

# Reduktion städtischer Wärmeinseln durch Verbesserung der Abstrahl- eigenschaften von Gebäuden und Quartieren

KELVIN

H. Schwaiger, D. Neil Bird,  
H. Gallaun, M. Zuvela-Aloise,  
K. Andre

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**29/2018**

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

### **Impressum**

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

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

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

# Reduktion städtischer Wärmeinseln durch Verbesserung der Abstrahleigenschaften von Gebäuden und Quartieren

KELVIN

DI Dr. Hannes Schwaiger, David Neil Bird, MSc  
JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH /  
RESOURCES - Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit

DI Heinz Gallaun  
DIGITAL - Institut für Digitale Bildverarbeitung

DI Dr. Maja Zuvela-Aloise, Konrad Andre  
ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Graz, September 2015

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorbemerkung

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.NachhaltigWirtschaften.at](http://www.NachhaltigWirtschaften.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.....	13
2	Stand der Technik .....	14
2.1	Literaturrecherche zum Stand der Technik hinsichtlich der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Eindämmung städtischer Wärmeinseln bzw. Diskussion zu Fragen der Akzeptanz von diesbezüglichen Veränderungen in österreichischen Städten .....	14
2.2	Erhebung der Dachflächentypen aus dem Luftbild und Oberflächenalbedo aus Satellitenbild-Zeitreihen .....	17
2.3	Stadtklimatologische Simulationen zur Vermeidung der Hitzebelastung .....	18
2.4	Energieeinsparung und direkte Beiträge zum Klimaschutz durch Maßnahmen zur Vermeidung städtischer Wärmeinseln.....	19
3	Verwendete Methoden.....	22
3.1	Erhebung der Dachflächentypen und der Oberflächenalbedo aus Fernerkundungsdaten.....	22
3.1.1	Erhebung der Dachflächentypen von Wien.....	22
3.1.2	Vorverarbeitung der MODIS Satellitenbildzeitreihen.....	22
3.1.3	Vorverarbeitung der Landsat Satellitenaufnahmen .....	22
3.1.4	Filterung der MODIS-Satellitenbildzeitreihen .....	23
3.1.5	Kalibrierung der Landsat Satellitenaufnahmen .....	23
3.1.6	Ableitung der Albedo .....	23
3.2	Stadtklimatologische Simulationen zur Vermeidung der Hitzebelastung .....	25
3.2.1	Methode .....	25
3.2.2	Modell .....	26
3.2.3	Zeitliche Auflösung .....	26
3.2.4	Modellgebiet, räumliche Auflösung, unaufgelöste Bebauung.....	26
3.2.5	Anfangs-, Randbedingungen, simulierte Zustände .....	26
3.2.6	Quader(Cuboid)-Methode, Klimaindizes .....	27
3.2.7	Orographie, Landnutzung (LN) .....	28
3.2.8	Landnutzungsparameter.....	29
3.3	Energieeinsparung und Beiträge zum Klimaschutz durch Maßnahmen zur Vermeidung städtischer Wärmeinseln.....	30
3.3.1	Direkte Klimaschutzmaßnahme – Reduktion des Strahlungsantriebes .....	30
3.3.2	Indirekter Klimaschutzeffekt – Reduktion des Strombedarfs .....	33
4	Ergebnisse .....	37

4.1	Ergebnisse der Literaturrecherche hinsichtlich der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Eindämmung städtischer Wärmeinseln .....	37
4.1.1	Parks und Grünflächen.....	37
4.1.2	Bäume und Vegetation.....	38
4.1.3	Dachbegrünung.....	39
4.1.4	Fassadenbegrünung .....	39
4.1.5	Albedoänderung von Dachflächen und Fassaden .....	40
4.1.6	Albedoänderung versiegelter, anderer horizontaler Flächen.....	42
4.1.7	Zusammenhang von UHIs und dem Stromverbrauch in Städten .....	43
4.2	Erhebung der Dachflächentypen und der Oberflächenalbedo aus Fernerkundungsdaten.....	45
4.2.1	Erhebung der Dachflächentypen von Wien.....	45
4.2.2	Oberflächenalbedo aus Satellitenbild-Zeitreihen.....	47
4.3	Stadtklimatologische Simulationen zur Vermeidung der Hitzebelastung .....	48
4.3.1	Referenzsimulation.....	48
4.3.2	Simulationsergebnisse .....	50
4.4	Energieeinsparung und Beiträge zum Klimawandel durch Maßnahmen zur Vermeidung städtischer Wärmeinseln.....	67
4.4.1	Direkte Vermeidungsstrategie des Klimawandels – Reduktion des Strahlungsantriebes .....	67
4.4.2	Indirekter Klimaschutzeffekt – Reduktion des Strombedarfs.....	68
4.4.3	Diskussion der Ergebnisse hinsichtlich der zu erwartenden Energieeinsparung und der Beiträge zum Klimawandel.....	70
5	Schlussfolgerungen .....	74
6	Ausblick und Empfehlungen .....	76
7	Verzeichnisse .....	78
7.1	Abbildungsverzeichnis .....	78
7.2	Tabellenverzeichnis .....	80
7.3	Literaturverzeichnis.....	82

## Abkürzungen

ALADIN	Numerical weather prediction model: Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Development International
BEM	Building Energy Model
BEP	Building Effect Parameterization
COSMO-CLM	Consortium for Small-scale Modeling Climate Limited-area Modelling - Numerical climate model
DWD	Deutscher Wetterdienst
HT	Hitzetage ( $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ )
ISBA	Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere
LN	Landnutzung
MESZ	Mitteuropäischen Sommerzeit
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MUKLIMO_3	Mikroskaliges, Urbanes KLImaMOdell, 3-dimensional
UHI	Urban Heat Island
PV	Photovoltaik
ST	Sommertage ( $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ )
TEB	Town Energy Balance
THG	Treibhausgas
$T_{\max}$	Temperaturmaximum
$T_{\min}$	Temperaturminimum
TOA	Top Of the Atmosphere
USGS	U.S. Geological Survey
WHW	Wien Hohe Warte
WIS	Wien Innere Stadt
WRF	Weather Research and Forecasting model
WUDAPT	World Urban Database and Access Portal Tools
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik



# Kurzfassung

## Ausgangssituation/Motivation

In städtischen Gebieten wird die eingestrahelte solare Energiemenge stärker als in land- und forstwirtschaftlichen Flächen absorbiert und auch länger gespeichert. Grund dafür sind einerseits die Art, aber auch Farbgebung der vorhandenen Oberflächen wie Hausdächer, Straßen, Abstellflächen für Autos und sonstige verbaute Flächen und andererseits die höhere Wärmespeicherkapazität der vorhandenen Materialien (Absorptions- und Emissionspotential). Die dabei entstehende Problematik der sogenannten „städtischen Wärmeinsel“ (englisch „Urban Heat Island - UHI“) gilt auch als Anreiz für verschiedene städtebauliche Maßnahmen wie z.B. Fassadenbegrünungen, Dachbegrünungen, Ausbau von Park- und Rasenflächen etc. . Das Phänomen des UHI und die innerstädtische Gebäudestruktur verstärken einerseits den Energieverbrauch und andererseits auch den Klimawandel durch:

- a) eine stärkere Erwärmung urbaner Flächen vor allem in den Sommermonaten mit einhergehendem stärkerem, zum Teil fossil erzeugtem Stromverbrauch für Raumkühlung von Wohnungen, Bürogebäuden, Häusern etc. und damit auch einhergehendem höheren THG Emissionen, sowie
- b) einen negativen Einfluss auf die städtische Strahlungsbilanz und damit einhergehendem negativen Beitrag zum Klimawandel infolge der erhöhten Energieabsorption (geringerem Rückstrahlpotential) bzw. damit verbundenem Klimaerwärmungspotential.

Die Gebäudekühlung hat in den letzten Jahren in Österreich stark zugenommen, wobei erwartet wird, dass mit dem Klimawandel und sich entwickelnden Stadterweiterungen der Energieaufwand für Raumkühlung- bzw. Belüftung weiter steigen wird. Eine erhöhte Intensität oder Häufigkeit von Hitzewellen in den Sommermonaten könnte dabei weitreichende Folgen in Hinblick auf Stadtklima, Energieeinsatz, Gesundheit und Lebensqualität in den Städten nach sich ziehen.

## Inhalte und Zielsetzungen

Das diesem Sondierungsprojekt zugrunde liegende Ziel, unterschiedliche Konzepte zur Reduktion städtischer Wärmeinseln zu untersuchen und die dadurch zu erwartenden Folgewirkungen in Bezug auf ein kühleres Stadtmikroklima und die Energieeinsparung durch geringeren Stromverbrauch abzuschätzen, wurde erreicht. Im Speziellen wurden die Auswirkungen der Abstrahleigenschaftsänderungen unterschiedlicher Flächen wie Dächer, Straßen, Parkflächen, aber auch der Einfluss von Gründächern eingehend untersucht und im Anschluss das Ergebnis in Form von Energieeinsparungs- und Emissionsreduktionsberechnungen für die Stadt Wien quantifiziert.

