

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt Institut für Meteorologie

OPTIMIERTER VERKEHRSFLÄCHENBETON FÜR DEN INNERSTÄDTISCHEN BEREICH

Untersuchung der Beeinflussung des lokalen und mesoskaligen Klimas durch den Einsatz von optimierten Oberflächen im Verkehrsbereich

Masterarbeit zur Erlangung des DI an der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von:

Bettina Leberbauer

Semester: WS 2014 - 2015

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

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die mich beim Verfassen meiner Masterarbeit tatkräftig unterstützt haben. Es war eine lange, aber auch spannende Angelegenheit und ich habe wirklich viel Arbeit und auch Begeisterung in das Projekt gesteckt.

Ganz besonderer Dank gehört meinen Professoren Herrn Weihs und Herrn Mursch-Radlgruber sowie dem Techniker Christian Gützer, die mich bei meinem Projekt in Stammersdorf beinahe immer betreut haben. Die Versuchsaufstellung und auch die Auswertungen wären ohne ihre Hilfe nicht möglich gewesen – vielen Dank für die hilfreichen Tipps und die notwendigen Erklärungen.

Zudem möchte ich mich natürlich auch bei meiner Familie und bei meinem Freund bedanken, die mich nicht nur finanziell, sondern auch moralisch immer unterstützt und mir den Rücken gestärkt haben. Sie alle haben mit mir viele schlechte Tage durchleben müssen, aber haben es immer wieder geschafft mich zu motivieren und mich voranzutreiben, wenn ich einmal einen Durchhänger hatte. Ohne ihre Unterstützung wäre ich nicht so weit gekommen. Danke Mama, Papa, Christine und Daniel.

Zuletzt möchte ich mich auch noch bei den zahlreichen Freunden, Bekannten und Verwandten bedanken, die mir die ganze Zeit zur Seite gestanden sind.

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

Der Klimawandel und seine Auswirkungen betreffen uns alle und haben sowohl jetzt als auch in Zukunft eine sehr wichtige Bedeutung. Vor allem die Erwärmung in Städten hat in der heutigen und zukünftigen Klimaforschung einen ganz besonderen Stellenwert. Aufgrund der wachsenden Bevölkerung, der verstärkten Urbanisierung und somit der steigenden Emissionen und Bebauungen wird es in den Städten immer heißer werden – das entstehende Phänomen wird als städtische oder urbane Wärmeinsel bezeichnet. Es gibt schon zahlreiche Studien, die sich mit dieser Problematik auseinandersetzen. Diverse Anpassungsstrategien an den Klimawandel wurden von der heutigen Gesellschaft akzeptiert: Dazu zählt die Technologie der "kühleren" Dachkonstruktionen, welche schon ausgereift und in Verwendung ist. Im Gegensatz dazu steht die Technologie der effektiveren, "kühleren" Befestigungen in Städten, welche ein komplexeres Aufgabengebiet hat: Neue Zusammensetzungen der Befestigungen auf Straßen, Gehwegen oder Parkplätzen müssen entwickelt werden, um die Auswirkungen durch die städtische Wärmeinsel in Zukunft mindern zu können. Wissenschaftler sehen in dieser neuen Technologie ein großes Potenzial für die Zukunft.

In dieser Arbeit werden sechs unterschiedliche Beton- und Asphaltzusammensetzungen in Hinblick auf Reflexion, Oberflächentemperatur und somit das lokale und mesoskalige Klima untersucht. Mit Hilfe entsprechender Sensoren wurden in einem Zeitraum von zirka sechs Monaten die notwendigen Daten für die Charakterisierung der Reflexion der einzelnen Befestigungen erfasst und anschließend miteinander verglichen. Des Weiteren wurde sichergestellt, dass die Versuchsflächen niemals beschattet oder mit Fahrzeugen verstellt wurden. Dies ist unbedingt notwendig, um qualitative Messungen zu gewährleisten. In der vorliegenden Arbeit wurden also zwei unterschiedliche Größen ermittelt: Einerseits wurde das Reflexionsvermögen der einzelnen Betonarten untersucht analysiert. Zum anderen wurden mittels Thermometer auch die und Oberflächentemperaturen der einzelnen Versuchsflächen bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen für die verschiedenen Befestigungen deutliche Unterschiede sowohl im Reflexionsvermögen als auch in der Oberflächentemperatur. Klar ersichtlich ist, dass die herkömmlichen Asphaltflächen deutlich höhere Durchschnittstemperaturen aufweisen. Im Laufe des Projektes stellte sich letztendlich heraus, dass das erhöhte Reflexionsvermögen negative Auswirkungen mit sich gebracht hat.

Executive Summary

Climate change and its impacts are becoming more and more important for people living in the future. Especially the rise in temperature in cities has a specific significance in the climate research nowadays. The so called urban heat island effect has its origin in the growth of population, especially in the cities, and the corresponding increased emissions and sealed surfaces. Therefore urban areas show higher temperatures in comparison to the surrounding landscape. A lot of studies have already been published discussing the impacts of this phenomenon. Some mitigation strategies are already well established: Cool roofing is state-of-the-art and is used worldwide. In contrast, the technology for using cool pavements in cities is not explored at all. Pavements are much more complex and challenging: New compositions of concrete or asphalt need to be established to decrease the effects of the urban heat islands in future. Scientists say that this technology has a high potential for future developments.

This thesis focuses on six different samples of concrete and asphalt pavements in terms of reflectance, surface temperature and local climate. The necessary data characterizing the reflectance and the surface temperatures of the individual samples was acquired with pyranometers and thermometers and then compared to each other. Caution was taken that the surfaces were never shaded by vehicles or vegetation. This is essential to ensure qualitative measurements. The thesis deals with two different parameters. On the one hand the solar reflectance of each sample was calculated and on the other hand, it was possible to find out the surface temperature of the samples.

The results show a strong difference between the different samples concerning solar reflectance and surface temperatures. It is clearly shown that the conventional asphalt pavements have higher mean temperatures than the pavements which consist of concrete. During this project, it turned out that the increased reflectivity has brought negative impacts.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	8
1.1	Problemstellung	8
1.2	Stand des Wissens	10
1.3	Zielsetzung der Arbeit	14
2.	Theoretische Grundlagen	15
2.1	Urbane Wärmeinseln	15
2.1.	1 Auswirkungen der Wärmeinseln auf den Menschen	16
2.1.	2 Quantifizierung des thermischen Stresses auf den Menschen	17
2.2	Die Energiebilanz in Städten	18
2.3	Einflussfaktoren der städtischen Wärmeinsel	20
2.3.	1 Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erde	21
2.3.	2 Albedo	23
2.3.	3 Eigenschaften und Auswirkungen von versiegelten Flächen	25
2.3.	4 Abflussverhalten von versiegelten Flächen	27
2.3.	5 Wirkung von Grünflächen	27
2.3.	6 Einfluss von Luftzirkulation auf die lokale Temperatur	29
3.	Methodik	31
3.1	Zugrundeliegende Strahlungsgesetze	31
3.1.	1 Kirchhoffsches Gesetz	31
3.1.	2 Plancksches Strahlungsgesetz	31
3.1.	3 Stefan-Boltzmann-Gesetz	31
3.1.	4 Wiensches Verschiebungsgesetz	32
3.2	Standort	32
3.3	Versuchsaufbau	34
3.4	Messsysteme	38
3.4.	1 Pyranometer	38
3.4.	2 Bilanzmesser	39

3.4.	Thermoelemente41
3.4.	4 Wetterstation43
3.4.	5 Campbell Scientific Datenlogger43
3.4.	6 Thermische Infrarotsensoren44
3.4.	7 Wärmebildkamera45
3.5	Datengrundlagen
3.6	Auswertungshilfen47
4.	Ergebnisse
4.1	Albedo48
4.2	Temperaturen55
4.3	Wärmebildkamera61
5.	Diskussion und Schlussfolgerung63
6.	Literaturverzeichnis66
7.	Abbildungsverzeichnis70
8.	Tabellenverzeichnis
9.	Formelyerzeichnis

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Der Klimawandel mit seinen Auswirkungen und vor allem die verstärkte Erwärmung in Städten werden weltweit beobachtet. Die städtische Erwärmung ist sehr unterschiedlich. Dies hat mehrere Gründe: Sie lässt sich zum einen auf die höhere Dichte der Gebäude, der Menschen und Maschinen, der Autos und Versiegelungen im Vergleich zum ländlichen Umfeld zurückführen, zum anderen werden teilweise auch Materialien für den Bau verwendet, deren optische und thermische Eigenschaften eine Erwärmung der Städte fördern. Des Weiteren verstärken der Mangel an Grünflächen, die Verdunstung und die erhöhte Abwärme durch Klimaanlagen im Sommer die Erhitzung der Städte zusätzlich. Aber auch die Ausweitung der Städte in das ländliche Umfeld verstärkt das Phänomen der Erhitzung, welches in der Regel als urbane Wärmeinsel bezeichnet wird: Die Temperaturen in der Stadt sind um einige Grade höher als im umliegenden ländlichen Raum. Dieser Effekt der urbanen Wärmeinsel wurde weltweit schon in über 30 Städten beobachtet. Die verstärkte Nachfrage von Energie für Klimaanlagen führt zudem noch zu einem gefährlichen Smog, wenn diese durch kalorische Kraftwerke generiert wird. Die dadurch erhöhten Emissionsbelastungen können zu gesundheitlichen Einschränkungen der Stadtbewohner führen.1

Es gibt verschiedene Ansatzpunkte, wie man an die Problematik der Stadterwärmung herangehen kann: Erwähnenswert ist hierbei die Technologie der Gründächer, welche sich in den letzten Jahren schon etabliert und weit verbreitet hat. Diese ist eine sehr gute Maßnahme, um die urbanen Wärmeinseln einzudämmen und die absorbierte Wärme effizient zu nützen. Gründächer können im Vergleich zu herkömmlichen Dächern viel mehr Wasser speichern und erhitzen sich in der Regel auch nicht so stark. Weltweit gibt es schon unzählige Beispiele für erfolgreiche Dachbegrünungen: In Singapur werden Hochhäuser begrünt, weil es aufgrund der Bodenknappheit nicht möglich ist großflächige Parks anzulegen. Im Jahr 2010 konnte Singapur zirka zehn Hektar begrünter Dachflächen aufweisen. Eines der weltbekanntesten Gebäude ist das Marina Bay Sands Hotel, welches in Sachen Begrünung als großes Vorbild für andere Gebäude weltweit steht.²

Zusätzlich zu den Gründächern kann man natürlich auch verschiedenste Wandbegrünungen als eine Art der Verminderung der städtischen Wärmeinseln einrichten, welche jetzt auch immer mehr an Bedeutung gewinnen. Die Stadt Wien geht hierbei mit gutem Beispiel voran: Die MA-48-Zentrale hat sich anstatt einer

¹ (vgl. Synnefa et al, 2010, S. 38)

² (vgl. Weber, 2011, S. 19f)

konventionellen Sanierung des Hauses für ein Pilotprojekt mit vertikaler Grünfassade entschieden. Es wurden rund 17.000 Pflanzen auf einer Fläche von 850 m² angebaut. Die Universität für Bodenkultur hat dieses Vorhaben von Anfang an begleitet und konnte sehr gute Ergebnisse präsentieren. Die grüne Fassade schützt vor Regen, UV-Strahlung und Wind, sie schluckt Straßenlärm, Abgase und Staub und obendrein hat sie auch einen positiven Einfluss auf die Wärmedämmung.³ Man konnte im Winter 2013 etwa 13% der Heizkosten und innerhalb von drei Jahren sogar vier Tonnen CO² (Kohlendioxid) einsparen. Neben diesen positiven Effekten im Winter, kühlt die Grünfassade im Sommer die Temperaturen um bis zu 15°C ab. Neben dem umweltfreundlichen Effekt ist die Blumenfassade natürlich auch ein ästhetischer Blickfang.⁴

Eine etwas neuere Technologie betrifft nicht die Dächer und Fassaden, sondern beschäftigt sich vor allem mit den Straßenbefestigungen und Zusammensetzungen der Gebäude innerhalb einer Stadt. Thermisch ungeeignete Zusammensetzungen von Beton, Asphalt und sonstigen Materialien in Hinblick auf die Erwärmung sollen in Zukunft durch bessere Alternativen ersetzt werden. Zu den Befestigungen zählen vor allem Straßen, Gassen und Gehwege, aber auch Fußgängerzonen und Parkplätze. Die thermischen Konditionen jeder Befestigung spielen eine äußerst wichtige Rolle in der Entstehung von urbanen Wärmeinseln.

Die neuen Befestigungen sollen sich in grundlegenden Eigenschaften von den alten, bisher verwendeten Zusammensetzungen unterscheiden. Vor allem das höhere Reflexionsvermögen (Albedo) der Bebauungsarten spielt hierbei eine große Rolle. Die Albedo als auch das Emissionsvermögen der langwelligen Strahlung eines Materials sind die wichtigsten Faktoren, um die thermischen Eigenschaften der Befestigungen optimieren zu können. ⁵ Durch die verstärkte Reflexion wird demnach weniger Strahlungsenergie in Form von Wärme in der jeweiligen Befestigung gespeichert und somit wird auch weniger Wärme in der Nacht abgegeben.

Die vorliegende Masterarbeit wurde im Rahmen des Projektes "Optimierter Verkehrsflächenbeton für den innerstädtischen Bereich" erstellt, in dem spezifische, neu entwickelte Eigenschaften von Befestigungen untersucht werden sollen. Bislang gibt es für Beton im innerstädtischen Raum nämlich nur Anforderungen hinsichtlich einer bestimmten Festigkeitsklasse, der Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen sowie einer ausreichenden Griffigkeit. Diese Eigenschaften gelten sowohl für die von Kraftfahrzeugen

³ (vgl. Enzi et al, 2013, S. 1ff)

⁴ (vgl. Magistrat der Stadt Wien, 2010)

⁵ (vgl. Doulos et al, 2004, S. 231)

befahrenen Befestigungen in einer Stadt als auch für Fußgänger- und Fahrradbereiche. Zusätzlich sollen diese Anforderungen nun auch auf den Einsatz von optimierten Oberflächen zur Reduktion von urbanen Wärmeinseln, die Erhöhung der Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer durch gute Ausleuchtung der Verkehrsflächen, sowie die Optimierung der Energiekosten dieser Ausleuchtung erweitert werden.

Die Energiebilanz eines Standortes in Abhängigkeit von den Luftströmungen beeinflusst das lokale Klima. In der Stadt sind Temperaturunterschiede der Oberflächen von rund 10°C zwischen sonnigen und schattigen Plätzen keine Seltenheit. Und genau hierbei spielen die verschiedenen Oberflächen der Befestigungen eine besonders wichtige Rolle: Je geringer das Reflexionsvermögen der Oberflächen ist, desto höher ist die absorbierte Strahlung. Die absorbierte Strahlung wird dann in Wärmeenergie umgewandelt und trägt zur weiteren Erwärmung der lokalen Atmosphäre bei. Durch die verstärkte Bebauung in den Städten vergrößern sich auch die Oberflächen, die die Strahlungsenergie der Sonne aufnehmen können. Die Aufheizung der Baukörper ist im Vergleich zu unbebauten Flächen viel höher – Baukörper stellen eine Art Wärmespeicher dar.

1.2 Stand des Wissens

Im Großraum Athen wurde bereits in einem küstennahen Park ein Experiment bezüglich kühlender und reflektierender Befestigungen durchgeführt. Es ist mit rund 4.500 m² das bisher größte Anwendungsprojekt von kühlen Pflastern in städtischen Gebieten weltweit. Der so genannte Flisvos Park liegt im südwestlichen Athen und ist rund 80.000 m² groß. Die Begrünung des Parks erfolgte allerdings nur spärlich mit kleinen Bäumen und Büschen und der versiegelte Teil besteht hauptsächlich aus dunklen Asphaltwegen. Südlich des Parks befindet sich eine stark befahrene Autobahn, welche dazu führt, dass im südlichen Teil des Parks höhere Oberflächentemperaturen gemessen wurden als im Norden. Das Projekt wurde von der lokalen Gemeinde durch einen großen Umbauplan gestartet. Dieser Plan wurde in zwei Stufen abgewickelt: die erste Stufe beinhaltete das Pflanzen von rund 2.500 zusätzlichen Bäumen und Büschen, im Rahmen der zweiten Stufe wurden rund 4.500 m² der existierenden Befestigungen durch neue, kühle Materialien ersetzt. Die hier verwendeten, neuen Materialien weisen folgende Eigenschaften auf: Sie besitzen einen hohen Reflexionsgrad der Sonnenstrahlung, einen hohen Emissionsgrad, hohe Lebensdauer und eine geringe Abnahme des Reflexionsvermögens im Laufe der Zeit. Zu solchen Materialien zählen vor allem helle oder gar weiße Befestigungen oder neue Asphaltmaterialien, die eine höhere Reflexion als gewöhnlicher Asphalt aufweisen. Neben den Befestigungen mit höherer Reflexion wurden aber auch Materialien mit nanotechnologischen Komponenten entworfen. Hierbei sind vor allem PCM-dotierte Oberflächen, welche Phasenwechselmaterialien (*phase change materials*) darstellen, gemeint. Phasenwechselmaterialien sind Latentwärmespeicher, welche einen hohen Anteil von Wärmeenergie speichern und als Wärme je nach Bedarf phasenverschoben wieder abgeben können. PCMs können in unterschiedlichen Baumaterialien wie Porenbetonsteinen, Gipsplatten und so weiter eingebracht werden.⁶ Im beschriebenen Experiment wurden 50 kleine, hellgelbe Pflastersteine aus Beton im Park verteilt, welche mit infrarot-reflektierenden Pigmenten durchmischt wurden. Die Renovierung des Parks wurde im Jahr 2010 fertiggestellt.⁷

Im Zuge des Experimentes wurden Umgebungs- und Oberflächentemperaturen, relative Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung sowie die Konzentration etwaiger Schwebeteilchen gemessen. Mittels einer mobilen Wetterstation, die an unterschiedlichen Plätzen des Parks aufgestellt wurde, konnten all diese Werte stündlich gemessen werden. Für die Auswertung wurden letztendlich acht spezifische Referenzpunkte im Park in Betracht gezogen. Diese umfangreichen Messungen der klimatischen Bedingungen wurden mit numerischen Modellierungen ergänzt, um vor allem Oberflächentemperaturen im Park vor und nach der Installation der neuen, verbesserten Messungen Befestigungen vergleichen. Die zeigten, die zu dass Durchschnittstemperaturen der nicht-beschatteten kühlen Befestigungen deutlich geringer waren (36,8°C) als die der herkömmlichen Befestigungen (48,1°C). Allerdings muss gesagt werden, dass Windeffekte eine große Rolle bei der Abkühlung spielten.8 Die prognostizierten Auswirkungen stimmten sehr gut mit den gemessenen Werten überein und zeigten somit, dass besonders reflektierende Befestigungen eine äußerst effektive Vermeidungstechnik für urbane Wärmeinseln hinsichtlich Lufttemperaturen darstellen.

