

# Optimierung reflektierender Materialien und Photovoltaik im Stadtraum bezüglich Strahlungsbilanz und Bioklimatik

PVOPTI-Ray

P. Weihs, S. Zamini,  
S. Krispel, S. Oswald,  
M. Peyerl, M. Revesz,  
A. Schneider, H. Trimmel

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**18/2018**

**Impressum:**

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

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

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

# Optimierung reflektierender Materialien und Photovoltaik im Stadtraum bezüglich Strahlungsbilanz und Bioklimatik

PVOPTI-Ray

P. Weihs, S. Oswald, H. Trimmel  
Universität für Bodenkultur, Department für Wasser, Atmosphäre  
und Umwelt, Institut für Meteorologie

S. Zamini, M. Revesz, A. Schneider  
AIT, Austrian Institute of Technology GmbH,  
Photovoltaic Systems – Center for Energy

S. Krispel, M. Peyerl  
Smart Minerals GmbH

Wien, Jänner 2018

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des bmvit publiziert und elektronisch über die Plattform [www.HAUSderZukunft.at](http://www.HAUSderZukunft.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

---



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	16
1.1	Aufgabenstellung.....	16
1.1.1	Stand der Technik .....	16
1.1.2	Ergebnisse aus Vorprojekten.....	21
1.2	Verwendete Methoden.....	22
1.2.1	Messungen im und über dem Canyon .....	23
1.2.2	PV-Ertragstools (SEBE-PVGIS-Modell).....	25
1.2.3	Quantifizierung des thermischen Komforts (MRT, UTCI) und Urbane Energiebilanzmodelle (SOLWEIG, TEB).....	26
1.2.4	Methoden zur Bestimmung des visuellen Komforts - Definitionen und Richtlinien.....	28
1.2.5	Vermessung hochreflektierenden Betonproben.....	30
1.2.6	Vorbereitung der Modelleingabeparameter.....	33
1.2.7	Setups / Szenarien .....	36
2	Ergebnisse .....	39
2.1	Modellimplementierung und -entwicklung .....	39
2.1.1	Spektrale Albedo von Betonrezepturen .....	39
2.1.2	Verknüpfung urbanes Einstrahlungspotential mit PV-Ertragsmodell .....	42
2.1.3	Modellentwicklung und Erweiterung auf Basis von SOLWEIG.....	44
2.1.4	Modellierung des thermischen Komforts – TEB Erweiterung für PV .....	46
2.2	Modelvalidierung.....	47
2.2.1	SEBE-PV.....	47
2.2.2	SOLWEIG-UTCI .....	50
2.3	PV-Ertrag an Fassaden im dicht bebauten Gebiet .....	52
2.4	Thermischer Komfort im Straßencanyon mit und ohne PV.....	55
2.4.1	Ergebnisse aus TEB.....	55
2.4.2	Ergebnisse von SOLWEIG .....	66
2.4.3	Übersicht Mikroklima und Wärmebelastung.....	75
2.5	Ergebnisse zu visuellem Komfort nahe spiegelnder Fassaden .....	76
2.5.1	Einfluss von Glasoberflächen der PV-Anlage .....	76
2.5.2	Einfluss von hellen Betonoberflächen.....	77
3	Schlussfolgerungen für eine optimierte Solarstadtplanung .....	78
3.1	Allgemeine Schlussfolgerungen.....	78

3.2	Anforderungen an PV-Module, Verkehrsflächen, Gebäudehüllen und Grünraum ..	80
3.3	Empfehlungen für die Stadtplanung .....	81
3.4	Organisatorische Schlussfolgerungen.....	84
4	Ausblick und Empfehlungen für weitergehende Forschung .....	85
5	Verzeichnisse .....	87
5.1	Abbildungsverzeichnis .....	87
5.2	Tabellenverzeichnis .....	91
5.3	Literaturverzeichnis.....	92
6	Akronyme .....	94
7	Anhang.....	96
7.1	Zusätzliche Auswertungen von SOLWEIG.....	96
7.2	Messkampagne: Effect of increased albedo on BIPV inside urban canyon .....	97





## **Kurzfassung**

Im Rahmen des Projektes PVOPTI-Ray wurde der Einfluss der Reflexion und der Strahlungsbilanz in städtischem, komplexen Gelände auf die Performance von fassadenintegrierter Photovoltaik (PV) untersucht. Ebenso wurde der Einfluss der Solarmodule und der Energiebilanz an PV-Oberflächen auf das Stadtklima analysiert. Menschen, die sich im urbanen Gelände aufhalten, werden gleichermaßen den Strahlungs- und Energieflüssen ausgesetzt. Mit Hilfe von gekoppelten urbanen Stadtklima-Gebäudemodellen und PV-Ertragstools wurden verschiedene Lösungen der Stadtplanung bezüglich der Formgebung eines Straßencanyons und der Ausgestaltung seiner Oberflächen untersucht und bewertet.

In diesem Projekt wurden Methoden und Techniken aufgezeigt, die zu einem optimalen Ertrag von fassadenintegrierten PV Anlagen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der für Menschen wichtigen bioklimatischen Aspekte führen.

## **Ausgangssituation/Motivation**

Städte und ihre BewohnerInnen sind die größten Energieverbraucher und zugleich einer der Hauptleidtragenden des Klimawandels. Vor diesem Hintergrund werden "Solar Cities" national und international diskutiert: Städte, die einen Großteil ihrer Energie über die Sonne direkt mit den eigenen möglichst unverschatteten Dächern und Fassaden gewinnen. Dadurch wird ein Großteil der einfallenden Solarenergie von Dächern und Fassaden absorbiert und in Form von Strom nutzbar gemacht. Der größte Teil der absorbierten Solarstrahlung wird jedoch in Wärme umgewandelt. Bislang liegen auf städtischer Ebene noch keine Abschätzungen und Simulationstools vor, welche Auswirkungen die angestrebte massenweise Verbreitung der Photovoltaik und Solarisierung der besonnten Fassadenflächen im Stadtraum auf das Mikroklima im Straßencanyon hat. Reflexion durch den Boden und durch umgebende Gebäude führt zu einer Erhöhung der auf die PV Modulebene einfallenden solaren Strahlung und damit zu einer Erhöhung des Ertrags der PV Anlage. Gleichzeitig kann eine Zunahme der Reflexion auch zu einer Zunahme des thermischen Stresses beim Menschen sowie möglicherweise zu Blendung führen.

## **Inhalte und Zielsetzungen**

Ziel war es, in der Sondierung Methoden zu erarbeiten um die komplexen Strahlungs- und Energieflüsse innerhalb typischer Straßencanyons abzuschätzen und ihre Auswirkungen auf Solarenergieerträge, Blendung, das Mikroklima und den thermischen Komfort des Menschen zu quantifizieren. Hierfür wurden im Projekt PVOPTI-Ray Simulations- und Planungstools getestet, verknüpft und weiterentwickelt, welche für eine energetisch und bioklimatisch optimierte Solarstadtplanung erforderlich sind.

## Methodische Vorgehensweise

Mit Hilfe von gekoppelten urbanen Klima- und Komfort-Modellen und PV-Ertragstools wurden optimale Lösungen der Stadtplanung bezüglich der Gestaltung eines Straßencanyons und der Wahl seiner Oberflächenmaterialien entwickelt, die einen optimalen Ertrag einer fassadenintegrierten PV Anlage bei gleichzeitiger Berücksichtigung von bioklimatischen Aspekten für den Menschen und Blendung gewährleisten sollen.

Für typische Globalstrahlungs- und Windverhältnisse sowie unterschiedliche Konfigurationen an Boden und Fassadenmaterialien und Albedos, Straßenbreiten und -orientierungen wurde PV-Ertrag und thermischer Komfort simuliert. Vergleichsweise wurden auch Simulationen für Winter, hoher und niedriger Vegetation und Einfluss der Dachflächen durchgeführt. Eine mögliche Beeinträchtigung des visuellen Komforts wurde für PV anhand von Literatur abgeschätzt, für Beton mittels Messungen ausgewertet.

## Ergebnisse und Schlussfolgerungen

### Verbesserte gekoppelte Simulationstools

Stadtklima-Gebäude Modelle und PV Ertragstools wurden gekoppelt und weiterentwickelt. Ein geometrisches Einstrahlungsmodell (SEBE) wurde für die Fragestellung adaptiert und mit PV-Ertragstools gekoppelt. Weiters wurde ein Modell zur Abschätzung der Belastung durch kurz- und langwellige Strahlung innerhalb urbaner Geometrie (SOLWEIG) weiterentwickelt, und PV Oberflächen sowie die Berechnung des thermischen Komfortindizes UTCI (universal thermal comfort index) implementiert.

### PV Ertrag:

- Eine Albedoerhöhung der Verkehrsflächen von 13% (üblicher aktueller Wert) auf 56% (realistische Albedoerhöhung einer Verkehrsfläche) kann auf einem offenen Platz über ein Jahr etwa 25-30% mehr Ertrag bei vertikalen PV-Anlagen bringen.
- PV-Zelltyp: CI(G)S ist entgegen der Erwartung nicht signifikant besser als die kristalline Silizium Technologie.
- Die Hinterlüftung der PV Module bringt unter den untersuchten Bedingungen keinen signifikanten Vorteil. Dies entspricht nicht der Erwartung und ist vermutlich durch die Umgebungsbedingungen verursacht.

### Lokales Klima + Thermischer Komfort:

- Bei Erhöhung der Albedo auf über 0.56 im gesamten Canyon wird die Lufttemperatur im Canyon bis zu -4 °C reduziert. Der thermische Komfortindex UTCI (thermischer Stress) wird im Gegensatz dazu durch die vom Menschen empfangene Bodenreflexion tagsüber erhöht (bis zu 5 °C). Für die Kombination heller Beton mit FassadenPV ist der Anstieg jedoch geringer (<1,5 °C).
- Die Verwendung von PV an Fassaden hat einen geringfügigen (+/-0.2 °C) Einfluss auf die Lufttemperatur, reduziert jedoch bis zu -1 °C den UTCI.

### **Visueller Komfort:**

- Der visuelle Komfort am Gehsteig kann durch Einsatz von sehr hellem Beton zu Zeiten höchsten Sonnenstandes beeinträchtigt werden. Die spiegelnde Komponente ist für Beton nicht relevant.
- Blendung durch PV ist auf Straßenniveau generell kein Problem, Bewohner gegenüberliegender Wohnungen könnten jedoch geblendet werden. Jede Situation muss getrennt betrachtet werden. Eine genaue Quantifizierung der Blendung für PV ist hier nicht möglich. Sie wird jedoch an Hand von vorhandener Literatur diskutiert.

### **Weitergehende Analyse und Schlussfolgerungen**

Aus den Analysen des Projektes ergeben sich keinesfalls nachteilige Effekte der fassadenintegrierten PV im dichtbebauten Gebiet auf den thermischen Komfort. Die Lufttemperatur kann teilweise, der UTCI deutlich gesenkt werden. Der Ertrag von PV kann durch Erhöhung der Bodenalbedo, bzw. der gegenüberliegenden Fassade erhöht werden. Diese Albedoerhöhung sollte 0.56 nicht übersteigen um den thermischen Komfort nicht zu gefährden. Der Wert von ca. 0.56 wurde im Zuge einer Messkampagne mit verschiedenen Untergrundflächen gemessen. Dabei verwendete man eine sogenannte „Whitetopping“-Fläche bei der handelsüblicher Zement durch Weißzement ersetzt wird (Krispel et al., 2017).

Die Einbeziehung der Dachflächen als PV Flächen und einfach weiße reflektierende Flächen stellt sich als vielversprechende Kombinationsmaßnahme heraus. Bäume im Straßenraum selbst sind eine sehr effektive Maßnahme zur Verbesserung des thermischen Komforts und auch des Solarertrages, vorausgesetzt sie verschatten die PV Module nicht.

### **Ausblick**

- Validierung der bisher gemachten Modellimplementationen an bestehenden Anlagen oder neu errichteten Versuchsanlagen
- Weiterentwicklung der Modelle, insbesondere SOLWEIG und SEBE-PV
- Simulation der validierten Modelle für größere Gebiete gekoppelt mit einem Stadtklimamodell um die Auswirkungen auf die städtische Wärmeinsel abzuschätzen
- Simulation für 30-jährige Klimaperioden (zB. 1980-2010) um die Änderung klimatischer Indizes (zB. Sommertage, Hitzetage) bestimmen zu können.

## **Abstract**

Within the scope of the project PVOPTI-Ray the influence of reflection and energy balance on the performance of building integrated photovoltaics (PV) in complex urban environment was investigated. Equally the influence of PV modules and of the energy conversion of solar energy at the PV module surface has an impact on micro climate and therefore also on pedestrians who are exposed to the radiation fluxes.

The aim of this project was to find and adapt urban energy balance models to be used for optimized solutions for urban planning regarding the design of an urban canyon and the choice of materials as well as methods and techniques for optimizing building integrated PV, taking at the same time bioclimatic aspects into consideration.

## **Starting point/Motivation**

Cities and its inhabitants are the biggest energy consumers and they are going to be significantly impaired by climate change. Against this background, the 'Solar Cities' issue is discussed nationally and internationally: cities that are gaining most of their energy need from the sun directly with their own rooftops and facades. Active houses and Solar Cities are thus planned in a way that they may retrieve a maximum of 'solar harvest', directing their roofs and facades towards the sun, thus avoiding shadowing to achieve a maximum solar yield. The biggest part of the absorbed solar radiation is however transformed into heat. So far, no evaluation and simulation tool has been developed for the urban area which can estimate the effects of a broad roll-out of PV and insolation of facade surfaces in urban districts, especially on the micro-climate in street canyons. Reflection from the ground and surrounding buildings causes an increase of the solar radiation directed to the PV module, and entails an increase of the PV yield. At the same time the increase of reflection could possibly cause more thermal stress and blinding for human beings. Solar modules are reducing the reflection in urban districts and may contribute to warming the environment.

## **Contents and Objectives**

The aim was to develop exploratory methods to estimate the complex radiation and energy fluxes in typical urban canyons and their influence on solar energy yields, glare, microclimate and thermal comfort of humans. In the PVOPTI-Ray project, simulation and planning tools were tested, linked and further developed, which are necessary for energetically and bioclimatically optimized solar town planning.

## **Methods**

By means of PV-tools, models for urban comfort and climate, optimal solutions for town planning in consideration of a maximum PV-yield and bioclimatic aspects such as the human well-being and the avoidance of blinding were developed. Different climatic situations were considered as well as the potential of positive effects of green facades and public green space.

## Results

### Improved coupled simulation tools

Urban Climate Buildings Models and PV yield tools have been coupled and developed. A geometric irradiation model (SEBE) was adapted for the research question and coupled with PV yield tools. Furthermore, a model for estimating the exposure to short- and long-wave radiation within urban geometry (SOLWEIG) was further developed, and PV surfaces and the calculation of the thermal comfort index UTCI (universal thermal comfort index) were implemented.

### PV yield:

- Albedo elevation of the traffic areas from 13% (current value) to 56% (realistic albedo elevation of a traffic area) can lead to about 25-30% more yield on vertical PV systems in an open space over one year.
- PV cell type: CI (G) S is contrary to expectation not significantly better than the crystalline silicon technology.
- The rear ventilation of the PV modules does not bring any significant advantage under the conditions studied. This is not expected and is probably caused by the environmental conditions.

### Local climate + thermal comfort:

- An albedo increase to over 0.56 throughout the canyon results in a drop in canyon air temperature down to  $-4^{\circ}\text{C}$ . In contrast, the thermal comfort index UTCI (thermal stress) is in this case increased during the day (up to  $5^{\circ}\text{C}$ ) by the ground reflection received by humans. A combination of higher reflecting concrete with facade PV, leads however, to a lower increase in UTCI ( $<1.5^{\circ}\text{C}$ ).
- The use of PV on facades has a slight ( $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ) influence on the air temperature, but reduces the UTCI by  $1^{\circ}\text{C}$ .

### Visual comfort:

- The visual comfort of the sidewalk can be impaired at times of highest sunshine by using very bright concrete. The specular component is not relevant for concrete.
- Glare from PV is generally not a problem at street level, but residents of opposite apartments might perceive glare. Every situation has to be considered separately. Accurate quantification of glare for PV is not possible here. However, it is discussed on the basis of existing literature.

### Further analysis and deductions

During this project, no disadvantageous effects of facade-integrated PV on thermal comfort in the densely built-up area were identified. The air temperature can be partially, the UTCI

clearly lowered. The yield of PV can be increased by increasing the soil albedo or the albedo of the opposite facade. This albedo increase should not exceed 0.56 in order not to endanger the thermal comfort.

The inclusion of the roof surfaces as PV surfaces or simply white reflective surfaces turns out to be a promising combination measure. Trees in the street itself are a very effective measure to improve the thermal comfort and the solar yield, provided that they do not shade the PV modules.

## **Prospects / Suggestions for future research**

- Validation of previously implemented model of existing PV plants or newly constructed experimental facilities
- Further development of the models, especially SOLWEIG and SEBE-PV
- Simulation of validated models for larger areas coupled with an urban climate model to estimate the impact on the urban heat island
- Simulation for 30-year climate periods (eg.1980-2010) to determine the change in climatic indices (e.g. summer days, heat days).

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Städte sind die größten Energieverbraucher und zugleich einer der Hauptleidtragenden des Klimawandels. Vor diesem Hintergrund werden "Solar Cities" national und international diskutiert: Städte, die einen Großteil ihrer Energie über die Sonne direkt mit den eigenen Dächern und Fassaden gewinnen. Aktivhäuser und Solar Cities werden daher so geplant, dass sie durch möglichst unverschattete Dächer und Fassaden den Solarenergieertrag maximieren und somit eine maximale „Solarernte“ einfahren. Dadurch wird möglichst viel der einfallenden Solarenergie von Dächern und Fassaden absorbiert und in Form von Strom nutzbar gemacht. Sehr gut geeignet sind hierfür schwarze Solarmodule, die nur gering reflektieren und daher den höchsten Stromerzeugungs-Wirkungsgrad mit bis zu 20% auf Modulebene realisieren. Der größte Teil der absorbierten Solarstrahlung wird jedoch in Wärme umgewandelt. Bisher liegen auf städtischer Ebene noch keine Abschätzungen und Simulationstools vor, welche Auswirkungen die angestrebte massenweise Verbreitung der Photovoltaik und Solarisierung der besonnten Fassadenflächen im Stadtraum auf das Mikroklima im Straßencanyon hat. Im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel wird aus den USA kommend eine genau gegenteilige Strategie propagiert: eine Stadt mit weißen Dächern, die urbane Solareinstrahlung möglichst hoch reflektierend und minimaler absorbiert. Reflexion durch den Boden und durch umgebende Gebäude führt zu einer Erhöhung der auf die PV Modulebene einfallenden solaren Strahlung und damit zu einer Erhöhung des Ertrags der PV Anlage. Gleichzeitig kann eine Zunahme der Reflexion auch zu einer Zunahme des thermischen Stresses beim Menschen sowie zur Blendung führen. Solarmodule reduzieren zwar die Reflexion im städtischen Gelände und können aber auch ihrerseits zu einer Erwärmung der Umgebung beitragen.

Das Ziel dieses Projektes ist es die Wechselwirkungen urbaner Geometrie, Reflexionen der Oberflächen, PV-Ertrag und menschlichem Komfort zu untersuchen und Lösungsvorschläge zu erarbeiten.

### 1.1.1 Stand der Technik

Die äußeren Einflussgrößen auf den Ertrag von PV-Anlagen sind die Einstrahlung (zusammengesetzt aus direkter, diffuser und aus der Umgebung reflektierter Einstrahlung), das Spektrum und der Einfallswinkel der Einstrahlung sowie die Modultemperatur (David L. King et al., 2004). Die Modultemperatur wird wiederum von der Umgebungstemperatur, der Einstrahlung und der Windgeschwindigkeit bestimmt (Faiman, 2008).

A) Einflussgrößen der PV Anlage



## 1) Einfluss der Reflexion (Albedo) der Umgebung auf den Ertrag einer fassadenintegrierten PV Anlage und auf die Strahlungsbilanz

Der Ertrag einer PV Anlage ist maßgeblich von dem kurzwelligen Strahlungsgenuss abhängig (Nagengast et al., 2013). Diese ist von Jahres- und Tageszeit, Zustand der Atmosphäre sowie der Ausrichtung der PV Anlage abhängig. Fassadenintegrierte PV Anlagen verwenden neben direkter Sonneneinstrahlung auch vom Boden und den Wänden gegenüberliegender Gebäude reflektierte Strahlung. Genauere Analysen liegen hierzu jedoch noch nicht vor.

Das Reflexionsvermögen selbst ist durch die Struktur der Stadt geprägt und bringt auch klimatologisch weitere Folgen mit sich. Die Gesamtreflexion einer Stadt nimmt deutlich mit der Zunahme des Höhe-Breite (H/W) Verhältnisses ihrer Straßencanyons ab. Laut Santamouris (2014) kann eine Erhöhung der Gesamtreflexion der Stadt um 0.1 die mittlere Lufttemperatur um etwa 0.3 K und die maximale Lufttemperatur um 0.9 K reduzieren. In einer Stadt der Zukunft Sondierung (KELVIN) wurde die thermische Auswirkung von erhöhter Albedo von Gebäude und Quartiere am Beispiel Wien untersucht mit dem Ergebnis, dass es durch Nutzung aller für Dachbegrünung geeigneten Flächen in Wien und Albedoänderung der restlichen Dächer auf 70%, geht die Zahl der Tage mit mehr als 30 Grad in der Innenstadt um bis zu 29 Prozent zurück. Yoshida et al (2000) und Hong et al (2004) berechneten bei einer Albedoerhöhung von beispielsweise 0.2 auf 0.5 der Dächer von mittleren und hohen Gebäuden (z.B. durchschnittlich 28.6 und 67.4 m) bewirkt jedoch nur eine geringe Reduktion der Lufttemperatur auf Straßenniveau (0.1 – 0.12 °C). Wesentlich ausschlaggebender hierfür seien die Wärmeflüsse im Straßencanyon selbst, deren genauere Analyse und Optimierung Gegenstand des beantragten Forschungsprojektes ist.

## 2) Einfluss der Energieflüsse auf die PV Modultemperatur und die Performance

Die kurzwellige auf ein PV Modul einfallende Sonnenstrahlung wird einerseits vom PV Modul reflektiert und andererseits absorbiert. Vom absorbierten Anteil wird ein Teil – abhängig vom Zell-Wirkungsgrad, der zwischen 15 - 24% liegt – in elektrische Energie umgewandelt und der Rest in Wärme, so dass die Modultemperatur zunimmt. Bei transparenten Modulen wird auch ein Teil transmittiert. Dieser trägt zur Beleuchtung aber auch Erwärmung des dahinterliegenden Raumes bei (Feng et al. 2015, Green 2015).

Zusätzlich zu der Temperaturzunahme durch Absorption der kurzwelligen Solarstrahlung wird die Modultemperatur aber auch durch weitere grundlegende Vorgänge bestimmt: Je größer die Luftbewegung an den Solarmodulen, desto mehr Wärme kann konvektiv vom Modul abtransportiert werden (Dubey et al. 2013; Kurnik et al. 2011). Je höher die Differenz zwischen Modul- und Umgebungstemperatur ist, desto größer ist dieser Energiefluss – Kühle Gebäudefassaden tragen also ebenso zu einer langsameren Erwärmung der Module bei.

Je wärmer die Module, desto größer ist auch ihre langwellige Rückstrahlung. Neben der Temperatur ist die langwellige Rückstrahlung auch von der Emissivität der Solarmodule

abhängig, die bei 0.91 für die Glas-Vorderseite und bei 0.93 für die Polymer-Rückseitenfolie liegt (Kurnik et al. 2011). In der Realität kann die Modultemperatur die Lufttemperatur um bis zu 30 °C übersteigen (Kurnik et al. 2011) und im Winter immer noch über 50 °C erreichen (Yoo und Manz 2011).

Die steigende Modultemperatur wirkt sich letztlich negativ auf den elektrischen Energieertrag aus (Dubey et al. 2013; Nishitani et al. 1998), was durch den Temperatur-Koeffizienten eines PV Moduls ausgedrückt ist. Heute typischerweise in der PV-Gebäudeintegration verwendete Glas-Glas Solarmodule mit polykristallinen Solarzellen verlieren ca. 0.43 % ihrer elektrischen Leistung pro Kelvin Erwärmung (vgl. Datenblatt Ertex VSG-Module), 20 Kelvin Erwärmung führen daher zu rund 9% Verlust am Solarstromertrag.

### 3) Technische Lösungen zum Umgang mit Erwärmung bei der Planung einer fassadenintegrierten PV Anlage

Stand der Technik sind zum Beispiel Kaltfassadenkonstruktionen, bei denen die Photovoltaikmodule für eine optimale konvektive Wärmeabfuhr hinterlüftet werden oder Isolierverglasungen mit integrierten Solarzellen. Dabei wird die warme Luft entweder nach außen weg gelüftet oder aber genutzt. Im Sommerfall wird die Abwärme hinter den Solarmodulen in der Regel entlüftet. Die Wärme der Solarmodule kann aber auch durch flüssige Medien abgeführt werden. Sowohl sonnenkollektorartige Strukturen als auch durchflossene Kapillar-Materialien wurden hier bereits erprobt. Bislang haben solche Produkte jedoch noch nicht den Weg in die Massenproduktion gefunden. Probleme bestehen bislang darin, dass Solarmodule mit gekoppelten Sonnenkollektoren per Definition weder für die thermische Nutzung optimiert werden können, für welche die Temperatur maximiert werden müsste, noch für die Stromerzeugung, da für diese die Modultemperatur soweit es geht minimiert werden müsste, wegen des beschriebenen Effektes des solarelektrischen Leistungs-Verlustes bei steigender Temperatur.

Noch zu wenig ausgeprägt ist die Nutzung der bei hinterlüfteten Solarfassaden entstehenden Warmluft zur Frischluftvorerwärmung oder als Wärmequelle für Wärmepumpen. Hier gibt es bereits erfolgreiche Realisationen (vgl. Projektbeschreibung Aerni Fensterfabrik in Schneider, 1996; aktuelles Projekt: ATB-Becker-Einfamilienhaus). Perspektivisch dürfte die Nutzung der Abwärme aus der erwärmten Luft hinter Modulen sehr interessant werden, da Niedertemperatur-Heizsysteme immer mehr auf Strom und somit auf Wärmepumpen umgestellt werden, welche auf Umweltwärme als Wärmequelle zurückgreifen.

Photovoltaik-Elemente werden auch als äußere Verschattung bei Gebäuden eingesetzt. In diesem Falle wird die direkte Einstrahlung aus dem Gebäude ferngehalten, während die Solarmodule ihre Abwärme direkt an die Umgebungsluft abgeben können. Typische Beispiele für PV-Verschattungssysteme sind:

- Verschattungslamellen (starre und sonnennachgeführte Systeme)
- Vordächer (Canopy Roofs)

- Solare Fensterläden (siehe Patent Nr. DE 100 28 433 B4 2007.05.31 Astrid Schneider)

Dabei wird sinnvollerweise eine Optimierung von Kühlung durch Verschattung und Tagesbelichtung angestrebt.

#### B) Wahl der Materialien bzgl. Verkehrs- und Gehsteigfläche und Gebäudehüllen/Fassaden

Durch die Wahl der Materialien der Verkehrs- und Gehsteigflächen sowie der Gebäudehüllen können die Energieflüsse und das Mikroklima des Straßencanyons beeinflusst werden. Neben der bereits zu Beginn erwähnten Albedo spielen auch hier sämtliche Materialeigenschaften welche die Energiespeicherfähigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die thermische Trägheit beschreiben eine Rolle.

Die abhängig von ihrer Exposition auf die Oberflächen auftreffende Einstrahlung kann transmittiert, reflektiert oder absorbiert werden. Abhängig von der Oberflächentemperatur und Emissivität strahlen die Materialien im langwelligen Bereich (Doulos et al. 2004). Die Temperatur der Oberflächenmaterialien kann weiters durch Abgabe von fühlbarer und latenter Wärme reguliert werden sofern die Umgebungsluft kühler und trockener als die Oberfläche ist. Windbewegung verstärkt diesen Prozess (Santamouris et al. 1999; Offerle et al. 2007). Besonders Vegetationsoberflächen wie bewachsene Fassaden, Gründächer oder Grünflächen am Boden können sich zusätzlich durch Verdunstung kühl halten (Trimmel et al. 2012).

Im städtischen Zusammenhang sind besonders Verkehrsflächen von großer Bedeutung. Zum einen finden dort viele Neuentwicklungen statt, zum anderen ist dort die Umsetzung neuer Oberflächentechnologien sowohl organisatorisch als auch finanziell einfacher realisierbar. Der Großteil der Verkehrsflächen besteht derzeit aus Beton oder Asphalt. Im Rahmen des Projekts „Optimierter Verkehrsflächenbeton für den innerstädtischen Bereich (Stadtverkehrsflächen)“ wurde von Partner SmartMinerals Beton entwickelt der eine besonders hohe Albedo aufweist welche Werte bis zu 0.56 erreichen kann (Peyerl et al. 2016, Krispel et al. 2017). Bei der Mischung von Beton und der Verwendung von Weißzement statt normalem Zement kommt so ein Wert zustande. Auch kann durch die Wahl der Inhaltsstoffe von Beton auch dessen Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherfähigkeit verändert werden. Durch Verwendung von Fugen oder Poren kann sogar latenter Wärmefluss ermöglicht werden.

#### C) Einfluss der Energiebilanz und der Strahlungsflüsse auf die thermische Behaglichkeit des Menschen

Die thermische Behaglichkeit des Menschen wird von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte und den kurzwelligen und langwelligen Strahlungsströmen, die auf ihn einwirken bestimmt. Die kurzwellige Strahlung ist in erster Linie direkte oder diffuse Sonnenstrahlung. Bei starker Sonneneinstrahlung und hoch reflektierenden Oberflächen ist jedoch auch die

Menge der Sonnenstrahlung, die von Boden oder Wänden reflektiert wird und danach auf den Menschen trifft, wesentlich. Je höher die Albedo der Fassaden, desto mehr Sonnenstrahlung wird reflektiert, und desto mehr erwärmen sich auch die Oberflächen in der direkten Umgebung und desto höher ist auch der thermische Stress auf den Menschen (Lee et al., 2014). Bei dunkleren Fassaden mit geringerer Albedo ist dieser Effekt dementsprechend schwächer, jedoch ist hier die Oberflächentemperatur deutlich höher. Des Weiteren hat hohe kurzwellige Strahlung negative Auswirkungen auf den visuellen Komfort von FreiraumnutzerInnen. Aspekte der Blendung wurden z.B. Von Compagnon und Goyette-Pernot (2004) im Zuge des Projektes RUROS untersucht.

Diskomfort tritt bei hohen Luminanzwerten, gemessen in  $\text{cd m}^{-2}$  oder großen Luminanzkontrasten auf. Derzeit ist die ÖVE-Richtlinie R11-3 in Österreich definiert, welche sich der Blendung durch PV Anlagen widmet. Blendgutachten könnten zukünftig auch für größere Projekte mit gebäudeintegrierter Photovoltaik Pflicht werden.

Im Falle der Straßengeometrie führt vor allem Beschattung zu geringerer thermischer Belastung. Aber auch besonders hohe Oberflächentemperaturen von Verkehrsflächen führen zu großer thermischer Belastung des Menschen (Doulos et al. 2004). Hohe Oberflächentemperaturen treten vor allem bei Materialien auf, die kaum reflektieren und sich dadurch stärker erwärmen. Im Rahmen des laufenden „Stadt der Zukunft“ Projekts „HOTSPOTS - Holistic thermographic screening of urban physical objects at transient scales“ werden Thermaldaten im Stadtgebiet flächendeckend erfasst und kritische Stellen identifiziert unter anderem mit dem Ziel die Energieeffizienz einer Stadt zu verbessern.

D) Zusammenfassung und sich daraus ableitender Forschungsbedarf

Faktoren, die Ertrag von Photovoltaik Anlagen bestimmen wurden und werden international untersucht. Der Einfluss von Baumaterialien auf das Klima der Städte und die thermische Befindlichkeit des Menschen ist ebenso Gegenstand internationaler Studien. Eine erhöhte Reflexion der umgebenden Flächen kann einerseits die auf die PV Module einfallende Strahlung erhöhen und andererseits auch die Temperaturen der Oberflächen der Umgebung reduzieren. Andererseits kann erhöhte Reflexion zu einer Zunahme des thermischen Stresses führen. Andererseits verändern die PV Module auch die Strahlungsbilanz einer Stadt. Der Einfluss der in städtischen Strukturen stattfindenden komplexen Phänomene auf die, die PV Module beeinflussenden, Energieflüsse und deren Performance (und vice versa) wurde bis jetzt nur unzureichend untersucht. Eine umfassende Sichtweise/Analyse, bei der Menschen, Stadtklima und Energieertrag für konkrete Stadtstrukturen und Klimazonen gleichzeitig betrachtet werden, war bisher nicht bekannt. Daher war das Ziel des PVOPTI-Ray Projekts die Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Einflussfaktoren und vor allem den Einfluss der Stadtstrukturen und der darin stattfindenden Energieaustausche mit fassadenintegrierten PV Modulen mit Hilfe von Modellen genauer zu quantifizieren. Deshalb war zunächst eine Kopplung von Urbanen Stadtklima-Gebäude Modellen und PV Ertragstools vorgesehen, die in weiterer Folge verwendet werden sollten

um Modellsimulationen der Energieflüsse und deren Einfluss auf lokales Klima, menschliches Befinden (thermischer Stress) und PV Modul Performance durchzuführen.

### **1.1.2 Ergebnisse aus Vorprojekten**

Das Projektkonsortium kann auf eine Vielzahl von Vorstudien zurückgreifen. Zum einen wurden die Materialeigenschaften von Photovoltaik, innovativen Fassaden und Verkehrsoberflächen untersucht. Zum anderen gibt es im Hinblick auf die Komplexität urbaner Strukturen sowohl klimatisch als auch in Bezug auf PV-Nutzung Erfahrung. Diese Ergebnisse fließen direkt in das vorgeschlagene Projekt ein.

**SOPHIA - SOLar PHotovoltaic European Research Infrastructure** (FP7 INFRA-2010-1.1.22, Grant Agreement Nr. 262533, Laufzeit: Feb. 2011-Jan.2014)

(AIT Projektleitung: Shokufeh Zamini). Alle Leistungen der Wertschöpfungskette wurden beforscht, vom Material bis zum fertigen Modul und seinen Anwendungen, Energiebilanz und Modellierung waren weitere Schwerpunkte.

Das Comet **K-Projekt MPPF - Multifunctional Plug & Play Facade** (AIT Projektleitung: Susanne.Gosztonyi, Marcus Rennhofer) hatte zum Ziel bisherige Funktionalitäten vorgefertigter Fassadenelemente zu erweitern wie z.B. Energie umwandelnde Technologien (Solarthermie, Photovoltaik) und gebäude-technische Funktionen (wie z.B. Wärme-, Kälte-Einbringung, Lufteinbringung, Beleuchtung, Wasser-, Strom- und IT- Versorgung). Ziel des Projektes war die Entwicklung eines entsprechenden neuartigen Fassadenstandards, das Aufzeigen von Lösungen, wie dieser Standard erfüllt werden kann, und die Konstruktion und rechnerische und messtechnische Evaluation entsprechender Prototypen.

**PV@Fassade** (BIPV: Fassadenelemente mit PV-aktiven Schichten) (e!MISSION 2013 4.AS, Laufzeit: 2014-2017, Projektleitung von AIT: Karl Berger) Das Projekt adressiert komplexe Fragestellungen der Integration von Photovoltaik-Modulen in Fassadenelemente. Sie betreffen Konstruktion, Verschaltung, Design, Materialien, aber auch Langzeitbeständigkeit und Effizienz der PV-Komponenten.

Das Projekt **Optimierter Verkehrsflächenbeton für den innerstädtischen Bereich (Stadtverkehrsflächen)** beschäftigte sich mit den Auswirkungen einer großflächigen Verwendung von Beton bei Verkehrsflächen im urbanen Bereich. Dabei wurden positive Effekte heller Betonfahrbahnen auf das allgemeine Temperaturniveau der Luft und der Oberflächen innerstädtischer Verkehrsflächen festgestellt. Es zeigte sich auch, dass obwohl die Oberflächentemperatur und langwellige Emission der Oberflächen abnehmen, die kurzwellige reflektierte Strahlung eine höhere Leistung aufweist und diese deswegen zu einer Erhöhung des thermischen Stress beim Menschen führt (Abbildung 1).

Im Projekt **GrünStadtKlima – Optimierung des urbanen Klimas und Wasserhaushalts (GSK)** wurden Materialeigenschaften und klimatische Auswirkung verschiedener

Wegebeläge, Fassaden und Gründächern gemessen. Die Auswirkung auf drei unterschiedliche städtische Situationen in Wien wurde für einen Hitzetag simuliert.

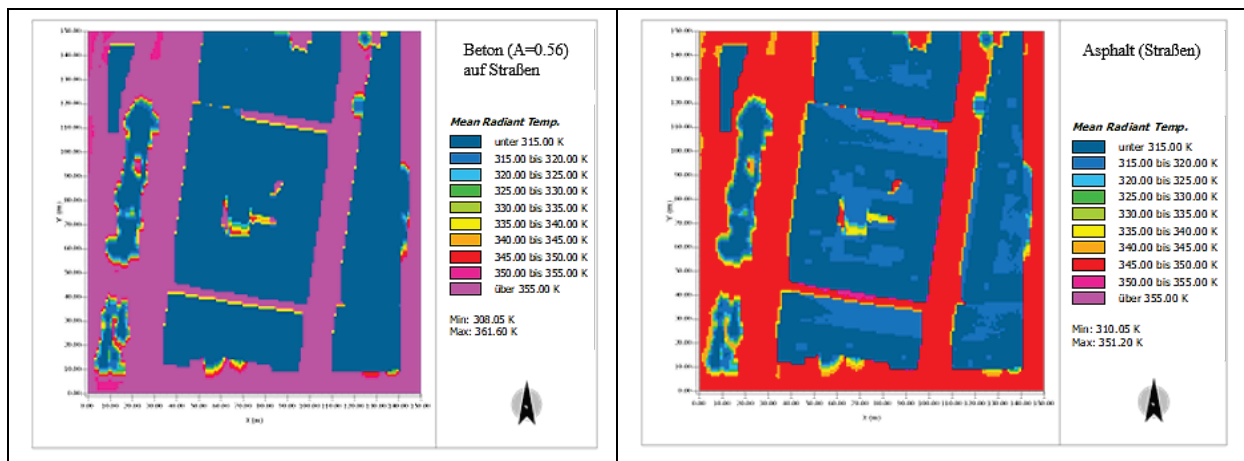


Abbildung 1: Mittlere Strahlungstemperatur (MRT) über höherreflektieren Straßenbeton (linke Abb.) und über Asphaltstraßen (rechte Abb.) Rosa Skala entspricht einer MRT von 355 bis 360 K (linke Abb.) und einen thermischen Stressindex (UTCI) von 43,9 °C. Die rote Farbe entspricht einem MRT von 345 bis 350 K (rechte Abb.) und einem UTCI von 41,3 °C. D.h. der thermische Stress ist geringer über der Asphaltstraße als über höherreflektierenden Beton.