## Methodische Vorgehensweise

Für eine erste Einschätzung des Potentials zur Vermeidung städtischer Wärmeinseln in Österreich wurde eine Literaturrecherche sowie Analyse von Projektberichten zu diesem Thema durchgeführt. Darüber hinaus wurden durch Gespräche und Befragungen mit österreichischen Interessensvertretern (Dachziegelhersteller, Stadtplaner, Regierungsvertreter etc.) Fragen der Dringlichkeit und Akzeptanz solcher Maßnahmen geklärt. Parallel dazu wurden - basierend auf hochaufgelösten Topographie- und Landnutzungsdaten - die erforderlichen Referenzwerte der Albedo (Rückstrahlvermögen der Oberflächen) des baulichen Bestands flächendeckend für die Region Wien aus Satellitendaten des Zeitraums 2000-2014 erhoben. Anschließend erfolgte mittels mikroklimatischer Simulation eine quantitative Abschätzung einer möglichen Abschwächung des Auftretens städtischer Wärmeinseln durch die Veränderung der Oberflächenalbedo unterschiedlicher Stadtstrukturen (Boden, Dachflächen, Dachbegrünung etc.). Letztlich wurde sowohl das dadurch zu erwartende Stromeinsparungspotential durch verringerten Kühlbedarf, als auch die damit einhergehende Emissionsreduktion an Treibhausgasen abgeschätzt.

## Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Projektergebnisse zeigen, dass eine flächendeckende Anwendung hochreflektierender Dachdeckungen in Wien mit einem Rückstrahlvermögen von ca. 70% in Kombination mit der Annahme einer vollen Umsetzung des vorhandenen Gründachpotentials zu einer starken Abnahme der Anzahl an Hitzetagen ( $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) führen kann. Basierend auf den Werten der Klimanormalperiode 1981 bis 2010 ergibt sich für die Innere Stadt eine maximale Reduktion der Anzahl der Hitzetage um 29% und in zentrumsferneren Bereichen bis zu 20%. Fügt man nun zusätzlich hochreflektierende Gebäudefassaden und versiegelte Flächen den Modellberechnungen als „theoretisches Gesamtpotential“ hinzu, so könnten maximale Reduktionen von Hitzetagen in Bereichen wie der Hohen Warte bis zu 45% und um bis zu 53% für die Wiener Innenstadt erreicht werden. Diese Prozentzahlen bedeuten umgerechnet auf die Stadt Wien ein Stromeinsparungspotential - bei gleichbleibender derzeitiger Kühlleistung - von 5.000 – 20.000 MWh pro Jahr. Damit könnten zwischen 600 und 2000 tCO<sub>2</sub> Äquivalente an Treibhausgasemissionen eingespart werden. Allerdings ergibt sich durch die Berücksichtigung des direkten Effekts (höheres Rückstrahlvermögen der eingehenden Globalstrahlung von städtischen Strukturen) ein noch höheres Reduktionspotential an Klimaerwärmung ausgedrückt in THG Emissionseinheiten, nämlich zusätzlich ca. 75.000 t CO<sub>2</sub>/Jahr. Effekte hinsichtlich des Humankomforts und andere positive Aspekte durch die geringere Hitzebelastung sind ebenfalls zu berücksichtigen.

## Ausblick

Als weitere F&E Aktivitäten ist die Einreichung eines Folgeprojektes im Rahmen des Programms „Stadt der Zukunft“ bzw. SMART CITIES Demo geplant. Hierzu wird im Programm „Stadt der Zukunft“ besonderes Augenmerk auf die praktische Umsetzung der Projektergebnisse gelegt. Demnach könnte eine standardisierte Methode zur Modellierung

von UHI implementiert werden, die auf Basis von standardisiert vorliegenden Landnutzungsdaten und frei verfügbaren Satellitenbildzeitreihen eine sehr kostengünstige Übertragung der Modellierung auf weitere Städte ermöglicht. Für das Programm SMART CITIES Demo sind Umsetzungsmaßnahmen als tatsächliche Fallbeispiele (Messungen an eingerichteten Dachflächen mit höherer Albedo bzw. Dachbegrünungen, Bepflanzungen von Fußgängerzonen etc.) in ausgewählten Österreichischen Städten geplant.

Auch eine industrielle Umsetzung der Arbeiten könnte in die Richtung gehen, dass mögliche Oberflächenbeschichtungen für Dachziegel gefunden werden, die den Kriterien des höheren Reflexionsvermögens bei gleichbleibender Farbgebung gerecht werden.

Zusätzliche Einreichungen zum Thema Eindämmung Städtischer Wärmeinseln in anderen Städten (Mikroklimatisch sind starke Differenzen zu erwarten), „Urban Forestry“ bzw. Auswirkung von Dach- und Fassadenbegrünungen in punkto „Transpiration und Abkühlung durch Verdunstungseffekte von Pflanzen“, positiver Einfluss von Gründächern auf die Feinstaubabscheidung in Städten, und die „Beschattung von Geschäftsstraßen und deren Einfluss auf das Kaufverhalten von Passanten“ sind ebenfalls angedacht.

Abschließend sei noch erwähnt, das sich zukünftige Forschungsvorhaben auch in Richtung der Programme des „EU Horizon 2020“ zur Demonstration innovativer, ökologischer Lösungsansätze von Maßnahmen in städtischen Gebieten richten werden.

# **Abstract**

## **Starting point/Motivation**

Solar energy is absorbed and stored more in urban areas than in rural landscapes. This is mainly due to the colour and aspect of urban surfaces such as rooftops, streets, parking spaces for cars and other built-up areas and the higher heat storage capacity of urban materials as compared to the texture of the rural landscape. The mitigation of the problem that results, the urban heat island (UHI), is the driver for various urban development measures such as greening of façades and roofs, tree planting on roadways and the expansion of parks and lawns. Climate change is modelled to worsen UHIs and, at the same time, the urban texture is thought to exacerbate climate change (positive-feedback) since:

- (a) increased warming of urban areas especially in the summer months will increase the demand for space cooling of apartments, office buildings and houses. The electrical energy required for this partly comes from fossil fuel fired power plants and hence causes greenhouse gas emissions (GHGs) indirectly; and
- (b) increased albedo of urban areas as compared to rural areas also increases the solar energy absorption and is equivalent to a GHG emission warming potential.

Air conditioning use has increased in recent years in Austria and the energy demand for space cooling and ventilation is expected to grow strongly with climate change. The increased intensity and frequency of heat waves in the summer months could thereby have far-reaching consequences in terms of the climate, energy consumption, health and quality of life in cities.

## **Contents and Objectives**

The aim of this exploratory project was to investigate different concepts for reducing urban heat islands (UHIs), and to assess the energy and greenhouse gas emissions savings that may result from a cooler city microclimate. In particular, the impacts of modifying the albedo of roofs, roads, parking areas, and green roofs on the microclimate of the City of Vienna were modelled and the potential reduction in energy use and GHGs were estimated.

## **Methods**

A literature review was used as an initial assessment of the potential to reduce the urban heat island. This was followed by interviews of Austrian stakeholders (roof tile manufacturers, city planners, government officials, etc.) in which the acceptance of identified strategies was discussed. In parallel, the values of the albedo (surface reflectivity) for the building stock for Vienna were estimated from satellite data from 2000 to 2014. These values were used as input to model the impacts of high albedo and “green” roofs on the UHI. The results of the microclimate modelling exercise were used to estimate the energy savings, and GHGs.

## Results

The project found that a comprehensive application of highly reflective roof (albedo = 70%) in combination with the full implementation of green roofs on potential roofs can lead to a strong decrease in the number of hot days (days with  $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ). In comparison to the period 1981 – 2010, the number of hot days in the inner city and near inner-city may be reduced by up to 29% and 20% respectively. Model calculations show that a "theoretical maximum potential" can be achieved by including highly reflective facades on buildings and paved-over surfaces. In this case, the number of hot days in areas such as Hohe Warte may be reduced by up to 45% and in the inner city by up to 53%. This leads to an electricity saving potential of 5,000 - 20,000 MWh per year - at current cooling capacity which, indirectly, decreases GHGs by 600 – 2,000 t CO<sub>2</sub> /year. However, there is a greater reduction in equivalent GHGs directly due to the decrease in radiative forcing caused by changing the roof albedo. The decreased radiative forcing is comparable to additional savings of around 75,000 t CO<sub>2</sub> / year. Additional effects regarding human comfort and other positive aspects in terms of human health should be considered as well.

## Prospects / suggestions for future research

There are many areas for future research including:

1. The practical implementation of the project results;
2. The implement of a standardized method for modelling of UHI and conversion to energy and GHG savings to other cities;
3. The identification of development of materials that increase albedo but fit within the constraints of Austrian architecture and building codes (e.g. red-tile roofs); and
4. The forecast of the impacts and benefits of modifying the urban landscape in future climates.

These research topics could be addressed in follow-up projects funded within the FFG research programmes. For example in the programme "City of the future" or SMART CITIES demo actual case examples (measurements on decorated roof surfaces with high albedo or roofs, plantings of pedestrian zones etc.) in selected Austrian cities are planned (points 1 & 2 above). For point 3 an industrial application may be the development of innovative materials or coatings which improve the optical reflectivity of roof tiles. For example, a possible surface treatment for clay roof tiles may be identified that meets the criteria of higher reflectivity without changing the tile colour.

Additional submissions on the topic of reducing UHI in other cities using "urban forestry", green roofs and facades are envisaged. These investigations should not only be assessed to show possible advantages of the evapotranspiration from trees and plants to provide additional cooling, but also the possible positive influence of green roofs on the air quality (i.e. particulates collection) in cities, and the shading of shopping streets that may also have a positive impact on the purchasing behaviour of consumers. Finally, future research could take advantage of a call in the EU Horizon 2020 programme for demonstrating innovative nature-based solutions in cities.