Neben diesem Experiment wurde im Jahr 2008 noch ein weiteres Projekt in Athen durchgeführt. Im Rahmen des zweiten Experimentes wurden sechs verschiedenfärbige, dünne Asphaltschichten in Bezug auf ihr Reflexionsvermögen mit einem herkömmlichen, schwarzen Asphalt verglichen. Die Plattform, auf welcher die Versuchsflächen platziert waren, war rund 20 m² groß, unbeschattet, horizontal und isoliert, um den Wärmetransfer zwischen der Plattform und den Versuchsflächen zu eliminieren. Ziel war, das Reflexionsvermögen als Funktion der einzelnen Farben und die Oberflächentemperaturen der einzelnen Flächen zu bestimmen. In diesem Experiment wurden neben dem

⁶ (vgl. Baunetz Wissen, s.a.)

⁷ (vgl. Santamouris et al, 2012, S. 129)

^{8 (}vgl. Santamouris et al, 2012, S. 134)

konventionellen (schwarzen) Asphalt eine beige, weiße, grüne, rote und gelbe Versuchsfläche mit Abmessungen von jeweils $33 \text{ cm} \times 33 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ verwendet.

Farbige Oberflächen weisen im Vergleich zu schwarzem Asphalt ein höheres Reflexionsvermögen und eine höhere Infrarot-Abstrahlung auf. Die hier verwendeten Materialien bestehen aus Pigmenten, welche eine geringe Reflexion im sichtbaren Bereich des Lichts haben (23%) und eine hohe Infrarot-Reflexivität aufweisen (86%). Traditionelle Befestigungen mit einer zumeist sehr dunklen (schwarzen) Oberfläche reflektieren nur einen sehr kleinen Teil der einfallenden Sonnenstrahlen (4%). Dadurch können im Sommer sogar maximale Temperaturen von bis zu 67°C erreicht werden. Weiße Materialien hingegen können bis zu 30°C und gefärbte Asphaltbefestigungen bis zu 15°C kühler sein im Vergleich zu den herkömmlichen, dunklen Befestigungen. Grund dafür ist, dass sie teilweise bis zu 55% der einfallenden Sonnenstrahlen reflektieren können. Diese kühlen Pflastermaterialien speichern vor allem weniger Wärme im Boden und sind daher für geringere Umgebungstemperaturen verantwortlich. Je höher die Reflexion einer Oberfläche ist, desto kühler bleibt sie während der Sonneneinstrahlung.9

In Tabelle 1.1 kann man die Temperaturmessungen während des Tages sehen, welche zeigten, dass die Oberflächentemperaturen der jeweiligen Versuchsflächen immer höher waren als die Lufttemperatur. In der Nacht hingegen wurde das Gegenteil ersichtlich. Die weiße Versuchsoberfläche wurde untertags auf rund 39°C, die rote auf 43,6°C und die schwarze auf 46,7°C erhitzt.¹⁰

⁹ (vgl. Synnefa et al, 2010, S. 38)

¹⁰ (vgl. Santamouris et al, 2012, S. 128)

Versuchsfläche	Oberflächentemperatur (in °C)		
	Tagsüber		Nachtsüber
	Durchschnitt	Abweichung zur traditionellen,	Durchschnitt
		schwarzen Fläche	
Traditionell schwarz	46,7	-	21,6
Weiß	39	7,7	21,1
Gelb	40	6,7	19,4
Beige	40,5	6,2	19,1
Rot	43,6	3,1	20,7
Grün	43,5	3,2	19,7
	1		1

Tabelle 1.1: Maximale Durchschnittstemperaturen an den Oberflächen der untersuchten Versuchsflächen untertags und in der Nacht während des Versuchszeitraums (modifiziert nach Synnefa 2010).

Zusammengefasst kann man sagen, dass tagsüber die maximalen durchschnittlichen Oberflächentemperaturen der roten Versuchsfläche um 7% niedriger waren im Vergleich zur schwarzen, traditionellen Fläche, die grüne Fläche um rund 8%, die beige und gelbe Fläche um zirka 13% beziehungsweise 15%. Den größten Unterschied konnte man aber auf der weißen Versuchsfläche erkennen, denn dort waren die Maximaltemperaturen um 20% geringer als bei der schwarzen Fläche. Im Endeffekt zeigten all diese fünf gefärbten Asphaltschichten während des Tages geringere Oberflächentemperaturen im Vergleich zum schwarzen Asphalt. Die genauen Werte, die in der Nacht gemessen wurden, wurden im Artikel allerdings nicht angeführt.

Um auf dem zuletzt genannten Experiment der einzelnen Versuchsflächen aufzubauen, wurden zwei dieser Flächen auf einer Straße in Athen direkt als Bodenbefestigung ausgewählt – verglichen wurde der konventionelle schwarze Asphalt mit dem weißen Schichtasphalt. In einer Höhe von 1,5 Meter über dem schwarzen Asphalt erreichte die Lufttemperatur 37°C bis 47°C, über der weißen Fläche hingegen nur 36°C bis 41°C. Letztendlich kann man also sagen, dass die weiß asphaltierte Straßenseite zu einer Reduktion der Lufttemperatur um zirka 5°C geführt hat, wobei man hierbei eventuell den Nachteil der Blendung berücksichtigen muss. 12

12 (vgl. Synnefa et al, 2010, S. 39ff)

¹¹ (vgl. Synnefa et al, 2010, S. 40)

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Wie bereits beschrieben, gibt es bereits Studien, die sich mit der Verminderung der urbanen Wärmeinseln und auftretenden Hitzewellen beschäftigen. Ähnlich wie im vorher schon beschriebenen Experiment, sollen im Rahmen dieser Masterarbeit sechs verschiedene, neue Zusammensetzungen aus Beton und Asphalt eine Beeinflussung des städtischen Klimas ersichtlich machen. Stark reflektierende Materialien speichern weniger Wärme im Boden und sollen dadurch die Lufttemperatur in Städten vermindern, um das Wohlbefinden des Menschen zu erhöhen. Im Rahmen dieses Projektes sollen sowohl die Reflexionseigenschaften im sichtbaren und im infraroten Bereich gemessen werden, als auch die wichtigsten Komponenten der Energiebilanz und die wichtigsten meteorologischen Größen, wie zum Beispiel die Oberflächentemperaturen und die Temperaturen in einer Höhe von 10 cm, um die jeweilige Abkühlung über einer Fläche bestimmen zu können.

Ziel ist es, mithilfe des Reflexionsvermögens auf die Lufttemperaturen zu schließen. Anhand von sechs Versuchsflächen sollen im Laufe eines halben Jahres die Albedo-Werte gemessen und deren Einfluss auf die Temperaturentwicklung untersucht werden. Mit geeigneten Sensoren und Wetterstationen soll das Reflexionsvermögen der einzelnen Flächen und deren Oberflächentemperaturen ermittelt und anschließend miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse werden dann in Zukunft in innerstädtischen Bereichen umgesetzt.¹³

Diese Masterarbeit umfasst folgende Abschnitte: Im zweiten Abschnitt dieser Arbeit werden die theoretischen Grundlagen für die Wärmebilanz in Städten und wichtige Definitionen erläutert. Standort, Versuchsaufbau, verwendete Messinstrumente und Datengrundlagen werden im dritten Abschnitt beschrieben. Der vierte Abschnitt beschäftigt sich schlussendlich mit den Messergebnissen des Projekts und im Anschluss daran werden die Ergebnisse diskutiert und Schlussfolgerungen daraus gezogen.

 $^{^{\}rm 13}$ (vgl. Forschungsförderungsgesellschaft, 2014, S. 1f)

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Urbane Wärmeinseln

Beschreiben lässt sich das Phänomen der urbanen Wärmeinsel als eine Erhöhung der städtischen Temperaturen im Vergleich zu umliegenden nicht-städtischen Gebieten. Die städtische Wärmeinsel tritt am deutlichsten während windstiller, nächtlicher (autochthoner) Strahlungswetterlagen von Juni bis August auf und ist im Zentrum der Stadt mit den höchsten Temperaturen am stärksten ausgeprägt. In vertikaler Abfolge lassen sich grundsätzlich drei (oder auch vier) urbane Übererwärmungsbereiche differenzieren.

Die *Bodenwärmeinsel* wird durch die vorherrschenden Oberflächentemperaturen bestimmt. Sie ist flächenscharf ausgebildet und deckungsgleich mit den bebauten Flächen in der Stadt.

Die *Stadthindernisschichtwärmeinsel* bezieht sich auf den Bereich zwischen Bodenoberfläche und mittlerer Dachhöhe und sie wird vor allem durch die thermische Trägheit der Baukörper, Oberflächenvergrößerung und Energiefreisetzungen charakterisiert. Diese Wärmeinsel ist nur bedingt deckungsgleich mit den Bebauungen an der Oberfläche.

Die dritte Art der vertikalen Wärmeinseln wird als *Stadtgrenzschichtwärmeinsel* bezeichnet. Sie entsteht vor allem durch den Wärmetransport von unten nach oben und erstreckt sich bis an die freie Atmosphäre.

Zusätzlich zu den drei genannten kann man noch eine weitere Wärmeinsel im Stadtgebiet nachweisen, es handelt sich hierbei um die Wärmeinsel im *Untergrund*. Durch die zahlreichen Bebauungen an der Erdoberfläche wird die Wärme auch in den Untergrund abgeleitet. Je nach Bebauung und Bodenzusammensetzung kann diese Wärmeinsel einige Meter in den Boden hineinreichen und somit auch zu Änderungen der Grundwassertemperaturen führen.

Der urbane Siedlungsraum stellt eine besondere Form des Geländeklimas dar. Das städtische Mikroklima wird vor allem durch die erhöhte Bebauungsdichte, die Verwendung von Materialien mit ungeeigneten optischen und thermischen Eigenschaften und das Fehlen von Grünflächen beeinflusst. Aber auch die erhöhte Erwärmung durch den Menschen, die verminderten Windaktivitäten und die steigende Luftverschmutzung zählen zu den Grundcharakteristika von Städten. Seit mehr als 30 Jahren werden

^{14 (}vgl. Santamouris et al, 2012, S. 128)

städtische Wärmeinseln weltweit beobachtet und zählen als Phänomen des Klimawandels. Die verstärkte Urbanisierung und das erhöhte Bevölkerungswachstum sind nur zwei von vielen weiteren Mitverursachern, warum es in der Stadt immer wärmer wird. Aufgrund verschiedenster Anreize, sei es Arbeitsplatzsicherheit oder Lebensmittelversorgung, werden Menschen Prognosen zufolge bevorzugt in Städten leben. Dies wiederum führt zu einem Ausbau der Gebäude in der Stadt. Die vielen Hochhäuser, die man vor allem in dicht besiedelten Städten zu Gesicht bekommt, wärmen sich tagsüber massiv auf und können nachts nur beschränkt abkühlen. Des Weiteren spielt der zunehmende Verkehr durch das Bevölkerungswachstum auch eine besonders wichtige Rolle. Großräumige Flächenversiegelungen erhöhen die innerstädtischen Temperaturen, weil das Niederschlagswasser schneller und großflächig abfließt und somit auch keine Verdunstungskälte erzeugt werden kann.

Die Ausprägung der Wärmeinseln ist von einigen meteorologischen, geographischen und urbanen Faktoren abhängig. Zu den meteorologischen Faktoren zählen autochthone Wetterlagen, Bedeckungsgrad, Windgeschwindigkeit und atmosphärische Schichtung. Als geographischer Faktor wird nur die jeweilige Topographie einer Stadt angesehen. Urbane Faktoren sind zum Beispiel die Einwohnerzahl einer Stadt oder der Versiegelungsgrad und die Bebauungsdichte. Anhand dieser unterschiedlichen Faktoren kann man eine sehr gute Prognose einer urbanen Wärmeinselausbildung erstellen.¹⁵

2.1.1 Auswirkungen der Wärmeinseln auf den Menschen

Urbane Wärmeinseln können sowohl Vorteile als auch Nachteile mit sich bringen. Im Winter bedeuten höhere Stadttemperaturen eine Verkürzung der Frostperiode und Schneedeckendauer. Der sinkende Bedarf an Energie für die Beheizung der Gebäude wirkt sich aus ökonomischer Sicht sehr positiv aus. Im Sommer hingegen sieht die Situation ganz anders aus. Durch die dauerhafte Erwärmung rechnet man mit einem erhöhten Wärmestress, also einer thermischen Belastung der Bevölkerung. Die heißen Tage und tropischen Nächte werden sich in Zukunft sogar verdoppeln und dies führt zu einer Verminderung der urbanen Lebensqualität und zu gesundheitlichen Herausforderungen für den Menschen. Nächtliche Temperaturen über 25°C stören den Tiefschlaf, ohne welchen der Körper nicht zur Ruhe kommen kann. Solche Nächte werden auch als Tropennächte bezeichnet. Vor allem ältere Menschen und Kinder haben Probleme sich den höheren Temperaturen anzupassen und laufen somit Gefahr der Überhitzung. Aus

¹⁵ (vlg. Schöningh, 2011, S. 65f)

¹⁶ (vgl. Schöningh, 2011, S. 69f)

ökonomischer Sicht werden durch die Gebäudeklimatisierung im Sommer aber leider die Energieeinsparungen im Winter wieder kompensiert.¹⁷

2.1.2 Quantifizierung des thermischen Stresses auf den Menschen

Zu den drei Wirkungskomplexen gehören Lufthygiene sowie aktinische und thermische Umgebung. Zur Lufthygiene zählen unter anderem Partikel oder Flüssigkeiten, die sich in der Luft befinden, oder auch Gase, die als unangenehm empfunden werden. Zum aktinischen Wirkungskomplex zählen Effekte der Sonnenstrahlung im infraroten, sichtbaren und ultravioletten Wellenlängenbereich. Jeder Mensch empfindet Wärme oder Kälte anders, allgemein kann man aber sagen, dass der thermische Wirkungskomplex Aufschluss gibt, wodurch die Wärmeempfindung der Menschen beeinflusst wird. Der thermische Wirkungskomplex gilt als Maß für die Strahlungsbilanz des Menschen und setzt sich aus verschiedenen Parametern wie Lufttemperatur und -feuchte, Windgeschwindigkeit sowie Niederschlag zusammen. In Abbildung 2.1 ist der thermische Wirkungskomplex mit seinen Abhängigkeiten graphisch dargestellt.

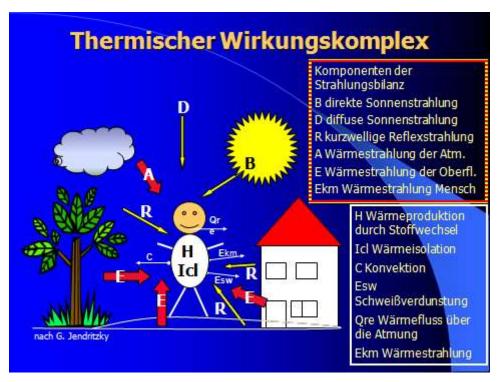


Abbildung 2.1: Der thermische Wirkungskomplex mit seinen Abhängigkeiten (Jendritzky, 1982)

Allgemein kann man also sagen, dass der Hitzestress des Menschen von einigen Parametern abhängt. Sowohl physiologische Eingangsgrößen wie Geschlecht, Alter, Körpergewicht und -größe, als auch meteorologische Faktoren wie Temperatur,

¹⁷ (vgl. Mursch-Radlgruber, 2012, S. 72)

Windgeschwindigkeit, Feuchtigkeit, Bewölkung sowie kurzwellige und langwellige Strahlungsflüsse spielen eine große Rolle.

Die mittlere Strahlungstemperatur (Mean Radiant Temperature) ist eine meteorologischen Größen, die die Energiebilanz des Menschen beeinflussen. Diese Strahlungstemperatur ist als einheitliche Temperatur einer schwarz strahlenden Umschließungsfläche definiert, die zum gleichen Strahlungsenergiegewinn eines Menschen führt wie die aktuellen, unter Freilandbedingungen meist sehr uneinheitlichen kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse. Ein darauf aufbauendes Indiz zur Beurteilung des Klimas in Bezug auf das Temperaturempfinden ist der PMV-Wert. PMV steht für Predicted Mean Vote und gibt Aussagen über das Wohlbefinden eines Durchschnittsmenschen hinsichtlich Wärmeempfindung. Zur Quantifizierung der menschlichen Temperaturempfindung wird eine 7-Punkte-Skala verwendet (+3 heiß bis –3 kalt, 0 steht hierbei für eine neutrale Temperaturempfindung). 18 Mittels der so genannten ENVI-Met Software kann man diese PMV-Werte dann auch graphisch darstellen, was im fünften Abschnitt zu finden ist. 19

2.2 Die Energiebilanz in Städten

In einer Stadt interagieren natürliche und anthropogene Faktoren auf engstem Raum. Zu den natürlichen Faktoren gehören Boden, Wasser und Luft und zu den anthropogenen Faktoren zählen vor allem Wohnsiedlungen, Verkehrseinrichtungen und Industrie, welche die natürlichen Energieflüsse aus dem Gleichgewicht bringen.²⁰ Das Stadtklima ist von Stadt zu Stadt unterschiedlich und hängt in erster Linie von der geografischen und topografischen Lage ab. Des Weiteren wird das Stadtklima aber auch von vielen anderen Faktoren, wie zum Beispiel Bebauungsdichte, Versiegelungen, Grünanlagen, Luftdurchmischung sowie Luftverschmutzung, beeinflusst.

Die Stadt ist durch eine verringerte natürliche Oberfläche und unzähligen versiegelten Flächen charakterisiert. Dadurch wird der natürliche Wärmehaushalt in der Stadt verändert, weil die Bebauungen fast doppelt so viel Wärme speichern können wie Grünflächen. Speziell in Städten kommen noch zusätzliche anthropogene Wärmequellen durch Industrie und das erhöhte Verkehrsaufkommen hinzu. Aufgrund verschiedener Oberflächenbedeckungstypen und Baukörperstrukturen wird das Klima der Stadt in viele verschiedene, kleine Mikroklimate differenziert. Das *Mikroklima* beschränkt sich auf

¹⁸ (vgl. Springer, 1994)

¹⁹ (vgl. Matzarakis et al., 2000)

²⁰ (vgl. Schöningh, 2011, S. 11ff)

wenige Meter bis einige Kilometer und versteht sich in diesem Sinne als kleine Regionen innerhalb einer Stadt, wie zum Beispiel Parks, Parkplätze oder Straßen.