Im Projekt **Urban Fabric Types and microclimate response – Assessment and Design Improvement (UFT-ADI)** wurden klimatisch relevante Indikatoren der Stadt- und Freiraumplanung für Wien extrahiert und daraus Klimazonen Wiens definiert.

### Syn[En]ergy - Synergiepotenziale zwischen Stadtplanungszielen und

**Photovoltaiknutzung auf Freiflächen** (Stadt der Zukunft, 2. Ausschreibung, Laufzeit: Feb. 2016-Jan. 2018) Ausgehend von stadtplanerischen Zielen und Rahmenbedingungen werden Nutzungsvarianten und Fallstudienentwürfe einer technischen und ökonomischen Bewertung unterzogen und hinsichtlich ihrer Akzeptanz von unterschiedlichen Stakeholdergruppen aus Unternehmen, Behörden und Gesellschaft bewertet.

## 1.2 Verwendete Methoden

Im Rahmen dieses Projektes wurden verschiedene Software Tools, die grundsätzlich für Stadtklima-, bzw. Photovoltaik-Ertrag-Simulationen zur Verfügung stehen, auf ihre Funktion und Tauglichkeit für das Projekt analysiert. Dabei waren folgende Kriterien wichtig: Die Tools sollten zum Großteil die erforderlichen Parameter simulieren können; nach Möglichkeit sollten diese quelloffen sein, um gegebenenfalls die Modelle verändern oder erweitern zu können; wissenschaftlich sollten diese im Ist-Zustand validiert sein. Die am besten geeigneten Tools wurden anschließend in ihrer Funktionalität den Erfordernissen nach erweitert oder verbessert.

Des Weiteren wurden Messungen wichtiger stadtklimatischer Parameter durchgeführt, um daran die weiterentwickelten Modelle zu validieren.

Zur Untersuchung der potentiell möglichen Reflektivität der Bodenflächen, wurden Betonproben hergestellt und vermessen. Die Proben repräsentieren aktuell verwendete

Betonmischungen, aber auch sehr helle Mischungen, welche aus Sicht dieses Projektes geeignet sind, das Reflexionsvermögen von städtischen Bodenflächen zu erhöhen.

Im Folgenden werden die Details zu den jeweiligen Schritten weiter ausgeführt.

### 1.2.1 Messungen im und über dem Canyon

Um eine möglichst genaue Modellvalidierung durchführen zu können, wurden im Straßencanyon zwischen Exner- und Schwachhöferhaus des Standorts BOKU Türkenschanze einige meteorologische Sensoren montiert (Abbildung 2 b). Darunter befindet sich ein DS-2 Sonic Anemometer der Firma Decagon Devices (Abbildung 2 d), welches die Windgeschwindigkeit sowie die Windrichtung aber auch Lufttemperatur misst. Des Weiteren wurden zwei Globalstrahlungssensoren der Firma EMS (Environmental Measuring Systems), Brno, installiert, wobei einer die horizontal einfallende und der andere die vertikal einfallende Sonnenstrahlung misst (Abbildung 2 e). Alle Sensoren wurden in einer Höhe von 3 m über Grund montiert, das Messintervall lag bei einer Minute.

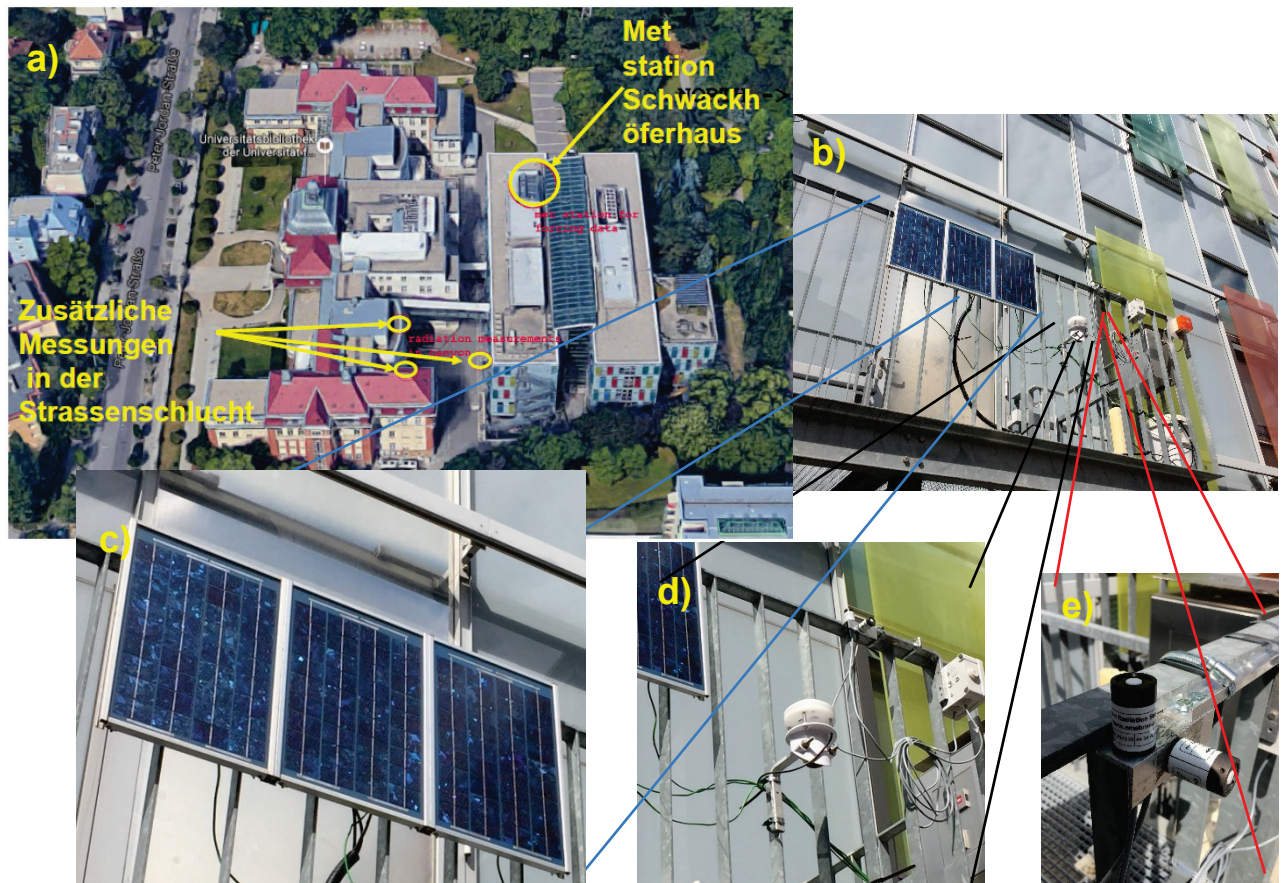


Abbildung 2: a) Universität für Bodenkultur im 19. Wiener Gemeindebezirk mit Kennzeichnung der einzelnen Messstationen (Met station = Abkürzung für meteorologische Station). b) Gesamte Messstation im Straßencanyon in 3 m Höhe über Grund. c) Polycrystallines Photovoltaik Modul d) DS-2 Sonic Anemometer. e) EMS11 Globalstrahlungssensoren für horizontale und vertikale Fläche.

Ein weiterer, wichtiger Aspekt in den Modellierungen ist die Einbindung von Daten über dem Straßencanyon. Dazu wurden Messdaten von der Dachplattform Schwackhöferhaus (Abbildung 3), welche bereits seit März 2005 kontinuierlich meteorologische Parameter aufzeichnet, verwendet. Als Input Daten wurden Werte wie Luftdruck, Lufttemperatur, Global- und direkte Strahlung, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit bzw. Richtung herangezogen. Diese Daten werden in Intervallen von 2 Sekunden durch einen Datenlogger abgefragt. Der Logger bildet 10 Minuten Mittelwerte, d.h. die Simulationen sowie die Ergebnisse beinhalten nur Werte alle 10 Minuten.



Abbildung 3: Links: Teil der Messstation (Wolkenkamera, Globalstrahlung und langwellige Strahlung) auf der Dachplattform Schwackhöferhaus in 26 m Höhe über Grund. Mitte: Suntracker mit Pyrheliometer. Rechts: Temperatur-, Feuchte- und Windmessstation.

Ebenso wurden Infrarot Bilder im Straßencanyon aufgenommen (Abbildung 4), wodurch die Wandtemperatur zur gegebenen Sonneneinstrahlung charakterisiert werden konnte. Dieser kausale Zusammenhang wird im Kapitel 2.2.2 näher erläutert.

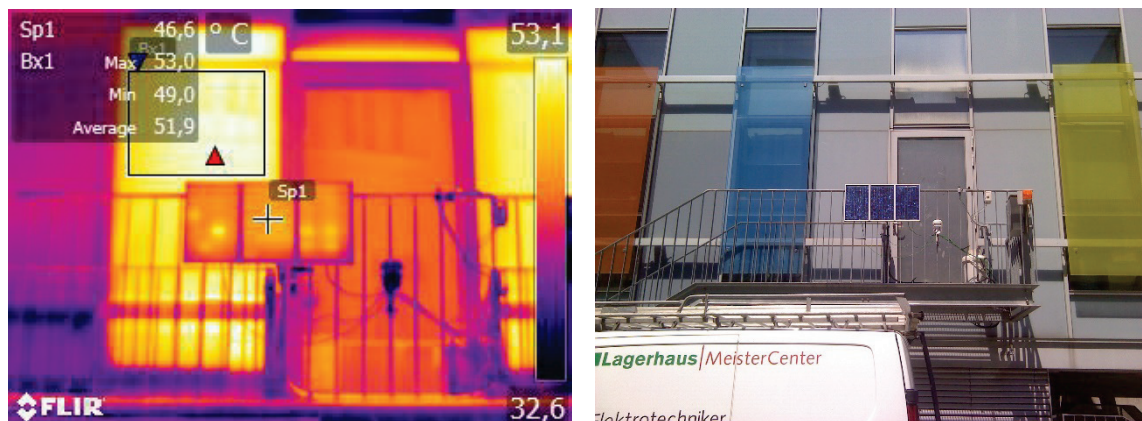


Abbildung 4: Links: Infrarotbild einer FLIR Kamera mit Blick auf das PV Modul und die Fassade des Schwackhöferhauses am 19.06.2017 um 11:12 UTC. Rechts: Das dazugehörige RGB Bild.

An fünf verschiedenen Tagen wurden auf der Straße / Parkplatz vor den PV-Modulen (sh. Anhang – Kapitel 7.2) eine ca. 32 m<sup>2</sup> große, weiße Styroporfläche ausgelegt. Die Albedo dieser Fläche war 0.78. Der Vergleich der Einstrahlung in der Vertikalebene unmittelbar neben den PV-Modulen für die Messungen mit und ohne Styroporplatten diente zur Messung der mit der veränderten Albedo einhergehenden Einstrahlungsänderung. Detaillierte Ergebnisse sind im Anhang zu finden.



## 1.2.2 PV-Ertragstools (SEBE-PVGIS-Modell)

Als Basis für das in diesem Projekt entwickelte Tool SEBEpv wurden folgende, bereits existierende, Modelle verwendet: Für die Berechnung der Einstrahlung im urbanen Gebiet wurde SEBE (Solar Energy on Building Envelopes) verwendet (Lindberg, 2015). Es ist Teil des Paketes UMEP (Urban Multi-scale Environmental Predictor) zur Simulation diverser Umweltfaktoren in der Stadt (Lindberg, 2017). Die Berechnung des PV-Ertrags erfolgt nach (Huld, 2011) und benötigt sechs Modellparameter, welche in der Literatur für verschiedene PV-Zelltechnologien zu finden sind. Des Weiteren gehen die Lufttemperatur und die Windgeschwindigkeit nach King (2004) in die Berechnung des PV-Ertrags mit ein.

SEBE bietet mehrere Vorteile für die Abschätzung der Einstrahlung im Stadtgebiet. Einerseits basiert es auf Geo-Raster-Daten, welche für viele Städte verfügbar sind und die Gebäudehöheninformation gerastert darstellen. Die Daten lassen sich daher auch leicht handhaben und Berechnungen auf Rasterdaten sind relativ einfach. Außerdem ist der Rechenaufwand mit SEBE in Vergleich zu Raytracing-Methoden relativ gering (Lindberg, 2015). SEBE bietet in seiner Form auch die Möglichkeit die Berechnung der vom Boden reflektierten Einstrahlung zu integrieren. Letzteres ist auch eine der notwendigen Erweiterungen an diesem Tool. Details dazu werden im Kapitel 2.1.1 ausgeführt.

Die Berechnung der Einstrahlung im Straßencanyon muss allerdings auch mit der Berechnung des Photovoltaikertrags kombiniert werden, um den Einfluss der städtischen Struktur auf den PV-Ertrag abschätzen zu können. Es gibt viele und sehr gute Modelle zur Berechnung des PV-Ertrags. Ein paar Beispiele sind das Zwei-Dioden Modell (Stein, 2013, Callegaro, 2015), das Loss-Factor Model (Sutterlueti, 2011, Sellner, 2012), das Sandia PV Array Performance Model (SAPM) (King, 1998, King, 2004), oder das "Huld" Modell (Huld, 2011), welches auch in der Solarpotential-Datenbank PVGIS ([http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html)) verwendet wird, und einige andere Modelle.

Das Huld-Modell benötigt lediglich sechs Modellparameter, die für verschiedene, gängige PV-Zelltechnologien veröffentlicht sind (siehe Tabelle 1). Die veröffentlichten Parameter stellen eine sehr gute Basis für die pauschale Abschätzung des PV-Ertrags dar. Aus diesen Gründen wird bei der Weiterentwicklung des PV-Ertrag-Modells auf dieses Modell zurückgegriffen.

Tabelle 1: Modellparameter im PV-Ertrags Modell für die Zelltechnologien c-Si, CdTe und CI(G)S.

	<b>c-Si</b> (Huld, 2011)	<b>CdTe</b> (Huld, 2015)	<b>CI(G)S</b> (Huld, 2010)
<b>k<sub>1</sub></b>	-0.01724	-0.046689	-0.005521
<b>k<sub>2</sub></b>	-0.0447	-0.072844	-0.038492
<b>k<sub>3</sub></b>	-0.0047	-0.002262	-0.003701

	<b>c-Si</b> (Huld, 2011)	<b>CdTe</b> (Huld, 2015)	<b>Cl(G)S</b> (Huld, 2010)
<b>k<sub>4</sub></b>	0.000149	0.000276	-0.000899
<b>k<sub>5</sub></b>	0.000147	0.000159	-0.001248
<b>k<sub>6</sub></b>	0.000005	-0.000006	0.000001

### 1.2.3 Quantifizierung des thermischen Komforts (MRT, UTCI) und Urbane Energiebilanzmodelle (SOLWEIG, TEB)

Der thermische Komfort (Hitze oder Kältestress) hängt nicht nur von der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit ab, sondern von der gesamten Energiebilanz des menschlichen Körpers ab. Einerseits empfängt der Körper kurzwellige und langwellige Strahlung, andererseits gibt der Körper durch Emission langwellige Strahlungsenergie ab. Die Bilanz aller von allen Raumwinkeln einfallenden sowie der emittierten Strahlungsflüsse auf den Menschen wird durch die mittlere Strahlungstemperatur (mean radiant temperature MRT) beschrieben (Jendritzky et al., 1990; Weihs et al., 2012). Zusätzlich findet zwischen dem Körper und der Umgebung ein Austausch an fühlbarer und latenter Wärme (z.B. bei Schweißverdunstung) statt. Der menschliche Körper erzeugt durch Metabolismus Energie, die den Körper wärmt. Durch den fühlbaren Wärmefluss wird diese an die Umgebung abgeführt. Bei sehr starker Hitze dreht sich der fühlbare Wärmefluss um (Wärmezufuhr von der Luft zum Körper). Der fühlbare Wärmefluss hängt von der Temperaturdifferenz zwischen Körper und Luft und von der dazwischenliegenden isolierenden Schicht (Kleidung) ab. Bei Schweißverdunstung kühlt sich der Körper durch Verdunstungskühlung. Der Wind beeinflusst sowohl die Schweißverdunstung, sowie den fühlbaren Wärmestrom.

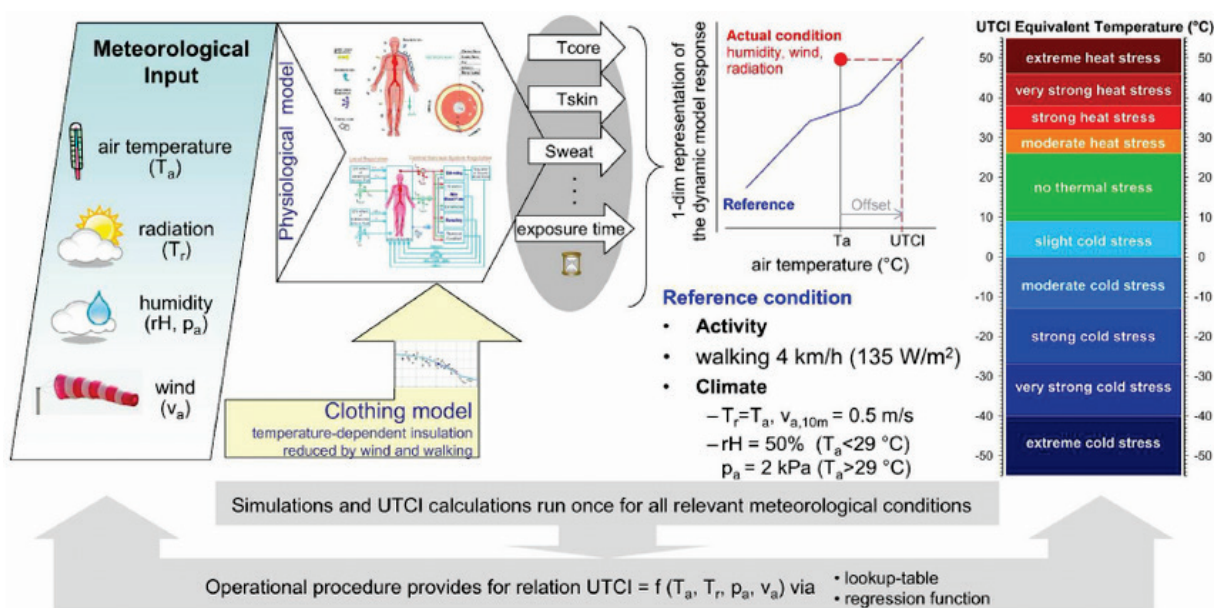


Abbildung 5: Beschreibung des Universal Thermal Climate Index (UTCI) bzw. des thermischen Komfortindex für den Menschen mit der zugehörigen Skala rechts. (Bröde et al., 2011)

Thermische Indizes (wie z.B. der Universale Thermale Klimaindex (UTCI) (Jendritzky et al., 1990; Weihs et al., 2012)) berücksichtigen deswegen nicht nur die Strahlungstemperatur, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, sondern auch den Wind (Abbildung 6).

In unserer Studie wird der thermische Komfort durch den thermischen Klimaindex „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI) beschrieben. Mit Hilfe einer Temperaturskala kann die in Grad Celsius angegebene UTCI Temperatur den einzelnen thermischen Komfortstufen (von extremen Kältestress bis zu extremen Hitzestress) zugeordnet werden.

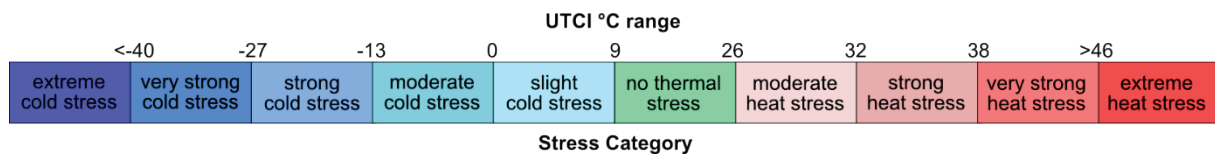


Abbildung 6: Vergrößerte Skala des universalen, thermischen Komfortindexes Source: climatechip.org

In diesem Projekt wurden unterschiedliche Energiebilanzmodelle verwendet und weiterentwickelt.

### SOLar and LOngWave Environmental Irradiance Geometry - SOLWEIG

Im Zentrums stand das Modell SOLWEIG (Lindberg et al., 2016), aufgrund seiner präzisen Berücksichtigung der urbanen Geometrie und der damit verbundenen Strahlungsflüsse. Das Ziel SOLWEIGs ist eine hochauflösende Berechnung der MRT. Diese ist besonders wertvoll, da der UTCI räumlich am stärksten mit der MRT variiert. Der UTCI wurde im Rahmen dieser Studie in das Programm SOLWEIG implementiert. Diesbezüglich war es notwendig die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit in das Modell einzubeziehen. Die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit wird in Anlehnung an das TEB (Masson, 2000) berechnet. Die MRT Berechnung beruht auf eine bereits in den früheren Versionen inkludierten Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur. Des Weiteren ist erwähnenswert, dass SOLWEIG gemeinsam mit anderen urbanen Modellen seit 2016 in das UMEP (Universal Environmental Predictor) Plugin für QGIS (Lindberg et al. 2017) integriert und frei zugänglich geworden ist.

### TEB

Das Town and Energy Balance Modell (TEB) (Masson, 2000) ist ein physikalisches Energiebilanzmodell, welches die kurzwelligen und langwelligen Strahlungsflüsse, latenten und fühlbaren Wärmefluss sowie die Speicherung im Boden und in Gebäuden berücksichtigt. TEB rechnet mit einzelnen Werten, wie prozentualer Flächenanteil von bebauter und versiegelter Fläche, Fensterfläche, Albedo und Wärmekapazität der Straßen, Wände und Dächer, welche für das jeweils gewählte Gebiet gleich bleiben. Dadurch können keine Unterschiede innerhalb des Straßencanyons berechnet werden, jedoch ist es aufgrund seiner vollständigen und etablierten Darstellung der urbanen Energieflüsse sehr hilfreich um die Auswirkung von Änderungen morphologischer Parameter wie Straßenbreite zu Höhe und Straßenorientierung, sowie Materialeigenschaften der Straßen, Wände und Dächer darzustellen und zu vergleichen. In diesem Projekt wurde TEB eingebettet in die Oberflächenmodellierungsplattform SURFEX (Surface Externalisée, Boone et al. 2017)

verwendet. SURFEX kann für sich stehend oder an ein atmosphärisches Modell gekoppelt benutzt werden.

#### 1.2.4 Methoden zur Bestimmung des visuellen Komforts - Definitionen und Richtlinien

Visueller Komfort wird in diesem Projekt als das Auftreten von Blendung durch starke Reflexionen von Oberflächen verstanden. Alle Oberflächen im urbanen Bereich reflektieren einfallende Sonnenstrahlung, aber auch Strahlung, die von anderen Oberflächen reflektiert wurde. Während raue Oberflächen wie z.B. rauer Beton *isotrop* – also in alle Richtungen reflektieren, reflektieren glatte Oberflächen wie z.B. Glas *spiegelnd* – also in einer Richtung gerichtet und abhängig vom Einstrahlungswinkel. Spiegelnde Oberflächen können besonders starke Blendungen verursachen, besonders wenn die Sonne selbst reflektiert wird, so dass für den Betrachter eine „zweite Sonne“ sichtbar wird (siehe Abbildung 7). Diese Blendung tritt jedoch nur sehr kurz auf. Die Häufigkeit mit der Blendung maximal auftreten darf, ist unter anderem z.B. für Österreich in der *ÖVE-Richtlinie R11-3* definiert.



Abbildung 7: „Zweite Sonne“ verursacht durch Glasfassade am TU Wien Gebäude Getreidemarkt 9 (Foto: AIT)

**Photovoltaikmodule** sind meistens mit Glas beschichtet. Es gibt jedoch unterschiedlich strukturierte Glasoberflächen, in der Bandbreite von glatter Oberfläche, über grob strukturiert, bis hin zu einer feinen Pyramiden-Struktur. Die Entscheidung für eine bestimmte Oberfläche hängt unter anderem von praktischen Gründen, wie auch von Design-Aspekten im Falle von Architektur ab. Während glatte Oberflächen die Sonne direkt spiegeln, streuen raue Oberflächen in alle Raumrichtungen.

**Sehr heller Beton** kann auch trotz isotroper Streuung hohe Energiemengen reflektieren und glatter Beton kann eine spiegelnde Komponente haben, weshalb Beton in diesem Projekt auf seine Blendwirkung untersucht wurde.

### ÖVE-Richtlinie R11-3 + Leuchtdichte

Wenn man von Blendung spricht, muss weiters in physiologische und psychologische Blendung unterschieden werden. Während die psychologische Blendung Unbehaglichkeit verursacht, bewirkt die physiologische Blendung (oder auch Absolutblendung genannt) eine messbare Herabsetzung des Sehvermögens. Physiologische Blendung tritt je nach Adaptationszustand und Vorschädigung des Auges ab einer Leuchtdichte von  $10^4 \text{ cd/m}^2$  auf (Mooshammer 2013+2015). Laut der ÖVE-Richtlinie R11-3 („Blendung durch Photovoltaikanlagen“, Version 10.05.2016, Entwurf) wird vorgeschrieben „das zeitliche Auftreten [von Absolutblendung] daher insofern zu beschränken, als dass weder die Einwirkzeit von 30 Minuten pro Tag, noch von 30 Stunden pro Jahr überschritten wird.“ Die Leuchtdichte (engl. Luminance) berechnet sich nach:

$$L = \int_{\lambda=380}^{\lambda=770} G(\lambda) * \alpha(\lambda) * V(\lambda) * Km * d\lambda$$

L ... Leuchtdichte [ $\text{cd/m}^2$ ]

G ... spektrale Bestrahlungsstärke [ $\text{W/m}^2/\text{nm}$ ]

$\lambda$  ... Wellenlänge

$\alpha$  ... spektrale Albedo

V ... relativer spektraler Hellempfindlichkeitsgrad

Km ... photometrisches Strahlungsäquivalent (Zahlenwert  $683 \text{ lm/W}$ )

Der relative spektrale Hellempfindlichkeitsgrad beschreibt die spektrale Hell-Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei Tageslicht (photometrischer Normalbeobachter gemäß CIE) (siehe Abbildung 8).

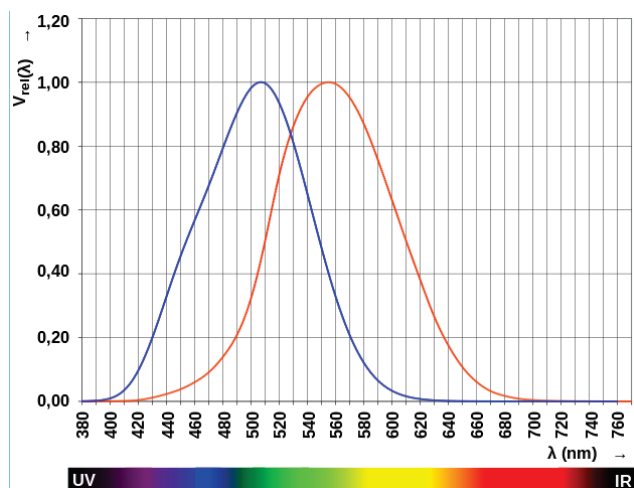


Abbildung 8: Reflektierte Strahlung gewichtet mit der spektralen Augenempfindlichkeit ( $V(\lambda)$ ) bei Tag (orange Kurve - „photopisch“) und Nacht (blaue Kurve - „skotopisch“) Quelle: Hahn, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9099891>, zugrunde liegende Zahlen: „OSA Handbook of Optics“ <http://www.intl-light.com/handbookthanks.html>.

### Tageslichtblendungs-Wahrscheinlichkeit (TBW)

Eine weitere Methode zur Evaluierung der Blendung ist die Tageslichtblendungswahrscheinlichkeit (TBW) nach der Formel von Wienold und Christoffersen (2006), wonach diese größer 0.1 aber kleiner 0.45 sein soll.

### Verhältnis der Objektentfernung zur Objektausdehnung (D/d)

Nach der Berechnung der Leuchtdichte oder anderen Methoden zur Berechnung von Blendung, kann ein von Ruesch et al. (Ruesch, 2016) angewendetes Kriterium verwendet werden, um zu beurteilen, ob die Blendung unkomfortabel ist. Dabei handelt es sich um das Verhältnis vom Abstand des Betrachters zu einem reflektierenden Objekt und die Flächenausdehnung der reflektierenden Oberfläche (D/d). Dieses Verhältnis kann für die unterschiedlichsten Oberflächen bestimmt werden und besagt, dass wenn dieser Wert unterschritten wird, die Blendung als unangenehm einzustufen ist, bzw. die Blendwirkung länger als 30 Minuten andauert (Ruesch, 2016). Der Wert ist jedoch abhängig von dem davor angewendeten Blendkriterium.

## **1.2.5 Vermessung hochreflektierenden Betonproben**

Als Grundlage für die Modellierung sind entsprechende Materialparameter zu ermitteln. Auf das thermische Verhalten hat die Albedo einer Oberfläche einen wesentlichen Einfluss. Dieser Faktor geht in die kurzwellige Strahlungsbilanz ein und nimmt je nach gewählten Materialien theoretisch Werte zwischen 0 % (vollständige Adsorption) oder 100 % (vollständige Rückstrahlung) ein. Tabelle 2 liefert eine Zusammenstellung einiger Albedowerte unterschiedlicher Materialien die im urbanen Umfeld präsent sind. Neben dem höheren Reflexionsvermögen spielt beispielsweise auch eine höhere Leuchtdichte einen wesentlichen Einfluss auf die Reduktion von Beleuchtungskosten in Städten (Peyerl et al. 2016).

Tabelle 2: Albedowerte ausgewählter Materialien nach (Matzarakis 2001, Fezer 1995, Nefzger and Karipot 1997)

<b>Material</b>	<b>Kurzwellige Albedo [%]</b>
Asphalt	5 – 20
Beton	10 – 35
Wiese	15 – 25
Laubwald	15 – 20

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Probekörper für typische im Straßenraum vorhandene Betonoberflächen hergestellt. Diese Probekörper sollten sowohl Straßenoberflächen aus Beton (Fahrbahnoberflächen als auch sonstige befestigte Oberflächen) als auch als Sichtbeton hergestellte Wandflächen repräsentieren. Neben Betonrezepturen mit normalen Betonausgangsstoffen wurden auch Probekörper mit speziell hellen Bindemitteln (Weißzement) angefertigt. Diese Probekörper sollen das grundsätzliche Potential einer gezielten Beeinflussung der Helligkeitseigenschaften von Beton auf die Wirksamkeit von Photovoltaikanlagen aufzeigen. In Tabelle 3 sind die verwendeten Betonrezepturen ersichtlich. Bei MV 1 und MV 2 handelt es sich um Rezepturen die

typischerweise für tragende Betonkonstruktion verwendet werden. Als Bindemittel wurde für MV 1 ein üblicher Transportbetonzement CEM II/A-L 42,5 N sowie für MV 2 ein Weißzement der Type CEM II/A-L 42,5 R eingesetzt. Als Gesteinskörnung kam typisches Rundkorn (karbonatisch) mit einer stetigen Sieblinie zum Einsatz. MV 3 und MV 4 repräsentieren Betonrezepturen für Straßenoberbeton mit Kantgesteinskörnung und einer Sieblinie mit Ausfallskörnung. Als Bindemittel wurde für MV 3 ein für Betonstraßen typischer Deckenzement CEM II/B-S 42,5 N sowie für MV 4 ein Weißzement der Type CEM II/A-L 42,5 R verwendet.

Tabelle 3: Rezepturen der hergestellten Probekörper

Mische	MV 1	MV 2	MV 3	MV 4
	Einwaage [kg/m <sup>3</sup> ]			
Zementtype	CEM II/A-L 42,5N	CEM II/A-L 42,5 R weiß	CEM II/B-S 42,5N (DZ)	CEM II/A-L 42,5 R weiß
Zementeinwaage	283	283	450	450
Wasser	146	146	170	170
Rundkorn 0/4	735	735	-	-
Rundkorn 4/8	339	339	-	-
Rundkorn 8/16	297	297	-	-
Rundkorn 16/32	455	455	-	-
Kantkorn 0/2	-	-	567	571
Kantkorn 4/8	-	-	1210	1218
W/B-Wert	0.43	0.43	0.38	0.38

Neben der Auswahl der Betonzusammensetzung inkl. Wahl von Zement und Gesteinskörnung hat die Oberflächentexturierung einen wesentlichen Einfluss auf die optische Wirkung bzw. die lichttechnischen Eigenschaften von Oberflächen. Abbildung 9 gibt einen Überblick über verschiedene Oberflächenausbildungen von Betonoberflächen. Betonoberflächen werden an der Oberseite in der Regel (z.B. mit einem Glättschwert) glatt abgezogen (Abbildung 9-2). Werden gewisse Anforderungen an eine Griffigkeit (z.B. bei Gehwegen oder Verkehrsflächen) gestellt, ist die einfachste Oberflächentexturierung das Aufbringen eines Besenstriches. Hierbei wird die frische Betonoberfläche mit einem Kunststoffborstenbesen abgezogen (Abbildung 9-1). Für stark befahrene Verkehrsflächen kommt in der Regel eine Waschbetonstrukturierung zum Einsatz. Die Herstellung erfolgt indem auf die glatt abgezogene Oberfläche ein Verzögerer (verzögert den Erstarrungsvorgang der oberen Betonschichte) aufgebracht und nach dem Erhärten des unteren Betons der oberflächennahe Mörtel entfernt wird. Es entsteht eine den Waschbetonplatten ähnliche Struktur mit guter Griffigkeit und gutem Entwässerungsverhalten sowie positiven lärmtechnischen Eigenschaften (Abbildung 9-3). Werden Wände in Betonschalungen hergestellt entsteht je nach Schalhauttyp eine glatte Oberfläche mit vereinzelt Luftporen. Diese Texturierung ist bei allen Sichtbetonbauteilen anzutreffen (Abbildung 9-4).

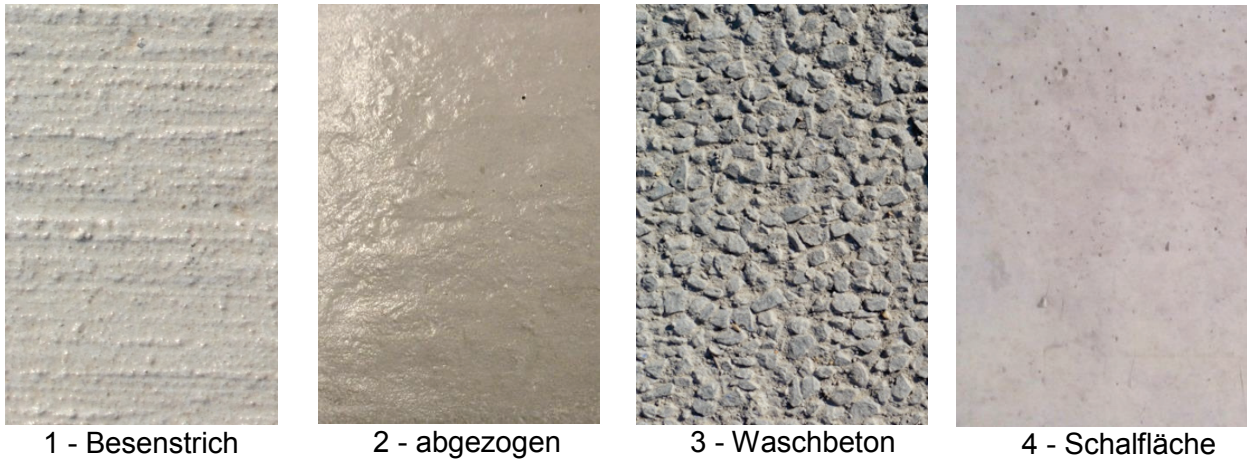


Abbildung 9: Oberflächenausbildung typischer Betonoberflächen

Zur besseren Darlegung der hergestellten Probekörper sowie der Anwendungsmöglichkeiten im urbanen Raum gibt Tabelle 4 einen Überblick über die hergestellten Probekörper sowie deren Bezeichnung für die Messung der Helligkeitseigenschaften.

Tabelle 4: Hergestellte Probekörper sowie Anwendungsmöglichkeiten im urbanen Raum

Mische	Beton	Oberfläche	Anwendungsbeispiele	Bezeichnung
MV 1	Normalbeton	Besenstrich	Gehwege etc.	MV1_02
		abgezogen	nicht befahrbare Betonflächen	MV1_01
		Schalfläche	Sichtbetonmauer	MV1_02
MV 2	Normalbeton hell	Besenstrich	Gehwege etc.	MV2_01
		abgezogen	sonst. mit Beton befestigte Flächen	MV2_02
		Schalfläche	Sichtbetonmauer	MV2_01 / 02
MV 3	Straßenbeton	Besenstrich	Straßen im niederrangigem Netz	MV3_01
		abgezogen	sonst. mit Beton befestigte Flächen	MV3_02
		Waschbetonstruktur	Straßen im hochrangigem Netz	MV3_03
		Schalfläche	Sichtbetonmauer	MV3_01 / 03
MV 4	Straßenbeton hell	Besenstrich	Straßen im niederrangigem Netz	MV4_01
		abgezogen	sonst. mit Beton befestigte Flächen	MV4_02
		Waschbetonstruktur	Straßen im hochrangigem Netz	MV4_03
		Schalfläche	Sichtbetonmauer	MV4_01 / 03

Die gemessenen Oberflächen der Betonmischen MV 1 bis MV 4 sind in Abbildung 10 bis Abbildung 13 dargestellt.