# 1 Einleitung

Mit Fortschreiten der Industrialisierung sind weltweit deutliche Veränderungen des Klimas zu beobachten. Die Temperatur ist im Zeitraum seit 1880 im globalen Mittel um fast 1 °C gestiegen, wobei in Österreich die Erwärmung nahezu 2 °C beträgt (APCC, 2014). In diesem Jahrhundert ist davon auszugehen, dass Temperaturextreme, z.B. die Anzahl der heißen Tage, deutlich zunehmen werden. Nach Modellberechnungen erhöht sich in Österreich die Temperatur während den Hitzeperioden im Sommer bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um 4 °C. Die Häufigkeit des Auftretens von Hitzewellen wird dabei von rund fünf auf etwa 15 pro Jahr am Ende des Jahrhunderts ansteigen. An den zwei heißesten Wiener Messstationen ergibt sich ein Anstieg der Hitzetage von derzeit rund 15 Ereignissen im Mittel auf etwa 30 bis zur Mitte des Jahrhunderts und bis zum Ende des Jahrhunderts liegen die Werte zwischen 45 und 50 Ereignissen. Gleichzeitig nehmen kalte Nächte mit Frost in der Innenstadt von derzeit rund 50 Ereignissen auf unter 40 zur Mitte des Jahrhunderts und knapp über 20 am Ende des Jahrhunderts ab (APCC, 2014). Dieser Umstand führt auch verstärkt zu gesundheitlicher Belastung der StadtbewohnerInnen. Auch im Sommer des Jahres 2015 traten in Österreich mehrere markante Hitzewellen auf, wobei die Temperaturhöchstwerte teils über 35 °C lagen. Die extreme Hitze entspräche demnach auch dem Szenario einer möglichen, langfristigen Klimaerwärmung. Auch Auswertungen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zeigen, dass zum Beispiel in Wien in den letzten Jahrzehnten die Zahl der Tage mit einer Tageshöchsttemperatur  $\geq 30$  °C (Hitzetage) um rund 50 Prozent zugenommen hat. Berechnungen mit Klimamodellen lassen bis zum Jahr 2100 einen weiteren deutlichen Anstieg erwarten. Die Hauptursache für die zumeist in Stadtgebieten beobachtete stärkere Erwärmung ist die Umwandlung natürlicher Oberflächen in gebaute (meist künstliche) Oberflächen mit ungünstigeren thermischen Eigenschaften zu einem, und zum anderen eine Vergrößerung der bebauten Gesamtoberfläche durch die erhöhte Menge an vertikalen Flächen wie beispielsweise Fassaden etc. (Pollak et al., 2011). Im Zuge der Bekämpfung des Auftretens städtischer Wärmeinseln ergeben sich für Stadt- und Raumplaner, Architekten, Landschaftsgestalter etc. mehrere Möglichkeiten. Dazu zählen die Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen (Ausbau von Park- und Rasenflächen), Abschattungen von Gebäuden, verstärkter Ausbau von Gründächern und Fassadenbegrünungen, die Senkung der Bebauungsdichte und die Reduktion der Versiegelung, aber auch die Erhöhung der Reflexionseigenschaften. Diesem letzten Punkt, der in vielen Veröffentlichungen und Publikationen als Maßnahme zwar erwähnt, aber infolge der schwierigeren Umsetzbarkeit zumeist weniger genau untersucht wird, soll in diesem Bericht mehr Beachtung geschenkt werden, indem er die Auswirkungen der Beschaffenheit von Gebäuden, Fassaden und Dachflächen in Wien auf die Reflexion von Sonnenstrahlen und somit auf die Aufnahme von Wärme untersucht.

Ziel der Arbeiten in diesem Projekt ist es, eine bessere Abschätzung des Klimaschutz- und UHI-Reduktionspotenzials durch eine Albedoerhöhung zur Verfügung zu stellen. Als Basis dienen detaillierte Erhebungen der vorhandenen Dachflächentypen und der jeweils gemessenen Albedo für diese Dachmaterialien. Mittels stadtklimatologischer Simulationen

werden anschließend die Auswirkungen einer Vielzahl von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündel zur Vermeidung der Hitzebelastung in Wien untersucht. Schließlich werden der direkte Einfluss auf die Klimaerwärmung durch den veränderten Strahlungsantrieb (englisch „Radiative Forcing“) modelliert und die indirekten Auswirkungen auf mögliche Energieeinsparungen und damit zusammenhängende THG-Reduktion aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen berechnet.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Literaturrecherche zum Stand der Technik hinsichtlich der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Eindämmung städtischer Wärmeinseln bzw. Diskussion zu Fragen der Akzeptanz von diesbezüglichen Veränderungen in österreichischen Städten

Die Entstehung einer städtischen Wärmeinsel, oder Englisch “Urban Heat Island (UHI)” ist ein typisches Merkmal für ein Stadtklima und wird durch die Wechselwirkung mehrerer unterschiedlicher Effekte hervorgerufen. Durch eine erhöhte Aufwärmung tagsüber und die eingeschränkte Abkühlung nachts werden die Städte im Vergleich zum Umland deutlich wärmer. Der UHI-Effekt beschreibt also den Temperaturunterschied von urbanen Gebieten im Vergleich zum städtischen Umland. Dabei können Unterschiede in den Sommermonaten von bis zu 10°C und mehr erreicht werden, wobei der UHI-Effekt vor allem in den Nachtstunden zu beobachten ist (Oke, 1982). Selbst in kleinen Städten wurden bereits UHI Erscheinungen gemessen (Steenefeld et al., 2011).

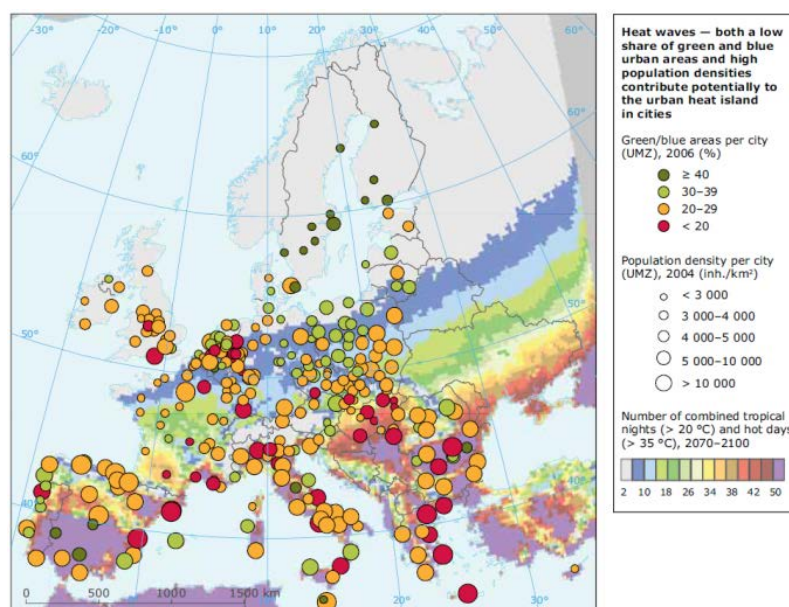


Abbildung 1: Darstellung der zu erwartenden Hitzewellen und die damit einhergehende Gefahr verstärkten Auftretens von UHI's in europäischen Städten zwischen 2071 und 2100. Quelle: EEA (2012)

Die Europäische Umweltagentur EEA (European Environment Agency) beschreibt in Ihrem Bericht jene Herausforderungen und Anpassungsmöglichkeiten europäischer Städte, die sich in Zukunft durch den fortschreitenden Klimawandel ergeben werden (European Environment Agency - EEA, 2012). Abbildung 1 zeigt eine Projektion der zu erwartenden Hitzewellen, also längeren Perioden mit ungewöhnlich hohen Temperaturen und die damit einhergehende Gefahr verstärkten Auftretens von UHI's in europäischen Städten zwischen 2071 und 2100. Besonders Städte in Ost- und Südosteuropa werden davon verstärkt betroffen sein.

Tabelle 1 beschreibt die Haupteinflussgrößen für das Zustandekommen städtischer Wärmeinseln, hier eingeteilt in meteorologische, morphologische und humane Einflussgrößen. Formayer et al., 2008 weist ebenfalls auf das Ansteigen von Hitzetagen ( $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) und Hitzewellen in Stadtgebieten mit wenig Grünflächen und hoher Bebauungsdichte hin.

Neben den bereits laufenden Klimaschutzmaßnahmen (Klimaschutzpläne etc.) wird dabei oft übersehen, dass gerade im urbanen Bereich zusätzliche Maßnahmen zur Bekämpfung des UHI-Phänomens notwendig sind. Diese werden zumeist in den oben erwähnten Maßnahmenpaketen nicht berücksichtigt und umfassen größtenteils „Low Tech“ Maßnahmen im Bereich der Gebäude und der Grünraumgestaltung (Stone et al., 2012, Georgescu et al., 2013). Auch Lazar et al., 2013 weisen in ihrer Studie für die Stadt Graz darauf hin, dass durch gut abgestimmte Baukörperstrukturen und durch die Erhaltung von Grünflächen städtische Kleinklimate besser gerüstet sind, dem durch den Klimawandel zu erwartenden Hitzestress besser entgegenzuwirken.

