden in Form von Globalstrahlung und Beleuchtungsstärke gemessen. Luftströmungen tragen einen Teil zur Erwärmung bzw. Abkühlung bei und wurden in Form von Windstärke und Windrichtung registriert. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde gemessen, da sie maßgeblich zum Temperaturempfinden des Menschen beiträgt. Als Einflussgrößen der Lufttemperatur sind noch die Oberflächentemperaturen und die Albedo von Oberflächen (Baukörper und Böden) zu nennen. Die Oberflächentemperaturen in der näheren Umgebung der Mini-Wetterstationen wurden erfasst und mithilfe einer Wärmebildkamera aufgezeichnet. Einzig die Albedo wurde während der Masterarbeit nicht dokumentiert.

## 2.3 Aufbau der urbanen Atmosphäre

Die unterste Schicht der Erdatmosphäre, die Troposphäre, steht in unmittelbarer Wechselwirkung mit der Erdoberfläche. Sie erstreckt sich bis zu einer Höhe von 15 km. In dieser Zone wird die globale atmosphärische Zirkulation durch Energieunterschiede bzw. Temperaturgradienten angetrieben. Diese Gradienten werden durch die unterschiedliche Sonneneinstrahlung an den Polen und am Äquator verursacht. Durch globale Windsysteme und Meeresströmungen versucht die Erde dem entgegenzuwirken und dies auszugleichen. Überschüssige Energie wird vom Äquator zu den Polen transportiert und führt dazu, dass Siedlungen und Städte je nach Breitengrad unterschiedliche übergeordnete Zirkulationssysteme haben, die sich auf die lokalen Systeme auswirken (Erell et al. 2011).

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, beschäftigt sich die Mikrometeorologie mit den untersten Schichten der Troposphäre. Die atmosphärische oder planetare Grenzschicht (0,5-2 km) oder im englischen „Planetary Boundary Layer“ PBL wird direkt vom Untergrund beeinflusst, da die Reibung in Annäherung zur Erdoberfläche zunimmt. Direkt über und in Nähe von urbanen Siedlungsräumen wird die Grenzschicht von den städtischen Strukturen, Energieströmen und Luftemissionen beeinflusst. Dort heißt sie dann urbane Grenzschicht oder „Urban Boundary Layer“ UBL.

In Abbildung 2.1 ist unter Punkt a) der mesoskalige Wirkungsbereich skizziert. Es ist zu sehen, dass die urbane Grenzschicht in Richtung Bodennähe weiter aufgegliedert wird. Der obere Bereich der Grenzschicht, über den Dächern, wird Mischungsschicht oder „Urban Mixing Layer“ genannt. Diese Schicht wird schon von der städtischen Oberfläche beeinflusst, jedoch hat sie sich nicht vollständig an die Verhältnisse adaptiert. Ihre Ausmaße sind von den jeweiligen Tagesgängen abhängig. Oberhalb und in der Mischungsschicht können sich Wolken bilden. Durch urbane Emissionen in Kombination mit Inversionswetterlagen besteht die Möglichkeit, dass bei Windschwäche Smog über der Stadt entsteht, der erhebliche Gesundheitsbeschwerden hervorrufen kann.

Unterhalb dieser Mischungsschicht befindet sich die Bodenschicht oder „Surface Layer“. Diese Schicht ist 4-5x höher als die durchschnittliche Gebäudehöhe. Sie wird vollständig durch die 3-D Struktur der Gebäude, Vegetation und Oberflächeneigenschaften bestimmt (Erell et al. 2011) (Kuttler 2004,b).

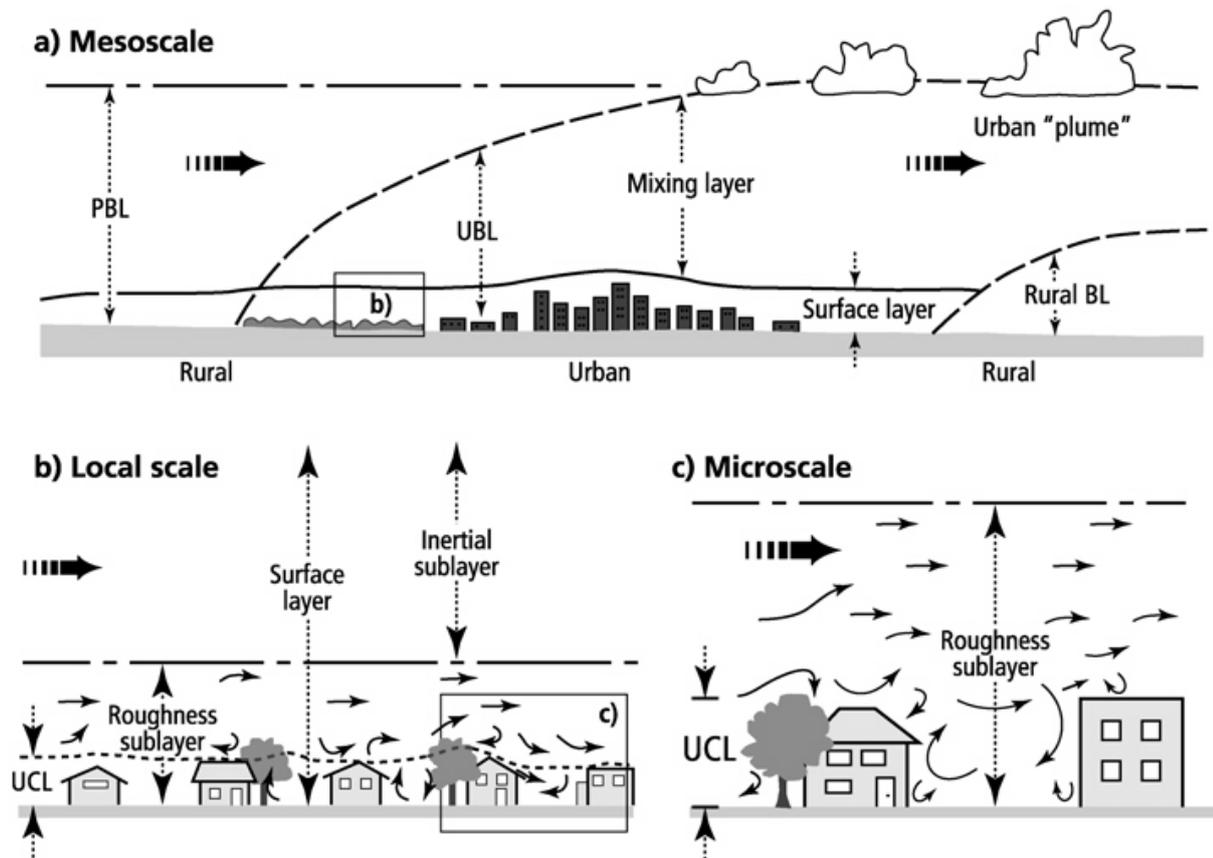


Abbildung 2.1: Die Schichtung der urbanen Atmosphäre (Oke 1997)

Unter Punkt b) in Abbildung 2.1 ist die Bodenschicht dargestellt. Der unterste Bereich vom Grund bis zu knapp über den Dächern wird als Stadthindernisschicht oder „Urban Canopy Layer“ UCL bezeichnet. Dieser Bereich ist ein Teil der etwas höher reichenden Stadtreibungsschicht oder „Urban Roughness Sublayer“ URS. Die Strömung innerhalb der Stadtreibungsschicht wird durch lokale Rauigkeitselemente und Einflüsse bestimmt. In Richtung der Mischungsschicht werden die Turbulenzfelder homogener. Die Standortfaktoren im mikroskaligen Bereich bestimmen die Wirkung der Windfelder, die Strahlungsbilanz, die Lufttemperatur und weitere Elemente, die für die Stadthindernisschicht von Bedeutung sind. Die urbane Grenzschicht geht am Stadtrand in die ländliche Grenzschicht über (Erell et al. 2011) (Kuttler 2004,b).

### 2.3.1 Stadt-Umland-Windsystem

Die ländliche Grenzschicht ist sehr bedeutsam für das Stadtklima. Durch die Überwärmung der Stadt ist es im urbanen Gebiet grundsätzlich um ein paar Grad wärmer als im Umland. Die warme Luft kann bei ruhigem Wetter nach oben steigen, da sie weniger Dichte besitzt als zuvor. Sie wird nach außen zum Land abtransportiert, da die kühle Luft aus dem Umland absinkt. Aus diesem

Luftdruckgradienten entsteht ein Flurwind, der in die Stadt weht. Verstärkt wird dieser durch die Anordnung der Straßen, Gassen und offenen Flächen. Er verhilft der Stadt zu frischer Luft, indem er die Abgase abtransportiert und zu einer Abkühlung. Dieses Windsystem tritt meist nachts und in den frühen Morgenstunden auf, wenn warm-trockene, windstille Hochdruckwetterlagen vorliegen (Forkel 2016).

Wichtige weitere Begriffe in Bezug zum Luftmassentransport sind die Advektion und Konvektion. Die Advektion bezeichnet den horizontalen Transport von Lufteigenschaften mit dem Windfeld, wie die Lufttemperatur, den Impuls und Wasserdampf. Im *Kapitel 2.6 Inhomogenitäten in städtischen Strukturen* wird auf advective Effekte näher eingegangen. Im Gegensatz zur Advektion transportiert die Konvektion in vertikaler Richtung Lufteigenschaften (Foken 2006).

### 2.3.2 Straßencanyon

Eine urbane bauwerkliche Besonderheit der Stadthindernisschicht ist die Straßenschlucht.

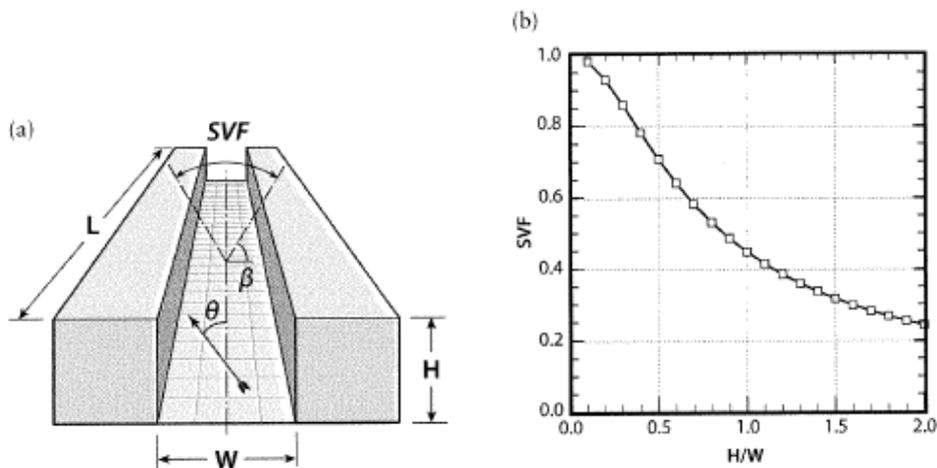


Abbildung 2.2: Geometrie eines Straßencanyons und Sky-View-Faktor (Erell et al. 2011)

Eine Straßenschlucht entsteht, wenn hohe Gebäude eine Straße an beiden Seiten säumen. Ein Paradebeispiel für eine Stadt mit vielen Straßencanyons ist New York. Hohe Wolkenkratzer umgeben breite Straßenverläufe. Die Geometrie der Schlucht bestimmt die Effekte auf das Stadtklima. Wichtig ist das Verhältnis von Gebäudehöhe zu Straßenbreite (Wand-zu-Wand Distanz) (siehe Punkt a) in Abbildung 2.2). Der Öffnungswinkel der Schlucht bestimmt den Sky-View-Faktor (siehe Punkt b) in Abbildung 2.2).

$$\text{SVF} = \cos \beta \quad (\text{F2.1})$$

$$\beta = \tan^{-1} (H/0,5*W) \quad (\text{F2.2})$$

Der Sky-View-Faktor ist hoch, wenn das Verhältnis von Höhe zu Breite klein ist. Dieser Faktor beschreibt den Anteil an sichtbarem Himmel, wenn man in der Mitte der Schlucht steht und nach oben sieht. Wenn die Schlucht breit ist und die Gebäude niedrig sind, dann ist natürlicherweise mehr Himmel sichtbar, als in einem schmalen Canyon (Erell et al. 2011).

Die Strahlungsgeometrie wird durch den Straßencanyon verändert. Wenn der Himmelsichtfaktor klein ist, gelangt weniger Strahlung in Bodennähe und kann auch nicht wieder von dort abstrahlen. Gebäudeflächen bekommen stattdessen das Meiste von der Strahlung ab. Ein gewisser Teil der Strahlung wird absorbiert, während der Rest reflektiert wird. Dieser Anteil wird dann wieder von Gebäudeflächen absorbiert usw. Diese Mehrfachreflexion und Absorption führt zur Erwärmung der Bebauung und trägt wesentlich zur Hitzebelastung der Menschen bei. Die Gebäudematerialeigenschaften sind für die hohen Oberflächentemperaturen mitverantwortlich und führen zu enormen Abstrahlungen. Dieser Effekt lässt sich durch Fassaden- und Dachbegrünung abschwächen. Pflanzen wandeln bei der Transpiration die Sonnenenergie in latente Wärme (Wasserdampf) um und dabei bleibt die Oberflächentemperatur der Vegetation nahe an der Lufttemperatur (Mursch-Radlgruber 2009).

Ein weiterer Effekt der Straßenschlucht ist die Beeinflussung der Windrichtung durch die Kanalisierung des Windes. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Straßenschlucht Nord-Süd oder Ost-West ausgerichtet ist. Je nach übergeordneter Windrichtung, wird der Wind in der Schlucht verstärkt oder durch auftretende Reibungseffekte abgeschwächt (Kuttler, b 2004).

## **2.4 Energieerhaltungssatz**

Der erste Satz der Thermodynamik besagt, dass in einem geschlossenen System Energie nicht gebildet bzw. verloren gehen kann, sondern von einer Form in die Andere umgewandelt werden kann. Für ein vereinfachtes System bedeutet dies:

**Energie Input = Energie Output + Änderung in gespeicherter Energie**

Es muss angemerkt werden, dass Energie Input und Energie Output nicht gleich groß sein müssen, vor allem wenn längere Zeiträume betrachtet werden. Die Form des Inputs und Outputs ist ebenfalls nicht gleich. Es ist ein Zusammenspiel von mehreren Formen des zeitgleichen Energie Inputs und Outputs, welches im Endeffekt dazu führt, dass es zu einer Erwärmung oder Abkühlung eines Systems kommt (Erell et al. 2011).

## 2.5 Strahlungsbilanz Erde

Der Planet Erde wird von der Sonne mit Energie versorgt. Diese verfügbare Energie erhält die Erde in Form von elektromagnetischer Strahlung. Aufgrund der hohen Temperaturen, die auf der Sonnenoberfläche herrschen ( $\sim 5700^\circ\text{C}$ ), emittiert sie kurzwellige Strahlung ( $0,2$  bis  $3\ \mu\text{m}$ ) im sichtbaren Wellenlängenbereich. Die bei einem Planeten ankommende Energie ist von dessen Entfernung zur Sonne abhängig. Die Solarkonstante beschreibt die Intensität der Sonneneinstrahlung aller Wellenlängen am oberen Rand der Erdatmosphäre und entspricht einem mittleren Wert von  $1367\ \text{W/m}^2$  (Watt pro Quadratmeter). Die Solarkonstante schwankt aufgrund von variabler Sonnenaktivität und gilt für den Bereich des Äquators, da dort die Strahlung senkrecht auf die Erdoberfläche trifft. An den Polen ist die Strahlung durch die Abflachung weniger intensiv. Letztendlich erreichen im Mittel  $342\ \text{W/m}^2$  den oberen Rand der Atmosphäre, da die Erdkugel ständig in Bewegung ist und nur eine Hälfte der Sonne zugewandt ist.

Die Strahlungsbilanz der Erde setzt sich aus einem kurzwelligen  $Q_k$  und einem langwelligen  $Q_l$  Anteil zusammen (Berechnung siehe Seite 21). Die ankommende Energie von der Sonne kennzeichnet den kurzwelligen Teil.

Im Durchschnitt werden rund  $107\ \text{W/m}^2$  von der einfallenden Strahlung wieder ins All reflektiert. Die Reflexion erfolgt an Wassertropfen in den Wolken, an Aerosolen in der Atmosphäre und auch direkt an der Erdoberfläche. Die Eigenschaft der Erde, Strahlung zu reflektieren, wird planetare Albedo genannt (ZAMG 2016). Der mittlere Wert der planetaren Albedo beträgt 30% (NASA 2016).

Die Atmosphäre absorbiert  $67\ \text{W/m}^2$  durch Wasserdampf und andere Aerosole und wird dadurch erwärmt. Die Erdoberfläche erreicht rund die Hälfte der ursprünglichen kurzwelligen Sonneneinstrahlung,  $168\ \text{W/m}^2$ , welche absorbiert wird. Durch die Aufnahme dieser Energie wird die Erdoberfläche erwärmt. Den Pflanzen kommt die Energie auch zugute, da sie Biomasse durch Photosynthese aufbauen können. Die Erde speichert die restliche aufgenommene Energie nicht, sondern gibt sie in Form von langwelliger ( $3-60\ \mu\text{m}$ ), nicht sichtbarer Wärmestrahlung ( $390\ \text{W/m}^2$ ) und Konvektion ( $24\ \text{W/m}^2$ ) wieder an die Atmosphäre und das Weltall ab. Ein Teil der Energie wird auch für die Umwandlung von Wasser in Gas durch pflanzliche Evapotranspiration ( $78\ \text{W/m}^2$ ) verwendet und als latente Wärme abgegeben. Durch die eingebrachte Energie werden auch Gewässer erwärmt und es kommt zur Verdunstung. Diese Vorgänge sind Teil der langwelligen Strahlungsbilanz  $Q_l$  (Berechnung siehe Seite 21). In Abbildung 2.1 sind die Wege der Strahlungsbilanzen schematisch abgebildet. Die Zahlen in der Abbildung sind globale Mittelwerte, da die Sonneneinstrahlung je nach Position auf der Erdkugel anders ist.

Außerdem spielen noch weitere Faktoren eine Rolle wie z.B. das Vorhandensein von Wasserflächen und Zirkulationen in Atmosphäre und Ozeanen. In der Grafik ist eine ausgeglichene Energiebilanz zu sehen (ZAMG 2016).

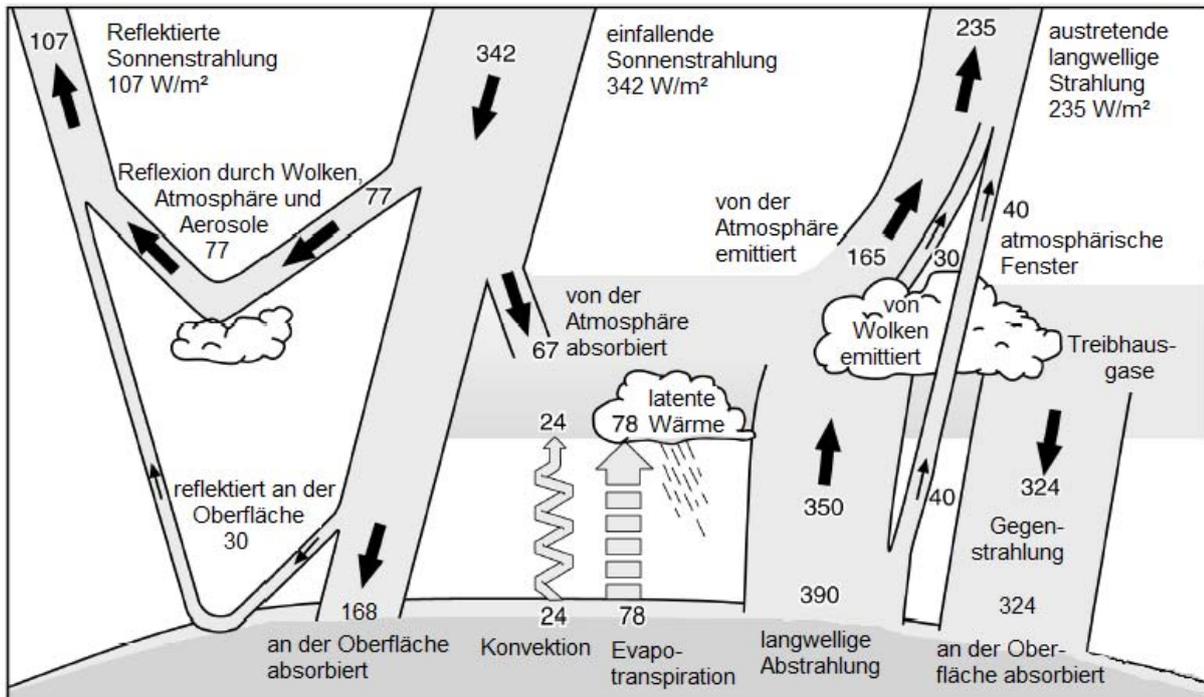


Abbildung 2.3: Strahlungshaushalt der Erde (Solomon et al. 2007)

### 2.5.1 Treibhauseffekt

Die Strahlungsbilanz ist positiv, wenn die Erde mehr Energie erhält als sie ins Weltall abgibt. Der natürliche Treibhauseffekt ist die treibende Kraft, die es ermöglicht, dass auf der Erde eine angenehme Durchschnittstemperatur von  $+15^{\circ}C$  statt kalten  $-18^{\circ}C$  vorherrscht (ZAMG 2016).

Die von der Erdoberfläche emittierte langwellige Wärmestrahlung beträgt  $390 W/m^2$ . Ins Weltall gelangen ungehindert ungefähr  $40 W/m^2$  durch das atmosphärische Fenster. Die natürlich vorkommenden Treibhausgase Wasserdampf ( $H_2O$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Distickstoffoxid ( $N_2O$ ), Ozon ( $O_3$ ) und Methan ( $CH_4$ ) absorbieren die restlichen  $350 W/m^2$ . Die Haupteigenschaft der Gase, die den Treibhauseffekt erst möglich macht, ist es kurzwellige Strahlung ungehindert durchzulassen und langwellige zu absorbieren und einen Teil wieder zur Erdoberfläche abzustrahlen. Die Gegenstrahlung in Richtung Erde beträgt  $324 W/m^2$ .

Zusammenfassende Strahlungsbilanz (mit den Werten aus der Abbildung):

Auf die Erdoberfläche treffen  $168 \text{ W/m}^2 + 324 \text{ W/m}^2$  auf  $= 492 \text{ W/m}^2$

Die Erdoberfläche verlassen  $24 \text{ W/m}^2 + 78 \text{ W/m}^2 + 390 \text{ W/m}^2 = 492 \text{ W/m}^2$

Da die Abbildung den Vorgang vereinfachend darstellt, fehlt der Betrag, der zur Erwärmung der Erdoberfläche führt. In Wirklichkeit ist die Bilanz leicht positiv mit  $\sim 1 \text{ W/m}^2$  (ZAMG 2016).

## 2.5.2 Globalstrahlung

Ein wichtiger Begriff, der bei der Energiebilanz nicht fehlen darf, ist die Globalstrahlung  $G$ . Die Globalstrahlung bezeichnet im Grunde die kurzwellige Sonneneinstrahlung und setzt sich aus einer direkten Sonnenstrahlung  $D$  und einer diffusen Himmelsstrahlung  $H$  zusammen. Die diffuse Strahlung wurde zuvor durch Aerosole und Wolken in der Atmosphäre gestreut. Sie trifft zusammen mit der direkten Strahlung auf der Erdoberfläche auf. Der Teil der von der Erdoberfläche ins Weltall reflektiert wird, heißt Reflexstrahlung  $R$  ( $30 \text{ W/m}^2$ ) (Foken 2006).

## 2.5.3 Albedo

Die Albedo  $a$  bezeichnet das Verhältnis von reflektierter zu einfallender kurzwelliger Strahlung.

$$a = - R/G \quad (F2.3)$$

Die Albedo wird entweder in Prozent % oder als ein Wert zwischen 0 und 1 angegeben. Sie ist ein Maß für das Reflexionsvermögen eines Körpers oder einer nicht selbst leuchtenden Oberfläche. Sie gibt auch an wie groß der Anteil der Strahlung ist, der von einer Fläche absorbiert wird. Je niedriger die Albedo, desto geringer das Rückstrahlvermögen und desto größer die Absorption. In Städten wird versucht, Gebäudewänden eine hohe Albedo zu geben, damit eine Aufheizung der Fläche verhindert wird. Dies wird z.B. durch Fassadenbegrünung erreicht. Einige Beispiele werden in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Tabelle 2.1: Albedo verschiedener Unterlagen (modifiziert nach Geiger et al. 1995)

Unterlage	Albedo
Sauberer Schnee	0,75-0,98
Grauer Boden, trocken	0,25-0,30
Weißer Sand	0,34-0,40
Gras	0,18-0,20
Eichen	0,18
Kiefern	0,14
Wasser, rau, Sonnenhöhe $90^\circ$	0,13

## 2.5.4 Strahlungsbilanz kurz- und langwellig

Die kurzwellige und langwellige Strahlungsbilanz wurden bereits auf Seite 17 genauer erläutert. Die Globalstrahlung  $G$  minus der Reflexion  $R$  beschreibt die kurzwellige Bilanz  $Q_k$ . Die Globalstrahlung kann auch durch die direkte und diffuse Strahlung ( $D + H$ ) ausgedrückt werden.

**Kurzwellige Strahlungsbilanz  $Q_k$ :**

$$Q_k = G - R = D + H - R \quad (F2.4)$$

Die kurzwellige Strahlungsbilanz  $Q_k$  lässt sich auch mithilfe der Albedo ausdrücken:

$$Q_k = G - R = D + H - R \quad (F2.4)$$

$$Q_k = G \cdot (1 - a) \quad (F2.5)$$

Die langwellige Strahlungsbilanz  $Q_l$  kann auch durch die effektive Ausstrahlung definiert werden. Diese setzt sich aus der Ausstrahlung der Erdoberfläche  $A_o$  minus der Gegenstrahlung  $A_g$  zusammen.

**Langwellige Strahlungsbilanz  $Q_l$ :**

$$Q_l = A_E = A_o - A_g \quad (F2.6)$$

Die gesamte Strahlungsbilanz (Nettostrahlung) ist die Summe der kurzwelligen und der langwelligen Strahlungsbilanz. Sie stellt die Differenz zwischen der absorbierten Globalstrahlung  $Q_k$  und der effektiven Ausstrahlung  $A_E$  dar. Bei der Berechnung muss auf das Vorzeichen geachtet werden.

**Gesamte Strahlungsbilanz  $Q$  (Nettostrahlung):**

$$Q = Q_k + Q_l \quad (F2.7)$$

$$Q = G - R - A_E \quad (F2.8)$$

## 2.5.5 Städtische Energiebilanz

Die städtische Energiebilanz setzt sich aus dem Strahlungs- und Wärmehaushalt zusammen.

Die allgemeine Formel lautet:

$$Q + Q_{\text{anthr}} + Q_{\text{met}} + Q_H + Q_E + Q_B = 0 \quad (F2.9)$$

Die Summe Strahlungsbilanz  $Q$  besteht aus der anthropogenen Wärmeflussdichte  $Q_{\text{anthr}}$  der metabolischen Wärmeflussdichte  $Q_{\text{met}}$ , der fühlbaren Wärmeflussdichte  $Q_H$ , der latenten Wärmeflussdichte  $Q_E$  und dem Bodenwärmestrom  $Q_B$ . Aufgrund der leicht positiven Strahlungsbilanz muss die überschüssige Energie durch turbulente Energieströme wieder an die Atmosphäre abgeführt werden.

Der **latente Wärmestrom**  $Q_E$  kommt durch Verdunstung zustande. Er wird bei Verdunstungsvorgängen wieder an die Atmosphäre abgegeben. Der **fühlbare Wärmestrom**  $Q_H$  oder auch sensibler Wärmestrom genannt, wird direkt an die Luft abgegeben. Die Erwärmung der Luft erfolgt durch den fühlbaren Wärmestrom. Der Transport erfolgt vom Boden aus in die Höhe.

Der **Bodenwärmestrom**  $Q_B$  gilt prinzipiell auch für urbane Oberflächen und Vegetation. Untertags werden der Boden bzw. andere Oberflächen durch die kurzwellige Sonneneinstrahlung stark aufgeheizt. Der Wärmetransport geht in den Boden hinein. Nachts wiederum emittiert der Boden langwellige Wärmestrahlung an die umgebende Luft. Dadurch kühlt er wieder ab. Dieser Vorgang führt zu vertikalen Temperaturgradienten. Gleichermaßen emittieren versiegelte Flächen wie zum Beispiel Asphalt, Betonflächen und Gebäudefassaden nachts die untertags gespeicherte Wärme. Dieser Mechanismus ist von mehreren materialspezifischen Parametern abhängig. Der molekulare Wärmeleitkoeffizient, die volumetrische Wärmekapazität und der thermische Diffusionskoeffizient der Materialien bestimmt das Ausmaß des Wärmetransportes (Foken 2006).

## 2.6 Inhomogenitäten in städtischen Strukturen

Wenn es um die Berechnung der Energiebilanzen geht, ist zu berücksichtigen, dass die Oberfläche der Erde nicht glatt und flach ist. Ganz im Gegenteil: man findet überall eine große Vielfalt an Arealen und Strukturen.

Besonders in Städten gibt es eine Vielfalt an Oberflächenstrukturen und Terrains. Da der Großteil der städtischen Fläche mittlerweile aus versiegelten Flächen besteht, spielen diese eine nicht zu vernachlässigende Rolle für das Klima. Andere Strukturen in der Stadt wären zum Beispiel grüne Flächen, Hochhäuser, dicht bebautes Gebiet und Einfamilienhäuser, sowie Industriezonen, Areale unter Einfluss von Flüssen und angrenzende Wälder.

Dies macht die Berechnung etwas schwieriger, da die räumlichen Inhomogenitäten zu unterschiedlichen Effekten führen. Jede einzelne Struktur hat ihre eigenen thermischen, radiativen, hydro- und aerodynamischen Eigenschaften. Diese wären zum Beispiel: Albedo, Emissivität, Bodenleitfähigkeit, Bodenfeuchtigkeitsgehalt, spezifische Wärmekapazität, Oberflächenrauheit,

etc. Jedes Areal verfügt deswegen über eigene Wasser- und Energiekreisläufe, welche für die unterschiedlichen Oberflächenklimata, Mikroklimata und atmosphärischen Klimata verantwortlich sind. Sehr stark davon abhängig sind die Größen der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeitsprofile. Bedingt durch diese angrenzenden Inhomogenitäten formen sich horizontale Gradienten, die nahe der Oberfläche am größten sind. Zwischen angrenzenden Arealen kommt es aufgrund der Gradienten zu Interaktionen. Die Energiebilanzen können somit weder verallgemeinert, noch kollektiv berechnet werden (Oke 1987).

### **2.6.1 Advektive Effekte**

Der Begriff Advektion steht für den horizontalen Transport von Luftmassen (Erell et al. 2011). Durch die zuvor besprochenen Inhomogenitäten kommt es zu einem zusätzlichen Effekt, der „Mikro-Advektion“. Dieser wird durch die horizontalen Gradienten der unterschiedlichen Flächen vorangetrieben. So wurde gezeigt, dass die Energieflüsse in einem Vorstadtgebiet, innerhalb eines Radius von 100 bis 1000 m in einem Rahmen von etwa 40% schwanken können (Foken 2006). Der Advektionsterm  $A_{ad}$  wird in Berechnungen verwendet, um die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 2 m zu beschreiben.  $[A_{ad}] = \text{m/s}$

Es gibt grundsätzlich 3 verschiedene advektive Effekte:

- „Clothesline-effect“ – Wäscheleineneffekt
- „Leading-edge or Fetch-effect“ – Fetch-Effekt
- „Oasis-effect“ – Oaseneffekt

#### **2.6.1.1 Clothesline-Effect**

Der „Clothesline-effect“ beschreibt den Effekt, den der Wind auf die Baumkronen der Pflanzenwelt hat, wenn dieser durch deren Blätter weht. Die Evapotranspiration der Pflanzen wird dadurch erhöht. Somit gelangt über die Baumkronen mehr Feuchtigkeit in die Atmosphäre. Kommt der horizontale Windinput von einem trockenen Gebiet mit wärmerer Luft, wird dieser Effekt verstärkt, da die Wärmezufuhr und der Dampfdruck erhöht werden. Je höher der Pflanzenwuchs ist, desto höher ist die Transpirationsrate.

Dieser Effekt beruht auf den Eigenschaften, die ebenfalls eine Wäscheleine mit nasser Wäsche aufweist. Nasse Wäsche, die auf einer hoch hängenden Wäscheleine hängt, trocknet viel

schneller, als nasse Wäsche, die auf Bodenhöhe in der Sonne liegt. Das liegt hauptsächlich am Wind, der durch die nasse Wäsche durchwehen kann, was in Bodennähe nicht möglich ist (Oke 1987).

### 2.6.1.2 Leading-edge effect bzw. Fetch-Effekt

Grenzt ein Gebiet mit spezifischen Oberflächeneigenschaften an ein anderes Gebiet mit anderen und klimatisch unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften, so heißt die Grenze (Systemgrenze) zwischen diesen Gebieten „leading-edge“. Strömt Luft über das erste Gebiet und kommt zum Rand der anderen Fläche, muss sie sich den neuen Gegebenheiten (Grenzbedingungen) anpassen. In Abbildung 2.2 ist dieser Vorgang schematisch dargestellt.

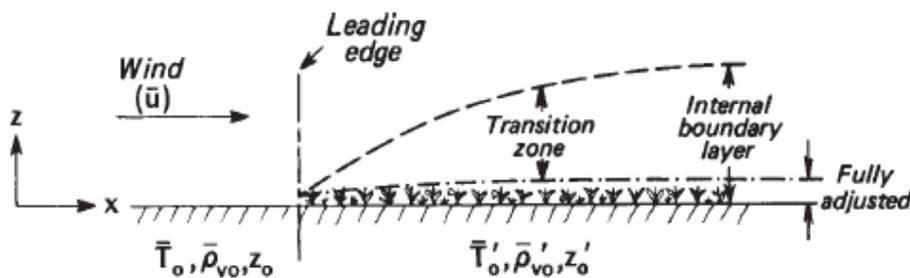


Abbildung 2.4: Darstellung des Fetch-Effektes (Oke 1987)

Die gesamte Luft kann sich nicht auf einmal den neuen Bedingungen anpassen. Dieser Vorgang beginnt nahe der Oberfläche und verbreitet sich allmählich aufwärts. Der Begriff „interne Grenzschicht“ bezeichnet den Teil der Luft, dessen Eigenschaften durch die neue Oberfläche beeinflusst werden. Die Tiefe dieser internen Grenzschicht wächst mit zunehmender Distanz, oder auch „fetch“ genannt, in Windrichtung von dem „leading-edge“ weg. Der Bereich der direkt mit der Oberfläche in Berührung kommt, also die unteren 10% der Grenzschicht, hat sich vollkommen an deren Eigenschaften angepasst. Der Rest der internen Grenzschicht wird durch die Oberfläche modifiziert, jedoch nicht angeglichen und wird deshalb „transition zone“ oder „Übergangszone“ genannt. Die Eigenschaften der Luft oberhalb der internen Grenzschicht werden gänzlich durch Aufwindeffekte bestimmt und nicht durch die neue Oberfläche (Oke 1987).

Eine wichtige Rolle spielt der Fetch-Effekt bei meteorologischen Feldmessungen. Beim Aufstellen von Messgeräten muss darauf geachtet werden, in welcher Höhe diese angebracht werden und auch wie die Umgebung aussieht. Durch den Fetch-Effekt kann es passieren, dass man nicht das misst, was man eigentlich braucht bzw. beabsichtigt hat zu messen. Es ist möglich, dass durch die Windrichtung und die ausbreitende Grenzschicht, die Daten von der Umgebung im Umkreis

aufgezeichnet werden und nicht die eigentlich gesuchten Werte von der Fläche unterhalb des Messgeräts (Jaeger 2002).

### 2.6.1.3 Footprint

Wie bereits im Kapitel „Fetch-Effekt“ erläutert wurde, sollte beim Montieren von Messstationen auf einer bestimmten Höhe beachtet werden, dass nicht die Fläche direkt unterhalb erfasst wird. Der so aufgezeichnete Fluss repräsentiert nicht die Austauschigenschaften vom gesuchten Bereich sondern vielmehr die Eigenschaften von der Oberfläche der windzugewandten Umgebung der Messstation (Gash 1986). Die Bezeichnung „Footprint“ beschreibt dieses Phänomen und steht für den effektiven Einflussbereich eines Messstandortes (Foken 2006).