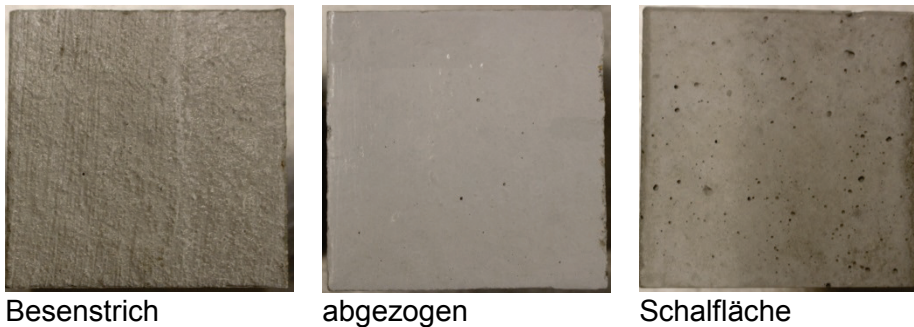


Abbildung 10: Oberflächenausbildung MV 1 Normalbeton



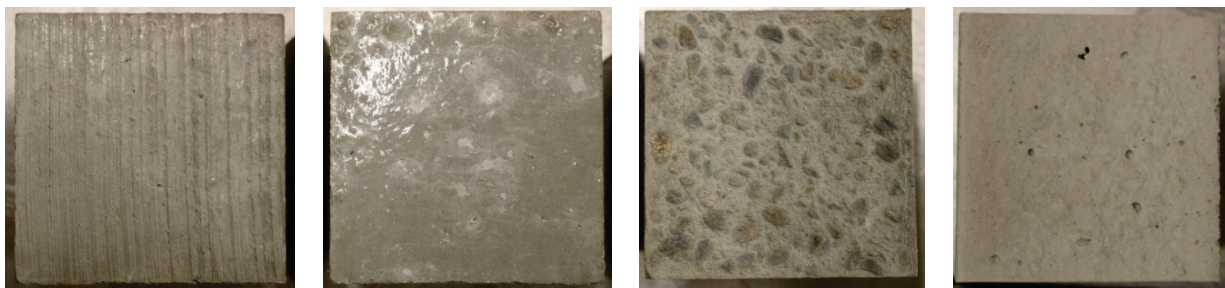


Besenstrich

abgezogen

Schalfläche

Abbildung 11: Oberflächenausbildung MV 2 Normalbeton hell



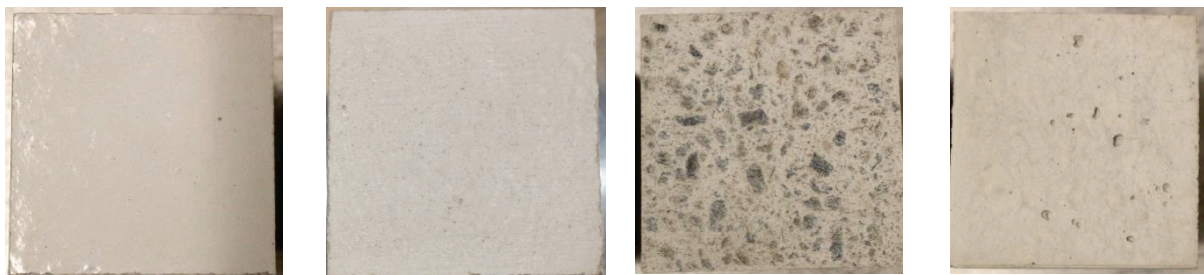
Besenstrich

abgezogen

Waschbetonstruktur

Schalfläche

Abbildung 12: Oberflächenausbildung MV 3 Straßenbeton



Besenstrich

abgezogen

Waschbetonstruktur

Schalfläche

Abbildung 13: Oberflächenausbildung MV 4 Straßenbeton hell

## 1.2.6 Vorbereitung der Modelleingabeparameter

### ***Meteorologische Input: Perioden***

#### Thermischer Komfort (SOLWEIG neu):

Um den thermischen Komfort zu simulieren wurden 5 trockene, heiße Tage um den 21. Juni 2017 ausgewählt. Zusätzlich wurden zwei Tage Ende Dezember und ein Tag Ende August ausgewählt um mit Ergebnissen bei tieferem Sonnenstand vergleichen zu können.

Tabelle 5: Daten mit minimaler, maximaler Lufttemperatur sowie Globalstrahlung am Sonnenzenit für Szenarientage

Datum		$T_a$ max [°C] (am Dach gemessen)	$T_a$ min [°C] (am Dach gemessen)	Globalstrahlung Sonnenhöchststand [W/m <sup>2</sup> ]
30.12.2016	sonnig, leichter bis mäßiger Wind	3,7	-3,5	296
31.12.2016	sonnig, leichter bis mäßiger Wind	5,6	-4,8	309
3.6.2017	zeitweise bedeckt, windstill	27,6	18,1	949
9.6.2017	sonnig, windig	25,6	12,0	960
16.6.2017	bedeckt, windig	26,7	16,7	265
19.6.2017	sonnig, windstill	28,0	16,3	961
20.6.2017	sonnig, leichter bis mäßiger Wind	32,3	16,9	941
30.8.2017	sonnig, leichter bis mäßiger Wind	28,5	13,5	804

#### Solarertrag (SEBE PV):

Der PV-Ertrag wurde für insgesamt sechs einzelne Tage im Sommer berechnet. Diese Tage sind der 3.6.2017, 9.6.2017, 16.6.2017, 19.6.2017, 20.6.2017 und der 30.8.2017 (siehe auch Tabelle 5). Zusätzlich wurde auch der PV-Ertrag über ein ganzes Jahr hinweg mit Wetterdaten vom 1. August 2016 bis 31. Juli 2017 simuliert.

### **Geodata, idealisiert**

Für die Simulationen wurden in erster Linie idealisierte Stadtsituationen simuliert. Es wurden zwei Situationen ausgewählt, die zum einen häufig in Wien vorzufinden sind, zum anderen auch Potential für Photovoltaiknutzung bieten. Der „Canyon“ hat ein Höhe/Breite Verhältnis von Gebäudehöhe zu Straßenbreite (HW – height width ratio) von 1. Der „Platz“ hat ein HW von 0.2.

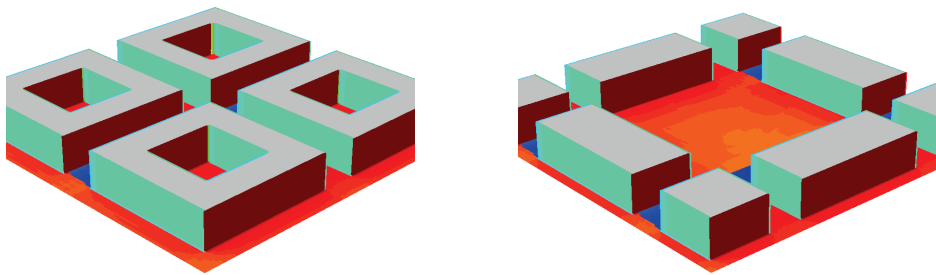


Abbildung 14: 3D Visualisierung der Stadtsituationen, links: „Canyon“, rechts „Platz“

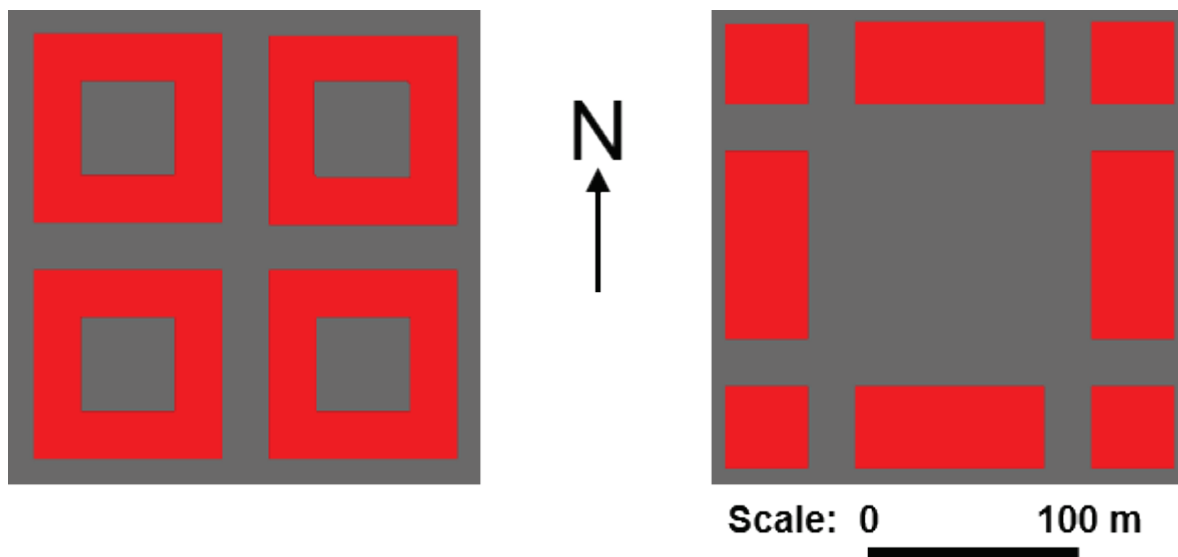


Abbildung 15: Genordete Aufsicht der gewählten Szenarien: links: „Canyon“, rechts: „Platz“. Die Farben bedeuten: grau – Boden, rot – Gebäude.

### **Geodata, real (BOKU):**

Neben den idealisierten Simulationen wurde auch exemplarisch ein reales Gebiet mit den Geodaten der Stadt für die Simulation aufbereitet. Die Flächennutzung wurde aus der Flächennutzungsplanung (FMZK), die Gebäudemorphologie aus dem digitalen Oberflächenmodell (DOM) bezogen.

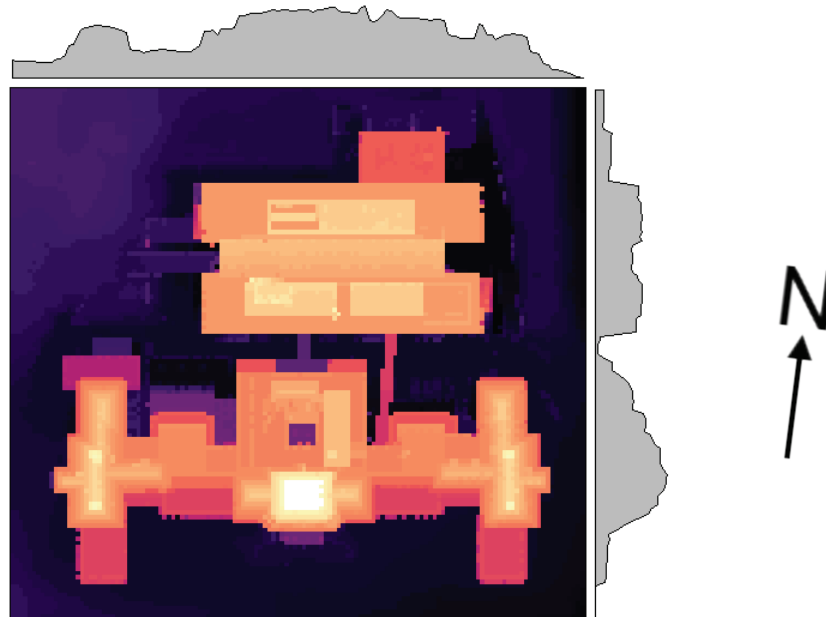


Abbildung 16: Detailliertes digitales Oberflächenmodell der Universität für Bodenkultur am Standort Peter-Jordan Straße mit den Gebäuden Exnerhaus (südliches) und Schwachhöferhaus (nördliches). Dieses Modell dient als Input für die Programme SOLWEIG und SEBEpv.

### 1.2.7 Stadtsituationen und Szenarien

Es wurden folgende städtebauliche Szenarien ausgewählt und jeweils für die Stadtsituation Platz und Canyon simuliert:

Tabelle 6: Städtebauliche Szenarien

	Albedo der Fassade	Albedo von Fahrbahn + Gehsteig	Simuliert mit		
			SOLWEIG	SEBE- PV	TEB
<b>PLATZ (HW=0.2)</b>					
Status Quo (STQ) / Asphalt- Putz	0,2	0,13	X	X	X
Asphalt-dunkle Fassade	0,1	0,13			X
„heller Boden“	0,2	0,56			X
Beton-Beton	0,56	0,56			X
Beton-Weiß	0,56	0,8			X
Hell mit PV	0,1 (PV)	0,56	X	X	
mit Wiese	0,1 (PV)	0,56	X		
mit Wiese und Bäume	0,1 (PV)	0,56	X		
Asphalt – 70%PV	0,1 (PV)	0,13			X
Beton – 70%PV	0,1 (PV)	0,56			X
Asphalt – PV Dach	0,2	0,13			X
<b>CANYON (HW=1)</b>					
STQ / Asphalt-Putz	0,2 (Putz)	0,13	X	X	X
Asphalt-dunkle Fassade	0,1	0,13			X

	<b>Albedo der Fassade</b>	<b>Albedo von Fahrbahn + Gehsteig</b>	<b>Simuliert mit</b>		
			<b>SOLWEIG</b>	<b>SEBE- PV</b>	<b>TEB</b>
„heller Boden“	0,2	0,56			X
Beton-Beton	0,56	0,56			X
Beton-Weiß	0,56	0,8			X
„weißer Canyon“	0,80	0,8			X
Beton-Putz isoliert	0,2	0,56			X
Asphalt-Putz isoliert	0,2	0,13			X
25% Wiese	0,2	0,13			X
25% Bäume	0,2	0,13			X
mit Wiesenstreifen + Bäume	0,56	0,80	X		
mit Wiesenstreifen + Bäume	0,80	0,80	X		
mit Wiesenstreifen	0,1 (PV)	0,56			X
mit Wiesenstreifen + Bäume	0,1 (PV)	0,56	X		X
Hell mit PV	0,1 (PV)	0,56		X	X
Beton – 70%PV	0,1 (PV)	0,56			X

Während bei den oben beschriebenen Simulationen die Albedo der Dachflächen konstant gehalten wurde (TEB: 0,14), wurden zusätzlich auch der Einfluss der Dachflächen untersucht. Diese zusätzlichen Szenarien sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7: Szenarien unter Berücksichtigung der Albedo von Dachflächen; Simulation mit TEB.

	<b>Albedo der Fassade</b>	<b>Albedo des Bodens</b>	<b>Albedo der Dachflächen</b>
„DachPV“	0,2	0,13	0,1 (PV)
„weißes Dach“	0,2	0,13	0,8
„helle Horizontale“	0,2	0,56	0,8
„alles Weiß“	0,8	0,8	0,8

Für SEBE<sub>pv</sub> wurden Reflexionen von den Fassaden vernachlässigt und daher nur die Albedo der Straßenflächen berücksichtigt. Alle Fälle wurden mit hinterlüftet montierten PV-Anlagen gerechnet. Die nicht-hinterlüftete Anlage wurde nur mit einer Zwischen-Version von SEBE<sub>pv</sub> gerechnet, in welcher der Ground-View-Factor noch nicht implementiert war.

Für die TEB Simulationen wurden die meisten Gebäudeparameter aus dem Projekt URBANIA übernommen, in dem eine ausführliche Literaturrecherche und Aufarbeitung der vorhandenen Daten für Wien durchgeführt wurde. In dieser Studie wurde folgendes allgemeines Setup für TEB verwendet, das eine durchschnittliche Wiener Stadtsituation repräsentiert.

- Bebaute Fläche = 50% der Gesamtfläche
- Fensteranteil = 30% der Fassadenfläche

- Bäume = 17m, Laubbäume mit mittlere Dichte
- PV Flächenanteil = 70% der Fassadenfläche
- PV Albedo: 0,1
- PV Emissivität: 0.9

Mittels TEB wurde die Sensitivität des Modells bezüglich der wichtigsten Parameter dargestellt:

- Höhe/Breite Verhältnis = 0,2 / 1 (Platz/Canyon)
- Vegetationsfläche= 0 / 25% / 50% der Grundfläche
- Albedo der Böden: 0,13 / 0,56 / 0,8
- Albedo der Wände: 0,10 / 0,2 / 0,56 / 0,8
- Albedo der Dächer: 0,14 / 0,8
- Albedo der PV-Module: 0,1
- Wärmekapazität der Wände: 1520000 / 1496000 J/m<sup>3</sup>
- Wärmekapazität der Dächer: 1554000 / 1496000 J/m<sup>3</sup>
- Thermische Leitfähigkeit der Wände: 1,7 / 0,11 W/(mK)
- Thermische Leitfähigkeit der Dächer: 1,4 / 0,11 W/(mK)

Für die SOLWEIG Simulationen wurden die einzelnen Gebäudeparameter von TEB übernommen. Bei den Parametern für Berechnungen, wo sich TEB und SOLWEIG grundlegend unterscheiden, wurden Werte zum Teil von Smart Minerals aber auch aus einer Literaturrecherche entnommen.

- Bäume = 10 m, Durchmesser = 5 m, Dichte kann nicht eingestellt werden
- Putz oder PV Flächenanteil der Fassade = 1,0
- PV Albedo: 0,10
- PV Emissivität: 0,90

Mittels SOLWEIG wurde die Sensitivität des Modells bezüglich der wichtigsten Parameter dargestellt:

- Höhe/Breite Verhältnis = 0,2 / 1 (Platz/Canyon)
- Albedo der Böden: 0,13 / 0,56 (0,13 kombiniert) / 0,80
- Albedo der Wände bzw. PV: 0,10 / 0,20 / 0,56 / 0,80
- Albedo der Dächer: 0,18
- Wärmespeicherzahl Asphalt/Beton/Lehm: 1196000 / 2125925 / 2260000 J/(m<sup>3</sup>K)
- Wärmespeicherzahl des Dachs: 1288000 J/(m<sup>3</sup>K)
- Thermische Leitfähigkeit Asphalt/Beton/Lehm: 0,7 / 1,0 / 2,2 W/(mK)
- Thermische Leitfähigkeit des Dachs: 0,5 W/(mK)

Bei „Albedo der Böden“ wird die Konfiguration „0,56 (0,13 kombiniert)“ erwähnt. Dies bedeutet dass die Gehsteige an den nördlichen Fassaden (also im Schatten) aus

Asphalt und die restlichen Bodenoberflächen aus Beton bestehend angenommen wurden. In den folgenden Graphiken wird dieser Umstand als „0,56 + 0,13“ bezeichnet.

## **2 Ergebnisse**

### **2.1 Modellimplementierung und -entwicklung**

#### **2.1.1 Spektrale Albedo von Betonrezepturen**

Die Reflexion oder Albedo von Betonrezepturen gibt an, wie viel Strahlung absolut vom Boden reflektiert wird. Eine Erhöhung der Albedo und der vom Boden reflektierten auf die Fassaden einfallenden Strahlung, führt zu einer Erhöhung des Stromertrags von Photovoltaikanlagen. Weiters bewirkt eine höhere Reflexion eine geringere Erwärmung der Oberflächen und indirekt auch der Lufttemperatur.

Da die Sonnenstrahlung eine starke spektrale Abhängigkeit in ihrer Intensität aufweist, ist es wichtig, dass Beton auch in der richtigen Wellenlänge stark reflektiert.

Durch die erhöhte Reflexion steigt jedoch auch die MRT, der UTCI und es kann zu Blendung kommen. Die Empfindlichkeit des menschlichen Auges ist abhängig von der spektralen Verteilung der Strahlung.

Die in Kapitel 1.2.6 beschriebenen Betonproben wurden verschickt und im Zuge des Synergieprojektes „Photonic Cooling“ von Johanneum Research spektral vermessen. Es zeigten sich deutliche Unterschiede sowohl im sichtbaren als auch im infraroten Bereich (Tabelle 8). Es wurde die Reflexion im gesamten Halbraum (Total Integrated Scatter = TIS) gemessen. Zusätzlich wurde auch die diffuse Reflexion (DIF) ohne spiegelnden Anteil gemessen. Für die meisten Betonoberflächen war der spiegelnde Anteil sehr gering, das bedeutet, dass man in guter Näherung in der Modellierung von einer nicht spiegelnden Oberfläche ausgehen kann.

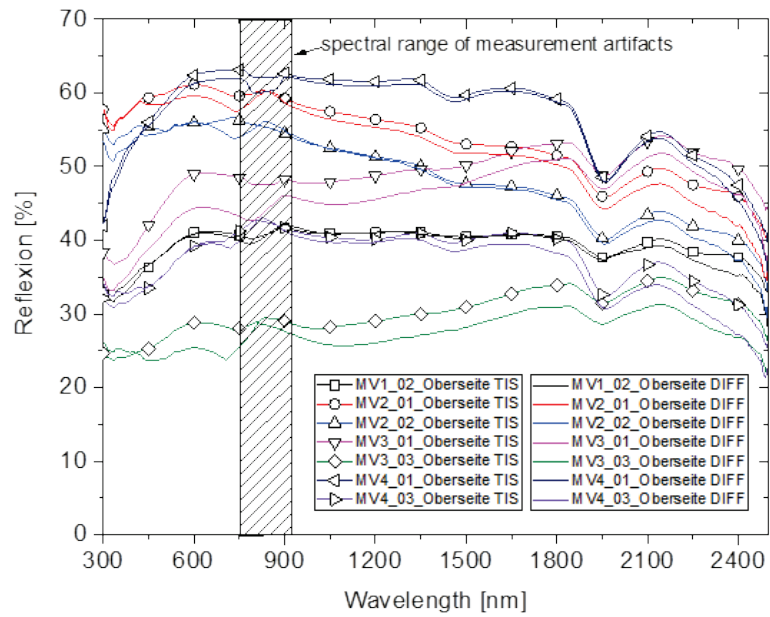


Abbildung 17: Spektrale Reflexion der unterschiedlichen Betonsorten aus dem gesamten Halbraum (TIS) und ohne die spiegelnde Komponente (DIF), Quelle: Gerhard Peharz – Projekt Photonic Cooling.



Tabelle 8: Albedo für unterschiedliche Wellenlängenbereiche Gehwege normal (MV1\_02) und hell (MV2\_01) und Straßenbetonsorten mit Besenstrich normal (MV3\_01) und hell (MV4\_01) und mit Waschbetonstruktur normal (MV3\_03) und hell (MV4\_03) gemittelt aus den Messungen

	nm	MV1_02	MV2_01	MV3_01	MV4_01	MV3_03	MV4_03
kurzwellig	300-2500	0.39	0.54	0.49	0.57	0.30	0.38
sichtbar	380-750	0.39	0.6	0.46	0.6	0.27	0.37
violett	380-450	0.35	0.58	0.4	0.54	0.25	0.33
blau	450-495	0.37	0.59	0.43	0.57	0.26	0.34
grün	495-570	0.39	0.6	0.47	0.6	0.27	0.37
gelb	570-590	0.41	0.61	0.48	0.62	0.29	0.39
orange	590-620	0.41	0.61	0.49	0.62	0.29	0.39
rot	620-750	0.41	0.6	0.49	0.63	0.28	0.4
NIR - A	750-1400	0.41	0.57	0.48	0.62	0.29	0.41
NIR - B	1400-3000	0.39	0.49	0.51	0.54	0.32	0.36

Die Messungen wurden danach von BOKU-Met mit dem genormten Sonnenspektrum der ICE Norm 60904-3 Norm gewichtet um die absolute reflektierte Irradianz (Bestrahlungsstärke) sowie deren sichtbaren Anteil der einzelnen Betonsorten zu berechnen (Abbildung 18, Tabelle 9).

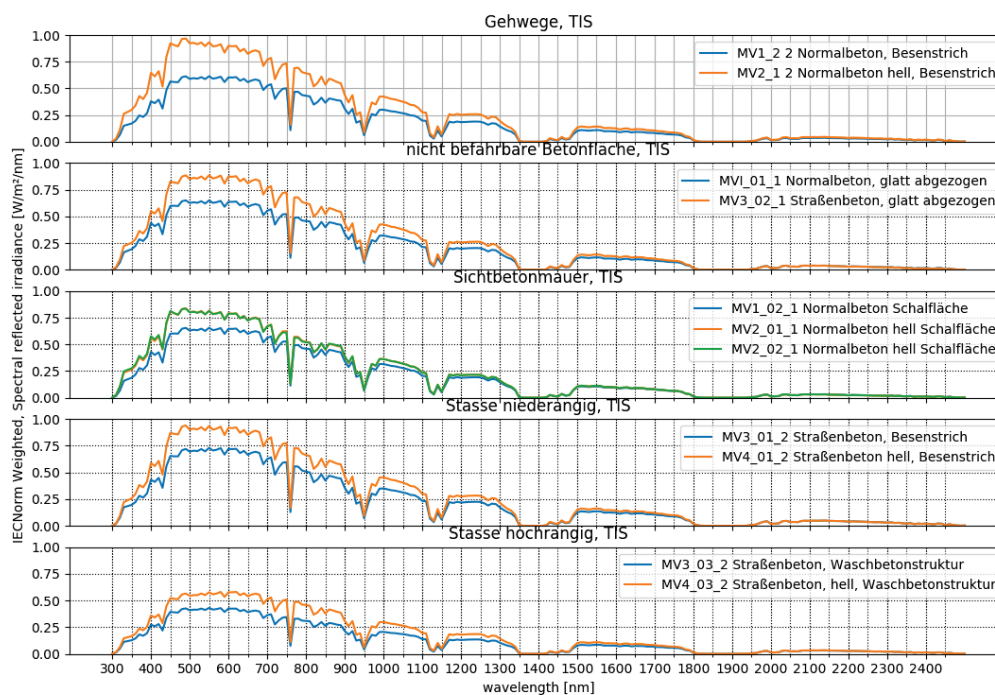


Abbildung 18: Spektrale reflektierte Irradianz (Bestrahlungsstärke) der unterschiedlichen Betonproben, berechnet mit der Referenzstrahlung aus der ICENorm 60904-3.

Tabelle 9: Bestrahlungsstärke (I) und reflektierte Strahlung (MV#) für unterschiedliche Wellenlängenbereiche für Gehweg normal (MV1\_02) und hell (MV2\_01) und Straßenbetonsorten mit Besenstrich normal (MV3\_01) und hell (MV4\_01) und mit Waschbetonstruktur normal (MV3\_03) und hell (MV4\_03) berechnet aus normierten Strahlungsbedingungen (ICENorm 60904-3)

	Nm	I	MV1_02	MV2_01	MV3_01	MV4_01	MV3_03	MV4_03
Kurzweilig	300-2500	983.70	390.25	574.64	464.04	591.35	278.17	379.62
sichtbar	380-750	499.14	195.69	299.94	231.18	299.88	136.54	185.88
Violett	380-450	59.65	20.7	34.91	23.63	32.04	14.75	19.43
Blau	450-495	46.12	17.02	27.43	19.83	26.18	11.82	15.67
Grün	495-570	91.22	35.83	55.07	42.52	54.69	25.03	33.42
Gelb	570-590	14.88	6.04	9.07	7.21	9.2	4.24	5.73
Orange	590-620	28.86	11.84	17.64	14.14	18.01	8.31	11.32
Red	620-750	168.23	69.09	101.46	82.3	105.96	47.84	67.36
NIR - A	750-1400	341.23	139.75	198.94	164.1	211.66	98.25	140.7
NIR - B	1400-3000	101.33	40.58	51.81	52.29	58.17	32.99	39.14

### 2.1.2 Verknüpfung urbanes Einstrahlungspotential mit PV-Ertragsmodell

Entsprechend dem State-of-the-art gibt es bereits unabhängige Tools bzw. Modelle zur Berechnung des Einstrahlungspotentials auf Gebäudeflächen in der Stadt und des PV-Ertrags an beliebig orientierten und geneigten Flächen auf Basis der Einstrahlung, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit. Jedoch gab es kein Tool, in welchem beide Simulationen gekoppelt sind.

Bei der Berechnung des Einstrahlungspotentials wird die Rechenzeit verkürzt, indem zuerst alle Einstrahlungskomponenten über den gewünschten Zeitraum aufsummiert werden und danach die Verschattung an Gebäuden bestimmt und die Verteilung der Einstrahlung auf die Gebäudeflächen berechnet wird (Lindberg, 2015). Dadurch muss bei Raster-Oberflächendaten der Gebäude nur einmal der Schattenwurf berechnet werden, was an sich bereits zeitaufwendig ist. Das Ergebnis dieser verkürzten Berechnung lässt sich allerdings nicht für die nachfolgende PV-Ertragsberechnung verwenden. Wie bereits erörtert, hängt der PV-Ertrag von der Einstrahlung und der Lufttemperatur eines jeden Zeitpunktes ab. Daher ist es notwendig die Algorithmen zur Einstrahlungsberechnung zu ändern und für jeden Datenpunkt einer Zeitreihe die Einstrahlung an Gebäudeoberflächen zu bestimmen. Dort setzt die in diesem Projekt durchgeführte Kopplung mit dem PV-Ertragsmodell an, um für jeden Zeitpunkt den Ertrag der PV-Anlage zu berechnen und anschließend über den

gesamten Simulationszeitraum aufzusummieren. Das gekoppelte PV-Ertragsmodell, welches speziell für urbane Strukturen gedacht ist, wird als SEBEpv, bzw. auch SEBE-PV bezeichnet.

Als Basis für das in diesem Projekt entwickelte Tool wurden folgende, bereits existierende, Modelle verwendet: Für die Berechnung der Einstrahlung im urbanen Gebiet wurde SEBE (Solar Energy on Building Envelopes) verwendet (Lindberg, 2015). Es ist Teil des Paketes UMEP (Urban Multi-scale Environmental Predictor) zur Simulation diverser Umweltfaktoren in der Stadt (Lindberg, 2017). Die Berechnung des PV-Ertrags erfolgt nach (Huld, 2011) und benötigt sechs Modellparameter, welche in der Literatur für verschiedene PV-Zelltechnologien zu finden sind. Des Weiteren gehen die Lufttemperatur und die Windgeschwindigkeit nach (King, 2004) in die Berechnung des PV-Ertrags mit ein.

Zusätzlich ist eine Kopplung von SEBE-PV indirekt mit Energiebilanzmodellen möglich. Dabei liefert die Energiebilanz als Resultat eine Lufttemperatur im Straßencanyon. Diese berechnete Lufttemperatur ersetzt dann eine etwaige Temperatur aus den Wetterdaten, die als Eingabedaten verwendet werden. Eine schematische Darstellung des Zusammenspiels der Modelle ist in Abbildung 19 zu finden.

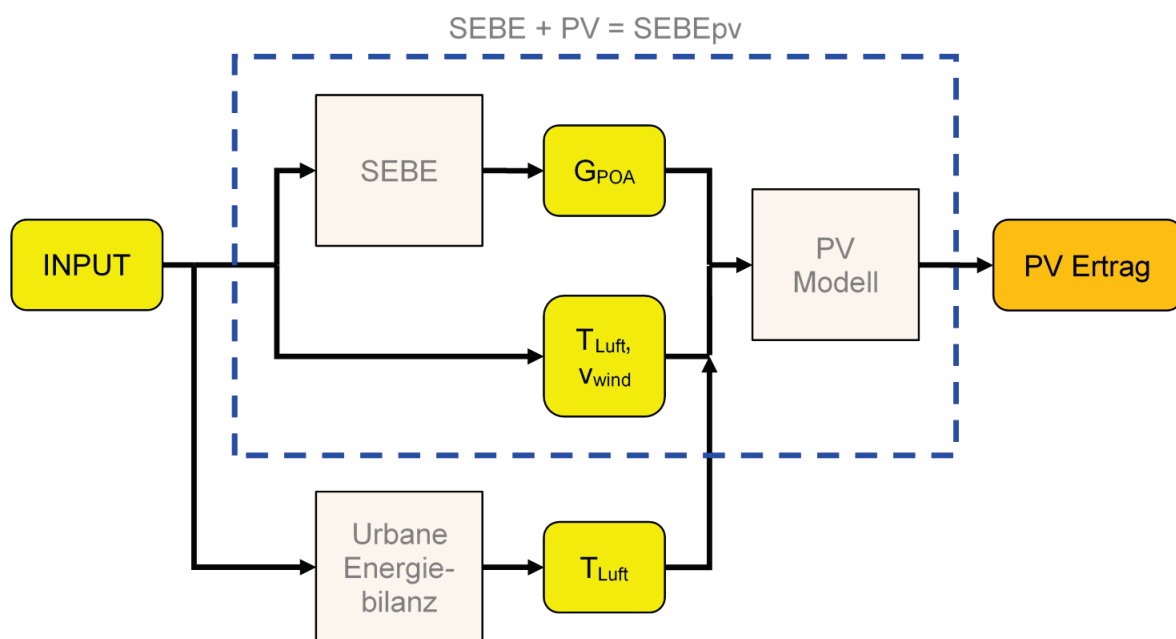


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Co-Simulation von SEBE, PV-Modell und Urbane Energiebilanz zur Berechnung des Photovoltaik Ertrages.

Zusätzliche, wichtige Weiterentwicklungen in SEBE-PV beziehen sich auf die vom Boden reflektierte Einstrahlung auf die Fassadenflächen. Die erste Version des Modells berücksichtigt für jeden Fassaden-Pixel, ob Bodenpunkte in 145 verschiedene Raumrichtungen innerhalb einer Hemisphäre sichtbar sind. Anschließend wird die vom Boden in den Halbraum reflektierte Einstrahlung mit der Anzahl jener sichtbaren Raumrichtungen gewichtet und zur direkten und diffusen Sonneneinstrahlung an den Wandpunkten hinzuaddiert (Revesz, 2017). Als vom Boden reflektierte Einstrahlung wird die globale, horizontale Einstrahlung aus den Eingabedaten unter Berücksichtigung des

Reflexionsvermögens der Bodenoberfläche angenommen. Außerdem wird die Reflexion vom Boden als isotrop angenommen.

Eine weiter entwickelte Version berücksichtigt zudem den Sichtfaktor zwischen Wandpunkt und Bodensegmente in jede der 145 Raumwinkel. Zudem ist die vom Boden reflektierte Einstrahlung davon abhängig, welche Einstrahlung die Bodensegmente tatsächlich empfangen, d.h. unter Berücksichtigung des Sky-View-Factor (SVF) und der Verschattung.

### 2.1.3 Modellentwicklung und Erweiterung auf Basis von SOLWEIG

Als erster Schritt wurden die Berechnungs- und Simulationsmethoden von SOLWEIG näher betrachtet und mit Messungen überprüft. Dazu wurden die Bilder der Infrarotkamera (siehe Kapitel 1.2.1) ausgewertet, die Differenz  $T_w - T_a$  der Wandtemperatur zur gegebenen Lufttemperatur (gemessen mit DS2 Sonic Anemometer) gebildet und als Funktion des Sonnenelevationswinkels aufgetragen (Abbildung 21, links). Die Theorie dahinter geht davon aus, dass die Oberflächentemperatur umso höher ist, je näher die Sonne am Zenit steht. Eine Regressionsanalyse wird hierzu verwendet um die jeweilige Oberflächentemperatur der Wand, des Bodens und des Dachs zu berechnen. Man erkennt jedoch in Abbildung 21 dass bei höheren Elevationswinkeln ( $> 55^\circ$ ) dieser lineare Zusammenhang nicht mehr gegeben ist ( $R^2 = 0.56$ ) bzw. gilt dies nur für horizontale Flächen. Um genauere Regressionsparameter zu bestimmen wurde diese Temperaturdifferenz als Funktion der Globalstrahlung (Abbildung 21, rechts) auf die vertikale Fläche aufgetragen (gemessen mit dem EMS11 Sensor im Straßencanyon). Die erklärte Varianz ergab  $R^2 = 0.79$ . Diese Parametrisierung ist von großer Bedeutung, da die langwellige Abstrahlung der einzelnen Flächen mit der ermittelten Oberflächentemperatur berechnet wird, welche wiederum für die MRT bzw. den UTCI benötigt wird. Als zweiter Schritt wurde ein Energiebilanzmodell für Photovoltaikmodule

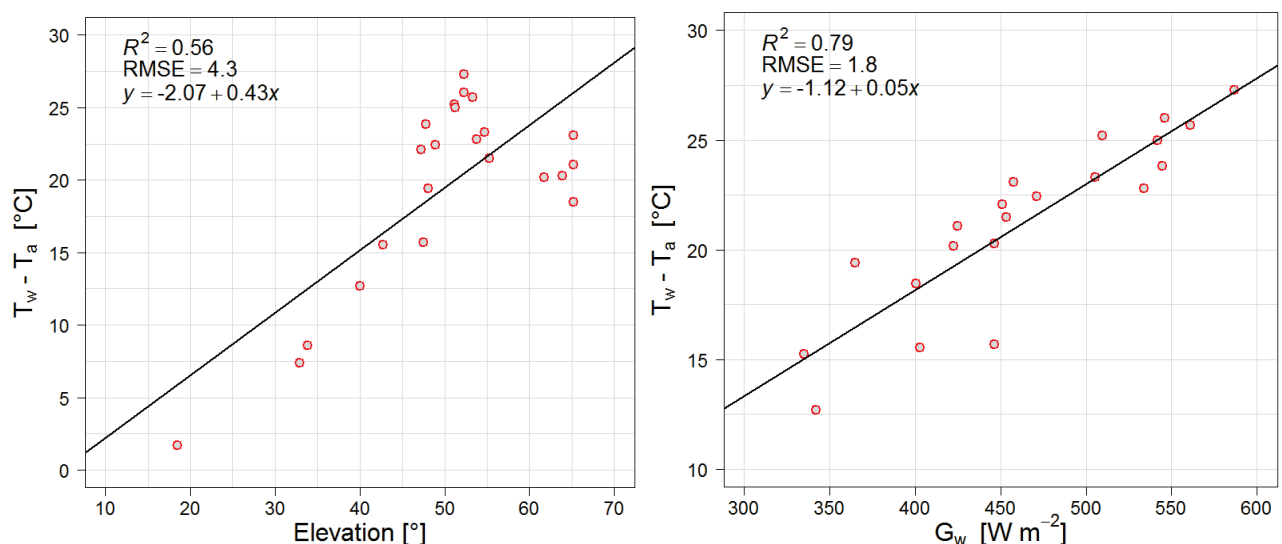


Abbildung 21: Links: Gemessene Differenz der Oberflächentemperatur an der Wand (Schwackhöferhaus) und der Lufttemperatur 1 m davor als Funktion des Sonnenelevationswinkels zur Zeit des Sonnenhöchststandes. Rechts: Großteils die gleichen Wandtemperaturen bzw. deren Differenz aber als Funktion der Sonneneinstrahlung auf die vertikale Fläche, gemessen mit dem EMS11 Sensor. Die erklärte Varianz ( $R^2$ ), die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) sowie die Regressionsparameter sind in der linken oberen Ecke gegeben.

implementiert. Hierzu stützte man sich auf die wissenschaftliche Arbeit von Lodi et al. „Modelling the heat dynamics of a monitored Test Reference Environment for Building

Integrated Photovoltaic systems using stochastic differential equations” aus dem Jahre 2012. Dabei werden sämtliche Energieflüsse vom und zu einer gebäudeintegrierten Photovoltaikanlage berechnet. Die einzelnen Parameter (Konvektionsterme, Albedo, etc.) wurden für das im Straßencanyon verwendete PV Modul bestimmt und angepasst. Durch die Euler Methode konnte nun die PV Oberflächentemperatur berechnet werden (Lodi et al., 2012).