Hinsichtlich der Akzeptanz von Maßnahmen die zur Vermeidung städtischer Wärmeinseln in Frage kommen, wurde durch Gespräche mit vielen Verantwortlichen im Bereich der Stadtverwaltung (z.B. Herrn Piringer, MSc vom Magistrat Graz) schnell klar, dass für die Stadtbevölkerung vor allem Maßnahmen, die in Richtung Begrünung gehen, besondere Akzeptanz finden. Sowohl die Vergrößerung von Parkflächen, aber auch die Bepflanzung von Straßenzügen und Parkflächen mit Alleebäumen, bzw. Dachbegrünungen (dort wo sie machbar sind) werden hier begrüßt. Bezüglich Änderung der Albedo horizontaler und vertikaler Flächen besteht noch wenig Erfahrung, eine signifikante farbliche Veränderung von Dachflächen und Fassaden wird allerdings kritisch gesehen. Städtische Wärmeinseln und deren häufigeres Auftreten stellen darüber hinaus auch ein soziales Problem dar. Alex et al., 2013 beschreiben diese zumeist negativen Einflussgrößen auf die Gesellschaft in ihrer Studie.

Tabelle 1: Einflussfaktoren die den UHI-Effekt verstärken oder reduzieren können (Quelle: EEA, 2012)

<b>Meteorological factors</b>	<b>Morphological factors</b>	<b>Human factors aggravating heat impacts</b>
Radiation Temperature Wind speed	Geographical location and topography Vegetation and water areas High building mass Presence of impervious cover Structure that hinders ventilation	Urbanisation with a high share of built-up land and impervious areas Population density Little shadowing Insufficient building insulation Additional heat production due to production processes, transport, heating etc.



Eine zusammenfassende Studie aller Maßnahmen zur Eindämmung städtischer Wärmeinseln veröffentlichten Rizwan et al., 2008, indem sie ein Review der bestehenden Vermeidungsstrategien von UHI's durchführten. Im Zuge des im Central Europe Programms der Europäischen Kommission geförderten Projekts „Development and application of mitigation and adaptation strategies and measures for counteracting the global urban heat islands phenomenon“ wurden Vermeidungs-, Risikovorsorge- und Anpassungsstrategien für das Phänomen der städtischen Wärmeinseln für 8 Europäische Großstädte entwickelt. Von besonderem Interesse galt es hier geeignete Strategien zu testen, die vordringlich städtische Lebensräume betreffen. Stadtgebiete sind als besonders sensibel auf Extremwetterereignisse wie zum Beispiel Hitzewellen einzustufen, die die Wärmebelastung für die Bewohner verstärken (<http://eu-uhi.eu/de/>). Für die Stadt Wien wurden dafür im „Urban Heat Islands – Strategy Plan Vienna“ eigene Maßnahmen zur Vermeidung und Anpassung des UHI-Effekts entwickelt (Czachs et al., 2013).



Abbildung 2: Technische Maßnahmen zur Vermeidung und Anpassung an den UHI-Effekt in Wien (Quelle: Czachs et al., 2013).

Abbildung 2 zeigt die acht Hauptanpassungs- bzw. Vermeidungskategorien im technischen Bereich für die Stadt Wien, aus denen eine Reihe von Maßnahmen entwickelt wurde. Dazu zählen u.a. die Gebäudekühlung, Abschattungen und „Blue roofs“ (Dächer zur Regenwasserspeicherung) bzw. Fassadenkühlung mit Wasser. Eine erste Analyse hat gezeigt, dass eine Umsetzung der Maßnahmen eine multilevel- bzw. multidisziplinäre Herangehensweise erforderlich macht. Zuvela-Aloise, 2013 zeigt in ihrem Bericht auf, welche vordergründigen Anpassungsmaßnahmen für Wien Anwendung finden können (Senkung der Bebauungsdichte, Verringerung der Versiegelung, Vergrößerung von Grün- und Wasserflächen bzw. die Erhöhung der Reflexionseigenschaften). Wissenschaftler des Instituts Climate Central in Princeton, New Jersey, USA unterstreichen in ihrer Studie „Summer in the City: Hot And Getting Hotter“ (Kenward et al., 2014), dass Stadtplaner und -

designer verstärkt Bäume und Parks, sowie weiße Dächer (Albedo-Effekt) einsetzen sollten, um den UHI-Effekt zu verringern, der durch den Klimawandel zusätzlich verstärkt werden könnte.

Gago E.J. et al., 2013 geben einen sehr guten Überblick über die geeignetsten Möglichkeiten das Phänomen UHI nachhaltig einzudämmen. Zu den Haupteinflussgrößen und deren Effekte zählen:

- a. Parks und Grünflächen
- b. Bäume und Vegetation
- c. Dach- und Fassadenbegrünung
- d. Versiegelte (Asphalt) Flächen
- e. Albedo

Auch die Stadtstruktur (Oberflächenrauigkeit durch mehrstöckige Gebäude) und die damit einhergehende Durchlüftung von Stadtgebieten haben einen wesentlichen Einfluss auf das Stadtklima. Da dies aber zumeist in allen Städten gegeben ist und bei gegebenen Stadtstrukturen nur schwer verändert werden kann, soll der Einfluss der Stadtstruktur als „Low Tech“ Maßnahme hier nicht weiter beleuchtet werden.

Anhand der oben angeführten Punkte a) - e) wurde eine intensive Literaturrecherche durchgeführt, um einzelne Effekte in Bezug auf ihre Wirksamkeit und Effektivität näher abschätzen zu können. Anschließend wurden daraus jene Einflussparameter zur weiteren Betrachtung innerhalb der Modellsimulation für Wien ausgewählt, die das zu erwartende größte Potential zur Verringerung des UHI-Effekts haben (siehe Tabelle 7). Die Ergebnisse der Literaturrecherche sind in Kapitel 4.1 näher beschrieben.

## **2.2 Erhebung der Dachflächentypen aus dem Luftbild und Oberflächenalbedo aus Satellitenbild-Zeitreihen**

Die Albedo beschreibt das Rückstrahlvermögen (physikalisch: Reflexionsgrad) von Oberflächen. Sie wird bestimmt durch den Quotienten aus reflektierter zu einfallender Lichtmenge. Die Werte, die die Albedo annehmen kann, reichen von 0 (kein Licht reflektiert) bis 1 (alles Licht reflektiert). Sie können auch in Prozent ausgedrückt werden (0 - 100%). Je größer der Anteil der reflektierten Strahlung ist, desto heller ist die Oberfläche und umso höher ist die Albedo. Die Albedo eines Körpers bestimmt auch sein Temperaturverhalten. Die durchschnittliche planetarische Albedo der Erde liegt bei ca. 0,31, was bedeutet, dass ungefähr 31 % des einkommenden Sonnenlichts in das Weltall zurückgestrahlt wird.

Die Messung der Albedo kann mittels in-situ Messungen mittels Spektrometer, oder mittels Satelliten-Fernerkundung erfolgen. Li H. et al., 2013 bestimmen z.B. saisonale Änderungen sowie langfristige Änderungen der Albedo über die Zeit für verschiedene Straßenbeläge mittels in-situ Messungen. Despini et al., 2015 analysieren den Zusammenhang von In-situ Messungen mit satellitenbasierten Messungen. Sie stellen eine starke Korrelation zwischen In-Situ Messungen und Fernerkundungsbasierten Messungen mit einem Pearson

Korrelationskoeffizienten von 0.85 fest und empfehlen für großflächige Umsetzung die Anwendung der Fernerkundung. Im vorliegenden Projekt erfolgte die Bestimmung der Oberflächenalbedo auf Basis von MODIS Satellitenbildzeitreihen und Landsat Thematic Mapper Satellitenbildaufnahmen. Diese Satellitenbilddaten ergänzen sich hinsichtlich der räumlichen und der zeitlichen Auflösung. Landsat Thematic Mapper Daten weisen eine räumliche Auflösung von 30m je multispektralem Bildpunkt bei einer zeitlichen Auflösung von 16 Tagen auf. Die eingesetzten MODIS Zeitreihen weisen eine geringere räumliche Auflösung von 500m je multispektralem Bildpunkt auf, bieten allerdings in Europa eine tägliche Abdeckung. Von den kalibrierten Satellitenaufnahmen wurde die Albedo von den Spektralbändern im Bereich des sichtbaren Lichts und des Nahen Infrarots abgeleitet.. Anhand der Realnutzungskartierung der Stadt Wien wurde in weiterer Folge die Oberflächenalbedo für 32 Landnutzungskategorien bestimmt.

### **2.3 Stadtklimatologische Simulationen zur Vermeidung der Hitzebelastung**

Eine durch bauliche Verdichtung modifizierte Landschaftsstruktur führt zu städtischen Wärmeinseln die sich negativ auf die Gesundheit und die Lebensqualität der Menschen auswirken. Die zunehmende Urbanisierung und die fortschreitende globale Erwärmung steigern die Vulnerabilität der Städte, der man durch nachhaltige Maßnahmen der Stadtentwicklung begegnen kann (s. Rosenzweig et al. 2011; UN-HABITAT, 2011; OECD, 2010; BMVBS / BBSR, 2009). Zusätzlich beeinflusst der UHI-Effekt den Sektor der Bauwirtschaft hinsichtlich des städtischen Heiz-/Kühlenergiebedarfs und dessen effizienter Umsetzung.