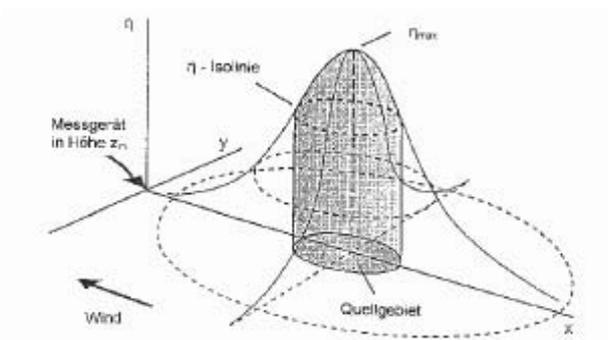


Abbildung 2.5: Footprintfunktion mit Quellgebiet (Foken 2006)

### 2.6.1.4 Oasis-Effect bzw. Oaseneffekt

Der „Oaseneffekt“ wurde ursprünglich in der Wüste beobachtet, behält jedoch überall seine Gültigkeit, wo solche Bedingungen vorzufinden sind. Die Oase stellt eine Feuchtigkeitsquelle in einer trockenen, warmen Umgebung dar (Oke 1987). Diese Bedingungen, sowie ein kräftiger Wind, begünstigen die Verdunstung des vorhandenen Oasenwassers (Foken 2006).

Untertags wird die Energie aus der Sonneneinstrahlung und der Strahlungsbilanz verwendet, um die Verdunstung voranzutreiben. In der Folge kühlt die Luft über der Oase ab und wird in Form von latenter Wärme durch den Wind abtransportiert. Dadurch strömt immer mehr Luft vom warmen, trockenen Gebiet zur Oase und es bildet sich ein Temperaturgradient aus. Wenn es Nacht wird und keine Sonneneinstrahlung mehr gegeben ist, dann hört der Prozess nicht auf. Die Luft in der

Umgebung von der Oase ist noch aufgewärmt und somit kann die fühlbare Wärme entzogen werden. Diese dient dann als Antrieb für den Verdunstungsprozess. Im Großen und Ganzen ist die Evapotranspiration größer als die Netto-Strahlung.

Der Oaseneffekt findet auch in Städten Anwendung, da es begrünte Parks oder Bäume gibt, die denselben Effekt hervorrufen. So ist es in Parks immer kühler, als in der urbanen Umgebung. Durch die höhere Wärmespeicherung einer Stadt im Sommer, kommt es in der Nacht ebenfalls zu dem Effekt, dass die fühlbare Wärme der Luft entzogen wird und dass die Verdunstung nicht aufhört. Der latente Wärmestrom versiegt erst gegen Mitternacht und wechselt dann sein Vorzeichen (Oke 1987).

## **2.7 Wärmeinseleffekt**

Der globale Wandel war der Auslöser für viele Änderungsvorgänge auf dem Planeten Erde. Der Prozess des Bevölkerungswachstums, der Globalisierung und der Verstädterung entwickelte sich parallel zu der globalen Erwärmung. Schon im Jahr 1818 wurde der Effekt der urbanen Wärmeinsel erstmals von John Howard beschrieben. Die Stadt London war die erste Stadt überhaupt, bei der man den Wärmeinseleffekt beobachtet hat. Seit damals war der Effekt Mittelpunkt vieler Klimawandelforschungen. Der Begriff der „Urbanen Wärmeinsel“ wurde zum ersten Mal in den 1940er Jahren geprägt (Balchin and Pye, 1947).

Der Wärmeinseleffekt beschreibt grob gesehen den Temperaturunterschied zwischen der Stadt bzw. dem urbanen Gebiet und dem ländlichen Umland (Stewart and Oke 2012). Die Intensität des Effekts variiert je nach Jahreszeit oder im Tagesgang und ist ein sehr komplexer Vorgang (Erell et al. 2011).

Es ist unbedeutend, um welche Klimazone es sich handelt, ob warmes oder kaltes Gebiet, der Effekt ist wahrnehmbar. Dabei ist es auch bedeutungslos, auf welcher Fläche sich das urbane Gebiet erstreckt (Stewart and Oke 2012).

Üblicherweise wird die Temperatur, noch unterhalb der städtischen durchschnittlichen mittleren Dachhöhe, bei einer Standardhöhe von 1-2 m über dem Boden gemessen. Diese Stadthindernisschicht ist der untere, bodennahe Bereich der Stadtgrenzschicht (siehe Kapitel urbane Atmosphäre). Im Gegensatz zur Lufttemperatur bei Standardmesshöhe in ländlich ausgeprägten Gebieten, ist die Luft in der Stadthindernisschicht deutlich wärmer (Stewart and Oke 2012).

Es wurden 3 verschiedene Formen des Wärmeinseleffektes beobachtet:

- Surface Heat Island – Bodenwärmeinsel
- Canopy-Layer Heat Island – Stadthindernisschichtwärmeinsel
- Boundary-Layer Heat Island – Stadtgrenzschichtwärmeinsel

Die **Bodenwärmeinsel** tritt auf, wenn die ländlichen, natürlichen Oberflächen in der Umgebung des urbanen Gebietes kühler sind als die Temperatur der städtischen, versiegelten Oberflächen bzw. Böden. Dieser Effekt ist während des Tages deutlich ausgeprägt und verstärkt sich bei windstillen, sonnigen Bedingungen. Während der Nacht geht diese Temperaturdifferenz zurück. Ist eine Stadt von feuchten Böden oder von viel Vegetation umgeben, so manifestiert sich die Bodenwärmeinsel. Dies ist größtenteils in Europa der Fall. Liegt aber eine Stadt in der Wüste, wo trockene Felsen oder sandige Böden vorherrschen, werden diese untertags meist stärker als die urbanen Oberflächen in der Stadt erwärmt.

Die Form der **Stadthindernisschichtwärmeinsel** macht sich nahe der Oberfläche bemerkbar, indem die Luftschicht die bis zur mittleren Bauhöhe geht, während der Nacht wärmer ist als untertags. Als Voraussetzung muss wenig Wind oder Wolkenbedeckung vorhanden sein. Untertags wird Strahlungsenergie von den Oberflächen in der Stadt aufgenommen und zum Teil gespeichert. In der Nacht wird diese Energie wieder frei, da kein Strahlungsinput mehr vorhanden ist und da die Lufttemperatur anfängt abzusinken. Außerhalb der Stadt ist dieser Effekt nicht anzufinden, da es keine Oberflächen gibt, die untertags Wärme gespeichert haben.

Die **Stadtgrenzschichtwärmeinsel** wird durch Windsysteme und den daraus resultierenden turbulenten Wärmetransport in Windrichtung verursacht. Es bildet sich eine Kuppel aus warmer Luft über der Stadt, die sich untertags über mehrere Kilometer in die Atmosphäre erstrecken kann. In der Nacht schrumpft die Höhe der Luftschicht dann auf einige hundert Meter zurück (Chmielewski et al. 2005).

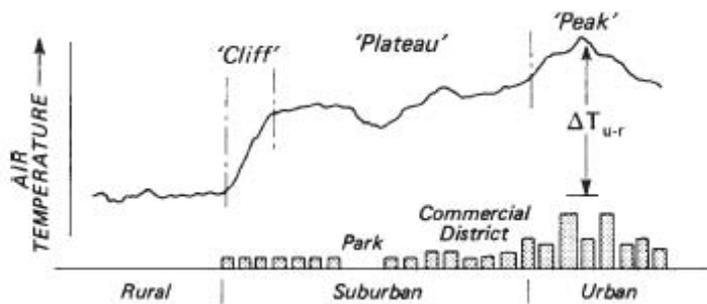


Abbildung 2.6: Temperaturverlauf über der Stadt (Oke 1987)

Mehrere physikalische Vorgänge sind für eine Überwärmung des urbanen Stadtgebietes im Gegensatz zum ländlichen Umland verantwortlich. Die Hauptursache jedoch liegt in den Unterschieden der baulichen Strukturen und in der Landbedeckung. Städte haben durch die hohen Gebäude eine höhere Rauigkeit. Natürliche Oberflächen, wie Böden und Vegetation, wurden Großteils versiegelt.

Gleichermaßen ist auch die Wirkung, die die Menschen ausüben, nicht zu vernachlässigen. Menschliche Körper, sowie ihre Aktivitäten, erzeugen Wärme und setzen Feuchtigkeit frei. Anthropogene Faktoren, darunter der Verkehr mit den resultierenden Treibhausgasemissionen oder Klimaanlage bzw. Heizungen, die Abwärme verursachen, greifen in den Wärmehaushalt, Strahlungshaushalt und Wasserhaushalt einer Stadt ein (Oke 1982) (Lowry and Lowry 2001). Der urbane Wärmeinseleffekt bringt Vor- und Nachteile mit sich:

In kalten Regionen auf der Erde bedeutet eine Erwärmung durch den Wärmeinseleffekt, dass während der Wintermonate Heizkosten gespart werden. Außerdem positiv zu sehen ist, dass dadurch das Wohlbefinden im Freien gesteigert wird, die Straßen weniger vereisen, der Nebel weniger häufig auftritt und dass das mildere Klima bessere Verhältnisse für Pflanzenwuchs und für die Tierwelt schafft.

Die Nachteile des Phänomens liegen auf der Hand. Befinden sich Städte in ohnehin schon warmen Gegenden, so wirkt sich eine Überwärmung durch den Wärmeinseleffekt negativ auf das Wohlbefinden der Bewohner aus. Der von den Menschen gefühlte Hitzestress wird stärker empfunden, in Folge kann es zu Unwohlsein, Krankheit und im schlimmsten Fall zum Tode führen. Eine erhöhte Nachfrage an Klimaanlage wirkt sich auf den Energiebedarf und auf die Kosten aus. Durch die Benutzung von Klimaanlage wird noch dazu Abwärme frei, die zusätzlich zum Wärmeinseleffekt beiträgt (Stewart und Oke 2012).

### **2.7.1 Klimaverbesserung in den Städten**

Um dem Wärmeinseleffekt einzudämmen bedarf es genereller Änderungen am Stadtklima. Die Luftqualität spielt einen großen Faktor in der Eindämmung des Wärmeinseleffektes. Die Schadstoffemissionen sollten reduziert werden. Es sollte versucht werden die Bevölkerung dazu zu animieren mit den öffentlichen Verkehrsmitteln zu fahren und das Auto stehen zu lassen. Ein Umstieg auf umweltfreundlichere Fortbewegungsmittel, wie z.B. Fahrräder, würde auch zu einem Wegfall der Abwärme von Kraftfahrzeugen führen. Eine Verbesserung des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), wie eine höhere Taktfrequenz und Ausbau des Netzes, wäre wichtig, um mehr Menschen den Umstieg zu erleichtern.

Die Durchlüftung innerhalb der Stadt sollte verbessert werden, nicht nur um die Emissionen zu verdünnen, sondern auch um die Stadt ein wenig abzukühlen und um den Luftaustausch voranzutreiben. Es sollten naturbelassene Freiflächen erschaffen werden. Grünflächen, Parks und Wasserflächen sollten in Städten Einzug finden, da sie die thermische Belastung senken würden. Eine Auflockerung der baulichen Strukturen zusammen mit dem vorher genannten führt zu einem verbesserten Luftaustausch, da es auch das Stadt-Umland Windsystem fördert. Bei der Planung von neuen Bauprojekten und bei der Erschließung neuer Stadtteile, können all diese Faktoren beachtet werden. Es lässt sich aber auch bei schon bestehenden Strukturen etwas ändern und verbessern. Hausfassaden und Dächer können begrünt werden. Dies würde die Aufheizung der versiegelten Flächen eindämmen und zu einer höheren Verdunstungsrate führen. Gebäude sollten saniert werden, um den Energieverbrauch einzuschränken und um den Einsatz von Klimaanlage zu optimieren. Klimagerechtes Bauen sollte an oberster Stelle stehen, da so ein Einsatz von Klimaanlage im Sommer und Heizen im Winter minimiert werden kann (Kuttler, b 2004).

### **2.8 Das Konzept der LCZ nach Stewart und Oke (2012)**

Das System der „Lokalen Klima Zonen“ oder auch „LKZ“, welches von Stewart und Oke im Jahr 2012 eingeführt wurde, ist ein überarbeitetes Klassifizierungssystem für Standorte, das in der urbanen Wärmeinseleffektforschung verwendet wird. Die „Lokalen Klima Zonen“ sind eine Erweiterung der von Oke 2004 eingeführten „Urbanen Klima Zonen“. Das neue Konzept bietet eine Grundlage für den weltweiten Austausch von Klimadaten und Beobachtungen.

Viele Studien haben gezeigt, dass eine einfache Klassifizierung in „urban“ und „ländlich“ nicht mehr ausreicht, um die Standorte und Prozesse bestmöglich zu kategorisieren. Die Begriffe „urban“ und „ländlich“ können nicht verallgemeinernd fassbare Strukturen, Oberflächeneigenschaften oder das thermische Klima beschreiben (Stewart & Oke 2012).

Gemäß Stewart (2011 a,b) hat das kritische Überprüfen der Studien gezeigt, dass es mehr als drei Viertel der empirischen Wärmeinseleffektliteratur misslingt, quantitative Metadaten der Standortexposition oder der Landbedeckung zu liefern. Viele Forscher würden sich auf die duale Einteilung von urbanen und ländlichen Bedingungen verlassen, um die lokalen Landschaften ihrer Messstandorte zu beschreiben.

Die weltweite Vielfalt an städtischen Strukturen lässt sich nicht nur mit einem Wort beschreiben. Der Begriff „urban“ kann viele Bedeutungen haben, je nachdem welche Stadt man damit beschreiben möchte. Ein urbanes Gebiet z.B. in Neu-Delhi (Indien) ist nicht mit einem urbanen Gebiet in Chicago (USA) zu vergleichen. Die Maßstäbe sind nicht dieselben, vor allem wenn man Entwicklungsländer mit Industrieländern vergleicht. Gleichermaßen sind ländliche Regionen nicht zu vereinheitlichen. Besonders in Asien, wo die Populationsdichte hoch ist, rückt der Unterschied zwischen Stadt und Land in den Hintergrund. Als Beispiel wird Tokio genannt, da es als Stadt eine dezentralisierte und zerstreute Struktur aufweist und nahtlos in die Metropolregion Tokio-Yokohama übergeht, die eine urban-ländliche Charakterisierung aufweist (Yamashita 1990).

Um dem Problem entgegenzuwirken, sollten Systeme eingeführt werden, die die physikalischen Eigenschaften der Oberflächenstruktur, der Bedeckung, des Gefüges und des Metabolismus miteinbeziehen (Oke, 2004). Außerdem wäre es wichtig, ländliche Landschaften in die Systeme zu integrieren und Bezeichnungen zu meiden, die kulturelle sowie regionenspezifische Kennzeichnungen verwenden (Stewart and Oke 2012).

Bevor das neue „Lokale Klima Zonen“ System eingeführt werden konnte, sollten 3 wichtige Kriterien erfüllt werden. Zuerst war es notwendig, eine einfache und logische Nomenklatur zu finden, mit der Orte und Objekte bezeichnet werden können (Grigg 1956). Des Weiteren sollte das System den Informationstransfer durch eine Verknüpfung der Orte in der realen Welt mit dem organisierten System von allgemeinen Kategorien erleichtern. Außerdem sollte eine induktive Generalisierung das Hauptkriterium eines neuen Klassifizierungssystems sein. Dies bedeutet, dass das System die zu untersuchenden Objekte und Orte vereinfachen und somit theoretische Behauptungen über deren Beziehungen und Eigenschaften begünstigen soll (Grigg 1956). Die beiden Autoren Stewart und Oke wollten mit ihrem neuen Konzept diese Kriterien erfüllen, zusätzlich alle Regionen inkludieren und kulturunabhängig sein.

Das neue „LKZ“ - System sollte quantifizierbar sein, wenn es um die Gruppeneigenschaften geht, die relevant für das thermische Oberflächenklima auf lokaler Ebene sind. Folglich war das Ziel von Stewart und Oke mit dem neuen Klassifizierungssystem die Basis für Vergleiche zwischen mehreren Standorten, durch eine Förderung konsistenter Dokumentation von Standort-Metadaten,

zu verbessern. Ferner sollte das Bereitstellen eines objektiven Protokolls für das Messen des Ausmaßes des urbanen Wärmeinseleffektes in einer beliebigen Stadt ebenfalls eine große Bedeutung haben (Stewart and Oke 2012).

Das System der „Lokalen Klima Zonen“ ist „lokal“ den Maßstab betreffend, „klimatisch“ in der Art und „zonenbezogen“ in der Repräsentanz, so Stewart und Oke. Die „LKZ“ sind Regionen mit gleichförmiger Oberflächenbedeckung, Struktur, Material und menschlicher Aktivität auf einer Fläche von mehreren hundert Metern bzw. mehreren Kilometern. Jede lokale Klima-Zone verhält sich unterschiedlich auf einer Standardmesshöhe von 1-2 m. Sie haben alle ihre spezifischen Temperaturverläufe, die am besten über trockenen Oberflächen während klaren, ruhigen Nächten und in Gegenden mit einfachem Relief zu tragen kommen (Stewart and Oke 2012).

Es gibt insgesamt 17 verschiedene Standard- „LKZ“, von denen 15 durch die Oberflächenstruktur und Oberflächenbedeckung charakterisiert sind und 2 durch Baumaterial und anthropogene Wärmeemissionen. Die Standardzonen sind unterteilt in „Bautypen“ 1–10 und „Landbedeckungstypen“ A – G. Die Landbedeckungstypen können saisonale oder vergängliche Eigenschaften aufweisen, wie zum Beispiel kahle Bäume im Vergleich zu blühenden oder schneebedeckte, nasse, sowie trockene Böden. Im Gegensatz dazu werden die „Bautypen“ durch die errichteten/erbauten Gebäude auf der vorherrschenden Landbedeckung charakterisiert. Im Fall von „kompakten“ Zonen ist die dominante Bedeckung befestigt bzw. versiegelt und bei „offenen“ Zonen sind Kleingewächse und vereinzelt Bäume dominant. (Stewart and Oke 2012). Die logische Struktur des „LKZ“- Systems wird durch beobachtete und numerische Modellierungsdaten gestützt (Stewart & Oke, 2010; Stewart 2011a).

<p>1. Compact high-rise</p> 	<p>Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.</p>	<p>6. Open low-rise</p> 	<p>Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.</p>
<p>2. Compact midrise</p> 	<p>Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.</p>	<p>7. Lightweight low-rise</p> 	<p>Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).</p>
<p>3. Compact low-rise</p> 	<p>Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.</p>	<p>8. Large low-rise</p> 	<p>Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.</p>
<p>4. Open high-rise</p> 	<p>Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.</p>	<p>9. Sparsely built</p> 	<p>Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).</p>
<p>5. Open midrise</p> 	<p>Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.</p>	<p>10. Heavy industry</p> 	<p>Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.</p>

Abbildung 2.7: Unterteilung der Lokalen Klima Zonen Teil 1 (Stewart and Oke 2012)

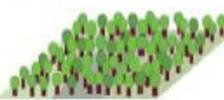
<p>A. Dense trees</p> 	<p>Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.</p>	<p>F. Bare soil or sand</p> 	<p>Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.</p>
<p>B. Scattered trees</p> 	<p>Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.</p>	<p>G. Water</p> 	<p>Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.</p>
<p>C. Bush, scrub</p> 	<p>Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.</p>	<p><b>VARIABLE LAND COVER PROPERTIES</b></p> <p>Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.</p>	
<p>D. Low plants</p> 	<p>Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.</p>	<p>b. bare trees</p>	<p>Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.</p>
<p>E. Bare rock or paved</p> 	<p>Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.</p>	<p>s. snow cover</p>	<p>Snow cover &gt;10 cm in depth. Low admittance. High albedo.</p>
		<p>d. dry ground</p>	<p>Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.</p>
		<p>w. wet ground</p>	<p>Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.</p>

Abbildung 2.8: Unterteilung der Lokalen Klima Zonen Teil 2 (Stewart and Oke 2012)

## 2.9 Universeller Thermischer Klimaindex (Universal Thermal Climate Index, UTCI)

Der Universelle Thermische Klimaindex (UTCI) wurde von der „Internationalen Gesellschaft für Biometeorologie, ISB“ (International Society on Biometeorology) ins Leben gerufen. 2002 gründeten sie eine Kommission (ISB Commission 6), deren Hauptziel es war, einen universellen thermischen Klimaindex zu finden, der auf den neuesten hochmodernen Technologien im Bereich der Ursache-Wirkung-Modellberechnung der thermischen äußeren Umwelt beruht. Es sollten ganzkörperliche thermische Effekte, wie Hyperthermie und Hypothermie, und lokale Effekte, wie Gesichts-, Hand- und Fußabkühlung und Kälteschäden, simultan prognostizierbar sein.

Außerdem wollte die Gesellschaft ein leicht zugängliches physiologisch bedeutungsvolles „Assessment Modell“ kreieren, welches Anwendungen für die Gesundheit und das Wohlbefinden verbessert. Die Erforschung dieser Bereiche bildet die Kernfrage der humanen Biometeorologie. Die Gesellschaft für Biometeorologie hat 2005 den COST (Cooperation in Science and Technical Development) Aktionsplan (COST Action 730) ins Leben gerufen, der eine Weiterführung der ISB Commission 6 on UTCI ist (Jendritzky et al. 2009).

Der Begriff „universell“ bezieht sich auf die Allgemeingültigkeit für alle Datenerhebungen und Bewertungen der äußeren thermalen Verhältnisse im Bereich der humanen Biometeorologie, wie zum Beispiel tägliche Wettervorhersagen und Extremwetterwarnungen, städtische und regionale Planung, bioklimatische Kartierung, Umweltepidemiologie und Klimafolgenforschung. Der öffentliche Wetterdienst, das öffentliche Gesundheitswesen, die Vorsorgeplanung und die Klimafolgenforschung im Gesundheitssektor profitieren von den Forschungen und vom UTCI.

Der Universelle Thermische Klimaindex soll bestimmte Anforderungen erfüllen:

- Thermo-physiologische Signifikanz im gesamten Bereich der Wärmeaustauschbedingungen in existierenden thermischen Umgebungen besitzen.
- Der Index soll in allen Klimaten dieser Erde gültig sein, sowie in allen Jahreszeiten und Skalen.
- Brauchbarkeit für Schlüsselanwendungen in der humanen Biometeorologie.

Der menschliche Körper steht in konstanter Wechselwirkung mit seiner Umwelt. Für den normalen Betrieb und für die Aufrechterhaltung lebenswichtiger Funktionen benötigt er eine Körperkerntemperatur von 36,5 °C – 37,4 °C. Ändern sich die äußeren Bedingungen, so muss er dementsprechend darauf reagieren, um die Körperkerntemperatur konstant zu halten und um die Behaglichkeit, die Leistungsfähigkeit und die Gesundheit aufrecht zu erhalten.

Zunehmende Unbehaglichkeit wird mit einer erhöhten Belastung und Stress assoziiert und wirkt sich dementsprechend auf das kardiovaskuläre und respiratorische System aus.

Auf Kälte und Wärme reagiert der menschliche Körper unbewusst mit Zittern beziehungsweise mit Schwitzen. Bewusste Handlungen sind zum Beispiel das Anziehen und Ausziehen von Kleidung. Diese Handlungen sollen dazu dienen, dass sich der Wärmehaushalt des Menschen an die äußeren Gegebenheiten anpasst. Die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit, der Wind, sowie die Strahlung der Sonne haben direkten Einfluss auf die Thermoregulation des Organismus (Jendritzky et al. 2009).

Wie der Körper auf die unterschiedlichen Einflüsse reagiert, hängt auch sehr stark von der individuellen Konstitution ab. Es ist abhängig vom Alter, Geschlecht, Gewicht, der Fitness, Akklimatisierung und der Morphologie. Zwei davon sind die wichtigsten Prädiktoren und sind auch eng korreliert: das Alter und die Fitness. Ein niedriges Fitnesslevel und/oder ein hohes Alter bedeutet eine geringe kardiovaskuläre Reserve, welche zu einer niedrigen thermischen Toleranz führt. Die Belastung durch thermischen Stress kann für den menschlichen Organismus quantifiziert werden. Der Physiologische Belastungs-Index (Physiological Strain Index PSI) basiert auf der Herzfrequenz und der Kerntemperatur  $T_{core}$  (Hyperthermie/Überhitzung) und auf der Hauttemperatur  $T_{skin}$  und der Kerntemperatur  $T_{core}$  (Hypothermie/Unterkühlung) (Moran et al. 1998/99).

Die Mechanismen mit denen der Körper den Wärmeaustausch mit seiner Umgebung durchführt sind: Konvektion (Wärmeaustausch über ein Medium z.B. Luft), Evaporation (Wärmeverlust durch Verdunstung), langwellige Strahlungsemission (Wärmestrahlung durch elektromagnetische Wellen) und Konduktion (Wärmeübertragung durch direkten Kontakt). Sensible Wärmeübertragung erfolgt durch Konvektion, Strahlung und Konduktion, wobei die Latente Wärmeübertragung durch Evaporation erfolgt (Prinz et al. 2016).

Es existieren viele Modelle, die mittels meteorologischen Parametern versuchen, die „gefühlte Temperatur“ bzw. das „Wohlbefinden“ des Menschen auszudrücken. Diese sind meist einfach gestrickt und beziehen 2 Parameter in die Berechnungen mit ein. Selbst die in den letzten Jahrzehnten als State-of-the-Art geltenden Wärmebilanzmodelle schaffen es nicht, zufriedenstellend die Fragestellung zu beantworten und haben ihre Defizite. Beispiele für bekannte Größen sind: der Heat Index (HI), Wet Bulb Globe Temperature (WBGT), Predicted Mean Vote (PMV), Perceived Temperature (PT) und Heat Stress Index (HSI). Da die Interaktion des menschlichen Körpers und die Prozesse im Inneren des Körpers so komplex sind, geschweige denn, die Interaktion des Körpers mit der Umwelt, bedarf es eines allumfassenden thermo-

physiologischen Wärmebilanzmodells, welches alle Mechanismen des Wärmeaustausches berücksichtigt (Jendritzky et al. 2009).

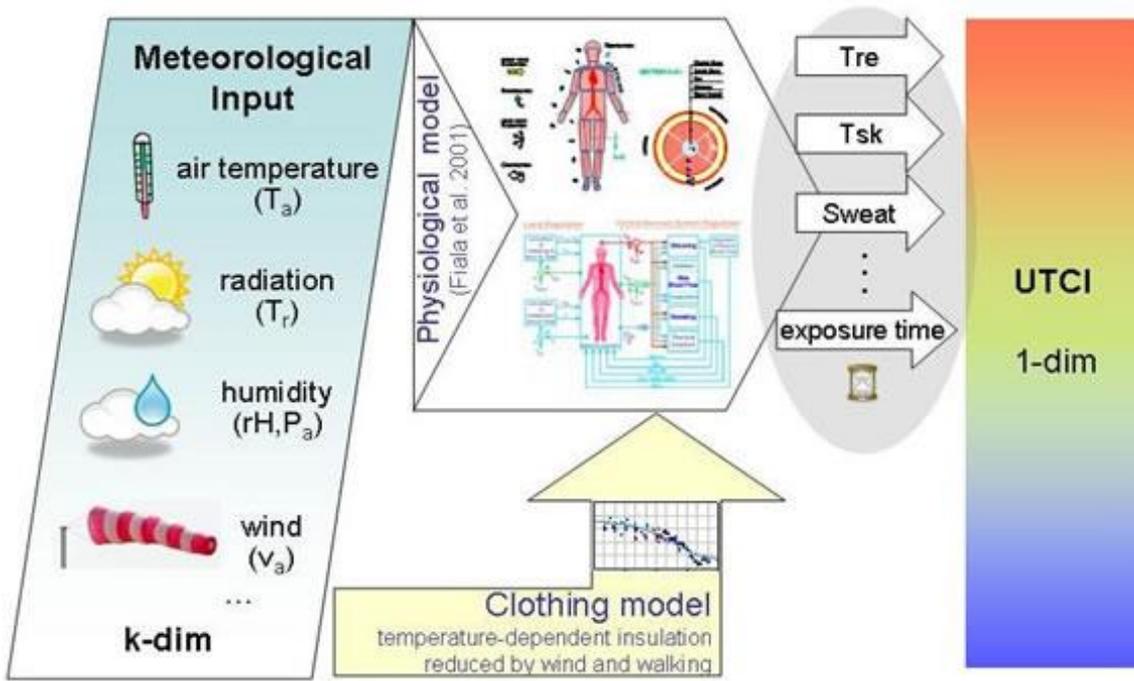


Abbildung 2.9: UTCI-Modellschema (Jendritzky et al. 2009)

Der UTCI kombiniert das physiologische Modell des menschlichen Körpers (metabolische Rate) mit einem Kleidungsmodell (Kleidungswärmedämmung) und den meteorologischen mehrdimensionalen Input Parametern, wie Lufttemperatur, Wasserdampfdruck, Windgeschwindigkeit, mittlere Strahlungstemperatur inklusive der kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse der Atmosphäre und liefert eine eindimensionale Größe (siehe Abbildung 2.9) (Tiefgraber, 2016).

Tabelle 2.2: UTCI Hitzestress-Levels (Jendritzky et al. 2009)

above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

Als Ergebnis erhält man eine Temperaturskalen-Indexgröße. Die UTCI-Temperatur bezeichnet die Lufttemperatur einer definierten Referenzumgebung, die denselben thermischen Stress hervorruft.

Im Bereich von +9 °C bis +26 °C bedeutet es für den menschlichen Körper, dass er keinem thermischen Hitzestress ausgesetzt ist (siehe Tabelle x). Bei einem UTCI von +32 °C bis +38 °C ist man schon starkem Hitzestress ausgesetzt. Der große Vorteil des UTCI ist die Gültigkeit auch bei sehr niedrigen Temperaturen. Zum Beispiel bedeutet ein UTCI von 0 °C bis -13 °C moderaten Kältestress (Tiefgraber, 2016).

## **3. Methodik**

### **3.1 Standort der Messungen**

Als Messstandort wurde das Gelände der Universität für Bodenkultur in Wien (Österreich) ausgewählt, da es einige wichtige Kriterien erfüllt hat. Zunächst war es notwendig, einen Standort ausfindig zu machen, wo ohne Bedenken Mini-Messstationen über mehrere Monate befestigt werden konnten, ohne dass diese von Passanten mutwillig zerstört oder abgenommen werden konnten. Wichtig war es ebenfalls, dass das Messgelände jederzeit begehbar ist, da die mobilen Messungen nicht nur tagsüber, sondern auch abends durchzuführen waren. Außerdem war ein Gelände mit unterschiedlichen Gelände-Charakteristiken von Bedeutung, um die lokalen Klimazonen (LKZ) entsprechend zu repräsentieren. Eine nähere Charakterisierung des BOKU-Geländes anhand der lokalen Klima Zonen wird im Kapitel Ergebnisse zu finden sein (siehe Seite 54). Das BOKU-Gelände auf der Türkenschanze, an der Grenze des 18. und 19. Bezirkes, in der Peter-Jordan-Straße 82, erfüllt diese Kriterien und wurde somit für die Messungen ausgesucht. Der Standort ist frei gelegen, da er auf einem Geländerrücken eines Ausläufers des Wienerwaldes liegt. Es mussten für das Aufstellen keine speziellen Bewilligungen angefordert werden, es war nur wichtig, dass die Bäume, an denen die Messstationen befestigt wurden, nicht beschädigt werden. Eine minimal invasive Methode, die auch Regenfälle überstehen musste, war das Befestigen der Wetterstationen mittels Klebeband an der Rinde. Dadurch, dass das Gelände der BOKU sehr weitläufig ist, findet man auf dem Standort sowohl versiegelte Oberflächen, wie zum Beispiel Parkplätze oder die Fläche direkt vor dem Haupteingang des Wilhelm-Exner-Hauses, als auch dichten Baumbestand, wie zum Beispiel den Bereich zwischen dem Gregor-Mendel-Haus und Adolf von Guttenberg-Haus. Mittelhohe Gebäude aus Ziegel und Beton wechseln Grasflächen, Sträucher und einzelne Bäume ab. Für das Montieren der Mini-Wetterstationen auf 2 Meter Höhe, war es von Vorteil, dass Lichtmasten und Stiegegeländer an den strategisch wichtigen Stellen vorzufinden waren.

#### **3.1.1 Das Klima Wiens**

Wien liegt im Osten von Österreich und weist ein kontinental beeinflusstes Klima auf. Dies bedeutet, dass wenig Niederschlag fällt, der Sommer heiß werden kann und der Winter gemäßigt ist. Da der Messstandort im Westen von Wien liegt, ist das Klima dort vom Ausläufer des Wienerwaldes beeinflusst. Der meist starke Wind, der vom Westen kommt, trägt dazu bei, dass sich die Temperaturen kühler anfühlen als sie sind (Iten 2016).

## 3.2 Versuchsaufbau

### 3.2.1 Stationäre Messungen

Insgesamt wurden 8 Mini-Wetterstationen im Zeitraum von 06.07. – 20.10.2015 aufgestellt.

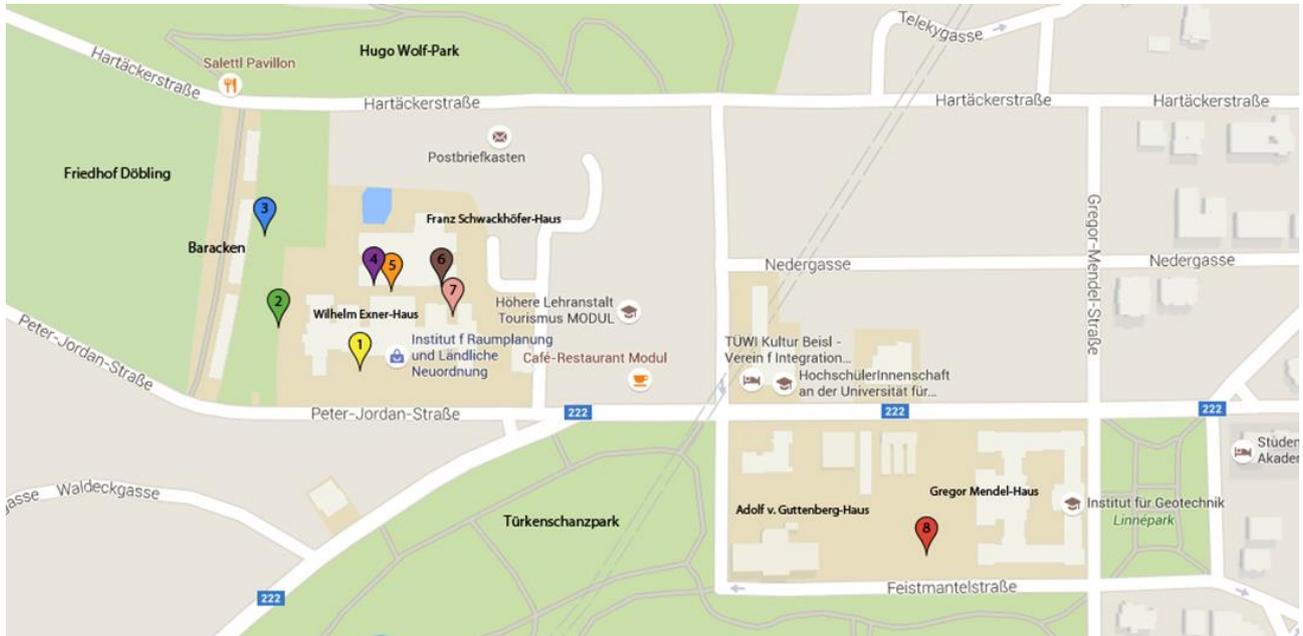


Abbildung 3.1: Standortplan BOKU-Gelände Türkenschanze (Google Maps 2016)

Die Wetterstationen, im weitesten Sinn auch Klimahütten, haben die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit aufgezeichnet. Die Datenspeicherung der 10-Minuten-Mittelwerte erfolgte mittels Datenlogger. Für die, im Rahmen meiner Masterarbeit, durchgeführten Messungen wurden *Onset HOBO U23 Pro v2 Temperature/Relative Humidity Data Logger* verwendet. Die gesammelten Daten wurden alle zwei Wochen abgelesen. Dies geschah mit einer *Onset HOBO Optic USB Base Station*, die ganz einfach an die Wetterstation angeschlossen und durch den USB-Port mit dem Computer verknüpft wurde (siehe Abbildung 3.2).



Abbildung 3.2: Onset HOBO Optic USB Base Station

Die Software *HOBOWare*, ebenfalls von Onset Computer Corporation, wurde verwendet, um die Daten abzulesen und am Computer zu speichern. Sobald man Daten gesammelt hat, und sie mit der Software ausliest, erstellt sie ein Diagramm und speichert das Projekt ab. Man kann die Daten dann als Excel-File (.xls), Text-File (.txt) oder als Comma-separated-values-File (.csv) abspeichern.

Die Messsensoren für die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit sind direkt in dem *Onset HOBO* Datenlogger eingebaut und bilden somit eine vollständige Einheit.

Der *Onset HOBO* Datenlogger ist umgeben von runden, weißen Lamellen aus Plastik, die als Strahlungsschutz dienen. Die Durchlüftung der Wetterstationen erfolgte passiv durch die Luft, die durch die Lamellen und von der Unterseite der Wetterstation hineinströmt. Eine aktive Belüftung wurde nicht verwendet, da die Kosten und der Aufwand, diese mit in die Wetterstation einzubauen, zu hoch gewesen wären. Die Gefahr von geringfügiger Überwärmung bei passiver Belüftung besteht bei sehr windschwachen Wetterlagen. Jedoch ist üblicherweise bei Strahlungswetter untertags immer genug Luftbewegung vorhanden, sodass der Fehler nicht groß sein wird. Idealerweise wäre natürlich eine aktive Belüftung.