Um weiter in die Richtung „physikalische Modelle“ zu gehen, wurde anstatt der (zuvor erwähnten) üblichen Regressionsmethode die „Force-Restore“ Methode für die Berechnung der Bodenoberflächentemperatur verwendet. Dabei wird der Boden in zwei Schichten aufgeteilt. Die untere, thermisch nicht aktive Schicht wird mit einer konstanten Temperatur  $T_m$  versehen (abhängig von der Jahreszeit und dem Tagesmittel). Für die obere, aktive Schicht spielt die Untere die Rolle eines Wärmereservoirs. Die Oberflächentemperatur  $T_g$  lässt sich über die sehr genaue Berechnung (mit dem vorhandenen SOLWEIG) der Strahlungsbilanz  $F$  am Boden (1. Term) und über die Parametrisierung des fühlbaren Wärmeflusses (2. Term) und des Bodenwärmeflusses (3. Term) mit folgender Gleichung berechnen:

$$T_g(i + 1) = T_g(i) + \left( \frac{F}{S \cdot z_g} - a_{FR} (T_g(i) - T_a(i)) - \Omega(T_g(i) - T_m) \right) \Delta t$$

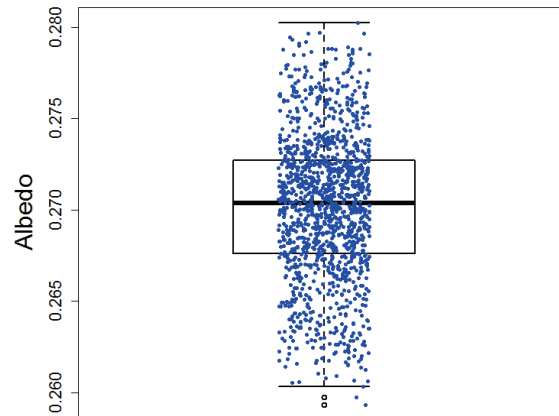
wobei  $S$  die Wärmespeicherzahl der jeweiligen Bodenbeschaffenheit,  $a_{FR}$  (Index FR steht für Force-Restore) eine von der Tageszeit abhängige Art Leitfähigkeit zwischen Boden und Luft,  $T_a$  die bodennahe Lufttemperatur und  $\Omega$  die Winkelgeschwindigkeit der Erde ist. Zuletzt muss noch die Tiefe  $z_g$  der thermisch, aktiven Schicht bestimmt werden. Realitätsnahe Ergebnisse erhält man mit:

$$z_g = \sqrt{\frac{\tau K_h}{4 \pi}}$$

dabei ist  $K_h$  der thermische Diffusionskoeffizient und  $\tau$  die Periode der Temperaturwelle. (S. Pal Arya, 2001)

Nun konnte mit Hilfe der Formel von TEB für die Lufttemperatur im Straßencanyon die neue und aktuelle Lufttemperatur in SOLWEIG bestimmt werden. Es ist zu beachten, dass jede Änderung der Bodenalbedo  $\alpha_g$ , Änderung der Bodenart (Asphalt, Beton, etc.) sowie Änderung der Wandbeschaffenheit eine Änderung der Lufttemperatur mit sich bringt. Um die Genauigkeit der neuen Parametrisierung abschätzen zu können, wird eine Analyse im Abschnitt 2.2.2 dargestellt.

Die Genauigkeit des Modells bzw. der Validierung wurde zusätzlich durch die Messung der Albedo des Schwackhöferhauses erhöht. Abbildung 22 zeigt eine nur geringe Schwankung um einen Median von 0,27.



Schwackhöferhaus

Abbildung 22: Gemessene Albedo der grauen Fassade am Schwackhöferhaus.

Nach der Berechnung einer „neuen“ genaueren Lufttemperatur im Straßencanyon, einer genaueren Bestimmung der langwelligen Strahlungsflüsse von den umgebenden Oberflächen und somit einer genaueren Berechnung der MRT, fehlte für die Berechnung des UTCI nur noch die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund. Für die Lösung dieses Problems wurde die Studie von Röckle (1990) herangezogen. Dabei handelt es sich um ein simples Massenerhaltungssystem, welches nur ein 3D Oberflächenmodell, eine Referenz-Windgeschwindigkeit und Windrichtung mit der dazugehörigen Höhe benötigt (Röckle, 1990).

Aus all diesen Informationen konnte nun der UTCI in SOLWEIG berechnet werden. Hierbei sei noch erwähnt, dass das SOLWEIG Modell im Gegensatz zum TEB Modell derzeit noch keine Verdunstungskälte berechnen kann. Daher werden in den Simulationen zwar Bäume und Wiesen eingebettet, jedoch wirken sich diese nur auf die MRT aus.

#### 2.1.4 Modellierung des thermischen Komforts – TEB Erweiterung für PV

TEB verfügt über eine Subroutine die Solarzellen mit definierter Albedo, Emissivität und Wirkungsgrad berücksichtigt (Masson et al. 2014). Bisher wurden jedoch in dieser thermische und elektrische Solarzellen gemeinsam berechnet, wobei der thermischen Nutzung der Vorzug gegeben wurde. Das bedeutete, dass nur die überschüssige, für die Wärmennutzung im Gebäude nicht verwendete Energie für die Stromerzeugung verwendet wurde. Als erster Schritt wurde die thermische Nutzung auf Null gesetzt womit die Änderung der Energiebilanz am Dach durch Photovoltaik alleine berechnet werden konnte. Bisher nicht vorhanden war die Möglichkeit auch Photovoltaikflächen im Straßencanyon zu definieren und ihre Auswirkungen zu berechnen. Im Rahmen von PVOPTI-Ray wurde innerhalb des TEB eine neue Wandfläche definiert, die zwischen 0 und 100% der Wandfläche einnehmen kann. Für diesen neuen Flächenanteil wurde eine eigene Albedo definiert, die in die Berechnung der Albedo der Fassade einfließt. Des Weiteren wurde

analog zur Dachfläche zuerst die Oberflächentemperatur der Photovoltaik ( $T_{sur,PV}$ ) mit der ISPRA center Methode abhängig von der Lufttemperatur ( $T_a$ ) und der Einstrahlung an der Wand ( $G_w$ ) berechnet:

$$T_{sur,PV} = T_a + k_T * G_w$$

Der empirische Faktor  $k_T$  beschreibt den Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur der Photovoltaik, Lufttemperatur und der Einstrahlung an der Wand für übliche Dachinstallationen und wird analog zu Masson et al. (2014) auf  $0,05 \text{ K}/(\text{Wm}^{-2})$  gesetzt. Nicht berücksichtigt wurde eine mögliche Änderung dieses Faktors durch eine spezifische Montageart. Ausgehend von der berechneten Modultemperatur wurden die langwelligen Energieflüsse innerhalb des Canyons um die Energieflüsse zwischen Fassaden PV Fläche und Straße, Grünfläche, gegenüberliegender Wand, dahinterliegender Wand und gegenüberliegenden Fenstern in jeweils beiden Richtungen zur Berechnung der Energiebilanz innerhalb des Canyons hinzugefügt.

Die Modelländerungen konnten noch nicht validiert werden, da dazu ein anderes Messsetup notwendig gewesen wäre, welches in diesem Projekt nicht zur Verfügung stand.

## 2.2 Modelvalidierung

### 2.2.1 SEBE-PV

SEBE<sub>pv</sub> wurde qualitativ und quantitativ auf Basis von einfachen Testszenarien validiert, um die Funktionsweise zu verifizieren. Ebenso wurde das Modell an Hand der Messdaten validiert.

Zur qualitativen Validierung durch Test-Szenarien wurde als Basis ein simples Gebäude mit Fassadenorientierungen in Richtung Nord, Südost, Süd und West angenommen. Zum Vergleich wurden Test-Szenarien mit jeweils einem Gebäudeblock in der Nähe (20 m Entfernung) und einem in größerer Entfernung (70 m), sowie einmal mit geneigtem Terrain erstellt. Die Ergebnisse aus der Simulation von Test-Szenarien sind in Abbildung 23 zu finden.

Es zeigt sich, dass die vom Boden reflektierte Einstrahlung in Übereinstimmung mit den Erwartungen simuliert wird. Der Schattenwurf erfolgt wie erwartet. Benachbarte Gebäude reduzieren die Sicht einer Wand auf den Boden und reduzieren damit auch den Gesamtbetrag an reflektierter Einstrahlung. Dabei konnte auch entsprechend der Erwartung festgestellt werden, dass die in Summe vom Boden auf eine Wand reflektierte Einstrahlung mit der Entfernung zwischen zwei gegenüberliegenden Gebäuden zunimmt und die Höhe eines gegenüberliegenden Gebäudes einen entsprechenden Einfluss hat, wenn Bodenbereiche über ein Gebäude hinweg für obere Wandbereiche sichtbar sind.

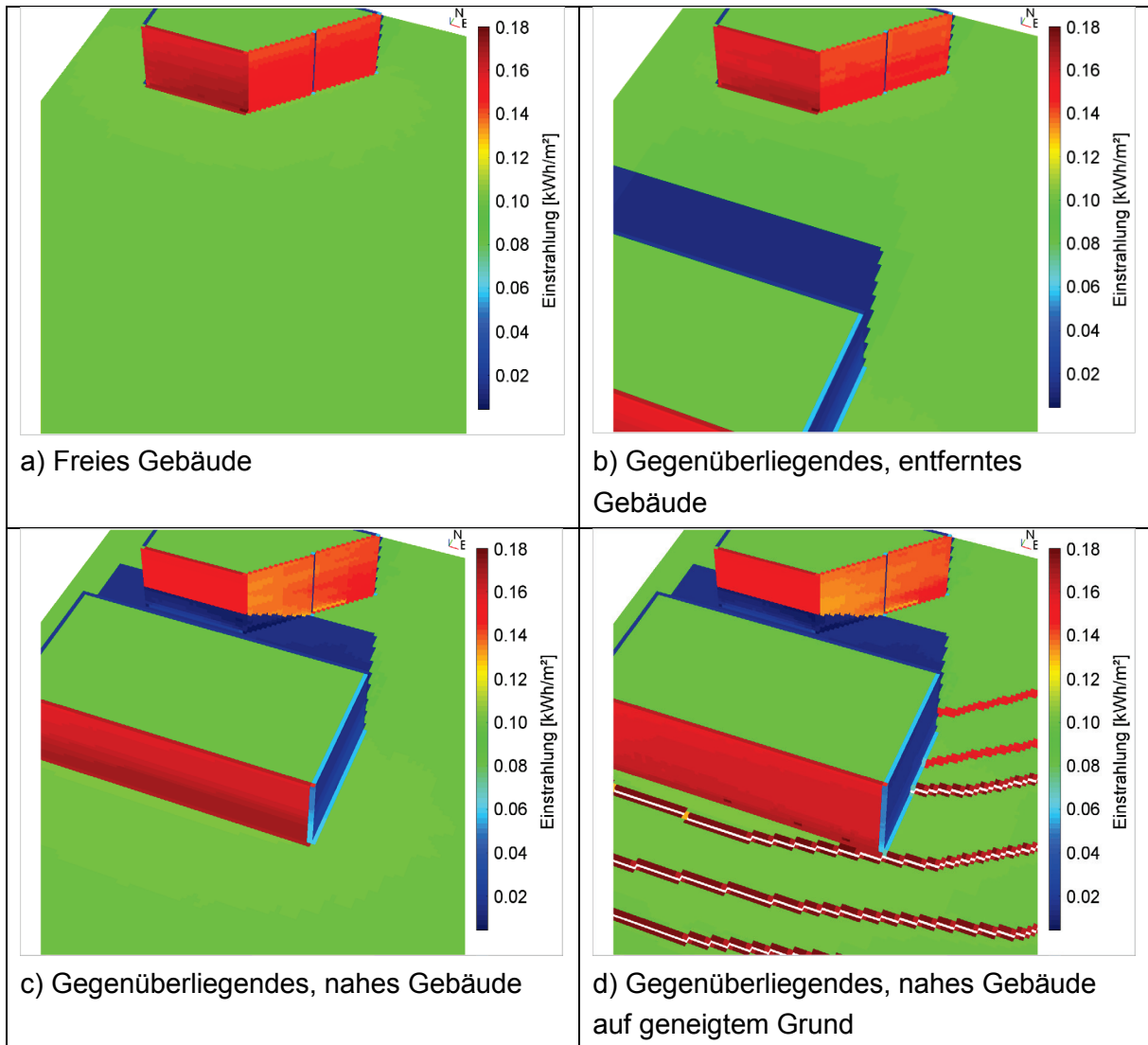


Abbildung 23: Ergebnisse aus ausgewählten fiktiven Test-Szenarien zur Validierung.

Zur quantitativen Validierung wurde ein reales Beispiel simuliert. Dabei handelt es sich um einen Gebäudekomplex an der Universität für Bodenkultur, das Exner Haus und das Schwachhöfer Haus. Die Messungen stammen vom 28.08.2016 und wurden in etwa 3,5 m Höhe, in vertikaler Ausrichtung nach Süden durchgeführt. Simulierte Ergebnisse für das Gebäude sind in Abbildung 24 links dargestellt. Rechts sieht man einen Ausschnitt mit einem Stiegenaufgang, an dem die Messungen durchgeführt wurden. In Tabelle 10 In Tabelle 10 werden die simulierten und gemessenen Werte für drei Stunden über die Mittagszeit aufgelistet. Es zeigt sich dabei, dass die Simulation eine in etwa 30% geringere Einstrahlung vorhersagt, als die Messungen. Eine Abschätzung, ausschließlich unter Berücksichtigung der direkten Einstrahlung auf die vertikale Fläche, ergibt jedoch einen Wert welcher zwischen 8 und 11% geringer ist, als die gemessene Einstrahlung (Tabelle 10). Dabei sind also die diffuse Einstrahlung und die vom Boden reflektierte Einstrahlung noch unberücksichtigt.

Zusätzlich zu diesem Vergleich von gemessener und simulierter Einstrahlung wurde die Einstrahlung auch für die Test-Szenarien mit nachfolgender Formel abgeschätzt:



$$G_w = G_{dir} \times AOI + G_{diff} \times SVF + G_{reflected}$$

$$G_w = G_{dir} \times AOI + G_{diff} \times SVF + G_h \times albedo \times GVF$$

Darin sind  $G_w$  die Einstrahlung an der Fassade,  $G_{dir}$  die direkte Einstrahlung der Sonne,  $G_{diff}$  die diffuse Einstrahlung,  $G_h$  die globale horizontale Einstrahlung (Einstrahlung auf dem Boden), AOI (Angle of Incidence) ist der Einfallswinkel der direkten Einstrahlung auf die Fassade, SVF ist der Sky-View-Factor und GVF ist der Ground-View-Factor. SVF und GVF wurden grob für die jeweilige Szenerie abgeschätzt. Dabei ergab sich jedoch keine große Diskrepanz (~5% Abweichung) zwischen simulierter Einstrahlung und der Abschätzung.

Es wird auf Grund dieser Ergebnisse gefolgert, dass die entwickelte Methode zur Berechnung der reflektierten Einstrahlung geeignet ist. Es wird davon ausgegangen, dass die Diskrepanzen eventuell aus der Bestimmung der Orientierung der einzelnen Wandpunkte verursacht wurden, oder auch in Kombination mit der Umrechnung der direkten Einstrahlung auf die geneigte Ebene (d.h. einer beliebig orientierten Wandfläche) in Verbindung zu bringen sind. Diese Unsicherheitsquellen stammen aber aus der ursprünglichen Software UMEP bzw. SEBE. Verbesserungen an SEBE<sub>pv</sub> sind daher empfohlen.

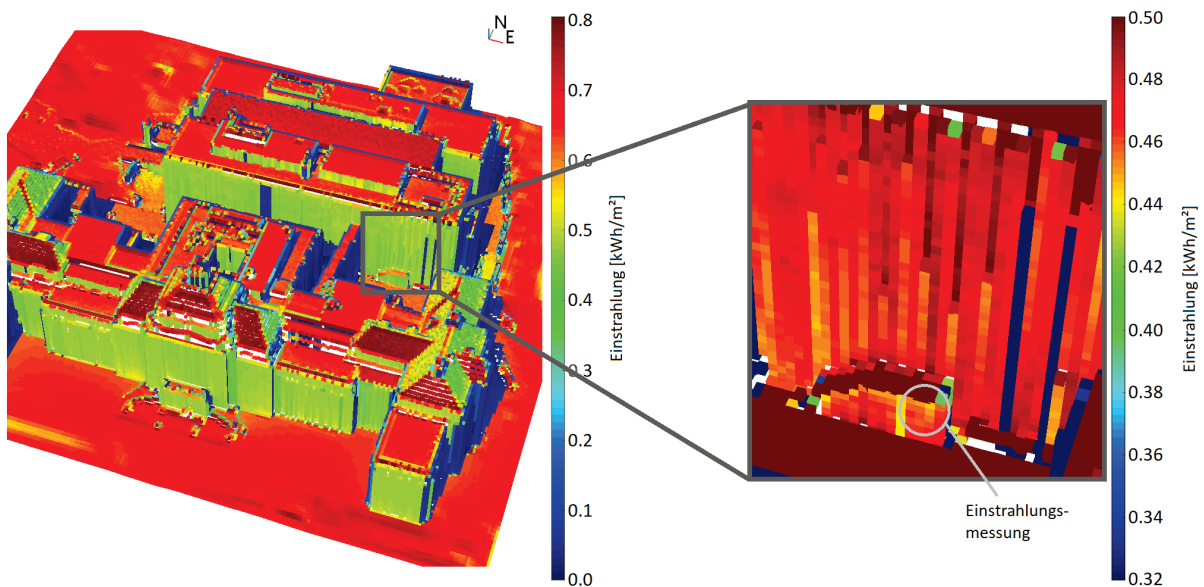


Abbildung 24: Simulierte Einstrahlung für die Fassaden von Exner und Schwackhöfer Haus, basiert auf meteorologischen Daten vom 26.08.2016, 11:00 UTC. Links: Gesamter Gebäudekomplex, rechts: Ausschnitt aus dem Bereich, an dem Messdaten erhoben wurden.

Tabelle 10: Vergleich der gemessenen Einstrahlung mit der simulierten Einstrahlung. Messung am 26.08.2016.

Zeit in UTC	Gemessene Einstrahlung [W m <sup>-2</sup> ]	Simulierte Einstrahlung [W m <sup>-2</sup> ]	Direkte Einstrahlungskomponente an Wand [W m <sup>-2</sup> ]
10:00	613,0	446,7	556,7
11:00	614,0	460,1	566,2
12:00	573,3	392,5	510,7

## 2.2.2 SOLWEIG-UTCI

Zur Illustration, an welcher Position die Lufttemperatur gemessen und modelliert wurde, wird in Abbildung 25 die von SOLWEIG berechnete MRT am Standort der Universität für Bodenkultur aus der Vogelperspektive gezeigt. Es werden zwei unterschiedliche Zeitpunkte (11:00 und 13:00 UTC) dargestellt und die grünen Punkte markieren nun die Position der Messung bzw. Berechnung. Man erkennt hier auch den großen Vorteil von SOLWEIG gegenüber TEB, da die Schatten sehr genau berechnet und auch die Entfernungen zu den Wänden berücksichtigt werden (erkennbar durch die Änderungen vor Wänden südlich des Exner-Hauses).

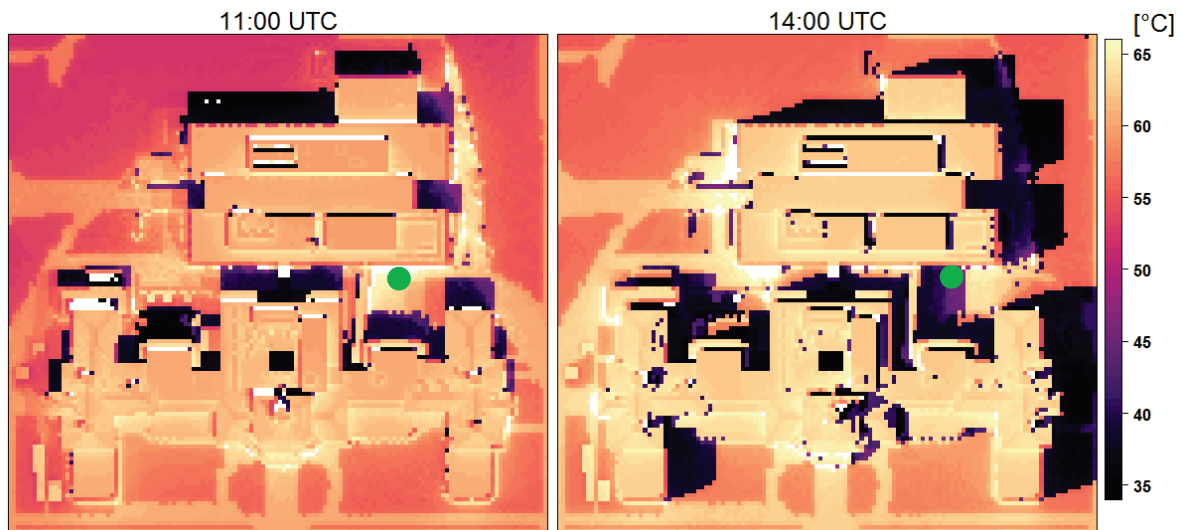


Abbildung 25: Berechnete mittlere Strahlungstemperatur für den Standort Universität für Bodenkultur zu den Zeitpunkten 11:00 (links) und 13:00 (rechts) UTC. Die grünen Punkte markieren den Standort der Lufttemperaturmessung.

In Abbildung 26 wird der zeitliche Verlauf der gemessenen (orange) und der modellierten (grün) Lufttemperatur dargestellt. Zusätzlich ist die Differenz der Beiden in braun aufgezeichnet. Man sieht, dass die Unterschiede nur gelegentlich über 2 °C gehen. Großteils pendelt die Differenz zwischen -1 und 1 °C. Ein weiteres, spezifisches Merkmal dieses Straßencanyons ist das Vorhandensein einer Brücke zwischen den beiden Gebäuden. Dieses führt zu einem zwischenzeitlichen Schattenwurf auf die Messstation (siehe Abbildung 25 rechts) und zu einem Rückgang der Lufttemperatur (siehe Abbildung 26) von 14 bis 15 UTC. Dieser Sachverhalt wurde auch im Modell berücksichtigt (Zellen im Schatten werden separat berechnet), jedoch war es bis dato nicht möglich eine genauere Berechnung durchzuführen.

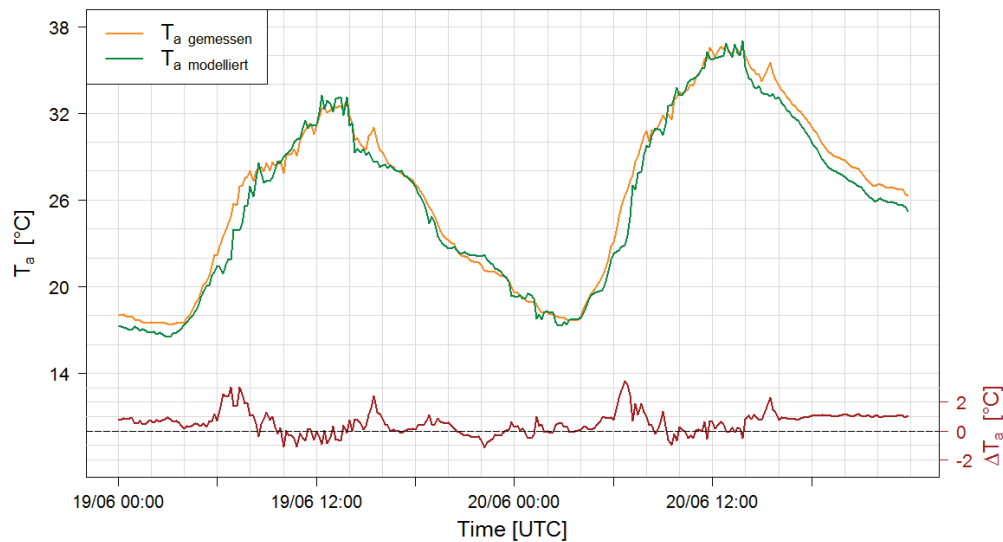
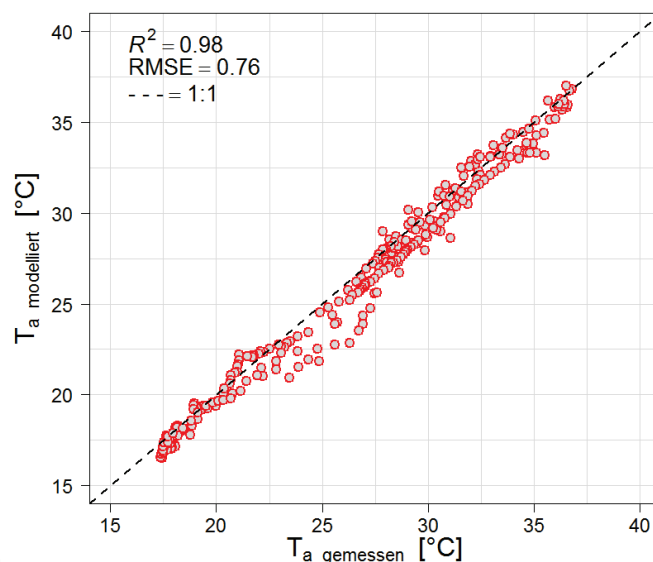


Abbildung 26: Zeitlicher Verlauf der gemessenen und modellierten Lufttemperatur im Straßencanyon der BOKU. Die linke, vertikale Achse zeigt die absoluten Werte an, die rechte, in braun gehaltene Achse zeigt die Differenz der beiden Temperaturen an.



Die Validierung selbst wird in

Abbildung 27 dargestellt. Diese Punktwolke zeigt die berechnete Lufttemperatur als Funktion der gemessenen. Als Hilfsmittel ist eine strichlierte Linie eingezeichnet, welche das Verhältnis von 1:1 der beiden Variablen darstellt. Die erklärte Varianz ergab einen Wert von 0.98 und der mittlere Fehler ist mit 0.76 sehr klein womit das Modell durchaus als plausibel erklärt werden kann.

Wie bereits beschrieben wurde für die Berechnung von  $T_{a \text{ modelliert}}$  die „Force-Restore“ Methode mit der gemessenen Albedo für den Boden im Straßencanyon, die neuen Regressionsparameter von Abbildung 21 rechts und die Formel von TEB verwendet. Wenn eine gebäude-integrierte Photovoltaikfassade angenommen wurde, wurde natürlich das Energiebilanzmodell verwendet.

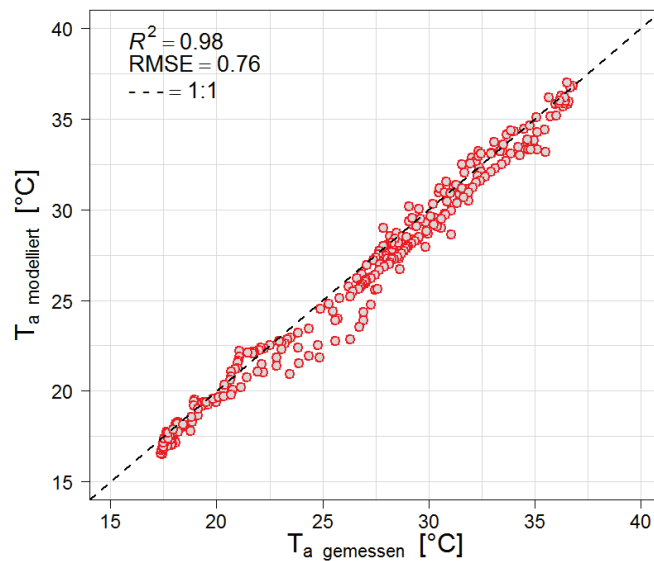


Abbildung 27: Punktwolke der modellierten Lufttemperatur als Funktion der gemessenen Lufttemperatur im Straßencanyon der BOKU. Links oben sind die erklärte Varianz ( $R^2$ ) und die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) gegeben.

### 2.3 PV-Ertrag an Fassaden im dicht bebauten Gebiet

Die Simulationen des spezifischen Photovoltaik-Ertrags (Ertrag pro installierter Leistung) wurde an den Fassaden der zwei ausgewählten Szenarien, Straßenschlucht und offener Platz, jeweils für eine Albedo der Straßen von 13% und 56% durchgeführt. Dabei wurden neben den verschiedenen Wetterbedingungen, wie klarer Himmel bei Windstille und mit moderaten Windgeschwindigkeiten, auch zwei marktrelevante Photovoltaik-Zell-Technologien verglichen. Die zwei ausgewählten Technologien sind kristallines Silizium, da es weit verbreitet ist, und  $Cl(G)S$ , weil es sich dabei um eine Dünnschichttechnologie mit gutem marktpotential für die Zukunft handelt. Für alle Simulationen wurde angenommen, dass die fassadenmontierte Photovoltaikanlage gut hinterlüftet ist.

In Abbildung 28 ist der absolute spezifische Ertrag über einen gesamten Tag für den Straßencanyon bei den zwei unterschiedlichen Reflexionsgraden des Bodens gezeigt. Abbildung 29 die Steigerung des Ertrags durch eine Erhöhung der Albedo für den Straßencanyon und Abbildung 30 zeigt das selbige für den offenen Platz.

Über den Sommer hinweg liefert eine Anlage an Breitengraden wie Wien den meisten Ertrag an den Ost-West Fassaden. Die Südfassade liefert auf Grund der hohen Sonne deutlich weniger Strom. Jedoch ändert sich das bereits im Laufe des Augusts.

Während eines Sommertages liefert zwar die Dünnschichttechnologie signifikant mehr als die Silizium-basierte Anlage. Allerdings lässt sich in diesem Fall der Unterschied nicht durch den unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten erklären, da unterschiedliche Windgeschwindigkeiten keine Veränderung verursachen. Die Prozentuelle Ertragsteigerung korreliert auch nicht bevorzugt mit einer bestimmten Technologie, wie man vor allem in

Abbildung 29 sehen kann. Daher kann keine Modultechnologie für die ausgewählten Fälle bevorzugt werden.

Die wichtigste Erkenntnis ist das Potential für den erhöhten Ertrag einer fassadenmontierten Photovoltaikanlage im städtischen Umfeld, wenn die Albedo der Straßenoberflächen von 13% auf 56% erhöht wird. Für den Straßencanyon bedeutet das im Sommer eine Ertragssteigerung um in etwa 0.5 kWh/kWp pro Tag, wobei Schwankungen vom Bewölkungsgrad abhängen. Prozentuell gesehen sind das für Ost-West Fassaden 10 bis 15% mehr Ertrag, wobei die Steigerung für die Südfassade und speziell im Fall von bewölktem Wetter prozentuell deutlich höher ausfällt. Zudem zeigt ein Vergleich mit Abbildung 30, dass der offene Platz durch die viel größere Bodenfläche vor den Gebäuden auch zu höheren Ertragssteigerungen führt als in einem relativ engen Straßencanyon.

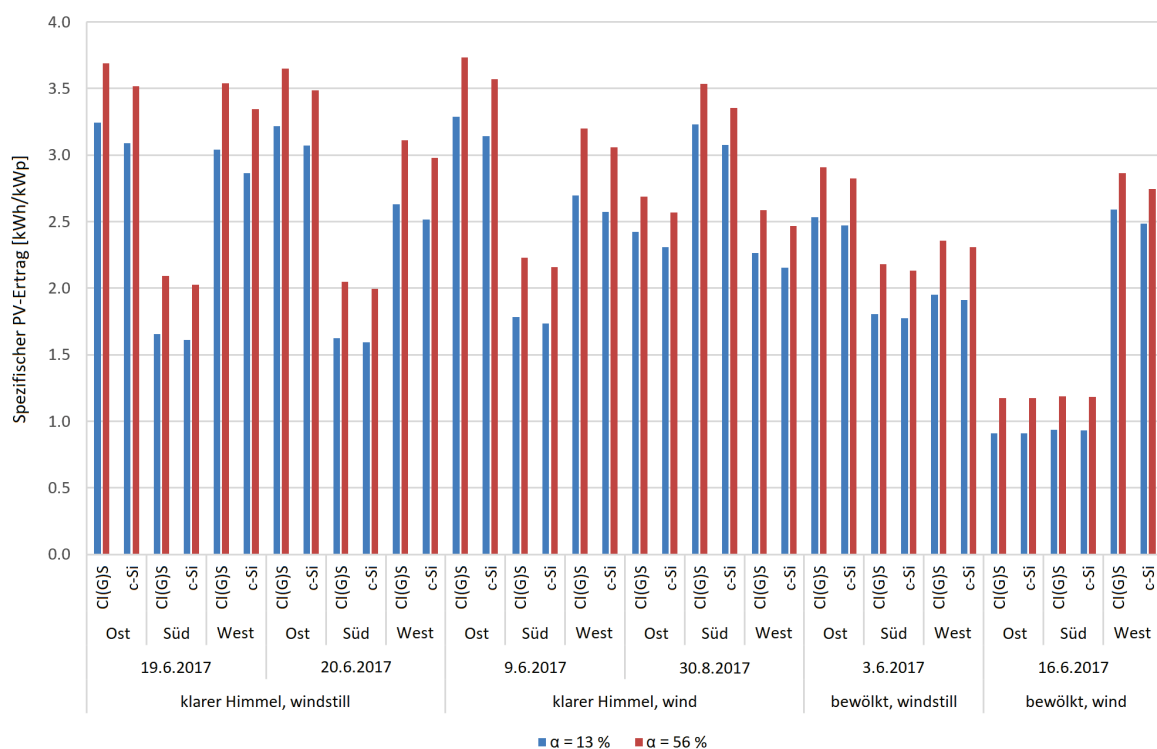


Abbildung 28: Photovoltaik Ertrag für den Straßencanyon über jeweils einen Tag, aufgeschlüsselt nach Technologie, Orientierung der Fassade, dem Tag im Jahr und den Wetterbedingungen. Blau: Reflektivität 13%, rot: Reflektivität 56%.

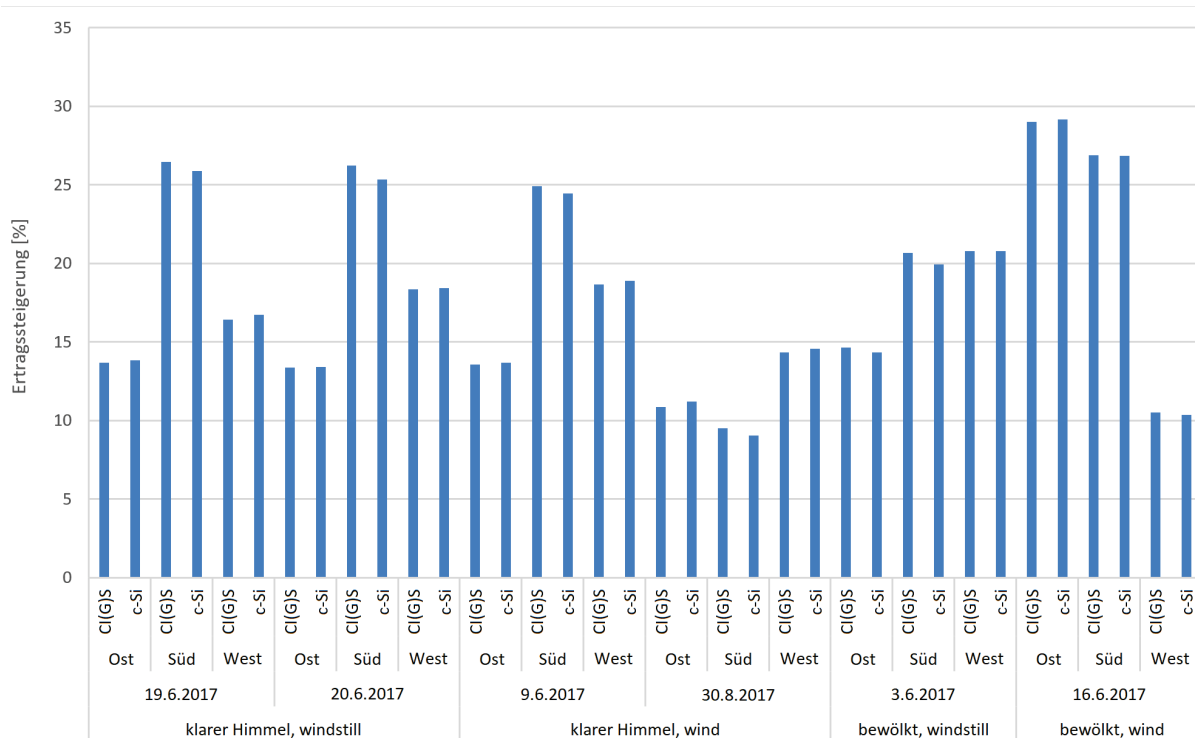


Abbildung 29: Steigerung des Photovoltaik Ertrags für einen Straßencanyon bei einer Erhöhung des Reflexionsgrades von 13% auf 56%, aufgeschlüsselt nach Technologie, Orientierung der Fassade, dem Tag im Jahr und der Wetterbedingung.