Aufgrund dieser weitläufigen Auswirkungen wird das stadtklimatologische Phänomen der „urbanen Wärmeinsel“ (UHI) am intensivsten untersucht. Dafür werden geeignete physikalische Modelle, oftmals mit unterschiedlicher Komplexität, verwendet. Durch Einbindung neuer Einflussfaktoren (Gebäudegeometrie, Vegetation, Strahlungs- und Bodenbilanz usw.) werden die Modelle kontinuierlich verbessert. Die korrespondierenden Parametrisierungsansätze werden laufend anhand der realen Messwerte evaluiert. Damit werden die realitätsbasierten Gegebenheiten gut abgebildet und dadurch verlässliche Simulationen ermöglicht. Eine umfassende Beschreibung der dahinterliegenden meteorologischen Prozesse ist im Übergangsbereich von meso- hin zu mikroskaligen Prozessen nur begrenzt möglich, deren Aussagekraft von der Verfügbarkeit von Validierungsmessdaten und der Zuverlässigkeit der numerischen Modelle abhängig (Stull 1988; Arya, 2001).

Um den Einfluss der städtischen Baustrukturen auf die atmosphärische Zirkulation explizit zu simulieren, ist eine räumliche Auflösung im Bereich von wenigen Metern notwendig. Es ist derzeit allerdings rechentechnisch nicht möglich, derartige mikroskalige Simulationen, die eine Auflösung der bebauten Strukturen gewährleistet, für das gesamte Stadtgebiet für einen längeren Zeitraum durchzuführen. Um die lokalen Informationen auf eine gröbere Skala zu transformieren, wurden unterschiedliche Parametrisierungsansätze zur Beschreibung der Energieaustauschprozesse entwickelt und mit regionalen Modellen gekoppelt.

Ein seitens der "International Association for Urban Climate" (<http://www.urban-climate.org/>) initiiertes Vergleich existierender Stadtklimamodelle (Grimmond et al., 2010a; Grimmond et al., 2010b) zeigt betreffend die Evaluierung der Oberflächenenergiebilanz unterschiedliche Performance der Modelle für verschiedene Energieflüsse, konnte sich auf keine allgemeine Präferenz festlegen. Gängige urbane Parametrisierungsschemen für regionale Klimamodelle sind "Town Energy Balance" (TEB), (Masson, 2000; 2006) und "Building Effect Parameterization" (BEP), (Martilli et al., 2002). Das BEP Schema wurde zusammen mit dem "Building Energy Model" (BEM), (Salamanca und Martilli, 2010) im WRF Modell integriert. Das TEB Schema mit ISBA "Interaction between Soil Biosphere, and Atmosphere" Schema für Vegetation (Noilhan und Planton, 1989) wurde in der Modellgruppe ALADIN verwendet. Beide Schemata wurden in COSMO-CLM integriert und Versuchssimulationen deutscher Städte durchgeführt (PIK, Schubert et al., 2012; Sändig und Renner, 2011; Trusilova et al., 2011). Weit verbreitet ist das Modell WRF (Simulationen für New York, Madrid, Trento). Zusätzlich entwickelt und fördert eine Initiative die globale Verfügbarkeit und freie Nutzung der Landnutzungsdaten "World Urban Database and Access Portal Tools" (WUDAPT) <http://www.wudapt.org/>. Diese Versuche der Anwendung regionaler Klimamodelle mit der, für den städtischen Raum gewünschten Auflösung, zeigen häufig numerische Probleme und unklare Phänomene hinsichtlich der Zirkulationsmuster. Die Validierung dieser feinskaligen Muster und deren korrektive Berücksichtigung in den Modellen sind akute Notwendigkeiten. Eine Alternative zur Nutzung dieser existierenden regionalen Klimamodelle stellt das am DWD entwickelte Stadtklimamodell MUKLIMO\_3 (Sievers, 1990; 1995) dar, das der Simulation bebauter Gebiete dient. In der thermodynamischen Version des MUKLIMO\_3 Modells (Früh et al., 2010; 2011) werden die thermischen und dynamischen Einflüsse der Gebäude parametrisiert und damit die Anwendung auf eine gröbere Skala ermöglicht. In den letzten Jahren wurde MUKLIMO\_3 vom DWD für Simulationen ausgewählter Städte in Deutschland (Frankfurt, Köln, Jena) verwendet, an der ZAMG wird MUKLIMO\_3 in Kooperation mit dem DWD seit 2010 für Untersuchungen des zukünftigen Klimasignals in österreichischen Städten sowie zur Quantifizierung der Effizienz von möglichen Anpassungsmaßnahmen verwendet. Die Validierung der Simulationen für die tägliche Hitzebelastung in Wien wurde mittels Stationszeitreihen und mobilen Messdaten mit zufriedenstellendem Ergebnis durchgeführt. Weitere Untersuchungen mit MUKLIMO\_3 werden aktuell zu den Zentraleuropäischen Städten Krakau, Bratislava, Brno und Szeged im Rahmen des Forschungsprojektes VISEGRAD unter Beteiligung der ZAMG durchgeführt.

## **2.4 Energieeinsparung und direkte Beiträge zum Klimaschutz durch Maßnahmen zur Vermeidung städtischer Wärmeinseln**

In einem Stadtgebiet wird – in Abhängigkeit von der Qualität und Farbe der Oberflächen von Dächern, Fassaden, Straßen, Parkplätzen etc. - solare Energie stärker absorbiert als im ländlichen Raum. Ein Ausdruck und Maß für das Rückstrahlvermögen von nicht selbst leuchtenden Oberflächen wird der Begriff der „Albedo“ (vom lateinischen Wort „albus“ („weiß“)) verwendet. Der Unterschied in der Albedo als Ergebnis der Oberflächeneigenschaften verstärkt die Klimaerwärmung auf folgende zwei Arten:

- 1) den direkten Einfluß auf die Klimaerwärmung durch den Strahlungsantrieb (englisch „Radiative Forcing“) und
- 2) den indirekten Effekt durch die Verstärkung des Entstehens einer städtischen Wärmeinsel, die in weiterer Folge auch den Energiebedarf für die Raumkühlung erhöht, der zumeist auch aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen erzeugt wird.

Daher gilt die Erhöhung der Albedo einer urbanen Landschaft generell als Klimaschutzmaßnahme, kann aber zusätzlich auch als eine Strategie zur Anpassung an den Klimawandel gesehen werden.

- Ad 1) Hier geht es um den direkten Einfluss einer Albedoänderung von Oberflächen (in dieser Studie nur von Dachflächen) auf den Strahlungshaushalt einer Stadt in Bezug auf das Gesamtklima (nicht Stadtklima bzw. UHI-Effekt). Diese technischen Betrachtungen können anderswo auch unter dem Namen „Geoengineering“ verstanden werden. Die Reduktion des Strahlungsantriebs durch eine Veränderung der Albedo von Dächern wurde in den vergangenen Jahren in mehreren wissenschaftlichen Publikationen behandelt und diskutiert (z.B. Ferrari et al., 2015). Unter Strahlungsantrieb versteht man das Maß für die Veränderung der Energiebilanz der Erde durch externe Einflüsse bzw. Faktoren und wird in Watt/m<sup>2</sup> angegeben. Generell kann damit der Einfluss auf die Strahlungsbilanz bzw. das Klimasystem der Erde beschrieben werden. Dazu gehören z.B. die Änderung der Konzentration von Treibhausgasen, eine Änderung der Bestrahlungsstärke der Sonne, die Veränderung der Albedo und alle Maßnahmen, die zu einer Änderung der Energiemenge (Sonneneinstrahlung plus langwellige Strahlung in W/m<sup>2</sup>) führen, die von der Erdoberfläche absorbiert werden. Akbari et al., 2009 haben grob geschätzt, dass die Veränderung der Dachalbedo global ein Treibhausgasäquivalent von 0,1 t CO<sub>2</sub> / m<sup>2</sup> durch weiße Dächer einsparen könnte. Mit einer Dachfläche von 54 km<sup>2</sup> (13% der Gesamtfläche Wiens von 415 km<sup>2</sup>) könnten in Wien durch eine entsprechende Modifizierung der Albedo der Dächer demnach ungefähr 5,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq pro Jahr eingespart werden. Wie jedoch von Gaffin et al., 2012 hingewiesen wird, wird die tatsächliche Wirksamkeit der Modifizierung der Albedo stark von dem im Laufe der Zeit bedingten Ergrauen und ev. Moosbewuchs der Dacheindeckungen beeinflusst.
- Ad 2) Die meisten internationalen Forschungsarbeiten beschäftigen sich eher mit den indirekten Maßnahmen und dem Potenzial UHI-Effekte und den einhergehenden Energiebedarf für die Raumkühlung zu reduzieren, als durch eine Albedoerhöhung unmittelbar den Strahlungsantrieb des globalen Klimas zu reduzieren (siehe Punkt 1). In Nordamerika gibt es zu diesem Thema einige Studien (z.B. Gago et al., 2013; Hoff et al., 2014; Kenward et al., 2014; Levinson und Akbari, 2010; Li et al., 2014; Rosenzweig et al., 2009; Urban und Roth, 2009), ein paar wenige inzwischen auch in Europa (Pisello et al., 2014; Santamouris et al., 2015; Synnefa et al., 2007). Die Bedeutung der Gebäudekühlung ist in Österreich derzeit noch relativ gering. Im Jahr 2008 betrug der Stromverbrauch für "Klimaanlagen, Ventilatoren, Luftent- und befeuchter bzw. Luftaufbereitungsanlagen" 0,1% des Gesamtenergieverbrauches der Haushalte. 12,3% des Stromverbrauches wurde hingegen für Kühl- und Gefriergeräte aufgewendet. Letzterer sank im Jahr 2012 auf 11,5%

des Energieverbrauches der Haushalte, obwohl 2012 ein wärmerer Sommer als der des Jahres 2008 war (Statistik Österreich, 2015a). Töglhofer et al., 2012 haben im Projekt EL.ADAPT, das vom österreichischen Klimaforschungsprogramm finanziert wurde, dennoch aufgezeigt, dass es zu einem Anstieg der Stromnachfrage in Österreich kommt, wenn die Temperaturen über 18 ° C ansteigen (Abbildung 3). Dies liegt in erster Linie am Mehrverbrauch an Strom für die öffentliche Raumkühlung und für andere Haushaltsgeräte wie Kühlschränke etc. .