Allgemein kann man sagen, dass bebaute Flächen mehr Sonnenwärme speichern als Grünflächen und somit die Abkühlung der Umgebung in der Nacht verzögern. Umso dichter eine Stadt bebaut ist, umso mehr Wärme kann gespeichert werden und desto weniger kühlt sie in der Nacht ab. Mehrgeschossige Gebäude haben eine größere Oberfläche und können sich extrem aufheizen, weil versiegelte Flächen eine hohe Wärmekapazitätsdichte und eine gute Temperaturleitfähigkeit besitzen. Um dieser Problematik entgegen zu wirken wird noch mehr Energie für Klimaanlagen aufgebracht, um die Übererwärmung innerhalb der Gebäude in den Griff zu bekommen. Die einzelnen Bebauungen heizen sich abhängig von der Untergrund- und Geländebeschaffenheit unterschiedlich schnell und stark auf. Die Abwärme der Klimaanlagen beschleunigt wiederum die Erwärmung außerhalb der Gebäude weiterhin und das zeigt, dass ein intelligentes, verbessertes Bebauungsund Grünflächenmanagement zukünftig unabdingbar ist.21

Aufgrund physikalischer Eigenschaften der Dichte, der Wärmeleitfähigkeit sowie der Wärmekapazität unterscheiden sich die einzelnen Oberflächen stark voneinander. Vor allem herkömmliche Befestigungen wie Asphalt oder Beton führen dazu, dass die absorbierte Wärme stärker in den Untergrund gelangt als dies bei natürlichen Oberflächen der Fall ist. Der größte Unterschied zwischen Stadt und Umland ist aber der, dass ein großer Teil der Energie im Umland aufsteigen und durch den Wind auch abtransportiert werden kann. In städtischen Gebieten hingegen verbleibt die Energie direkt am Standort und kann durch die verringerte Luftzirkulation auch kaum abtransportiert werden.²²

Des Weiteren werden durch den Neubau von Gebäuden oder ganzen Siedlungen auch Grünflächen verdrängt und somit wird die Verdunstung in der Stadt noch stärker vermindert. Durch die vermehrte Zuwanderung der Bevölkerung in die Städte siedeln sich auch Industriegewerbe am Rande der Stadt an, welche durch ihre Emissionen noch mehr Wärme erzeugen. Zusätzlich zur Industrie nimmt auch der Verkehr in den Stadtgebieten eine ganz besondere Rolle ein: Er produziert unzählige Feinstaub-Partikel, die so genannten PMx (particulate matter), und trübt die städtische Atmosphäre. Es gibt unterschiedliche Klassen des Feinstaubs, manche davon sind besonders gefährlich, weil sie von Menschen eingeatmet werden und somit zu gesundheitlichen Problemen führen

²¹ (vgl. Klimacampus, s.a.)

²² (vgl. Spektrum - Lexikon der Geografie, 2001)

können. Diese Partikel beeinflussen neben der menschlichen Gesundheit aber auch noch den Niederschlag und die Luftzirkulation.²³

Eine allgemeine Formel für die Energiebilanz eines urbanen Siedlungskörpers setzt sich aus dem Strahlungs- und Wärmehaushalt zusammen.

$$Q + Q_{anthr} + Q_{met} + Q_H + Q_E + Q_B = 0 (2.1)$$

Die Summe der Strahlungsbilanz Q, der anthropogenen und metabolischen Wärmeflussdichte Q_{anthr} und Q_{met} , der fühlbaren und latenten Wärmeflussdichte Q_H und Q_E sowie dem Bodenwärmestrom Q_B ergibt die allgemeine Formel für die Energiebilanz.

Wenn man nun die Strahlungsbilanz der Stadt mit der des Umlandes vergleicht, erkennt man im urbanen Raum eine Verringerung der kurzwelligen Strahlungsdichte. Unter Strahlungsdichte versteht man die mengenmäßigen Orts- und Richtungsabhängigkeiten der von einer Sendefläche abgegebenen Strahlung. Die geringere Strahlungsdichte in der Stadt lässt sich darauf zurückführen, dass dort viel mehr Luftbeimengungen in der Atmosphäre vorhanden sind und diese die Strahlung abschwächen. Zudem bewirkt die urbane Dunstglocke, die über der Stadt hängt, eine Reduktion der einfallenden Strahlung von rund 10% gegenüber dem Umland. Bei den langwelligen Strahlungen, die von Gebäuden und Befestigungen reflektiert werden, lässt sich das Gegenteil beobachten. Durch die verstärkte Bebauung wird die Sonnenstrahlung zum Teil von Gebäuden absorbiert oder reflektiert. Der reflektierte Teil der Strahlung trifft wieder auf ein anderes Gebäude und hier geschieht dasselbe. Somit kommt es zu so genannten "Mehrfachreflexionen" in den Straßenschluchten, sodass die kurzwellige, reflektierte Strahlung unweigerlich immer wieder auf eine andere Oberflächen trifft und dabei zu einer Erhöhung der Temperaturen in der Stadt führt, weil diese Oberflächen die kurzwellige Strahlung als langwellige Wärmestrahlung wieder an die Umgebung abgeben.

2.3 Einflussfaktoren der städtischen Wärmeinsel

Um die Zusammenhänge des städtischen, mesoskaligen Klimas und somit auch der urbanen Wärmeinseln verstehen zu können, wird viel Wissen diesbezüglich vorausgesetzt. Urbane Wärmeinseln werden durch viele verschiedene Faktoren beeinflusst: Strahlungsund Wärmehaushalt der Erde, Albedo, Eigenschaften und Auswirkungen von versiegelten Flächen, Abflussverhalten von versiegelten Flächen, Wirkung von Grünflächen und Einfluss von Luftzirkulation auf die lokale Temperatur. All diese Faktoren können die

²³ (vgl. Klimacampus, s.a.)

Entstehung von Wärmeinseln oder Hitzewellen verändern. Im Folgenden werden alle wichtigen Einflussfaktoren erläutert.

2.3.1 Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erde

Die Sonne stellt für die Erde die wichtigste Energiequelle dar. Die außerhalb der Erdatmosphäre gemessene Strahlungsdichte aller Wellenlängen bei mittlerer Entfernung der Erde kann durch die Solarkonstante beschrieben werden. Diese Konstante beschreibt die Intensität der Sonnenstrahlung und kann mit genügender Genauigkeit nur von hochfliegenden Flugzeugen oder Satelliten gemessen werden. Der Wert der Solarkonstante beträgt 1.370 W/m² (Watt pro Quadratmeter).²4

Für die Sonnenstrahlen gibt es beim Eintreten in die Atmosphäre vier verschiedene Möglichkeiten: Reflexion, Absorption, Streuung und Transmission. Zirka ein Viertel der einfallenden Strahlung wird sofort durch die Atmosphäre und die Wolken wieder zurück ins All reflektiert. Ein geringerer Teil der Sonnenenergie wird aber auch durch die Atmosphäre und die Wolken absorbiert: Sie wird durch Gase aufgenommen, in Wärme umgewandelt und in der Atmosphäre gespeichert.

Ein großer Teil der einfallenden Strahlung unterliegt der Schwächung durch verschiedene Einflüsse. Dieser Teil der Strahlung gelangt als *diffuse* Strahlung auf die Erdoberfläche, was bedeutet, dass die Strahlung durch Wolken oder Partikel in der Atmosphäre gestreut wird. Streuung heißt, dass die Strahlen eine Ablenkung erfahren. Zum einen kann die Streuung an Luftmolekülen stattfinden und zum anderen können die Photonen auch durch die in der Luft schwebenden größeren Teilchen gestreut werden.

Als *direkte* oder *parallele* Strahlung bezeichnet man die Strahlung der Sonne, die in der Atmosphäre nicht gestreut wird. Die diffuse (aus allen Richtungen kommende) und direkte Strahlung werden zusammen als *Globalstrahlung G* bezeichnet. Die Globalstrahlung gibt den gesamten solaren Strahlungsfluss zur Erdoberfläche an und ist für den Energiehaushalt von ganz besonderer Bedeutung. Die Sonnenstrahlung beträgt im Durchschnitt um die 341 W/m² (Abbildung 2.2). Zudem stellt die Globalstrahlung auch den wichtigsten positiven Anteil der Wärmebilanz der Erdoberfläche dar. Letztendlich werden zirka 23 W/m² der Globalstrahlung an der Erdoberfläche wieder reflektiert und *Reflexstrahlung R* genannt. Des Weiteren werden 79 W/m² der eintreffenden

²⁴ (vgl. Forkel, 2009)

Sonnenstrahlung an Wolken, Aerosolen und der Atmosphäre reflektiert. Insgesamt werden also rund 102 W/m² der einfallenden Strahlung wieder zurück ins All reflektiert.²⁵

Zirka 78 W/m² werden von der Atmosphäre und die restlichen 161 W/m² der gesamten einfallenden kurzwelligen Sonnenstrahlung werden durch die Erdoberfläche absorbiert. Über die Photosynthese wird diese Energie teilweise in Biomasse umgewandelt und erhitzt die Erdoberfläche sowie die darauf befindlichen Gewässer. Aus der kurzwelligen Sonnenstrahlung wird also eine langwellige Wärmestrahlung, die auch als Wärmestrahlung im infraroten Bereich bezeichnet wird.²6

396 W/m² gibt die Erdoberfläche in Form von langwelliger Oberflächenstrahlung wieder an die Atmosphäre ab. Weitere 17 W/m² und 80 W/m² werden durch Konvektion und latente Wärmeverluste emittiert. Insgesamt werden also 239 W/m² als Wärmestrahlung (austretende langwellige Strahlung) zurück in den Weltraum geschickt. Die *Gegenstrahlung* beträgt 333 W/m² und wird von der Erdoberfläche wieder absorbiert.

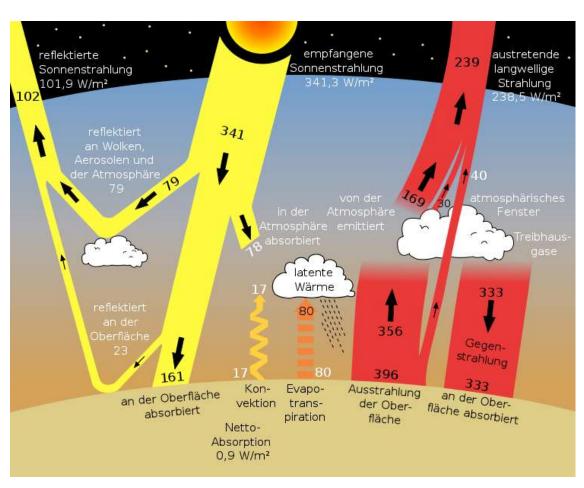


Abbildung 2.2: Strahlungshaushalt der Erde (Wikipedia, 2014)

²⁵ (vgl. Möller, 1973, S. 16ff)

²⁶ (vgl. Forkel, 2009)

Generell unterscheidet man zwischen der kurzwelligen und der langwelligen Strahlungsbilanz. Man spricht von der kurzwelligen Strahlungsbilanz Q_k , weil die einfallende Sonnenstrahlung überwiegend aus kurzwelligen Strahlen besteht.

$$Q_k = G - R = D + H - R = (1 - a) \times G$$
 (2.2)

Die *kurzwellige Strahlungsbilanz Q* $_k$ ergibt sich aus der Differenz zwischen der Globalstrahlung G und der Reflexstrahlung R. Die Globalstrahlung selbst wird als Summe von direkter und diffuser Strahlung (D und H) gesehen. Die Albedo der jeweiligen Oberfläche wird als G0 bezeichnet und fließt in die Berechnung mit ein.

Die *langwellige Strahlungsbilanz Q_l* wird deshalb so genannt, weil es sich hierbei um die Wärmestrahlung im infraroten Bereich der Erdoberfläche handelt.

$$Q_{l} = A_{E} = A_{0} - A_{G} \tag{2.3}$$

Die langwellige Strahlungsbilanz Q_l ist gleichbedeutend mit der effektiven Ausstrahlung A_E der jeweiligen Oberfläche. Die effektive Ausstrahlung wird als Differenz zwischen der terrestrischen Strahlung A_0 (Ausstrahlung der Erdoberfläche) und der Gegenstrahlung A_G bezeichnet. Als Gegenstrahlung kann man sich den Einfluss von Aerosolen, Wolken und Gasen in der Atmosphäre vorstellen.

Aus diesen beiden Formeln für die Strahlungsaufnahme beziehungsweise die Strahlungsabgabe, lässt sich nun die gesamte Strahlungsbilanz *Q* (*Nettostrahlung*) ermitteln, welche eine Differenz zwischen der absorbierten Globalstrahlung und der effektiven Ausstrahlung darstellt.²⁷

$$Q = Q_k - Q_l = G - R - A_E (2.4)$$

2.3.2 Albedo

Unter Albedo versteht man das Reflexionsvermögen eines Körpers, welches das Verhältnis von reflektiertem zum einfallenden Licht beschreibt. Sie ist für alle Oberflächen unterschiedlich und wird in Prozent beziehungsweise als Zahl zwischen 0 und 1 angegeben. Umso niedriger die Zahl, umso weniger Reflexionsvermögen hat der jeweilige Körper.²⁸ Das Reflexionsvermögen der Körper ist abhängig von verschiedenen Faktoren: Die Art und Beschaffenheit der Oberfläche, sowie dem Spektralbereich der einfallenden Strahlung. Zusätzliche Parameter wie der Einfallswinkel der eingehenden Strahlung, die

²⁷ (vgl. Freie Universität Berlin, 2006)

²⁸ (vgl. Forkel, 2009)

atmosphärische Trübung oder der atmosphärische Wasserdampfgehalt beeinflussen ebenfalls den Wert der Albedo.²⁹ Ist der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre hoch oder ist die atmosphärische Trübung stark, sinkt demnach die Albedo. Der Bedeckungsgrad des Himmels durch Wolken muss hierbei natürlich auch erwähnt werden, denn dieser vermindert die Sonneneinstrahlung.³⁰

Mittels eines Pyranometers kann der Reflexionsgrad eines Körpers gemessen werden. Aufgrund unterschiedlicher optischer und stofflicher Zusammensetzungen hat jeder Körper eine andere Albedo: Ein idealer schwarzer Körper absorbiert die eingehende Strahlung zu 100% und hat folglich eine Albedo von 0%. Eine sehr dunkle Oberfläche, vergleichsweise ein brachliegender Ackerboden, absorbiert daher nahezu die gesamte Strahlung und erwärmt den Boden maßgebend. Im Gegensatz dazu steht eine sehr helle, ebene Fläche: Wenn die Strahlung zum Beispiel auf Neuschnee trifft, wird bis zu 90% der einfallenden Strahlung wieder reflektiert.

Eine weitere Problematik des Klimawandels ist zum Beispiel, dass viele Eisflächen abschmelzen und der dunkle Untergrund darunter sichtbar wird. Dadurch verändert sich die Albedo dieser Landschaft und sogar derart geringe Änderungen der planetaren Albedo können zu spürbaren Änderungen der globalen Mitteltemperatur führen. Wenn also noch mehr Eisflächen abschmelzen, wird mehr von der dunkleren Erde darunter sichtbar. Folglich wird sich der Boden auch dort stärker erwärmen und dies wiederum führt zu einem weiteren Abschmelzen von Eis oder sogar Gletschern. So genannte *indirekte Landnutzungsänderungen* stellen also in Zukunft eine große Herausforderung dar, weil diese meistens unterschätzt werden.

In Tabelle 2.1 wurden verschiedene Oberflächen mit ihrem jeweiligen Reflexionsgrad aufgelistet. Zudem kann man zwischen kurzwelliger und langwelliger Albedo unterscheiden. Die kurzwellige Albedo beschreibt das Reflexionsvermögen der einfallenden Sonnenstrahlung zurück in die Atmosphäre. Unter der langwelligen Albedo versteht man die von der Erde emittierte Strahlung, von welcher wieder ein Teil zurück reflektiert wird.

²⁹ (vgl. Spektrum – Lexikon der Geografie, 2001)

³⁰ (vgl. Schöningh, 2011, S. 76f)

Kurzwellige Albedo	Langwellige Albedo		
Neuschnee	75–90 %	Polierte Metalle	98 %
Tiefes Wasser bei tiefstehender Sonne	80 %	Blech	93 %
Wolken	60–90 %	Aluminiumbronze	65 %
Dünensand	30–60 %	Sand	10 %
Ackerboden, brach	7–17 %	Wolken	10 %
Tropischer Regenwald	10–12 %	Ackerboden, brach	8 %
Laubwald	15–20 %	Wasser	4 %
Nadelwald	5–12 %	Rasen	1,5 %
Wiesen, Weiden	12-30 %	Schnee	0,5 %
Landwirtschaftliche Kulturen	15–25 %		
Siedlungen	15–20 %		
Tiefes Wasser bei hochstehender Sonne	3–10 %		

Tabelle 2.1: Kurzwellige und langwellige Albedo (modifiziert nach Spektrum, 2014)

Verschiedene Albedo-Werte führen also zu unterschiedlichen Auswirkungen: Asphalt hat zum Beispiel eine dunklere Farbe als Beton und heizt sich folglich bei starker solarer Einstrahlung stärker auf. Nahezu die gesamte Strahlungsenergie wird zur Erwärmung der Oberfläche und der darüber liegenden Luftschichten verwendet. Beton hingegen weist eine hellere Oberflächenfarbe auf und erhitzt sich deshalb nicht so stark.