Wie schon bereits erwähnt, sollen die Mini-Wetterstationen auf 2 Meter Höhe über Grund befestigt werden, da Effekte wie der Footprint oder der Fetch-Effekt minimiert werden sollen. Diese Messhöhe ist von der WMO (World Meteorological Organization) festgelegt.

Es wurde untersucht welche meteorologischen Größen, wie zum Beispiel die relative Luftfeuchtigkeit und die Globalstrahlung, Einfluss auf die Lufttemperatur haben. Die Messstandorte wurden nach ihrer Beschattung, Hitzestress und dem UTCI verglichen.

Tabelle 3.1: Messstandorte mit Beschreibung und lokaler Klimazone

<b>Stationäre Messungen</b>		
<b>Messstationen</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Lokale Klima Zone</b>
1. Haupteingang	an Baum angebracht, südlich von Exner-Haus	Open midrise
2. Parkplatz	auf Lichtmast befestigt, westlich von Exner-Haus	Bare rock or paved
3. Baumschatten Container	auf Zaunsteher befestigt, zwischen Baracken und Container, nordwestlich von Exner-Haus	Compact low-rise with dense trees
4. Straßencanyon westseitig	unter Stiegengeländer montiert, zw. Exner- und Schwachhöfer-Haus	Compact mid-rise
5. Unterführung	auf Querverstrebung an Unterseite befestigt	Compact mid-rise
6. Straßencanyon ostseitig	unter Stiegenaufgang angebracht, große versiegelte Fläche davor	Compact mid-rise with bare rock or paved
7. Schatten Stiege	auf Stiegengeländer befestigt, ganztägiger Schatten	Compact mid-rise with bare rock or paved
8. tiefer Baumschatten	zw. Guttenberg- und Gregor-Mendel-Haus an Baum angebracht, ganztägig tiefer Schatten	Dense trees

### 3.2.1.1 BOKU-Met Wetterstation

Die BOKU Wetterstation befindet sich in unmittelbarer Nähe zu den stationären Messstellen. Sie ist auf dem Universitäts-Dach des Schwachhöfer-Hauses angebracht in 28 – 30 m Höhe (relativ zum Grund). Sie liegt in 266 m Seehöhe über der Adria. Die Wetterstation misst: die Lufttemperatur, die relative Feuchte, die Globalstrahlung, die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit, Wind-Böen, den Niederschlag, den 3-h-Niederschlag, den Luftdruck und die 3-h-Drucktendenz.

Der Datenlogger scannt die Werte alle 2 Sekunden und bildet 10-Minuten Mittelwerte. Diese Mittelwerte werden gespeichert und für die Grafiken verwendet. Diese Daten sind dann auf der Homepage frei zugänglich: <http://www.wau.boku.ac.at/met/wetter/informationen-zur-wetterstation>

### 3.2.2 Mobile Messungen (Tagesgänge)

Neben den stationären Messungen wurden auch mobile Messungen an mehreren Tagen realisiert. Die mobilen Messungen wurden direkt bei den Messstandorten durchgeführt, um den Einfluss der Lufttemperatur auf unterschiedliche Parameter zu untersuchen. Mit den mobilen Messungen

wurden Tagesgänge aufgenommen. Gemessen wurde bis zu 3 Mal am Tag. Alle Messinstrumente wurden in einem Durchgang verwendet und immer nach demselben Schema an derselben Stelle, um eine „Messqualität“ und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

Tabelle 3.2: Durchgeführte Mobile Messungen (Uhrzeiten sind in MESZ)

<b>Mobile Messungen 2015</b>			
	1. Durchgang	2. Durchgang	3. Durchgang
16. Juli	14:00	16:51	x
05. August	09:50	12:59	16:38
06. August	14:45	17:37	x
07. August	10:46	13:52	16:40
10. August	10:54	14:00	16:41
11. August	10:07	12:38	15:33
12. August	09:51	11:58	x
13. August	09:50	12:53	x

Es muss jedoch hingewiesen werden, dass es sich bei mobilen Messungen um Momentaufnahmen handelt und diese wenig Aussagekraft für den ganzen Tag besitzen. Deshalb wurde versucht so oft wie nur möglich, bis zu 3 Mal an den Messtagen an denselben Stellen zu messen. Einige Parameter ändern sich sehr schnell wie zum Beispiel die Windstärke, andere Parameter wie zum Beispiel die Oberflächentemperatur, ändern sich nur sehr langsam. Die Abkühlung/Erwärmung ist natürlich auch abhängig davon wie hoch die Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit oder die Verdunstungsfähigkeit eines Stoffes/einer Oberfläche ist. Es ist ebenfalls ein großer Unterschied, wenn während der Messung der Beleuchtungsstärke Wolken oberhalb der Messstelle vorbeiziehen und die direkte Sonnenstrahlung abschirmen. Dies ist dann sofort in den Messwerten ersichtlich. Nach 10 min kann der Wert dann wieder ein anderer sein. Notwendig ist auf jeden Fall eine konstante Dokumentation der jeweiligen Messsituationen.

Da es in dieser Masterarbeit um lokalklimatische Effekte geht, ist es für die Untersuchung ausreichend zu unterschiedlichen Tageszeiten mobile Messgänge zu unternehmen und dann mit den eigenen stationären Messwerten und den Daten der BOKU-Messstelle und der Messstellen der ZAMG zu vergleichen. So können dann Abhängigkeiten und Einflüsse zwischen Parametergrößen identifiziert werden.

### 3.2.2.1 Thermalbildaufnahmen

Infrarotaufnahmen mit einer Wärmebildkamera von dem Hersteller *FLIR*, Modellnummer E60 (FLIR Instruments 2016). Die Thermalkamera ist ein bildgebendes Gerät und kann zusätzlich die Infrarotstrahlung messen und als Bild wiedergeben. Die thermische Empfindlichkeit beträgt weniger als 0,05 °C und die Infrarot-Auflösung hat 320 x 240 Pixel. Der Bereich der Betriebstemperatur befindet sich zwischen -20°C und +120°C.

Die Wärmebildaufnahmen mit der Infrarotkamera wurden an vier Tagen gemacht: 16.07., 10.08., 11.08., und 13.08.2015.

Tabelle 3.3: Durchgeführte Thermalbildaufnahmen

Infrarot Wärmebildaufnahmen 2015		
	1. Durchgang	2. Durchgang
16. Juli	13:00 Uhr MEZ	x
10. August	14:00 Uhr MEZ	x
11. August	12:36 Uhr MEZ	15:30 Uhr MEZ
13. August	09:50 Uhr MEZ	12:50 Uhr MEZ

Es wurde jeweils die Umgebung der Wetterstationen fotografiert, um Erhitzungs-Effekte beobachten zu können. Dabei wurden Gebäudefassaden, Fenster, Beton und Schotter, Autos, Bäume und Grünflächen und Stieengeländer fotografiert.



Abbildung 3.3: Messstandort Haupteingang

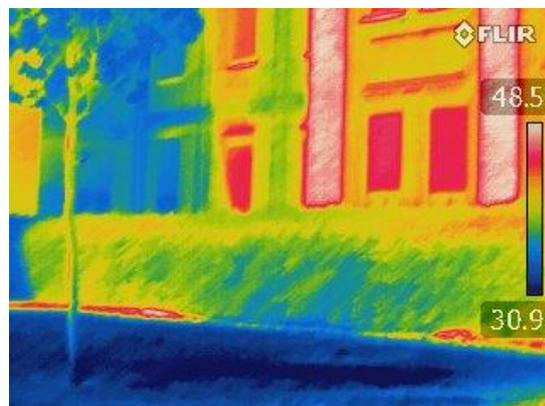


Abbildung 3.4: Infrarotaufnahme zu Abbildung 3.3

Die Aufnahme-Durchgänge sind bewusst so gewählt worden, damit sie nicht immer zur selben Zeit anfangen, um ein möglichst breites Spektrum des Sonnentagesganges und der damit beeinflussten Gebäude-Oberflächenerwärmung aufzunehmen. Ein Durchgang, bzw. das Abgehen aller Messstandorte hat ungefähr 20 Minuten gedauert.

### 3.2.2 WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) – Hitzestress



Abbildung 3.5: Hitzestressmessgerät

Mit dem Hitzestressmessgerät *PCE-WB 20SD* der Marke *PCE Instruments* wurden wichtige Parameter wie WBGT, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Feuchtkugeltemperatur und die Taupunkttemperatur, erfasst. Zusammen bestimmen diese Messgrößen den Hitzestress und können im Innen- als auch Außenbereich angewendet werden. Dieses Gerät verfügt über einen internen Datenlogger und einen Slot für eine SD-Speicherkarte, somit konnten die Mess-Daten problemlos auf den Computer übertragen werden. Die Betriebstemperatur liegt zwischen 0-50 °C. Die Auflösung beträgt 0,1 °C und die Genauigkeit ist +/- 0,8 °C.

Die Formel für die Berechnung der WBGT im Freien und mit Sonneneinstrahlung:

$$\mathbf{WBGT = (0,7 \times WB) + (0,2 \times TG) + (0,1 \times TA)} \quad (\text{F 3.1})$$

WB = Wet bulb Temperatur

TG = Black globe Temperatur

TA = Lufttemperatur

Für den Hitzestress sind zwei Parameter von Bedeutung, die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit. Das Gerät erfasst die Lufttemperatur und setzt sie in Relation zur Feuchtigkeit. Dies ergibt den Wet Bulb Globe Temperature Index. Der WBGT-Temperatur wird je nach Risiko eine Farbe zugewiesen und im schlimmsten Fall von über 32,2°C sollten alle Aktivitäten im Freien abgebrochen werden (schwarz) (siehe Tabelle 3.4).

Im Falle von Code Rot, also von 31,1°C bis 32,2°C, sollten intensive Aktivitäten nur von trainierten Personen durchgeführt werden (PCE Instruments 2016).

Tabelle 3.4: Empfehlungen für Aktivitäten bei Hitzestress (aus Bedienungsanleitung des Gerätes)

<b>WBGT</b>	<b>Zeichen</b>	<b>Intensität der Aktivität</b>
< 26,7 °C / < 80 °F	Weiß	Normale Aktivität
26,7 °C ... 29,4 °C	Grün	Bei der Planung von intensiven Aktivitäten sollte mit Bedacht vorgegangen werden.
29,5 °C ... 31 °C	Gelb	Intensive Aktivitäten sollten von ungeübten Personen nur eingeschränkt ausgeführt werden.
31,1 °C ... 32,2 °C	Rot	Intensive Aktivitäten sollten nur von trainierten Personen ausgeführt werden.
≥ 32,2 °C / ≥ 90 °F	Black	Alle Aktivitäten im Freien abbrechen

Diese Werte gelten auch im Inneren und sind wichtig für Menschen, die an Anlagen und mit Maschinen arbeiten, die Wärmestrahlung abgeben. Besonders an solchen Arbeitsplätzen kann die Luftfeuchtigkeit erdrückend sein. In Kombination mit körperlich anstrengenden Tätigkeiten und wenig Wasseraufnahme kann dies eine höhere Körpertemperatur verursachen. Die Folgen von Hitzestress können vielfältig sein: Herzklopfen, Übelkeit, Schwindel, Krämpfe und im schlimmsten Fall kann Hitzestress auch zum Tod führen.

Auch Sportler, die an extremen Strahlungswettertagen hohen Belastungen im Freien ausgesetzt sind, benötigen ein Frühwarnsystem für Trainingseinheiten und Wettkämpfe, um zu wissen, wie hoch das Risiko an Kreislaufproblemen zu erkranken ist. Die körperlichen Aktivitäten sollten sie dann dementsprechend dem WBGT-Index anpassen.

Tabelle 3.5: Verhältnis von Arbeit zu Pause bei bestimmten Hitzestress-Temperaturen

Arbeit / Pause Verhältnis (pro Stunde)	Leicht	Mittel	Schwer
Kontinuierliche Arbeit	30 °C	26,7 °C	25 °C
75% Arbeit, 25% Pause	30,6 °C	28 °C	25,9 °C
50% Arbeit, 50% Pause	31,4 °C	29,4 °C	27,9 °C
25% Arbeit, 75% Pause	32,2 °C	31,1 °C	30 °C

Tabelle 3.5 zeigt, wie das Verhältnis von Pause zu Arbeit bei unterschiedlichen WBGT-Temperaturen sein soll. Dabei wird auch die Intensität der Arbeit miteinbezogen. Zum Beispiel sollte bei 30°C das Verhältnis von schwerer Arbeit zu Pause 25% zu 75% ausmachen. Hat man jedoch bei dieser Temperatur leichte Arbeit, so kann man dieser kontinuierlich nachgehen. Bei mittlerer Beanspruchung sollte man bei 29,4°C Arbeit und Pause gleichermaßen aufteilen (PCE Instruments 2016)

### 3.2.2.3 Beleuchtungsstärke (LUX)



Abbildung 3.6: LUX-Meter

Für die Messungen der Beleuchtungsstärke wurde das *Lux-Meter LX-1108* von der Firma *Voltcraft* benützt. Die Beleuchtungsstärke  $E$  gibt an, welcher Lichtstrom  $\Phi$  auf einer bestimmten Flächeneinheit  $A$  effektiv auftrifft ( $\Phi/A$  [ $\text{lm}/\text{m}^2$ ] =  $E$  [ $\text{lux}$ ]). Deshalb kann man auch den Begriff „Lichtstromdichte“ dafür verwenden. Der Lichtstrom wird in Lumen  $\text{lm}$  angegeben.

Die Auflösung des LUX-Meters macht 0,01 LUX aus und der Messbereich liegt zwischen 0 - 400000 LUX. Die Genauigkeit des Messgerätes beträgt +/- 3%. Während der Messung sollte der externe Sensor auf einer geraden Unterlage liegen, um das Ergebnis nicht zu verfälschen.

Mit dem Messgerät wird nicht nur das eintreffende Sonnenlicht gemessen, sondern auch Lichtströme aus Natrium- und Quecksilberdampflampen, sowie Leuchtstofflampen. Es wird somit zwischen der Innenbeleuchtungsstärke  $E_i$  und der Außenbeleuchtungsstärke  $E_a$  unterschieden.

Besonders an Arbeitsplätzen ist die Beleuchtungsstärke von großer Bedeutung. Sie entscheidet wie einfach und schnell eine Sehaufgabe zu bewältigen ist. Die Beleuchtungsstärke ist somit für die Sehleistung ausschlaggebend. Verschiedenste Arbeiten erfordern unterschiedliche Beleuchtungsstärken. Es gibt in der Arbeitswelt genormte Beleuchtungsstärken, die ein einwandfreies, effektives Arbeiten ermöglichen sollen. Die Empfehlungen nach *DIN EN 12464-1* für Büroarbeiten und für feine Arbeiten an Maschinen sind 500 LUX, wobei für grobe Arbeiten nur 300 LUX vorgeschrieben sind. Im Gegensatz dazu benötigt man in der Schmuckherstellung 1 000- 1 500 LUX. Diese Werte geben die mittleren Beleuchtungsstärken an, die mindestens einzuhalten sind.

Im Freien hängt die Beleuchtungsstärke sehr stark von der Jahreszeit, der Tageszeit, dem Sonnenstand und der Bewölkung ab. An einem wolkenlosen Sommertag im Juli beträgt  $E_a = \sim 100\ 000$  LUX und an einem trüben Winternachmittag im Dezember beträgt  $E_a = \sim 3\ 000$  LUX (FVLR 2016) (licht.de 2016) (Conrad 2016).

#### **3.2.2.4 Oberflächentemperaturen**

Die Oberflächentemperaturen wurden mit dem *Infrarot-Thermometer IR 260-8S* der Firma *Voltcraft* bestimmt. Die Messung erfolgt sehr schnell, da man das Gerät mit einer Hand hält, den Pistolengriff betätigt und mit Hilfe des Ziel-Lasers den Messpunkt genau platzieren kann. Das Gerät misst unmittelbar berührungslos die Oberflächentemperatur.

Mit dem Gerät lassen sich Temperaturen von  $- 30^{\circ}\text{C}$  bis zu  $260^{\circ}\text{C}$  messen. Die Grundgenauigkeit beträgt +/- 2% bzw +/-  $2^{\circ}\text{C}$ . Außerdem liegt die Ansprechzeit unter 1s.



Abbildung 3.7: Infrarot Thermometer

Gemessen wurden Oberflächentemperaturen von Gebäuden (Fassaden), Betonböden, Grasoberflächen, Kies und Glasflächen (Conrad 2016).

### 3.2.2.5 Windstärke

Mit dem Windmessgerät *Windmaster 2* der Firma *Kaindl electronic* wurde die Windstärke ermittelt. Die Bedienung des Gerätes ist vollkommen unkompliziert, da man es nur hochhalten muss, wobei es durch das Schalensystem windrichtungsunabhängig ist. Das Ausrichten des Messgerätes muss nicht vorgenommen werden. Die Anzeige des Windmaster 2 zeigt drei Windgeschwindigkeiten an: die momentane Windgeschwindigkeit, die maximal detektierte und die durchschnittliche Windgeschwindigkeit. Die Einheit, die angezeigt wird, lässt sich auch einstellen: km/h, m/s, KTS (Knoten) oder MPH (Meilen/Stunde). Der Messbereich der Windgeschwindigkeit liegt zwischen 2,5 - 150 km/h. Die Auflösung der Windgeschwindigkeit beträgt 0,1 und 1 km/h und die Genauigkeit +/- 4% (Conrad 2016).

Wichtig in Zusammenhang mit der Windstärke ist die Beaufort-Skala. Die Skala geht von 0 – 12 Bft und beschreibt die Auswirkungen auf See und Binnenland (Wetterkontor 2016).

0 Bft: Stille, Rauch steigt gerade empor, <1 km/h  
12 Bft: Orkan, schwerste Verwüstungen, >117 km/h



Abbildung 3.8: Windmessgerät

### 3.2.3 Fischaugenaufnahmen

Im September 2015 wurden hemisphärische Aufnahmen von den Standorten der Mini-Wetterstationen gemacht. Dies hatte zum Zweck, dass man in weiterer Folge die Sonnenbahn über die Aufnahme legen kann.

Mit Hilfe der Software *RayMan (Radiation on the human body)* wurde zuvor die Sonnenbahn berechnet und auf ein polares Koordinatensystem übertragen. Für die Berechnung der Sonnenbahn wurden die genauen Koordinaten des Standortes, das Datum und die genaue Uhrzeit, sowie der Sky-view Factor, also die Fischaugenaufnahme benötigt.

Die Aufnahmen wurden mit einer Kamera mit speziellem Fischaugenobjektiv gemacht. Das Stativ auf dem die Kamera montiert wurde, befand sich direkt unterhalb der Wetterstationen. Das Kameraobjektiv wurde horizontal gegen den Himmel gerichtet. Für die Aufnahmen wurde aus diesem Grund ein Tag gewählt, an dem es bewölkt war, damit ja keine Sonnenstrahlen auf das Objektiv fallen. Die Mini-Wetterstationen sind somit auf jedem Bild sichtbar. Der Sky-view Faktor der Standorte lässt sich mit den Aufnahmen sehr gut bestimmen. Er beschreibt den Prozentsatz des Himmels, der von dem Standpunkt aus sichtbar ist. Besonders in Straßenschluchten spielt der Sky-view Faktor (Himmelsicht-Faktor) eine wichtige Rolle.



Abbildung 3.9: Standort Schatten Container



Abbildung 3.10: Standort Parkplatz

Eine weitere Software wurde für das Auswerten der Fischaugenaufnahmen herangezogen. Mit der Software *HemiView v.2.1.* konnte man ebenfalls die Sonnenbahn berechnen und über die Aufnahme legen. Es ließen sich aber noch weitere Parameter wie zum Beispiel „Visible Sky“ damit bestimmen. Dieser Wert ist der Sky-View-Faktor und gibt an wieviel Prozent des Himmels sichtbar ist. Die Software wird hauptsächlich zur Analyse von hemisphärischen Aufnahmen unter

Vegetation verwendet, da sie die Strukturparameter der Baumkronen und solare Strahlungsindizes berechnen kann. Ebenfalls können Strahlungslevels unter den Baumkronen vorhergesagt werden.

### **3.2.4 Datengrundlagen**

Für die Untersuchung der lokalklimatischen Effekte wurden die Messwerte der mobilen und stationären Messungen verwendet. Die Rohdaten der stationären Messungen waren 10-Minuten Mittelwerte. Die Rohdaten der mobilen Messungen waren momentane Messwerte zu dem jeweiligen Messzeitpunkt. Diese Messwerte wurden mit den Daten der BOKU-Met Messstation verglichen. Wichtige zusätzliche Parameter, die nicht mit den mobilen und stationären Messungen erfasst wurden, konnten so für die Auswertung verwendet werden. Die für die Masterarbeit wichtigen zusätzlichen Parameter der BOKU-Messstation sind die Globalstrahlung, die Windgeschwindigkeit (nicht nur die momentane), die Windrichtung und der Niederschlag.

### **3.2.5 Auswertungshilfen**

Die Software *HOBOWare* diente nicht nur zum Auslesen der Datenlogger, sondern auch zum grafischen Darstellen der gemessenen Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. Hierbei wurde die Version 3.7.2 benützt. In Abbildung 3.11 sieht man wie die Software die ausgelesenen Daten darstellt. In der Grafik kann man auch die Zeitpunkte, wann die Wetterstationen ausgelesen wurden, sehen. Es wird „Koppler verbunden“ und „Koppler abgetrennt“ angezeigt. Die Grafiken, die im Rahmen der Masterarbeit verwendet wurden, wurden jedoch mit *Microsoft Excel* erstellt. Die Auswertung der Daten der mobilen Messungen erfolgte ebenfalls mit *Microsoft Excel*.

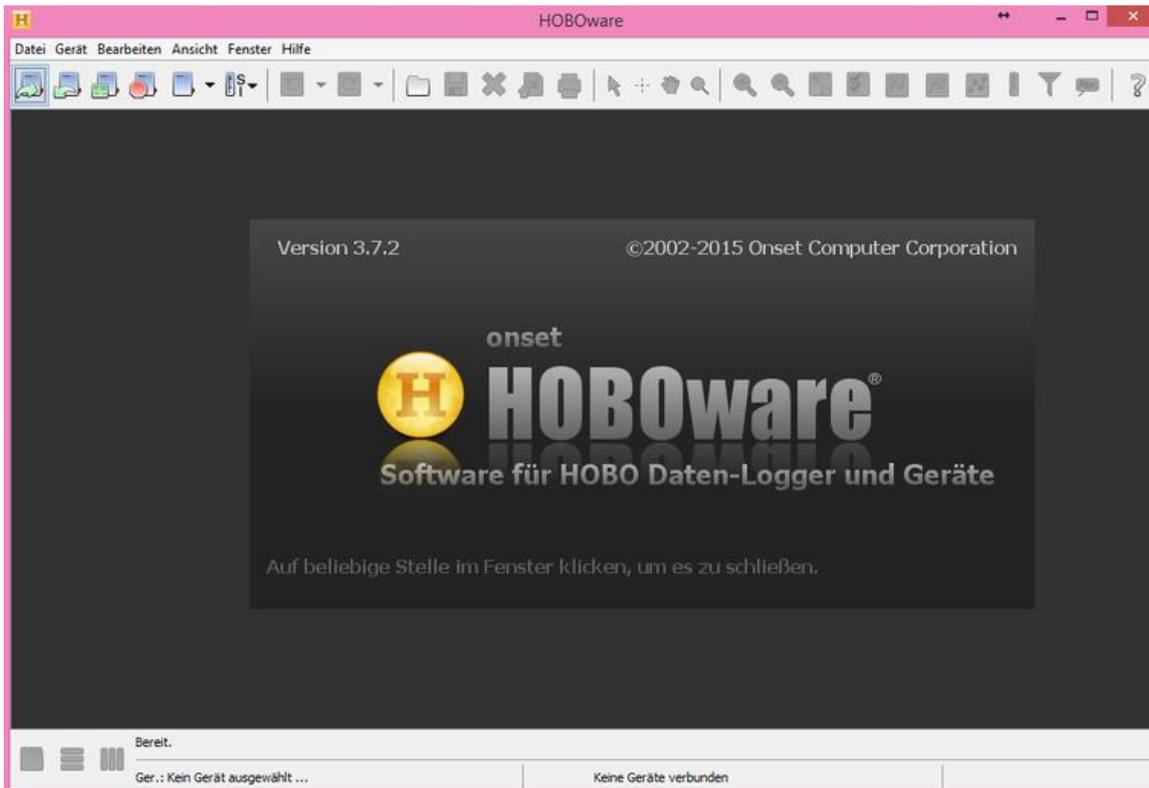


Abbildung 3.11: HOBOWare Startseite

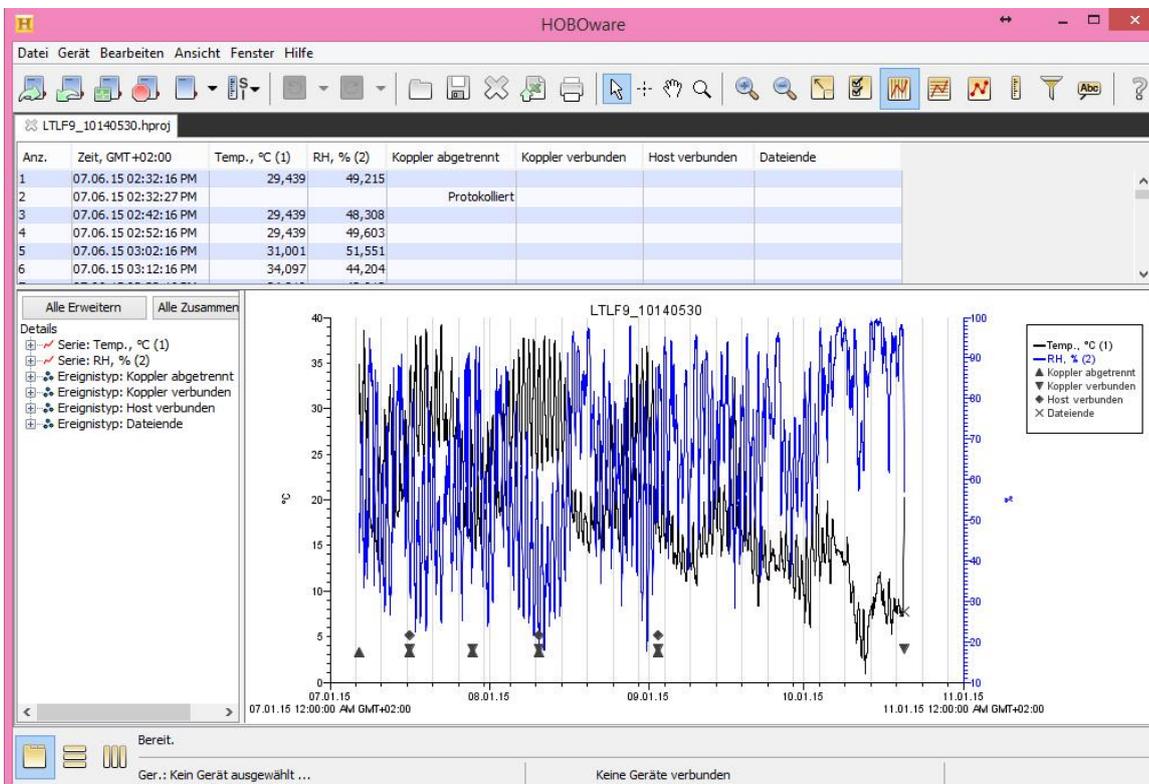


Abbildung 3.12: Daten einer Messstation in HOBOWare

Die Berechnung und Darstellung der Sonnenbahnen über dem jeweiligen Messstandort erfolgte mittels der Software *RayMan*. Es wurde mit der neuesten Version 1.2 gearbeitet. Abbildung 3.13 zeigt die Startseite der Software. Für die Berechnung der Sonnenbahn ist das genaue Datum, an dem die Fischaugenaufnahme entstanden wurde, einzutragen. Im Abschnitt „Geografische Daten“ muss Österreich (Wien) ausgewählt sein, wobei das Programm sofort die dazugehörigen Koordinaten anzeigt. Als nächstes muss der Punkt „Input“ und „Sky view factor“ ausgewählt werden. Es öffnet sich ein Fenster und die Fischaugenaufnahmen können hochgeladen und das Gitternetz über die Aufnahmen gelegt werden. Worauf hierbei geachtet werden muss, ist die Ausrichtung, denn das Foto muss genau nach den Himmelsrichtungen ausgerichtet sein. Die Aufnahmen mussten gedreht und vertikal gespiegelt werden. Dieser Schritt wurde mit einem Bildbearbeitungsprogramm umgesetzt. Nachdem diese Punkte erledigt wurden, konnte das Programm die Sonnenbahn berechnen und ein polares Diagramm (siehe Abbildung 3.14) als Output erstellen. Es war mit dieser Version von *RayMan* leider nicht möglich, die Sonnenbahn direkt über die Fischaugenaufnahme zu legen. Somit musste ein Bildbearbeitungsprogramm verwendet werden, um die zwei Ebenen übereinander zu legen und die gewünschte Grafik zu erhalten.

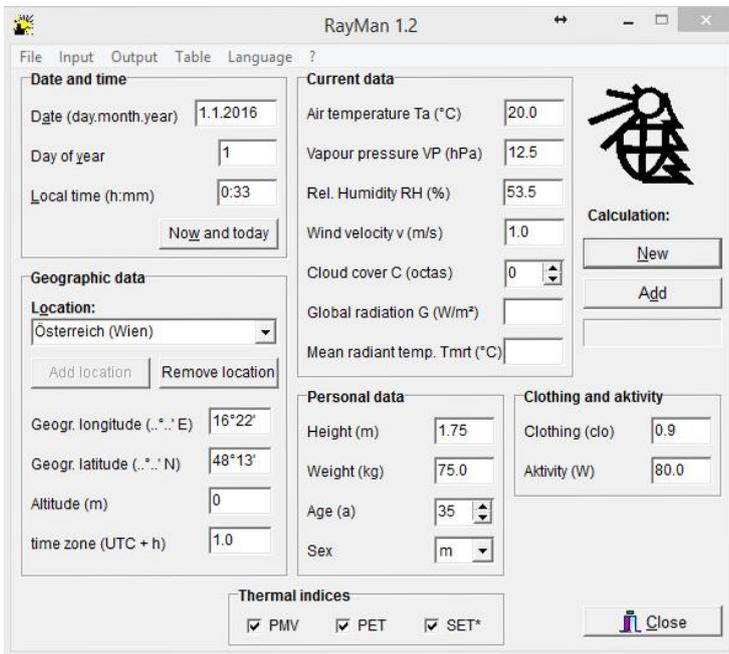


Abbildung 3.13: Startseite RayMan 1.2

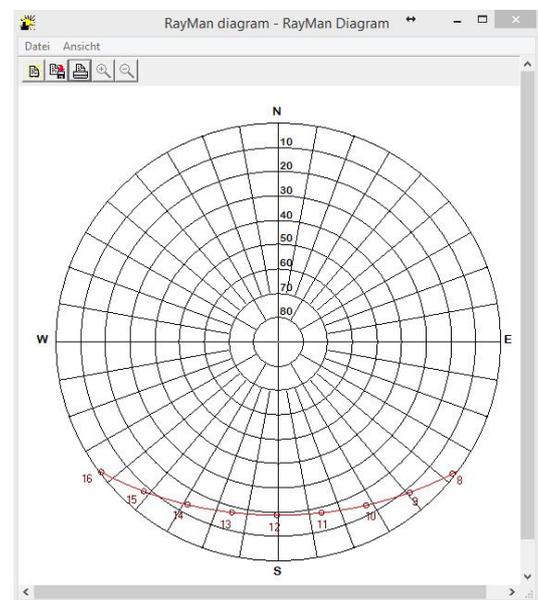


Abbildung 3.14: Polares Diagramm

Wie schon erwähnt wurde die Berechnung der Sonnenbahnen nicht nur mit *RayMan* durchgeführt sondern auch mit der Software *HemiView v.2.1*. Mit dem Programm lässt sich eine JPEG-

Aufnahme von der Kamera einfach öffnen. Die nächsten Schritte gestalten sich einfacher als mit der Software *RayMan*. Um die Sonnenbahn berechnen zu können, wird zunächst der gesuchte Tag des Jahres im Feld „Day of Year“ eingegeben. Damit die Sonnenbahn für den 05.08.2015 berechnet werden kann, muss der 217.-te Tag eingegeben werden. Der Standort wird unter „Site List“ eingetragen. Als Messstandort wurde Wien ausgewählt. Anders als bei *RayMan* müssen hier keine genauen Koordinaten eingegeben werden. Unter „Lens List Toolbar“ kann die Linse angegeben werden, mit der fotografiert wurde. Die Sonnenbahn und das Sonnenstandsdiagramm werden nach den Einstellungen sofort über die Aufnahme gelegt. Damit die Polar-Koordinaten auch wirklich stimmen, muss die Aufnahme und das Sonnenstandsdiagramm einem „Alignment“ unterzogen werden. Einfach gesagt, bedeutet dies, dass die Ausrichtungen nach den Himmelsrichtungen und die Größen der Grafiken aufeinander angepasst werden müssen. In Abbildung x ist dieser Schritt sichtbar. Wenn über die farbige Sonnenbahn mit dem Mauszeiger gefahren wird, wird der genaue Stand der Sonne für eine bestimmte Uhrzeit angezeigt. Dies war für die Abschätzung des Schattens für die UTCI-Berechnungen wichtig.

In weiterer Folge wird der „Threshold“ eingestellt. Der „Threshold“ ist die Klassifizierungsgrenze, die für die Bestimmung des „Visible-Sky“ Faktor benötigt wird. Es beschreibt den Kontrast zwischen dem sichtbaren Himmel und den himmelsichtversperrenden Gebäuden, Bäumen und anderen Elementen. Ist die Klassifizierungsgrenze niedrig angesetzt, werden helle Flächen in der Aufnahme auch als Himmel angesehen.

Mit der Software *HemiView* lassen sich viele verschiedene strahlungsbezogene Parameter berechnen. Im Menüpunkt „Settings“ wird ausgewählt, welche „Outputs“ das Programm berechnen soll. Es lässt sich der gesamte Tagesgang, Standortfaktoren, die Strahlung unter den Baumkronen und der „Visible Sky“ berechnen. In einem Output-Sheet lassen sich alle Parameter auch auf einmal anzeigen. Wichtig für jeden Standort ist der „Global Site Factor GSF“, der das Verhältnis von Globalstrahlung unter den Baumkronen zu der einfallenden Globalstrahlung im offenen Gelände angibt. Dies wird mithilfe der direkten plus diffusen Strahlung berechnet, wobei die reflektierte Strahlung ignoriert wird. Neben dem „Global Site Factor“ (globaler Standortfaktor) werden auch der „Direct Site Factor DSF“ (direkter Standortfaktor) und „Indirekt Site Factor IFS“ (indirekter Standortfaktor) berechnet. Der direkte Standortfaktor DSF gibt das Verhältnis von direkter Strahlung unter den Baumkronen zu der einfallenden direkten Strahlung im offenen Gelände an. Der indirekte Standortfaktor ISF gibt wiederum das Verhältnis von diffuser Strahlung unter den Baumkronen zu der diffusen Strahlung im offenen Gelände an. Im Kapitel Ergebnisse wird näher auf die Parameter eingegangen.

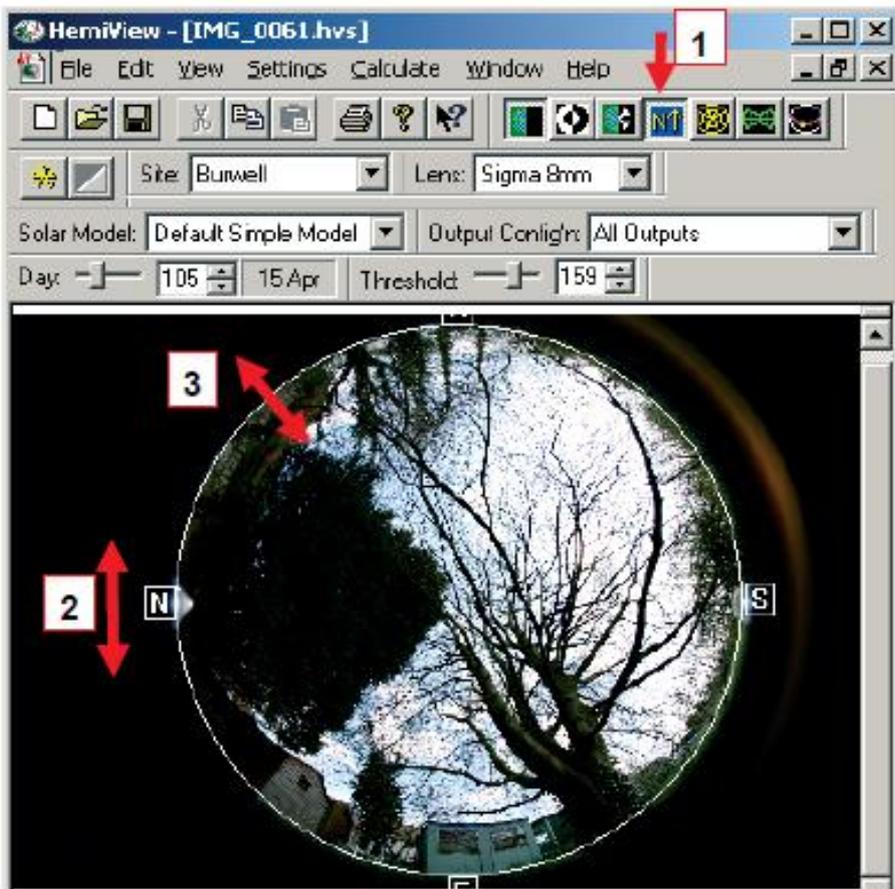


Abbildung 3.15: HemiView Startseite

Als Auswertungshilfen dienen die gesammelten Rohdaten der BOKU-Met Wetterstation vom Standort am Dach des Schwachhöferhauses. Die verwendeten Parameter waren die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit und Windrichtung, die Globalstrahlung und der Niederschlag.