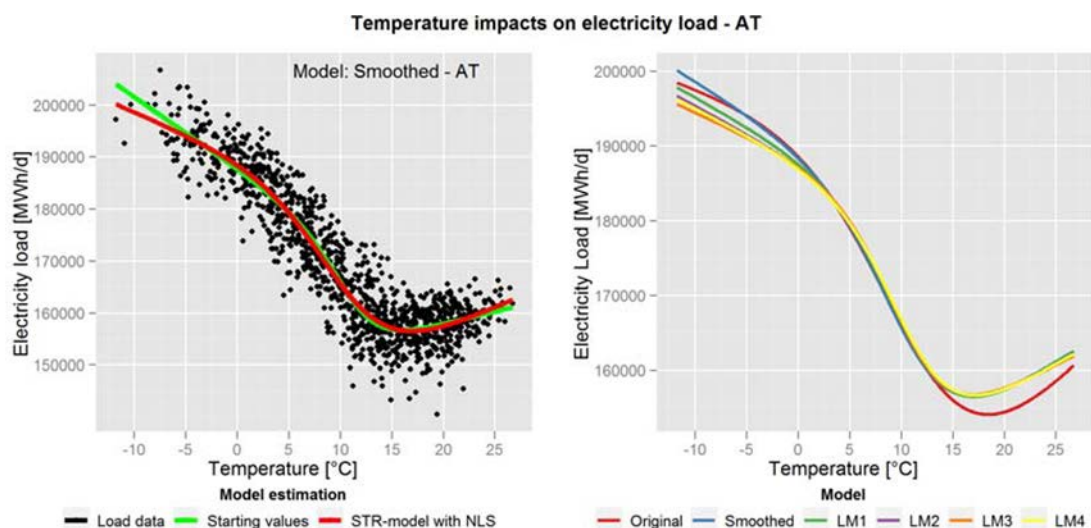


Abbildung 3: Stromverbrauch an Werktagen in Österreich (1960-2010)

Darüber hinaus wurde abgeschätzt, dass in den nächsten 100 Jahren die Stromnachfrage in Österreich durch den Klimawandel um 3,9% sinken wird (Eskeland und Mideska, 2010). Dabei wird der Stromverbrauch für die Raumkühlung zwar um 3,6% zunehmen, jener für den Heizaufwand allerdings um 7,5% sinken. Wie schon im Kapitel 2.1 erwähnt ist zu erwarten, dass der UHI-Effekt in Städten durch die Klimaerwärmung verstärkt wird, was Li und Bou-Zeid, 2013 auch bestätigen. Dies würde zu einem erhöhten Energiebedarf für die Raumkühlung bzw. Raumbelüftung führen und weiterreichende Folgen z.B. auch auf die Lebensqualität der städtischen Bevölkerung haben (Willbanks et al., 2007).

Einer Abschätzung der möglichen Energieeinsparungen durch die Veränderung der Albedo der Wiener Stadtlandschaft, basierend auf den gegenwärtigen Energieverbrauchsmustern bedarf es einer geeigneten Modellauswahl. Das Up-Scaling von der Gebäudeebene zur Stadtebene ist komplex (Li D. et al., 2014). Daher wurde das bestehende Stadtklima Modell MUKLIMO\_3 (Sievers und Zdunkowski, 1986; Sievers, 1995; Sievers, 2012) verwendet, um mögliche Veränderungen in der städtischen Wärmebelastung aufgrund geänderter Albedowerte für Dächer zu simulieren. Dies erfolgt durch Verwendung vorhandener Simulationen (Zuvela-Aloise et al., 2014). Dieser Ansatz liefert keine Temperaturschwankungen, sondern die Anzahl an Tagen mit bestimmten Höchsttemperaturen, die wiederum in Temperaturbandbreiten eingeteilt werden. Es musste also das Modell von Töglhofer et al., 2012 überarbeitet werden, indem aktualisierte Wetter- und Stromverbrauchsdaten herangezogen wurden.

## **3 Verwendete Methoden**

### **3.1 Erhebung der Dachflächentypen und der Oberflächenalbedo aus Fernerkundungsdaten**

#### **3.1.1 Erhebung der Dachflächentypen von Wien**

Um die Flächenanteile ausgewählter Dachkategorien abzuschätzen, wurde eine Stichprobenerhebung durchgeführt. Dazu wurden mittels Zufallsauswahl 10.000 Stichprobenpunkte systematisch über das Stadtgebiet verteilt und visuell im geographischen Informationssystem interpretiert. Als Basis für die Interpretation wurde das Orthofotomosaik der Stadt Wien mittels Web-Map-Service eingebunden. Die Interpretation erfolgte direkt am Monitor, wobei ein Programm zur effizienteren Bearbeitung implementiert wurde. Wenn die Interpretation aufgrund der Orthofotomosaik-Daten der Stadt Wien nicht eindeutig möglich war (z.B. im Fall von Schlagschatten) erfolgte die Interpretation unter Einbeziehung von Microsoft Bing Maps. Die Analyse erfolgte durch Berechnung der Häufigkeiten der jeweiligen Kategorie für die zwei Straten „Wien gesamt“ und „Wien Zentrum“.

#### **3.1.2 Vorverarbeitung der MODIS Satellitenbildzeitreihen**

Für die Arbeiten wurden MODIS Albedoprodukte (Details siehe [https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table)) eingesetzt, die von USGS kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Für den Download und die Bearbeitung wurden für die automatisierte Prozessierung am Joanneum Research entwickelte Programme eingesetzt. Die Prozessierungsschritte sind dabei:

- Download der Zeitreihen
- Entpacken der komprimierten Dateien
- Kartographische Projektion
- Formatkonvertierung

Als Ergebnis liegen für Wien MODIS Satellitenbildzeitreihen für den Zeitraum 2000 bis 2014 mit einer räumlichen Auflösung von 500 Metern, einer zeitlichen Auflösung von 8 Tagen und einer spektralen Auflösung von sieben Spektralbändern vor.

#### **3.1.3 Vorverarbeitung der Landsat Satellitenaufnahmen**

Für die Arbeiten wurden Landsat Thematic Mapper (TM) Daten des Satelliten Landsat 5 eingesetzt. Die Landsat 5 Satellitenbilddaten messen die Reflexion der Erdoberfläche in sieben Spektralbändern mit einer räumlichen Auflösung von 30m mal 30m. Diese Daten werden von der NASA kostenfrei zur Verfügung gestellt. Der Download erfolgte für ausgewählte Sommer-Aufnahmen über den sogenannten Earth-Explorer von USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Für folgende Prozessierungsschritte wurden bei JOANNEUM RESEARCH entwickelte Programme für die automatisierte Prozessierung eingesetzt:

- Entpacken der komprimierten Dateien
- Absolute atmosphärische Korrektur (LEDAPS-Software)
- Erstellung von Wolkenmasken
- Kartographische Projektion
- Formatkonvertierung

Als Ergebnis liegen für Wien Landsat TM Satellitenaufnahmen für ausgewählte Zeitpunkte mit einer räumlichen Auflösung von 30m je multispektralem Bildpunkt und einer spektralen Auflösung von sieben Spektralbändern vor.

#### **3.1.4 Filterung der MODIS-Satellitenbildzeitreihen**

Durch atmosphärische Einflüsse wie lokal unterschiedliche Luftfeuchte, Aerosole, Ozon, nicht identifizierte Wolkenpixel, Wolken-Schatten sowie durch Effekte unterschiedlicher Lichteinfallswinkel etc. tritt sogenanntes „rauschen“ in den Zeitreihen auf. In Arbeiten die auf Satellitenbild-Zeitreihenauswertung basieren, wird daher meist eine Filterung der Zeitreihen durchgeführt um das Rauschen im Signal zu verringern. Für das vorliegende Projekt wurde die sogenannte Savitzky Golay Methode angewandt. Das dem Savitzky Golay Filter zugrunde liegende Polynom ist zweiter Ordnung, wobei für das vorliegende Projekt für die Bestimmung des Polynoms jeweils 15 Beobachtungszeitpunkte herangezogen wurden. Für die Bestimmung des Polynoms wurde dabei die Qualitätsinformation des MODIS Produkts MCD43A2 herangezogen. Aufgrund der Wolkenbedeckung stehen daher in Abhängigkeit von der Wolkenbedeckung, nicht alle 15 möglichen Beobachtungen zur Verfügung. Im Falle dass vor bzw. nach dem jeweiligen zu interpolierenden Zeitpunkt weniger als 3 Beobachtungen zur Verfügung standen (z.B. bei langdauernder Wolkenbedeckung) erfolgte ein „Gap-Filling“ mittels linearer Interpolation. Die Bearbeitung erfolgte automatisiert mittels Python Programmen.