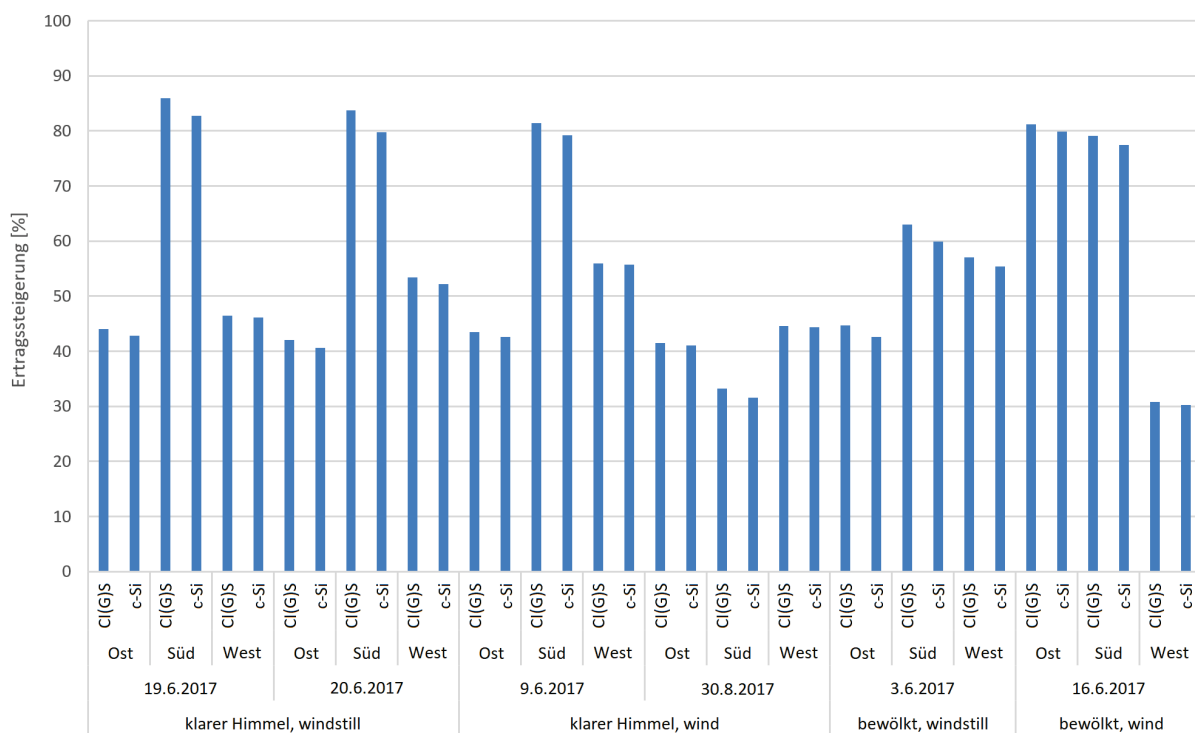


Abbildung 30: Steigerung des Photovoltaik Ertrags für einen Platz bei einer Erhöhung des Reflexionsgrades von 13% auf 56%, aufgeschlüsselt nach Technologie, Orientierung der Fassade, dem Tag im Jahr und der Wetterbedingung.

Durch die Ertragssteigerung bei der sehr hohen Albedo von 56% übertrifft der Ertrag einer ost bzw. west orientierten Fassade über einen Sommertag sogar den Ertrag einer optimal geneigten und orientierten Dach-Anlage (Revesz, 2017). Wie jedoch in Tabelle 11 für den

Fall des offenen Platzes zu sehen ist, gilt dieser Vorteil nicht bei einer Betrachtung über das gesamte Jahr. Über ein Jahr gesehen ist der Ertrag selbst bei der recht hohen Albedo von 56% um knapp 30% geringer als bei der optimalen Dachanlage. Dennoch ist eine Steigerung des Ertrags um 25% möglich.

Tabelle 11: Simulierter Photovoltaik-Ertrag [kWh/kWp] über ein Jahr für ausgewählte Wandorientierungen für einen offenen Platz. Vergleich mit optimal orientierten System nach PVGIS. (Revesz et al., 2017)

	$\alpha = 0,13$		$\alpha = 0,56$		<b>PVGIS</b> Süd, 35° Neigung, Keine System- Verluste
	Süd	Ost	Süd	Ost	
<b>c-Si</b>	698	583	872	755	1220
<b>CI(G)S</b>	706	594	879	765	1210

Insgesamt kann man daher das große Potential sehen, wie durch geeignete Wahl der Oberflächenalbedo eine Photovoltaikanlage im Stadtbereich auch in einer Straßenschlucht deutlich höhere Erträge liefern kann und damit auch solche Installationen attraktiv werden.

## 2.4 Thermischer Komfort im Straßencanyon mit und ohne PV

In diesem Kapitel werden relevante Ergebnisse aus den Untersuchungen für unterschiedliche städtebauliche Szenarien (siehe Kapitel 1.2.7) gezeigt. Auch diese städtebaulichen Szenarien sind natürlich eine starke Vereinfachung der möglichen Konfiguration im urbanen Raum, jedoch wurden die zu Projektbeginn diskutierten vielfältigen morphologischen Varianten stark reduziert, um sich auf die wesentlichen Elemente (z.B. Modellentwicklung) zu konzentrieren. In dieser Studie wird ausschliesslich der Einfluß einer Änderung der Straßenbreite und -orientierung sowie einer Änderung der Materialien inkl. Verwendung von Photovoltaik und Vegetation auf die Lufttemperatur und den thermischen Komfort untersucht. Weitere Einflussfaktoren auf den thermischen Komfort, wie Anstieg der Lufttemperatur durch Einsatz von Klimaanlage, wurden in Kooperation mit Photonic Cooling in einer ersten Simulation in der Größenordnung +/-1°C Canyontemperatur (abhängig von der Konfiguration der Klimaanlage) abgeschätzt.

### 2.4.1 Ergebnisse aus TEB

#### Morphologie

Der thermische Komfort im Straßencanyon ist vor allem von der Luft- und mittleren Strahlungstemperatur abhängig. In erster Linie trägt die direkte Sonnenstrahlung, die in den Straßencanyon eintrifft zur Erwärmung und dem Entstehen von Hitzestress bei. Des Weiteren führt die von Boden und Fassaden (direkt) reflektierte Strahlung sowie die langwellige Strahlung zu möglichen (Dis)komfort. Bei offenen Straßenzügen und Plätzen

( $HW \ll 1$ ) führt eine Erhöhung der Albedo des Bodens und der Fassaden zu einer geringeren Erhöhung der Canyon-temperatur (Abbildung 31) als bei normalem Asphalt. Heller Beton auf Fassaden und Böden erwärmen sich am langsamsten. Die mögliche erzielbare Reduktion der Lufttemperatur durch hellen Beton an Fassaden und Böden wird mit  $1\text{ °C}$  abgeschätzt. Bei engeren Stadtmorphologien, wie z.B. einer Straße mit  $HW = 1$  (HW1), ist die mögliche Änderung etwas geringer (Abbildung 32). Da in diesem Projekt der Schwerpunkt auf typische Straßen im dichtverbauten Gebiet gelegt wurde, wird in weiterer Folge besonders der Canyon mit HW1 weiter analysiert.

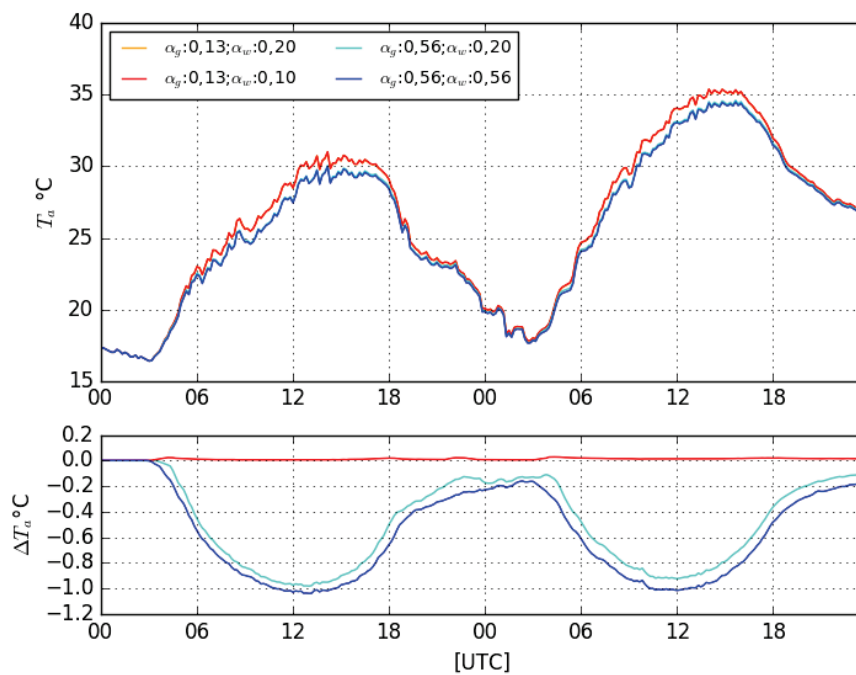


Abbildung 31: Reduktion der Lufttemperatur durch Erhöhung der Albedowerte von Boden und Fassade in einer Stadtsituation mit  $HW=0.2$ , unten: Differenz zu Asphalt+Putz (19+20.6.2017).



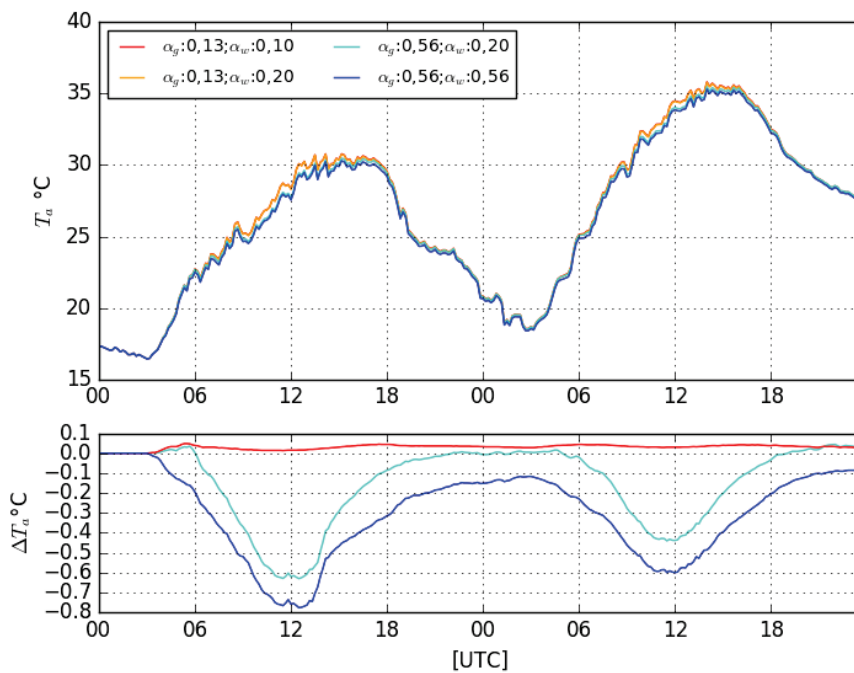


Abbildung 32: Reduktion der Lufttemperatur durch Erhöhung der Albedowerte von Boden und Fassade in einer Stadtsituation mit  $HW=1$ , Differenz zu Asphalt+Putz (19+20.6.2017).

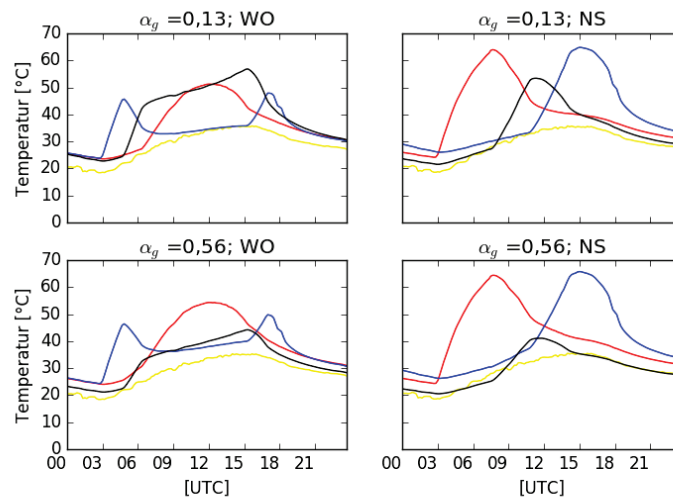


Abbildung 33: Erwärmung der Oberflächen von Boden (schwarz), Süd bzw. Westwand (rot) (19.6.2017) und Nord bzw. Ostwand (blau) für West-Ost orientierte (linke Spalte) und Nord-Süd orientierte (rechte Spalte) Straßencanyons mit Asphaltboden (1. Zeile) und hellen Betonboden (2. Zeile). Die Lufttemperatur ist gelb eingezeichnet.

In Straßencanyons erwärmen sich die Oberflächen abhängig von der auf sie auftreffenden Sonnenstrahlung. In Abbildung 33 wird deutlich, dass eine Erhöhung der Albedo in erster Linie zu einer langsameren Erwärmung der Oberfläche führt.

### Einfluss der Oberflächen und der Wärmespeicherung

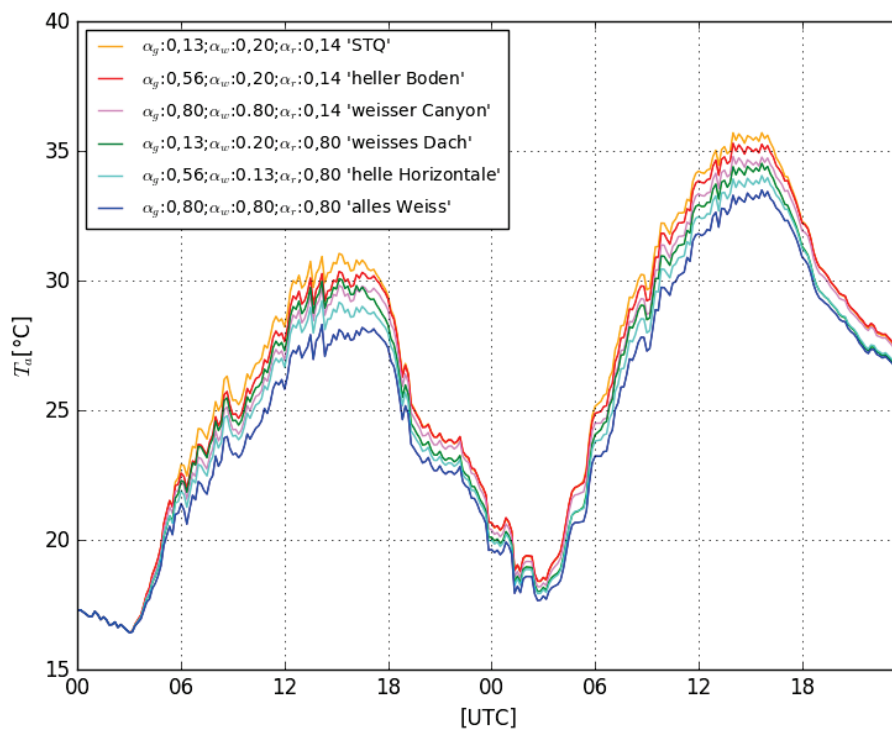


Abbildung 34: Reduktion der Lufttemperatur aufgrund einer Albedoerhöhung von Boden, Fassade und Dach eines West-Ost orientierten Straßencanyons mit HW1 für den 19+20.6.2017.

In einem Extremvergleich (Abbildung 34) zeigt sich, dass durch starke Erhöhung der Albedo auf allen Flächen der Lufttemperaturanstieg verzögert werden kann und zu geringeren Maxima aber auch geringeren Minima führt. Ein nahezu „weißer Canyon“ mit einer Straßen- und Fassadenalbedo von 0.8 mit typischer dunkler (0.2) Dachalbedo hat eine bis zu 2 °C höhere Lufttemperatur als ein „weißes Dach“ in Kombination mit typischer dunkler Straßen- und Fassadenalbedo. Werden jedoch „weißer Canyon“ und „weißes Dach“ zu „alles Weiss“ kombiniert, kann mehr als der doppelte Effekt erzielt werden.

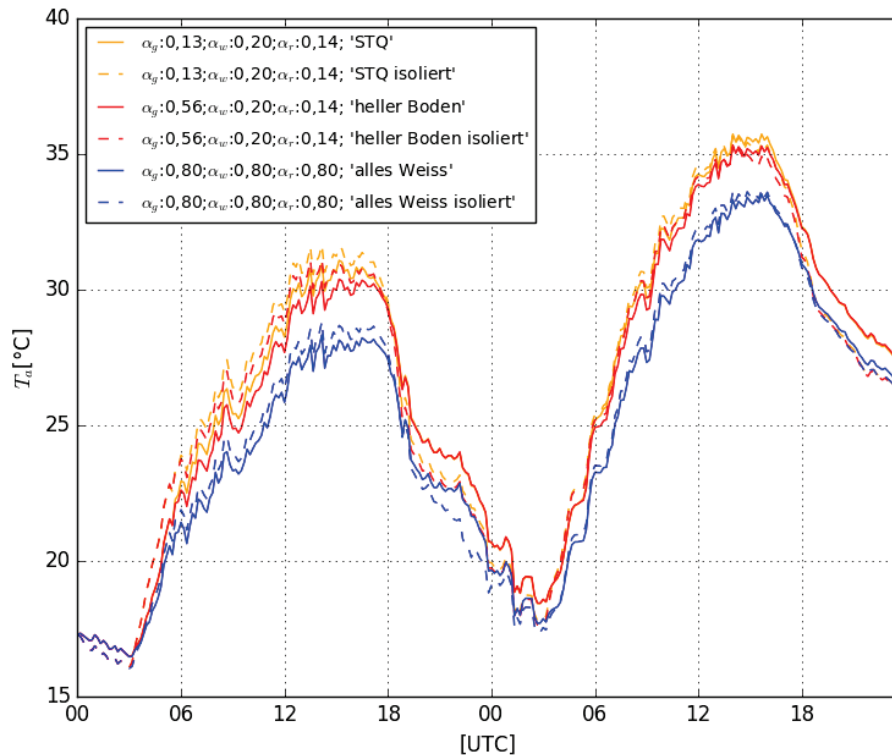


Abbildung 35: Reduktion der Lufttemperatur durch Albedoerhöhung von Boden, Fassade und Dach sowie Erhöhung der Lufttemperatur durch Isolierung der Gebäudeaußenhülle (thermische Leitfähigkeit der Fassaden und Dächer herabsetzt von 1,7 bzw. 1,4 auf 0,1 W/(mK), Reduktion der Wärmekapazität von 1520000 bzw. 1554000 auf 1496000 J/m<sup>3</sup>K) in einem West-Ost orientierten Straßencanyons mit HW1 für den 19+20.6.2017

Bei guter Isolierung der Putzfassade (strichlierte Linien in Abbildung 35) führt dies in allen Varianten vorerst zu einem Anstieg der Lufttemperatur. Erst in der Abkühlungsphase (17 bis 00 UTC) stellt sich eine Abkühlung der Lufttemperatur ein, die auf die Verringerung der in den Gebäuden gespeicherten Wärme zurückzuführen ist.

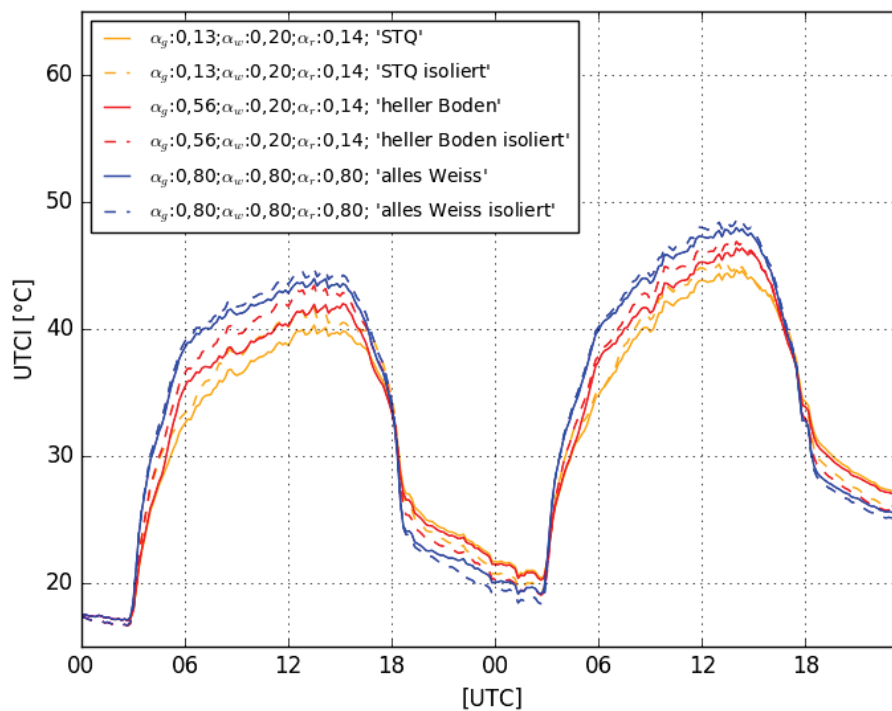


Abbildung 36: Erhöhung des UTCI durch Reduktion der Albedo von Boden, Fassade und Dach sowie durch Isolation der Gebäudehülle (gepunktet - thermische Leitfähigkeit der Fassaden und Dächer herabsetzt von 1,7 bzw. 1,4 auf 0,1 W/mK, Reduktion der Wärmekapazität von 1520000 bzw. 1554000 auf 1496000 J/m³K) auf den UTCI eines West-Ost orientierten Straßencanyons mit HW1 für den 19+20.6.2017.

Der UTCI in Abbildung 36 erhöht sich zum einen durch die Erhöhung der Albedo um bis zu 5 °C. Durch die Isolierung der Gebäudeaußenhülle erhöht sich in allen Varianten der UTCI tagsüber gegenüber der Variante mit Asphalt-Putz, jedoch reduziert sich der UTCI nachts. .

Wenn man nun den Einfluss der Albedo innerhalb des Canyons betrachtet, reduziert sich bei erhöhter Albedo die Lufttemperatur im Vergleich zu Asphalt-Putz bis ca.18:00 UTC sehr stark. Danach gleichen sich die Varianten wieder an (siehe Abbildung 37).

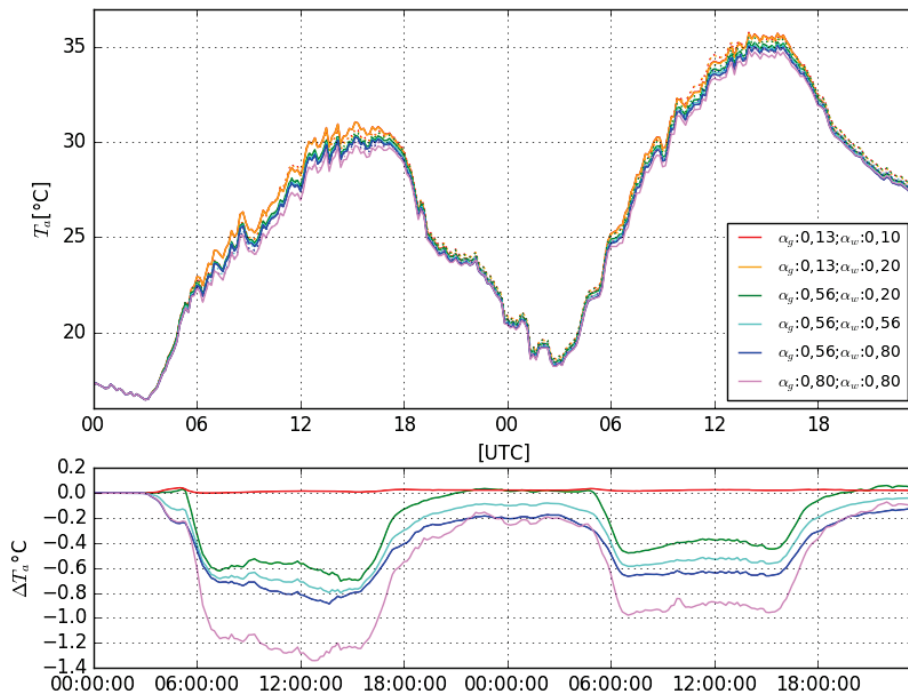


Abbildung 37: Reduktion der Lufttemperatur aufgrund Albedoerhöhung im Canyon (Boden und Wand) in Straßensituationen mit HW Verhältnis (19.6.2017) für West-Ost.

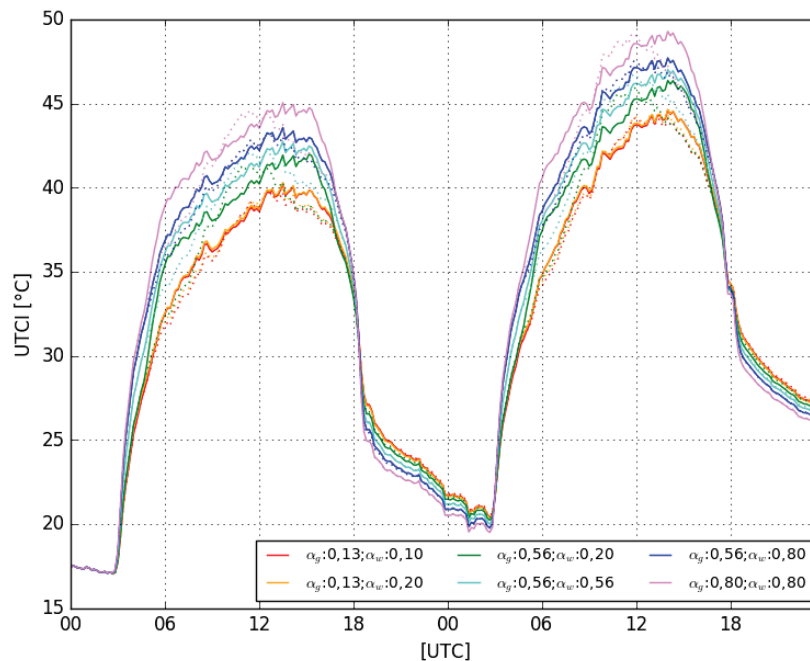


Abbildung 38: Erhöhung des UTCI aufgrund Albedoerhöhung im Canyon (Boden und Wand) in Straßensituationen mit HW1 Verhältnis (19.6.2017) für West-Ost (durchgezogen) und Nord-Süd (gepunktet).

Der UTCI (Abbildung 38) ist bis ca. 18:00 UTC durch eine höhere Albedo um über 5 °C erhöht, jedoch sinkt dieser danach im Vergleich zu Asphalt-Putz ab.

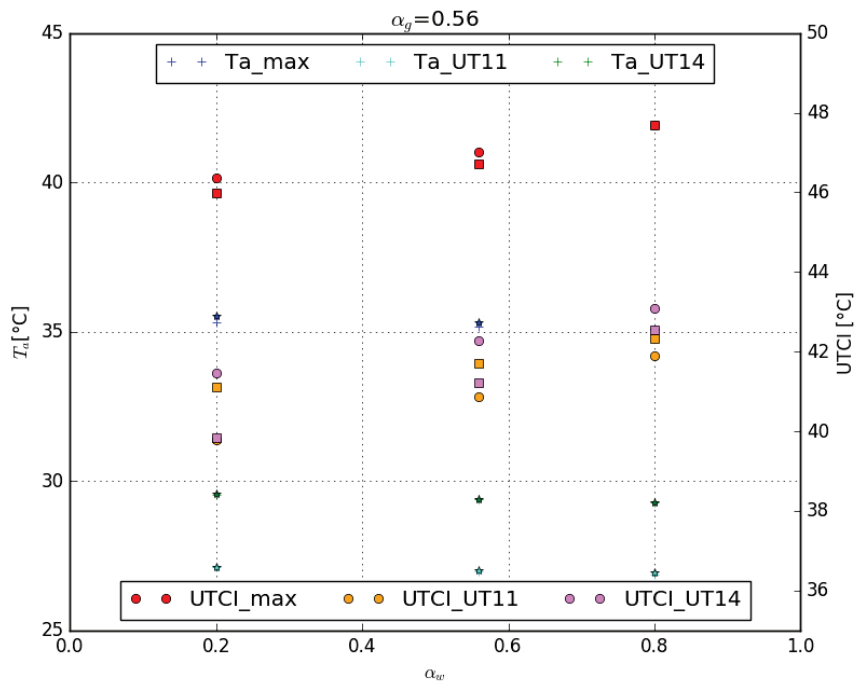


Abbildung 39: Reduktion des Lufttemperatur und Anstieg des UTCI im Tagesmaximum, Mittel über 10:30-11:30 UTC (UT11) und Mittel über 13:30-14:30 UTC (UT14) in einer Straßensituation mit HW1 Verhältnis (19.6.2017) für West-Ost (Kreise und Kreuze) und Nord-Süd orientierte Fassaden (Quadrate und Sterne).

Abbildung 39 zeigt dass bei gleichbleibend heller Bodenoberfläche ( $\alpha_g = 0.56$ ) () und veränderlicher Fassadenalbedo ( $\alpha_w = [0.2, 0.4, 0.6, 0.8]$ ) und zum Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (UT11) bzw. des Lufttemperaturmaximums (UT14) die Lufttemperatur ansteigt, während der UTCI abfällt.

### Einfluss von PV

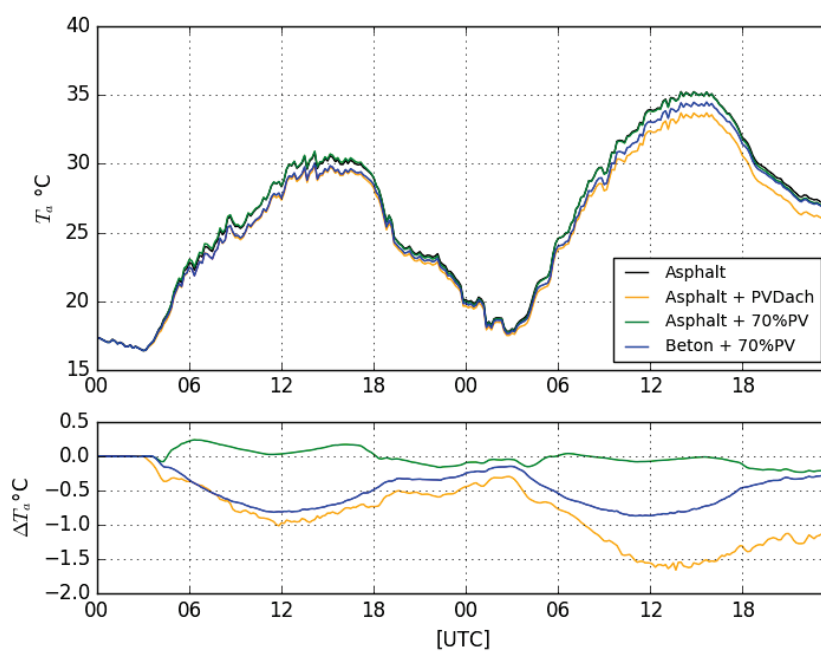


Abbildung 40: Reduktion der Lufttemperatur durch Verwendung von PV am Dach, an der Fassade und in Kombination mit hellem Beton in Stadtsituation mit HW0.2 (19+20.6.2017).

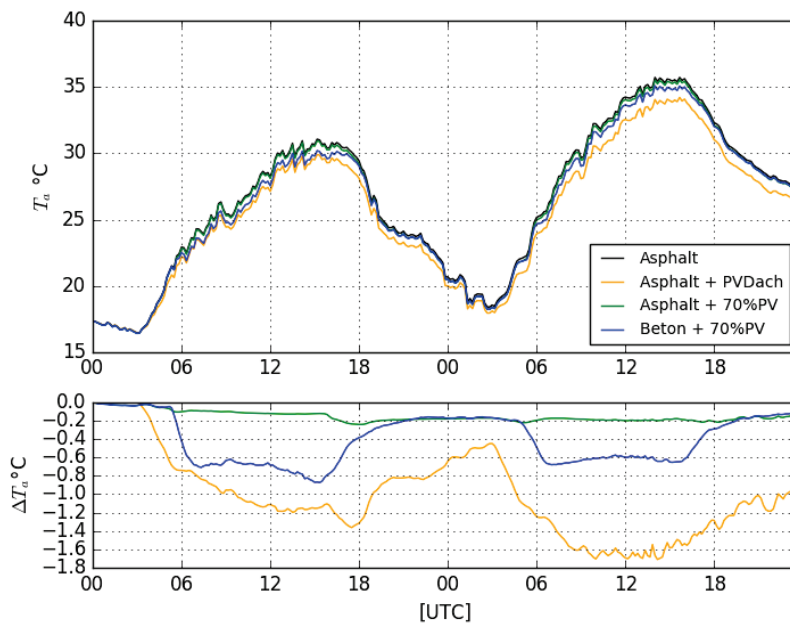


Abbildung 41: Reduktion der Lufttemperatur durch Verwendung von PV am Dach, an der Fassade und in Kombination mit hellem Beton in Straßensituation mit HW1 (19+20.6.2017).

Durch die Verwendung von PV-Modulen an 70% der Fassadenfläche kann am Platz keine deutliche Reduktion der Lufttemperatur erzielt werden (siehe Abbildung 40). Im Canyon hingegen kommt es zu einer leichten Reduktion der Lufttemperatur von  $-0,2$  °C (Abbildung 41). In Kombination mit Beton führt die PV-Fassadenfläche in beiden Fällen zu einer deutlichen geringeren Lufttemperatur von etwa  $-0,6$  °C. PV-Anlagen am Dach führen zu einer noch deutlicheren Absenkung der Lufttemperatur für Platz und Canyon mit ca  $-1,5$  °C. Die Reduktion durch PV kann zum einen dadurch erklärt werden, dass die Albedoänderung von üblichen Gebäudeoberflächen (zB. Dach: 0.14) und PV (0.1) nicht sehr hoch ist, weiters wird zusätzlich Energie für Stromerzeugung entnommen. Dadurch wird eine in Betrieb befindliche PV nie so warm wie Oberflächen gleicher Albedo.

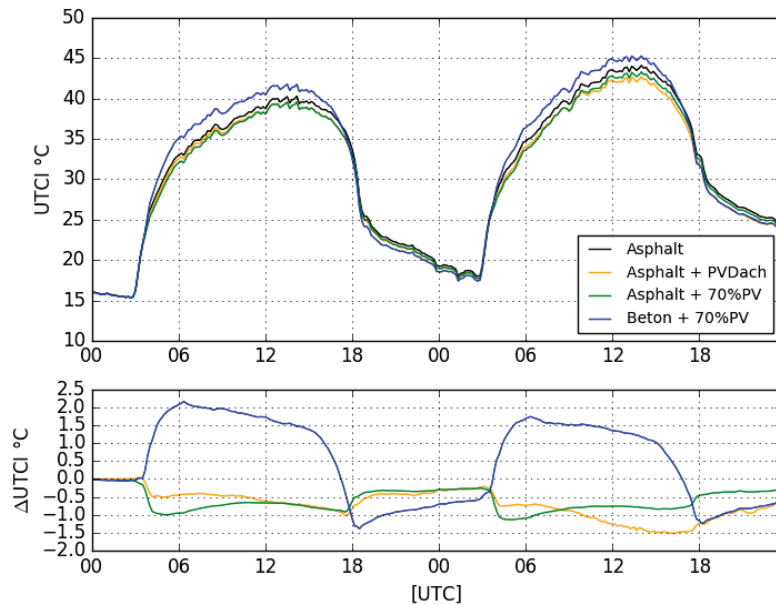


Abbildung 42: Reduktion des UTCI durch die Verwendung von PV am Dach oder an der Fassade, Erhöhung des UTCI bei Kombination von PV Fassade mit hellem Beton für Stadtsituation mit HW0.2 (19+20.6.2017).

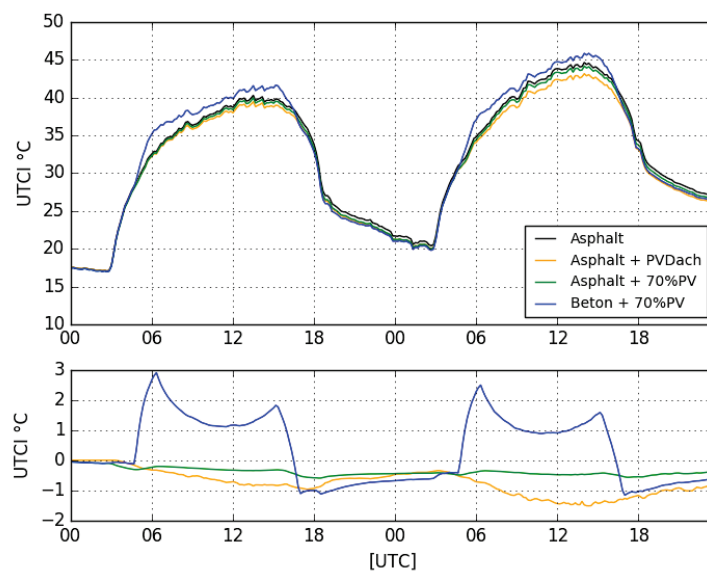


Abbildung 43: Reduktion des UTCI durch die Verwendung von PV am Dach oder an der Fassade, Erhöhung des UTCI bei Kombination von PV Fassade mit hellem Beton für Stadtsituation mit HW1 (19+20.6.2017).

Der UTCI (Abbildungen Abbildung 42/Abbildung 43) wird durch die Verwendung von PV-Fassaden für Platz und Canyon um ca.  $-0,5\text{ °C}$  gesenkt. Bei Kombination mit hellem Beton kann jedoch der UTCI trotz der PV-Fassade um  $2\text{ °C}$  ansteigen. PV-Anlagen am Dach führen in dieser Simulationsstudie auch beim UTCI zu einer eindeutigen Reduktion des thermischen Komforts von bis zu  $1,5\text{ °C}$ . Die Reduktion des UTCI im Canyon kann direkt durch die Reduktion der Fassadenalbedo von 0.2 auf 0.1 zurückgeführt werden. Zusätzlich trägt immer auch die Lufttemperaturabsenkung zu einer Senkung des UTCI bei. Bei der Senkung des UTCI durch DachPV dürfte in erster Linie die geringere Aufheizung der Dachflächen und der Luftaustausch zwischen Dach und Canyon Ursache der Absenkung sein.



## Einfluss von Vegetation

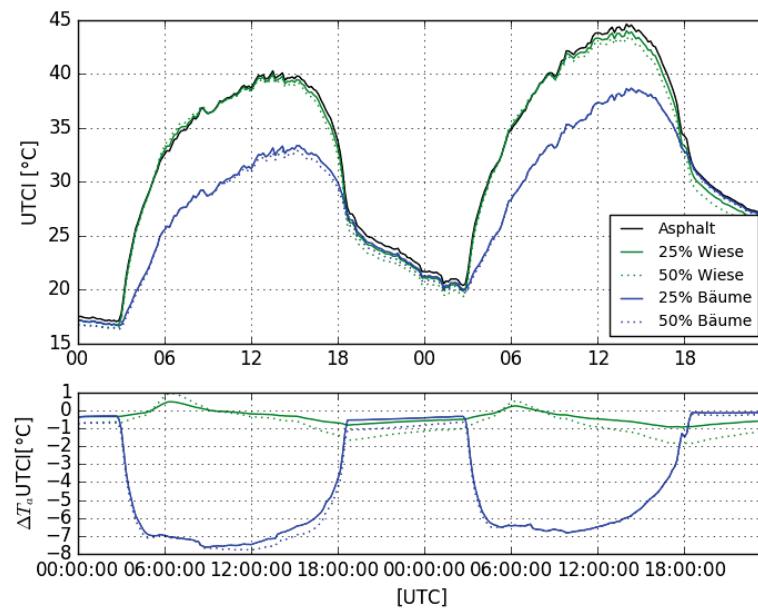


Abbildung 44: Änderung des UTCI bei Asphalt durch die Verwendung von niedriger (Wiese) und Starke Reduktion des UTCI bei hoher Vegetation (Bäume) bei 50% Bebauung für West-Ost orientierte Straßen (19+20.6.2017).