Daten für Monats- und Jahresübersichten für Wien bzw. Österreich wurden von der Homepage der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) übernommen.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Standorte zuordnen

Die Messstandorte besitzen unterschiedlichste Eigenschaften und können deshalb den Lokalen Klima Zonen (LKZ) zugeordnet werden. Die Charakterisierung erfolgte nach dem System von Stewart und Oke (2012) und bezieht sich rein auf die Standorteigenschaften.

#### ***Wetterstation 1: Haupteingang***

Baum vor dem Haupteingang (südlich von Exner-Haus)



*Abbildung 4.1: Messstandort 1 Haupteingang aus südwestlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)*



*Abbildung 4.2: Messstandort 1 Haupteingang aus südöstlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)*



Abbildung 4.3: Fischaugenaufnahme Messstandort 1  
Haupteingang (Wetterstation ist rot markiert)

Vor dem Haupteingang befinden sich eine großzügige freie Fläche, die großteils versiegelt ist, und an den Seiten jeweils kleine Rasenflächen, auf denen der Baum mit der Messstation steht. Der Haupteingang ist dem Süden zugewandt. Ein Zaun grenzt diesen Platz vom Gehsteig und der Fahrbahn ab. Niedriges Gebüsch ist entlang des Zaunes angepflanzt. Die Fahrbahn (Peter-Jordan-Straße) wird hier wenig befahren. Das Unigebäude und die Gebäude in der Umgebung sind ungefähr 3 bis 5 Stockwerke hoch. Der Sky-View-Faktor ist sehr groß.

Charakterisierung: LCZ 5: Open mid-rise / Offen angelegte Gebäude mittlerer Höhe (eine kurze Zusammenfassung der Charaktereigenschaften des Standortes findet man auf den Seiten 30/31.

### **Wetterstation 2: Parkplatz**

Steher am Parkplatz (westseitig von Exner-Haus)



Abbildung 4.4: Messstandort 2 Parkplatz aus südlicher  
Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)



Abbildung 4.5: Messstandort 2 Parkplatz aus nördlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)



Abbildung 4.6: Fischaugenaufnahme Messstandort 2 Parkplatz (Wetterstation ist rot markiert)

Der Parkplatz besteht aus einer versiegelten Fahrbahn und Kies/Schotter-Parkplätzen, durch welche das Regenwasser abrinnen kann. Der Parkplatz ist auf zwei Ebenen angelegt. Die westlichere Ebene ist, im Gegensatz zur anderen, ungefähr einen Meter erhöht. Zwischen den Baracken (gehören zur BOKU) und dem Parkplatz sind westlich Bäume angepflanzt, die untertags viel Schatten spenden. Der Sky-View-Faktor ist relativ hoch.

Charakterisierung: LCZ E: Bare rock or paved, function: urban transportation / Nackter Fels oder befestigt, Funktion: Stadttransport (Beschreibung Seiten 30/31).

### **Wetterstation 3: Schatten Container**

Steher im Baumschatten zwischen Baracken und Container (nordwestlich von Exner-Haus)



*Abbildung 4.7: Messstandort 3 Schatten Container aus östlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)*



*Abbildung 4.8: Messstandort 3 Schatten Container*



*Abbildung 4.9: Fischaugenaufnahme Messstandort 3 Schatten Container (Wetterstation ist rot markiert)*

Dieser Bereich ist eng umrandet von einem Metall-Container, den Holz-Baracken und Bäumen bzw. Sträuchern. Ein Maschendrahtzaun grenzt das Areal zusätzlich ein. Es gibt hier sehr wenig bis keine Luftbewegung. Der Sky-View-Faktor ist sehr gering.

Charakterisierung: LCZ 3 a: Compact low-rise with dense trees / Kompakt angelegte Gebäude niedriger Höhe mit dichtem Baumbewuchs (Definition Seiten 30/31)

#### **Wetterstation 4: Canyon 1**

Straßencanyon zwischen Exner- und Schwackhöferhaus, Messstelle westseitig



Abbildung 4.10: Messstandort 4 Canyon 1 aus westlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)



Abbildung 4.11: Fischaugenaufnahme Messstandort 4 Canyon 1 (Wetterstation ist rot markiert)

Dies ist ein typisches Beispiel für einen Straßencanyon, welcher durch höhere Bauwerke geformt wird. Die Gebäude sind 3-4 Stockwerke hoch. Die Fassade des Schwachhöferhauses wurde außen zusätzlich verglast und mit bunten Glasflächen verziert. Das Exner-Haus wurde aus massiven Baustoffen (Ziegel, Beton) errichtet. Der Gehweg im Canyon ist versiegelt, da hier ebenfalls Autos durchfahren und auch Parkplätze vorhanden sind. Der Wind weht teils kräftig hindurch, da der Straßenschluchteneffekt zum Tragen kommt. Die Wetterstation befindet sich im westseitigen Bereich und wurde unter einem Stiegenaufgang fixiert. Der Sky-view-Faktor ist klein.

Charakterisierung: LCZ 2: Compact mid-rise with street canyon effect / Kompakt angelegte Gebäude mittlerer Höhe mit Straßen Canyon-Effekt (Beschreibung auf Seite 30/31).

### **Wetterstation 5: Straßencanyon Unterführung**



Abbildung 4.12: Messstandort 5 Unterführung aus östlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)



Abbildung 4.13: Fischaugenaufnahme Messstandort 5 Unterführung (Wetterstation ist rot markiert)

Die Unterführung liegt ungefähr in 2,30 m Höhe. Sie dient als Durchgang zwischen den beiden BOKU-Gebäuden und wurde bis auf den Boden und die Decke verglast. Die Wetterstation wurde an einer Querverstrebung an der Unterseite der Unterführung befestigt. Somit ist hier der Sky-View-Faktor sehr gering.

Charakterisierung: LCZ 2: Compact mid-rise with street canyon effect / Kompakt angelegte Gebäude mittlerer Höhe mit Straßen Canyon-Effekt

### **Wetterstation 6: Canyon 2**

Straßencanyon, Messstelle ostseitig



Abbildung 4.11: Messstandort 6 Canyon 2 aus östlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)



Abbildung 4.12: Fischaugenaufnahme Messstandort 6 Canyon 2 (Wetterstation ist rot markiert)

Diese Messstelle weist andere Eigenschaften auf, als die beiden anderen im Straßencanyon. Der Grund dafür ist, dass der Canyon hier wieder breiter ist. Eine größere, offene versiegelte Fläche (Parkplätze) befindet sich hier zwischen den Gebäuden. Die Messstation wurde ostseitig unter einem Stiegenaufgang beim Schwackhöferhaus platziert. Der Sky-View-Faktor ist etwas höher als bei den anderen HOBO-Stationen im Straßencanyon.

Charakterisierung: LCZ 2: Compact mid-rise with street canyon effect / Kompakt angelegte Gebäude mittlerer Höhe mit Straßen Canyon-Effekt (Definition auf den Seiten 30/31)

### **Wetterstation 7: Stiege Schatten**

Ganztägiger Schatten bei Stiegen hinter Exner-Haus



Abbildung 4.16: Messstandort 7 Stiege Schatten aus nördlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)



Abbildung 4.17: Fischaugenaufnahme Messstandort 7 Stiege Schatten (Wetterstation ist rot markiert)

Diese Messstelle befindet sich in einer Nische und liegt den ganzen Tag im Schatten, da sie vom Exner-Haus vom Osten/Süden/Westen eingezäunt wird. Der Sky-View-Faktor liegt im Mittleren Bereich.

Charakterisierung: LCZ 2 e: Compact mid-rise with bare rock or paved / Kompakt angelegte Gebäude mittlerer Höhe mit nacktem Fels oder befestigt

### **Wetterstation 8: Tiefer Baumschatten**

Baumschatten zwischen Guttenberg- und Gregor-Mendel-Haus



Abbildung 4.18: Messstandort 8 tiefer Baumschatten aus östlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)



Abbildung 4.19: Fischaugenaufnahme Messstandort 8 tiefer Baumschatten (Wetterstation ist rot markiert)

Hier befindet sich ein tiefer, natürlicher Baumschatten mit unterschiedlichem Schattenwurf untertags. Von der Ost- bzw. Westseite scheint zu unterschiedlichen Zeiten die Sonne durch. Im Gegensatz zum tiefen Baumschatten bei Wetterstation 3 steht die Luft hier nicht, sondern kann

zirkulieren. Eine mäßige Brise macht den Aufenthalt an heißen Tagen hier noch angenehmer. Der Sky-View-Faktor ist relativ niedrig.

Charakterisierung: LCZ A: Dense trees / Dichter Baumbewuchs (Definition auf Seite 30/31)

## 4.2 Charakterisierung BOKU-Standort Türkenschanze

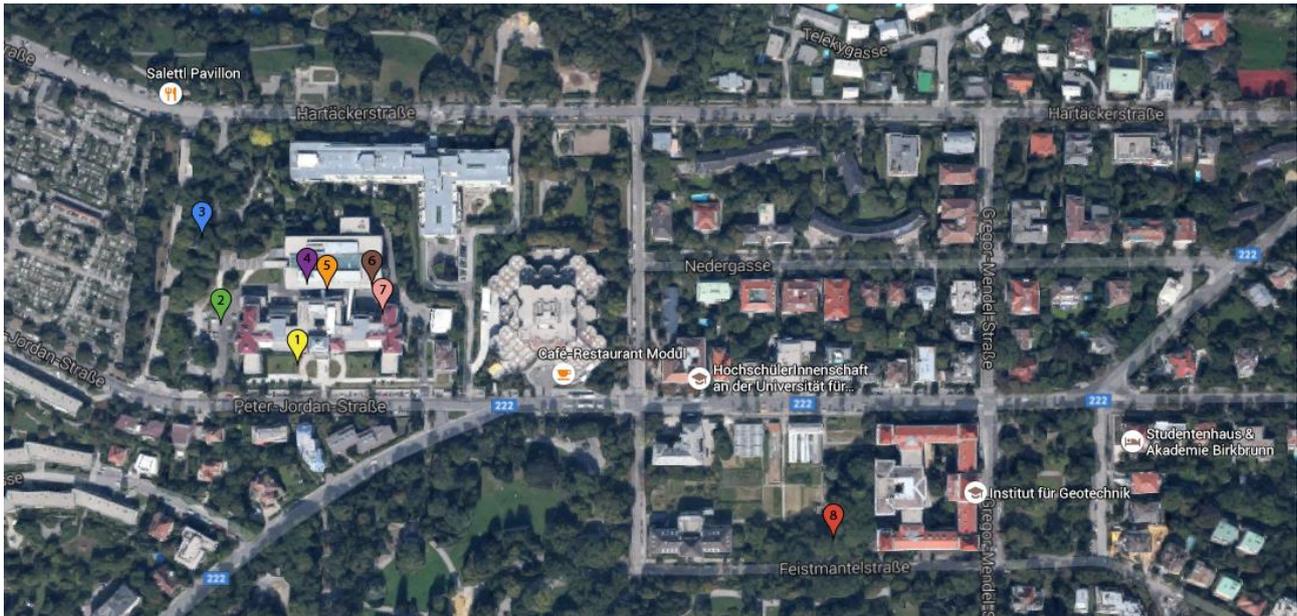


Abbildung 4.20: Standort BOKU-Gelände aus Vogelperspektive (Google Earth 2016)

Der Standort Türkenschanze liegt an der Grenze des 18. und 19. Bezirks in Wien und befindet sich somit im Nordwesten der Stadt. Rund um die Universität für Bodenkultur sind große Park- bzw. Grünflächen zu finden. Der Türkenschanzpark liegt südlich des Geländes, der Hugo-Wolf-Park im Norden und im Westen grenzt der Döblinger Friedhof an das Areal. Direkt auf dem BOKU-Gelände wurden viele Laubbäume und Sträucher angepflanzt.

Da die Bezirke am Stadtrand liegen, ist es auch nicht weit zum Wienerwald. Der Wienerwald ist ein gebirgiger Ausläufer der Nordalpen und kann bis zu 900 m Höhe erreichen (Quelle1). Dieser prägt die Stadtlandschaft insofern, dass es in der Gegend von der Türkenschanze hügeliger ist als im Rest von Wien. Aufgrund dessen wird auch das örtliche Klima beeinflusst. Die Gegend, in der die BOKU angesiedelt ist, lässt sich als LCZ 5 „open midrise“ (mittlere Bauhöhe, offen angelegt) beschreiben. Dies bedeutet, dass Großteils drei bis neunstöckige Häuser, die locker auseinander gebaut wurden, das Erscheinungsbild prägen. Dazu gesellen sich ab und zu Einfamilienhäuser mit Gartenanlagen. Straßen und Gehwege wurden für den Städteverkehr asphaltiert. Es sind überall Sträucher, Bäume und Grünflächen anzufinden.

DEFINITION

**Form:** Open arrangement of buildings 3–9 stories tall. Sky view from street level slightly reduced. Heavy construction materials (concrete, steel, stone); thick roofs and walls. Scattered trees and abundant plant cover. Low space heating/cooling demand. Low traffic flow. **Function:** Residential (multi-unit housing, multistorey tenements, apartment blocks); institutional (research/business parks, campuses); commercial (office buildings, hotels). **Location:** Periphery. **Correspondence:** UCZ6 (Oke 2004); Do6 (Ellefsen 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle



Low level



Abbildung 4.21: Eigenschaften Open-midrise 1/2 (Stewart and Oke 2012)

PROPERTIES

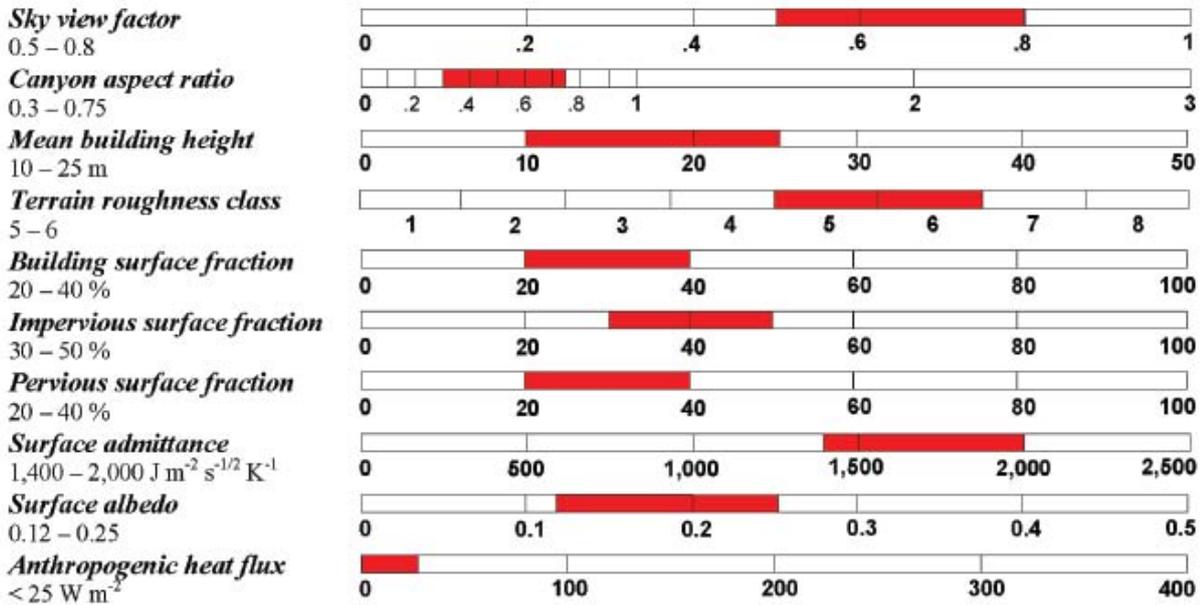


Abbildung 4.22: Eigenschaften Open-midrise 2/2 (Stewart and Oke 2012)

### 4.3 Witterung

Zunächst wurde die Witterung während der Sommermonate Juli und August 2015 untersucht. Hierzu wurden die Lufttemperaturmesswerte der Mini-Wetterstationen mit den Werten der BOKU-Met Messstation verglichen. Die Auswertung der Daten erfolgte mit Microsoft Excel.

#### Maximum-Temperaturen im Juli (06.07. – 31.07.2015)

Laut ZAMG war der Juli 2015 in Österreich der wärmste Juli der Messgeschichte (seit dem Jahr 1767). Österreichweit lagen die Werte 3,1 °C über dem vieljährigen Mittel (Klimaperiode 1981-2010). In Wien wurde der Temperaturhöchstwert am 19.07. erreicht (Quelle ZAMG). In Abbildung 4.31 sieht man den Temperaturverlauf vom 18.07. – 20.07.2015. Die Messwerte stammen von allen 8 Messstationen und von der BOKU-Met Station am Dach (rot). Im Juli wurde der höchste  $T_{\max}$ -Wert vom ZAMG-Messnetzwerk und von den stationären Messstationen auf dem BOKU-Gelände am selben Tag (19.07.) erreicht.

Die dazugehörigen  $T_{\max}$ -Messwerte vom 19.07.2015 (siehe Tabelle 4.1):

Tabelle 4.1: Temperaturmaxima am 19.07.2015

<b><math>T_{\max}</math> 19.07.2015</b>	Temperatur [°C]	Uhrzeit
ZAMG Messwert Wien-Innere Stadt	38,1 °C	/
Messstelle BOKU Dach	36,1° C	16:07 MESZ
Haupteingang	38,7° C	16:17 MESZ
Parkplatz	36,8° C	16:17 MESZ
Schatten Container	35,7° C	16:17 MESZ
Canyon 1	38,6° C	16:17 MESZ
Unterführung	38,1° C	16:27 MESZ
Canyon 2	39,4° C	13:07 MESZ
Stiegen Schatten	37,3° C	16:17 MESZ
Baumschatten GM	34,9° C	16:57 MESZ

heißester Tag - 19.07.2015

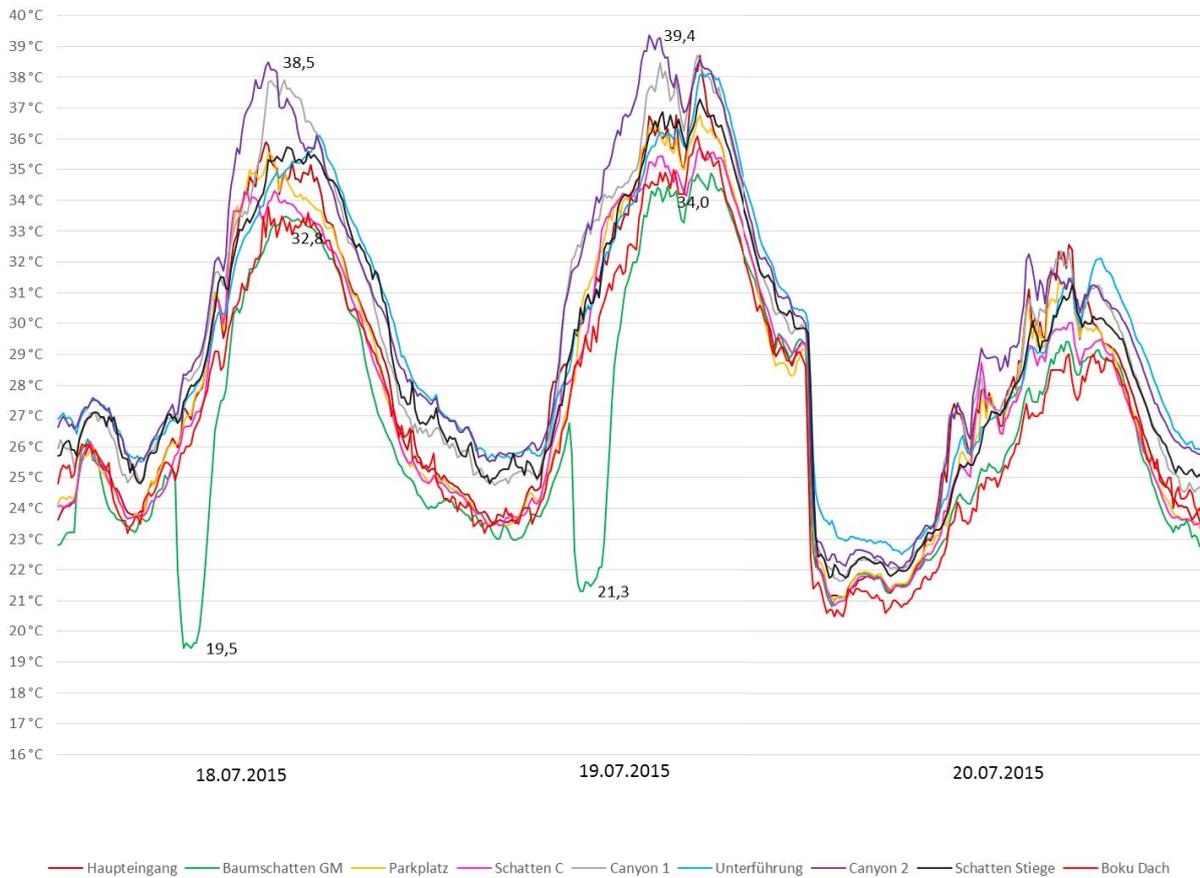


Abbildung 4.13: Temperaturverlauf 18.-20.07.2015

Wie in Tabelle 4.1 ersichtlich ist, wurden die Tageshöchstwerte nicht zur selben Uhrzeit erreicht. Von den 8 Mini-Wetterstationen wurde der höchste Wert (39,4 °C) von der Messstation Canyon 2 (ostseitig) um 13:07 MESZ gemessen. Die niedrigste maximale Temperatur (34,9 °C) an diesem Tag wurde um 16:57 MESZ im tiefen Baumschatten beim Gregor Mendel-Haus aufgenommen. Die BOKU-Met Messstation hatte um 16:07 MESZ mit 36,1 °C ihren Tageshöchstwert. Wie schon erwähnt, war der  $T_{max}$ -Wert 38,1 °C von der ZAMG Wien-Innere Stadt nicht nur Tageshöchstwert, sondern auch die höchste Temperatur im gesamten Juli in Wien (ZAMG Messnetzwerk; zu diesem Wert konnte keine Uhrzeit gefunden werden). Vergleicht man den Messwert der ZAMG mit den Werten der Messstationen am BOKU-Campus, so merkt man, dass eine große Bandbreite vorhanden ist: 34,9°C bis 39,4°C. Je nach Standort kann die Höchsttemperatur bis zu 4,5 °C schwanken.

Bei den stationären Messungen im Juli wurde noch an einem anderen Tag die Höchsttemperatur von 39,4 °C erreicht. Am 22.07. hat ebenfalls die Messstation Canyon 2 um 13:37 MESZ diesen Wert aufgezeichnet.

In der Abbildung 4.31 lässt sich ebenfalls gut erkennen, dass der Temperaturverlauf der Messstationen sehr stark fluktuiert. Es ist ein ständiges Auf und Ab zu erkennen. Diese unterschiedlichen Verläufe lassen sich mit den Effekten der Globalstrahlung, der Bewölkung und der Windgeschwindigkeit bzw. Windrichtung erklären. Näheres dazu wird im Kapitel 4.4 Einflüsse meteorologischer Größen erläutert. Die Umgebung der Messstandorte und ihre erwärmenden bzw. abkühlenden Effekte stellen auch einen großen Einflussfaktor dar. Dies wird im Kapitel 4.8 Hitzestress und 4.9 UTCI näher besprochen. Am 18.07. und 19.07. sind ebenfalls Ausreißer zu erkennen. Die Werte der Wetterstation im tiefen Baumschatten beim Gregor Mendel-Haus weisen einen anderen Verlauf, als die restlichen Stationen, am Vormittag auf. Dieses Phänomen ist einfach zu erklären. Es wurde nämlich eine Sprinkleranlage direkt vor dem Baum mit der Messstation aufgebaut und diese war an beiden Tagen am Vormittag in Betrieb. Da es dort sehr schattig ist, hat sich die Feuchtigkeit unter den Baumkronen gehalten und hat dafür gesorgt, dass es für einen längeren Zeitraum kühl geblieben ist. Ebenfalls wurde die Messstation direkt mit Wasser benetzt.

### Minimum-Temperaturen im Juli

Ebenfalls ist es interessant, sich die Minimum-Temperaturen anzusehen. Damit sind die niedrigsten aufgezeichneten Temperaturen im Monat gemeint. Wie man in Abbildung 4.32 erkennen kann, war dies am 11.07.2015 in den frühen Morgenstunden der Fall.

Tabelle 4.2: Temperaturminima am 11.07.2015

<b>T<sub>min</sub> 11.07.2015</b>	Temperatur [°C]	Uhrzeit
Messtelle Boku Dach	12,2° C	04:27 MESZ
Haupteingang	12,2° C	04:07 MESZ
Parkplatz	12,0° C	04:27 MESZ
Schatten Container	12,1° C	04:47 MESZ
Canyon 1	12,9° C	04:27 MESZ
Unterführung	13,8° C	04:37 MESZ
Canyon 2	13,9° C	04:37 MESZ
Stiegen Schatten	13,6° C	04:37 MESZ
Baumschatten GM	11,6° C	04:37 MESZ

Min. T im Juli - 11.07.2015

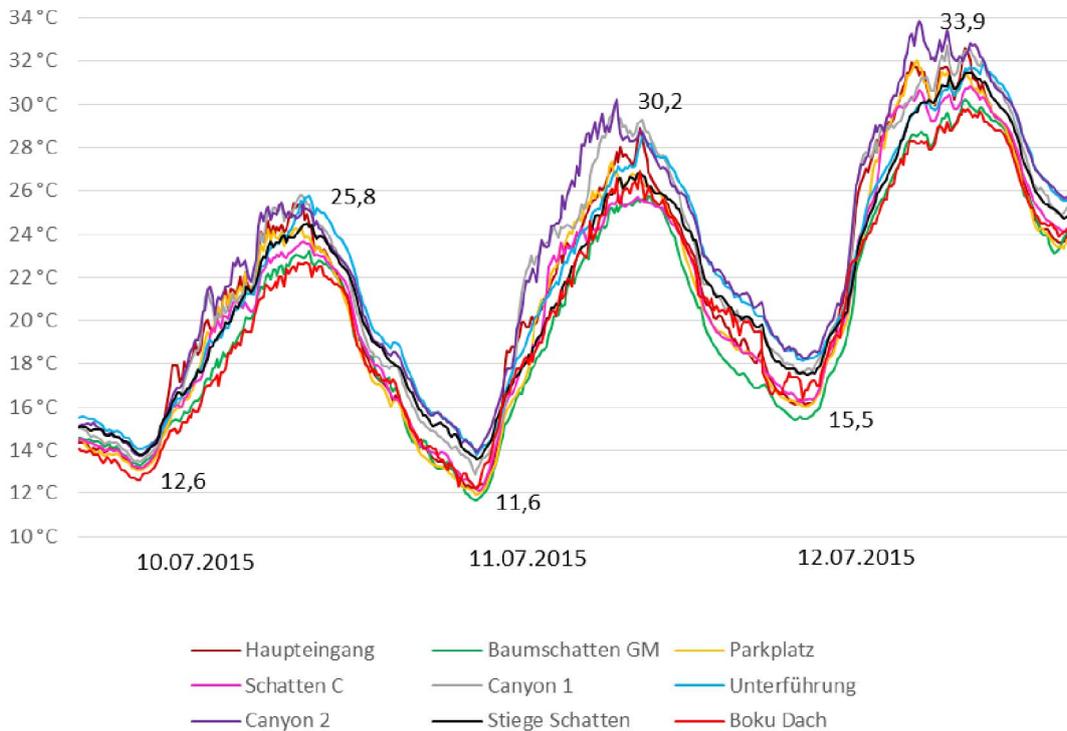


Abbildung 4.14: Temperaturverlauf 10.-12.07.2015

Laut Tabelle 4.2, lag die tiefste Temperatur um 04:37 MESZ bei 11,6 °C im tiefen Baumschatten. Beim Haupteingang wurde die tiefste Temperatur schon um 04:07 MESZ erreicht, diese betrug 12,2 °C. Die BOKU-Met Messstelle registrierte ebenfalls 12,2 °C als tiefste Lufttemperatur. Es hat einen Grund, weshalb die Mini-Wetterstationen in den abgeschotteten Bereichen (Schatten Container und Baumschatten G.M.-Haus) erst später die niedrigste Temperatur aufweisen konnten. Diese Bereiche sind besser „isoliert“ und halten die untertags entstandene Wärme länger unter den Baumkronen und zwischen den Bäumen bzw. Containern. So dauert es auch länger, bis sich die Luft dort abkühlt. Umgekehrt gilt dies auch für die Erwärmung der Luft. Bei diesen Standorten braucht es mehr Zeit, bis die Luft sich erwärmt. Natürlich hängt dies auch noch von anderen Faktoren, wie der Luftfeuchtigkeit und dem Wind ab, denn trotz besserer „Isolierung“ wird es zum Beispiel beim Messstandort Schatten Container sehr schwül, wenn kein Wind weht und es heiß ist. Die Hitzeempfindung ist in diesem Fall stärker. Weitere Ausführungen zu diesem Thema werden später bei den Kapiteln 4.8 Hitzestress und 4.9 UTCI erörtert.

## Maximum-Temperaturen im August (01.08. – 31.08.2015)

August 2015 war der viertwärmste August der Messgeschichte. Die ZAMG Messstation Wien-Innere Stadt hat am 08.08.2015 den Temperaturhöchstwert von 37,2 °C verzeichnet. Im Falle der selber durchgeführten Messungen wurde  $T_{\max}$  vom August erst am 09.08.2015 erreicht, weshalb dieser Tag näher erläutert wird. In Abbildung 4.33 sieht man den Temperaturverlauf vom 07.08. – 09.08.2015. In Tabelle 4.3 wurden die Tageshöchsttemperaturen des 09.08. aufgezählt.

Tabelle 4.3: Temperaturmaxima am 09.08.2015

<b><math>T_{\max}</math> 09.08.2015</b>	Temperatur [°C]	Uhrzeit
Messstelle BOKU Dach	34,6° C	14:37 MESZ
Haupteingang	35,9° C	14:27 MESZ
Parkplatz	35,7° C	13:47 MESZ
Schatten Container	35,7° C	14:37 MESZ
Canyon 1	37,6° C	13:47 MESZ
Unterführung	36,0° C	16:17 MESZ
<b>Canyon 2</b>	<b>38,7° C</b>	<b>12:47 MESZ</b>
Stiegen Schatten	36,4° C	13:57 MESZ
Baumschatten GM	34,9° C	14:27 MESZ

Die höchste Lufttemperatur an diesem Tag wurde bei der Messstelle Canyon 2 registriert. Um 12:47 MESZ hat der Sensor 38,7 °C gemessen. Im Vergleich zu der Höchsttemperatur im Juli ist dieser Wert um 0,7 °C geringer. Trotz längeren Hitzeperioden im August ist der Aufheizeffekt schwächer als im Juli. Dies hat mit der Sonneneinstrahlung und der Sonnenbahn zu tun. Im August ist die Beleuchtungsstärke nicht mehr so intensiv. Auffällig ist ebenfalls, dass die maximale Tagestemperatur früher erreicht wird als im Juli.

Messstelle Canyon 2: Juli: 16:17 MESZ und August: 12:47 MESZ.

Messstelle Baumschatten G.M.-Haus: Juli: 16:57 MESZ und August: 14:27 MESZ

Weiters hat die BOKU-Met Messstation um 14:37 MESZ den Wert 34,6 °C aufgezeichnet. Die niedrigste maximale Temperatur wurde im Baumschatten gemessen und betrug 34,9 °C. Die Bandbreite zwischen den Messwerten ist wieder sehr groß. Die Messwerte schwanken in einem Rahmen von 3,8 °C.

In Abbildung 4.33 ist zu erkennen, dass die Temperaturverläufe nicht konstant sind, sondern über den Tag schwanken. Sie haben aber alle einen ähnlichen Verlauf. Der Verlauf von der Wetterstation im Canyon 2 jedoch ragt deutlich über die anderen, somit ist es dort für einen längeren Zeitraum sehr heiß.

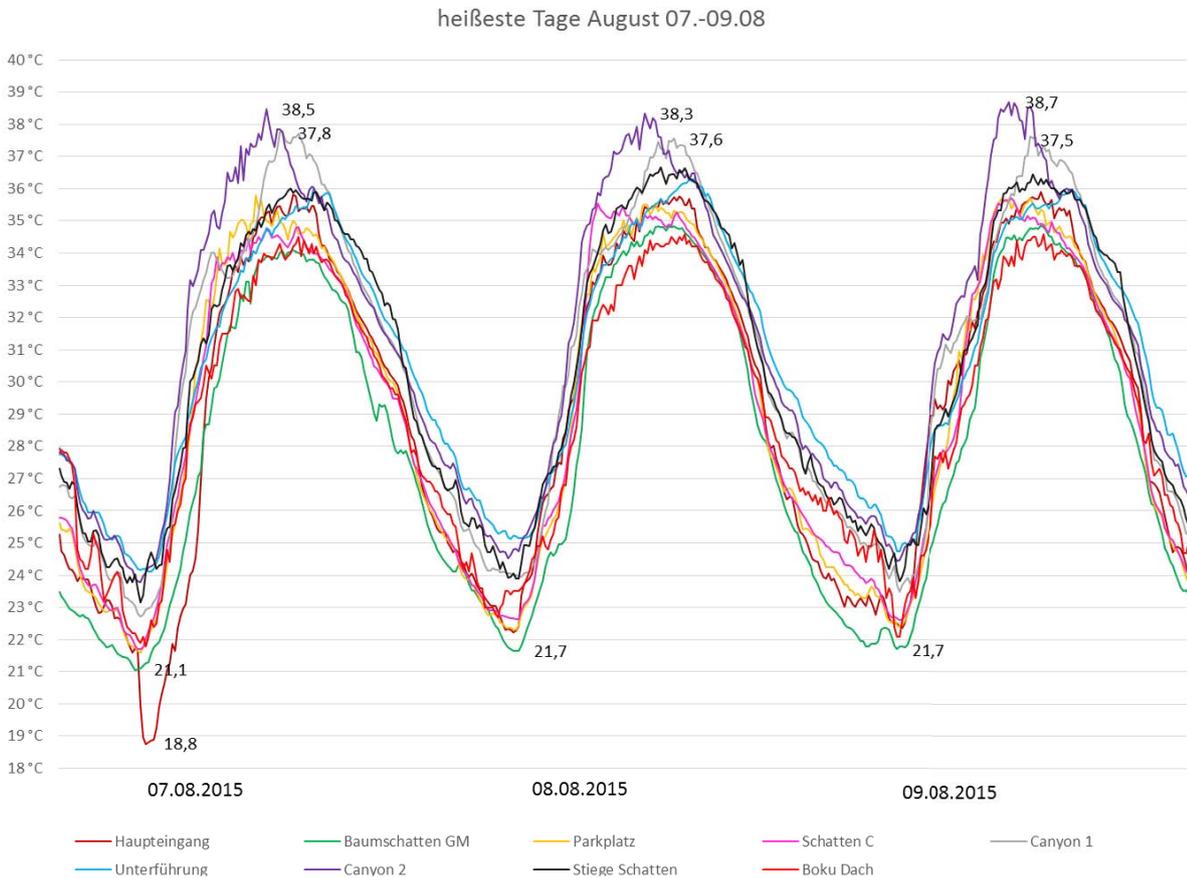


Abbildung 4.15: Temperaturverlauf 07.-09.08.2015

Es gibt einen Ausreißer am 07.08.2015 im Verlauf der Mini-Wetterstation vor dem Haupteingang des Wilhelm-Exner-Hauses. Der Einbruch in der Temperaturkurve findet am Vormittag statt, und wird ebenfalls durch eine Bewässerungsanlage verursacht. Die Anlage befand sich auf der Grasfläche vor dem Baum, auf dem die Messstation angebracht war. Der Baum und die Messeinheit waren dem Wasser ausgesetzt. Der abkühlende Effekt dauerte kürzer an als im tiefen Baumschatten, da die Fläche offen ist und ein Luftaustausch möglich war. Dazu kommt noch, dass der Baum umgeben von Gebäuden ist, die sich aufheizen, sobald die Sonne sie direkt trifft.