Das Ergebnis dieses Bearbeitungsschrittes ist eine über die Vegetationsperiode zeitlich und räumlich konsistente MODIS Satellitenbildzeitreihe wobei Beobachtungslücken, z.B bei Wolkenbedeckung anhand zeitlich benachbarter Beobachtungen geschätzt sind.

#### **3.1.5 Kalibrierung der Landsat Satellitenaufnahmen**

Die gefilterten MODIS Zeitreihendaten weisen im Vergleich zu den absolut kalibrierten Landsat Aufnahmen eine wesentlich höhere radiometrische Genauigkeit auf. Daher wurden die Landsat Aufnahmen relativ an die vorverarbeiteten MODIS Aufnahmen angepasst. Die relative Kalibrierung wurde dabei mittels linearer Regression, getrennt für die jeweiligen Spektralbänder durchgeführt.

Als Ergebnis sind sämtliche Satellitenaufnahmen radiometrisch kalibriert.

#### **3.1.6 Ableitung der Albedo**

Auf Basis der kalibrierten Satellitenaufnahmen wurde die Albedo entsprechend der von Liang, 2001 publizierten Methode berechnet. Dabei wird die Albedo im sichtbaren Spektralbereich, im Spektralbereich des Nahen Infrarot sowie die gesamte Breitbandalbedo



vom sichtbaren bis zum Spektralbereich des Nahen Infrarot aus einer Linearkombination der jeweiligen Spektralbänder berechnet wobei die Koeffizienten in der Publikation Liang, 2001 angeführt sind. Folgende Abbildung zeigt beispielhaft die Breitbandalbedo für Wien für den Beobachtungszeitpunkt 31. Juli 2005.



Abbildung 4: Albedo für das Stadtgebiet von Wien basierend auf Landsat-5 Thematic Mapper Aufnahme vom 31. Juli 2005. Darstellung in Grauwerten von 5% Albedo in Schwarz bis 25% Albedo in Weiß mit einer Auflösung von 30m mal 30m je Bildelement.

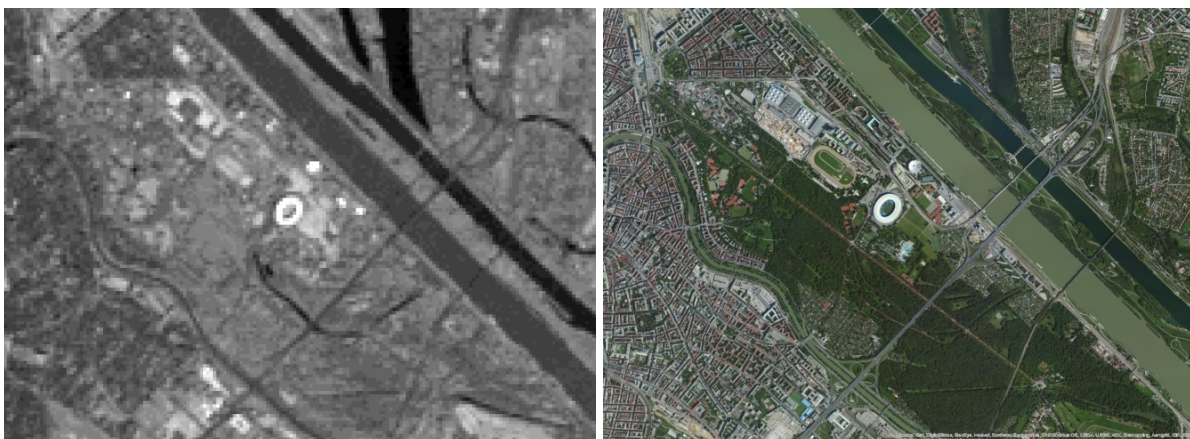


Abbildung 5: Ausschnitt Albedo und Vergleich mit Echtfarb-Aufnahme.

#### Ableitung von Mittelwerten der Albedo für ausgewählte Landnutzungseinheiten:

Anhand der Realnutzungskartierung der Stadt Wien wurden für 32 Landnutzungskategorien Mittelwerte der Albedo abgeleitet. Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt der Realnutzungskartierung, die als Basis für die Ableitung verwendet wurde.



Abbildung 6: Ausschnitt – Realnutzungskartierung (gelbe Linien über Echtfarb-Luftbild) die für die Ableitung von Mittelwerten der Albedo herangezogen wurde. Die Flächen innerhalb der gelben Linien stellen jeweils eine zusammenhängende Landnutzungskategorie dar.

Um Randeffekte die durch die Auflösung der Landsat Thematic Mapper Aufnahmen von 30m je Bildelement verursacht werden zu minimieren wurden die Polygone jeweils nach innen um eine Distanz von 30m verkleinert. Die Ergebnisse für die jeweiligen Landnutzungskategorien sind in Tabelle 9 angeführt.

Als Ergebnisse liegen somit flächendeckend für das Stadtgebiet von Wien Albedo – Zeitreihendaten vor, sowie für 32 ausgewählte Landbedeckungskategorien abgeleitete Schätzwerte der Oberflächenalbedo für den sichtbaren Spektralbereich und den Spektralbereich des nahen Infrarot.

## 3.2 Stadtklimatologische Simulationen zur Vermeidung der Hitzebelastung

### 3.2.1 Methode

Es wurden unterschiedliche bauliche Adaptierungsmaßnahmen betreffend das Rückstrahlverhalten von Baukörperoberflächen im urbanen Raum der Stadt Wien mithilfe des dynamischen Modells MUKLIMO\_3 experimentell simuliert. Aus den Ergebnisfeldern meteorologischer Parameter wurden via Quader-Methode (siehe Kapitel 3.2.6) interpolativ mittlere Klimaindizes, basierend auf Klimainformationen einer außerhalb des Stadtgebiets liegenden Referenzstation (Früh et al., 2010; Zuvela-Aloise et al., 2014), abgeleitet. Auf Basis dieser Klimaindizes sind die quantitativen Auswirkungen auf die städtische Hitzebelastung abschätzbar.

### **3.2.2 Modell**

Zum Einsatz kam das, seitens des DWD (Sievers und Zdunkowski, 1986; Sievers, 1990 und 1995) entwickelten und kontinuierlich verbesserte, kleinskalige atmosphärische Strömungsmodell MUKLIMO\_3 (Mikroskaliges, Urbanes KLImaMOdell, 3-dimensional). Ursprünglich für die Berechnung stationärer Windfelder eingesetzt, eignet es sich durch die implementierten Erweiterungen für die Berechnung von Strömungsfeldern um Hindernisse, wie sie Gebäude darstellen, wie auch für die Anwendung in orographisch inhomogenen Gebieten, d.h. für stadtklimatologische Fragestellungen. Die innerhalb des Projekts verwendete Thermodynamik-Version liefert in kurzzeitlichen Schritten Ergebnisfelder der meteorologischen Größen wie z.B. der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Energieflüsse. Das ermöglicht, einen Einblick in den Tagesgang der relevanten physikalischen Größen über dem Modellgebiet zu gewinnen.

### **3.2.3 Zeitliche Auflösung**

Als Simulationszeitraum für die 3D-Simulationen wurde ein Tag gewählt. Der Modelloutput liefert die Ergebnisfelder zu einem vollständigen Tagesgang zu dreizehn Zeitpunkten um 9:00, 10:00, 12:00, ..., 0:00, ..., 8:00 MESZ. Damit ist gewährleistet, dass man die gewünschten Informationen wie z.B. Extremtemperaturen erhält.

### **3.2.4 Modellgebiet, räumliche Auflösung, unaufgelöste Bebauung**

Die Modelldomäne Großraum-Wien überdeckt ein Gebiet von 31km x 24km, auf einem äquidistanten Gitter mit einer horizontalen Auflösung von 100m. Dieser Flächenausschnitt beinhaltet ausreichend Randausdehnung außerhalb der politischen Grenzen Wiens um die Zirkulation der städtischen Wärmeinsel befriedigend zu simulieren. Nachdem bei der gewählten horizontalen Gitterweite keine Einzelgebäude direkt simulierbar sind, wird der Baubestand bzw. dessen fluiddynamischer Einfluss unter Nutzung dessen analogem Verhalten zur Fluidynamik in porösen Medien, in Form einer geeigneten Parametrisierung im Modell berücksichtigt. Aufbauend auf der Referenzhöhe von 2m, werden in vertikaler Richtung 39 Niveaus berechnet, deren Vertikalabstand zueinander, beginnend mit 10m in den unteren Schichten bis in eine Höhe von ca. 2km auf 100m zunimmt. Somit ist gewährleistet, dass das räumliche Gebiet für das Aussagen gesucht werden, d.h. der bodennahe, bebaute urbane Raum, mit ausreichender Dichte an Information abgebildet ist, und gleichzeitig die atmosphärischen Randinformationen in den Untersuchungsraum einfließen.