2.3.3 Eigenschaften und Auswirkungen von versiegelten Flächen

Durch die Flächenversiegelung werden vor allem die grundlegenden Eigenschaften des Bodens, wie zum Beispiel die Bodenfruchtbarkeit, die Speicherfähigkeit und die Wasserdurchlässigkeit, gestört. Bodenversiegelung bedeutet nämlich, dass der Boden wasser- und luftdicht abgedeckt wird und das Regenwasser nur erschwert oder zum Teil gar nicht durchsickern kann. Wenn der Boden dauerhaft von Wasser und Luft abgeschlossen ist, geht die Bodenfauna zugrunde, welche aber notwendig ist, um den Boden fruchtbar zu erhalten. Aus diesem Grund bedeutet Flächenversiegelung auch eine Art Lebensraumverlust für diverse Organismen. Durch den Ausbau versiegelter Flächen werden immer mehr Pflanzen verdrängt, welche aber als günstige Wasserverdunster oder Schattenspender in jeder Stadt von Nöten wären.³¹

Der so genannte "Sky view factor" kann hierbei auch in Betracht gezogen werden. Gebiete mit einem höheren "Sky view factor" – das heißt, Gebiete mit größerem Blick zum Himmel

^{31 (}vgl. Umweltbundesamt, 2013)

– unterliegen höheren Temperaturschwankungen, was sich positiv auf das Wohlbefinden des Menschen auswirkt.³²

Aber der Anteil an versiegelten Flächen steigt und steigt, egal ob in stadtnahen oder aber in ländlichen Gebieten. Es gibt vielfältige Ursachen für die größere Flächeninanspruchnahme der Bevölkerung: Vor allem ein gehobener Lebensstandard, aber auch Änderungen in der Wirtschaftsstruktur sind hierbei Hauptverursacher. Dies hat zur Folge, dass immer mehr bebaute, betonierte, asphaltierte oder gepflasterte Flächen entstehen und somit viele wichtige, notwendige Bodenfunktionen verloren gehen. Versiegelte Flächen heizen sich im Vergleich zu Grünflächen schneller auf und absorbieren auch mehr Wärme, sodass sich die darüber liegenden Luftschichten immer mehr erwärmen. Tagsüber liegt die Oberflächentemperatur der versiegelten Flächen deutlich über der Temperatur der Luft. Der Energietransport richtet sich folglich von der Oberfläche in die Atmosphäre und erwärmt die darüber liegende Luftschicht. Die versiegelten Flächen speichern die Wärme und in der Nacht wird die Wärme in den Unterboden geleitet. Infolge der höheren Bodentemperatur im Vergleich zur Oberfläche findet der Wärmetransport vom Untergrund zur Oberfläche statt, der Energietransport kehrt sich also um. Dies sorgt dafür, dass auch in der Nacht die Oberflächentemperaturen erhalten bleiben und die nächtliche Abkühlung der Lufttemperaturen eingeschränkt wird. Bebauungen haben denselben Speichereffekt wie der Boden, sie geben nachts ihre Wärme verzögert an die Atmosphäre ab und erwärmen die Stadt. Dieser Effekt kann als zweiter Hauptsatz der Wärmelehre vereinfacht beschrieben werden: Wärme fließt selbstständig nur von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedrigerer Temperatur.

An versiegelten Flächen wird ein zunehmender Wasserverlust des darunterliegenden Bodens ersichtlich und das wird durch den Evapotranspirationswert deutlich. Unter *Evapotranspiration* versteht man die Verbindung zwischen Evaporation und Transpiration, also die Summe aus der direkten, physikalischen Verdunstung (Übergang von Wasser in flüssiger zur gasförmigen Form, von Land- als auch Wasserflächen) und der Wasserabgabe durch Pflanzen und Tiere (Transpiration).³³ Sie hängt vor allem vom Wassergehalt und der Bedeckung des Bodens, sowie von der Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit an der Erdoberfläche ab. Umso niedriger die Evapotranspirationsrate ist, umso höher werden die städtischen Temperaturen untertags.³⁴

³² (vgl. Tremeac et al, 2012, S. 109)

³³ (vgl. U.S. Department of the Interior, 2014)

³⁴ (vgl. Taha, 1997, S. 101)

2.3.4 Abflussverhalten von versiegelten Flächen

Aufgrund der höheren Flächenversiegelung in der Stadt im Gegensatz zum ländlichen Umfeld kommt es zu einer deutlichen Erhöhung des Oberflächenabflusses und somit auch zu einer reduzierten Sickerwasser- und Grundwasserneubildungsrate und einer sinkenden Wasserspeicherkapazität. Versiegelte Flächen lassen fast gar keinen Niederschlag mehr in den Untergrund versickern. Demnach können sich die Grundwasservorräte nicht mehr auffüllen und der Unterboden trocknet aus. Der Grundwasserstand unter einer Stadt sinkt also kontinuierlich ab und in Verbindung mit den hohen Abflussspitzen sind die urbanen Wasserläufe hohen Schwankungen zwischen Niedrig- und Hochwasser ausgesetzt. Gravierende Unterschiede bezüglich des Oberflächenabflusses zwischen den einzelnen Bodenbedeckungstypen einer Stadt dürfen aber nicht vernachlässigt werden.

Des Weiteren spielen Vegetationsdichte, Bodenvorfeuchte, Hangneigung und Niederschlagsintensität und -dauer eine wichtige Rolle beim Oberflächenabfluss. Bebauungen mit geneigten Dächern lassen das meiste Niederschlagswasser abfließen, Flachdächer hingegen können zwar auch kein Wasser speichern, aber sie halten das Oberflächenwasser länger zurück und stellen es für die Verdunstung bereit. Die Reaktionszeit einer urbanen Region auf den Niederschlagsinput ist viel kürzer als in einem ländlichen Gebiet mit geringerem Versiegelungsgrad. Vor allem Starkregen (Gewitter) können zu großen Herausforderungen in Städten führen, weil die Infiltrationskapazität der meist verdichteten urbanen Böden überstiegen wird. Des Weiteren kann es bei Starkregenfällen zu Störungen in der Kanalisation kommen: Wenn zu viel Regenwasser auf einmal in die Kanalisation rinnt, kann das zu örtlichen Überschwemmungen und somit auch zu Hochwasserereignissen führen, weil die Kanalisation so große Wassermassen nicht aufnehmen kann.

Eine weitere Folge des niedrigen Grundwasserstandes betrifft auch die städtischen Grünanlagen. Vorzeitiger Laubabfall und Zuwachsverluste können auftreten und zu Standortschäden führen. Die verringerte Verdunstung und das Absterben der Grünflächen können demnach zu einer weiteren Erwärmung in der Stadt führen.³⁵

2.3.5 Wirkung von Grünflächen

Zur Verminderung der städtischen Wärmeinsel wurden schon vermehrt Projekte ins Leben gerufen, die mit Begrünungen die Stadt abkühlen sollen. Zu den Begrünungen

³⁵ (vgl. Schöningh, 2011, S. 127ff)

zählen unter anderem Parks mit vielen Bäumen, Sträuchern und Wiesen aber auch Gründächer und Wandbegrünungen. Es hat sich gezeigt, dass Gründächer als auch vertikale Grünfassaden einen äußerst positiven Einfluss auf die Wärmeminderung in Städten haben.

Im August 2001 sowie 2002 wurde diesbezüglich ein Experiment in Chicago durchgeführt. Hierbei wurden die Temperaturen am Dach der Chicago City Hall und einem benachbarten Gebäude gemessen. Das Dach der Chicago City Hall wurde begrünt und anschließend wurden die Temperaturen mit dem konventionellen bituminösen Flachdach des Nachbargebäudes verglichen. Mithilfe eines Datenloggers konnte man die Messwerte der Lufttemperaturen der beiden Dächer im 30-Minutentakt aufzeichnen und anschließend auch ablesen. Man konnte hierbei einen Temperaturunterschied der Oberflächen von bis zu 3,9°C feststellen. Mit einem Infrarot-Thermometer wurden dann auch noch die Lufttemperaturen auf den Dächern gemessen und es zeigten sich deutliche Unterschiede: Die Lufttemperaturen auf dem Gründach der City Hall lagen zwischen 33°C und 48°C und auf dem bituminösen Flachdach bei maximal 76°C.36

In Wales wurde ein weiteres Experiment mittels eines Computerprogramms bezüglich des Mikroklimas inner- und außerhalb von Gebäuden durchgeführt. Es wurden die Temperaturen von blanken Betongebäuden mit begrünten Betongebäuden in neun verschiedenen Städten in unterschiedlichen Klimazonen miteinander verglichen. Darunter waren unter anderem Montreal (Kanada), London (England), Mumbai (Indien) und Brasilia (Brasilien). Die Ergebnisse zeigten, dass durch Dach- und Fassadenbegrünungen die Umgebungstemperatur der Gebäude in allen Städten verringert werden konnte. Je heißer das Klima in der Stadt war, umso höher war der Kühleffekt.³⁷ Anhand dieses Projektes kann man sagen, dass man mit einer Dachbegrünung im Schnitt eine Temperaturabsenkung von zirka 1°C bis 2°C erreichen kann. Um spürbare Effekte zu erzielen, sind aber begrünte Dachflächen in einem erheblich größeren Ausmaß nötig.38

Zu den allgemeinen Wirkungen von Vegetation lässt sich sagen, dass diese für die Wasserrückhaltung und die Abflussverzögerung sehr förderlich, wenn nicht sogar unbedingt notwendig sind. Ein weiterer positiver Effekt der Begrünung ist, dass diese Schadstoffe aus Niederschlagswasser und Luft filtern und somit die Qualität des Wassers als auch der Luft verbessern können. Die jeweilige Regenwasserspeicherung einer

³⁶ (vgl. Weber, 2011, S. 30)

³⁷ (vgl. Weber, 2011, S. 33)

^{38 (}vgl. Weber, 2011, S. 64)

Begrünung unterliegt aber einigen Faktoren, dazu zählen vor allem Gesamtniederschlag, klimatische Einflüsse, Art der Begrünung und die Wasserspeicherfähigkeit des Substrates.

Vegetationen sorgen vor allem auch durch die verstärkte *Verdunstung* für eine Absenkung der Lufttemperatur in der Stadt. Grünflächen können im Vergleich zu versiegelten Befestigungen größere Mengen an Wasser speichern und halten den Boden somit feuchter und kühler. Ohne ausreichende Grünflächen in der Stadt kann dies zu einer Erhöhung der Oberflächentemperaturen, des sensiblen sowie des Bodenwärmestroms und letztendlich auch einen Anstieg der Lufttemperatur zur Folge haben.³⁹

Grünflächen haben neben ihren funktionalen Vorteilen natürlich auch eine ästhetische Wirkung und im Sinne von Dach- und Fassadenbegrünungen haben sie auch ein besseres Dämmverhalten als herkömmliche Dachkonstruktionen. Der Aspekt der Nachhaltigkeit ist sehr gefragt und wird auch in Zukunft eine große Rolle in der Raumplanung spielen.

2.3.6 Einfluss von Luftzirkulation auf die lokale Temperatur

Neben den bereits erwähnten Einflussfaktoren der städtischen Wärmeinsel darf man den Einfluss des Windes nicht unterschätzen. Die atmosphärische Luftzirkulation ist für die unterschiedliche Erwärmung von äquatornahen und polnahen Regionen der Erde verantwortlich. Es gibt demnach unterschiedlich ausgedehnte Gebiete der Erdoberfläche, die durch typische großräumige Luftdruckgebilde charakterisiert sind. Unter dem Begriff der atmosphärischen Zirkulation versteht man ein vereinfachtes Modell der den Globus umspannenden atmosphärischen Zirkulationssysteme. Aufgrund der globalen Luftzirkulation haben Städte in unterschiedlichen Breitengraden ganz unterschiedliche Ausgangslagen.⁴⁰

Der Wind ist stadtklimatisch sehr nützlich, weil er im Stadtgebiet als Frischluftzubringer dient und die emissionsbelastete Luft erneuert beziehungsweise nach oben "entsorgt". Begriffe wie *Advektion* sind in der Meteorologie beziehungsweise in der Klimatologie der Städte ein sehr wichtiger Terminus. Unter Advektion versteht man die horizontale Zufuhr von Luftmassen. Im Gegensatz dazu steht der Begriff *Konvektion*, welcher den vertikalen Luftaustausch beschreibt.⁴¹

Generell versteht man in der Meteorologie den Wind als eine gerichtete, stärkere Luftbewegung in der Erdatmosphäre. Hierbei kann man verschiedene Arten von Winden

³⁹ (vgl. Schöningh, 2011, S. 73)

^{40 (}vgl. Häckel, 2005)

⁴¹ (vgl. Duden, 2013)

unterscheiden: Vor allem in der Stadt ist ein ausgeprägtes Lokalwindsystem zu beobachten. Das *Stadt-Umland-Windsystem* ist im Idealfall auf das Stadtzentrum ausgerichtet und tritt vor allem nachts oder in den frühen Morgenstunden auf. Dieses Windsystem entsteht vor allem durch Temperatur- und Druckunterschiede zwischen Stadt und dessen Umland bei warm-trockenen, austauscharmen und windstillen Hochdruckwetterlagen. Motor dieses Lokalwindsystems ist die Wärmeinsel selbst: In der Stadt herrschen höhere Temperaturen, welche ein Druck- und Temperaturgefälle zum Umland ergeben. Die Stadtluft, die sich am Tag aufheizt und aufgrund ihrer geringeren Dichte aufsteigt, bewegt sich konvektiv über die Stadt und kühlere Luft aus dem Umland strömt in Bodennähe nach. Innerhalb der Stadt sind die Windgeschwindigkeiten im Durchschnitt nur 1 m/s bis 2 m/s, weil sie durch Gebäude und Bewuchs leicht abgebremst oder sogar verschwinden können. Dieses Lokalwindsystem ist auch bekannt unter dem Namen *Flur-Windsystem*, weil es die Druckausgleichsströmungen zwischen verschiedenen Fluren beschreibt.

Für die Messungen, die in diesem Projekt durchgeführt wurden, ist der Einfluss des Windes von besonderer Bedeutung, denn die Messung wird stark durch die Umgebung beeinflusst. Die Oberflächentemperatur der einzelnen Flächen muss keine große Rücksicht auf den Wind nehmen, die Lufttemperaturen in 10 cm Höhe hingegen können sehr leicht durch Luftzirkulation beeinflusst werden, was auch an den Ergebnissen ersichtlich ist. Bei den Messungen der Lufttemperatur in 2 Meter Höhe muss der Einfluss des Windes jedenfalls berücksichtigt werden. Generell ist es wichtig zu wissen, ob sich die Versuchsfläche in einem windstillen oder windreichen Gebiet befindet. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde der Wind allerdings nicht in die Analyse einbezogen, da dies über den Rahmen hinausgehen würde.

3. Methodik

3.1 Zugrundeliegende Strahlungsgesetze⁴²

3.1.1 Kirchhoffsches Gesetz

Das Kirchhoffsche Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Absorption und Emission eines realen Körpers im thermischen Gleichgewicht. Es besagt, dass ein Körper schwarz ist, wenn er die auf ihn einfallende Strahlungsenergie vollständig absorbiert. Diese aus dem sichtbaren Spektrum entnommene Bezeichnung wird für alle Wellenlängen verwendet. Absorbiert der Körper nur einen Bruchteil der auffallenden Strahlungsenergie, dann schreibt man diesem ein Absorptionsvermögen zu, das mit der Wellenlänge veränderlich sein kann. Das Gesetz besagt, dass ein Körper bei bestimmter Wellenlänge ebenso viel Energie emittiert oder ausstrahlt, wie er von einem schwarzen Körper der gleichen Temperatur bekommt oder von dessen Emission absorbiert.

3.1.2 Plancksches Strahlungsgesetz

Das Plancksche Strahlungsgesetz gibt an, wie viel Strahlungsenergie je Wellenlängeneinheit von der Flächeneinheit eines schwarzen Körpers in der Zeiteinheit in den Einheitsraumwinkel übergeht.

3.1.3 Stefan-Boltzmann-Gesetz

Dieses physikalische Gesetz gibt an, welche Strahlungsenergie von der Flächeneinheit eines idealen schwarzen Körpers in der Zeiteinheit, integriert über alle Wellenlängen und über die Halbkugel, in Abhängigkeit von seiner Temperatur abgestrahlt wird. Jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, gibt Wärmestrahlung an seine Umgebung ab. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz gibt an, welche Strahlungsleistung B ein schwarzer Körper der absoluten Temperatur T aussendet. σ stellt die Stefan-Boltzmann-Konstante dar.

$$B(T) = \sigma \times T^4 \tag{3.1}$$

Der Wert von σ beträgt nach derzeitiger Messgenauigkeit $5.67 \times 10^{-8} \ W/(m^2 \times K^4)$.⁴³

-

⁴² (vgl. Möller, 1973, S. 11ff)

^{43 (}vgl. LD Didactic GmbH, s.a.)

Die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers ist also proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur. Eine Verdoppelung der Temperatur bewirkt, dass die abgestrahlte Leistung um den Faktor 16 ansteigt.

Hierbei muss das Emissionsvermögen auch noch erläutert werden: Das Emissionsvermögen ist eine physikalische Größe, welche die Eigenstrahlung eines Körpers kennzeichnet. Jeder Körper hat einen bestimmten Emissionsgrad ϵ (auch als Emissivität bezeichnet), welcher ein Maß dafür ist, wie stark ein Material oder ein Körper Wärmestrahlung mit seiner Umgebung austauscht. Reale Materialien haben einen Emissionsgrad zwischen 0 und 1 – zur Erklärung, ein so genannter idealer schwarzer Körper hat den Wert 1.44 Das heißt, dass die Stefan Boltzmann-Gleichung für nicht ideale schwarze Strahler noch mit dem Emissionsgrad ϵ erweitert werden muss.

$$B(T) = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \tag{3.2}$$

3.1.4 Wiensches Verschiebungsgesetz

Das Wiensche Verschiebungsgesetz gibt die Wellenlänge des Maximums der Planckschen Kurve in Abhängigkeit der Temperatur an. Das Maximum der Kurve liegt für höhere Temperaturen bei niedrigen Wellenlängen.

3.2 Standort

Die im Rahmen des Projektes zu erfolgenden Messungen werden im Nord-Osten von Wien (Österreich) durchgeführt, genauer gesagt im Stadtteil Stammersdorf (1210) auf dem Gelände der Firma Leithäusl (Nikolsburger Gasse 6). Stammersdorf liegt in der pannonischen Klimazone, welche kontinental beeinflusst wird und durch niederschlagsarme Perioden, heiße Sommer und mäßig kalte Winter gekennzeichnet ist. Stammersdorf liegt am 48. Breitengrad und am 16. Längengrad und ist 164 Meter über dem Meeresspiegel.⁴⁵

Im Rahmen dieses Projektes wurden sechs Versuchsflächen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen aus Beton und Asphalt angelegt. Rund um die Versuchsflächen wird zum Großteil Schotter als Untergrund verwendet, vereinzelt stehen Fahrzeuge und Geräte, welche aber keineswegs die Flächen beschatten. In Abbildung 3.1 kann man das umliegende Gelände sowie die Versuchsflächen selbst (rote Markierung) erkennen.

^{44 (}vgl. Paschotta, s.a.)

^{45 (}vgl. Google Maps, 2014)



Abbildung 3.1: Standort und Lage der Versuchsflächen

Die Klimadaten für Juli und August 2014 für die Wetterstation Wien Hohe Warte sind in Tabelle 3.1 abgebildet. Die Daten können für Stammersdorf übernommen werden.