## Minimum-Temperaturen im August

Die niedrigsten Temperaturen wurden am 26. August aufgezeichnet. In Abbildung 4.34 lässt sich erkennen, dass am Vortag ein Temperatureinbruch stattgefunden hat. In den Aufzeichnungen der BOKU-Met Wetterstation ist kein Niederschlag registriert sondern eine schwächere Globalstrahlung. Dies bedeutet, dass es am Vortag stark bewölkt und zusätzlich ein starker Wind vorhanden war.

Die niedrigste Lufttemperatur mit 12,7 °C wurde von der Messeinheit im tiefen Baumschatten beim G.M.-Haus gemessen. Die Messstelle am BOKU-Dach hat 14,6 °C bestimmt. In Tabelle 4.4 sind die restlichen Messwerte mit den dazugehörigen Uhrzeiten zu finden.

Tabelle 4.4: Temperaturminima am 26.08.2015

<b>T<sub>min</sub> 26.08.2015</b>	Temperatur [°C]	Uhrzeit
Messstelle Boku Dach	14,6° C	04:47 MESZ
Haupteingang	12,9° C	05:27 MESZ
Parkplatz	13,2° C	04:57 MESZ
Schatten Container	14,1° C	04:57 MESZ
Canyon 1	14,3° C	05:17 MESZ
Unterführung	15,4° C	05:07 MESZ
Canyon 2	15,1° C	04:57 MESZ
Stiegen Schatten	15,4° C	04:37 MESZ
Baumschatten GM	12,7° C	05:07 MESZ

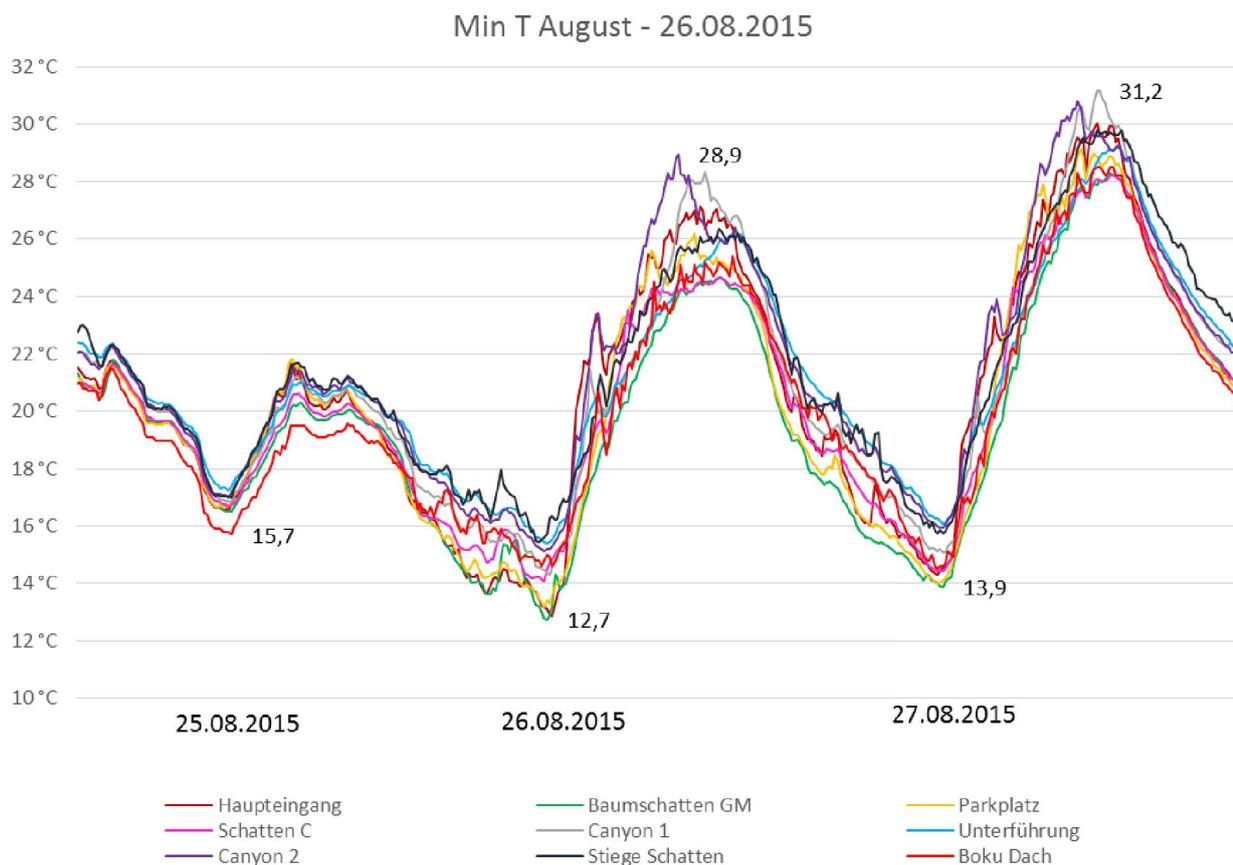


Abbildung 4.16: Temperaturverlauf 25.-27.08.2015

#### 4.4 Einfluss meteorologischer Elemente auf die Lufttemperatur

Die Ergebnisse der stationären und der mobilen Messungen wurden für die Beschreibung der Einflüsse auf die Lufttemperatur verwendet. Ebenfalls wurden wichtige Werte wie die Globalstrahlung, die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung von der BOKU-Met Messstation genommen. Es wurden jeweils Tage, mit besonders signifikanten Effekten in den Ergebnissen aufgeführt. Es ist nicht möglich alle Tage mit jedem Effekt zu beschreiben, da dies den Rahmen dieser Masterarbeit sprengen würde.

##### 4.4.1 Relative Luftfeuchtigkeit

Für die Darstellung der relativen Luftfeuchtigkeit wurden nur die Messwerte der stationären Mini-Wetterstationen gebraucht. Die relative Luftfeuchtigkeit wird in Prozent angegeben und beschreibt den Anteil des Wasserdampfes an der Umgebungsluft. In Abbildung 4.35 sind der Temperaturverlauf und die relative Luftfeuchtigkeit vom 16.07.2015 dargestellt.

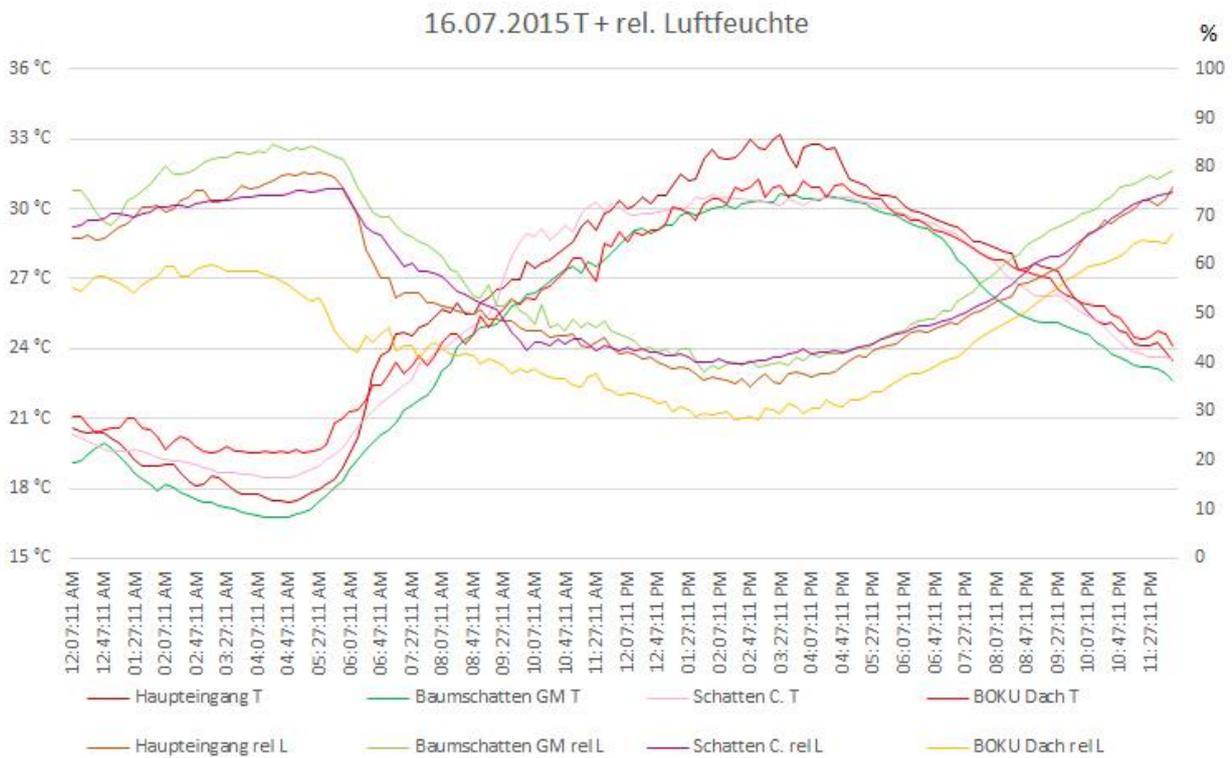


Abbildung 4.17: Temperatur (T) und relative Luftfeuchtigkeit (rel L) am 16.07.2015

Es wurden die Werte der Wetterstationen vom Haupteingang, vom tiefen Baumschatten, vom Schatten Container und vom BOKU-Dach für diese Grafik verwendet. Sie bilden die oberen bzw. unteren Grenzen der Verläufe aller Messstationen und wurden verwendet, um die Darstellung übersichtlich zu gestalten.

Die Temperaturachse ist die Primärachse und die hellen Verläufe (obere Reihe der Legende) sind die Temperaturwerte. Die Sekundärachse stellt die relative Luftfeuchtigkeit dar und gehört zu den dunklen Verläufen.

In der Abbildung ist deutlich zu sehen, dass die Kurven beinahe symmetrisch verlaufen und die Abhängigkeit beider Größen voneinander demonstrieren. In den frühen Morgenstunden ist die relative Luftfeuchtigkeit am höchsten. Um 04:27 MESZ erreicht die Wetterstation im tiefen Baumschatten beim Gregor Mendel Haus den höchsten Wert. Zu diesem Zeitpunkt beträgt dort die relative Luftfeuchte 84,59 %. Gleichzeitig wurde dort die tiefste Temperatur mit 16,75 °C erfasst. Die relative Luftfeuchtigkeit ist das Verhältnis von Dampfdruck  $e$  zu Sättigungsdampfdruck  $e_s$ . Der Sättigungsdampfdruck nimmt mit der Lufttemperatur zu.

In der Grafik kann man erkennen, dass bei der BOKU-Met Wetterstation andere Verhältnisse herrschen. In den frühen Morgenstunden sind hier die Temperaturen im Vergleich zu den anderen

Wetterstationen am höchsten und die relative Luftfeuchtigkeit am niedrigsten. Am Dach oben gibt es keine Vegetation, die transpirieren könnte. Das Gebäude strahlt noch die untertags gespeicherte Wärme ab und durch den schwachen Wind kommt es zu keiner wesentlichen Abkühlung.

Sobald die Sonne aufgeht, sieht die Situation anders aus. Die Temperaturkurve steigt und erreicht einen Tageshöhepunkt und die relative Luftfeuchtigkeit fällt auf ein Minimum. Um 15:27 MESZ werden 33,16 °C von der Wetterstation beim Haupteingang registriert. Die Luftfeuchtigkeit beträgt 35,77 %. Die tiefsten Temperaturwerte findet man an den schattigen Plätzen, wie dem Standort Schatten Container und Baumschatten G.M.-Haus. Die niedrigste relative Luftfeuchte bleibt die von der Messstation am Dach.

Warme Luft kann viel mehr Feuchtigkeit aufnehmen. Dies wird an heißen Tagen zum Problem, wenn die schwüle Hitze den Menschen Probleme bereitet. Die absolute Luftfeuchtigkeit gibt die Wasserbeladung der Luft an.

Am 11. August (siehe Abbildung 4.36) sehen die Kurven der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte ebenfalls wie gespiegelt aus. Es lässt sich außerdem beobachten, dass der Verlauf der beiden Kurven der Messstation vor dem Haupteingang einen vorerst unerklärlichen Sprung besitzt. Der Sprung bezeichnet Ausreißer in den Verläufen in der Früh. Von 4:50 MESZ bis ca. 8 Uhr steigt die relative Luftfeuchtigkeit plötzlich an und erreicht zweimal die 90 % Marke.

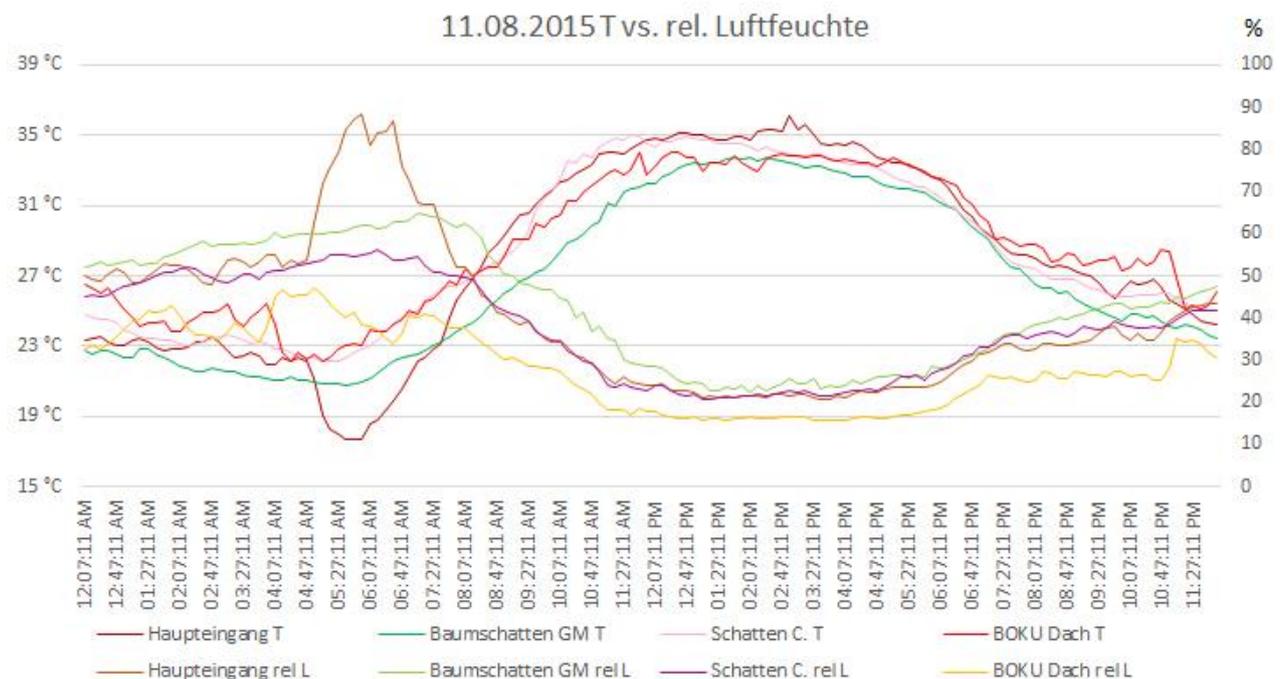


Abbildung 4.28: Temperatur (T) und relative Luftfeuchtigkeit (rel L) am 11.08.2015

## 4.4.2 Windstärke

Der Einfluss der Windstärke auf die Lufttemperatur wurde für den 11. August 2015 untersucht, da untertags der Wind schöne Windspitzen hatte und dadurch ein Einfluss erkennbar war.

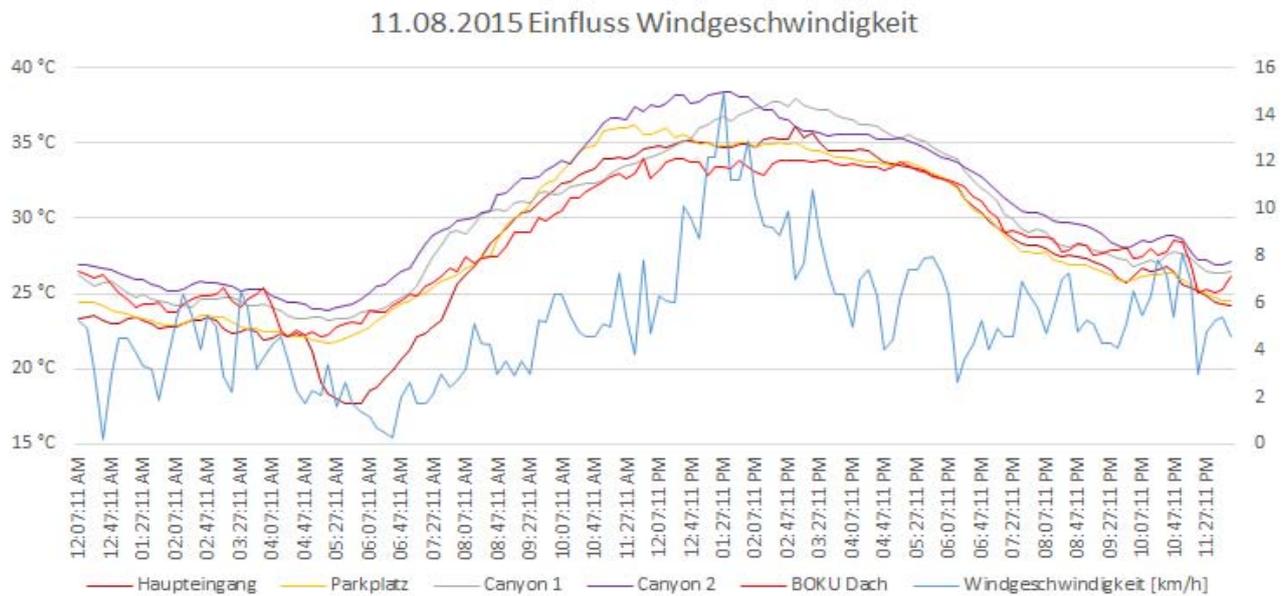


Abbildung 4.29: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Lufttemperatur ausgewählter Standorte am 11.08.2015

Abbildung 4.37 zeigt den Verlauf der Windgeschwindigkeit und die Lufttemperaturverläufe von 5 unterschiedlichen Messstandorten. Die Windgeschwindigkeit ist in km/h angegeben. Die Windgeschwindigkeit war an dem Tag nicht konstant, sondern ist zwischen 2-8 km/h geschwankt. Zur Mittagszeit wird der Wind etwas stärker und die Windgeschwindigkeit erreicht um 13:27 Uhr MESZ ihren Höhepunkt mit 15 km/h. Danach wird der Wind schwächer und verliert an Intensität. Es sind die Temperaturverläufe der Messstandorte Haupteingang, Parkplatz, Canyon 1, Canyon 2 und BOKU-Dach abgebildet. Die Temperaturverläufe sind sehr ähnlich. Nur die Messstation beim Haupteingang hat wieder einen Ausreißer in der Früh, der durch die Bewässerung verursacht wurde. Um 05:27 Uhr MESZ sackt der Temperaturverlauf auf einen Tiefpunkt ab. Ab ungefähr 06:00 Uhr MESZ steigt der Verlauf dann wieder konstant an. Ab 08:30 Uhr MESZ verlaufen die Kurven fast parallel. Um die Mittagszeit jedoch steigen nur 2 Temperaturkurven weiter an. Die Verläufe der Canyons 1 und 2 steigen weiter an und haben Peaks mit Temperaturen von 36°-38°C. Die anderen Kurven pendeln sich zwischen 33°-35°C ein und bleiben für ca. 3-4 h konstant. Interessanterweise hat die Temperaturkurve Canyon 2 zur selben Uhrzeit den Peak wie die

Windgeschwindigkeit. Es wurden eindeutig einige Standorte vom Wind beeinflusst und der Straßencanyon nicht. In Tabelle 4.5 ist es ersichtlich, warum dies so ist.

Tabelle 4.5 Windgeschwindigkeit und Windrichtung zur Mittagszeit am 11. August 2015

11. August 2015			
BOKU-Dach	Windgeschwindigkeit [km/h]	Windrichtung (Grad °)	Himmelsrichtung
12:37 MESZ	10,1 km/h	126,8°	SO
12:47 MESZ	9,6 km/h	170,4°	SSO
12:57 MESZ	8,7 km/h	206,9°	SSW
13:07 MESZ	12,2 km/h	188,1°	SSW
13:17 MESZ	12,2 km/h	157,6°	SSO
13:27 MESZ	15,0 km/h	158,9°	SSO
13:37 MESZ	11,2 km/h	170,1°	SSO
13:47 MESZ	11,2 km/h	180,5°	S
13:57 MESZ	12,9 km/h	169,2°	SSO
14:07 MESZ	10,6 km/h	173,1°	SSO
14:17 MESZ	9,3 km/h	173,5°	SSO
14:27 MESZ	9,2 km/h	125,2°	SO

Die Windrichtung ist der entscheidende Faktor, der zur Abkühlung eines Standortes führen kann. Die Standorte der Wetterstationen beim Haupteingang und Parkplatz sind offene Flächen, die in Richtung Süden ausgerichtet sind. Die Messstation am BOKU-Dach befindet sich auf mind. 25 m Höhe und bietet so eine Angriffsfläche für den Wind aus allen Himmelsrichtungen. Der Straßencanyon wiederum verläuft von Ost nach West und ist im Süden und Norden von Hohen Gebäuden gesäumt. Wie in Tabelle 4.5 deutlich zu erkennen, kam der Wind zur Mittagszeit bzw. am frühen Nachmittag hauptsächlich aus südöstlicher Richtung. Dies stimmt mit der Ausrichtung der Standorte und dem Einfluss des Windes überein. Der Straßencanyon wurde durch das Uni-Gebäude vom Wind geschützt und so konnte die Temperatur weiterhin steigen. Der Standort beim Parkplatz wurde durch den Wind deutlich abgekühlt. Abbildung 4.38 zeigt eine Windrose, mit der die Bestimmung der Windrichtung erfolgte.

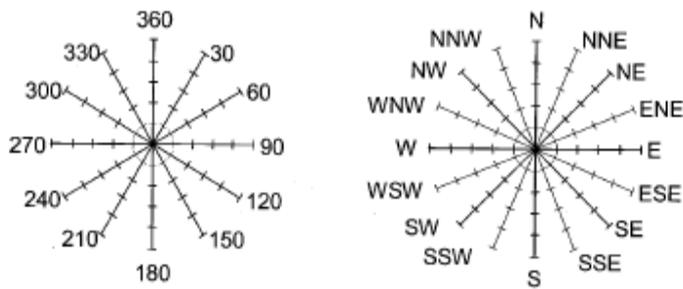


Abbildung 4.30: Windrose und Himmelsrichtungen (Zmarsly et al. 2007)

### 4.4.3 Globalstrahlung

Die Effekte der Globalstrahlung werden anhand des 07.08. und 10.08.2015 gezeigt. An beiden Tagen ist der Verlauf einzigartig und zeigt deutlich den Einfluss auf die Lufttemperatur bzw. auf den Hitzestress des Menschen.

Im Kapitel Strahlungsbilanz der Erde wurde gezeigt, dass die einfallende Globalstrahlung aus einem direkten Anteil und einem diffusen Anteil der Strahlung besteht. Der diffuse Anteil wurde in der Atmosphäre bereits gestreut, reflektiert oder gebrochen und hat an Energie eingebüßt. Für das Hitzeempfinden und die Erwärmung ist die kurzwellige Direktstrahlung verantwortlich. Bei den Ergebnissen vom UTCI wird dies genauer erläutert. Sobald der Himmel bewölkt ist, versiegt die direkte Strahlung und es kommt nur diffuse Strahlung zum Standort.

Abbildung 4.31 zeigt den Verlauf der Globalstrahlung am 07.08.2015. Es sind eindeutige Einbrüche in der Strahlungsintensität zu sehen. Dies kann durch dichte Wolkenfelder verursacht worden sein. Zuerst gab es einen kleinen Einbruch in der Globalstrahlungsintensität um 11:37 Uhr MESZ und danach einen stärkeren um 12:07 Uhr MESZ. Der Temperaturverlauf der Messstation Canyon 1 (westseitig) wird durch die plötzlich nicht mehr vorhandene direkte Strahlung beeinflusst und kühlt etwas ab. Auch bei den anderen Standorten macht sich ein unregelmäßiger Temperaturverlauf bemerkbar. Der Verlauf von der Station am BOKU-Dach und vom Parkplatz bricht ebenfalls eindeutig ein.

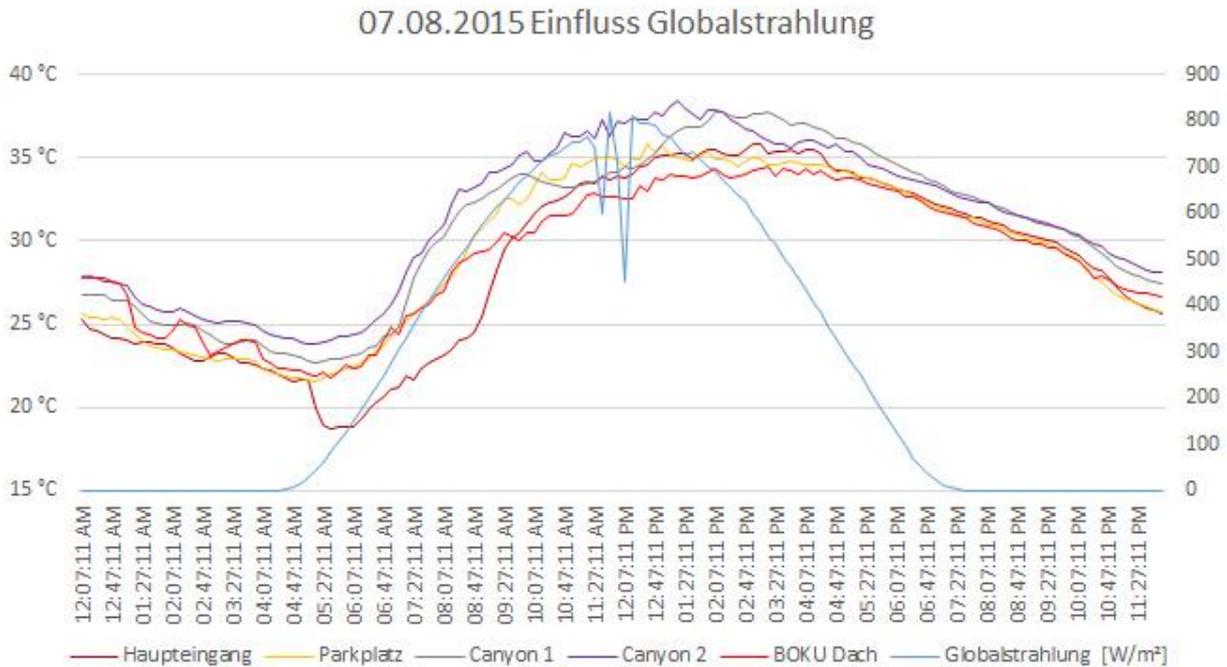


Abbildung 4.31: Einfluss der Globalstrahlung auf die Lufttemperatur am 07.08.2015

Am 10.08.2015 lässt sich der Einfluss der Globalstrahlung besonders gut erkennen. Die Temperaturverläufe der Standorte Parkplatz, Schatten Container und Canyon 1 sind in Abbildung zusammen mit der Globalstrahlung dargestellt. Um ca. 11 Uhr MESZ hat die Globalstrahlung einen lang andauernden negativen Höchstwert und dann nach kurzer Zeit einen kurzen. Die Intensität der Globalstrahlung verliert an ca. 200 W/m<sup>2</sup>. Zeitgleich fallen die Temperaturen bei den Standorten und die Verläufe erreichen einen Tiefpunkt. Sobald die Strahlung wieder an Intensität gewinnt, steigen auch die Temperaturen wieder an. Es erscheint vielleicht ein wenig merkwürdig, dass der Temperaturverlauf vom Standort Schatten Container beeinflusst wird, aber die Mini-Wetterstation wurde generell bis zur späten Mittagszeit von den Sonnenstrahlen getroffen, da die Baumkronen auf südöstlicher Seite nicht dicht genug waren.

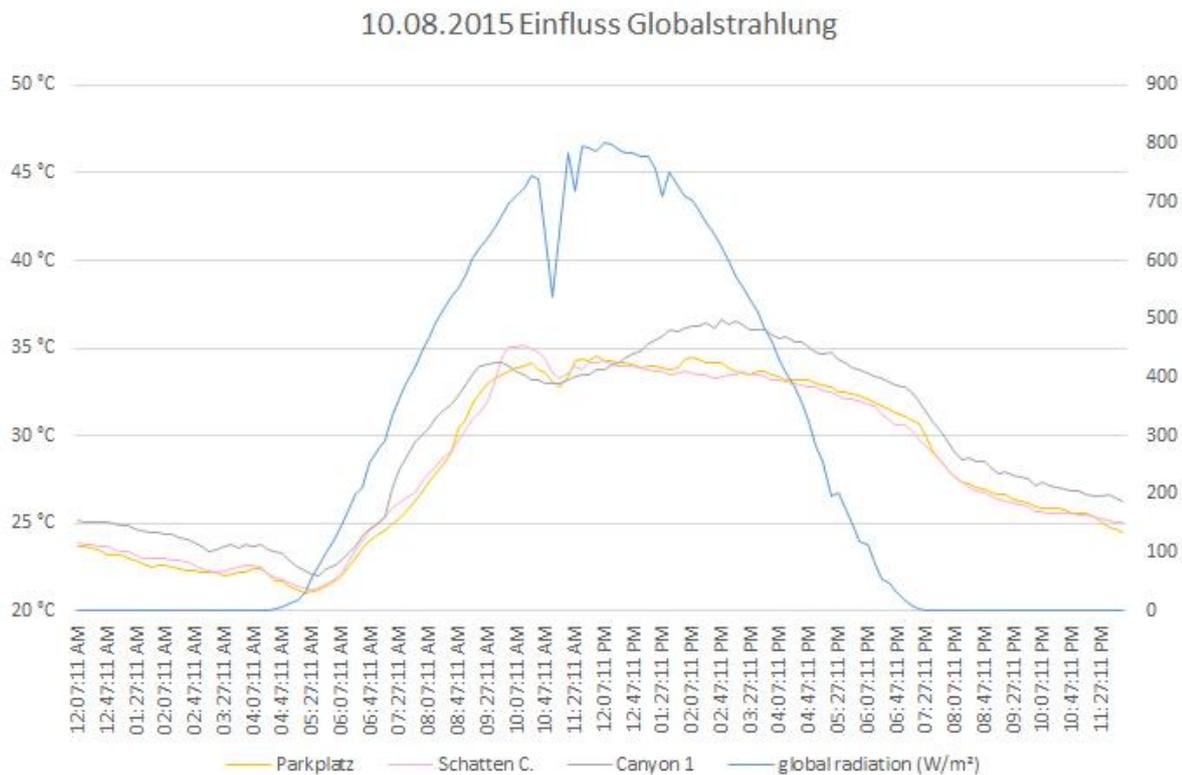


Abbildung 4.18: Einfluss der Globalstrahlung auf die Lufttemperatur am 10.08.2015

## 4.5 Infrarot-Aufnahmen

Die Infrarotkamera-Aufnahmen wurden am 11. August 2015 in zwei Durchgängen gemacht. Es wurde mit der Wärmebildkamera der Marke FLIR gearbeitet. Um den Aufheizungseffekt des Standortes beobachten zu können, wurde zur Mittagszeit und am Nachmittag fotografiert. An anderen Tagen wurden auch Aufnahmen am Vormittag aufgenommen. Der erste Messdurchgang startete um 12:36 Uhr MESZ und der zweite um 15:22 Uhr MESZ. Die Aufnahmen vom Nachmittag wurden ebenfalls mit den mobilen Messungen der Oberflächentemperatur verglichen, um die Temperaturen genauer zu bestimmen. Die Oberflächentemperaturen wurden mit einem Infrarot-Thermometer ab 15:33 Uhr MESZ gemessen. Nähere Beschreibungen zu den Messgeräten findet man im Kapitel Methodik ab Seite 40.

## Wetterstation 1: Haupteingang (11. August 2015)

12:36 Uhr MESZ

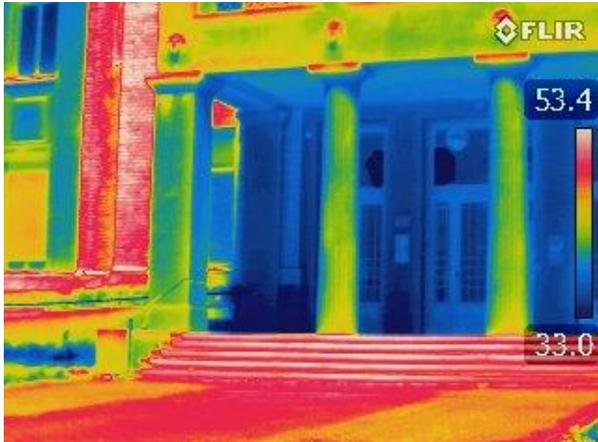


Abbildung 4.19: Haupteingang 12:36 MESZ

15:22 Uhr MESZ

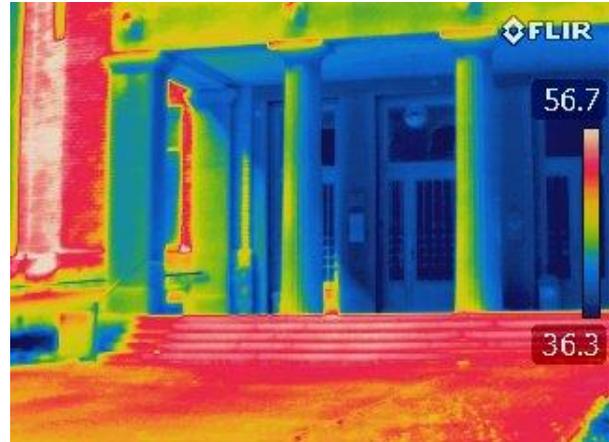


Abbildung 4.34: Haupteingang 15:22 MESZ

Bei den Abbildungen 4.41 und 4.42 des Standortes Haupteingang sieht man die Mini-Wetterstation nicht. Der Fokus lag auf der Erwärmung und den Oberflächentemperaturen des Unigebäudes um die Messstation herum. Der Einfluss auf die Lufttemperatur am Standort hängt sehr von der Wärmeabstrahlung der versiegelten Flächen ab. Aus den Abbildungen ist es ersichtlich, dass die Sonne nach Westen gewandert ist. Im Bild befindet sich der Norden hinter dem Gebäude und der Westen auf der linken Seite.

Die Fläche vor dem Haupteingang ist laut den Wärmebildaufnahmen am Nachmittag mit 50°-54°C (orange bis rot) statt 52°-56°C (orange bis leicht weiß) ein wenig kühler geworden. Die Messung der Oberflächentemperatur mit dem Thermometer ergibt 56,8° C (siehe Tabelle 4.6). Die Fassade des Haupteinganges hat eine Oberflächentemperatur von 45,6°C am Nachmittag. Dies entspricht in etwa dem Ergebnis der Infrarotkamera-Aufnahme.

Tabelle 4.6: Oberflächentemperaturen beim Haupteingang (SS=südseitig)

<b>Oberflächentemperaturen</b>		11.08.2015
Haupteingang 15:33 MESZ		
Baum ss Sonne		49,3 °C
Baum ss Schatten		42,7 °C
Gras vor Baum		34,2 °C
Fassade Haupteingang		45,6 °C
Beton		56,8 °C

## Wetterstation 2: Parkplatz

12:43 Uhr MESZ



Abbildung 4.35: Parkplatz 12:43 MESZ

15:34 Uhr MESZ



Abbildung 4.36: Parkplatz 15:34 MESZ

Die Abbildungen 4.43 und 4.44 zeigen den Parkplatz am BOKU-Gelände. Auf der versiegelten Fläche ist deutlich zu sehen, wie der Baumschatten vom Westen kommt und am Nachmittag dieser Bereich dadurch abkühlt. Der versiegelte Bereich im Hintergrund des Bildes heizt sich jedoch stark auf, da die Sonne diesen Bereich direkt bestrahlt. Die Oberflächentemperaturmessung um 15:50 Uhr MESZ hat in der Sonne 51,8°C und im Schatten 42,8°C ergeben (siehe Tabelle 4.7). Der versiegelte Bereich weiter nördlich wurde nicht erfasst. Die Wärmebildkamera hat den Schattenbereich für weitaus kühler mit 35°-40°C eingeschätzt.