Die Verwendung von Vegetation bringt eine deutliche Reduktion des UTCI. Wiese kann bis zu -2 °C reduzieren, Bäume bis zu -8 °C (siehe Abbildung 44).

## Ergebnisse für Wintertage

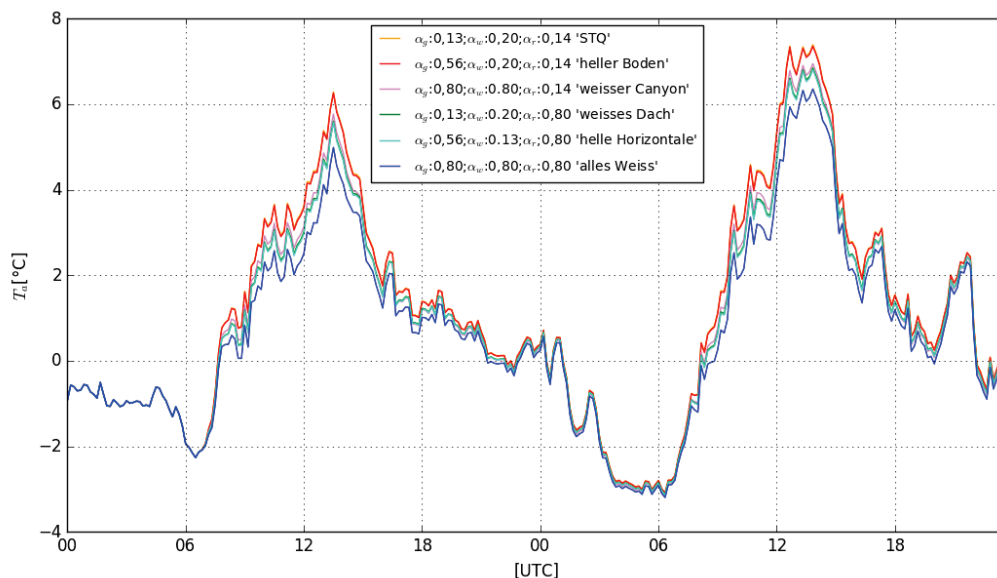


Abbildung 45: Reduktion der Lufttemperatur durch Erhöhung der Albedos von Boden, Fassaden und Wänden im Winter für einen West-Ost orientierten Straßencanyon mit HW1 (30+31.12.2016).

Abbildung 45 ist analog zu Abbildung 34 aufgebaut und zeigt die selben Szenarien, jedoch für zwei Wintertage nahe dem jährlichen Strahlungsminimum. Auch hier wird die Lufttemperatur reduziert, doch nur um maximal 1 °C tagsüber.

## 2.4.2 Ergebnisse von SOLWEIG

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von SOLWEIG für die Stadtsituation mit HW=1 (Canyon) für 2 verschiedene Positionen gezeigt. Es sei erwähnt, dass nur Ergebnisse mit Wiesenstreifen und Bäumen präsentiert werden. Der Grund dafür ist in Abbildung 57 und Abbildung 58 im Anhang dargestellt. Da keine Berechnung der Verdunstungskühlung in SOLWEIG bis dato möglich war, erkennt man auch fast keinen Unterschied in den Ergebnissen zwischen fehlender Vegetation, nur Wiesenstreifen und Wiesenstreifen mit Bäumen.

Als Auswertungsgrundlage werden die Ergebnisse für die Tage 19. und 20. Juni 2017 gezeigt. Die Simulationen für die beiden Wintertage wurden für SOLWEIG ausgelassen, da die Position des PV Moduls im Canyon zwischen Exner- und Schwackhöferhaus, aufgrund der dauerhaften Beschattung (von Mitte Oktober bis Anfang März), keinen Vergleich der gemessenen und der mit dem Energiebilanzmodell berechneten Werte zuließ.

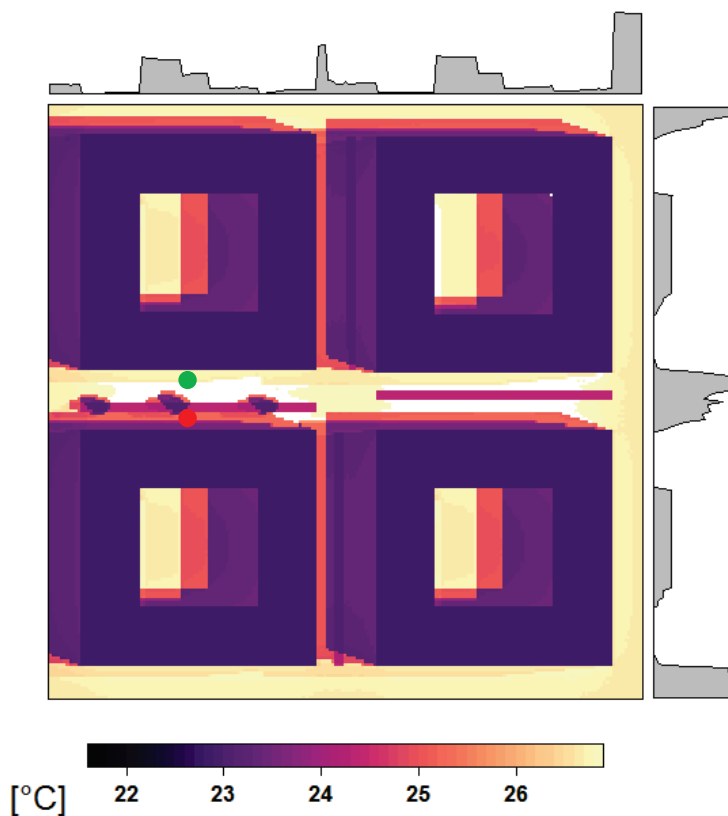


Abbildung 46: 2-dimensionale Darstellung der mit SOLWEIG berechneten Lufttemperatur mit 4 Gebäuden welche die Kreuzung und somit einen Straßencanyon darstellen. Der grüne Punkt markiert den sonnenbeschienenen Standort, der rote den beschatteten Standort.

Abbildung 46 zeigt die modellierte Lufttemperatur im Szenario der Kreuzung. Der grüne Punkt markiert die sonnenbeschienene Stelle bzw. in unmittelbarer Nähe zur Südfassade, der rote Punkt die beschattete Stelle, welche sich in unmittelbarer Nähe zu einem Baum befindet. Die dunkleren Streifen auf den Straßen werden als Wiese im Modell behandelt. Die orangen Gebiete, speziell in den Innenhöfen erkennbar, stellen den Übergang von beschatteten zu sonnenbeschienenen Flächen dar.

Zu Beginn wird ein Vergleich der modellierten Lufttemperatur gezeigt, welcher zugleich eine Kernaussage dieser Arbeit darstellen soll. Abbildung 47 gibt den zeitlichen Verlauf der Lufttemperatur im Straßencanyon für die Oberflächenkonfigurationen Asphalt ( $\alpha_g = 0.13$ ) mit normaler Putzfassade ( $\alpha_w = 0.20$ ), und Beton ( $\alpha_g = 0.56$ ) mit einer Fassade aus Photovoltaik ( $\alpha_{pV} = 0.10$ ) wieder. Der Index w steht für Wand, Index g für Grund und Index PV für Photovoltaik. Die Konfiguration Asphalt und normaler Putz, welche die Standardkonfiguration in den meisten Straßencanyons darstellt, wird von nun an als Referenzkonfiguration angesehen.

Man erkennt zunächst, dass die Lufttemperatur bei der Kombination von Beton und Photovoltaik ab ca. 8 UTC langsamer ansteigt und im Temperaturmaximum sich eine Differenz von etwa  $-2\text{ °C}$  einstellt. Kurz nach Sonnenaufgang ist zwar die Differenz umgekehrt, also Beton mit PV erzeugt höhere Temperaturen, jedoch mit ca.  $0,5\text{ °C}$  deutlich geringer. Hervorheben sollte man nun die Möglichkeit auch bei mikro-skaligen Bereichen,

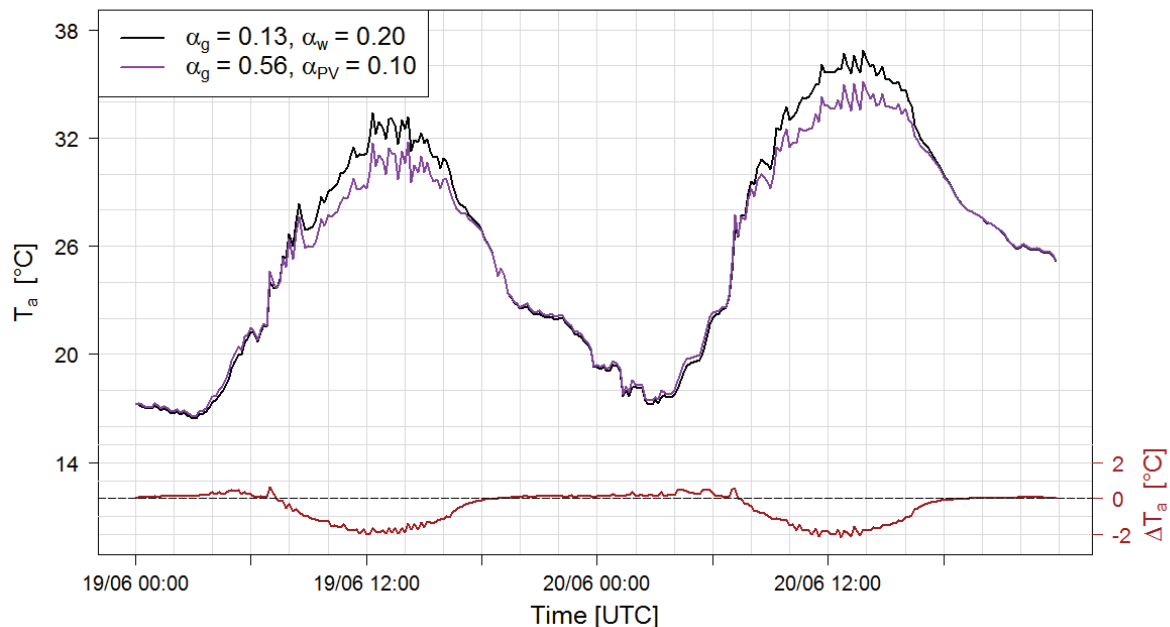


Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur am sonnenbeschienenen Standort in der Kreuzung für die Konfigurationen Asphalt ( $\alpha_g = 0.13$ ) mit normaler Putzfassade ( $\alpha_w = 0.20$ ) in schwarz und Beton ( $\alpha_g = 0.56$ ) mit gebäudeintegrierter Photovoltaikanlage ( $\alpha_{pV} = 0.10$ ) in violett. Die Differenz der beiden Temperaturen ist in braun eingezeichnet, zugehörige Achse befindet sich rechts.

wie dem gewählten Straßencanyon, Effekte der höheren Albedo zu sehen und zu modellieren.

Sieht man sich die dazu gehörige mittlere Strahlungstemperatur an (Abbildung 48), so wird es deutlich, ein Betonboden hat maßgebliche Auswirkungen auf die Helligkeit bzw. die reflektierte, kurzwellige Strahlung. Bis zu  $7\text{ °C}$  am Vormittag ist die MRT bei Beton und PV höher. Allerdings reduziert sich diese Erhöhung im Laufe des Tages und beträgt zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums nur noch  $2\text{ °C}$ .

Um die Lufttemperatur und die MRT zu kombinieren und die zwei vorherigen Graphiken verständlicher zu machen, wird nun der UTCI für den gleichen Zeitraum dargestellt. Abbildung 49 zeigt, dass der thermale Komfortindex bei Sonneneinwirkung auf den Menschen (ca. 7 UTC) bei höherreflektierender Betonoberfläche und PV-Fassaden um  $2\text{ °C}$  höher ist als bei der Referenzkonfiguration. Im Laufe des Tages nimmt die Differenz des UTCIs jedoch deutlich ab, was auf die geringere Lufttemperatur im Canyon zurück zu führen ist. Zur Zeit des Tagestemperaturmaximums ist die violette Kurve um einen Grad C geringer. Vergleicht man die Absolutwerte des UTCIs in Abbildung 49 mit der dazugehörigen Skala (siehe Abbildung 6), wird schnell klar, dass ein Mensch sich vormittags kurzzeitig bei Beton und PV starkem Hitzestress ( $UTCI > 32\text{ °C}$ ) ausgesetzt fühlt, jedoch die Grenze zu sehr

starkem Hitzestress ( $UTCI > 38 \text{ }^\circ\text{C}$ ) von Beton und PV beim Temperaturmaximum (12 – 14 UTC) des ersten Tages teilweise unterschritten wird.

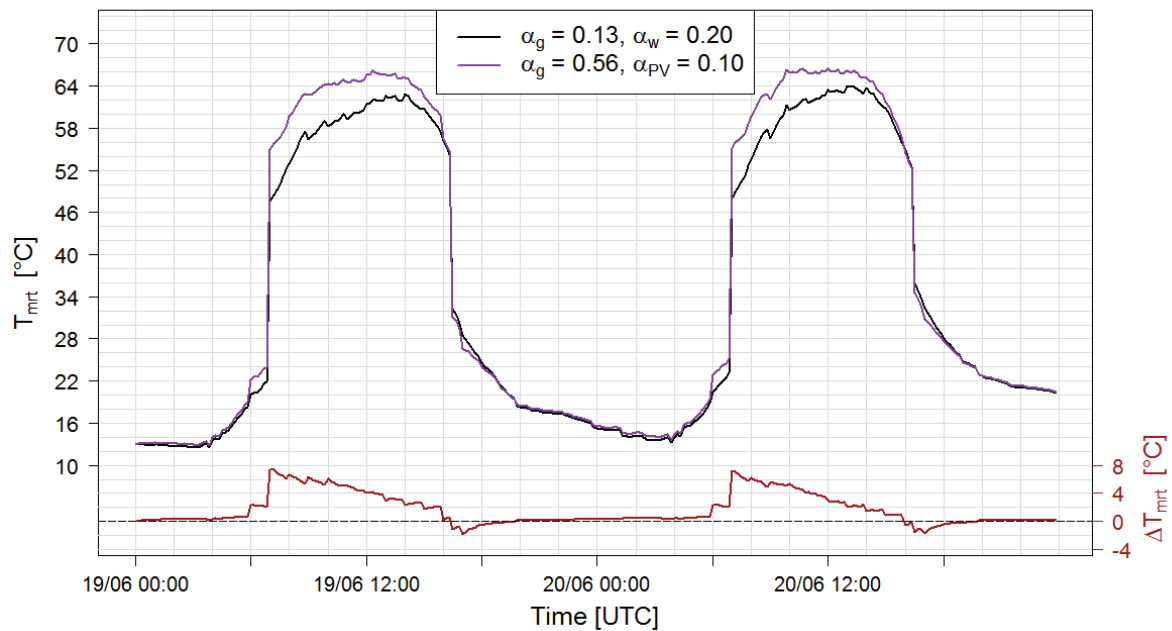


Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der mittleren Strahlungstemperatur am sonnenbeschienenen Standort für die Oberflächenkonfigurationen Asphalt mit normaler Putzfassade (schwarze Linie) und Betonbodenoberfläche mit PV Fassade (violette Linie). Die Differenz der beiden ist in braun dargestellt.

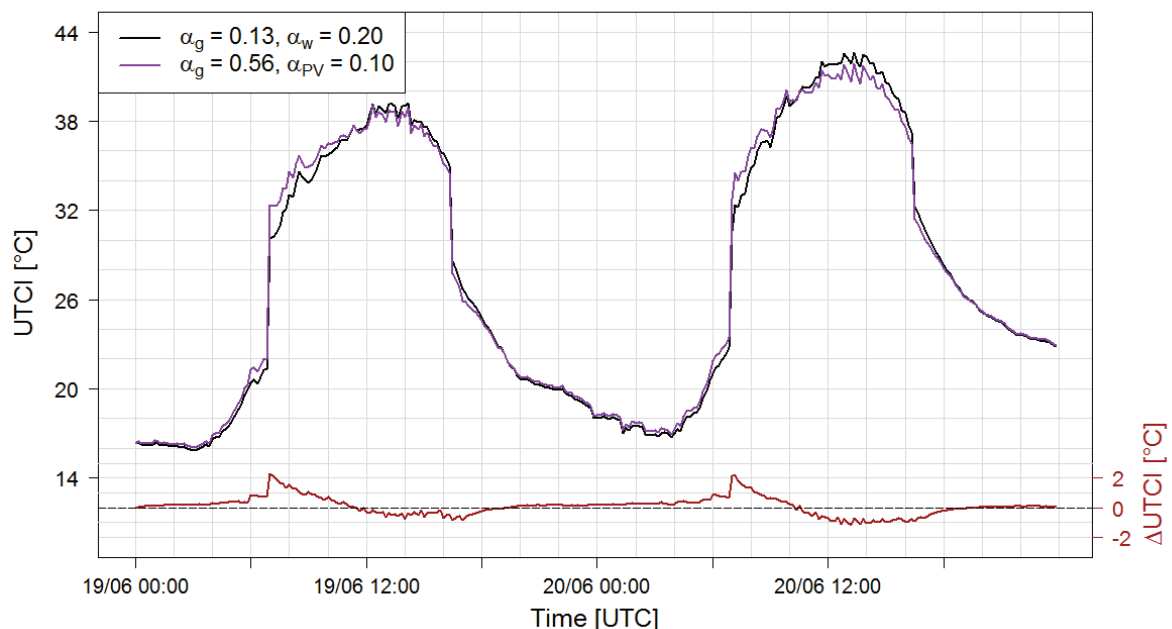


Abbildung 49: Zeitlicher Verlauf des universalen, thermischen Komforts am sonnenbeschienenen Standort für die Oberflächenkonfigurationen Asphalt mit normaler Putzfassade (schwarze Linie) und Beton mit PV Fassade (violette Linie). Die Differenz der beiden ist in braun dargestellt.

In den letzten Jahren kam es oft zu Vorschlägen, man solle so viele Flächen so hell (Albedo  $> 0.5$ ) wie möglich machen (siehe Projekt KELVIN). Allerdings wurden hierbei nie die mittlere

Strahlungstemperatur bzw. der thermische Komfort des Menschen berücksichtigt. Dazu werden in Abbildung 50 und Abbildung 51 der UTCI an einem sonnenbeschienenen und

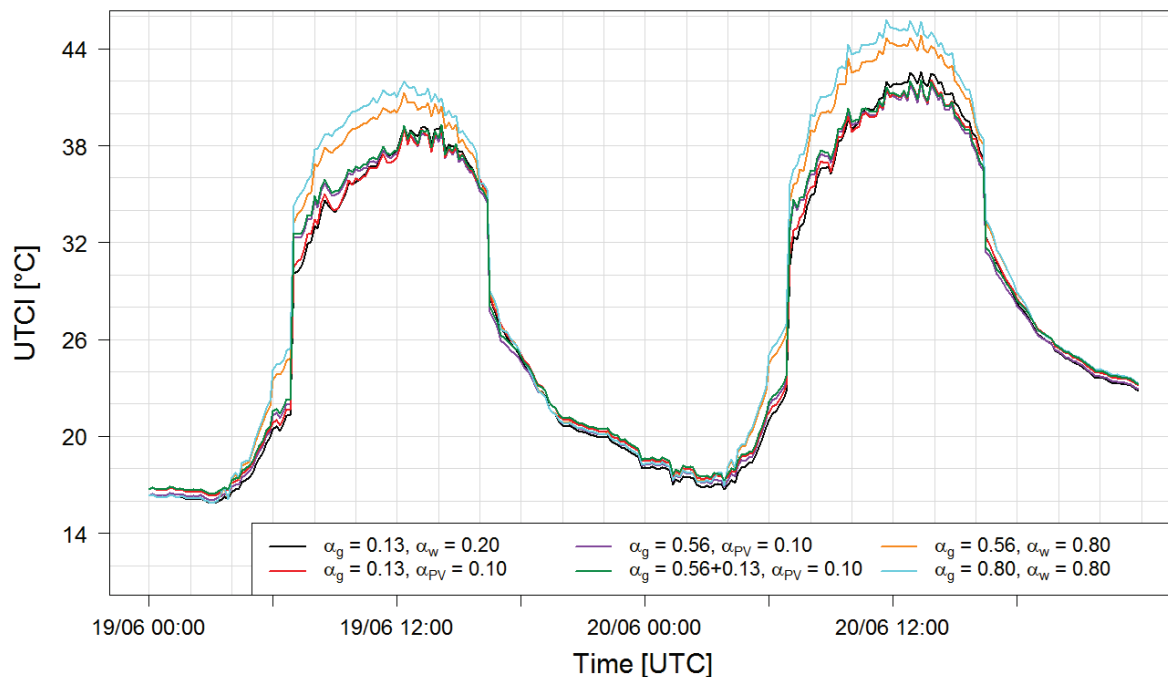


Abbildung 50: Zeitlicher Verlauf des UTCI für alle Oberflächenkonfigurationen am sonnenbeschienenen Standort.

größtenteils beschatteten Standort für sechs verschiedene Oberflächenkonfigurationen gezeigt.

Abbildung 50 zeigt anschaulich die starken Auswirkungen von sehr hellen Oberflächen im Straßencanyon. Während man sich am 20. Juni bei dunklen Fassaden (Putz oder PV) noch im sehr starken thermischen Stress befindet, ist man bei Oberflächen mit 0.80 Albedo schon fast im Bereich des extremen thermischen Stresses ( $\geq 46 \text{ °C}$ ). Wie in Kapitel 1.2.7 beschrieben, handelt es sich bei der Albedo Konfiguration „0.56 + 0.13“ in der Legende von Abbildung 50 um eine Kombination aus Beton und Asphalt am Boden.

Der Effekt der stark reflektierenden Oberflächen wird in der Schattenposition nochmals verstärkt. In Abbildung 51 zeigen sich, abermals den 20. Juni betreffend, die dunklen Oberflächen bei Lufttemperaturmaximum noch knapp im Bereich des moderaten thermischen Stresses. Die stark reflektierenden Oberflächen hingegen sind schon nahe dem sehr starken thermischen Stress. Dies zeigt eindeutig, dass die geringere Aufheizung von sehr hellen Oberflächen nicht ausreicht um den Gesamteindruck des menschlichen Komforts zu verbessern. Im Gegenteil, sogar im Schatten würde ein Mensch thermischen Stress empfinden.

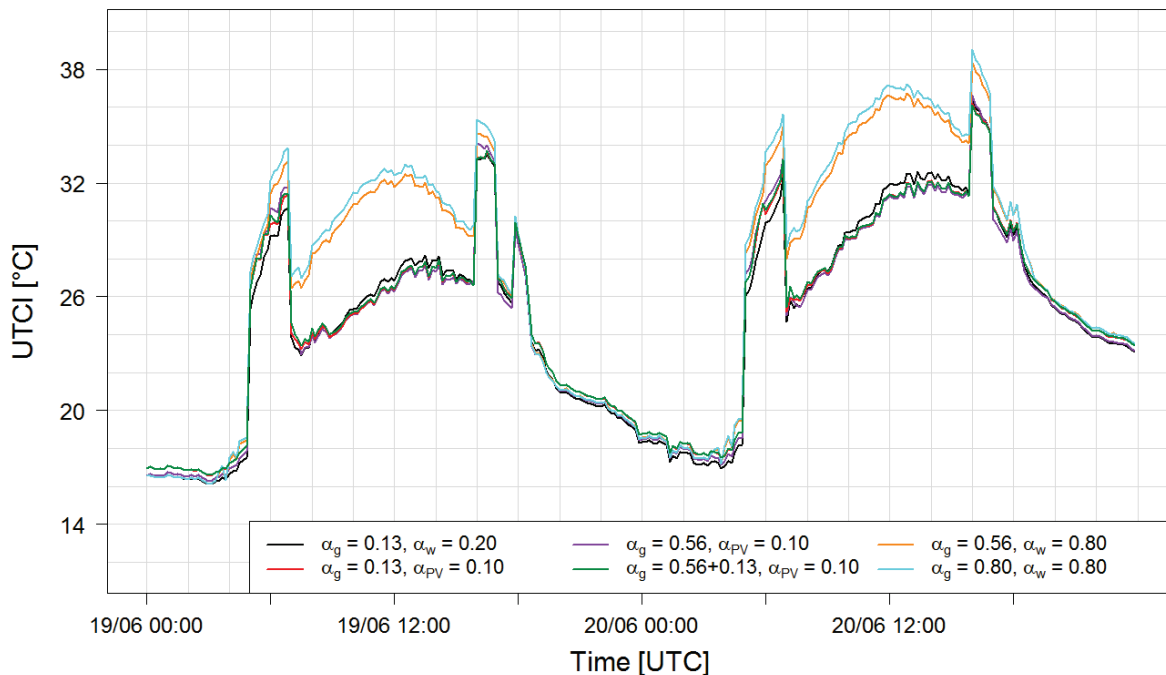


Abbildung 51: Zeitlicher Verlauf des UTCI für alle Oberflächenkonfigurationen an einem teilweise beschatteten Standort. Die starken Schwankungen werden durch Reflexionen an den Fassaden hervorgerufen.

Abbildung 52 zeigt die 2-dimensionalen Unterschiede der MRT zur Referenzkonfiguration vom 20. Juni 2017 um 11 UTC für die folgenden Oberflächenkonfigurationen: Asphalt mit PV Fassade (links oben), Beton mit PV Fassade (rechts oben), Beton und Asphaltgehsteig (siehe Szenarien Kapitel 1.2.7) kombiniert mit PV Fassade (links unten) und Beton mit heller Putzfassade (rechts unten). Die Konfiguration Asphalt mit einer PV Fassade zeigt fast keine bis gar keine Unterschiede am Boden. Einzig in den Innenhöfen nahe der Südfassade wird die MRT aufgrund der geringeren Albedo niedriger (grüne Ellipse). Hier sei erwähnt, dass sowohl die MRT als auch der UTCI auf den Dächern immer gleich ist, da die Lufttemperatur immer aus den Input Daten übernommen und die Albedo des Daches konstant auf 0.18 festgelegt wurde. Daher ist die Differenz immer Null.

Betrachtet man die Konfiguration Beton bzw. Beton mit Asphalt kombiniert mit PV Fassade, fallen die Bereiche mit Differenzen von 8 Grad Celsius oder mehr auf (rote Ellipsen). Das sind Stellen, die erst seit kurzem von Sonnenlicht beschienen werden, d.h. der Übergang von Schatten zur Sonne bewirkt eine starke Erhöhung der mittleren Strahlungstemperatur. Hierbei sollte überprüft werden, ob Situationen mit hoher und winkelabhängiger Einstrahlung bei solchen Positionen zur Blendung führen können. Allerdings nehmen diese höheren MRT Werte nach einer gewissen Zeit wieder ab (westseitige Straßen oder Innenhöfe haben nur mehr die Hälfte der Differenz). In den orangenen Ellipsen, welche die Bereiche der unterschiedlichen Bodenarten kennzeichnen (Beton vs. Beton mit Asphalt), sind nur minimale Unterschiede festzustellen. Die letzte Konfiguration rechts unten (Beton mit heller Putzfassade) zeigt durchgehend Differenzen höher als 10 °C in der MRT. Nicht mal Schatten bzw. Bäume schützen vor einer hohen mittleren Strahlungstemperatur.

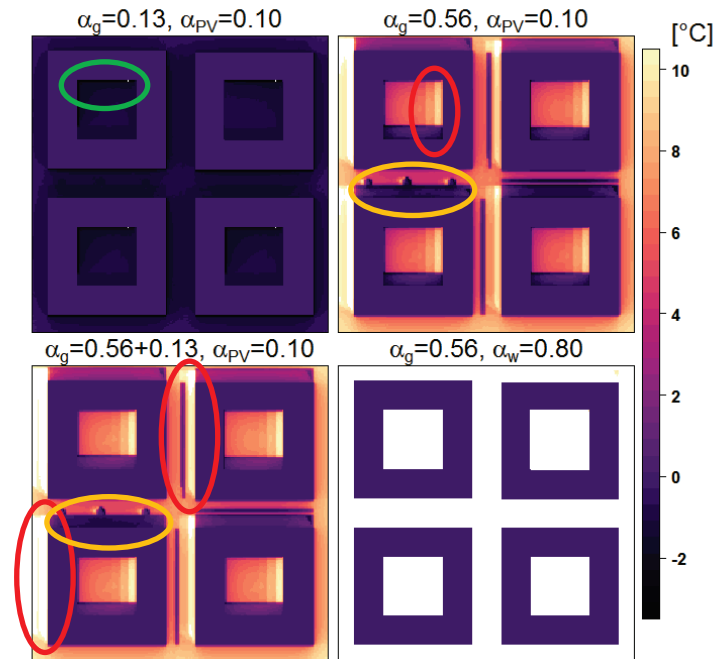


Abbildung 52: 2-dimensionale Differenzdarstellung der mittleren Strahlungstemperatur im Straßencanyon der Oberflächenkonfiguration Asphalt mit PV (links oben), Beton mit PV (rechts oben), Beton und Asphalt kombiniert mit PV (links unten) und Beton mit heller Fassade (rechts unten) zur Referenz Asphalt mit normaler Putz am 20. Juni 2017 um 11 UTC. Die farbigen Ellipsen sind im Fließtext beschrieben.

Abbildung 53 zeigt dieselben Konfigurationen im gleichen Straßencanyon mit den Differenzen zur Referenz, jedoch für den UTCI. Aufgrund der helleren Oberflächen für jene mit Beton und der daraus folgenden niedrigeren Lufttemperatur im Canyon ergeben sich natürlich viel kleinere Differenzen als in der Abbildung 52. Betrachtet man jedoch einzelne Positionen genauer, sieht man zunächst Bereiche bei Betonbodenoberflächen (orange Ellipsen), die um über 1 °C niedriger sind als bei Asphalt Oberflächen. Grund dafür ist die niedrigere langwellige Strahlung vom Boden ausgehend. Ein weiterer essentieller Aspekt dieser Analyse sind die Verhältnisse des thermischen Komforts bei Beton und sehr heller Putzfassade. Die beiden roten Ellipsen heben deutlich die großen Unterschiede in den Schattenbereichen hervor. Hier sind die Werte um 5 °C (mehr noch bei den Bäumen) höher als bei einer Kombination von Asphalt mit normaler Putzfassade. Die Skala in Abbildung 6 zeigt deutlich, dass eine Erhöhung um 5 °C bereits eine Klasse höheren thermischen Stress für den Menschen bedeutet.



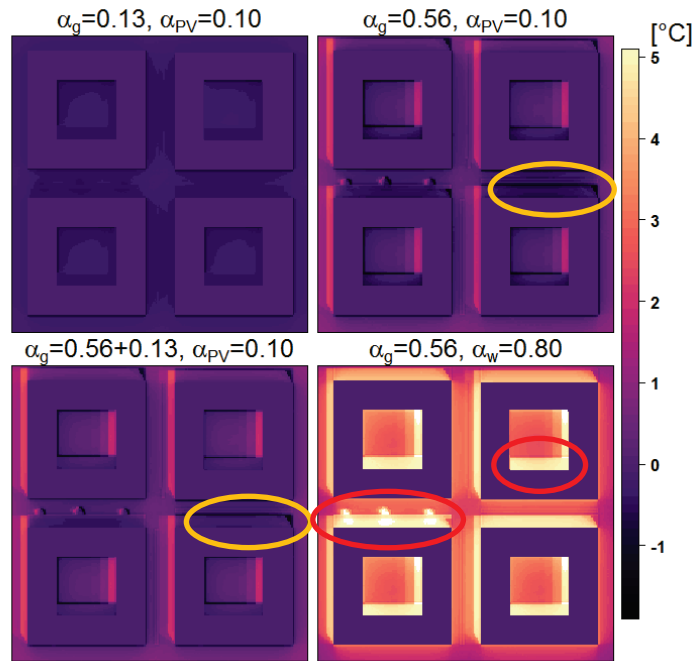


Abbildung 53: 2-dimensionale Differenzdarstellung des universalen, thermischen Komforts im Straßencanyon der Oberflächenkonfiguration Asphalt mit PV (links oben), Beton mit PV (rechts oben), Beton und Asphalt kombiniert mit PV (links unten) und Beton mit heller Fassade (rechts unten) zur Referenz Asphalt mit normalen Putz am 20. Juni 2017 um 11 UTC. Die farbigen Ellipsen sind im Fließtext beschrieben.

Um den Vergleich der einzelnen Oberflächenkonfiguration übersichtlicher darzustellen, werden im Folgenden zwei Graphiken mit Differenzen der Lufttemperatur und des UTCIs zur Referenzkonfiguration dargestellt.

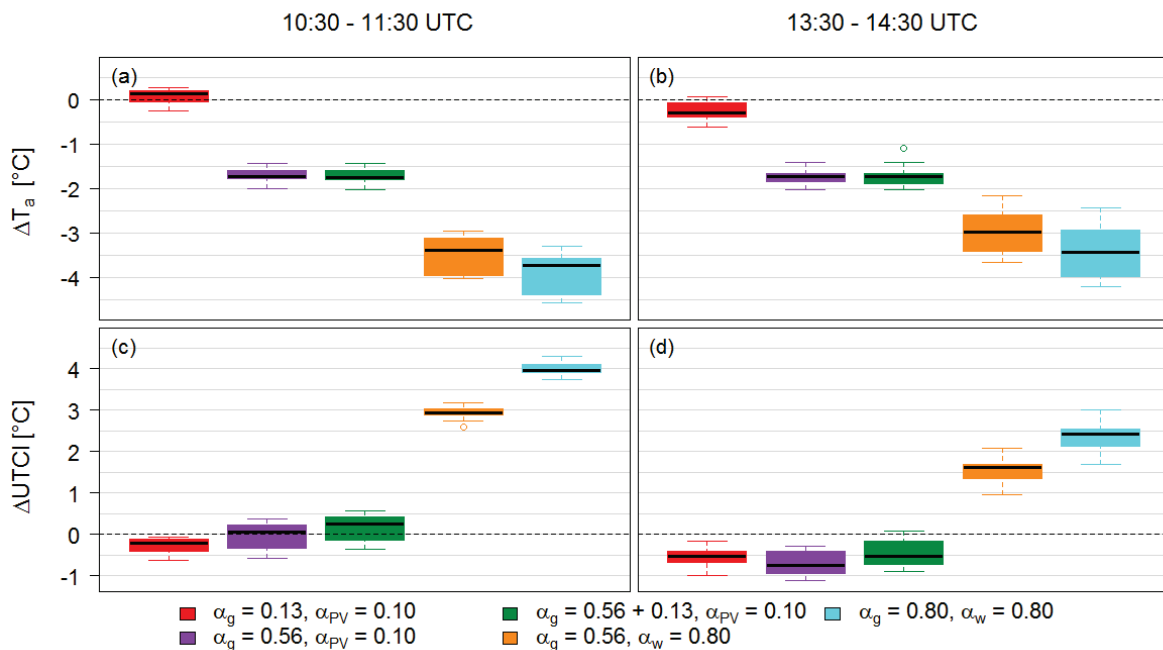


Abbildung 54: Box-whisker Differenzdarstellung der einzelnen Oberflächenkonfigurationen zur Referenzkonfiguration (Asphalt und normaler Putz) an sonnenbeschienener Stelle an den Tagen 19. und 20. Juni 2017 zwischen den Zeitpunkten 10:30 und 11:30 UTC (linke Spalte) und den Zeitpunkten 13:30 und 14:30 UTC (rechte Spalte).

Abbildung 54 gibt die Differenzen der einzelnen Oberflächenkonfigurationen für zwei verschiedene Zeiträume (Einzelbilder (a) und (c) für 10:30 bis 11:30 UTC; Einzelbilder (b) und (d) für 13:30 bis 14:30 UTC) an sonnenbeschienener Stelle wieder. Die Zeiträume wurden aufgrund des Sonnenhöchststandes (11 UTC) und des Lufttemperaturmaximums (~ 14 UTC) gewählt. Zusammengefasst sieht man sehr ähnliche Ergebnisse wie aus den Graphiken zuvor. Die Konfiguration Asphalt mit PV Fassade weist sowohl in der Lufttemperatur als auch im UTCI nur geringe Unterschiede auf. Die Konfiguration Beton mit PV bzw. Beton und Asphalt kombiniert mit PV zeigen Lufttemperatur Unterschiede bis zu  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , der UTCI jedoch bleibt zum Sonnenhöchststand auf gleichem Niveau und wird durch die niedrigere Lufttemperatur im Laufe des Tages sogar geringer. Bei sehr hellen Oberflächen ist die Tendenz ähnlich, aber die bis zu  $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  niedrigere Lufttemperatur kann den Effekt der stark höheren MRT nicht mehr ausgleichen und der UTCI ist auch noch beim Maximum um  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  höher als bei der Referenzkonfiguration.