Klimawerte für Wien Hohe Warte	Juli 2014	August 2014
Monatsmittel der Lufttemperatur	21,9 °C	19,0 °C
Abweichung vom Normalwert 1981-2010	1,1 °C	-1,2 °C
Maximum der Lufttemperatur	33 °C	31,2 °C
Minimum der Lufttemperatur	12,5 °C	10,0 °C
Sommertage (Tagesmaximum größer als 25°C)	25	10
Tropentage (Tagesmaximum größer als 30°C)	8	1
Niederschlagshöhe	91 mm	110 mm
Niederschlagshöhe in % des Mittelwertes 1981-2010	130	153
Maximaler Tagesniederschlag	25 mm	40 mm
Sonnenscheindauer	268 h	216 h
Sonnenscheindauer in % des Mittelwertes 1981-2010	102	86
Globalstrahlung (Tagesmaximum)	1027 W/m ²	979 W/m²

Tabelle 3.1: Klimawerte für Juli und August 2014 (ZAMG)

Für Juli wurden 268 und für August 216 Sonnenstunden aufgezeichnet. Die durchschnittliche Lufttemperatur für Juli und August betrug 21,9°C und 19,0°C. Die Globalstrahlung für die Wetterstation Wien Hohe Warte für Juli 2014 beträgt im Maximum

1027 W/m² und im August 979 W/m².⁴⁶ Erwähnenswert ist, dass sowohl Juli als auch August keine typischen Sommermonate waren, da es deutlich kühler und regnerischer war als in den Jahren zuvor.

3.3 Versuchsaufbau

Sechs Versuchsfelder mit unterschiedlichen Straßenbelagsaufbauten stellen die Versuchsgrundlage dar. Hierbei ist wichtig, dass die normativ vorgegebenen Anforderungen an die Herstellung eingehalten werden, ansonsten können die Ergebnisse nur beschränkt auf die innerstädtischen Begebenheiten übertragen werden. Aus diesem Grund gab es auch im Laufe des Forschungsprojektes eine prüftechnische Begleitung.

Die sechs Versuchsflächen weisen jeweils eine Größe von 8 m × 8 m mit unterschiedlicher Höhe auf. Neben den unterschiedlichen Zusammensetzungen haben sie aber auch Unterschiede im visuellen Charakter. Zwei der sechs Flächen sind dunkler als die anderen und somit klar der Asphaltdeckschicht zuzuordnen. Der Aufbau und die Oberflächenstruktur der einzelnen Flächen sind vergleichbar mit den Befestigungen, die derzeit im innerstädtischen Bereich zum Einsatz kommen. Wie bereits erwähnt liegt der Versuchsplatz an einem geeigneten Standort, welcher zu keiner Tageszeit beschattet ist oder durch Fahrzeuge verstellt werden kann.

Im Folgenden werden sechs Versuchsfelder charakterisiert:

- (1) Fläche 1 White Topping normal
- (2) Fläche 2 Gehsteigbereich
- (3) Fläche 3 White Topping hell
- (4) Fläche 4 Asphaltdecke (rein Asphalt)
- (5) Fläche 5 Betondecke (rein Beton)
- (6) Fläche 6 White Topping weiß

Abbildung 3.2 zeigt die Lage der Versuchsflächen aus südlicher Perspektive und in Abbildung 3.3 kann man die Nummerierung der einzelnen Flächen erkennen, um einen Überblick über die Versuchsflächen zu haben.

^{46 (}vgl. BOKU - Institut für Meteorologie, 2014)



Abbildung 3.2: Sechs Versuchsflächen aus südlicher Perspektive

Norden			
Fläche 1	Fläche 2		
White Topping normal	Gehsteigbereich		
Fläche 3	Fläche 4		
White Topping hell	Asphaltdecke		
Fläche 6	Fläche 5		
White Topping weiß	Betondecke		
Süden			

Abbildung 3.3: Nummerierung der Versuchsflächen

3.3.1 Fläche 1 - White Topping normal

Es gibt sowohl für Beton als auch für Asphalt ganz bestimmte Anforderungen. Asphaltstraßen neigen dazu Spurrinnen zu bekommen oder sich in der warmen Jahreszeit zu verformen. Um diese abgenutzten Straßenbereiche nicht komplett erneuern zu müssen, wird die Technologie des "White Topping" eingesetzt. Hierbei wird die alte, verformte Asphaltoberfläche etwa 10 cm abgefräst und nach sorgfältiger Reinigung Beton im

Verbund eingebracht. Dies stellt eine einfache und kostengünstige Alternative im Vergleich zur kompletten Sanierung der Straße dar, die nur eine Voraussetzung erfüllen muss: die dauerhaften Verbundeigenschaften zwischen Asphalt und Beton müssen gegeben sein. In Abbildung 3.4 kann man den typischen Aufbau einer White Topping-Fläche sehen.

Diese Versuchsfläche umfasst folglich eine 10 cm dicke bituminöse Tragschichte und darauf aufbauend eine 20 cm dicke ungebundene obere Tragschichte. 10 cm dieser Tragschicht wurden abgefräst und in gleicher Dicke, 10 cm, durch Beton ersetzt. Der Oberbeton wurde durch Besenstriche aufgebracht. Mit einer Gesamthöhe von 30 cm ergibt sich somit ein Volumen von 19,2 m³.



Abbildung 3.4: Fläche 1 – Aufbau White Topping

3.3.2 Fläche 2 – Gehsteigbereich

Der in Abbildung 3.5 dargestellte Gehsteigbereich umfasst eine 2,5 cm dicke Gussasphaltschicht mit Riffelung. Darunter befinden sich 10 cm Unterbeton und 10 cm ungebundene obere Tragschichte. Mit der Oberfläche von 8 m x 8 m umfasst das Volumen des Gehsteigbereiches lediglich 14,4 m³.



Abbildung 3.5: Fläche 2 - Gehsteigbereich

3.3.3 Fläche 3 – White Topping hell

Die helle White Topping-Fläche ist vom Prinzip her gleich mit der normalen White Topping-Fläche (Fläche 1) mit dem einzigen Unterschied, dass der Oberbeton mit Weißpigmenten versetzt wurde. Das Volumen ist demnach identisch und beträgt 19,2 m³.

3.3.4 Fläche 4 - Asphaltdecke

Die Asphaltfläche besteht aus 20 cm bituminöser Decke und Tragschichte und darunter liegen 30 cm ungebundene untere Tragschichte. Die Fläche mit einer Höhe von 50 cm hat ein Volumen von 32 m^3 .

3.3.5 Fläche 5 – Betondecke

Die Betonfläche besteht aus einer $20\,$ cm dicken Betonschicht, darunter liegen $5\,$ cm bituminöse Tragschichte und $45\,$ cm ungebundene untere Tragschichte. Mit einer Gesamthöhe von $70\,$ cm weist diese Versuchsfläche das mit Abstand größte Volumen von $44,8\,$ m 3 auf.

3.3.6 Fläche 6 – White Topping weiß

Die weiße White Topping-Fläche ist vom Prinzip her gleich wie die anderen beiden White Topping-Flächen (Fläche 1 und Fläche 3) mit dem Unterschied, dass der Oberbeton mit Weißzement versetzt wurde. Das Volumen beträgt wieder 19,2 m³. Diese Art des White

Toppings ist eine komplett neue Entwicklung und sollte auch die höchsten Albedo-Werten aufweisen.⁴⁷

3.4 Messsysteme

Zur Bestimmung der Albedo und zum Aufzeichnen der Temperaturen sowohl an den Oberflächen der sechs Versuchsflächen als auch in 10 cm Höhe wurden verschiedene Messsysteme verwendet, die im Folgenden erläutert werden.

3.4.1 Pyranometer

Unter einem *Pyranometer* versteht man ein Messgerät, welches die eintreffende kurzwellige, globale Sonnenstrahlung mit einem Sichtfeld von 180° misst. Pyranometer werden vor allem in der Meteorologie und Klimatologie bei Forschungen über die Solarenergie angewendet. In diesem Fall wurden SR03 Pyranometer der Marke *Hukseflux* verwendet und nach unten hin ausgerichtet, um die reflektierte Sonnenstrahlung der Oberflächen zu messen. Im Vorfeld wurde berechnet, dass das Messgerät rund 95% der von der unteren Kuppel empfangenen Strahlung der jeweiligen Versuchsfläche abdeckt. Die Ansprechzeit der Pyranometer beträgt eine Sekunde und der Spektralbereich reicht von 285 nm bis 3.000 nm. Die Empfindlichkeit liegt bei 15 × 10-6 V/W/m² und die Umgebungstemperaturen müssen zwischen -40°C und +80°C liegen, damit die angegebene Gerätegenauigkeit gewährleistet bleibt.48

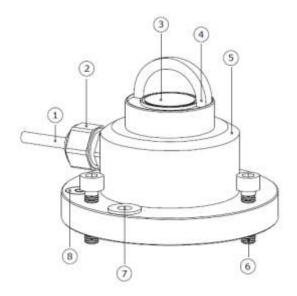


Abbildung 3.6: Überblick eines Hukseflux-Pyranometers

_

⁴⁷ (vgl. Forschungsförderungsgesellschaft, 2014, S. 6f)

⁴⁸ (vgl. Hukseflux, 2014, S. 2)

Das verwendete Hukseflux-Pyranometer, welcher in Abbildung 3.6 zu sehen ist, besteht aus einem Kabel (1) und einer dazugehörigen Kabelverschraubung (2). Der Thermalsensor mit schwarzer Thermosäule (3) wird von einem Glasdom (4) vor äußeren Umwelteinflüssen geschützt. Darunter liegt der Körper des Sensors (5). Mithilfe von verstellbaren Füßchen (6) kann man die optimale horizontale Lage des Pyranometers einstellen und diesen dann am Befestigungsloch (7) montieren. Anhang der Libelle (8) kann die waagrechte Position kontrolliert werden. Die Verwendung dieses Pyranometers ist sehr einfach, weil er über ein Signalkabel direkt mit Datenloggern verbunden werden kann. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt im Minutentakt, wobei jeweils über 60 Messwerte gemittelt wird. Auf fünf der sechs Flächen (Fläche 1 bis 5) waren Pyranometer dieses Modells aufgestellt. In Abbildung 3.7 kann man den Sensor des Pyranometers im domförmigen Schutzgehäuse zum Messen der kurzwelligen Strahlung sehen.



Abbildung 3.7: Pyranometer (parallel zum Boden montiert)

3.4.2 Bilanzmesser

In meiner Masterarbeit wurden neben den Pyranometer auch noch *CNR 4 Net Radiometer*, oder auch *Bilanzmesser*, von *Kipp & Zonen* verwendet (Abbildung 3.8 und 3.9). Unter einem Bilanzmesser versteht man eine Kombination aus zwei Pyranometer und zwei Pyrgeometer, er besteht also insgesamt aus vier Komponenten. Jeweils ein Pyranometer und ein Pyrgeometer sind nach unten gerichtet, die anderen beiden Sensoren nach oben. Pyranometer messen die kurzwellige und Pyrgeometer die langwellige Strahlung. Der Bilanzmesser misst demnach sowohl die langwellige und kurzwellige Strahlung von oben

(Himmelsstrahlung), als auch die langwellige und kurzwellige reflektierte Strahlung der Oberfläche. Die domförmigen Bereiche des Bilanzmessers (ganz außen, gewölbt) messen die kurzwelligen Strahlungen und sorgen dafür, dass bei Regen die Regentropfen leichter abrinnen und somit das Sichtfeld von 180° nicht beeinträchtigen. Die flachen Bereiche haben nur ein Sichtfeld von 150° bis 170° und sind für die Messung der langwelligen Strahlung verantwortlich. Alle vier Sensoren sind in einem Gehäuse verstaut. Sie wurden jedoch separat kalibriert, um eine entsprechende Genauigkeit erzielen zu können. Zusätzlich zu den vier Sensoren sind auch noch zwei Thermometer im Bilanzmesser integriert. Dieses Messgerät wurde nur auf Fläche 6 fix aufgestellt und verwendet.

Die Spektralbereiche der Pyranometer reichen im kurzwelligen Bereich von 300 nm bis 2.800 nm und im langwelligen Bereich (Pyrgeometer) von 4.500 nm bis 42.000 nm. Die Empfindlichkeit des Bilanzmessers liegt bei 5 bis 20 μ V/W/m². Der Betriebstemperaturbereich liegt wie beim Pyranometer zwischen -40°C und +80°C, die Ansprechzeit beträgt weniger als 18 Sekunden.⁴⁹ Auch der Bilanzmesser kann direkt mit einem Datenlogger verbunden werden, um die Daten im Minutentakt abspeichern zu können.



Abbildung 3.8: Bilanzmesser (von unten)

-

⁴⁹ (vgl. Kipp & Zonen, 2014, S. 1ff)



Abbildung 3.9: Bilanzmesser (von oben)

Erwähnenswert hierbei ist, dass jeder Körper eine langwellige Strahlungsemission hat, das heißt, dass jeder Körper – auch der Bilanzmesser selbst – langwellige Strahlung emittiert und nicht nur die Sonnenstrahlung oder Wärmeabstrahlung der Oberfläche absorbiert. Der Energieverlust wird anhand der Gehäusetemperatur und des Stefan-Boltzmann-Gesetzes berechnet. Diese langwellige emittierte Strahlung wird zur langwelligen absorbierten Strahlung addiert, um die gesamte auf den Sensor einfallende langwellige Strahlung zu erhalten. Als Ergebnis bekommt man die so genannte *Netto-Energie* oder *Netto-Strahlung*, welche proportional zur Temperatur ist.

3.4.3 Thermoelemente

Ein Thermoelement besteht aus zwei unterschiedlichen, leitfähigen Materialien, die elektrisch miteinander verbunden beziehungsweise zusammengelötet werden. Zwischen den zwei Enden wird eine Spannung erzeugt, die von der Temperaturdifferenz zwischen den Enden und der Kontaktstelle abhängt. Thermoelemente können durch Thermoelektrizität Wärme in elektrische Energie umwandeln und messen somit die Temperaturen verschiedener Oberflächen. Erwähnenswert ist, dass die dünnen Drähte aufgrund ihrer geringen Oberfläche zu keinem Strahlungsfehler führen. Die Drähte selbst nehmen kaum Wärme durch die Sonneneinstrahlung auf und verfälschen die Messungen deswegen auch nicht. Ein solches Thermoelement, wie man es in Abbildung 3.10 sehen kann. wurde ieder einzelnen Versuchsfläche angebracht, die Oberflächentemperaturen zu messen.



Abbildung 3.10: Thermoelement

Zusätzlich zu den Messungen der Oberflächentemperaturen wurden auch Temperaturmessungen in einer Höhe von zirka 10 cm durchgeführt. Diese Messgeräte werden *Strahlungsschutz* genannt und sollen die Abkühlung der Lufttemperatur über der jeweiligen Fläche messen. Diese Temperaturmessgeräte (Abbildung 3.11) wurden beabsichtigt nicht ventiliert, um die einzelnen Luftschichten in so einer geringen Höhe nicht zu zerstören, denn genau die stufenweise Abkühlung ist das Interessante an der Messung.



Abbildung 3.11: Temperaturmessgerät (Strahlungsschutz) in 10 cm Höhe

3.4.4 Wetterstation

Des Weiteren wurde eine *Wetterstation* in einer Höhe von 2 Meter auf Fläche 6 für den gesamten Verlauf des Projektes montiert (Abbildung 3.12). Eine Wetterstation ist eine Zusammenstellung verschiedenster Messgeräte, die zur Messung meteorologischer Größen an einem bestimmten Ort dienen. Mithilfe von Thermometern, Barometern, Hygrometern, Wind- und Regenmessern konnten Messdaten wie Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Wind und Niederschlagsmenge erfasst und mittels eines Datenloggers aufgezeichnet werden. Für die vorliegende Masterarbeit wurden aber nur die Daten bezüglich der Lufttemperatur verwendet.



Abbildung 3.12: Wetterstation

3.4.5 Campbell Scientific Datenlogger

Der im Projekt verwendete *Datenlogger* ist von der Marke *Campbell Scientific*, welcher ein Messgerät für Langzeitüberwachungen ist. Er besteht aus einem Mess- und Steuerungssystem und der Anschlussleiste. Der verwendete Datenlogger CR1000, welchen man in Abbildung 3.13 sehen kann, ist ein kompakter Datenlogger mit externer Stromversorgung. In diesem Fall wurde der Strom mittels eines kleinen Solarpanels generiert, welches auf Fläche 6 aufgestellt wurde. Während der Nacht wurde die Stromzufuhr durch einen angeschlossenen Akkumulator abgedeckt.



Abbildung 3.13: Campbell Scientific Datenlogger CR1000

Der CR1000 besitzt acht differenzielle (16 single-ended) analoge Eingänge, zwei Pulszähler und acht digitale I/O-Ports und wurde mittels einer RS-232-Schnittstelle durch einen Adapter über USB mit einem Laptop verbunden. Zirka zweimal pro Woche wurden die Daten des internen Speichers abgelesen, um wieder Platz für neue Daten sicherzustellen. Mit dem *PakBus*-Betriebssystem wurde die Datensammlung in Logger-Netzwerken generiert. In diesem Fall wurde der Laptop mit der Computersoftware *LoggerNet* programmiert, um die gesammelten Daten des Datenloggers abrufen zu können. Die Messungen selbst erfolgen im Minutentakt, wobei der Datenlogger die Sekundenwerte zu einem Mittelwert zusammenfasst und diesen dann abspeichert. Der Datenlogger verfügt über 4 Megabyte internen Speicher für Daten und Programme, welcher aber durch aufsteckbare Systeme noch erweitert werden könnte.⁵⁰

Neben dem CR1000 wurde auch noch ein etwas älteres Modell (CR200) für die Daten der Wetterstation verwendet.

3.4.6 Thermische Infrarotsensoren

Thermische Infrarotsensoren (IR Sensoren) sind lichtempfindliche optoelektronische Bauelemente, deren spektrale Empfindlichkeit im Infrarot-Wellenlängenbereich (850 nm bis 50.000 nm) liegen. Mithilfe der Infrarot-Sensoren (Abbildung 3.14) wurde die unterschiedliche reflektierte Strahlung der Bodenoberflächen im infraroten Bereich gemessen. Die Daten der Infrarot-Sensoren wurden auf SD-Karten gespeichert und zur weiteren Verwendung zur Verfügung gestellt.