Tabelle 4.7: Oberflächentemperaturen Parkplatz

Oberflächentemperaturen	
11.08.2015	
Parkplatz 15:50 MESZ	
Mauer unter HOBO	35,2 °C
Beton	51,8 °C
Beton Schatten	42,8 °C
Kies	42,2 °C
Kies Schatten	33,9 °C

### Wetterstation 3: Schatten Container

13:02 Uhr MESZ

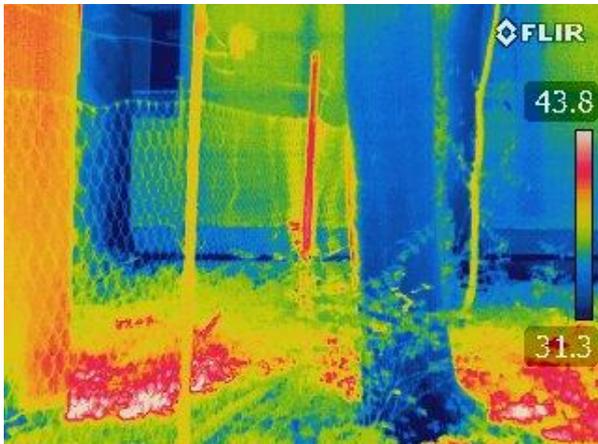


Abbildung 4.37: Schatten C. 13:02 MESZ

15:36 Uhr MESZ

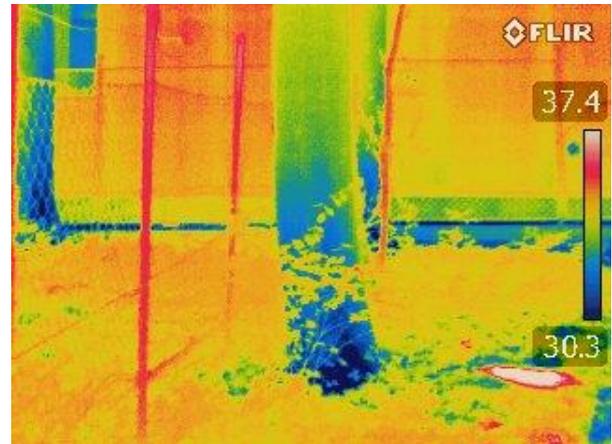


Abbildung 4.38: Schatten C. 15:36 MESZ

In Abbildung 4.45 und 4.46 ist wenig Unterschied zwischen den Oberflächentemperaturen sichtbar. Da der Standort abgeschirmt ist und wenig direkte Strahlung empfängt, erwärmt sich die Umgebung ab der Mittagszeit nicht mehr und die Temperaturen bleiben mit ca. 1°C +/- konstant. Die Infrarot-Aufnahme um 15:36 Uhr MESZ zeigt höhere Temperaturen an, als das Oberflächenthermometer. Dies könnte an der halben Stunde Differenz zwischen den Messungen liegen. Die Fassade des Holzhauses hat laut Thermometer 30,6°C (siehe Tabelle 4.8), wohingegen die Aufnahme ca. 34°C schätzen lässt.

Tabelle 4.8: Oberflächentemperaturen Schatten C.

Oberflächentemperaturen	
11.08.2015	
Schatten Container 16:03 MESZ	
Mast HOBO	32,3 °C
Baum	29,9 °C
Container	32,2 °C
Holzhaus	30,6°C

## Wetterstationen 4 + 5: Canyon 1 (westseitig) + Unterführung

13:10 Uhr MESZ



Abbildung 4.20: Canyon 1 13:10 MESZ

15:37 Uhr MESZ



Abbildung 4.40: Canyon 1 15:37 MESZ

Die Abbildungen 4.47 und 4.48 zeigen die beiden Standorte Canyon 1 (westseitig) und die Unterführung. Die Kamera blickt in Richtung Osten. Zur Mittagszeit ist der Schatten unter der Unterführung kleiner, da die Sonne senkrecht über dem Messstandort steht. Am Nachmittag breitet sich der Schatten aus, da das Gebäude seitlich aus südwestlicher Richtung angestrahlt wird, und den Schatten wirft. Die Oberflächentemperaturen nehmen am Nachmittag zu, da die Sonne über diese Seite wandert und mehr direkte Strahlung auf den Standort fällt. Unterhalb der Unterführung wird es auch wärmer, da die Wärmeabstrahlung von den versiegelten Flächen dazu beiträgt, dass sich die Oberfläche trotz Schatten nicht abkühlt. Die mit dem Infrarot-Thermometer gemessenen Oberflächentemperaturen (siehe Tabelle 4.9), entsprechen den aus den Wärmebildaufnahmen gewonnenen Temperaturen.

Tabelle 4.9: Oberflächentemperaturen Canyon 1 (ss=südseitig, ns=nordseitig)

Oberflächentemperaturen		11.08.2015
Canyon 1 16:09 MESZ		
Beton		51,4 °C
Beton Schatten		47,4 °C
Fassade ss		46,7 °C
Fassade ns		37,8 °C

## Wetterstation 6: Canyon 2 (ostseitig)

13:12 Uhr MESZ



Abbildung 4.41: Canyon 2 13:12 MESZ

15:38 Uhr MESZ



Abbildung 4.42: Canyon 2 15:38 MESZ

Die Aufnahmen 4.49 und 4.50 sind leider von der Standortperspektive nicht ident. Es lässt sich aber erkennen, dass der Schatten zur Mittagszeit bis zu dem ersten Stiegenaufgang geht und am Nachmittag zieht er sich weiter bis zum zweiten Aufgang und hüllt die Messstation ebenfalls ein. Die Oberflächentemperaturen des Betons vor der Messstelle betragen zur Mittagszeit ca. 57°C und am Nachmittag ca. 50°C (laut Wärmebildkamera). Die gemessene Thermometertemperatur vom Beton beträgt sogar weniger um 16:21 Uhr MESZ. 45°C hat die Oberfläche nun im Schatten (siehe Tabelle 4.10). Auch die Gebäudefassade südseitig ist laut Thermometer kühler: 39°C statt ca. 50°C. Dies kann daran liegen, dass die Aufnahme ca. 40 min früher entstanden ist.

Tabelle 4.10: Oberflächentemperaturen Canyon 2 (ss=südseitig, ns=nordseitig)

Oberflächentemperaturen		11.08.2015
Canyon 2 16:21 MESZ		
Beton		/ °C
Beton Schatten		45,0 °C
Fassade s.s.		39,0 °C
Fassade n.s.		33,4 °C

## Wetterstation 7: Stiegen

13:12 Uhr MESZ



Abbildung 4.43: Stiege Schatten 13:12 MESZ

15:38 Uhr MESZ



Abbildung 4.21: Stiege Schatten 15:38 MESZ

Die Messstation beim Stiegenaufgang ist in Abbildung 4.51 und 4.52 zu sehen. Dieser Bereich ist gantztägig im Schatten, deshalb ist auch beinahe kein Unterschied zwischen den Aufnahmen zu sehen. Laut der Oberflächentemperaturmessung (siehe Tabelle 4.11) ist der Boden im Vordergrund des Bildes 31,3°C warm und in der Aufnahme ist der Boden ca. 3°C wärmer. Die Wand hinten bei der Eingangstür hat laut Messung 33,3°C und laut der Aufnahme ca. 38°C. Diese Differenzen können wieder durch die unterschiedliche Messuhrzeit bedingt sein.

Tabelle 4.11: Oberflächentemperaturen Stiege Schatten (ns=nordseitig)

Oberflächentemperaturen		11.08.2015
Stiege Schatten 16:26 MESZ		
Boden		31,3 °C
Wand ns		33,2 °C

## Wetterstation 8: Baumschatten GM

13:44 Uhr MESZ



Abbildung 4.45: Baumschatten GM 13:44 MESZ

16:24 Uhr MESZ



Abbildung 4.46: Baumschatten GM 16:24 MESZ

Die Abbildungen 4.53 und 4.54 zeigen den Bereich des tiefen Baumschattens beim Gregor Mendel-Haus. Hier ist wieder kaum ein Temperaturunterschied zu sehen. Die Oberflächentemperaturen sind um ca. 1°C im Vergleich zur Mittagszeit gestiegen. Es fällt wieder auf, dass die Thermalbildaufnahme höhere Temperaturen wiedergibt als die Oberflächenmessungen. Dies fällt beim Boden direkt vor der Sprenkieranlage auf. Das Infrarot-Thermometer hat am Boden 24,7°C gemessen (siehe Tabelle 4.12) und die Aufnahme zeigt mind. 26,3°C. Dieses Mal sind aber nur 11 Minuten Differenz zwischen den Messungen.

Tabelle 4.12: Oberflächentemperaturen Baumschatten GM (ss=südseitig)

Oberflächentemperaturen		11.08.2015
Baumschatten G.M. 16:35 MESZ		
Baum unter HOBO		30,6 °C
Boden		24,7 °C
Baum ss		27,5 °C

## 4.6 Sonnenbahn über den Standorten

Die Bestimmung der Sonnenbahn über den Messstandorten war notwendig für die Berechnung des „Universellen thermischen Klimaindexes“ UTCI. Anhand der Sonnenbahn wurde festgestellt, zu welcher Uhrzeit die Messstationen im Schatten waren, um so die Globalstrahlung abschätzen zu können (siehe Kapitel 4.9 UTCI).

Mit der Software HemiView konnte die Sonnenbahn berechnet werden, nachdem eine hemisphärische Aufnahme des Standortes in das Programm geladen wurde. Um den Einfluss im Sommer zu demonstrieren, wurde die Sonnenbahn für den 05.08.2015 berechnet. Die Fischaugenaufnahmen entstanden im September 2015 an einem bewölkten Tag. Für die Aufnahmen war es wichtig, dass keine direkte Sonnenstrahlung auf die Linse fällt. Auf den Aufnahmen wurde in violett die Sonnenbahn für den Tag eingezeichnet und in grün ist jener Bereich gekennzeichnet, in dem die Sonne während eines Jahres wandert (Sonnenkarte).

Wichtige Standortfaktoren wurden ebenfalls mithilfe von HemiView ermittelt. Standortfaktoren sind Indizes, die das Verhältnis der Strahlung angeben, die einen bestimmten Standort erreicht. Es gibt den indirekten Standortfaktor ISF, den direkten Standortfaktor DSF und den globalen Standortfaktor GSF. Der ISF gibt den Anteil an diffuser Strahlung an, die einen Standort erreicht, relativ gesehen zum offenen Gelände ohne Himmelsichteinschränkungen. Der DSF gibt den Anteil an direkter Strahlung an, die einen Messstandort erreicht, ebenfalls relativ gesehen zum offenen Gelände. Der GSF ist der Anteil an Globalstrahlung unterhalb von Baumkronen in Bezug zur Globalstrahlung, die auf Gelände ohne Himmelsichteinschränkungen trifft. Die Standortfaktoren können Werte zwischen 0 und 1 einnehmen, wobei bei 0 keine Strahlung mehr vorhanden ist. Diese Werte sind auf den ganzen Tag bezogen und wurden für den 05.08.2015 berechnet.

Ein wichtiger Wert, der ebenfalls den Standort charakterisiert, ist „VisSky“ oder der Himmelsichtfaktor. Dieser Wert gibt den sichtbaren und unversperrten Anteil des Himmels an, der vom Boden aus gesehen wird. Wenn ein Standort von Vegetation umgeben ist, so ändert sich der Himmelsichtfaktor mit den Jahreszeiten, da im Winter die Blätter abfallen und den Himmel nicht mehr versperren können (Rich et al. 2016).

In den folgenden Tabellen wurden bei den Messstationen ebenfalls die Minimum- und Maximum-Temperaturen vom 05. August 2015 angegeben. Die Wind Ratio (Wind R.) bezeichnet das Verhältnis von den gemessenen durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten zu der von der BOKU-Met Messstation am Dach. Die Sonnenscheindauer SSD gibt an, wie lange die direkte Sonneneinstrahlung am jeweiligen Standort gedauert hat.

## Haupteingang

Tabelle 4.13: Standortfaktoren Haupteingang

Standortfaktoren								05.08.2015	
	VisSky	ISF	DSF	GSF	Min T.	Max T.	Wind R.	SSD	
Haupteingang	0,53	0,67	0,68	0,68	20,7 °C	34,6 °C	0,45	15,97 h	

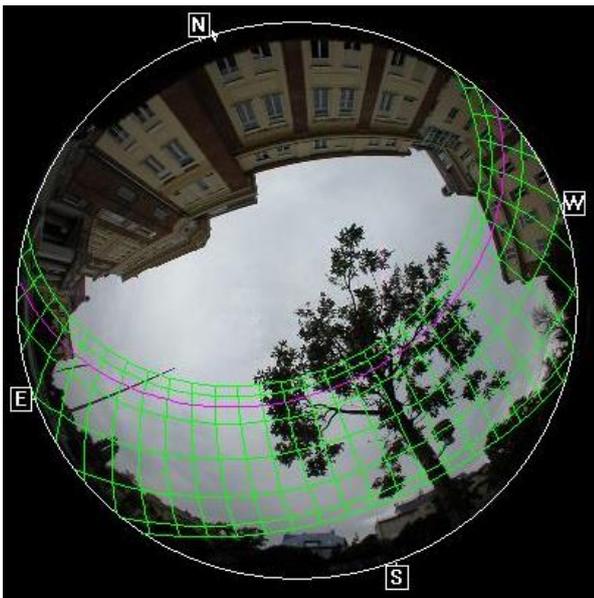


Abbildung 4.47: Sonnenbahn über dem Standort Haupteingang

## Parkplatz

Tabelle 4.14: Standortfaktoren Parkplatz

Standortfaktoren								05.08.2015	
	VisSky	ISF	DSF	GSF	Min T.	Max T.	Wind R.	SSD	
Parkplatz	0,44	0,65	0,54	0,56	22,7 °C	33,1 °C	0,65	11,08 h	

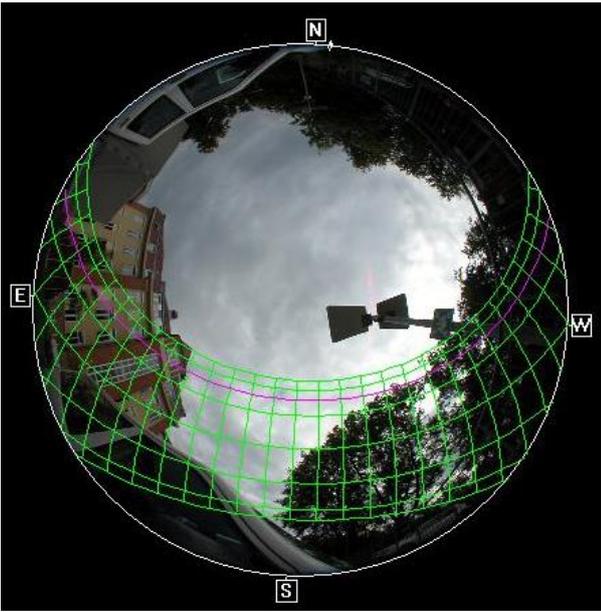


Abbildung 4.22: Sonnenbahn über dem Standort Parkplatz

**Schatten Container**

Tabelle 4.15: Standortfaktoren Schatten Container

Standortfaktoren						05.08.2015		
	VisSky	ISF	DSF	GSF	Min T.	Max T.	Wind R.	SSD
Schatten C	0,16	0,21	0,26	0,26	23,0 °C	32,2 °C	0,07	7,14 h

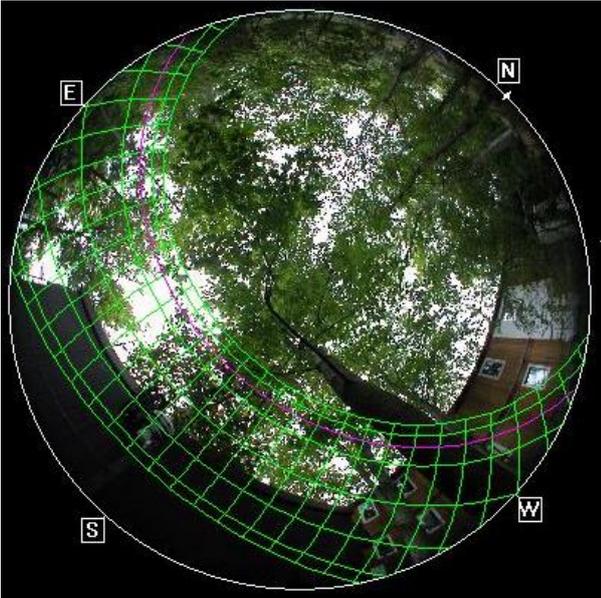


Abbildung 4.23.: Sonnenbahn über dem Schatten C

## Canyon 1 (westseitig)

Tabelle 4.16: Standortfaktoren Canyon 1

Standortfaktoren							05.08.2015	
	VisSky	ISF	DSF	GSF	Min T.	Max T.	Wind R.	SSD
Canyon 1	0,22	0,34	0,33	0,33	23,5 °C	35,3 °C	0,49	9,31 h

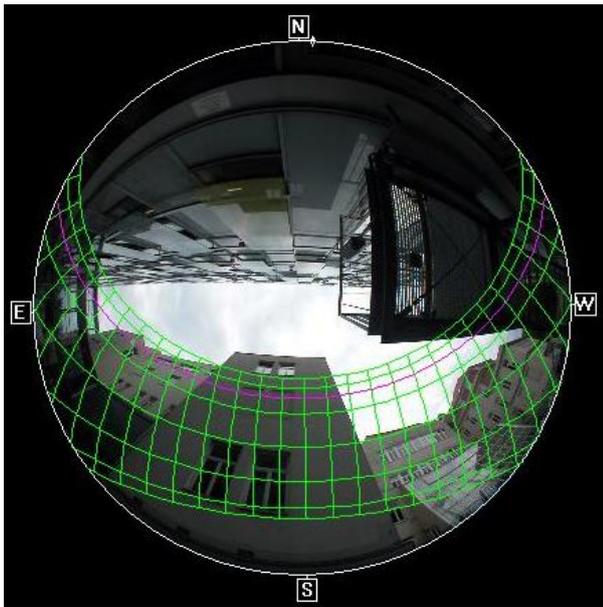


Abbildung 4.24: Sonnenbahn über dem Standort Canyon 1

## Unterführung

Tabelle 4.17: Standortfaktoren Unterführung

Standortfaktoren							05.08.2015	
	VisSky	ISF	DSF	GSF	Min T.	Max T.	Wind R.	SSD
Unterführung	0,15	0,13	0,21	0,20	23,7 °C	33,5 °C	0,43	10,35 h

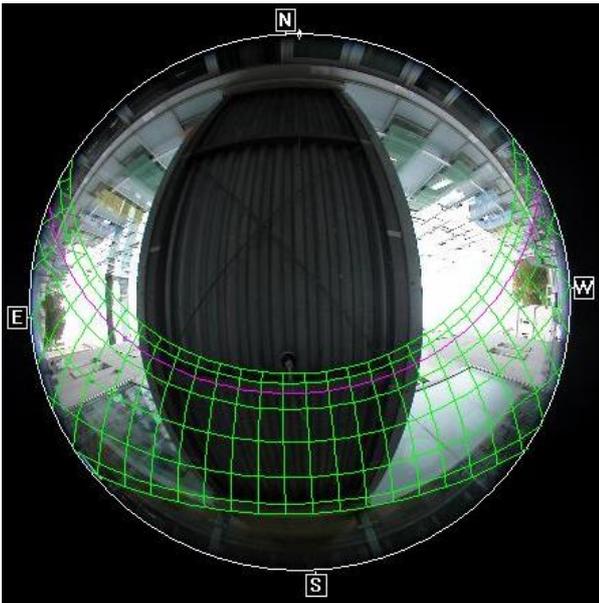


Abbildung 4.25: Sonnenbahn über dem Standort Unterführung

### Canyon 2 (ostseitig)

Tabelle 4.18: Standortfaktoren Canyon 2

Standortfaktoren	05.08.2015							
	VisSky	ISF	DSF	GSF	Min T.	Max T.	Wind R.	SSD
Canyon 2	0,35	0,53	0,60	0,59	23,5 °C	34,5 °C	0,54	17,91 h

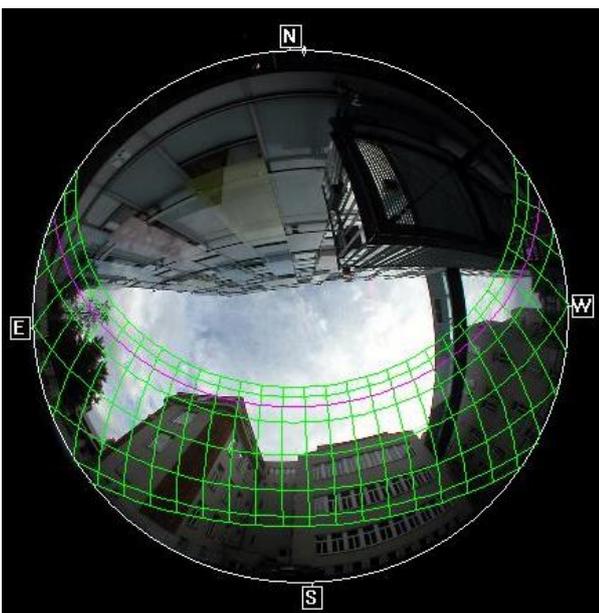


Abbildung 4.26: Sonnenbahn über dem Standort Canyon 2

## Stiege Schatten

Tabelle 4.19: Standortfaktoren Stiege Schatten

Standortfaktoren							05.08.2015		
	VisSky	ISF	DSF	GSF	Min T.	Max T.	Wind R.	SSD	
Stiege	0,19	0,32	0,05	0,09	23,5 °C	32,7 °C	x	0,35 h	

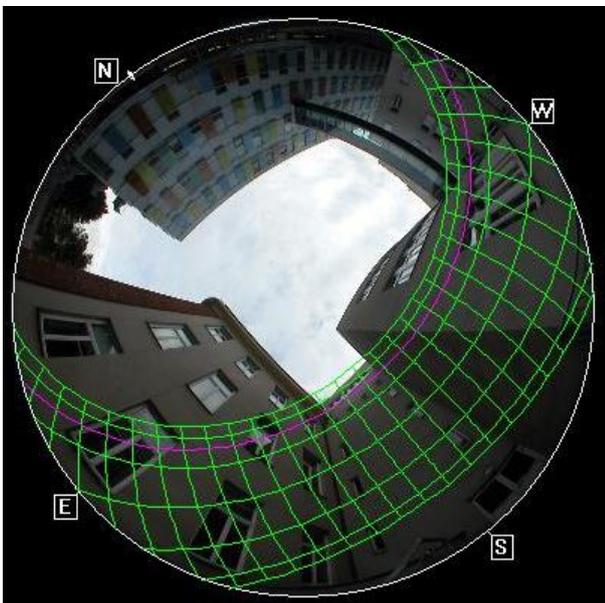


Abbildung 4.27: Sonnenbahn über dem Standort Stiege

## Baumschatten GM

Tabelle 4.20: Standortfaktoren Baumschatten GM

Standortfaktoren							05.08.2015		
	VisSky	ISF	DSF	GSF	Min T.	Max T.	Wind R.	SSD	
Baumschatten GM	0,16	0,16	0,13	0,14	21,6 °C	31,3 °C	0,55	2,19 h	

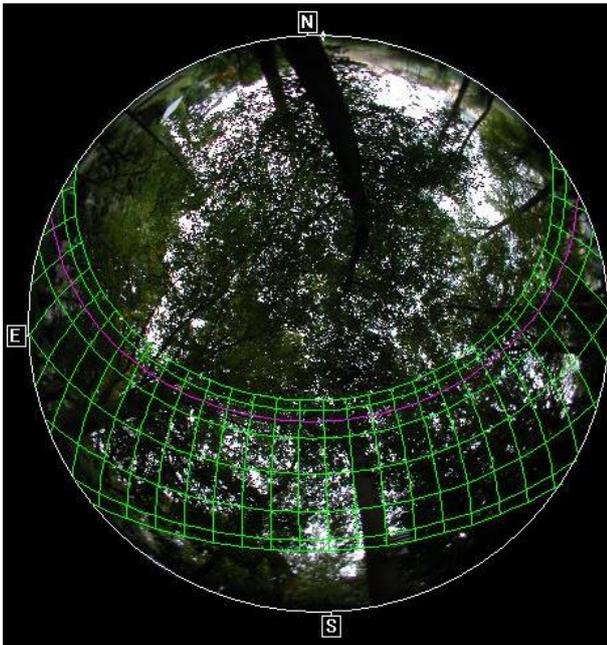


Abbildung 4.28: Sonnenbahn über dem Standort Baumschatten GM

#### 4.7 Der Straßencanyon-Effekt

Der Straßenschluchteneffekt wurde bereits auf Seite 16 beschrieben. Um diesen Effekt nachweisen zu können, wurden verschiedene Parameter in der repräsentativen Straßenschlucht, die sich von der Messstelle Canyon 1 bis zur Messstelle Canyon 2 zieht (die Messstelle Unterführung liegt dazwischen und gehört ebenfalls dazu), untersucht. Da auch die UTCI-Temperatur einen Aufschluss über die Eigenschaften des Standortes geben kann, wurde der 05.08.2015 genauer untersucht.

#### Windgeschwindigkeit

In Abbildung 4.63 ist die Windgeschwindigkeit in km/h in der Schlucht und am BOKU-Dach zu bestimmten Zeiten abgebildet. Die angegebenen Windgeschwindigkeiten sind 10-min Mittelwerte und nicht Momentangeschwindigkeiten. Deutlich sichtbar ist der Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem Dach und der Straßenschlucht. Der Wind wird in über 25 m Höhe gemessen, wo keine Hindernisse sind, an denen er an Stärke verlieren kann. Am Boden ist der Wind um die Hälfte schwächer als oben. Am Vormittag ist der Wind stärker und die Geschwindigkeit ist westseitig höher als ostseitig. Am Nachmittag ist die Geschwindigkeitsverteilung anders. Bei der Messstation im Osten des Canyons wird sogar eine höhere Geschwindigkeit gemessen als am Dach.

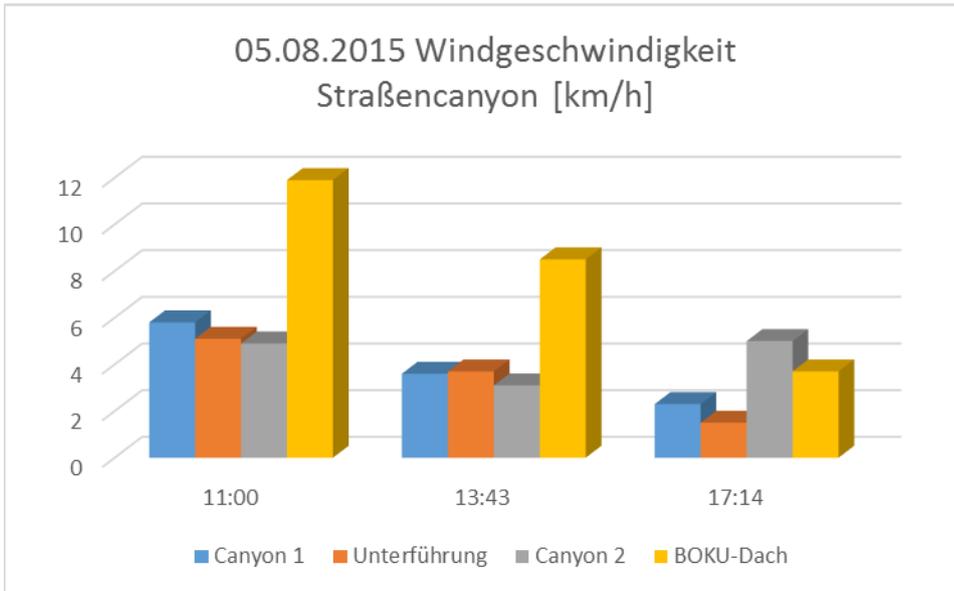


Abbildung 4.29: Windgeschwindigkeit im Straßencanyon und BOKU-Dach [km/h]

Der Grund für diese Verteilung liegt in der Windrichtung, aus der er kommt. Die Windrichtung in Grad für diese Messzeitpunkte wird in Abbildung 4.64 dargestellt.

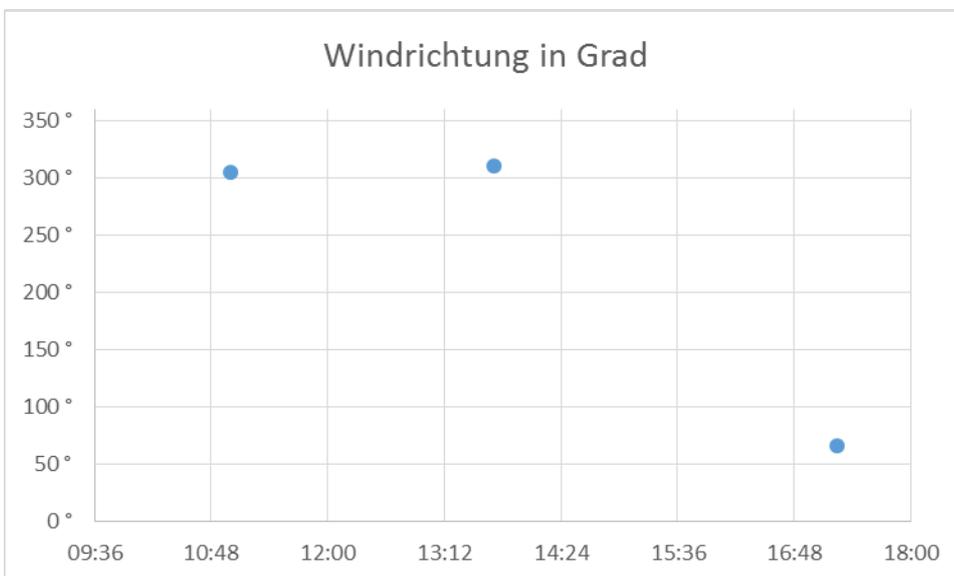


Abbildung 4.56: Windrichtung in Grad ° am 05.08.2015

Um 11 Uhr MESZ und um 13:43 Uhr MESZ weht der Wind aus ungefähr 305°. Die Windrose von Seite 79 gibt Aufschluss über die Windrichtung. Wenn der Wind aus 305° weht, dann bedeutet dies, dass er aus Nordwesten kommt. Dies stimmt mit den gemessenen Werten überein, da der Wind am Vormittag und Mittag bei der Messstation Canyon 1 stärker war als bei Canyon 2. Die volle Kraft konnte er im Canyon jedoch nicht entfalten, da er an der nördlichen Gebäudemauer

abgeschwächt wurde. Der Straßencanyon-Effekt wäre zum Tragen gekommen, wenn der Wind direkt aus Westen gekommen wäre. Am Nachmittag um 17:14 Uhr MESZ kam der Wind aus 65° bzw. Nordosten, deshalb hat die Wetterstation Canyon 2 die höchste mittlere Geschwindigkeit aufgezeichnet. Da er nicht vollständig aus östlicher Richtung kam, wurde er ebenfalls an der Gebäudefront abgeschwächt.

## Lufttemperatur

Eine Straßenschlucht trägt dazu bei, dass sich Hitze in dem Bereich vermehrt ansammelt, da die Wärmeabstrahlung der versiegelten Flächen sehr hoch ist. Im Kapitel Straßencanyon wurden die Einflüsse der Strahlungsgeometrie in der Schlucht genauer beschrieben. Abbildung 4.65 vergleicht die Lufttemperaturen in der Schlucht mit den gemessenen Werten vom BOKU-Dach. Die Werte in der Schlucht liegen 2°-4°C höher als auf dem Dach. Zur Mittagszeit ist der Temperaturunterschied am größten. Am Nachmittag gleichen sich die Temperaturen langsam aneinander an.

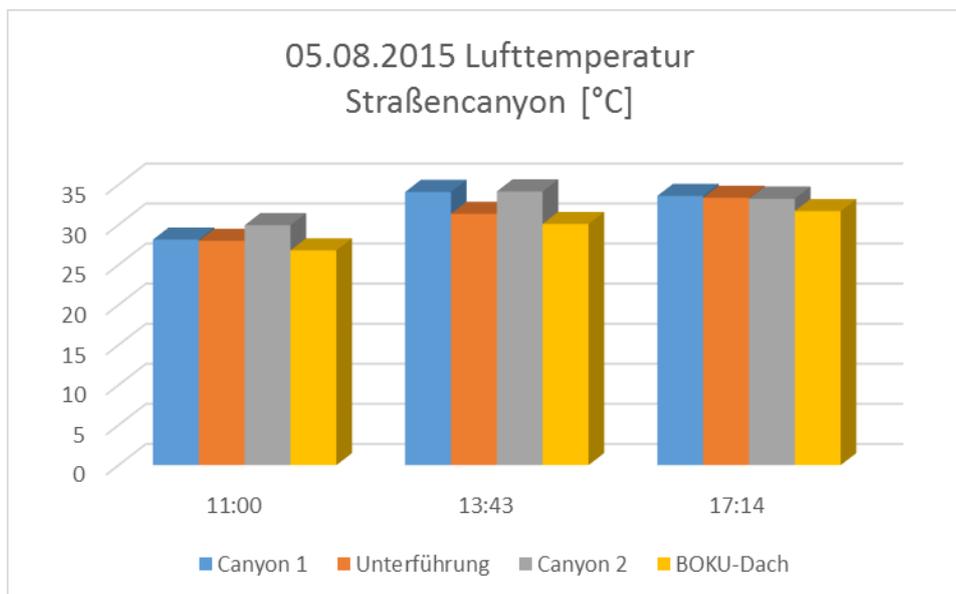


Abbildung 4.57: Gemessene Lufttemperatur im Straßencanyon und am BOKU-Dach

## Relative Luftfeuchtigkeit

Die relative Luftfeuchtigkeit wurde zwischen den Standorten ebenfalls verglichen. Die Darstellung in % erfolgt in Abbildung 4.66.

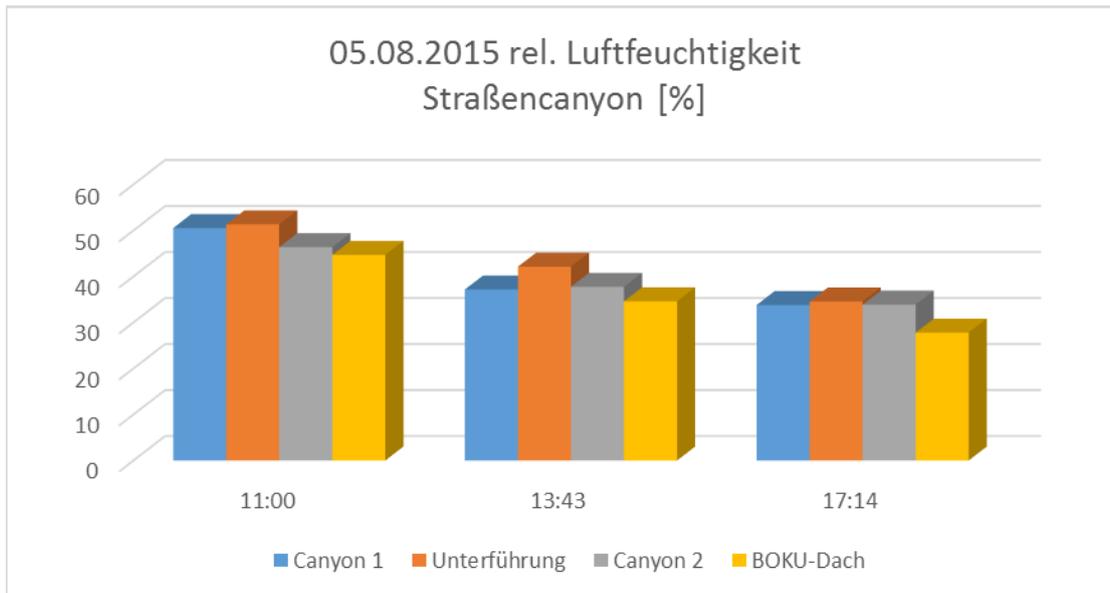


Abbildung 4.58: Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit im Straßencanyon und am BOKU-Dach

Die relative Luftfeuchtigkeit ist in der Straßenschlucht höher als am Dach. Gemeinsam mit der höheren Lufttemperatur führt das zu einem unangenehmen Empfinden von Schwüle. Besonders bei niedrigen Windgeschwindigkeiten kommt dies zum Tragen.

### Hitzestress und UTCI

Zum Schluss werden der Hitzestress-Index und der UTCI in der Straßenschlucht miteinander verglichen. In Abbildung x sind 3 verschiedene Indizes zu sehen: der Hitzestress-Index, UTCI 1 und UTCI neu. UTCI 1 gibt die UTCI-Temperatur am BOKU-Dach wieder, da für die Berechnung die Werte der BOKU-Met Station verwendet wurden. UTCI neu ist standortspezifisch, da für die Berechnung des Indexes die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit von der jeweiligen Messstation verwendet wurden. Die Globalstrahlung wurde für jeden Standort einzeln abgeschätzt. Dies wird im Kapitel 4.9 UTCI auf Seite 102 genau erklärt.