Im Schatten sind die Auswirkungen der einzelnen Konfiguration auf den UTCI nochmals anders. Abbildung 55 zeigt ebenfalls die Differenzen in der Lufttemperatur und im UTCI zur Kombination Asphalt mit normaler Putzfassade. Bei beiden Variablen sind Unterschiede für Asphalt, Beton und PV Fassaden nur marginal, während die stark-reflektierenden Oberflächen bis zu  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  höhere UTCI Werte aufweisen, in der Lufttemperatur hingegen nur Werte bis  $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

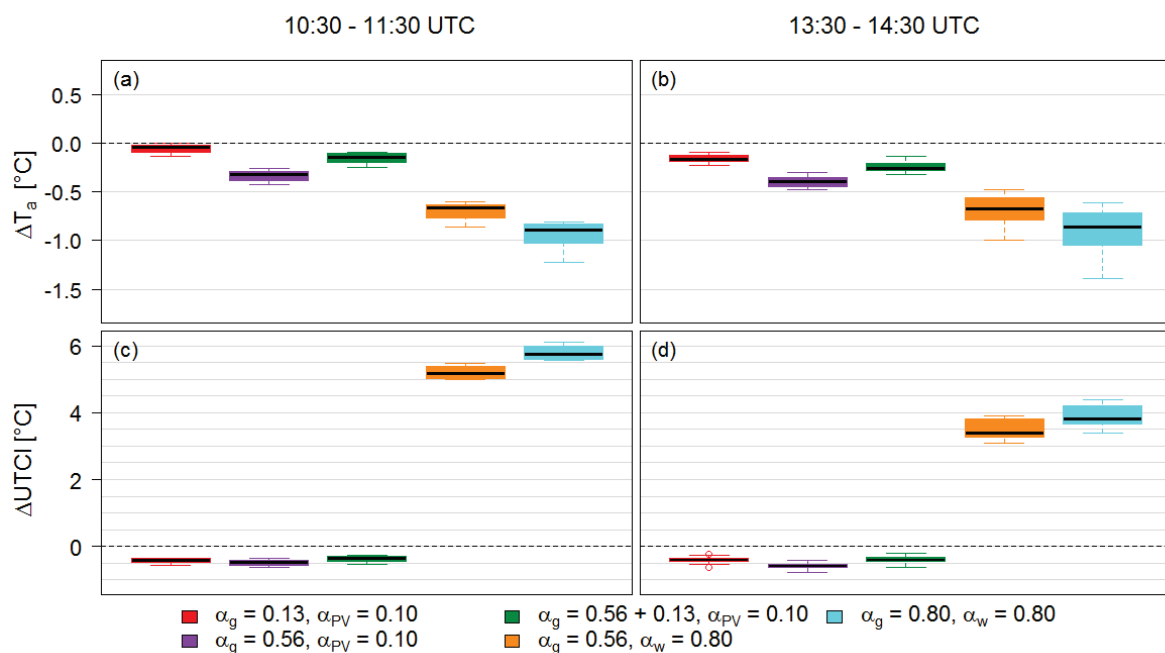


Abbildung 55: Box-whisker Differenzendarstellung der einzelnen Oberflächenkonfigurationen zur Referenzkonfiguration (Asphalt und normaler Putz) an beschatteter Stelle an den Tagen 19. und 20. Juni 2017 zwischen den Zeitpunkten 10:30 und 11:30 UTC (linke Spalte) und den Zeitpunkten 13:30 und 14:30 UTC (rechte Spalte).

### 2.4.3 Übersicht Mikroklima und Wärmebelastung

Für einen typischen Straßencanyon werden in Tabelle 12 die wichtigsten Größen zusammengefasst. Ausgewählt wurde ein unbedeckter Tag nahe dem Sonnenhöchststand im Jahr (20.Juni 2017) mit einer mittleren Windgeschwindigkeit (im Canyon) von 0,61 m/s. Ergebnisse aus SOLWEIG sind fett, Ergebnisse aus TEB kursiv dargestellt.

- 20.Juni 2017, unbedeckt, Windgeschwindigkeit = 0,61
- Straßen-Ausrichtung: West-Ost
- Höhe/Breitenverhältnis des Straßencanyons: 1
- Annahme Albedo der Materialien für:
  - Boden: Asphalt (0.13) oder Beton hell: 0.56 bzw 0.80
  - Fassaden: PV (0.1) oder Putz: 0.1; 0.2 bzw 0.80
  - Dach: 0.14 oder 0.8

Tabelle 12: Übersicht der wichtigsten Größen der Wärmebelastung für eine Auswahl an Oberflächenkonfigurationen für den 20.Juni 2017, städtebauliche Situation HW=1, West-Ost orientiert.

			$T_a$		$T_w$		$T_{mrt}$		$UTCI$	
Straße	Hauswand	Dach/Veg.	min	max	min	max	min	max	min	max
			0,13	0,10	18,43	35,74	23,76	53,20	21,48	75,11
0,13	0,20		<b>17,24</b>	<b>36,83</b>	<b>17,22</b>	<b>53,88</b>	<b>13,26</b>	<b>64,04</b>	<b>16,71</b>	<b>42,59</b>
			18,12	35,72	23,52	51,22	21,38	75,62	17,05	44,64
0,13	0,20	Dach=0.8	18,03	34,54	23,00	50,45	20,94	75,08	17,04	43,48
0,13	0,20	25%Wiese	18,25	35,24	23,04	50,83	20,15	74,49	16,62	44,03
0,13	0,20	25%Bäume	18,27	35,36	23,21	51,37	20,53	51,93	16,66	38,69
0,56	0,80		<b>17,50</b>	<b>34,10</b>	<b>20,19</b>	<b>37,75</b>	<b>13,59</b>	<b>83,43</b>	<b>16,96</b>	<b>44,85</b>
			18,24	35,07	21,30	36,39	19,72	90,69	17,07	47,70
0,80	0,80		<b>17,49</b>	<b>33,67</b>	<b>20,01</b>	<b>38,14</b>	<b>13,58</b>	<b>89,01</b>	<b>16,95</b>	<b>45,77</b>
			18,21	34,81	21,22	36,77	18,96	96,95	17,08	49,28
0,80	0,80	Dach=0.8	17,68	33,51	20,70	35,94	18,52	96,60	17,08	47,98
0,56	0,2	Dach=0.8	17,95	34,06	23,53	53,61	20,43	82,37	17,05	45,17
0,13	0,10 (PV)		<b>17,33</b>	<b>36,78</b>	<b>18,91</b>	<b>48,42</b>	<b>14,61</b>	<b>62,26</b>	<b>17,25</b>	<b>42,07</b>
			18,24	35,53	20,58	47,74	20,3	74,34	16,95	44,17
0,56	0,10 (PV)		<b>17,44</b>	<b>35,13</b>	<b>18,98</b>	<b>47,24</b>	<b>13,52</b>	<b>66,46</b>	<b>16,91</b>	<b>41,89</b>
			18,24	35,09	20,44	48,63	19,74	81,53	16,96	45,86
0,56+0,13	0,10 (PV)		<b>17,42</b>	<b>35,13</b>	<b>18,97</b>	<b>47,26</b>	<b>14,67</b>	<b>67,34</b>	<b>17,30</b>	<b>42,07</b>

## 2.5 Ergebnisse zu visuellem Komfort nahe spiegelnder Fassaden

### 2.5.1 Einfluss von Glasoberflächen der PV-Anlage

Wie bereits in Kapitel 1.2.4 beschrieben hängt der visuelle Komfort von Oberflächen bzw. von dessen Struktur ab. Zusätzlich ist jedoch auch die gesamte Umgebung mit den relativen Positionen von Sonne, reflektierende Oberfläche und des Betrachters entscheidend dafür, ob es zu unangenehmen Situationen durch Blendung kommt. Aus letztem Grund kann hier nicht auf die Blendhäufigkeit und Blenddauer eingegangen werden. Das muss in jedem Einzelfall geprüft werden.

An dieser Stelle sollen allerdings zur einfacheren Beurteilung Werte für das Verhältnis  $D/d$  angeführt werden. Einfaches, flaches Glas, zum Beispiel, hat theoretisch für mehrere Blendkriterien ein Verhältnis von  $>100$ . Lediglich für die Blenddauer von unter 30 Minuten ergibt sich auf Grund des engen Reflexionskegels ein Wert von etwa 8. Leicht strukturiertes Glas mit Antireflexions-Schicht (wie oft für PV-Module verwendet) weist je nach Kriterium Werte von  $D/d$  zwischen 5 und 30 auf. Im Vergleich dazu, hat Beton mit einer isotropen Reflektivität von 33% ein Verhältnis von  $D/d$  mit 1 bis 5 (Ruesch, 2016).

Man kann daher in den meisten Fällen davon ausgehen, dass definierte Grenzwerte für den visuellen Diskomfort bei der Verwendung von strukturiertem Glas für PV-Anlagen und bei üblichen Straßenbreiten bzw. Abständen zwischen gegenüberliegenden Gebäuden nicht überschritten werden. Außerdem wird der visuelle Komfort eher für Bewohner in Wohnungen auf Höhe der gegenüber installierten PV-Anlage eingeschränkt, als für den Fußgänger auf der Straße. Letzteres liegt daran, dass die Fläche der PV-Anlage aus der Position des Fußgängers durch den relativ flachen Sichtwinkel sehr klein ist und daher das Verhältnis  $D/d$  ebenfalls sehr klein wird.

Bei Gebäuden in der Stadt soll allerdings nicht ausschließlich auf die Blendwirkung von PV-Anlagen geachtet werden. Zum Beispiel ist in Abbildung 56 zu sehen, dass nicht die glatte Glasoberfläche des „schwarzen“ PV-Anlage zwischen den Fensterreihen für Blendung verantwortlich sein kann, sondern auch die ungünstig geneigten Innenjalousien.



Abbildung 56: Reflexion der Sonne an Glasfassade: Potentielle Blendung an Innenjalousien statt an Photovoltaikmodulen. (Foto: AIT)

## 2.5.2 Einfluss von hellen Betonoberflächen

Um eine mögliche Absolutblendung durch Beton, welche ab einer Leuchtdichte von  $10^4$  cd/m<sup>2</sup> auftreten kann, zu ermitteln, wurde die Leuchtdichte bestimmt (sh. Formel 1 in Kapitel 1.2.4 . und spektrale Reflexion Kapitel 1.2.5) Die Werte in Tabelle 13. liegen im unteren Bereich den Mooshammer (2013) für blauen Himmel angibt (5000 - 30 000 cd/m<sup>2</sup>). Eine Absolutblendung von  $> 10^4$  cd/m<sup>2</sup> kann nach dieser Rechnung durch hellen Normalbeton und hellen Straßenbeton mit Besenstrich bei einer Sonneneinstrahlung von 900W/m<sup>2</sup> erreicht werden. Dies tritt jedoch nur bei unbewölkten Himmel im Sommer auf wenn die Sonne im Zenit steht (11 UTC/13 MESZ). Außerdem gilt dies nur unter der Annahme, dass die sehr großflächige helle Betonfläche annähernd den gesamten unteren Halbraum als Sichtwinkel einnimmt (180°).

Für relativ helle Betonflächen mit einer isotropen Reflektivität von 33% ergibt sich nach (Ruesch, 2016) für verschiedene Kriterien des visuellen Komforts ein Verhältnis D/d von 1 bis 5. Dies kann durchaus bedeuten, dass eine vollständig von der Sonne beschienene, höher reflektierende Beton-Verkehrsfläche für den Fußgänger oder den Autofahrer als unangenehm empfunden wird. Es sind daher eventuell je nach Umgebung zusätzliche Maßnahmen zur Verringerung der Blendung zu ergreifen.

Tabelle 13: Umrechnung der Einstrahlung (I) und reflektierte Strahlung ausgehend von Betonsorten für Gehweg normal (MV1\_02) und hell (MV2\_01) und Straßen mit Besenstrich normal (MV3\_01) und hell (MV4\_01) und mit Waschbetonstruktur normal (MV3\_03) und hell (MV4\_03) berechnet aus normierten Strahlungsbedingungen (ICE Norm 60904-3) in Leuchtdichte L

	I	MV1_02	MV2_01	MV3_01	MV4_01	MV3_03	MV4_03
L [cd /m <sup>2</sup> ]	17069.5	6819.8	10352.6	8111.7	10401.2	4773.1	6428.7

### 3 Schlussfolgerungen für eine optimierte Solarstadtplanung

Durch die aus dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse können folgende Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Planung gemacht werden:

#### 3.1 Allgemeine Schlussfolgerungen

##### 3.1.1 Aus PV-Ertragssicht:

Aus Sicht der Solarstadtplanung können für PV-Anlagen an Fassaden folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Eine dichtere Bebauung als HW 1 sollte vermieden werden, da dadurch häufigere Verschattung von Fassaden und Verkehrsflächen zu einer deutlichen Reduktion des PV-Ertrags an Fassaden verursachen. Besonders, wenn geplant ist eine etwaige höhere Albedo von Verkehrsflächen auszunutzen, führt die dichtere Bebauung zu einer Reduktion des Potentials. Generell sind im Fall eines Straßencanyons wegen der Verschattung nur die oberen Meter der Fassade für eine PV-Anlage sinnvoll nutzbar. Umgekehrt bedeutet dies aber auch, dass Gebäudefassaden an offenen Plätzen am besten für die Montage von fassadenintegrierten PV-Anlagen geeignet sind.

Eine Erhöhung der Albedo von Verkehrsflächen bringt auch eine signifikante Zunahme des PV-Ertrages. Über ein Jahr hinweg kann eine Erhöhung der Albedo von 13% auf 56% etwa 25-30% mehr Ertrag bei vertikalen ost- respektive südorientierten PV-Anlagen bringen. Bei einem Straßencanyon mit HW gleich 1 ist zumindest in den Sommermonaten mit einer Steigerung des Ertrags im Ausmaß von 13% bis 26% für Ost-, bzw. Südfassaden zu rechnen.

Zudem wurde festgestellt, dass Ost-/West-Fassaden in Breitengraden wie Wien während eines Jahres in etwa 15% weniger Ertrag liefern als Südfassaden. Diese sind aber zur Verteilung des Erzeugungsprofils dennoch sehr gut geeignet.

##### 3.1.2 Aus Sicht des menschlichen Komforts:

Aus Sicht des Stadtbewohners wird durch die Erhöhung der Albedo sowohl auf Böden, Fassaden und Dächern die Lufttemperatur reduziert. Bei einer Erhöhung von über 0,56 kann

diese Reduktion sogar  $-4\text{ °C}$  im Maximum betragen. Der thermische Komfortindex UTCI (thermischer Stress) wird im Gegensatz dazu durch die vom Menschen empfangene Bodenreflexion tagsüber erhöht (bis zu  $5\text{ °C}$ ).

Für die Kombination heller Beton mit FassadenPV ist der Anstieg jedoch geringer ( $<1,5\text{ °C}$ ). Die Verwendung von PV an Fassaden selbst hat einen geringfügigen ( $\pm 0,2\text{ °C}$ ) Einfluss auf die Lufttemperatur, reduziert jedoch bis zu  $-1\text{ °C}$  den UTCI.

Offene Morphologien mit einem Höhe-Breite verhältnis  $HW \ll 1$  sind strategisch wichtig für die Produktion und das Abfließen von Kaltluft. Weiters sind offene Morphologien im Winter attraktiv, da sie stärker besonnt sein können. Im Sommer bietet das zum einen ideale Bedingungen für die Photovoltaik, zum anderen wird der Mensch durch die Sonnenexposition stärker belastet. Erhöhung der Boden- und Fassadenalbedo führen zwar zu einer starken Reduktion der Lufttemperatur gleichzeitig aber auch zu verstärktem thermischen Stress.

In geschlosseneren Morphologien mit einem Höhe-Breiteverhältnis  $HW \sim 1$  wird die Lufttemperatur schwächer durch erhöhte Albedo reduziert. Der thermische Stress ist hier zwar generell durch die stärkere Beschattung durch Gebäude niedriger, kann jedoch durch Reflexionen an hellen Flächen verstärkt werden.

Dächer sind bezüglich einer Erhöhung der Albedo sehr interessant, da diese einen großen Flächenanteil an der Grundfläche einnehmen und keine Reflexionen im Canyon verursachen der zu einer Belastung durch zusätzliche Strahlung und sogar zu Erwärmungen führen kann. In dieser Studie kann durch PV am Dach eine sehr große maximale Reduktion der Lufttemperatur erzielt werden ( $-1,5\text{ °C}$ ), da einerseits die Albedo von PV der Albedo üblicher Dachflächen entspricht und andererseits zwischen 10 und 20% der einfallenden Energie in Strom statt in Wärme umgewandelt wird. Hier muss zum einen bedacht werden, dass diese Werte Maximalwerte sind und keine Tages-, Monats- oder Jahresmittel. Weiters wird in dieser Simulation keine urbane Grenzschicht berechnet. Andere Studien haben ebenfalls eine Reduktion der Lufttemperatur in Städten durch Solarpaneele beschrieben jedoch Monatsmittel, welche deutlich geringer sind. Taha (2013) beschreibt eine Reduktion von bis zu  $-0,15\text{ K}$  für Los Angeles durch Photovoltaik mit Wirkungsgrad 20%. Masson et al. (2014) spricht von einer Reduktion der urbanen Wärmeinsel von Paris um  $-0,2\text{ °C}$  tagsüber und  $-0,3\text{ °C}$  nachts, jedoch für thermische Solarpaneele mit Wirkungsgrad von 60%. Das anders als in den vorliegenden Ergebnissen auch in der Nacht größere Reduktionen zu erwarten sind liegt daran, dass hier nicht mit einem atmosphärischen Modell gerechnet wurde, dass auch die Änderung der Grenzschichtdicke berücksichtigt.

### 3.1.3 Synthese:

Es konnte aus stadtklimatischer Sicht gezeigt werden, dass „dunkle“ PV-Module nicht zu einer Erhöhung der Lufttemperatur im Sommer führen und daher deren Einsatz an Fassaden in Kombination mit höherer Albedo von Verkehrsflächen zu empfehlen sind.

## 3.2 Anforderungen an PV-Module, Verkehrsflächen, Gebäudehüllen und Grünraum

### 3.2.1 Empfehlenswerte technologische Entwicklung von PV-Modulen

#### i. Aus Sicht der PV

Im urbanen Umfeld ist die Lufttemperatur im Sommer höher als im ländlichen Umfeld. Daher sind möglichst niedrige Temperaturkoeffizienten für PV-Module zu empfehlen. Abgesehen von dieser technologischen Weiterentwicklung ist bei der Montage darauf zu achten, dass entweder eine ausreichende Abfuhr von Wärme erzielt wird, oder anderweitig durch z.B. Kopplung mit Luftwärmepumpen oder mit der Gebäudemauer Synergien bezüglich des Wärmehaushalts des Gebäudes genutzt werden.

Wegen des hohen Anteils an reflektierter, diffuser Einstrahlung in der Stadt besteht auch die Frage, ob dieser Anteil der Einstrahlung effizient genutzt wird, oder die Einkopplung dieser Einstrahlungskomponenten in das PV-Modul noch verbessert werden sollte.

- ii. Ein weiterer Umstand in der Stadt ist, dass der Anteil der infraroten Strahlung durch die Abstrahlung von Gebäuden und Verkehrsflächen höher ist. Der Ertrag von PV-Modulen könnte durch eine geeignete Anpassung der Quanteneffizienz (spektralspezifische Effizienz) dahingehend weiter optimiert werden. *Synthese mit Berücksichtigung der Anforderungen des menschlichen Komforts:*

Es ist sowohl aus PV Ertragsicht als auch aus Sicht des menschlichen Komforts wichtig den Temperaturkoeffizienten von PV-Modulen zu reduzieren und die erzeugte Abwärme geeignet abzuführen oder durch Kopplung anderweitig zu nutzen. Weitere denkbare Entwicklungen betreffen die Einkopplung der diffus reflektierten Einstrahlung in das PV-Modul und eine Optimierung der Quanteneffizienz zur besseren Nutzung der Infrarotstrahlung. Aus Sicht des visuellen Komforts ist es wichtig möglichst keine spiegelnden Module zu verwenden.

### 3.2.2 Anforderungen an Verkehrsflächen und Gebäudehüllen

#### i. Aus Sicht der PV

Mit der Erhöhung der Reflektivität von Bodenflächen im Sichtbereich von PV-Modulen steigt auch der PV-Ertrag. Andererseits sinkt der Anteil der vom Boden reflektierten Einstrahlung in Relation zur Gesamteinstrahlung an fassadenmontierten PV-Modulen je höher die PV-Module über dem Boden montiert sind. Dennoch ist die technisch höchstmögliche und aus Sicht des menschlichen Komforts sinnvollste Reflektivität für Oberflächen anzustreben.



Möglichst helle Oberflächen von Fassaden wirken sich ebenso wie helle Verkehrsflächen auf den PV-Ertrag aus. Dabei ist bei einer Albedoerhöhung der West- und Ostfassaden auch ein entsprechender Vorteil für ost-/westorientierte PV-Anlagen zu erwarten.

*ii. Synthese mit Berücksichtigung der Anforderungen des menschlichen Komforts:*

Verkehrsflächen mit einer technisch möglichen Albedo von 56% (siehe Kapitel 1.1.1) für hellen Beton (Krispel et al., 2017) sind aus Sicht des menschlichen Komforts vertretbar und daher zu empfehlen. Der positive Effekt auf den PV-Ertrag ist jedenfalls als signifikant anzusehen. Aus Sicht des thermischen Komforts wäre es auch vorteilhaft möglichst die Fahrbahn und nicht den Gehsteig oder die Wand direkt neben dem Gehsteig aufzuhellen. Eine Möglichkeit zur Sicherstellung des thermischen Komforts wäre auch die Einrichtung von Grünbereichen (Bäume, Sträucher) zur Trennung von verschiedenartigen Verkehrsflächen.

Für Gebäudehüllen gelten insgesamt die selben Einschränkungen und Vorteile, wie sie bei Verkehrsflächen gültig sind. Je nach Orientierung und Lage muss die Situation neu eingeschätzt werden und auf die Beeinträchtigung des menschlichen Komforts Rücksicht genommen werden.

### **3.2.3 Anforderungen in Kombination mit der Grünraumplanung**

*i. Aus Sicht der PV*

Grundsätzlich haben Grünflächen eine niedrigere Albedo als es bei hellem Beton möglich wäre. Dies schränkt auch das Potential den PV-Ertrag durch reflektierte Einstrahlung zu steigern ein. Auf der anderen Seite hat Vegetation im Straßencanyon auch einen kühlenden Effekt, der damit die Verluste einer PV-Anlage durch die umgebende Lufttemperatur reduziert. Es ist daher auf eine ausgewogene Kombination mit Grünflächen zu achten.

Außerdem ist die Verschattung von PV-Anlagen durch Bäume zu vermeiden und das Wachstum von Bäumen bei der Pflanzung mit zu berücksichtigen.

*ii. Synthese mit Berücksichtigung der Anforderungen des menschlichen Komforts:*

Vegetation hat aus Sicht des menschlichen Komforts, wie für die PV-Anlage positive Aspekte. Die Verschattung von PV-Anlagen durch Bäume muss unbedingt vermieden werden. Nicht verschattende Vegetation und Bäume zur Absenkung der Stadtlufttemperatur um Stromeffizienz optimal zu halten wie z.B. bei PV-Anlagen im oberen Gebäudebereich in Kombination mit niedrig wachsenden Bäumen sind sinnvoll.

## **3.3 Empfehlungen für die Stadtplanung**

Das Projekt PVOPTI-Ray konnte klar zeigen, dass die Integration von Photovoltaikanlagen in Fassaden und Dächern keine negativen Auswirkungen auf die Erwärmung der Stadt hat und insbesondere das Wohlbefinden des Menschen nicht beeinträchtigt.

Es kann daher aus Klimaschutzsicht empfohlen werden, Photovoltaik in Fassaden und Dächer zu integrieren.

Im Gegensatz zur weit verbreiteten Meinung, dass weiße Dächer und Fassaden zur Erhöhung des thermischen Komforts in Städten beitragen, konnte gezeigt werden, dass der thermische Stress des Menschen in einem Straßencanyon mit weißen Straßen, Fassaden und Dächern (für welche eine Albedo von 0,8 angenommen wurde) sogar noch erhöht wird. Insbesondere weiße Straßen und Fassaden wirken sich im Sommer negativ auf die komplexe Strahlungsbilanz im Straßencanyon aus. Zwar verringert sich an heißen Sommertagen die Lufttemperatur durch die weißen Oberflächen, jedoch nur geringfügig um rund 1 Grad Celsius. Die Oberflächentemperatur der durch Photovoltaik mit einer Albedo von 0,1 angenommenen Wände ist am Sommertag mittags rund 10 Grad wärmer, als die der weißen Wand. Jedoch schlägt dies nicht auf den thermischen Stress des Menschen durch, im Gegenteil: die durch Albedoerhöhung sehr starke Reflexion der direkten und diffusen Solarstrahlung im Straßencanyon bewirkt eine starke Zunahme der Beeinträchtigung des Menschen durch eine erhöhte Solareinstrahlung. Die Addition von direkter Solareinstrahlung und der zu 80% an Wänden und Boden reflektierten Solareinstrahlung bewirkt eine Steigerung der ‚Gesamteinstrahlung‘ auf den Fußgänger auf der Straße, welche die erhöhte Wandtemperatur überkompensiert. Diese Gesamtstrahlung wird mit der ‚MRT‘ (mean radiant temperature), welche die mittlere Strahlungstemperatur ausdrückt, gemessen. Bei der untersuchten Variante mit einer Albedo von 0,8 also weißen Straßenbelägen, Fassaden und Dächern, ist die MRT bei beiden Simulationstools (SOLWEIG und TEB) rund 20 Grad höher, als bei einer Asphaltstraße und Photovoltaikfassaden. Der noch komplexere UTCI-Index (Universale Thermale Klimaindex UTCI) (Jendritzky et al., 1990; Weihs et al., 2012)) berücksichtigt nicht nur die Strahlungstemperatur, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, sondern auch den Wind. Beim UTCI ergibt sich immer noch eine Steigerung der Temperatur um (je nach Modell) 3-5 Grad Celsius.

Die starke Zunahme des thermischen und optischen Stresses für den Menschen durch albedoerhöhte Fassaden und Straßen ist sicherlich das markanteste Ergebnis der Simulationen.

Wenn man bedenkt, dass die ‚weiße Stadt‘ traditionell aus historischen Architekturen im Mittelmeerraum und im Arabischen und Afrikanischen Kulturraum stammen, so wird auch schnell klar, warum eine Übertragung auf mitteleuropäische Städte nicht empfehlenswert ist: die dortigen Altstädte haben typischerweise extrem enge Gassen, welche noch dazu häufig von oben durch Bastmatten oder ähnliche semitransparente Überdachungen verschattet werden. Die weißen Dächer reflektieren die Strahlung und die weißen Fassaden sorgen trotz Enge und Verschattung für genügendes Tageslicht. Eine direkte Übertragung dieser Oberflächen auf weite unverschattete Plätze und Straßen mitteleuropäischer Städte bewirkt jedoch eine fatale Strahlungserhöhung im Straßencanyon, welche zu Blendung und erhöhtem thermischen Stress durch stark reflektierte direkte Solarstrahlung führt.

Die Idee auch in westlichen Großstädten ‚weiße Dächer‘ einzuführen, stammt aus Amerika. Dort wurde allerdings insbesondere verglichen, wie die Energie für die Klimatisierung von

Bürogebäuden verringert werden kann. Positive Werte konnten dort erzielt werden, wenn ungedämmte Flachdächer klimatisierter Hochhäuser bedeckt mit schwarzer Teerpappe renoviert wurden, indem der Wärmeeintrag reduziert wurde, indem diese einerseits gedämmt und andererseits mit weißer Dachfolie belegt wurden. Selbst ein weißer Anstrich erzielte unter diesen Bedingungen bereits Besserung.

Die Messungen der Albedo von Photovoltaik im Vergleich zu herkömmlichen Asphaltbelägen oder Putzfassaden bzw. Betondachsteinen ergeben, dass die Albedo von PV im selben Bereich liegt. Photovoltaikfassaden tragen daher nicht zu einer Verschlechterung des Mikroklimas im Verhältnis zum Bestand bei. Im Gegenteil ist es so, dass sie noch einen Teil der Solarstrahlung in Strom umwandeln und so der Strahlungsmenge im Straßencanyon entziehen.

Eine realistische Erhöhung der Albedo von Straßenbelägen durch hellere Betonsteine mit einer Albedo von 0.56 im Verhältnis zu Asphalt mit 0.2 kann jedoch dazu beitragen, den Solarertrag von PV-Fassaden markant zu erhöhen. Der UTCI bleibt dabei rund 4 Grad Celsius unter dem der stark albedo-erhöhten Variante. Diese Kombination schneidet daher stadtklimatisch am besten ab.

Die zwei wichtigsten Faktoren neben der Oberflächen-Albedo im Straßencanyon sind jedoch Verschattung und Begrünung. Bei einem Baumbestand von 25% im Straßencanyon sinkt der UTCI durch die Beschattung noch einmal gegenüber der Variante mit heller Straße und PV-Fassaden um 3 Grad Celsius ab. In diesem Fall ist jedoch nur Nutzung der Photovoltaik in den obersten Geschossen möglich.

Die Empfehlungen aus dem Projekt PVOPTI-Ray für die Stadtplanung lauten daher:

- Betrachtung komplexer Strahlungsbilanzen und Indices als Instrumente der solaren Stadtplanung bezogen auf Mikroklima und menschliches Wohlbefinden (MRT und UTCI)
- Die alleinige Konzentration auf Oberflächentemperaturen und Lufttemperatur greift zu kurz, um das Mikroklima im Stadtraum und die Auswirkungen der Strahlungs- und Klimabilanz auf den Menschen zu beschreiben
- Solare Dächer und Fassaden als Beiträge zum Klimaschutz sowie zu einem angenehmen Mikroklima und einer ausgewogenen Strahlungsbilanz im Straßencanyon
- Erhöhung der Albedo von Straßenbelägen auf rund 0.56 durch z.B. hellere Betonsteine zur Solarertragserhöhung bei Bedarf
- Von einer ‚weißen Stadt‘ mit stark albedoerhöhten Straßen und Fassaden wird bei mitteleuropäisch gestalteten Stadträumen mit Besonnung von Straßen und Fassaden strikt abgeraten, da der thermische und optische Stress für den Menschen durch erhöhte solare Strahlungsbelastung stark steigt.
- Im Gegensatz zur arabischen verschatteten Altstadt mit engen Gassen ‚Medina‘ trägt die ‚weiße Stadt‘ bei weiträumigen europäischen Stadträumen nicht zur Verminderung des thermischen Stresses oder zur Verbesserung der Lichtverhältnisse bei.

- Ratsam sind PV-Fassaden in den unverschatteten Lagen der höheren Stockwerke in Kombination mit der Nutzung von Begrünung an Fassaden und von Bäumen auf Straßen bis zur Höhe der unteren Stockwerke zur Verdunstungskühlung und Beschattung der Gehwege im Sommer
- Abgestimmte Konzepte der Begrünung und des PV-Einsatzes zur gegenseitigen Optimierung
- Bewusstes Schaffen von sommerlich verschatteten Gehwegen bzw. Schatten-Optionen für Fußgänger in Straßen
- Schaffung optimaler Windverhältnisse, Durchlüftung der Straßen

### 3.4 Organisatorische Schlussfolgerungen

Innerhalb des Projektteams ist geplant mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter zu arbeiten und die Modelle, insbesondere SOLWEIG und SEBE-PV weiterzuentwickeln. Die Modelle können auch für die Anwendung in 3D Modellen (statt Raster-Oberflächenmodell) verändert werden. Damit wäre die Anwendung in der üblichen 3D Design Software denkbar.

Die Projektergebnisse sind auf verschiedenen Ebenen und für ganz unterschiedliche Zielgruppen interessant und können von diesen auch weiterverwendet werden:

- Stadtplanung -> Anpassung von Städten an den Klimawandel, bezogen auf Mitigation (PV) und Adaptation (Schutz der Menschen vor Überhitzung / Stadtklimaoptimierung / Komforterrhöhung im Straßencanyon)
- Anbieter und Entwickler von Softwaretools, bezogen auf Stadtklimasimulationen, wie auch PV-Ertragssimulationen
- Architekten, Landschafts- und Stadtplaner: klimatisch und solar optimierte Gestaltung von Straßencanyons, Stadtplanung und Architekturgestaltung
- Investoren, Geschäfte – Gestaltung eines attraktiven Geschäftsumfeldes
- Städtische Verwaltung und Planung (zB. Stadt Wien - MA20, MA22), Modulhersteller (zB. ertex, ATB Becker), Modulinstallateure und Architekten, CSEM

Die Modellerweiterungen in SOLWEIG und SEBE-PV wurden den Entwicklern der opensource Projekte zur Verfügung gestellt, sodass sie in die Hauptversion implementiert werden können. Mit den TEB Entwicklern sind die im Projekt mitwirkenden WissenschaftlerInnen in Kontakt. Die Messergebnisse der speziell für diese Fragestellung hergestellten Betonrezepturen sind diesem Bericht zu entnehmen

Klimawandel in der Stadt ist gerade eines der nachgefragtesten Themen, sowohl was die Anpassung und Minderung der Effekte des Klimawandels auf die Stadt anbelangt, als auch, was den Beitrag der Städte zur Verringerung von Treibhausgasen und zur regenerativen Stromerzeugung angeht. Daher sehen die Projektpartner im Projektergebnis einen wichtigen Beitrag zur internationalen Diskussion, welche auf vielfältigen Wegen weiterverfolgt werden kann.

Es wurde in der Vorzeigeregion ein Projektproposal erarbeitet, um einen Parkplatz mit PV zu überdachen, sowie mit stärker reflektierenden hellen Betonsteinen die Bodenalbedo auf die bifacialen Solarmodule zu erhöhen. Die Parkplätze sollen mit Grünflächen kombiniert werden, um eine stadtklimatische Optimierung zu erzielen und die Effekte des Gesamtprojektes zu messen, sowie die Simulationstools daran zu validieren.

Weitere Projekte mit BIPV-Fassaden im Straßencanyon wären sinnvoll. Es besteht zudem Kontakt zu ZAMG, um sich über Mikroklimaeffekte und urbane Hitzeeinseln auszutauschen. Geplant sind Publikationen und Konferenzbeiträge sowie Folgeprojekte zur vertieften Untersuchung. Bisher gab es einen Stakeholderworkshop im Zuge des Projektes.

## 4 Ausblick und Empfehlungen für weitergehende Forschung

Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

- Bauen von Mustermustern des Solar, Grün und Strahlungsbilanziell optimierten Straßencanyons zur Messung komplexer Strahlungsbilanzen
- Validierung der bisher gemachten Modellimplementationen an bestehenden großflächigen PV Installationen
- Weiterentwicklung des Modells SOLWEIG und Inkludierung der Verdunstung
- Auch die Weiterentwicklung von TEB hinsichtlich dieser Fragestellung ist empfehlenswert, allerdings wäre in diesem Falle eine Kooperation auf EU Ebene sinnvoll
- Verbesserung von SEBE<sub>pv</sub> zur Reduzierung von Unsicherheitsquellen und Implementierung von lokal abhängigen Albedowerten
- Simulation der validierten Modelle für größere Gebiete gekoppelt mit einem Stadtklimamodell um die Auswirkungen auf die städtische Wärmeinsel abzuschätzen
- Simulation für 30-jährige Klimaperioden (zB. 1980-2010) um die Änderung klimatischer Indizes (zB. Sommertage, Hitzetage) bestimmen zu können.

Die Ergebnisse zeigen dass für Fassaden im dichtbebauten Gebiet anhand der momentan verfügbaren Simulationstools Photovoltaikanlagen keine negative Auswirkung auf das Mikroklima bzw. den thermischen Komfort haben, auch konnte keine relevante visuelle Beeinträchtigung festgestellt werden. Aus Ertragssicht ist die Verwendung von Photovoltaik im Straßencanyon jedenfalls interessant. Die Simulationstools wurden jedoch nicht anhand einer realen Situation validiert. Ein Demonstrationsprojekt könnte zum einen eine Validierung möglich machen, so dass diese vielversprechende Lösung bestätigt werden kann. Gleichzeitig kann ein Anschauungsobjekt im bebauten Gebiet helfen Vorurteile abzubauen. Momentan sind aus mikroklimatischer und PV-Ertragssicht für ein Demonstrationsprojekt nur Chancen aber keine Risiken erkennbar. Etwaige Konsequenzen auf die Stadtökologie und die Bewohner jenseits des hier untersuchten thermischen und visuellen Komforts sind nicht

bekannt, könnten jedoch durch ein Demonstrationsprojekt untersucht werden. Jedoch ist es empfehlenswert vor der Umsetzung die CO<sub>2</sub>-Bilanz und den Lebenszyklus der Baumaßnahmen und Materialien zu untersuchen. Weiters müssen ökonomische und juristische Gesichtspunkte geprüft werden. Auch sollte die zusätzliche thermische Last durch Klimawandel und der potentiell vermehrte Einsatz von Klimaanlage untersucht werden.