⁵⁰ (vgl. Campbell Scientific, 2014)



Abbildung 3.14: Thermischer Infrarot-Sensor (rote Markierung) mit Solarzelle

3.4.7 Wärmebildkamera

Um die Temperaturunterschiede der einzelnen Flächen auch visuell erkennen zu können, wurde eine *Wärmebildkamera* herangezogen. Die verwendete Wärmebildkamera ist von der Marke *Flir* und hat die Modellnummer E60 (Abbildung 3.15). Wärmebildkameras (oder auch Thermalkameras) sind bildgebende Geräte ähnlich herkömmlicher Kameras, welche zusätzlich Infrarotstrahlung messen können. Die Infrarot-Auflösung beträgt 320 × 240 Pixel und die thermische Empfindlichkeit ist weniger als 0,05°C. Der Betriebstemperaturbereich liegt zwischen -20°C und +120°C. Die normale Atmosphäre wird durch die Thermalkamera weitgehend als transparent dargestellt, somit stören die seitliche Einstrahlung der Sonne sowie künstliche Lichtquellen bei kleineren Distanzen kaum. Die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen der fotografierten Körper werden in verschiedenen Farben dargestellt, um es für das menschliche Auge besser sichtbar zu machen. Die Farbpalette reicht von arktisch, grau, eisengrau, lavafarbig bis hin zu Farben

des Regenbogens: Blau stellt die Oberflächen mit den geringsten Temperaturen dar, rot hingegen werden die wärmsten Oberflächen angezeigt.⁵¹

Die Fotos, welche mit der Wärmebildkamera gemacht wurden, wurden als JPEG mit den zugehörigen Messdaten abgespeichert. Gleichzeitig entsteht sowohl eine sichtbare Aufnahme, als auch eine thermische Infrarot-Aufnahme, um den Vergleich besser darstellen zu können.



Abbildung 3.15: Flir Thermalkamera E60

3.5 Datengrundlagen

Mit diesem Projekt sollen verschiedene Messgrößen bewertet werden. Hauptaugenmerk liegt auf dem Reflexionsvermögen der jeweiligen Fläche. Wie bereits erwähnt wird das Reflexionsvermögen durch eine Zahl zwischen 0 und 1 beschrieben und gibt Auskunft darüber, welcher Anteil der auftreffenden Strahlung reflektiert wird. Je nach Situation kann ein hohes oder niedriges Reflexionsvermögen beabsichtigt sein. Im Fall dieses Projekts ist ein hohes Reflexionsvermögen erwünscht.

Des Weiteren wurden im Rahmen dieses Projekts auch die Oberflächentemperaturen, sowie die Temperatur in 10 cm und 2 Meter Höhe gemessen. Somit kann die Temperaturabsenkung zwischen der Oberfläche und der 10 cm hohen Luftschicht erfasst

_

⁵¹ (vgl. Flir, 2013, S. 1ff)

werden und auf die Wärmekapazität der einzelnen Flächen geschlossen werden. Im Gegensatz dazu gibt der Temperaturmesswert der Wetterstation in 2 Meter Höhe einen Referenzwert der Umgebungstemperatur an.

3.6 Auswertungshilfen

Um die Rohdaten auslesen zu können, wurde die Software *LoggerNet* verwendet. Diese Software kann entsprechend programmiert werden, Daten abrufen und auch anzeigen. Sie besteht aus einer Server-Anwendung und mehreren Clients, die in einem Produkt kombiniert sind. Man kann die Software auch zur Verbindung mit mehreren Loggern in einem Netzwerk einsetzen. Die neueste Version 4.1 enthält ein Werkzeug zum einfachen Aufbau von PakBus Netzwerken, welche für dieses Projekt verwendet wurden.⁵² In Abbildung 3.16 kann man ein typisches Menü der genannten Software sehen.

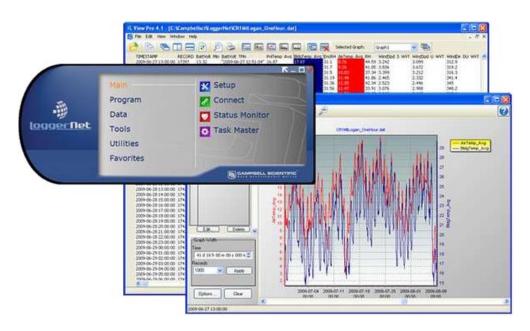


Abbildung 3.16: LoggerNet – Datenlogger Support Software

Die *Envi-Met* Software ist eine weitere Auswertungshilfe, die zur Beurteilung der Wärmeempfindung des Menschen herangezogen wurde. Diese Software ist ein dreidimensionales, urbanes Mikroklima-Modell und berechnet sowohl den Tagesgang der Oberflächentemperaturen, Lufttemperaturen und -feuchte, Strahlungsflüsse sowie Windgeschwindigkeit und -richtung. Typische Einsatzgebiete sind unter anderem Stadtklimatologie, Architektur, Gebäudeplanung und Umweltplanung. Mittels dieser Software kann man den schon genannten PMV-Wert berechnen und graphisch darstellen. Entsprechende Graphiken werden im fünften Abschnitt angeführt.

⁵² (vgl. Campbell Scientific, 2014)

4. Ergebnisse

4.1 Albedo

Mittels der Datenlogger wurden sämtliche Daten der Albedo-Werte auf den Laptop überspielt und fortan bearbeitet. Die Albedo ist das Verhältnis zwischen kurzwelliger Strahlung von unten und kurzwelliger Strahlung von oben.

Einführend wurden die vier Komponenten-Messungen des Bilanzmessers auf Fläche 6 an zwei unterschiedlichen Tagen (11. Juli 2014 und 15. Juli 2014) verglichen. Dazu wurde die gesamte Strahlungsleistung (in W/m^2) zwischen 10:00 Uhr und 18:00 Uhr für beide Tage aufgeteilt in kurz- und langwellig sowie von oben und unten ausgewertet.

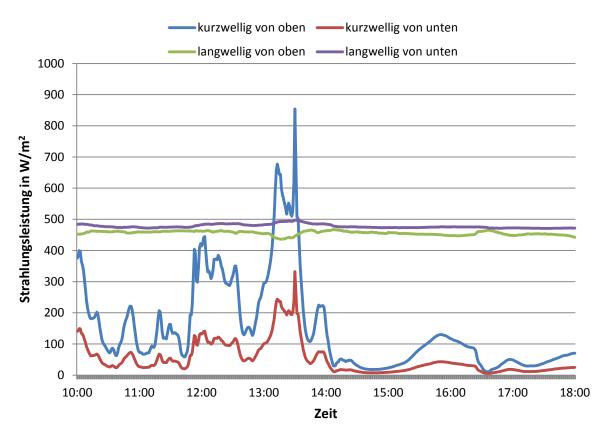


Abbildung 4.1: Messungen des Bilanzmessers am 11. Juli 2014 von 10:00 Uhr bis 18:00 Uhr

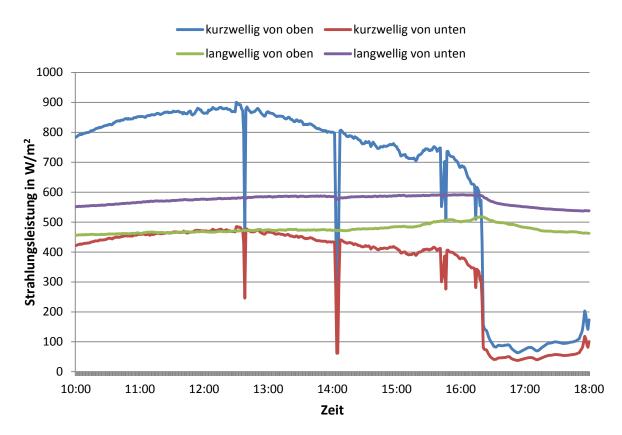


Abbildung 4.2: Messungen des Bilanzmessers am 15. Juli 2014 von 10:00 Uhr bis 18:00 Uhr

In den Abbildungen 4.1 und 4.2 kann man deutliche Unterschiede in der gesamten Strahlungsleistung innerhalb der acht Stunden erkennen. Der 11. Juli (Abbildung 4.1) war ein kalter, regnerischer, wolkiger Tag, was man unschwer an der geringen kurzwelligen Strahlung von oben erkennen kann. An diesem Tag liegt der Mittelwert über alle acht Stunden bei zirka 150 W/m². Am 15. Juli (Abbildung 4.2) hingegen konnte durch die starke Sonneneinstrahlung ein Mittelwert von rund 650 W/m² erzielt werden. Die langwellige Strahlung von oben ist allerdings an beiden Tagen ziemlich gleich. Die langwellige Strahlung von unten ist an beiden Tagen höher ist als die langwellige Strahlung von oben: Die kurzwellige Sonneneinstrahlung wird an der Oberfläche reflektiert oder absorbiert. Der absorbierte Teil wird als langwellige Strahlung wieder in die Atmosphäre zurück geschickt. Die langwellige Wärmestrahlung der Oberflächen ist also höher als die langwellige Sonnenstrahlung.

Zusätzlich zu den kontinuierlichen Messungen der einzelnen Flächen wurde am 17. Juli 2014 eine mobile Messstation aufgebaut. Die mobile Station bestand aus einem Bilanzmesser, der auf einem mobilen Teleskopmast mit Dreibein montiert wurde. Sinn und Zweck dieser mobilen Messstation war es, die Richtigkeit der Messungen der einzelnen Pyranometer und des Bilanzmessers sicherzustellen. Im Laufe von ungefähr zwei Stunden wurde die mobile Station zirka im 15-Minutentakt von einer Fläche zur

nächsten getragen (Tabelle 4.1). Auf der jeweiligen Fläche wurde dann zu Beginn zeitgleich der mobile sowie der fixe Bilanzmesser (auf Fläche 6) mittels Decken für eine Minute abgeschattet, um zwischen den einzelnen Flächen unterscheiden zu können. Nach den 15 Minuten wurden die beiden Bilanzmesser erneut abgeschattet und die mobile Messstation auf die nächste Fläche getragen. Dieser Vorgang wurde auf jeder Fläche wiederholt bis man für alle Flächen einen Referenzwert hatte.

Uhrzeit		Intervall	
von	bis		
08:45	09:10	25	Minuten
09:29	09:46	17	Minuten
09:51	10:15	24	Minuten
10:22	10:37	15	Minuten
10:44	11:02	18	Minuten
11:08	11:24	16	Minuten
	von 08:45 09:29 09:51 10:22 10:44	von bis 08:45 09:10 09:29 09:46 09:51 10:15 10:22 10:37 10:44 11:02	von bis 08:45 09:10 25 09:29 09:46 17 09:51 10:15 24 10:22 10:37 15 10:44 11:02 18

Tabelle 4.1: Begehung der Versuchsflächen mit dem mobilen Bilanzmesser

In Abbildung 4.3 kann man die kurzwellige Strahlung von oben und von unten der unterschiedlichen Flächen im Verhältnis zueinander sehen. Auch hier kann man die zwei dunkleren Oberflächen, also Fläche 4 – Asphaltdecke und Fläche 2 – Gehsteigbereich, deutlich erkennen, da sie eine geringe kurzwellige Strahlung von unten im Gegensatz zu den Betonoberflächen aufweisen. Die beinahe senkrechten Linien sind deshalb zu sehen, weil man für die Bestimmung der Strahlungsleistung der einzelnen Flächen immer zwischen jeder Fläche den Bilanzmesser abschatten musste, um nachzuvollziehen, wann über welcher Fläche gemessen wurde.

In Abbildung 4.4 wurden die jeweiligen Albedo-Werte der einzelnen Flächen im Verlauf nacheinander dargestellt. In dieser Abbildung wurden die senkrechten Linien entfernt, um die Albedo gleich mit dem ersten Blick besser erkennen zu können. Man sieht, dass Fläche 6 – White Topping weiß die höchsten Albedo-Werte aufweist. Allgemein kann man also sagen, dass die mobile Messstation die Reihung der Albedo-Werte der einzelnen Flächen bestätigt und zu denselben Ergebnissen, wie die Pyranometer und der fixe Bilanzmesser, geführt hat. Somit hat sich die Annahme bestätigt, dass Fläche 6 - White Topping weiß das höchste Reflexionsvermögen aufweist.

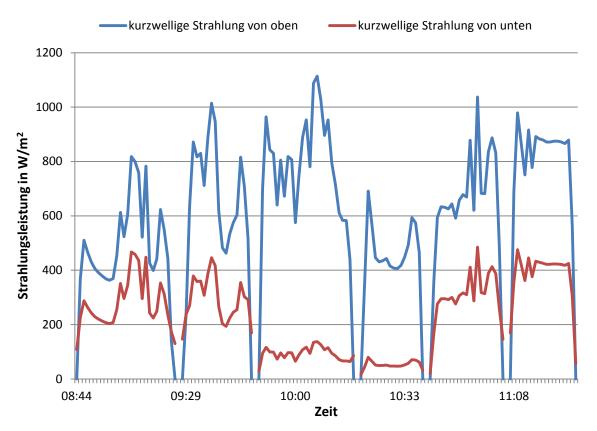


Abbildung 4.3: Messung der einfallenden und der reflektierten kurzwelligen Strahlung über alle sechs Versuchsflächen mithilfe der mobilen Messstation

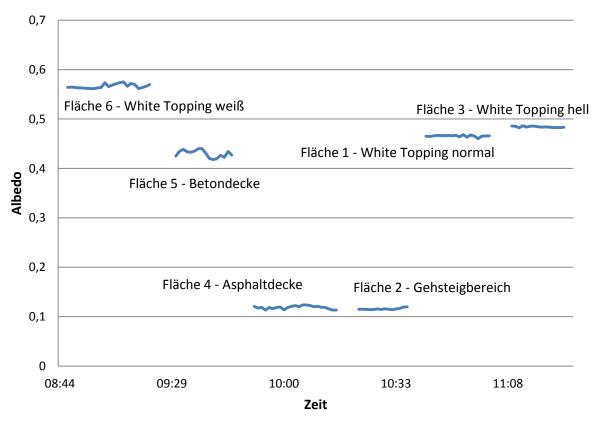


Abbildung 4.4: Albedo-Werte der mobilen Messstation im Verlauf

Um die Albedo zweier wettertechnisch unterschiedlicher Tage miteinander zu vergleichen, wurden die Tagesgänge der Albedo aufgezeichnet. Abbildung 4.5 zeigt den Tagesgang der Albedo am kühleren und nicht so sonnigen Tag (11. Juli 2014) von 10:00 Uhr bis 18:00 Uhr.

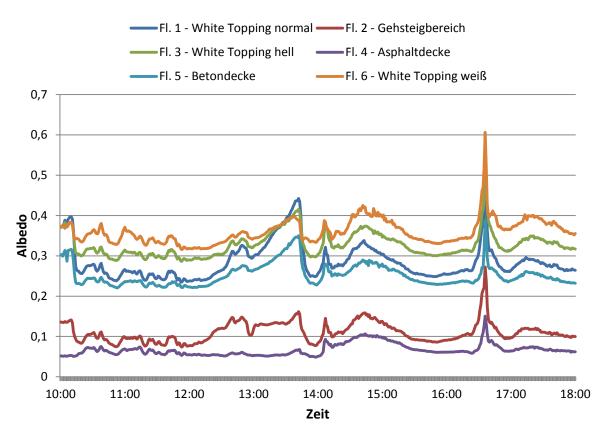


Abbildung 4.5: Tagesgang der Albedo am 11. Juli 2014 von 10:00 Uhr bis 18:00 Uhr

In Abbildung 4.5 kann man zum Teil große Unterschiede in der Albedo zwischen den einzelnen Flächen erkennen. Die rote und die violette Linie stellen den Gehsteigbereich und die Asphaltdecke dar, welche durch deutlich niedrigere Albedo-Werte leicht erkennbar sind. Die anderen vier Flächen, hier gekennzeichnet in orange, blau, hellgrün und türkis, stellen die Befestigungen mit einer Betondeckschicht dar. Die Albedo-Werte dieser vier Flächen liegen knapp beieinander, die reine Betonfläche ist hierbei das Schlusslicht. Die White Topping-Beläge haben das höchste Reflexionsvermögen, wobei Fläche 6 – White Topping weiß die höchsten Werte erreicht. Um etwa 16:30 Uhr kann man kurzzeitig eine starke Sonneneinstrahlung erkennen.

Im Gegensatz dazu wurde in Abbildung 4.6 der sonnige Tag dargestellt, um auch hier die Albedo-Werte anschaulich zu machen. Die nachfolgende Graphik zeigt den Tagesgang der Albedo am 15. Juli 2014 von 04:45 Uhr bis 18:45 Uhr, die Zeit zwischen Sonnenaufgang und -untergang.

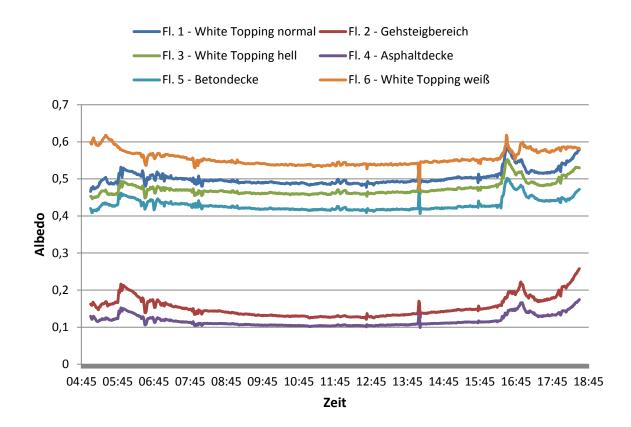


Abbildung 4.6: Tagesgang der Albedo am 15. Juli 2014 von 04:45 Uhr bis 18:45 Uhr

Klar ersichtlich sind die höheren Albedo-Werte im Vergleich zu Abbildung 4.5. Die Flächen mit Betondeckschicht weisen hier viel höhere Albedo-Werte auf als am 11. Juli 2014. Die Albedo-Werte des Gehsteigbereichs und der Asphaltdecke sind aber nur eine Spur höher als am Vergleichstag. Generell kann man sagen, dass die Albedo-Werte an einem sonnigen Tag höher sind als an einem bewölkten Tag.

Um die Unterschiede der Albedo noch deutlicher zu machen, wurden die jeweiligen Mittelwerte mit ihrer Standardabweichung der einzelnen Flächen vom 11. Juli 2014 bis 16. Juli 2014 zwischen 10:00 Uhr und 18:00 Uhr berechnet.