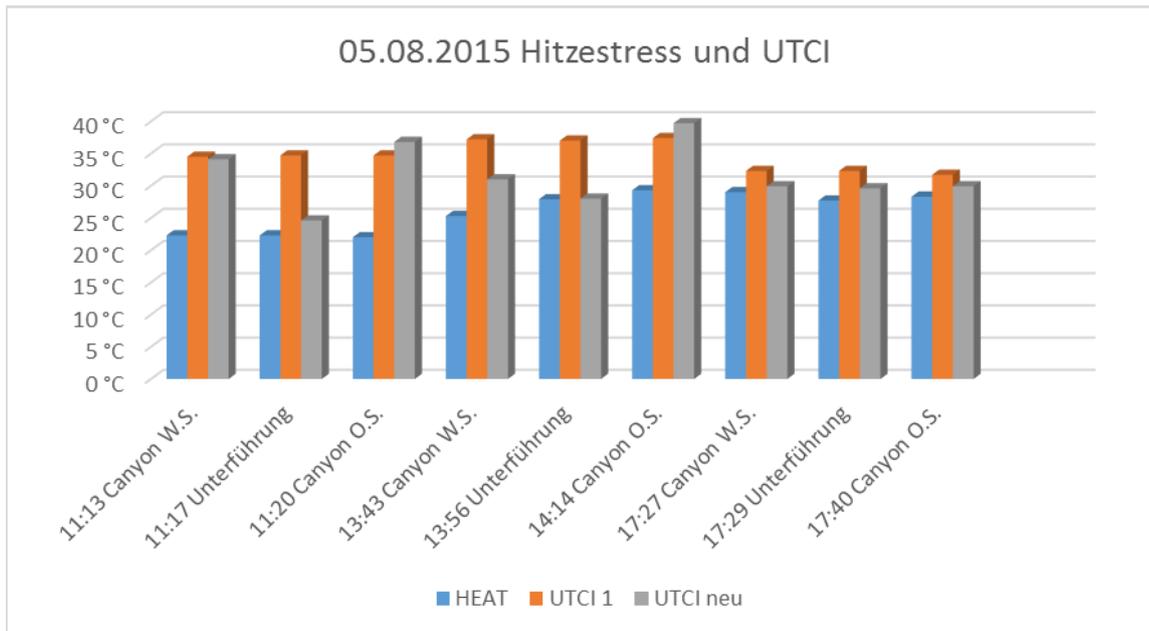


Abbildung 4.59: Vergleich von HEAT-Index und UTCI

Die UTCI 1-Temperatur am BOKU-Dach ist meist höher als in der Straßenschlucht. Nur bei der Messstation Canyon 2 wurden um 11:20 Uhr MESZ und 14:14 Uhr MESZ höhere Werte erreicht. Dieses Ergebnis sagt viel über die Aufheizeffekte am Standort aus. Die Werte am BOKU-Dach wurden mit der gesamten Globalstrahlung berechnet, die dort gemessen wurde. Die Himmelsicht wird in dieser Messhöhe nicht versperrt. Am Grund, d.h. bei den Messstandorten in der Straßenschlucht, gelangt nicht die gesamte Globalstrahlung hin. Der Sky-View Faktor beträgt 0,35, was bedeutet, dass nur 35% des Himmels sichtbar sind. Die energiegelvolle direkte Sonneneinstrahlung erreicht nur bedingt den Boden. Sie wird an den Gebäudeflächen teils absorbiert und reflektiert. Die hohe UTCI-Temperatur wird nicht durch die direkte Sonneneinstrahlung verursacht sondern durch die langwellige Wärmeausstrahlung der Fassaden und der versiegelten Bodenflächen. Der östliche Bereich des Canyons erwärmt sich mehr, da dort vom frühen Morgen bis zum Nachmittag die Sonne die Oberflächen bestrahlt. Im Westen befindet sich die Messstation länger im Schatten.

Der HEAT-Index ist am Vormittag und zur Mittagszeit geringer als die UTCI-Temperaturen. Am Nachmittag gleichen sich die UTCI-Temperaturen dem Hitzestress-Index an.

## 4.8 Hitzestress

Die Hitzestress-Messungen wurden immer parallel zu den mobilen Messungen gemacht. In Tabelle 3.3 im Kapitel Methodik sieht man die Tage und Uhrzeiten, an denen die Messungen stattgefunden haben.

Als Beispiel für den Hitzestress an einem Tag wurde der 05. August 2015 genommen, da an dem Tag die Globalstrahlung nicht durch Bewölkung gestört wurde. Der UTCI wurde auch für denselben Tag berechnet, da die zwei Größen vergleichbar sein sollten.

Tabelle 4.21: Hitzestress-Index am 05.08.2015

5. August 2015	
Standort	HEAT-Index [°C]
10:09 Haupteingang	22,0 °C
10:34 Parkplatz	24,8 °C
10:54 Schatten C.	23,8 °C
11:13 Canyon W.S.	22,3 °C
11:17 Unterführung	22,3 °C
11:20 Canyon O.S.	22,0 °C
11:20 Stiege	24,4 °C
11:41 Baumsch. G.M.	22,6 °C
13:10 Haupteingang	28,8 °C
13:14 Parkplatz	28,2 °C
13:30 Schatten C.	25,7 °C
13:43 Canyon W.S.	25,3 °C
13:56 Unterführung	27,9 °C
14:14 Canyon O.S.	29,3 °C
14:14 Stiege	29,3 °C
14:28 Baumsch. G.M.	25,2 °C
16:48 Haupteingang	28,7 °C
17:01 Parkplatz	24,5 °C
17:10 Schatten C.	23,8 °C
17:27 Canyon W.S.	29,0 °C
17:29 Unterführung	27,7 °C
17:40 Canyon O.S.	28,3 °C
17:40 Stiege	28,3 °C
18:00 Baumsch. G.M.	23,7 °C

Für die Auswertung des HEAT-Index wurde Tabelle 4.22 herangezogen, die in der Gebrauchsanweisung des WBGT-Messgerätes zu finden ist.

Tabelle 4.22: Hitzestress-Auswertungshilfe aus dem Geräte-Handbuch

WBGT	Zeichen	Intensität der Aktivität
< 26,7 °C / < 80 °F	Weiß	Normale Aktivität
26,7 °C ... 29,4 °C	Grün	Bei der Planung von intensiven Aktivitäten sollte mit Bedacht vorgegangen werden.
29,5 °C ... 31 °C	Gelb	Intensive Aktivitäten sollten von ungeübten Personen nur eingeschränkt ausgeführt werden.
31,1 °C ... 32,2 °C	Rot	Intensive Aktivitäten sollten nur von trainierten Personen ausgeführt werden.
≥ 32,2 °C / ≥ 90 °F	Black	Alle Aktivitäten im Freien abbrechen

Der Tag startet mit Hitzestress-Temperaturen am Vormittag im Bereich von 22,0°-24,8°C. Bei diesen Temperaturen sind normale Aktivitäten im Freien ohne Einschränkung erlaubt. Die niedrigste Index-Temperatur wurde beim Haupteingang und beim Canyon 1 (westseitig) erreicht.

Zur Mittagszeit ändert sich die Situation und die Temperaturen steigen schnell an. Die höchsten Messwerte wurden um 14:14 MESZ bei den Messstandorten Canyon 2 (ostseitig) und bei der Stiege im Schatten erreicht. Der Hitzeindex hatte zu dem Zeitpunkt 29,3°C betragen. Dieser Wert befindet sich laut Tabelle im gelben Bereich und bedeutet, dass intensive Aktivitäten von ungeübten Personen nur eingeschränkt ausgeführt werden sollten. Das Interessante dabei ist, dass die Temperatur gleich hoch ist, obwohl der eine Standort von der Sonne bestrahlt wird und der andere den ganzen Tag im Schatten steht. Dies kann bedeuten, dass die Hitze in dem Bereich durch die versiegelte Fläche gehalten wird und dass die Gebäude sehr viel langwellige Wärmestrahlung abstrahlen. Der Bereich der Stiege ist abgeschottet und warme Luft kann sich dort lange halten. Hinzu kommt, dass der Wind an dem Tag relativ schwach ausgeprägt war. Ab 10 Uhr MESZ ist der Wind konstant schwächer geworden. Zuerst ist er zwischen 5-10 km/h gependelt und am Abend nur noch zwischen 0-7 km/h. Bei den restlichen Standorten, die sich im Schatten zu der Uhrzeit befanden, wurden deutlich niedrigere Werte erfasst. Die Messstelle beim Baumschatten GM hatte den niedrigsten Wert um diese Uhrzeit aufgezeichnet: 25,2°C.

Die Mini-Wetterstation beim Haupteingang hat den steilsten Hitzestress-Anstieg gehabt, da dort am Vormittag nur 22,0°C aufgezeichnet wurden und um 13:10 MESZ 28,8°C. Der Grund für den

niedrigen Wert am Vormittag war die Bewässerung der Rasenfläche rund um die Messstelle von ca. 8-11:30 Uhr MESZ.

Am späten Nachmittag wurden von den Mini-Wetterstationen Werte im Bereich 23,7°-29,0°C gemessen. Insgesamt kann gesagt werden, dass der Standort Canyon 2 (ostseitig) dem größten Hitzestress während des Tages ausgesetzt war.

Außerdem entscheidet der Standort der Messstelle über den Tagesverlauf des Hitzestresses. Während bei den meisten Standorten der Hitzestress den Höhepunkt zur Mittagszeit hat, ist es bei dem Standort Canyon 1 (westseitig) anders. Dort steigt der Hitzestress konstant an und erreicht um 17:27 Uhr MESZ die höchste Temperatur. Dies wird durch die Sonnenbahn und die direkte Sonneneinstrahlung begründet.

An den mobilen Messtagen während den Hitzeperioden im Sommer 2015 war der Hitzestress bei den einzelnen Standorten nie im roten bzw. schwarzen Bereich. Ein Hitzestress von mehr als 31,1°C wurde nicht erreicht.

#### **4.9 UTCI**

Als Vergleichswert zum Hitzestress-Index wurde auch der UTCI (Universal Thermal Climate Index) berechnet. Wie schon erwähnt, war der 05. August 2015 ein idealer Tag zum Bestimmen des Index-Wertes, da die Globalstrahlung nicht abgeschwächt wurde, da keine Bewölkung vorhanden war.

Für die Berechnung des UTCI sind unterschiedliche Parameter notwendig. Es wird die Lufttemperatur (°C), die mittlere Strahlungstemperatur (°C), die Windgeschwindigkeit in 10m Höhe (m/s) und der Wasserdampfdruck (hPa) oder alternativ die relative Luftfeuchtigkeit (%) für die Berechnung benötigt. Ein Programm, von Peter Broede 2009 entwickelt, berechnet nach Eingabe der Parameter-Werte automatisch den UTCI. Die mittlere Strahlungstemperatur wurde nicht gemessen, sondern mithilfe eines anderen Programmes berechnet werden. Dazu musste nur die Globalstrahlung (W/m<sup>2</sup>) in das Programm eingegeben werden, welches in einem MS-DOS Fenster ausgeführt wird und die mittlere Strahlungstemperatur wurde daraufhin angezeigt.

Es wurden 3 verschiedene UTCI's berechnet. UTCI-Dach wurde nur mit den Werten der BOKU-Met Messstation berechnet. Alle Parameter beziehen sich auf diesen Standort. UTCI-korr. wurde mit der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit an den jeweiligen Messstandorten ermittelt und die Messwerte der Windgeschwindigkeit und der Globalstrahlung wurden vom BOKU-Dach genommen. Dieser Ansatz ist nur zum Teil richtig, da die Globalstrahlung an den Messstandorten

durch die Sonnenbahn und die Schattenänderung bedingt, untertags nicht dem Wert am BOKU-Dach entspricht. Die Globalstrahlung sollte also für jeden Standort einzeln abgeschätzt werden. Die Windgeschwindigkeitswerte konnten für jeden Messstandort übernommen werden, da der Wert von 10 m Höhe gesucht wird. Die Werte des UTCI-neu repräsentieren die wahren Gegebenheiten am Messstandort. Die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit wurden von den Mini-Wetterstationen gemessen und die Globalstrahlung musste mit Formeln geschätzt werden. Die Schätzung beruht auf dem Prinzip der Aufteilung der Globalstrahlung in einen direkten und einen diffusen Strahlungsanteil. Mithilfe des Spektralmodells SPCTRL2, welches von Bird und Riordan 1984 entwickelt wurde, konnte der Anteil an Diffus- und Direktstrahlung bestimmt werden. Der Sky-View Faktor war für die Berechnung ebenfalls von Bedeutung, zumal er die Strahlungseigenschaften am Standort mitbestimmt. Das Programm HemiView wurde für die Bearbeitung der Fischaugenaufnahmen verwendet und hat nicht nur die Sonnenbahn, sondern auch bestimmte Strahlungsfaktoren berechnet. Von Bedeutung für die Schätzung der Globalstrahlung war der „Visible-Sky“-Faktor. Dieser ist im Grunde genommen der Sky-View Faktor, der den sichtbaren Anteil des Himmels wiedergibt, wenn man vom Boden nach oben sieht. Der Visible-Sky Faktor ist in Städten mit hohen Gebäuden und engen Gassen sehr gering. In Gebieten mit Bäumen und Vegetation ist dieser Faktor auch sehr gering, da es keinen Unterschied macht, womit die Himmelsicht versperrt ist. Für die Schätzung der Globalstrahlung wird zunächst der diffuse und direkte Anteil der Sonnenstrahlung berechnet. Der diffuse Anteil wird mit dem Visible-Sky Faktor multipliziert, da die diffuse Strahlung an den Hindernissen gestreut wird. Oberhalb des Hindernisses ist die Diffusstrahlung größer als unterhalb. Nun müssen 2 Fälle unterschieden werden. Befindet sich die Messstation zu dem Zeitpunkt der Messung im Schatten, so muss die Direktstrahlung mit 0 multipliziert werden. Im Schatten fällt natürlich die direkte Strahlung ganz weg. Befindet sich die Messstation in der Sonne, so bleibt der direkte Anteil erhalten und wird mit 1 multipliziert. Das Hitzeempfinden ist in der prallen Sonne stärker als im Schatten, da der direkte Strahlungsanteil vorhanden ist. Für die Standorte im Schatten bleibt somit nur der abgeschwächte, diffuse Strahlungsanteil übrig, der für die Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur verwendet wird. Im Fall des Standortes in der Sonne, wird der direkte Anteil mit dem abgeschwächten diffusen Anteil addiert. Das Ergebnis ist die standortspezifische, abgeschwächte Globalstrahlung, die für die Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur verwendet wird. Mit dem Programm von Broede konnte dann der UTCI-neu berechnet werden.

Tabelle 4.23 zeigt den Vergleich zwischen den unterschiedlich berechneten UTCI-Indizes und dem HEAT-Index am 05. August 2015. Wichtig ist der Vergleich zwischen dem Hitzestress-Index und dem UTCI-neu. Beide repräsentieren die Standorteigenschaften bei den Messstationen.

Tabelle 4.23: Vergleich von HEAT-Index mit UTCI-Index

5. August 2015				
	HEAT Index [°C]	UTCI Dach [°C]	UTCI korr [°C]	UTCI neu [°C]
10:09 Haupteingang	22,0	33,1	32,5	31,5
10:34 Parkplatz	24,8	33,3	36,9	35,9
10:54 Schatten C.	23,8	34,5	37,3	35,6
11:13 Canyon W.S.	22,3	34,5	35,6	34,1
11:17 Unterführung	22,3	34,7	35,8	24,6
11:20 Canyon O.S.	22,0	34,7	36,8	36,8
11:20 Stiege	24,4	34,7	36,6	25,6
11:41 Baumsch. G.M.	22,6	36,7	37,1	25,7
13:10 Haupteingang	28,8	37,0	40,8	31,1
13:14 Parkplatz	28,2	37,0	39,9	38,6
13:30 Schatten C.	25,7	37,5	38,8	37,1
13:43 Canyon W.S.	25,3	37,2	40,8	31,0
13:56 Unterführung	27,9	37,0	38,2	28,0
14:14 Canyon O.S.	29,3	37,4	41,0	39,7
14:14 Stiege	29,3	37,4	41,0	29,4
14:28 Baumsch. G.M.	25,2	37,2	37,7	28,1
16:48 Haupteingang	28,7	34,1	34,7	33,7
17:01 Parkplatz	24,5	32,3	33,7	29,3
17:10 Schatten C.	23,8	32,6	32,4	27,6
17:27 Canyon W.S.	29,0	32,3	33,7	29,9
17:29 Unterführung	27,7	32,3	33,6	29,6
17:40 Canyon O.S.	28,3	31,7	33,2	29,9
17:40 Stiege	28,3	31,7	32,3	28,7
18:00 Baumsch. G.M.	23,7	29,4	29,4	26,9

Deutlich sichtbar ist der Unterschied zwischen dem HEAT-Index und den UTCI-Werten, die deutlich höher sind. In Abbildung 4.60 wurden die Werte des Hitzestress und des UTCI-neu-Indizes für den 05.08.2015 aufgezählt. Beide Indizes sind standortspezifisch und repräsentieren die Verhältnisse am Messstandort.

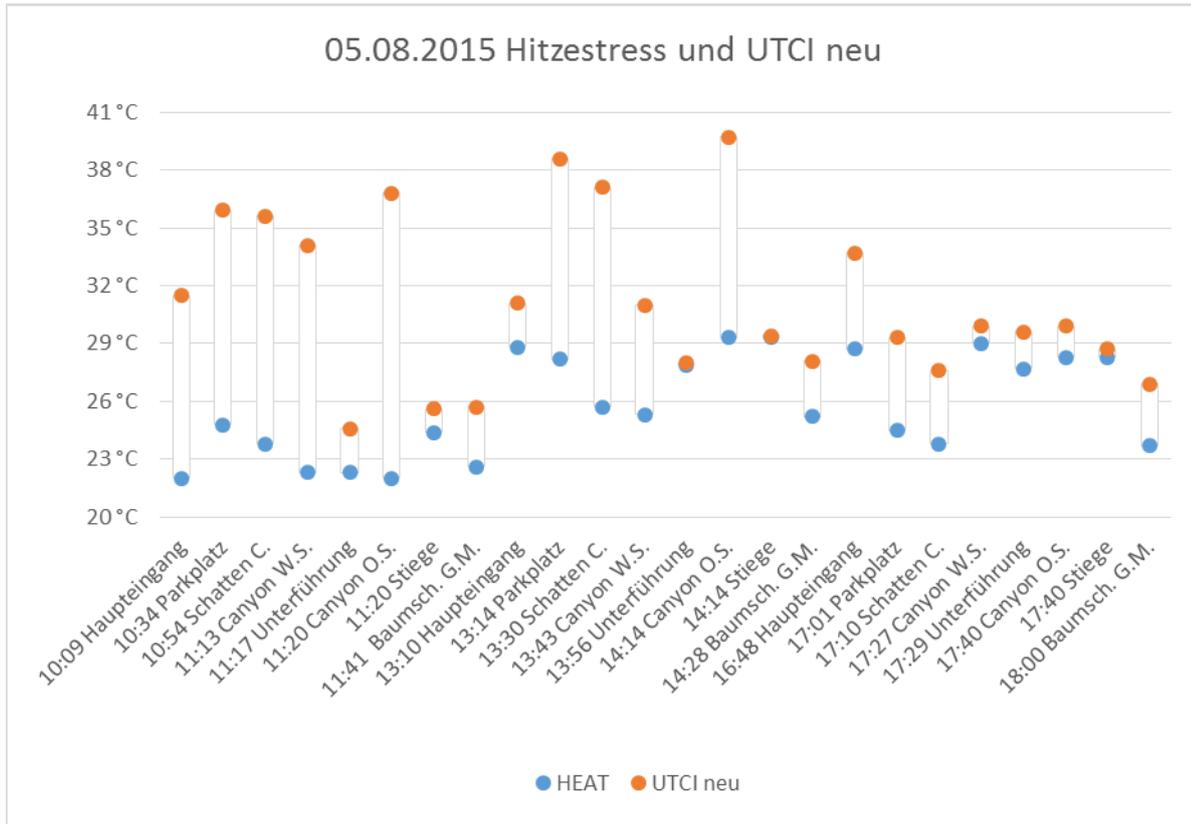


Abbildung 4.60: Unterschied zwischen HEAT-Index und UTCI neu

Die UTCI-Temperatur ist von der Intensität stärker einzuschätzen als die Hitzestresstemperatur. Die Tabellenauswertungen zeigen, dass der UTCI einen stärkeren Hitzestress wahrnimmt als die Messung der WBGT. Besonders am Vormittag und zur Mittagszeit in der direkten Sonne kann die Hitzestresswahrnehmung sehr stark variieren. Die Messstelle Canyon 2 (ostseitig) hat um 14:14 Uhr MESZ einen HEAT-Index von 29,3°C und eine UTCI Temperatur von 39,7°C. Diese UTCI Temperatur bedeutet sehr starken Hitzestress laut Tabelle 4.24, während der HEAT-Index noch im grünen Bereich ist (siehe Tabelle 4.22) und besagt, dass bei Planungen von intensiven Aktivitäten im Freien mit Bedacht vorzugehen ist.

Was bedeutet dieser Unterschied konkret? Im Kapitel Methodik wurde schon erwähnt, dass für die Messung mit dem Hitzestressmessgerät zwei Parameter wichtig sind: die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit. Wichtige Parameter wie die Sonneneinstrahlung und die Windgeschwindigkeit sind im Index nicht enthalten. Die direkte Sonneneinstrahlung und der Wind tragen aber maßgeblich zum Hitzeempfinden bei. Somit erfasst der UTCI die Empfindungen präziser. Bei Messstellen im Schatten ist der Unterschied zwischen den Indizes nicht mehr so groß, da die direkte Sonneneinstrahlung wegfällt. Der größte Unterschied beträgt 5,7°C beim Standort Canyon 1 (westseitig) um 13:43 Uhr MESZ. Am späten Nachmittag werden die Differenzen geringer. Wenn

die Messstellen der prallen Sonne ausgesetzt sind, haben sie einen UTCI von über 32°C. Die einzige Ausnahme ist der Vormittagswert beim Haupteingang aufgrund der Bewässerung und bildet somit einen Ausreißerwert. Dies bedeutet, dass Personen einem starken Hitzestress ausgesetzt sind, wenn sie sich am BOKU-Campus in der Sonne aufhalten.

Tabelle 4.24: UTCI Temperatur Interpretation

above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

## Verteilung von HEAT in Bezug zu UTCI neu

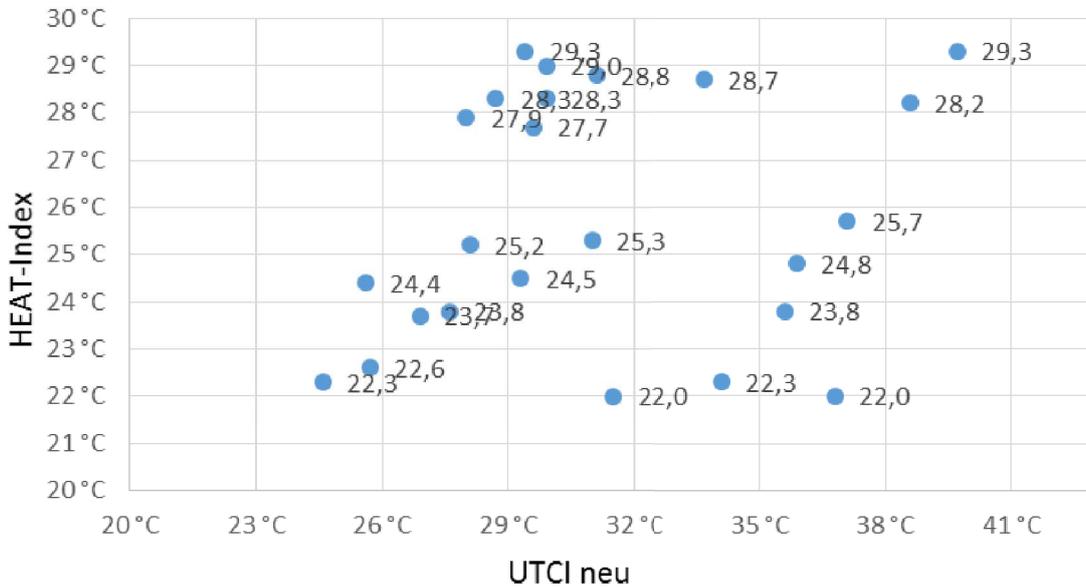


Abbildung 4.61: Verteilung HEAT-Index in Bezug zu UTCI neu

Wenn man die UTCI-Temperaturen untereinander vergleicht, so sieht man, dass UTCI-korr., also die UTCI-Temperatur ohne korrigierter Globalstrahlung immer am höchsten ist. Die Ausnahme bildet wieder der erste Messwert beim Haupteingang wegen der abkühlenden Bewässerung.

In Abbildung 4.62 ist der Vergleich zwischen UTCI-1, also der UTCI am Messstandort BOKU-Dach, und UTCI-neu dargestellt. Die Abbildung zeigt, die unterschiedlichen UTCI-Temperaturen der Standorte im Vergleich zum BOKU-Dach.

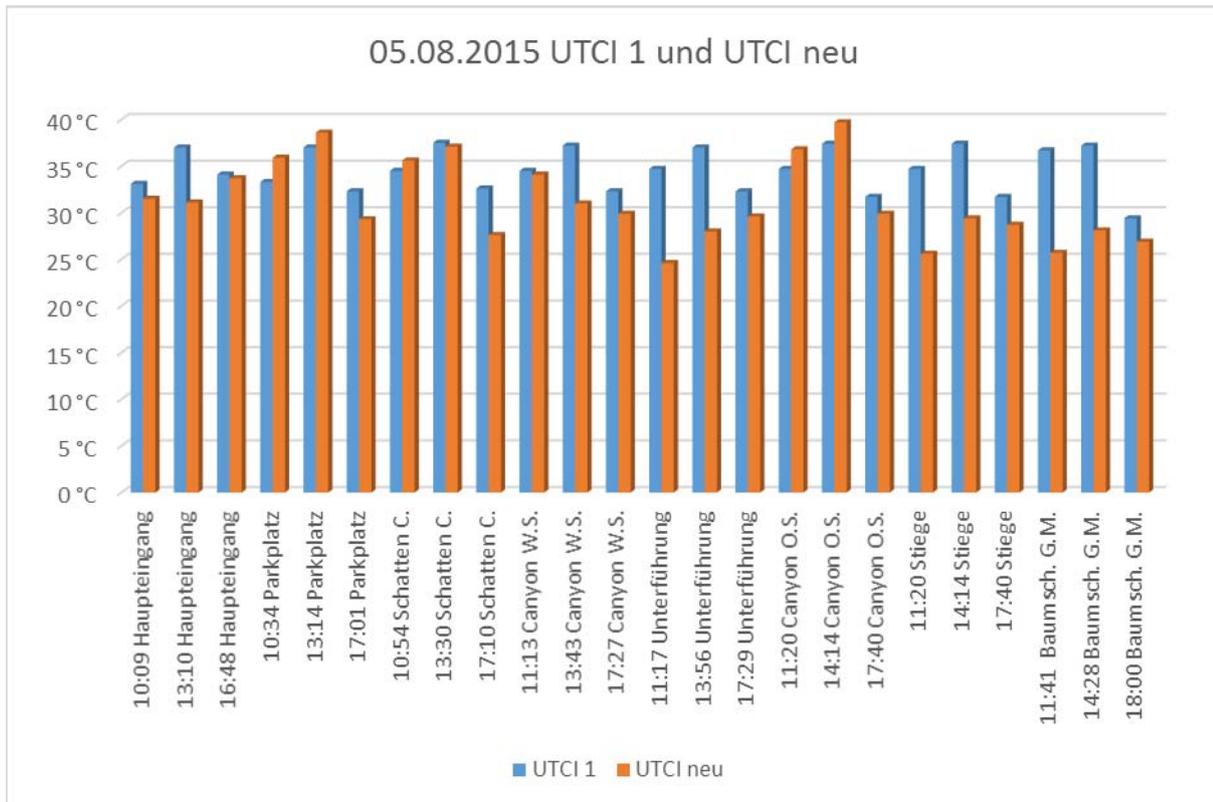


Abbildung 4.62: Vergleich von UTCI-1 mit UTCI-neu

Die Grafik macht deutlich, dass die Standorte, die im Schatten liegen, eine niedrigere UTCI-Temperatur aufweisen als das BOKU-Dach. Der Hitzestress ist an diesen Plätzen moderat und ermöglicht einen längeren Aufenthalt an diesen Standorten während starker Hitzeperioden.

An Standorten mit direkter Sonneneinstrahlung steigen die Werte des UTCI-neu über die des BOKU-Daches, obwohl der diffuse Anteil mittels des Visible-Sky Faktors korrigiert wurde. Am Standort Canyon 2 (ostseitig) ist dies der Fall. Dieser Ort heizt sich durch die versiegelten Flächen und hohen Gebäude extrem auf, da die Sonne von der Früh bis zum Nachmittag den Standort bestrahlt.

#### **4.10 Sensorenvergleich (29.01.2016 – 12.02.2016)**

Ende Jänner/Anfang Februar 2016 wurde ein zweiwöchiger Testlauf mit den 8 Mini-Wetterstationen durchgeführt. Grund für den Testlauf waren die weit auseinander liegenden Messwerte der Wetterstationen, der im Sommer gemessenen Parameter. Ziel war es zu überprüfen, ob bei gleichen Bedingungen die gemessenen Werte untereinander schwanken. Die Messstationen wurden vom 29.01. - 11.02.2016 in einem Raum in der Universität für Bodenkultur aufbewahrt. Äußere Einflüsse wie Sonneneinstrahlung, Wind und Nässe sollten eliminiert werden. Die Messstationen wurden in dem Raum so platziert, dass sie sich nicht in unmittelbarer Nähe von Wärmequellen (Computer, Heizung, Menschen) befanden und dass sie nicht in der Nähe von Fenstern waren. Es sei erwähnt, dass sich untertags Personen in dem Raum aufgehalten haben, da es ein Arbeitszimmer ist. Der aufgezeichnete Temperaturverlauf schwankt im Tagesgang, wie es auch in Abbildung 4.70 ersichtlich ist. Erklärung hierzu folgt ein wenig später.

Am 11.02.2016 wurden die Messsensoren auf das Dach des Unigebäudes gebracht, wo sie in einem kleinen Raum eingesperrt waren. Dort war es kühler als im Haus, sodass die aufgezeichnete Temperatur gefallen ist. Am 12.02. um 11 Uhr MEZ wurden die Mini-Wetterstationen ins Freie gebracht, wo sie in einer offenen Kiste auf einer Plattform für eine Stunde aufbewahrt wurden. Die Kiste hatte seitlich Durchlüftungslöcher, sodass eine gleichmäßige Durchlüftung erreicht werden konnte. Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Wetterstationen aufrecht und im Schatten stehen. Auf der Plattform befand sich ebenfalls auch die BOKU-Met Wetterstation. Die gemessenen Werte der BOKU-Wetterstation konnten somit für einen direkten Vergleich dienen und zeigen, in welchem Ausmaß die Werte der Mini-Wetterstationen davon abwichen. Um 12 Uhr MEZ wurden die Mini-Wetterstationen wieder in das Gebäude gebracht und anschließend um 12:06 MEZ ausgelesen.

#### **Sensorenvergleich Auswertung**

Abbildung 4.70 zeigt den gesamten Verlauf der Testmessung vom 29.01.2016 (11:16 MEZ) bis zum 12.02.2016 (12:06 MEZ). In dieser Übersichts-Darstellung sehen die Temperaturverläufe beinahe deckend aus. Ein gleichmäßiges Auf und Ab ist zu erkennen. Untertags hat sich das Arbeitszimmer durch die in diesem Raum befindlichen Personen, die Beheizung und die in Betrieb genommenen Computer aufgewärmt. Ein kleiner Beitrag zur Erwärmung wurde durch die Sonneneinstrahlung, die durch die Fenster in das Zimmer traf, geleistet. In der Nacht kühlte der Raum wieder ab.

Am Sonntag den 31.01.2016 hat sich keine Person in dem Arbeitszimmer aufgehalten und somit hat es sich untertags nur minimal erwärmt. Dies lässt sich in Abbildung 4.71 gut erkennen. Es gibt zur Mittagszeit einen kleinen Peak, welcher mit der Globalstrahlung zu tun hat. Das Zimmer und die Fenster sind nämlich in Richtung Süd-Ost ausgerichtet und werden vom Vormittag bis zum frühen Nachmittag besonnt. Die Intensität der Sonneneinstrahlung, und somit der Erwärmung des Zimmers, ist natürlich abhängig von Bewölkungsgrad. Die Temperatur im Raum hatte sich im Gegensatz zur Nacht um 0,5 °C – 0,8 °C erhöht.

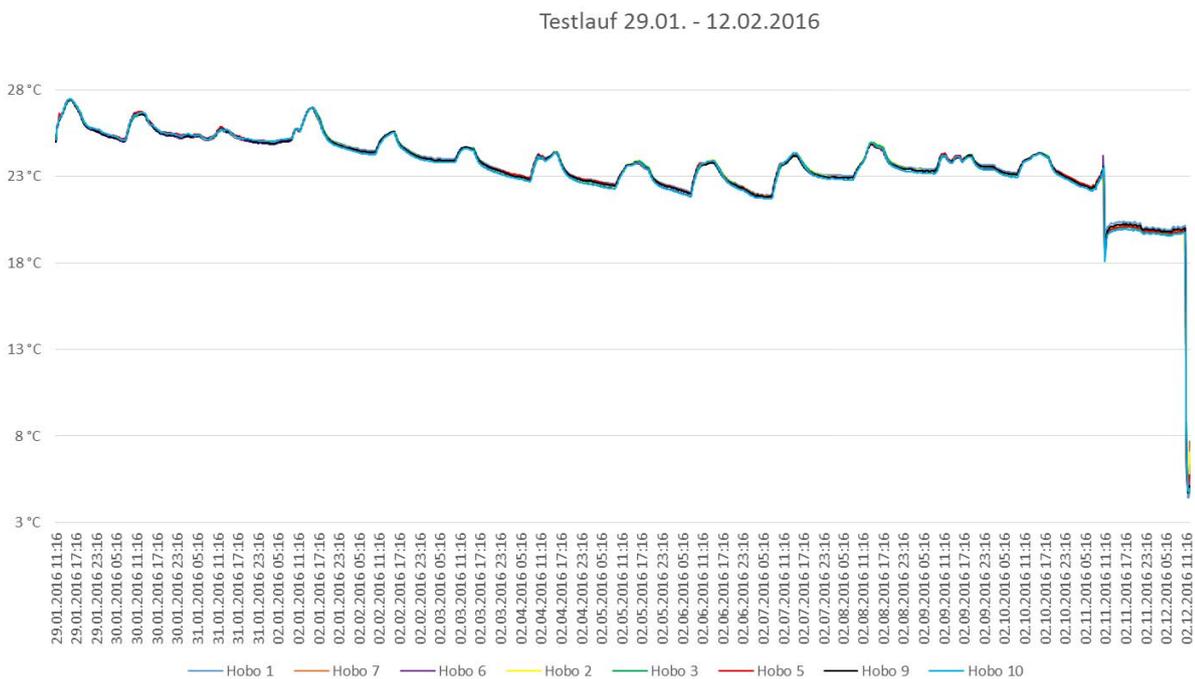


Abbildung 4.63: Temperaturverlauf aller Wetterstationen 29.01.-12.02.2016

Das Wochenende darauf (06./07.02.) weist denselben Temperaturverlauf wie unter der Woche auf (siehe Abbildung 4.70). Der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht beträgt fast 2°C. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass jemand am Wochenende in diesem Zimmer gearbeitet hat oder das Schönwetter war und die Sonneneinstrahlung in das Zimmer hoch war.

Am 11.02. (siehe Abbildung 4.70) gab es eine Störung und die Temperaturkurven fallen steil ab. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Mini-Wetterstationen aus dem Arbeitszimmer nach draußen ins Freie gebracht und in einen Raum auf dem Dach der BOKU eingesperrt. Nach kurzer Zeit stiegen die Temperaturen wieder an und erreichten ungefähr 20 °C. Am darauffolgenden Tag um 11 Uhr MEZ wurden die Messsensoren ins Freie auf die Plattform gebracht, wo sie testweise für eine Stunde geblieben sind. Dies ist wieder durch den steilen Abfall in den Temperaturkurven

ersichtlich. In dieser Abbildung lassen sich keine genaueren Details erkennen, weswegen auf Seite 111 eine detailliertere Darstellung zu finden ist.

Einen Ausschnitt aus dem Testlauf sieht man in Abbildung 4.71. Es wird der Temperaturverlauf vom 30.01. – 01.02.2016 abgebildet. In dieser Grafik lassen sich die feinen Unterschiede in den Temperaturkurven erkennen. Ein Messunterschied von höchstens 0,2 °C ist in der Darstellung vom 30./31.01. ersichtlich. Diese Bandbreite, in welcher die Kurven schwanken, ist jedoch vernachlässigbar klein. Die Temperaturdifferenz bezeichnet die Messunsicherheit, die die Messsensoren untereinander haben. Am 01.02. weichen die Temperaturkurven ebenfalls kaum voneinander ab.