# 5 Verzeichnisse

## 5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mittlere Strahlungstemperatur (MRT) über höherreflektieren Straßenbeton (linke Abb.) und über Asphaltstraßen (rechte Abb.) Rosa Skala entspricht einer MRT von 355 bis 360 K (linke Abb.) und einen thermischen Stressindex (UTCI) von 43,9 °C. Die rote Farbe entspricht einem MRT von 345 bis 350 K (rechte Abb.) und einem UTCI von 41,3 °C. D.h. der thermische Stress ist geringer über der Asphaltstraße als über höherreflektierenden Beton.....22

Abbildung 2: a) Universität für Bodenkultur im 19. Wiener Gemeindebezirk mit Kennzeichnung der einzelnen Messstationen. b) Gesamte Messstation im Straßencanyon in 3 m Höhe über Grund. c) Polycrystallines Photovoltaik Modul d) DS-2 Sonic Anemometer. e) EMS11 Globalstrahlungssensoren für horizontale und vertikale Fläche. ....23

Abbildung 3: Links: Teil der Messstation (Wolkenkamera, Globalstrahlung und langwellige Strahlung) auf der Dachplattform Schwackhöferhaus in 26 m Höhe über Grund. Mitte: Suntracker mit Pyrheliometer. Rechts: Temperatur-, Feuchte- und Windmessstation.....24

Abbildung 4: Links: Infrarotbild einer FLIR Kamera mit Blick auf das PV Modul und die Fassade des Schwackhöferhauses am 19.06.2017 um 11:12 UTC. Rechts: Das dazugehörige RGB Bild. ....24

Abbildung 5: Beschreibung des Universal Thermal Climate Index (UTCI) bzw. des thermischen Komfortindex für den Menschen mit der zugehörigen Skala rechts. (Bröde et al., 2011) .....26

Abbildung 6: Vergrößerte Skala des universalen, thermischen Komfortindex Source: climatechip.org .....27

Abbildung 7: „Zweite Sonne“ verursacht durch Glasfassade am TU Wien Gebäude Getreidemarkt 9 (Foto: AIT).....28

Abbildung 8: Reflektierte Strahlung gewichtet mit der spektralen Augenempfindlichkeit (V-lambda) bei Tag (orange Kurve - „photopisch) und Nacht (blaue Kurve – „skotopisch“) Quelle: Hahn , CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9099891>, zugrunde liegende Zahlen: „OSA Handbook of Optics“ <http://www.intl-light.com/handbookthanks.html>. ....29

Abbildung 9: Oberflächenausbildung typischer Betonoberflächen .....32

Abbildung 10: Oberflächenausbildung MV 1 Normalbeton.....32

Abbildung 11: Oberflächenausbildung MV 2 Normalbeton hell .....33

Abbildung 12: Oberflächenausbildung MV 3 Straßenbeton .....33

Abbildung 13: Oberflächenausbildung MV 4 Straßenbeton hell .....33

Abbildung 14: 3D Visualisierung der Stadtsituationen, links: „Canyon“, rechts „Platz“ .....35

Abbildung 15: Genordnete Aufsicht der gewählten Szenarien: links: „Canyon“, rechts: „Platz“. Die Farben bedeuten: grau – Boden, rot – Gebäude. ....35

Abbildung 16: Detailliertes digitales Oberflächenmodell der Universität für Bodenkultur am Standort Peter-Jordan Straße mit den Gebäuden Exnerhaus (südliches) und

Schwachhöferhaus (nördliches). Dieses Modell dient als Input für die Programme SOLWEIG und SEBEpv.....	36
Abbildung 17: Spektrale Reflexion der unterschiedlichen Betonsorten aus dem gesamten Halbraum (TIS) und ohne die spiegelnde Komponente (DIF), Quelle: Gerhard Peharz – Projekt Photonic Cooling. ....	40
Abbildung 18: Spektrale reflektierte Irradianz (Bestrahlungsstärke) der unterschiedlichen Betonproben, berechnet mit der Referenzstrahlung aus der ICENorm 60904-3. ....	41
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Co-Simulation von SEBE, PV-Modell und Urbane Energiebilanz zur Berechnung des Photovoltaik Ertrages. ....	43
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Co-Simulation von SEBE, PV-Modell und Urbane Energiebilanz zur Berechnung des Photovoltaik Ertrages. ....	43
Abbildung 21: Links: Gemessene Differenz der Oberflächentemperatur an der Wand (Schwachhöferhaus) und der Lufttemperatur 1 m davor als Funktion des Sonnenelevationswinkels zur Zeit des Sonnenhöchststandes. Rechts: Großteils die gleichen Wandtemperaturen bzw. deren Differenz aber als Funktion der Sonneneinstrahlung auf die vertikale Fläche, gemessen mit dem EMS11 Sensor. Die erklärte Varianz ( $R^2$ ), die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) sowie die Regressionsparameter sind in der linken oberen Ecke gegeben. ....	44
Abbildung 22: Gemessene Albedo der grauen Fassade am Schwachhöferhaus. ....	46
Abbildung 23: Ergebnisse aus ausgewählten fiktiven Test-Szenarien zur Validierung. ....	48
Abbildung 24: Simulierte Einstrahlung für die Fassaden von Exner und Schwachhöfer Haus, basiert auf meteorologischen Daten vom 26.08.2016, 11:00 UTC. Links: Gesamter Gebäudekomplex, rechts: Ausschnitt aus dem Bereich, an dem Messdaten erhoben wurden. ....	49
Abbildung 25: Berechnete mittlere Strahlungstemperatur für den Standort Universität für Bodenkultur zu den Zeitpunkten 11:00 (links) und 13:00 (rechts) UTC. Die grünen Punkte markieren den Standort der Lufttemperaturmessung. ....	50
Abbildung 26: Zeitlicher Verlauf der gemessenen und modellierten Lufttemperatur im Straßencanyon der BOKU. Die linke, vertikale Achse zeigt die absoluten Werte an, die rechte, in braun gehaltene Achse zeigt die Differenz der beiden Temperaturen an. ....	51
Abbildung 27: Punktwolke der modellierten Lufttemperatur als Funktion der gemessenen Lufttemperatur im Straßencanyon der BOKU. Links oben sind die erklärte Varianz ( $R^2$ ) und die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) gegeben. ....	52
Abbildung 28: Photovoltaik Ertrag für den Straßencanyon über jeweils einen Tag, aufgeschlüsselt nach Technologie, Orientierung der Fassade, dem Tag im Jahr und den Wetterbedingungen. Blau: Reflektivität 13%, rot: Reflektivität 56%. ....	53
Abbildung 29: Steigerung des Photovoltaik Ertrags für einen Straßencanyon bei einer Erhöhung des Reflexionsgrades von 13% auf 56%, aufgeschlüsselt nach Technologie, Orientierung der Fassade, dem Tag im Jahr und der Wetterbedingung. ....	54
Abbildung 30: Steigerung des Photovoltaik Ertrags für einen Platz bei einer Erhöhung des Reflexionsgrades von 13% auf 56%, aufgeschlüsselt nach Technologie, Orientierung der Fassade, dem Tag im Jahr und der Wetterbedingung. ....	54



Abbildung 31: Reduktion der Lufttemperatur durch erhöhung der Albedowerte von Boden und Fassade in einer Stadtsituation mit HW=0.2, unten: Differenz zu Asphalt+Putz (19+20.6.2017).....	56
Abbildung 32: Reduktion der Lufttemperatur durch erhöhung der Albedowerte von Boden und Fassade in einer Stadtsituation mit HW=1, Differenz zu Asphalt+Putz (19+20.6.2017).	57
Abbildung 33: Erwärmung der Oberflächen von Boden (schwarz), Süd bzw. Westwand (rot) (19.6.2017) und Nord bzw. Ostwand (blau) für West-Ost orientierte (linke Spalte) und Nord-Süd orientierte (rechte Spalte) Straßencanyons mit Asphaltboden (1.Zeile) und hellen Betonboden (2.Zeile). Die Lufttemperatur ist gelb eingezeichnet.....	57
Abbildung 34: Reduktion der Lufttemperatur aufgrund einer Albedoerhöhung von Boden, Fassade und Dach eines West-Ost orientierten Straßencanyons mit HW1 für den 19+20.6.2017.....	58
Abbildung 35: Reduktion der Lufttemperatur durch Albedoerhöhung von Boden, Fassade und Dach sowie Erhöhung der Lufttemperatur durch Isolierung der Gebäudeaußenhülle (thermische Leitfähigkeit der Fassaden und Dächer herabsetzt von 1,7 bzw. 1,4 auf 0,1 W/(mK), Reduktion der Wärmekapazität von 1520000 bzw. 1554000 auf 1496000 J/m³K) in einem West-Ost orientierten Straßencanyons mit HW1 für den 19+20.6.2017.....	59
Abbildung 36: Erhöhung des UTCI durch Reduktion der Albedo von Boden, Fassade und Dach sowie durch Isolation der Gebäudehülle (gepunktet - thermische Leitfähigkeit der Fassaden und Dächer herabsetzt von 1,7 bzw. 1,4 auf 0,1 W/mK, Reduktion der Wärmekapazität von 1520000 bzw. 1554000 auf 1496000 J/m³K) auf den UTCI eines West-Ost orientierten Straßencanyons mit HW1 für den 19+20.6.2017.....	60
Abbildung 37: Reduktion der Lufttemperatur aufgrund Albedoerhöhung im Canyon (Boden und Wand) in Straßensituationen mit HW Verhältnis (19.6.2017) für West-Ost.....	61
Abbildung 38: Erhöhung des UTCI aufgrund Albedoerhöhung im Canyon (Boden und Wand) in Straßensituationen mit HW1 Verhältnis (19.6.2017) für West-Ost (durchgezogen) und Nord-Süd (gepunktet).....	61
Abbildung 39: Reduktion des Lufttemperatur und Anstieg des UTCI im Tagesmaximum, Mittel über 10:30-11:30 UTC (UT11) und Mittel über 13:30-14:30 UTC (UT14) in einer Straßensituation mit HW1 Verhältnis (19.6.2017) für West-Ost (Kreise und Kreuze) und Nord-Süd orientierte Fassaden (Quadrate und Sterne).....	62
Abbildung 40: Reduktion der Lufttemperatur durch Verwendung von PV am Dach, an der Fassade und in Kombination mit hellem Beton in Stadtsituation mit HW0.2 (19+20.6.2017).	63
Abbildung 41: Reduktion der Lufttemperatur durch Verwendung von PV am Dach, an der Fassade und in Kombination mit hellem Beton in Straßensituation mit HW1 (19+20.6.2017).....	63
Abbildung 42: Reduktion des UTCI durch die Verwendung von PV am Dach oder an der Fassade, Erhöhung des UTCI bei Kombination von PV Fassade mit hellem Beton für Stadtsituation mit HW0.2 (19+20.6.2017).....	64
Abbildung 43: Reduktion des UTCI durch die Verwendung von PV am Dach oder an der Fassade, Erhöhung des UTCI bei Kombination von PV Fassade mit hellem Beton für Stadtsituation mit HW1 (19+20.6.2017).....	64

Abbildung 44: Änderung des UTCI bei Asphalt durch die Verwendung von niedriger (Wiese) und Starke Reduktion des UTCI bei hoher Vegetation (Bäume) bei 50% Bebauung für West-Ost orientierte Straßen (19+20.6.2017). .....	65
Abbildung 45: Reduktion der Lufttemperatur durch Erhöhung der Albedos von Boden, Fassaden und Wänden im Winter für einen West-Ost orientierten Straßencanyon mit HW1 (30+31.12.2016). .....	65
Abbildung 46: 2-dimensionale Darstellung der mit SOLWEIG berechneten Lufttemperatur mit 4 Gebäuden welche die Kreuzung und somit einen Straßencanyon darstellen. Der grüne Punkt markiert den sonnenbeschienenen Standort, der rote den beschatteten Standort. ....	66
Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur am sonnenbeschienenen Standort in der Kreuzung für die Konfigurationen Asphalt ( $\alpha_g = 0.13$ ) mit normaler Putzfassade ( $\alpha_w = 0.20$ ) in schwarz und Beton ( $\alpha_g = 0.56$ ) mit gebäudeintegrierter Photovoltaikanlage ( $\alpha_{PV} = 0.10$ ). Die Differenz der beiden Temperaturen ist in braun eingezeichnet, zugehörige Achse befindet sich rechts. ....	68
Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der mittleren Strahlungstemperatur am sonnenbeschienenen Standort für die Oberflächenkonfigurationen Asphalt mit normaler Putzfassade (schwarze Linie) und Betonbodenoberfläche mit PV Fassade (violette Linie). Die Differenz der beiden ist in braun dargestellt. ....	69
Abbildung 49: Zeitlicher Verlauf des universalen, thermischen Komforts am sonnenbeschienenen Standort für die Oberflächenkonfigurationen Asphalt mit normaler Putzfassade (schwarze Linie) und Beton mit PV Fassade (violette Linie). Die Differenz der beiden ist in braun dargestellt. ....	69
Abbildung 51: Zeitlicher Verlauf des UTCI für alle Oberflächenkonfigurationen am sonnenbeschienenen Standort. ....	70
Abbildung 51: Zeitlicher Verlauf des UTCI für alle Oberflächenkonfigurationen an einem teilweise beschatteten Standort. Die starken Schwankungen werden durch Reflexionen an den Fassaden hervorgerufen. ....	71
Abbildung 52: 2-dimensionale Differenzdarstellung der mittleren Strahlungstemperatur im Straßencanyon der Oberflächenkonfiguration Asphalt mit PV (links oben), Beton mit PV (rechts oben), Beton und Asphalt kombiniert mit PV (links unten) und Beton mit heller Fassade (rechts unten) zur Referenz Asphalt mit normalen Putz am 20. Juni 2017 um 11 UTC. Die farbigen Ellipsen sind im Fließtext beschrieben. ....	72
Abbildung 53: 2-dimensionale Differenzdarstellung des universalen, thermischen Komforts im Straßencanyon der Oberflächenkonfiguration Asphalt mit PV (links oben), Beton mit PV (rechts oben), Beton und Asphalt kombiniert mit PV (links unten) und Beton mit heller Fassade (rechts unten) zur Referenz Asphalt mit normalen Putz am 20. Juni 2017 um 11 UTC. Die farbigen Ellipsen sind im Fließtext beschrieben. ....	73
Abbildung 54: Box-whisker Differenzdarstellung der einzelnen Oberflächenkonfigurationen zur Referenzkonfiguration (Asphalt und normaler Putz) an sonnenbeschienener Stelle an den Tagen 19. und 20. Juni 2017 zwischen den Zeitpunkten 10:30 und 11:30 UTC (linke Spalte) und den Zeitpunkten 13:30 und 14:30 UTC (rechte Spalte). ....	73
Abbildung 55: Box-whisker Differenzdarstellung der einzelnen Oberflächenkonfigurationen zur Referenzkonfiguration (Asphalt und normaler Putz) an beschatteter Stelle an den Tagen	

19. und 20. Juni 2017 zwischen den Zeitpunkten 10:30 und 11:30 UTC (linke Spalte) und den Zeitpunkten 13:30 und 14:30 UTC (rechte Spalte).....	74
Abbildung 56: Reflexion der Sonne an Glasfassade: Potentielle Blendung an Innenjalousien statt an Photovoltaikmodulen. (Foto: AIT).....	77
Abbildung 58: Box-whisker Differenzendarstellung der Lufttemperatur (obere Reihe) sowie des UTCIs (untere Reihe) von der Konfiguration Asphalt mit PV Fassade (coral) und Beton mit PV Fassade (cyan) zur Referenzkonfiguration (Asphalt mit Putzfassade) für die Sonnenposition im Straßencanyon zu den Zeiten 12, 13 und 14 UTC. Der Farbverlauf von links nach rechts beschreibt die Art der Vegetation im Canyon (hell heißt keine Vegetation, mittel heißt nur Wiese und dunkel mit Bäumen und96	
Abbildung 58: Wie Abbildung 47 nur für den Platz.....	97

## 5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modellparameter im PV-Ertrags Modell für die Zelltechnologien c-Si, CdTe und CI(G)S.....	25
Tabelle 2: Albedowerte ausgewählter Materialien nach (Matzarakis 2001, Fezer 1995, Nefzger and Karipot 1997) .....	30
Tabelle 3: Rezepturen der hergestellten Probekörper.....	31
Tabelle 4: Hergestellte Probekörper sowie Anwendungsmöglichkeiten im urbanen Raum ...	32
Tabelle 5: Daten mit minimaler, maximaler Lufttemperatur sowie Globalstrahlung am Sonnenzenit für Szenarientage .....	34
Tabelle 6: Städtebauliche Szenarien .....	36
Tabelle 7: Szenarien unter Berücksichtigung der Albedo von Dachflächen; Simulation mit TEB.....	37
Tabelle 8: Albedo für unterschiedliche Wellenlängenbereiche Gehweg normal (MV1_02) und hell (MV2_01) und Straßenbetonsorten mit Besenstrich normal (MV3_01) und hell (MV4_01) und mit Waschbetonstruktur normal (MV3_03) und hell (MV4_03) gemittelt aus den Messungen.....	41
Tabelle 9: Bestrahlungsstärke (I) und reflektierte Strahlung (MV#) für unterschiedliche Wellenlängenbereiche für Gehweg normal (MV1_02) und hell (MV2_01) und Straßenbetonsorten mit Besenstrich normal (MV3_01) und hell (MV4_01) und mit Waschbetonstruktur normal (MV3_03) und hell (MV4_03) berechnet aus normierten Strahlungsbedingungen (ICENorm 60904-3).....	42
Tabelle 10: Vergleich der gemessenen Einstrahlung mit der simulierten Einstrahlung. Messung am 26.08.2016.....	49
Tabelle 11: Simulierter Photovoltaik-Ertrag [kWh/kWp] über ein Jahr für ausgewählte Wandorientierungen für einen offenen Platz. Vergleich mit optimal orientiertes System nach PVGIS. (Revesz et al., 2017).....	55
Tabelle 12: Übersicht der wichtigsten Größen der Wärmebelastung für eine Auswahl an Oberflächenkonfigurationen für den 20.Juni 2017, städtebauliche Sitation HW=1, West-Ost orientiert. ....	75

Tabelle 13: Umrechnung der Einstrahlung (I) und reflektierte Strahlung ausgehend von Betonsorten für Gehweg normal (MV1\_02) und hell (MV2\_01) und Straßen mit Besenstrich normal (MV3\_01) und hell (MV4\_01) und mit Waschbetonstruktur normal (MV3\_03) und hell (MV4\_03) berechnet aus normierten Strahlungsbedingungen (ICE Norm 60904-3) in Leuchtdichte L .....77

### 5.3 Literaturverzeichnis

Arya S.P.: Introduction to Micrometeorology, Academic Press, San Diego, 2001

Boone, A. et al. 2017: The interactions between soil–biosphere–atmosphere land surface model with a multi-energy balance (ISBA-MEB) option in SURFEXv8 – Part 1: Model description, *Geosci. Model Dev.*, 10, 843-872.

Bröde P. et al.: Assessment of urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI, XIV International Conference on Environmental Ergonomics, Greece 2011.

Callegaro, L., Ciobotaru, M., Agelidis, V. 'Analysis and Comparison of Electrical PV Modeling Techniques Based on Datasheet Values'. In: Proc. 31st Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. and Exhib., Hamburg, 2015. S. 2006 – 2011.

ClimateCHIP (2016): URL: <http://www.climatechip.org>, (Stand: 22.1.2018)

Fezer, F.: Das Klima der Städte, Perthes Geographie Verlag, Gotha, 1995

Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., and Dunlop E. D. 2015: Solar cell efficiency tables (Version 45), *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **23**, (1), 1–9, doi: 10.1002/pip.2573.

Huld, T., Gottschalg, R., Beyer, H.G., Topič, M.: 'Mapping the performance of PV modules, effects of module type and data averaging' *Solar Energy*, 2010, **84**, (2), S. 324 – 338.

Huld T., Friesen G., Skoczek A., *et al.*: 'A power-rating model for crystalline silicon PV modules', *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2011, **95**, (12), S. 3359 – 3369

Huld, T., Amillo, A.M.G.: 'Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum' *Energies*, 2015, **8**, (6), S. 5159 – 5181.

KELVIN-Endbericht (Reduktion städtischer Wärmeinseln durch Verbesserung der Abstrahleigenschaften von Gebäuden und Quartieren, Schwaiger H., Bird D.N., Gallaun H., Zuvela-Aloise M., Andre K., *Berichte aus Energie- und Umweltforschung*, 10/2015.

King, D.L., Kratochvil, J.A., Boyson, W.E., Bower, W.I. 'Field Experience With A New Performance Characterization Procedure For Photovoltaic Arrays'. In: Proc. 2nd World Conf. and Exhib. on Photovolt. Sol. Energy Conv., Vienna, 1998. S. 1947 – 1952

King D.L., Boyson W.E., Kratochvil J.A.: 'Photovoltaic Array Performance Model', (Sandia National Laboratories, 2004), Report SAND2004-3535

Krispel, S., Peyerl, M., Weihs, P., Maier, G.: Reduction of Urban Heat Islands with Whitetopping. *BAUPHYSIK*, 39(1): 33-39. 2017.

Lindberg F., Jonsson P., Honjo T., et al.: 'Solar energy on building envelopes - 3D modelling in a 2D environment', *Solar Energy*. 2015, **115**, S. 369 – 378.

Lindberg F., Grimmond C.S.B.: SOLWEIG Manual V2016a, <http://urban-climate.net/umep/SOLWEIG> Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Sweden, University of Reading, UK, 2016.

Lindberg F., Grimmond C.S.B., Gabey A., et al.: 'Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) - An integrated tool for city-based climate services', *Environmental Modelling and Software*, 2017, **99**, S. 70 – 87

Lodi C. et al.: Modelling the heat dynamics of a monitored Test Reference Environment for Building Integrated Photovoltaic systems using stochastic differential equations, *Energy and Buildings*, S. 273 – 281, 2012.

Masson, V.: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3), 357–397, 2000

Masson, V., Bonhomme M., Salagnac J-L., Briollet, X., Lemonsu, A.: Solar panel reduce both global warming and urban heat island, *Frontiers in Environmental Science*, 2014.

Matzarakis, A.: Die thermische Komponente des Stadtklimas, Habilitation an der Universität Freiburg, Freiburg 2001

Mooshammer H.: Medizinische Beurteilungsgrundlagen der Passiven Blendung , 2013.

Mooshammer H.: Medizinische Beurteilung von Lichtmissionen, 123.Amtsärztliche Fortbildungsveranstaltung, Bundesministerium für Gesundheit und Land Kärnten – Sanitätsdirektion, 4. - 5.Mai 2015, Pörschach, <https://www.ktn.gv.at/>, 2015.

Nefzger, H., Karipot A.: Einfluß von Strahlung und Mikroklima auf Straßenwetterprognosen, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien 1997

Peyerl, M.; Krispel. S.; Weihs, P.; Maier, G.: Stadtverkehrsflächen – Optimierter Beton für den innerstädtischen Bereich, update 44, 2016

Revesz M., Oswald S., Trimmel H., Schneider A., Weihs P., Zamini S., Peyerl M., Krispel S. et al.: 'PVOPTI-Ray: Optimisation of Reflecting Materials and Photovoltaic Yield in an Urban Context', *Conf. Proc. of 33rd EU PVSEC*, 2017, S. 2130 – 2134.

Ransome, S., Hansen, C.W., King, B.H.: Outdoor PV Performance Evaluation of Three Different Models: Single-Diode, SAPM and Loss Factor Model. In: *Proc. 28th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. and Exhib.*, Paris, S. 2865 – 2871, 2013.

Röckel R.: Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen, Dissertation, 1990.

Ruesch, F., Bohren, A., Battaglia, M., Brunold, S.: Quantification of Glare from Reflected Sunlight of Solar Installations, *Energy Procedia*, 91, S. 997–1004, 2016.

Schneider, A.: *Solararchitektur für Europa*. Birkhäuser Verlag, Basel, 207 Seiten, 1996.

Sellner, S., Sutterlueti, J., Ransome, S., Schreier, L., Allet, N. 'Understanding PV Module Performance: Further Validation of the Novel Loss Factors Model and Its Extension to AC Arrays'. In: *Proc. 27th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. and Exhib.*, Frankfurt, S. 3199 – 3204, 2012.

Sutterlueti, J., Ransome, S., Kravets, R., Schreier, L.: Characterising PV Modules Under Outdoor Conditions: What's Most Important for Energy Yield. In: *Proc. 26th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. and Exhib.*, Hamburg, S. 3608 – 3614, 2011.

Taha, H.: The potential for air temperature impact from large scale deployment of solar photovoltaic arrays in urban areas. *Solar Energ.* 91, 358–367. doi: 10.1016/j.solener.2012.09.014, 2013.

Wienold, J. and Christoffersen, J.: Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings*, 38(7), 743-757, 2006

## 6 Akronyme

EMS ..... Environmental Measuring Systems

GIS..... Geographische InformationsSysteme

MRT ..... Mean Radiant Temperature

PV ..... Photovoltaik

SEBE ..... Solar Energy on Building Envelope

SEBE-PV..... Solar Energy on Building Envelope – Photovoltaik Ertrag (auch SEBEpv)

SOLWEIG ..... SOLar and LongWave Environmental Irradiance Geometry model

STQ..... Status quo

SVF ..... Sky-View-Factor

TEB ..... Town and Energy Balance Modell

UMEP..... Urban Multiscale Environmental Predictor

UTC / UT ..... Coordinated Universal Time

UTCI..... Universal Thermal Climate Index  
  
 $a_{FR}$  ..... Leitfähigkeit zwischen Boden und Luft (force-restore)  
 $G$  ..... spektrale Strahlungsstärke  
 $G_w$  ..... Bestrahlungsstärke auf vertikaler Fläche  
 $H$  ..... Height – Width ratio  
 $K_h$  ..... thermischer Diffusionskoeffizient  
 $K_m$  ..... photometrisches Strahlungsequivalent  
 $L$  ..... Leuchtdichte  
 $MV$  ..... Mischungsverhältnis  
 $S$  ..... Wärmespeicherzahl  
 $T$  ..... Temperatur  
 $T_a$  ..... Lufttemperatur im Straßencanyon  
 $T_w$  ..... Wandtemperatur  
 $T_{sur,PV}$  ..... PV Oberflächentemperatur  
 $V$  ..... spektrale relative Hellempfindlichkeitsgrad  
 $z_g$  ..... Dämpfungstiefe  
  
 $\alpha$  ..... spektrale Albedo  
 $\alpha_g$  ..... Albedo des Bodens  
 $\alpha_w$  ..... Albedo der Wand  
 $\alpha_r$  ..... Albedo des Dachs  
 $\alpha_{PV}$  ..... Albedo des Photovoltaikmoduls  
 $\Delta$  ..... Differenz der jeweiligen Variable  
 $\Lambda$  ..... Wellenlänge  
 $\tau$  ..... Periode der Temperaturwelle  
 $\Omega$  ..... Winkelgeschwindigkeit

## 7 Anhang

### 7.1 Zusätzliche Auswertungen von SOLWEIG

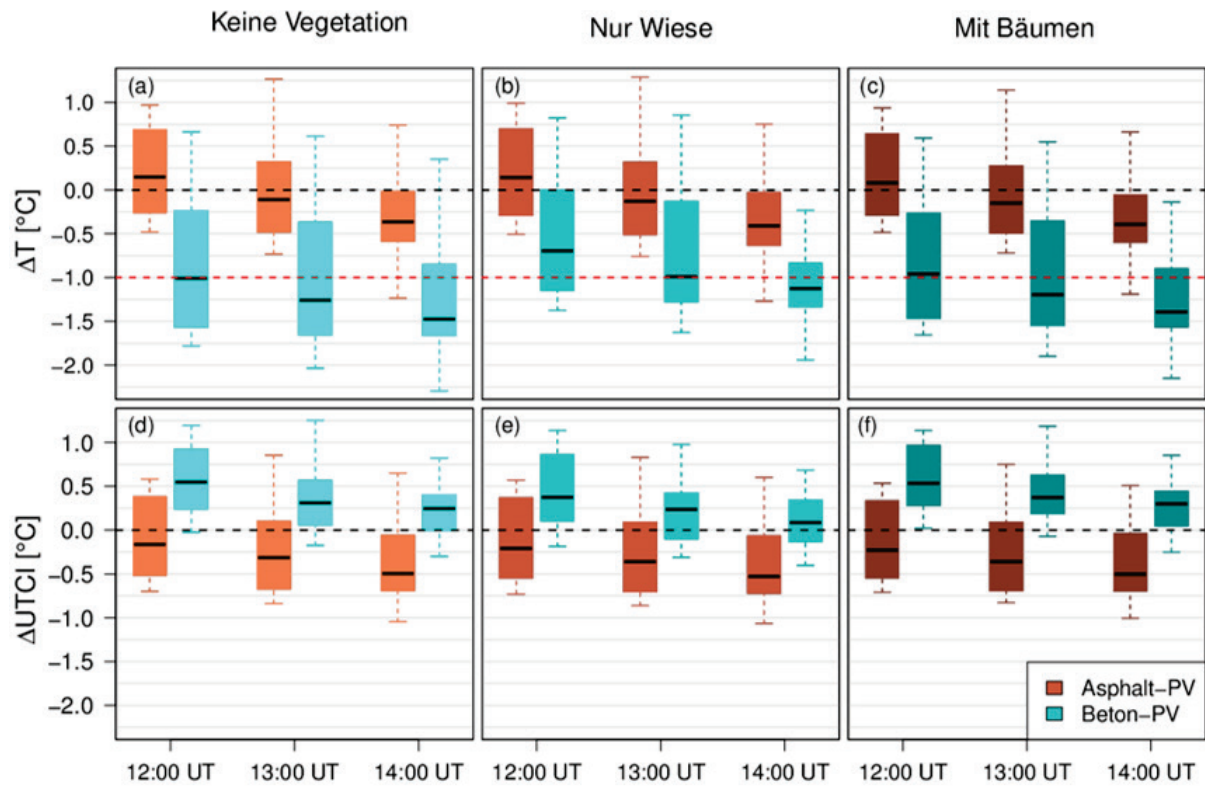


Abbildung 57: Box-whisker Differenzendarstellung der Lufttemperatur (obere Reihe) sowie des UTCIs (untere Reihe) von der Konfiguration Asphalt mit PV Fassade (coral) und Beton mit PV Fassade (cyan) zur Referenzkonfiguration (Asphalt mit Putzfassade) für die Sonnenposition im Straßencanyon zu den Zeiten 12, 13 und 14 UTC. Der Farbverlauf von links nach rechts beschreibt die Art der Vegetation im Canyon (hell heißt keine Vegetation, mittel heißt nur Wiese und dunkel mit Bäumen und Wiese).



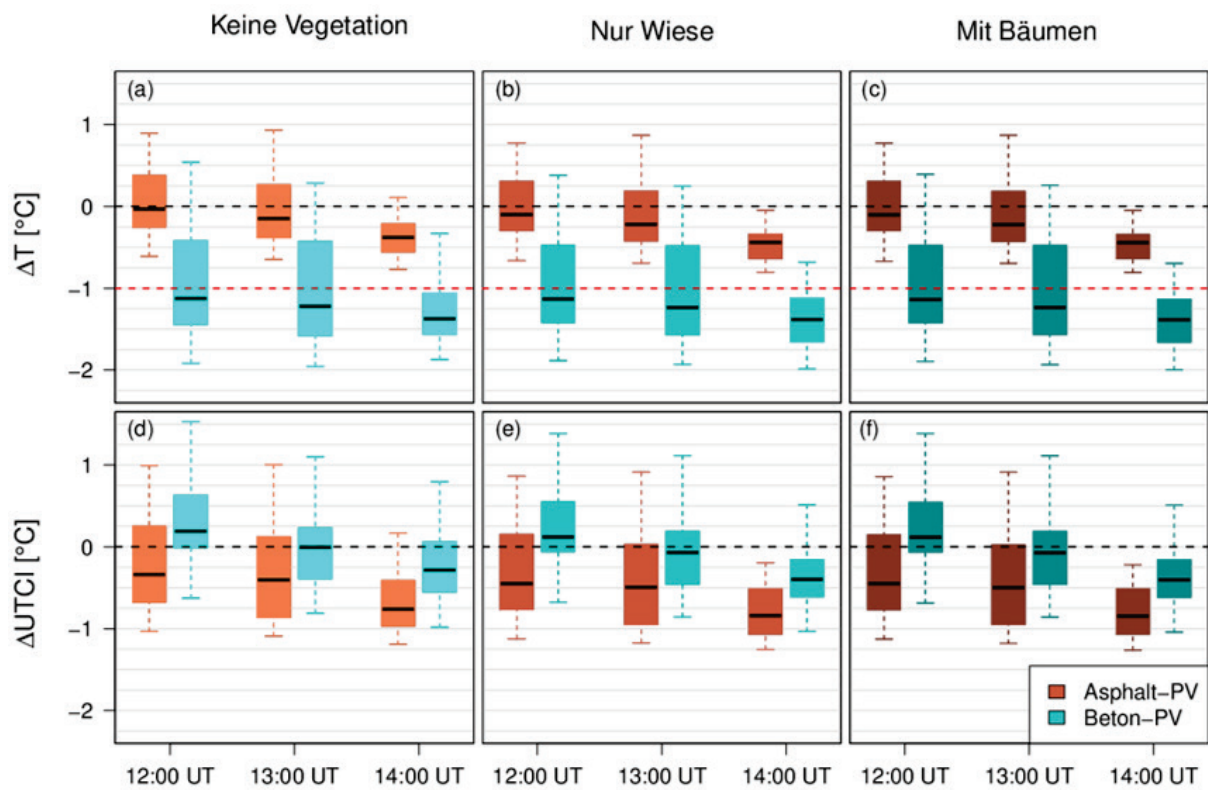


Abbildung 58: Wie Abbildung 47 nur für den Platz

## 7.2 Messkampagne: Effect of increased albedo on BIPV inside urban canyon

# Effect of increased albedo on BIPV inside an Urban Canyon



Universität für Bodenkultur Wien



Michael.Revezs.fl@ait.ac.at

Revezs, M.<sup>1,2</sup>; Oswald, S.<sup>2</sup>; Weihs, Ph.<sup>2</sup>; Zamini S.<sup>1</sup>;

<sup>1</sup>AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Energy Department, Photovoltaic Systems, Vienna, Austria.

<sup>2</sup>BOKU University of Natural Resources and Life Sciences, Inst. of Meteorology, Vienna, Austria

Increasing the ground albedo in urban canyons has a significant impact on the energy yield of vertically mounted PV modules. According to standard methods a fivefold increase of ground albedo results in 30% more irradiation [1]. Studies regarding the effect of albedo on the performance of Photovoltaic (PV) modules have a focus on either the spectral effects of albedo or the effect of snow [2, 3, 4]. The usual assumptions are an unobstructed site and infinitely extended plane [1].

This study investigates the effect of increased ground albedo in an urban canyon on the PV performance. The effect of increased surface albedo in the cities is not only relevant for urban climate. The results about the increase of PV performance are very important for future urban planning. E.g. the city of Vienna not only has plans for increased PV installations inside the city, but also took first actions to foster this plan [5]. The results will be used in the project PVOPTI-ray by AIT, BOKU and Smart Minerals.

For the measurements the albedo of a limited ground surface area was increased from 13% to 77%. The  $I_{sc}$  of three independent vertically and south facing mounted PV panels was measured for both cases. In the cases of surface areas of 14m<sup>2</sup> and 30m<sup>2</sup> the increase of  $I_{sc}$  during noon was 10% and 13%, respectively.



## Measurement setup

For the measurements three PV modules (c-Si, 10Wp) are mounted ~3m above ground (lower edge), vertical tilt and south facing. The module temperature is measured on the backside. Next to the PV modules the horizontal and vertical (in-plane) irradiance are measured using EMS11 silicon diode sensors. Further, wind speed and air temperature are measured.

The albedo of the bitumen surface (low albedo) and painted white polystyrene panels was measured using EMS11 sensors for upper and lower hemisphere located 80cm above ground. At the beginning of the measurement campaign the area of polystyrene was ~14m<sup>2</sup> and was later increased to ~30m<sup>2</sup> for all further measurements. A summary of the measurements is shown in Table 1.

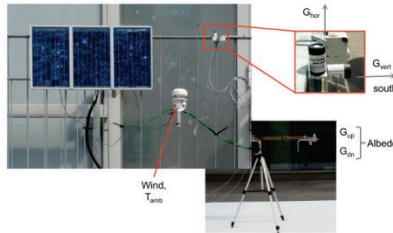


Figure 1: Measurement setup



Figure 2: View from the photovoltaic panels

## Evaluation

- Evaluation of albedo by well known relation:

$$\alpha = \frac{G_{down}}{G_{up}}$$

- Evaluation of gain using the "Performance Ratio" of the Short Circuit Current:

$$PR_{I_{sc}} = \frac{I_{sc}(G, T)}{I_{sc,STC}} \cdot \frac{1000 \text{ Wm}^{-2}}{G_{in-plane}(\alpha_{low})}$$

$$gain = \left( \frac{PR_{I_{sc}}(\alpha_{high})}{PR_{I_{sc}}(\alpha_{low})} - 1 \right) \cdot 100\%$$

- Due to limitations at test-site  $G_{horizontal}$  had to be used for evaluation instead of  $G_{in-plane}$
- The chosen approach is similar to the definition of the "spectrally responsive" albedo  $\alpha_{SR}$  in [2]:

$$\alpha_{SR} = \frac{I_{sc} \cdot \frac{G_{STC}}{G_{total}}}{I_{sc,STC} \cdot \frac{G_{STC}}{G_{total}}}$$

where  $G_{total}$ ,  $I_{total}$  mean the values without the effect of ground reflections caused by the albedo.

## Results

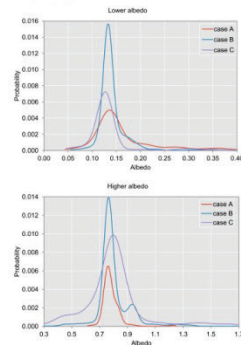


Figure 3: Distribution of the calculated albedo values. Top: lower albedo, bottom: larger albedo

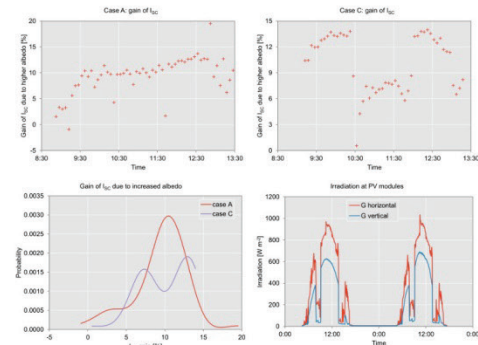


Figure 4: Top: Gain of  $I_{sc}$  for cases A and C using the median of  $PR_{I_{sc}}$  during five minute intervals. Bottom: (left) Distribution of the calculated gain, (right) horizontal and vertical irradiance for 26. and 27.08.2016

Case	Date	Albedo	$I_{sc}$ gain	Comment
A	07.08.2016	0.76	10 % ± 3%	14m <sup>2</sup> white polystyrene
	08.08.2016	0.14	-	bitumen
B	20.-21.08.2016	0.77	? %	Cloudy, evaluation impossible
	22.-23.08.2016	0.13	-	bitumen
C	26.08.2016	0.13	-	bitumen
	27.-28.08.2016	0.80	13 % ± 3%	30m <sup>2</sup> white polystyrene

Table 1: Summary of the measurements, showing for each case the albedo, gain and description

## Conclusion

Increasing the ground albedo in urban canyons has a significant impact on the energy yield of vertically mounted PV modules. Thus, it is a good option for increasing renewable energy production in cities.

- $I_{sc}$  at PV module is increased by ~10 – 13% when ground albedo is increased from 0.13 to 0.78.
- Difficulties with the evaluation of an increase in  $I_{sc}$  arise at cloudy weather due to strong fluctuations of  $I_{sc}$  and G.

## Future aspects

- To be examined: the gain of PV energy output when
  - a complete street has a larger surface albedo.
  - the PV modules are installed ~15m above ground.
- Comparison of measurements with simulations of an urban canyon will be carried out.
- The impact of increased ground reflections and glare from PV on human comfort will be simulated.

## REFERENCES

- [1] Häberlin, H., „Photovoltaik - Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen,“ VDE Verlag (2007).
- [2] Andrews, R. W., and Pearce, J. M., „The effect of spectral albedo on amorphous silicon and crystalline silicon solar photovoltaic device performance,“ Sol. Energy, 91, pp. 233–241 (2013).
- [3] Andrews, R. W., and Pearce, J. M., „Prediction of energy effects on photovoltaic systems due to snowfall events,“ 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 3386–3391 (2012).
- [4] Brennan, M. P., Abramase, A. L., Andrews, R. W., and Pearce, J. M., „Effects of spectral albedo on solar photovoltaic devices,“ Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 124, pp. 111–116 (2014).
- [5] Dvorak E., „PV im dichtverbauten Gebiet - Treiber und Hemmnisse aus Sicht der Stadt Wien,“ Workshop in framework of Shape-PV (June 2016).

The research leading to these results has received funding from the energy research programme (Stadt der Zukunft 3. Ausschreibung 2015) under grant agreement number 854691.