	Fläche 1	Fläche 2	Fläche 3	Fläche 4	Fläche 5	Fläche 6
11.07.2014	$0,28 \pm 0,04$	0,11 ± 0,02	$0,32 \pm 0,03$	0,06 ± 0,01	$0,25 \pm 0,02$	$0,36 \pm 0,03$
12.07.2014	$0,48 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$	$0,46 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,00$	$0,41 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,02$
13.07.2014	$0,41 \pm 0,10$	$0,15 \pm 0,07$	$0,42 \pm 0,07$	$0,10 \pm 0,08$	$0,34 \pm 0,09$	$0,45 \pm 0,08$
14.07.2014	$0,49 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,01$	$0,46 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,00$	$0,42 \pm 0,00$	$0,54 \pm 0,01$
15.07.2014	$0,50 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$	$0,42 \pm 0,01$	$0,54 \pm 0,01$
16.07.2014	0,49 ± 0,01	$0,14 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,01$	0,11 ± 0,00	$0,42 \pm 0,01$	0,54 ± 0,01

Tabelle 4.2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Albedo der sechs unterschiedlichen Flächen von 11. Juli 2014 bis 16. Juli 2014 von 10:00 Uhr bis 18:00 Uhr

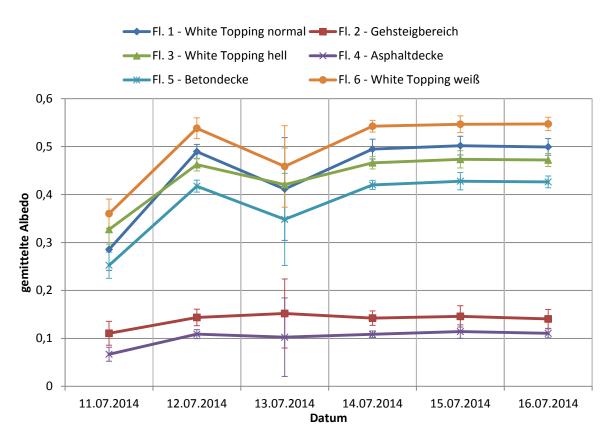


Abbildung 4.7: Graphische Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Albedo von 11. Juli 2014 bis 16. Juli 2014 von 10:00 Uhr bis 18:00 Uhr

In Abbildung 4.7 und in Tabelle 4.2 kann man erkennen, dass Fläche 6 – White Topping weiß mit Abstand die höchsten Mittelwerte der Albedo an jedem der sechs Tage aufweist. Das Schlusslicht hinsichtlich der Albedo-Werte nimmt Fläche 4 – Asphaltdecke ein. Bei genauerer Betrachtung kann man größere Standardabweichungen für den 13. Juli 2014 erkennen. Diese lassen sich dadurch erklären, dass dies ein regnerischer und unbeständiger Tag war und die nassen Oberflächen aufgrund der veränderten Reflexion für Schwankungen in den Albedo-Werten gesorgt haben.

4.2 Temperaturen

Neben den Untersuchungen der Albedo wurden auch noch Temperaturmessungen auf allen Flächen durchgeführt. Auf jeder Fläche wurden Thermoelemente montiert, um die direkte Oberflächentemperatur zu messen. Zudem wurde auf allen sechs Flächen ein Strahlungsschutz in 10 cm Höhe montiert, um die Abkühlung der untersten Luftschichten messen zu können. Neben diesen zwei Temperaturen wurde auf Fläche 6 auch noch eine Wetterstation aufgebaut, um die Temperatur in 2 Meter Höhe zu messen, welche als Referenzwert für ein großes Einzugsgebiet gesehen werden kann. Bei der Erstellung der Graphiken wurde die Windgeschwindigkeit nicht einbezogen, da dies über den Rahmen dieser Masterarbeit hinausgehen würde.

Hierbei ist der Bodenwärmestrom zu erwähnen, welcher den Energietransport zwischen einer Erdoberfläche und ihrem Untergrund darstellt. Tagsüber wird die Erdoberfläche gegebenenfalls durch intensive Sonneneinstrahlung stark aufgeheizt und der Wärmetransport erfolgt in den Untergrund hinein. Diese gespeicherte Energie kann in der Nacht dann wieder abgegeben werden. Der Bodenwärmestrom ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität des Bodens sowie vom vertikalen Gradienten der Erdbodentemperatur.⁵³

Von 25. Juli 2014 bis 30. Juli 2014 wurden drei verschiedene Temperaturen miteinander verglichen. In Abbildung 4.8 kann man den Vergleich der Temperatur in 2 Meter Höhe und der Oberflächentemperaturen von Fläche 4 und Fläche 6 sehen. Man kann erkennen, dass die Asphaltdecke Oberflächentemperaturen von mehr als 50°C erreicht, im Gegensatz dazu erreicht Fläche 6 – White Topping weiß eine maximale Temperatur von 38°C. Die berechneten Mittelwerte von 25. Juli 2014 11:00 Uhr bis 30. Juli 2014 13:00 Uhr belaufen sich für die Asphaltfläche auf 31,71°C, für die White Topping Fläche auf 24,82°C und für die Temperatur in 2 Meter Höhe auf 22,36°C. Erwähnenswert hierbei ist, dass der Wind in einer Höhe von 2 Meter einen sehr großen Einfluss auf die Temperaturentwicklung hat und die Bodenbeschaffenheit selbst eine untergeordnete Rolle spielt.

 $^{\rm 53}$ (vgl. Lexikon der Geowissenschaften, 2000)

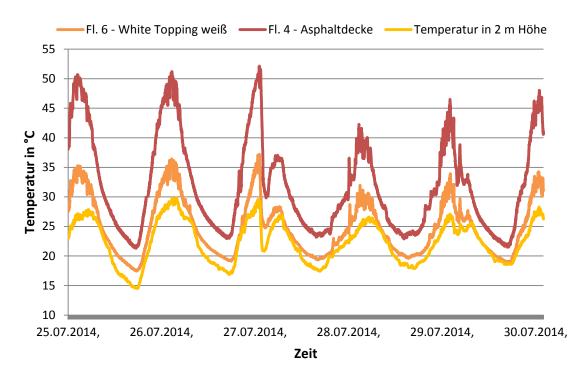


Abbildung 4.8: Vergleich der Temperaturen von 25. Juli 2014 11:00 Uhr bis 30. Juli 2014 13:00 Uhr

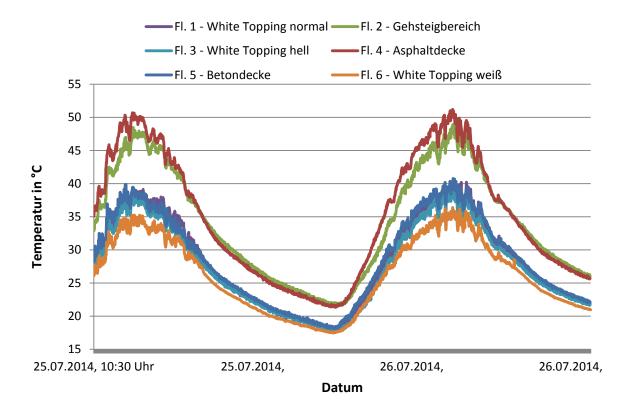


Abbildung 4.9: Tagesgang der Oberflächentemperaturen von 25. Juli 2014 10:30 Uhr bis 27. Juli 00:00 Uhr

In Abbildung 4.9 wurde der Tagesgang der Oberflächentemperaturen der sechs einzelnen Flächen vom 25. Juli 2014 10:30 Uhr bis 27. Juli 2014 00:00 Uhr dargestellt. Die Temperaturen der einzelnen Versuchsflächen zeigen einen nahezu gleichen Verlauf, wobei Fläche 2 – Gehsteigbereich und Fläche 4 – Asphaltdecke die höchsten Temperaturen aufweisen. Die niedrigste Oberflächentemperatur hat Fläche 6 – White Topping weiß. Auf der Abbildung kann man auch den Tages- und Nachtgang der Temperaturen deutlich erkennen. In der Nacht liegen die Temperaturen näher beisammen als untertags.

In der folgenden Abbildung 4.10 kann man den Tagesgang der Temperaturen in 10 cm Höhe beobachten und man kann daraus schließen, dass der Wind selbst in so einer geringen Höhe einen recht großen Einfluss auf die Temperaturentwicklung hat. Denn die Temperaturen in 10 cm Höhe verlaufen generell ziemlich gleich, egal über welcher Fläche gemessen wurde. Aufgrund eines Messausfalls des Thermometers auf Fläche 6 konnten leider nur fünf der sechs Flächen auf einer Abbildung miteinander verglichen werden.

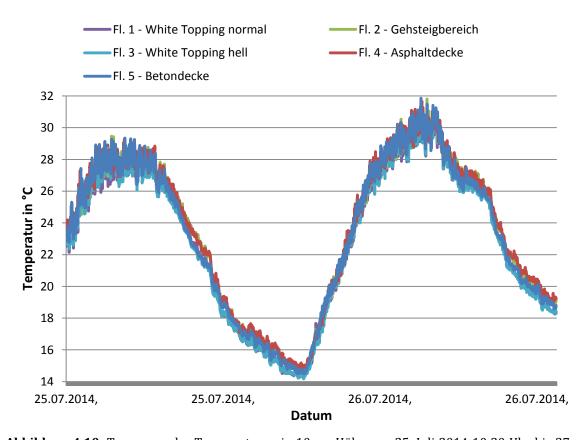


Abbildung 4.10: Tagesgang der Temperaturen in 10 cm Höhe von 25. Juli 2014 10:30 Uhr bis 27. Juli 00:00 Uhr

Um die Temperaturdifferenzen der beiden unterschiedlichsten Flächen miteinander zu vergleichen, wurde Fläche 3 – White Topping hell und Fläche 4 – Asphaltdecke

herangezogen (Abbildung 4.11). Man kann unschwer erkennen, dass die Temperaturen untertags größere Unterschiede aufweisen als in der Nacht.

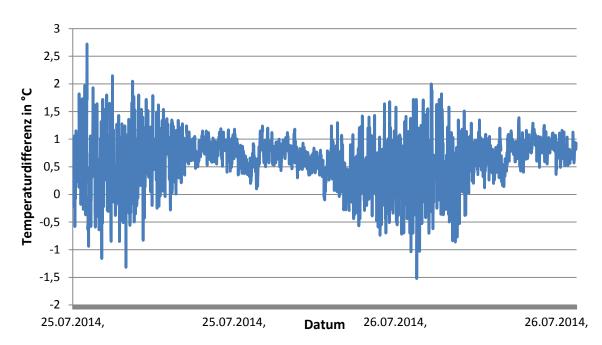


Abbildung 4.11: Temperaturdifferenzen von Fläche 3 – White Topping hell und Fläche 4 – Asphaltdecke in 10 cm Höhe von 25. Juli 2014 10:30 Uhr bis 27. Juli 00:00 Uhr

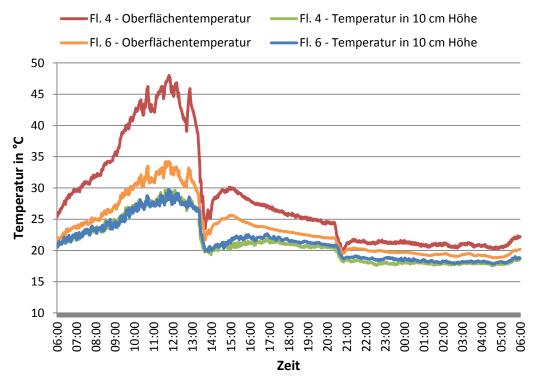


Abbildung 4.12: Vergleich der Oberflächentemperaturen mit den Temperaturen in 10cm Höhe zweier ausgewählter Flächen von 30. Juli 2014 06:00 Uhr bis 31. Juli 2014 06:00 Uhr

In Abbildung 4.12 kann man den Unterschied zwischen den Bodentemperaturen und den Temperaturen in 10 cm Höhe von zwei unterschiedlichen Flächen sehen, es wurden Fläche 4 – Asphaltdecke und Fläche 6 – White Topping weiß im Vergleich zueinander dargestellt. Für die Darstellung wurde der 30. Juli von 06:00 Uhr bis 31. Juli 06:00 Uhr herangezogen. Auf der Abbildung kann man sehen, dass die Temperaturen beider Flächen nahezu parallel zueinander verlaufen. Die Oberflächentemperatur von Fläche 4 – Asphaltdecke ist aber um einiges höher ist als die der Fläche 6 – White Topping weiß. Bei den Temperaturen in 10 cm Höhe hingegen lassen sich keine allzu großen Unterschiede der Temperaturen beider Flächen feststellen.

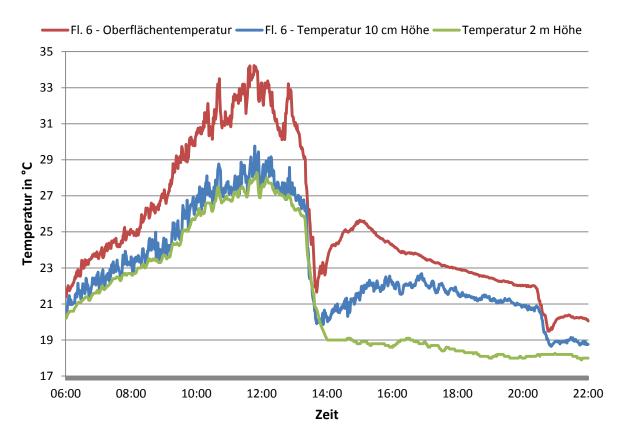


Abbildung 4.13: Vergleich von Oberflächentemperatur, Temperatur in 10 cm und 2 m Höhe auf Fläche 6 – White Topping weiß am 30. Juli 2014 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr

In Abbildung 4.13 sieht man einen Vergleich der Oberflächentemperatur, der Temperatur in 10 cm als auch in 2 m Höhe auf Fläche 6. Der gemessene Zeitraum ist der 30. Juli 2014 zwischen 06:00 Uhr und 22:00 Uhr. Untertags liegt die Oberflächentemperatur natürlich über der Temperatur in 10 cm als auch in 2 Meter Höhe.

Um die Unterschiede der Oberflächentemperaturen noch deutlicher zu machen, wurden die jeweiligen Mittelwerte der einzelnen Flächen mit ihrer Standardabweichung vom 25.

Juli 2014 bis 28. Juli 2014 zwischen 11:00 Uhr und 19:00 Uhr berechnet und in Tabelle 4.3 dargestellt.

	Fläche 1	Fläche 2	Fläche 3	Fläche 4	Fläche 5	Fläche 6
25.07.2014	34,70±3,07	42,29±3,92	33,40±2,99	43,98±4,69	34,60±3,10	31,53±2,37
26.07.2014	34,66±3,73	41,92±4,52	33,81±3,49	43,30±5,61	35,13±3,67	31,72±2,95
27.07.2014	30,18±4,10	35,49±5,61	29,18±6,29	36,92±6,29	30,42±4,57	28,11±3,37
28.07.2014	29,60±2,10	34,35±2,60	28,76±1,83	35,94±2,98	29,60±1,86	27,85±1,69

Tabelle 4.3: Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Versuchsflächen von 25. Juli 2014 bis 28. Juli 2014 von 11:00 Uhr bis 19:00 Uhr

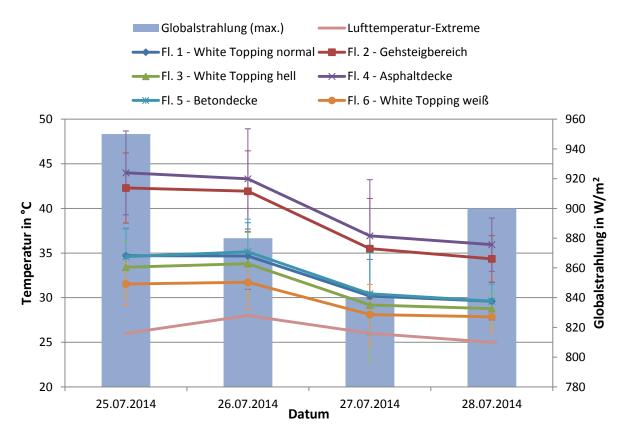


Abbildung 4.14: graphische Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Oberflächentemperaturen zwischen 11:00 Uhr und 19:00 Uhr sowie der maximalen Globalstrahlung und der Lufttemperatur-Extreme in 2 m Höhe des jeweiligen Tages

Anhand Tabelle 4.3 und Abbildung 4.14 kann man die Mittelwerte und Standardabweichungen der Oberflächentemperaturen der sechs Versuchsflächen vergleichen und man kann deutlich erkennen, dass Fläche 2 und 4 deutlich wärmer sind als die restlichen vier Flächen. Die Asphaltdeckschicht weist im Durchschnitt über den genannten Zeitraum (25. Juli bis 28. Juli 2014) die höchsten Temperaturen mit knapp 40°C auf und Fläche 6 – White Topping weiß hat wie erwartet im Durchschnitt die niedrigsten

Temperaturen mit rund 30°C. Des Weiteren wurde die maximale Globalstrahlung (blaue Balken) auf der Sekundärachse und die Lufttemperatur-Extreme (rosa) der jeweiligen Tage dargestellt. Da die Temperaturen in 10 cm Höhe über jeder Versuchsfläche annähernd gleich sind, wurde hierbei keine Gegenüberstellung gemacht.

4.3 Wärmebildkamera

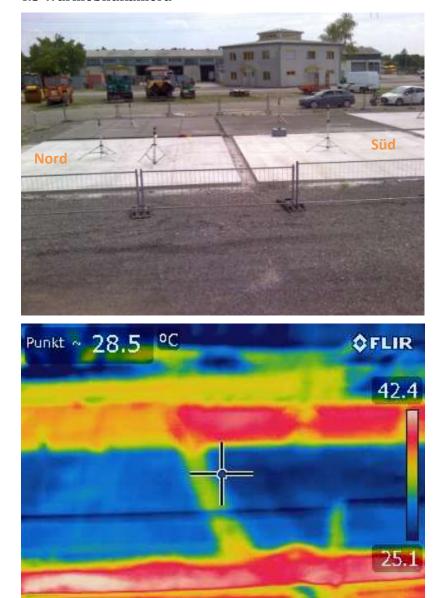


Abbildung 4.15: Foto im sichtbaren Wellenlängenbereich (oben) und im infraroten Wellenlängenbereich (unten)

In Abbildung 4.15 kann man Fotos der Wärmebildkamera sehen. Anhand der Farbgebung kann man erkennen, dass sowohl die Oberflächentemperatur des Gehsteigbereichs (links hinten) als auch der Asphaltdecke (rechts hinten) deutlich wärmer sind als die zwei

Versuchsflächen der White Topping-Flächen im Vordergrund. Die Temperaturen auf den beiden hinteren Versuchsflächen liegen bei maximal 42,4°C (Asphaltdeckschicht), auf den beiden Betonflächen im Vordergrund liegt die Temperatur teilweise nur bei zirka 25°C. Des Weiteren weist Fläche 2 – Gehsteigbereich niedrigere Temperaturen auf als Fläche 4 – Asphaltdecke, dies lässt sich gegebenenfalls durch die weißen Pigmente im Befestigungsmaterial begründen. Die genauen Temperaturwerte lassen sich anhand dieser Bilder leider nicht feststellen. Des Weiteren muss man die Ungenauigkeiten bezüglich des Emissionsgrades und der Reflexionen erwähnen. Mittels Wärmebildkameras wird nämlich für alle Flächen derselbe Emissionsgrad ϵ angenommen und deswegen können die Ergebnisse nicht ganz korrekt dargestellt werden. Die Emissionskonstanten können zwischen 0,9 bis 0,99 liegen – das heißt, dass eine Ungenauigkeit der Emissionskonstante von 10% möglich ist.