Nun stellt sich noch die Frage, wie hoch die Messunsicherheit der Mini-Wetterstationen im Vergleich zu einer geprüften Wetterstation ist. Um dies herauszufinden wurden die Messwerte des Testlaufs im Freien (12.02.2016) mit den Messwerten der BOKU-Met Wetterstation verglichen.

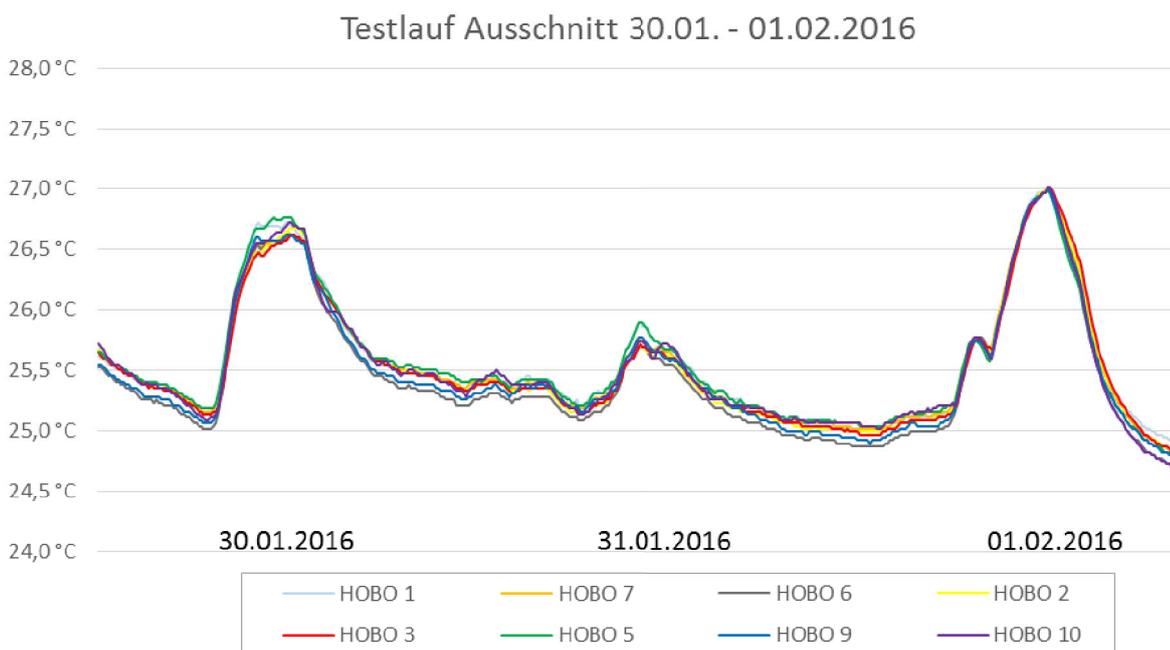


Abbildung 4.64: Ausschnitt aus Testlauf

Wie in Abbildung 4.72 ersichtlich ist, benötigen die Messsensoren eine Weile, um sich an die Außentemperatur anzupassen. Da es im Freien wesentlich kälter als im Raum war, haben die Wetterstationen mehr als eine halbe Stunde gebraucht, um sich zu „akklimatisieren“. Im Aufbewahrungsraum hatte es ungefähr 20 °C und im Freien ungefähr 3,5 °C – 3,9 °C, laut der BOKU-Met Wetterstation. Um 11:56 MEZ wurde der letzte Messwert im Freien registriert. Nach

knapp einer Stunde hatten sich die Mini-Wetterstationen an die Außentemperatur angepasst. Der Temperaturmesswert von der BOKU-Met Station hat 3,5 °C ausgemacht. Die HOBO-Messwerte lagen im Bereich von 4,5 °C – 5,1 °C. Somit betrug der Unterschied zu den Messwerten der BOKU-Met Messeinheit 1,0 °C – 1,6 °C. Diese Messunsicherheit ist vernachlässigbar gering.

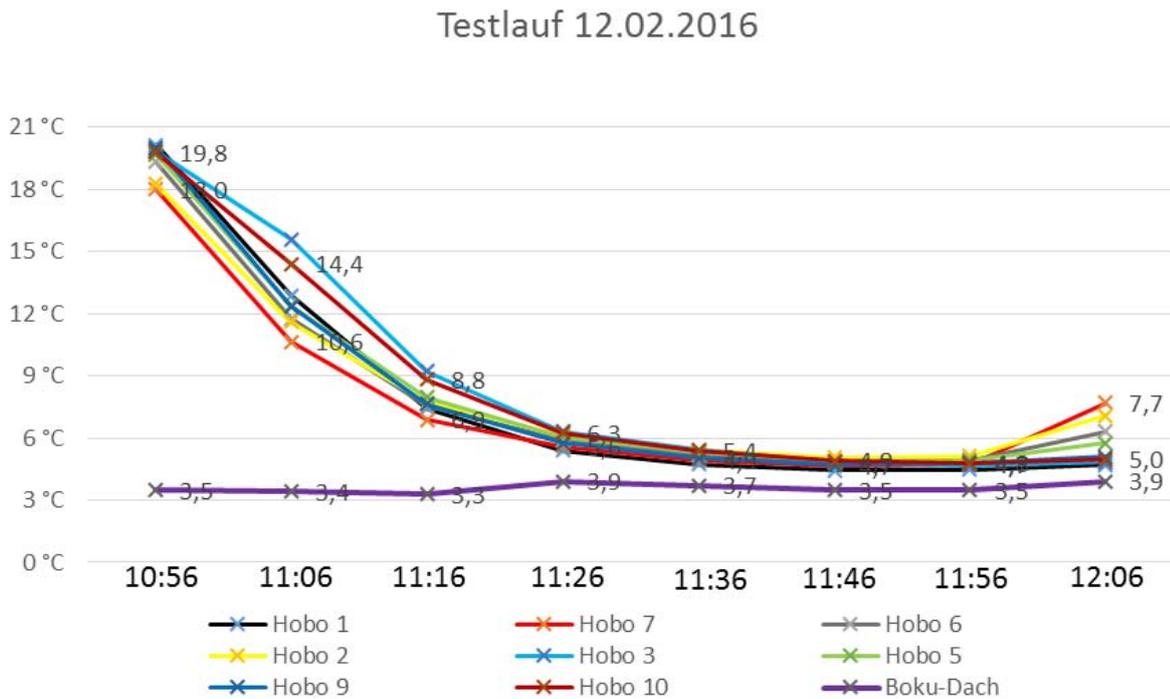


Abbildung 4.65: Detailausschnitt Testlauf 12.02.2016

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die großen Temperaturunterschiede von bis zu 4,5 °C, die an den heißen Tagen im Sommer 2015 registriert wurden, keine Messfehler der Mini-Wetterstationen waren, sondern reale Überwärmungseffekte an den Messstandorten. Diese Überwärmungseffekte hatten je nach Standort unterschiedliche Ursachen. Auf diese Effekte wurde in Kapitel 2.7 Wärmeinseleffekt eingegangen.

## 5. Diskussion und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der lokalen Untersuchungen haben die unterschiedlichen Wechselwirkungen der meteorologischen Parameter untereinander deutlich gemacht. Es war interessant festzustellen, wie sehr sich die Temperaturen auf dem Gelände der BOKU innerhalb von wenigen Metern unterscheiden können.

Die Lufttemperatur bei den Messstandorten wird durch die Windstärke und Windrichtung, die Globalstrahlung bzw. die Beschattung und durch die Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Welchen Einfluss die Windrichtung hat, hängt sehr stark von der Umgebung beim Standort ab, da zum Beispiel bei den Standorten Canyon 1 und 2 der Wind aus Nord bzw. Süd nichts ausgemacht hat, da er durch das Unigebäude abgeschirmt wurde. Wäre der Wind aus Ost bzw. West gekommen, wäre eine Abkühlung und Windverstärkung möglich gewesen. Bei den Standorten Schatten Container und Baumschatten GM ändert die Windrichtung nichts an der Lufttemperatur, da die Orte gut abgeschirmt sind und ohnehin wenig Luftzirkulation vorhanden ist. Der Standort beim Parkplatz bietet wiederum eine gute Angriffsfläche für Winde aus allen Himmelsrichtungen.

Die Messstandorte Canyon 1 und Canyon 2 haben die Verhältnisse in einem Straßencanyon repräsentiert. Tatsächlich sind dann die erwarteten Effekte auch aufgetreten. Hitze und Luftfeuchtigkeit stauten sich in dem Bereich vom Canyon, besonders wenn der Wind aus Nord bzw. Süd gekommen ist. Durch die Abstrahlung von langwelliger Wärmestrahlung von den Gebäudefassaden und vom versiegelten Boden (Fahrbahn und Parkplatz) war auch die Hitzebelastung dort höher.

Die Beschattung hat sich ebenfalls als großer Einflussfaktor auf die Lufttemperatur und den Hitzestress erwiesen. Sobald eine Messstation im Schatten war, wurde der Hitzestress und UTCI geringer. Dies ist dadurch begründet, dass keine direkte Strahlung mehr auf die Station fiel und somit die Globalstrahlung abgeschwächt war. Nur der diffuse Strahlungsanteil war dann noch vorhanden. Einen großen Unterschied hat es auch gemacht, wodurch der Schatten geworfen wird. Der tiefe Baumschatten war stets kühler als der Schattenbereich bei dem Stiegenaufgang. Die Vegetation trägt maßgeblich dazu bei, dass hohe Temperaturen als angenehm empfunden werden.

Bei zwei Messstandorten haben die Mini-Wetterstationen Ausreißer bei den Werten der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte verzeichnet. Die betroffenen Wetterstationen waren bei den Standorten beim Haupteingang und im tiefen Baumschatten beim Gregor Mendel-Haus. An einigen Tagen wurden dort am Morgen deutlich niedrigere Temperaturen und erhöhte Luftfeuchtigkeit als bei den anderen Messstandorten festgestellt. Die Ursache für dieses

Phänomen wurde einige Tage nach Beginn der Messungen entdeckt. Es wurden Sprengleranlagen direkt neben den Bäumen mit den Mini-Wetterstationen gesetzt, um die Grasfläche bzw. den Waldboden zu bewässern. Öfters wurde beim zuständigen Institut nach den genauen Bewässerungszeiten gefragt, jedoch ohne Erfolg. Dies wäre von Nutzen gewesen, da es dann möglich gewesen wäre festzustellen, mit welcher Verzögerung die Messstation auf die veränderten Gegebenheiten reagiert hätte.

Einen Vergleich der Mini-Wetterstationen hat es erst nach den Messungen im Sommer gegeben. Es sollte geprüft werden, ob die Stationen untereinander einen Messfehler aufweisen, wenn sie unter gleichen Bedingungen messen. Falls dies der Fall gewesen wäre, würden die Messungen vom Sommer nicht stimmen und es gäbe Aufheizeffekte bei den Standorten im Gegensatz zur BOKU-Met Wetterstation. Wichtig war es beim Testlauf alle äußeren Einflüsse wie Sonnenstrahlung, Wind und externe Hitzequellen zu eliminieren. Der Testlauf hatte gezeigt, dass die Messstationen untereinander höchstens 0,2 °C abwichen, wobei der Unterschied zur BOKU-Met Wetterstation 1-1,6 °C ausmachte. Dies bedeutet, dass die Temperaturunterschiede von bis zu 4,5 °C während der Hitzeperioden keine Messfehler der Mini-Wetterstationen waren. Die Ursache waren die realen Überwärmungseffekte an den Messstandorten, verursacht durch die unterschiedliche urbane 3-D Struktur.

Es hat sich gezeigt, dass der UTCI einen höheren Hitzestress wahrgenommen hat, als die WBGT-Messung. Eine Erklärung für diesen Unterschied ist, dass der UTCI ein komplexeres Modell darstellt und viel mehr Parameter in die Berechnung einfließen. An den extrem heißen Tagen während der Hitzeperioden wurden UTCI-Temperaturen erreicht, die sehr starken Hitzestress bedeuten.

Um den Hitzestress am BOKU-Gelände zu senken, könnten die Hausfassaden begrünt oder noch mehr Bäume angepflanzt werden. Dies wäre im Bereich des Haupteinganges möglich, da sich dort Sitzbänke befinden und der direkten Sonneneinstrahlung untertags ausgesetzt sind. Studenten und Professoren könnten sich dann länger draußen aufhalten. Es könnte über Dachbegrünung nachgedacht werden, da sich am Dach des Schwackhöfer-Hauses Sitzmöglichkeiten befinden. So hätte das Dach einen Naherholungseffekt. Bodenversiegelung sollte, so gut es geht, vermieden werden.

## 6. Literaturverzeichnis

- Austriainfo (2016): Klima, Jahreszeiten und typische Temperatur in Österreich, <http://www.austria.info/at/service-fakten/uber-osterreich/klima>, abgerufen am 16.05.2016.
- Balchin, W. G. V., and N. Pye, 1947: A micro-climatological investigation of Bath and the surrounding district. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 73, Seite 297–323.
- Brown, Robert D., Gillespie, Terry J. (1995): *Microclimatic landscape design*. New York: J. Wiley & Sons.
- Chmielewski, Frank-Michael; Heyer, Ernst; Hupfer, Peter u. a. (2005): *Witterung und Klima*. Stuttgart [u.a.]: Teubner, Seite 391.
- Conrad (2016): Infrarot-Thermometer VOLT-CRAFT IR 260-8S Optik 8:1 -30 bis +260 °C Pyrometer online auf conrad.at bestellen | 000100980, <https://www.conrad.at/de/infrarot-thermometer-voltcraft-ir-260-8s-optik-81-30-bis-260-c-pyrometer-100980.html>, abgerufen am 26.03.2016.
- Conrad (2016): VOLT-CRAFT® LX-1108 Lux-Meter, Beleuchtungsmessgerät, Helligkeitsmesser 0 - 400000 lx online auf conrad.at bestellen | 000121885, <https://www.conrad.at/de/voltcraft-lx-1108-lux-meter-beleuchtungsmessgeraet-helligkeitsmesser-0-400000-lx-121885.html>, abgerufen am 28.03.2016.
- Conrad (2016): Windmesser Windmaster 2 Messbereich Wind-Geschwindigkeit=2.5 - 150 km/h, 0.7 - 42 m/s, 1.3 - 81 Knoten, 1.5 - 93 MPH Kaindl - im Conrad Online Shop | 000100464, <https://www.conrad.at/de/windmesser-windmaster-2-messbereich-wind-geschwindigkeit25-150-kmh-07-42-ms-13-81-knoten-15-93-mph-kaindl-100464.html>, abgerufen am 25.03.2016.
- Deutscher Wetterdienst (2016): Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar - T – Thermometerhütte, <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html;jsessionid=12CBF4B96E6B231F89F771EF89A89130.live11044?lv2=102672&lv3=102752>, abgerufen am 16.01.2016.
- Erell, Evyatar; Pearlmutter, David; Williamson, T. J (2011): *Urban microclimate*. London: Earthscan, Seite 17-24.
- Flir Instruments (2016): FLIR Exx-Serie Technische Spezifikationen, <http://www.flir.de/instruments/display/?id=56911>, abgerufen am 28.03.2016.
- Foken, Thomas (2006): *Angewandte Meteorologie*. Berlin: Springer, Seite 7-13.

Forkel, Matthias (2016): Das Klima der Erde | Strahlungs- und Wärmehaushalt, <http://www.klima-der-erde.de/strahlungshalt.html>, abgerufen am 13.05.2016.

Forkel, Matthias (2016): Das Klima der Erde | Regionale Windsysteme, <http://www.klima-der-erde.de/winde.html>, abgerufen am 13.05.2016.

FVLR (2016): FVLR - Tageslicht - Grundlagen - Was ist Licht?, [http://www.fvlr.de/tag\\_wasistlicht.htm](http://www.fvlr.de/tag_wasistlicht.htm), abgerufen am 20.02.2016.

Gash, JHC (1986) A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements. *Boundary-Layer Meteorol* 35: Seite 409-414.

Grigg, D., 1965: The logic of regional systems. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, 55, Seite 465–491.

IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, Seite 151 pp.

Iten, Karl (2016): Klima - Klimadiagramm Österreich – Wien, <http://www.iten-online.ch/klima/europa/oesterreich/wien.htm>, abgerufen am 16.05.2016.

Jaeger, Lutz (2002): Skript zum Vertiefungsblock „Forstmeteorologische Messsysteme“ (Block Nr. 97a) im Rahmen des reformierten Studienganges Forstwissenschaft an der Universität Freiburg von Lutz Jaeger Freiburg, im Juni 2002 Meteorologisches Institut. 1. Aufl. o.V.

Jendritzky, Gerd; Havenith, George; Weihs, Philipp u. a. (2009): Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being, 1. Aufl. Final Report, COST Action 730.

Kerschgens, M. (2016): Stadtklima - Lexikon der Geographie, <http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/stadtklima/7543>, abgerufen am 23.03.2016.

Kuttler, Wilhelm (2004): Stadtklima. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*. 16 (3), Seite 187-199.

Kuttler, Wilhelm (2004): Stadtklima. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*. 16 (4), Seite 263-274.

Landsberg, Helmut Erich (1981): *The urban climate*. New York: Academic Press, Seite 83-100.

Licht.de (2016): Beleuchtungsstärke: licht.de, <http://www.licht.de/de/trends-wissen/beleuchtungsqualitaet/beleuchtungsstaerke/>, abgerufen am 26.03.2016.

- Lowry, and P. P. Lowry II, 2001: The Biological Environment. Vol. 2, Fundamentals of Biometeorology: Interactions of Organisms and the Atmosphere. Peavine, 680 pp.
- Moran DS, Shitzer A, Pandolf KB (1998) A physiological strain index to evaluate heat stress. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 275: R129-134.
- Moran DS, Pandolf KB (1999) Wet bulb globe temperature (WBGT) – to what extent is GT essential. Aviat Space Environ Med 70, Seite 480-484.
- Moran DS, Castellani JW, O'Brien C, Young AJ, Pandolf KB (1999) Evaluating physiological strain during cold exposure using a new cold strain index. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 277: R556-R564.
- Mursch-Radlgruber, Erich Trimmel, Heidelinde (2009): Studie "Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Temperaturszenarien für Wien und ausgewählte Analysen bezüglich Adaptationsstrategien" Bericht 2. Teil „Räumliche Differenzierung der mikroklimatischen Eigenschaften von Wiener Stadtstrukturen und Anpassungsmaßnahmen“. 1. Aufl. Universität für Bodenkultur Wien.
- NASA (2016): Measuring Earth's Albedo: Image of the <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=84499>, abgerufen am 23.05.2016.
- Ohne Autor (2009): „Earth's Global Energy Budget“. In: Bull. Amer. Meteor. Soc. 90 (3), Seite 311-323.
- Oke, T. R., (1982): The energetic basis of the urban heat island. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 108, Seite 1–24.
- Oke, T.R. (1987): Boundary Layer Climates. London: Taylor & Francis Ltd, Seite 3-8.
- Oke, T. R; Rouse, Wayne R; Bailey, William G (1997): The Surface Climates of Canada (Canadian Association of Geographers Series in Canadian Geography). McGill-Queen's University Press.
- Olgay, Victor, Olgay, Aladar (1963): Design with climate. Princeton, N.J.: Princeton University Press, Seite 14-19.
- Paradigma (2016): Globalstrahlung im Solar Lexikon, <http://www.paradigma.de/globalstrahlung>, abgerufen am 16.05.2016.
- Pce Instruments (2016): Hitzestressmessgerät PCE-WB 20SD im Shop kaufen | PCE Instruments, [https://www.pce-instruments.com/deutsch/messtechnik/messgeraete-fuer-alle-parameter/hitzestressmessgeraet-pce-instruments-hitzestressmessgeraet-pce-wb-20sd-det\\_377978.htm?\\_list=kat&\\_listpos=2](https://www.pce-instruments.com/deutsch/messtechnik/messgeraete-fuer-alle-parameter/hitzestressmessgeraet-pce-instruments-hitzestressmessgeraet-pce-wb-20sd-det_377978.htm?_list=kat&_listpos=2), abgerufen am 26.03.2016.

- Prinz, Dominik et. al., (2016): Thermoregulation - DocCheck Flexikon, <http://flexikon.doccheck.com/de/Thermoregulation>, abgerufen am 10.03.2016.
- Rich, P.M. et al., (2016): HemiView User Manual, [http://ftp://ftp.dynamax.com/manuals/HemiView\\_Manual.pdf](http://ftp://ftp.dynamax.com/manuals/HemiView_Manual.pdf), abgerufen am 10.05 2016.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (Hg.) (2007): Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Stewart, I. D.Oke, T. R. (2012): „Local Climate Zones for Urban Temperature Studies“. In: Bull. Amer. Meteor. Soc.. 93 (12), Seite 1879-1900.
- Tiefgraber, Michael (2016): UTCI - Universal Thermal Climate Index (Universeller thermischer Klimaindex) - Wetterdienst.de, [http://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema\\_des\\_Tages/878/utci-universal-thermal-climate-index-universeller-thermischer-klimaindex](http://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Thema_des_Tages/878/utci-universal-thermal-climate-index-universeller-thermischer-klimaindex), abgerufen am 16.05.2016.
- TU Wien (2016): Urban Fabric, <http://urbanfabric.tuwien.ac.at/index.php/de/>, abgerufen am 23.05.2016.
- Universität für Bodenkultur Wien (2016): Institut für Meteorologie (BOKU-Met) - Monatsübersicht Wetterstation, <https://meteo.boku.ac.at/wetter/mon-archiv/2015/201507/201507.html> abgerufen am 13.01.2016.
- Universität für Bodenkultur Wien (2016): Informationen zur Wetterstation: Institut für Meteorologie (BOKU-Met): Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU):BOKU, <http://www.wau.boku.ac.at/met/wetter/informationen-zur-wetterstation>, abgerufen am 16.04.2016.
- Universität für Bodenkultur Wien (2016): Wetterstation des Instituts für Meteorologie (BOKU-Met), 1190 Wien - Aktuelles Wetter, <https://meteo.boku.ac.at/wetter/aktuell/index.html>, abgerufen am 16.04.2016.
- Wetterkontor (2016): Skala für Windstärken – WetterKontor, [http://www.wetterkontor.de/de/bft\\_tabelle.html](http://www.wetterkontor.de/de/bft_tabelle.html), abgerufen am 10.05.2016.
- Wienert, Uwe (2002): Untersuchungen zur Breiten- und Klimazonenabhängigkeit der urbanen Wärmeinsel. Hohenwarsleben: Westarp Wiss. Essener Ökologische.

Wikibooks (2016): Meteorologie: Lufttemperatur – Wikibooks, Sammlung freier Lehr-, Sach- und Fachbücher, [https://de.wikibooks.org/wiki/Meteorologie:\\_Lufttemperatur](https://de.wikibooks.org/wiki/Meteorologie:_Lufttemperatur), abgerufen am 02.05.2016.

Wikipedia (2016): Street canyon, [https://en.wikipedia.org/wiki/Street\\_canyon](https://en.wikipedia.org/wiki/Street_canyon), abgerufen am 16.04.2016.

Wikipedia (2016): Transpiration, <https://de.wikipedia.org/wiki/Transpiration>, abgerufen am 13.01.2016.

Yamashita, S., 1990: The urban climate of Tokyo. Geogr. Rev. Japan, 63B, 98–107.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG (2016): Aufgaben — ZAMG, <https://www.zamg.ac.at/cms/de/topmenu/ueber-uns/aufgaben>, abgerufen am 16.02.2016.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG (2016): Die Dächer Wiens könnten die Stadt kühlen — ZAMG, <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/die-daecher-wiens-koennten-die-stadt-kuehlen>, abgerufen am 07.04.2016.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG (2016): 2015: Zweitwärmstes Jahr der Messgeschichte — ZAMG, <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/2015-zweitwaermstes-jahr-der-messgeschichte>, abgerufen am 02.03.2016.

Zmarsly, Ewald; Kuttler, Wilhelm; Pethe, Hermann (2007): Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.

## 7. Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2.1:</b>	Die Schichtung der urbanen Atmosphäre (Oke 1997)	14
<b>Abbildung 2.2:</b>	Geometrie eines Straßencanyons und Sky-View-Faktor (Erell et al. 2011)	15
<b>Abbildung 2.3:</b>	Strahlungshaushalt der Erde (Solomon et al. 2007)	18
<b>Abbildung 2.4:</b>	Darstellung des Fetch-Effektes (Oke 1987)	23
<b>Abbildung 2.5:</b>	Footprintfunktion mit Quellgebiet (Foken 2006)	24
<b>Abbildung 2.6:</b>	Temperaturverlauf über der Stadt (Oke 1987)	27
<b>Abbildung 2.7:</b>	Unterteilung der Lokalen Klima Zonen Teil 1 (Stewart and Oke 2012)	31
<b>Abbildung 2.8:</b>	Unterteilung der Lokalen Klima Zonen Teil 2 (Stewart and Oke 2012)	31
<b>Abbildung 2.9:</b>	UTCI-Modellschema (Jendritzky et al. 2009)	34
<b>Abbildung 3.1:</b>	Standortplan BOKU-Gelände Türkenschanze (Google Maps 2016)	37
<b>Abbildung 3.2:</b>	Onset HOBO Optic USB Base Station	38
<b>Abbildung 3.3:</b>	Messstandort Haupteingang	41
<b>Abbildung 3.4:</b>	Infrarotaufnahme zu Abbildung 3.3	41
<b>Abbildung 3.5:</b>	Hitzestressmessgerät	42
<b>Abbildung 3.6:</b>	LUX-Meter	44
<b>Abbildung 3.7:</b>	Infrarot Thermometer	46
<b>Abbildung 3.8:</b>	Windmessgerät	47
<b>Abbildung 3.9:</b>	Standort Schatten Container	48
<b>Abbildung 3.10:</b>	Standort Parkplatz	48
<b>Abbildung 3.11:</b>	HOBOware Startseite	50
<b>Abbildung 3.12:</b>	Daten einer Messstation in HOBOware	50
<b>Abbildung 3.13:</b>	Startseite RayMan 1.2	51
<b>Abbildung 3.14:</b>	Polares Diagramm	51
<b>Abbildung 3.15:</b>	HemiView Startseite	53
<b>Abbildung 4.1:</b>	Messstandort 1 Haupteingang aus südwestlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)	54
<b>Abbildung 4.2:</b>	Messstandort 1 Haupteingang aus südöstlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)	54
<b>Abbildung 4.3:</b>	Fischaugenaufnahme Messstandort 1 Haupteingang (Wetterstation ist rot markiert)	55
<b>Abbildung 4.4:</b>	Messstandort 2 Parkplatz aus südlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)	55
<b>Abbildung 4.5:</b>	Messstandort 2 Parkplatz aus nördlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)	56

<b>Abbildung 4.6:</b> Fischaugenaufnahme Messstandort 2 Parkplatz (Wetterstation ist rot markiert)	56
<b>Abbildung 4.7:</b> Messstandort 3 Schatten Container aus östlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)	57
<b>Abbildung 4.8:</b> Messstandort 3 Schatten Container	57
<b>Abbildung 4.9:</b> Fischaugenaufnahme Messstandort 3 Schatten Container (Wetterstation ist rot markiert)	57
<b>Abbildung 4.10:</b> Messstandort 4 Canyon 1 aus westlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)	58
<b>Abbildung 4.11:</b> Fischaugenaufnahme Messstandort 4 Canyon 1 (Wetterstation ist rot markiert)	58
<b>Abbildung 4.12:</b> Messstandort 5 Unterführung aus östlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)	59
<b>Abbildung 4.13:</b> Fischaugenaufnahme Messstandort 5 Unterführung (Wetterstation ist rot markiert)	59
<b>Abbildung 4.14:</b> Messstandort 6 Canyon 2 aus östlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)	60
<b>Abbildung 4.15:</b> Fischaugenaufnahme Messstandort 6 Canyon 2 (Wetterstation ist rot markiert)	60
<b>Abbildung 4.16:</b> Messstandort 7 Stiege Schatten aus nördlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)	61
<b>Abbildung 4.17:</b> Fischaugenaufnahme Messstandort 7 Stiege Schatten (Wetterstation ist rot markiert)	61
<b>Abbildung 4.18:</b> Messstandort 8 tiefer Baumschatten aus östlicher Perspektive (Wetterstation ist rot markiert)	62
<b>Abbildung 4.19:</b> Fischaugenaufnahme Messstandort 8 tiefer Baumschatten (Wetterstation ist rot markiert)	62
<b>Abbildung 4.20:</b> Standort BOKU-Gelände aus Vogelperspektive (Google Earth 2016)	63
<b>Abbildung 4.21:</b> Eigenschaften Open-midrise 1/2 (Stewart and Oke 2012)	64
<b>Abbildung 4.22:</b> Eigenschaften Open-midrise 2/2 (Stewart and Oke 2012)	64
<b>Abbildung 4.23:</b> Temperaturverlauf 18.-20.07.2015	66
<b>Abbildung 4.24:</b> Temperaturverlauf 10.-12.07.2015	68
<b>Abbildung 4.25:</b> Temperaturverlauf 07.-09.08.2015	70
<b>Abbildung 4.26:</b> Temperaturverlauf 25.-27.08.2015	72
<b>Abbildung 4.27:</b> Temperatur (T) und relative Luftfeuchtigkeit (rel L) am 16.07.2015	73
<b>Abbildung 4.28:</b> Temperatur (T) und relative Luftfeuchtigkeit (rel L) am 11.08.2015	74
<b>Abbildung 4.29:</b> Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Lufttemperatur ausgewählter Standorte am 11.08.2015	75
<b>Abbildung 4.30:</b> Windrose und Himmelsrichtungen (Zmarsly et al. 2007)	77

<b>Abbildung 4.31:</b> Einfluss der Globalstrahlung auf die Lufttemperatur am 07.08.2015	78
<b>Abbildung 4.32:</b> Einfluss der Globalstrahlung auf die Lufttemperatur am 10.08.2015	79
<b>Abbildung 4.33:</b> Haupteingang 12:36 MESZ	80
<b>Abbildung 4.34:</b> Haupteingang 15:22 MESZ	80
<b>Abbildung 4.35:</b> Parkplatz 12:43 MESZ	81
<b>Abbildung 4.36:</b> Parkplatz 15:34 MESZ	81
<b>Abbildung 4.37:</b> Schatten C. 13:02 MESZ	82
<b>Abbildung 4.38:</b> Schatten C. 15:36 MESZ	82
<b>Abbildung 4.39:</b> Canyon 1 13:10 MESZ	83
<b>Abbildung 4.40:</b> Canyon 1 15:37 MESZ	83
<b>Abbildung 4.41:</b> Canyon 2 13:12 MESZ	84
<b>Abbildung 4.42:</b> Canyon 2 15:38 MESZ	84
<b>Abbildung 4.43:</b> Stiege Schatten 13:12 MESZ	85
<b>Abbildung 4.44:</b> Stiege Schatten 15:38 MESZ	85
<b>Abbildung 4.45:</b> Baumschatten GM 13:44 MESZ	86
<b>Abbildung 4.46:</b> Baumschatten GM 16:24 MESZ	86
<b>Abbildung 4.47:</b> Sonnenbahn über dem Standort Haupteingang	88
<b>Abbildung 4.48:</b> Sonnenbahn über dem Standort Parkplatz	89
<b>Abbildung 4.49:</b> Sonnenbahn über dem Schatten C	89
<b>Abbildung 4.50:</b> Sonnenbahn über dem Standort Canyon 1	90
<b>Abbildung 4.51:</b> Sonnenbahn über dem Standort Unterführung	91
<b>Abbildung 4.52:</b> Sonnenbahn über dem Standort Canyon 2	91
<b>Abbildung 4.53:</b> Sonnenbahn über dem Standort Stiege	92
<b>Abbildung 4.54:</b> Sonnenbahn über dem Standort Baumschatten GM	93
<b>Abbildung 4.55:</b> Windgeschwindigkeit im Straßencanyon und BOKU-Dach [km/h]	94
<b>Abbildung 4.56:</b> Windrichtung in Grad ° am 05.08.2015	94
<b>Abbildung 4.57:</b> Gemessene Lufttemperatur im Straßencanyon und am BOKU-Dach	95
<b>Abbildung 4.58:</b> Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit im Straßencanyon und am BOKU-Dach	96
<b>Abbildung 4.59:</b> Vergleich von HEAT-Index und UTCI	97
<b>Abbildung 4.60:</b> Unterschied zwischen HEAT-Index und UTCI neu	103
<b>Abbildung 4.61:</b> Verteilung HEAT-Index in Bezug zu UTCI neu	105
<b>Abbildung 4.62:</b> Vergleich von UTCI-1 mit UTCI-neu	106
<b>Abbildung 4.63:</b> Temperaturverlauf aller Wetterstationen 29.01.-12.02.2016	108
<b>Abbildung 4.64:</b> Ausschnitt aus Testlauf	109
<b>Abbildung 4.65:</b> Detailausschnitt Testlauf 12.02.2016	110

## 8.Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2.1:</b> Albedo verschiedener Unterlagen (modifiziert nach Geiger et al. 1995)	19
<b>Tabelle 2.2:</b> UTCI Hitzestress-Levels	35
<b>Tabelle 3.1:</b> Messstandorte mit Beschreibung und lokaler Klimazone	39
<b>Tabelle 3.2:</b> Durchgeführte Thermalbildaufnahmen	41
<b>Tabelle 3.3:</b> Durchgeführte Mobile Messungen (Uhrzeiten sind in MESZ)	40
<b>Tabelle 3.4:</b> Empfehlungen für Aktivitäten bei Hitzestress (aus Bedienungsanleitung des Gerätes)	43
<b>Tabelle 3.5:</b> Verhältnis von Arbeit zu Pause bei bestimmten Hitzestress-Temperaturen	44
<b>Tabelle 4.1:</b> Temperaturmaxima am 19.07.2015	65
<b>Tabelle 4.2:</b> Temperaturminima am 11.07.2015	67
<b>Tabelle 4.3:</b> Temperaturmaxima am 09.08.2015	69
<b>Tabelle 4.4:</b> Temperaturminima am 26.08.2015	71
<b>Tabelle 4.5:</b> Windgeschwindigkeit und Windrichtung zur Mittagszeit am 11. August 2015	76
<b>Tabelle 4.6:</b> Oberflächentemperaturen beim Haupteingang	80
<b>Tabelle 4.7:</b> Oberflächentemperaturen Parkplatz	81
<b>Tabelle 4.8:</b> Oberflächentemperaturen Schatten C.	82
<b>Tabelle 4.9:</b> Oberflächentemperaturen Canyon 1	83
<b>Tabelle 4.10:</b> Oberflächentemperaturen Canyon 2	84
<b>Tabelle 4.11:</b> Oberflächentemperaturen Stiege Schatten	85
<b>Tabelle 4.12:</b> Oberflächentemperaturen Baumschatten GM	86
<b>Tabelle 4.13:</b> Standortfaktoren Haupteingang	88
<b>Tabelle 4.14:</b> Standortfaktoren Parkplatz	88
<b>Tabelle 4.15:</b> Standortfaktoren Schatten Container	89
<b>Tabelle 4.16:</b> Standortfaktoren Canyon 1	90
<b>Tabelle 4.17:</b> Standortfaktoren Unterführung	90
<b>Tabelle 4.18:</b> Standortfaktoren Canyon 2	91
<b>Tabelle 4.19:</b> Standortfaktoren Stiege Schatten	92
<b>Tabelle 4.20:</b> Standortfaktoren Baumschatten GM	92
<b>Tabelle 4.21:</b> Hitzestress-Index am 05.08.2015	98
<b>Tabelle 4.22:</b> Hitzestress-Auswertungshilfe aus dem Geräte-Handbuch	99
<b>Tabelle 4.23:</b> Vergleich von HEAT-Index mit UTCI-Index	102
<b>Tabelle 4.24:</b> UTCI Temperatur Interpretation	104

## 9. Formelverzeichnis

<b>(F2.1) Skyview-Faktor</b>	$SVF = \cos \beta$	15
<b>(F2.2) Skyview-Faktor <math>\beta</math></b>	$\beta = \tan^{-1} (H/0,5*W)$	15
<b>(F2.3) Albedo</b>	$a = - R/G$	19
<b>(F2.4) Kurzwellige Strahlungsbilanz</b>	$Q_k = G - R = D + H - R$	20
<b>(F2.5) Kurzwellige Strahlungsbilanz mithilfe Albedo</b>	$Q_k = G*(1-a)$	20
<b>(F2.6) Langwellige Strahlungsbilanz</b>	$Q_l = A_E = A_O - A_G$	20
<b>(F2.7) Gesamte Strahlungsbilanz</b>	$Q = Q_K + Q_L$	20
<b>(F2.8) Gesamte Strahlungsbilanz</b>	$Q = G - R - A_E$	20
<b>(F2.9) Städtische Energiebilanz</b>	$Q + Q_{anthr} + Q_{met} + Q_H + Q_E + Q_B = 0$	20
<b>(F3.1) WBGT</b>	$WBGT = (0,7 \times WB) + (0,2 \times TG) + (0,1 \times TA)$	42