5. Diskussion und Schlussfolgerung

Um die Ergebnisse all dieser Abbildungen und Tabellen auch anders darzustellen, wurde die *Envi-Met* Software herangezogen. Mit dieser Software kann man thermische Klimaindizes mittels aussagekräftiger Graphiken erstellen, welche unterschiedlichen Berechnungen zugrunde liegen. Die Temperaturen werden bei der Envi-Met Software in Kelvin ausgedrückt: 1 Kelvin (K) entspricht -272,15 Grad Celsius (°C).

In Abbildung 5.1 kann man die Oberflächentemperaturen der sechs Versuchsflächen anhand eines Farbschemas erkennen. Auf der Legende kann man sehen, dass der Farbverlauf von blau (kühl) bis hin zu pink (heiß) verläuft. Die beiden Asphaltflächen sind deutlich heißer als die Betonflächen, die Temperatur liegt bei rund 312,33 K (39°C). Am kühlsten wird auch hier die Fläche 6 – White Topping weiß mit einer Temperatur von zirka 305,35 bis 306,75 K (32 – 33°C) dargestellt.

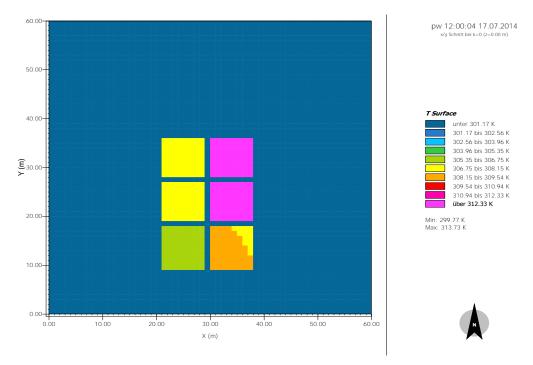


Abbildung 5.1: graphische Darstellung der Oberflächentemperaturen mittels Envi-Met

In Abbildung 5.2 wurde die mittlere Strahlungstemperatur aufgezeigt. Die beiden Asphaltflächen erscheinen in dieser Graphik eigentlich gar nicht, weil ihre Temperatur unter 335,9 K (63°C) liegt. Die Temperaturen der White Topping-Flächen hingegen liegen bei über 348,73 K (75°C). Fläche 5 – Betondecke liegt in der Mitte bei ca. 345,52 bis 347,13 K (72 – 74°C). Auf den Menschen ausgelegt bedeutet eine höhere Strahlungstemperatur eine erhöhte Strahlungsbilanz des menschlichen Körpers und kann somit mit einem höheren Hitzestress verbunden sein.

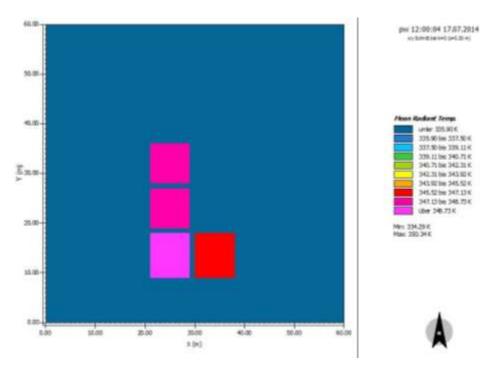


Abbildung 5.2: graphische Darstellung der mittleren Strahlungstemperatur mittels Envi-Met

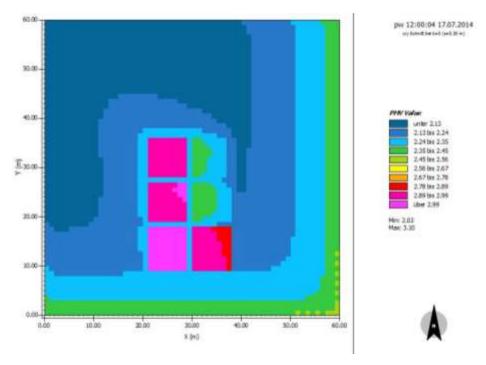


Abbildung 5.3: graphische Darstellung der PMV-Werte mittels Envi-Met

In Abbildung 5.3 wurde dann der PMV-Wert dargestellt, welcher die Wärmeempfindung eines Durchschnittsmenschen widerspiegelt. Obwohl die Asphaltflächen deutlich höhere Oberflächentemperaturen aufweisen und diese die Lufttemperaturen leicht beeinflussen, hat die Strahlungstemperatur den größeren Einfluss und dem Menschen widerfährt über Betonflächen ein erhöhter Hitzestress (ersichtlich am höheren PMV-Wert). Grund dafür sind die vermehrten Reflexionen, die besonders auf den White Topping-Flächen zu

bemerken sind. Der PMV-Wert des Gehsteigbereichs und der Asphaltfläche reicht von 2,24 bis 2,56, was im Vergleich zu den Beton- und White Topping-Flächen ziemlich gering ist. Diese erreichen Werte von über 2,99, was als sehr heiß empfunden wird.

All diese Abbildungen geben Aufschluss über die Wärmeempfindung eines Durchschnittsmenschen über den jeweiligen Versuchsflächen. Sie beweisen, dass – entgegen der Erwartungen des Projektes – der Mensch auf den White-Topping-Flächen aufgrund der verstärkten Reflexionen einem erhöhten Hitzestress ausgesetzt ist als auf den Asphaltflächen. Natürlich darf man sich hierbei nicht ausschließlich auf diese Ergebnisse stützen, denn es sind eine Reihe anderer wichtiger Tatsachen zu überprüfen, bevor man endgültige Schlüsse ziehen kann und wie bereits erwähnt verspürt auch jeder Mensch Wärme anders.

Diese Masterarbeit hat also gezeigt, dass es große Unterschiede in der Albedo zwischen den unterschiedlichen Flächen gibt und dass die Albedo auch Einfluss auf die Temperaturentwicklung hat. White Topping-Flächen haben im Vergleich zu herkömmlichen Straßenbefestigungen ein deutlich höheres Reflexionsvermögen und weisen demnach niedrigere Oberflächentemperaturen auf, weil sie nicht so viel Energie in Form von Wärme im Boden speichern. Die Oberflächentemperaturen haben wiederum Einfluss auf die Temperatur in den bodennahen Luftschichten, welche aber nicht nur durch die Bodenzusammensetzung, sondern auch durch den Wind beeinflusst wird. Modellsimulationen zeigten letztendlich, dass hohe Albedo-Werte aufgrund vermehrter Reflexionen zu einem höheren Hitzestress für den Menschen führen. Abschließend muss nochmals gesagt werden, dass der Wind in all diesen Analysen nicht einbezogen wurde – dieser hat aber maßgebend Einfluss auf die Temperaturentwicklung. Für zukünftige Projekte sollte der Einfluss des Windes allenfalls berücksichtigt werden und das Potenzial der erhöhten Albedo auf die Verminderung der Temperatur in Städten sollte weiter untersucht werden.

6. Literaturverzeichnis

Baunetz Wissen (s.a.): Phasenwechselmaterial (PCM), http://www.baunetzwissen.de/glossarbegriffe/Nachhaltig-Bauen-Phasenwechselmaterialien-PCM-_674761.html, abgerufen am 03.12.2014.

Campbell Scientific (2014): Loggernet – Datalogger Support Software, https://www.campbellsci.de/loggernet-uberblick, abgerufen am 26.11.2014.

Campbell Scientific (2014): CR1000 – Datenlogger mit Anschlussleiste, https://www.campbellsci.de/cr1000-uberblick, abgerufen am 26.11.2014.

Definitionen des Duden (2014): Konvektion, http://www.duden.de/suchen/dudenonline/konvektion, abgerufen am 15.12.2014.

Doulos, L.; Santamouris, M. und Livada, I. (2004): Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. Solar Energy 77, Seite 231 – 249.

Envi-Met Software (2015): Envi-Met Software Informer, http://envi-met.software.informer.com/, abgerufen am 20.01.2015.

Enzi, V. und Scharf, B. (2013): Das Haus im "grünen Pelz" – Bürogebäude der MA 48, Einsiedlergasse 2, Wien 5. Umwelt und Planung, Seite 1 – 6.

Flir Systems (2013): Technical Data Flir E60 (incl. Wi-Fi.). Flir Systems, Inc., Seite 1 – 3.

Forkel, M. (2008): Regionale Windsysteme, http://www.klima-der-erde.de/winde.html, abgerufen am 19.09.2014.

Forkel, M. (2009): Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erde. Klima der Erde, http://www.m-forkel.de/klima/strahlungshshlt.html, abgerufen am 22.04.2014.

Forschungsförderungsgesellschaft FFG (2014): Optimierter Verkehrsflächenbeton für den innerstädtischen Bereich. Collective Research, Seite 1-18.

Freie Universität Berlin (2006): Strahlungsbilanz, http://www.cms.fu-berlin.de/geo/fb/e-learning/pg-

net/themenbereiche/klimageographie/klimaelemente/strahlung/strahlungsbilanz/index. html?TOC=..%2F..%2F..%2Fstrahlung%2Fstrahlungsbilanz%2Findex.html, abgerufen am 10.07.2014.

Häckel, H.; Schönwiese, C.D.; Wallace, J.M. und Hobbs, P.V. (2005): Meteorologie, https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-

klimawandel/klimasystem/umsetzungen/atmosphaerische-zirkulation, abgerufen auf der Homepage der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG am 08.10.2014.

Hukseflux (2014): Thermal Sensors – SR03. Hukseflux, Version 1302, Seite 1 – 2.

Jendritzky, G. (1982): Zum thermischen Wirkungskomplex des Menschen. Promet 33 (3/4), Seite 33 – 42.

Kipp & Zonen (2014): Nettoradiometer – Zur Messung der Energiebilanz. Kipp & Zonen, Seite 1 – 4.

Klimacampus (s.a.): Herausforderung Stadtklima. Fakten und Impulse aus der Wissenschaft, Seite 1-7.

LD Didactic GmbH (s.a.): Optik, Lichtintensität und Strahlungsgesetze, Seite 1 – 4.

Magistrat der Stadt Wien (2010): MA 48: Pilotprojekt Grüne Fassade auf der Zentrale der MA 48 – Vertikalbegrünung als aktiver Beitrag zur Lebensqualität in Wien, https://www.wien.gv.at/rk/msg/2010/09/12001.html, abgerufen am 03.12.2014.

Möller, F. (1973): Einführung in die Meteorologie – Band 2. Hochschultaschenbücher Band 288.

Matzarakis, A.; Rutz, F.; Mayer, H. (2000): Modellierung der mittleren Strahlungstemperatur in urbanen Strukturen. Universität Stuttgart, Fachtagung METTOOLS, Seite 22 – 24.

Mursch-Radlgruber, E. (2012): Vorlesung Stadt- und Geländeklimatologie.

Paeger, J. (2012): Ökosystem Erde – Treibhausgase, http://www.oekosystemerde.de/html/treibhausgase.html, abgerufen am 18.06.2014.

Paschotta, R. (s.a.): Emissionsgrad, in RP-Energie-Lexikon, https://www.energie-lexikon.info/emissionsgrad.html, abgerufen am 22.01.2015.

Santamouris, M.; Gaitani, N.; Spanou, A.; Saliari, M.; Giannopoulou, K.; Vasilakopoulou, K.; Kardomateas, T. (2012): Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project. Building and Environment 46, Seite 128 – 136.

Scherer, D. (2010): Stadtklima – welche Bedeutung haben Bäume und kleine Parkanlagen, http://www.klima.tu-berlin.de/index.php?show=lehre_pj_stadtklima11&lan=, abgerufen am 17.06.2014.

Schöningh, F. (2011): Stadtökologie – Bausteine des Ökosystems Stadt. Herausgeber Sascha Henninger.

Spektrum – Lexikon der Geographie (2001): Albedo, http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/albedo/241, abgerufen am 18.04.2014.

Spektrum - Lexikon der Geografie (2001): Stadtklima, http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/stadtklima/7543, abgerufen am 18.06.2014.

Spektrum - Lexikon der Geowissenschaften (2000): Bodenwärmestrom, http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/bodenwaermestrom/2153, abgerufen am 13.01.2015.

Springer (1994): Mensch und Raumklima. Raumklimatechnik – Grundlagen, Seite 1 – 30.

Synnefa, A.; Karlessi, T.; Gaitani, N.; Santamouris, M.; Assimakopoulos, D.N.; Papakatsikas, C. (2010): Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. Building and Environment 46, Seite 38 – 44.

Taha, H. (1997): Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. Energy and Buildings, Seite 99 – 103.

Tremeac, B.; Bousquet, P.; de Munck, C.; Pigeon, G.; Masson, V.; Marchadier, C.; Merchat, M.; Poeuf, P.; Meunier, F. (2012): Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. Applied Energy 95, Seite 102 – 110.

Umweltbundesamt (2013): Bodenversiegelung, http://www.umweltbundesamt.de/daten/bodenbelastung-landoekosysteme/bodenversiegelung, abgerufen am 15.07.2014.

Universität für Bodenkultur BOKU (2014): Institut für Meteorologie – Wetterstation Monatsübersicht, https://meteo.boku.ac.at/wetter/mon-archiv/2014/201407/201407.html, abgerufen am 25.09.2014.

U.S. Department of the Interior (2014): Evapotranspiration – The Water Cycle, http://water.usgs.gov/edu/watercycleevapotranspiration.html, abgerufen am 15.07.2014.

Weber, M. (2011): Positive Wirkungen begrünter Dächer – Zusammenstellung von positiven Fakten aus aller Welt.

Wikipedia (2015): Klima – räumliche Dimension, http://de.wikipedia.org/wiki/Klima, abgerufen am 21.01.2015.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG (2014): Klima – Sonnenschein, http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/monatsrueckblick/klimawerte?monat=07&jahr=2014, abgerufen am 25.09.2014.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung. 2.1 Der thermische Wirkungskomplex	Seite 17
Abbildung 2.2 Strahlungshaushalt der Erde	Seite 22
Abbildung 3.1 Standort und Lage der Versuchsflächen	Seite 33
Abbildung 3.2 Sechs Versuchsflächen aus südlicher Perspektive	Seite 35
Abbildung 3.3 Nummerierung der Versuchsflächen	Seite 35
Abbildung 3.4 Fläche 1 – Aufbau White Topping	Seite 36
Abbildung 3.5 Fläche 2 – Gehsteigbereich	Seite 37
Abbildung 3.6 Überblick eines Hukseflux-Pyranometers	Seite 38
Abbildung 3.7 Pyranometer (parallel zum Boden montiert)	Seite 39
Abbildung 3.8 Bilanzmesser (von unten)	Seite 40
Abbildung 3.9 Bilanzmesser (von oben)	Seite 41
Abbildung 3.10 Thermoelement	Seite 42
Abbildung 3.11 Temperaturmessgerät (Strahlungsschutz) in 10 cm Höhe	Seite 42
Abbildung 3.12 Wetterstation	Seite 43
Abbildung 3.13 Campbell Scientific Datenlogger CR1000	Seite 44
Abbildung 3.14 Thermischer Infrarot-Sensor mit Solarzelle	Seite 45
Abbildung 3.15 Flir Thermalkamera E60	Seite 46
Abbildung 3.16 LoggerNet – Datenlogger Support Software	Seite 47
Abbildung 4.1 Messungen des Bilanzmessers am 11. Juli 2014	Seite 48
Abbildung 4.2 Messungen des Bilanzmessers am 15. Juli 2014	Seite 49
Abbildung 4.3 Einfallende und reflektierte kurzwellige Strahlung	Seite 51
Abbildung 4.4 Albedo-Werte der mobilen Station	Seite 51
Abbildung 4.5 Tagesgang der Albedo am 11. Juli 2014	Seite 52

Abbildung 4.6 Tagesgang der Albedo am 15. Juli 2014	Seite 53
Abbildung 4.7 Mittelwerte und Standardabweichungen der Albedo	Seite 54
Abbildung 4.8 Vergleich drei verschiedener Temperaturen	Seite 56
Abbildung 4.9 Tagesgang der Oberflächentemperaturen	Seite 56
Abbildung 4.10 Tagesgang der Temperaturen in 10 cm Höhe	Seite 57
Abbildung 4.11 Temperaturdifferenzen von Fläche 3 und Fläche 4	Seite 58
Abbildung 4.12 Oberflächentemperaturen und 10 cm Temperaturen	Seite 58
Abbildung 4.13 Oberflächentemperatur, 10 cm und 2 m Temperatur	Seite 59
Abbildung 4.14 Mittelwerte und Standardabweichungen d. Temperaturen	Seite 60
Abbildung 4.15 Fotos der Wärmebildkamera	Seite 61
Abbildung 5.1 Oberflächentemperaturen mittels Envi-Met	Seite 63
Abbildung 5.2 Mittlere Strahlungstemperatur mittels Envi-Met	Seite 64
Abbildung 5.3 PMV-Wert mittels Envi-Met	Seite 64

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1 Maximale Durchschnittstemperaturen der Oberflächentemperaturen	aturen de
untersuchten Versuchsflächen untertags und in der Nacht während des	
Versuchszeitraums (Synnefa, 2010)	Seite 13
Tabelle 2.1 kurzwellige und langwellige Albedo (Spektrum, 2014)	Seite 25
Tabelle 3.1 Klimawerte für Juli und August 2014 (ZAMG, 2014)	Seite 33
Tabelle 4.1 Begehung der Versuchsflächen mit dem mobilen Bilanzmesser	Seite 50
Tabelle 4.2 Mittelwerte und Standardabweichungen (Albedo) der sechs	
unterschiedlichen Flächen von 11. Juli 2014 bis 16. Juli 2014	Seite 53
Tabelle 4.3 Mittelwerte und Standardabweichungen (Oberflächentempera	tur) der
einzelnen Versuchsflächen von 25. Juli 2014 bis 28. Juli 2014	Seite 60

9. Formelverzeichnis

(2.1) Energiebilanz	$Q + Q_{anthr} + Q_{met} + Q_H + Q_E + Q_B = 0$	Seite 20
(2.2) kurzwellige Strahlungsbilan	$\mathbf{Z} Q_k = G - R = D + H - R = (1 - a) * G$	Seite 23
(2.3) langwellige Strahlungsbilan	$\mathbf{z} \ Q_l = A_E = A_O - A_G$	Seite 23
(2.4) gesamte Strahlungsbilanz	$Q = Q_k - Q_l = G - R - A_E$	Seite 23
(3.1) Stefan Boltzmann	$B(T) = \sigma * T^4$	Seite 31
(3.2) Stefan Boltzmann (erweiter	$\mathbf{t)} B(T) = \varepsilon * \sigma * T^4$	Seite 32