### **3.2.5 Anfangs-, Randbedingungen, simulierte Zustände**

Aus den atmosphärischen Bedingungen einer außerhalb des Stadtgebiets liegenden Referenzstation, werden dem Modell Eingangsprofile (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Feuchtigkeit auf unterschiedlichen Höhen/Druckniveaus) übergeben, die in der Initialisierungsphase in Form einer zweistufigen Interpolation (ein- und zweidimensionalen) das umgebende Regionalklima der eigentlichen Simulationsphase überträgt. Die Profile wurden in iterativen Schritten auf die atmosphärischen Zustände des potentiellen Eintretens eines Sommertages ( $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ ) innerhalb des Stadtgebiets hin kalibriert. Somit simuliert das

Modell Tagesgänge der relevanten physikalischen Größen für jene meteorologischen Situationen, die das Eintreten eines Sommertages im bebauten urbanen Raum potentiell in sich bergen. Dies geschieht parallel für acht Zustände, die durch die unten genannten Intervallgrenzen (siehe Quader-Methode) der Eingangsgrößen gegeben sind, jeweils für die im Raum Wien vorherrschenden Hauptwindrichtungen NW und SO. Als die östlich außerhalb des urbanen Raums liegende Referenzstation wurde das auf 154m Seehöhe liegende Groß-Enzersdorf, mit geographischer Breite/Länge 48,1997/16,5592 Grad gewählt.

### 3.2.6 Quader(Cuboid)-Methode, Klimaindizes

Die Ergebnisfelder der oben beschriebenen Simulationen repräsentieren die Eckpunkte eines virtuellen Quaders (Abbildung 7), dessen Achsen die meteorologischen Größen Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit repräsentieren, und dessen Kanten sich über das genannte Kalibrierungsintervall der jeweiligen Größe erstrecken. Diese Intervalle wurden in früheren Untersuchungen betreffend Auftretens eines Sommertages anhand von fünf Stationszeitreihen innerhalb der Stadt Wien geprüft und wie folgt definiert:

Lufttemperatur	$T_{cmin} =$	15°C,	$T_{cmax} =$	25°C
Luftfeuchtigkeit	$rh_{cmin} =$	42%,	$rh_{cmax} =$	80%
Windgeschwindigkeit	$v_{cmin} =$	0,7m/s,	$v_{cmax} =$	4,0m/s

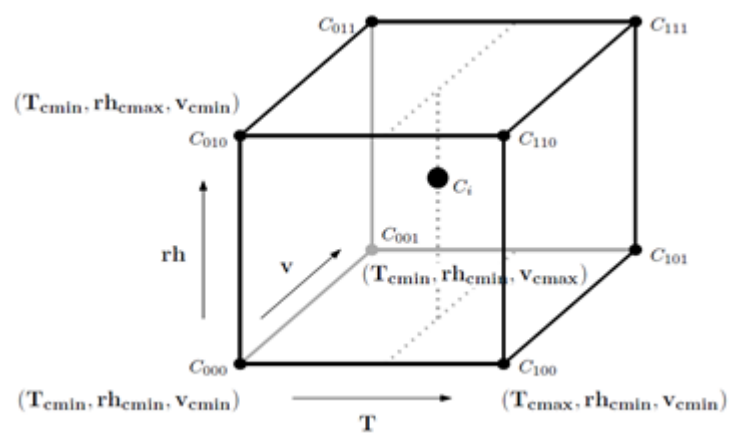


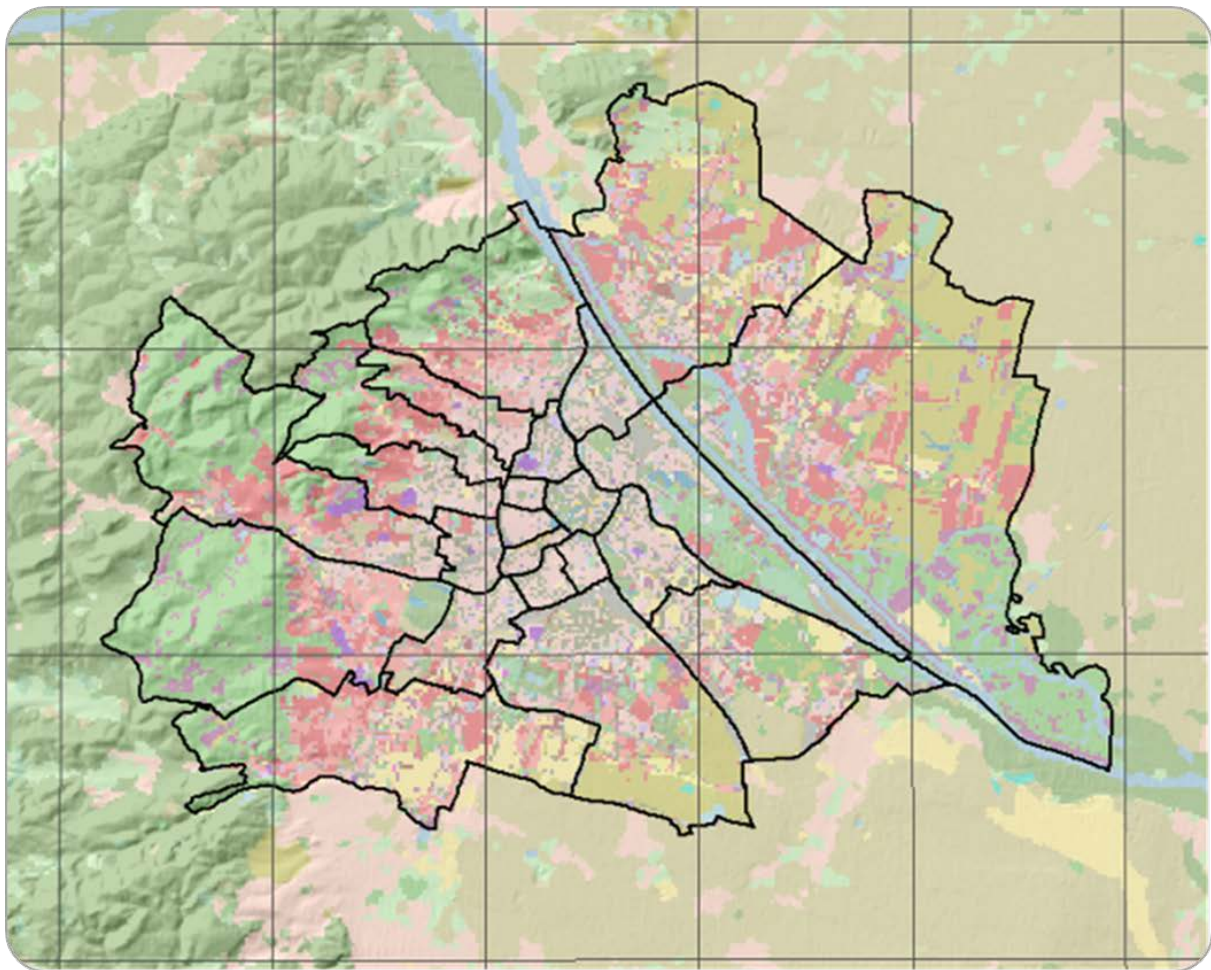
Abbildung 7 Illustration der tri-linearen Interpolation der Quader-Methode (Früh et al., 2010, Zuvella-Aloise et al., 2014)

Das Verfahren der Quader-Methode eignet sich für die Behandlung spezifischer Fragestellungen ähnlicher atmosphärischer Zustände, wie sie bei Hitzebelastung gegeben sind, reduziert die notwendige Rechenzeit erheblich. Die für die Berechnung der Klimaindizes notwendigen Felder der Extremtemperaturen werden aus der trilinearen Interpolation der Tagesmittelwerte für Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit an der Referenzstation aus den acht Eckpunktsimulationen gewonnen. Aus der daraus ermittelten Anzahl an Schwellwertüberschreitungen  $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ , sind die Felder der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen ableitbar. Innerhalb des Projekts wurden diese Klimaindizes mit Bezug auf die Klimanormalperiode 1981 bis 2010 und dem Referenzstandort Groß-Enzersdorf berechnet.

### **3.2.7 Orographie, Landnutzung (LN)**

Das Modell benötigt Informationen über die orographische Basis der Stadt, die in Form der Höhenangabe über NN für jeden Gitterpunkt übergeben wird. Zusätzlich wird jeder Gitterzelle die Art der Landnutzung zugeordnet (Abbildung 8). Die Landnutzung ist in 32 Klassen aus 4 Kategorien gegliedert. Die Kategorien repräsentieren die bestehenden Baulandflächen, jene, die Verkehrsflächen zuzuordnen sind, solche, die den Grünflächen zugewiesen werden können und Wasserflächen. Die Kategorie Baulandnutzung beinhaltet Wohngebäude die in unterschiedlicher Dichte zueinander angeordnet sind, Stadtkernstrukturen, Industrie- und Produktionsstätten, Gewerbeflächen, öffentliche Gebäude die administrativen, kulturellen, militärischen, u. ä. Zwecken gewidmet sind, die Kategorie Verkehr umfasst Straßen- und Schienenverkehrswege und deren Infrastruktur. Unter der Kategorie Grünland sind teilbebaute Objekte mit hohem Grünanteil wie Sportstätten und Friedhöfe bis zu Wiesen- und Waldflächen zusammengefasst.

Die Gewässer stellen eine gesonderte Kategorie dar. Die Zuordnung der Landnutzungs-kategorie zu den Gitterzellen erfolgte nach Zuvela-Aloise et al. / Urban Climate 10, 2014, 490–508, p.493, basierend auf Daten der MA18 der Stadt Wien. Jene Flächenanteile der Dächer Wiens, die potentiell als Gründächer nutzbar sind, wurden dem *Wien Umweltgut – Themenstadtplan: Gründachpotentialkataster* entnommen, öffentlich bereitgestellt vom Magistrat der Stadt Wien unter <http://www.wien.gv.at/umweltgut/public/>.



**Landnutzungsklassen:**

- Kategorie: **Baulandnutzung**
- 1 lockeres Wohn(misch)gebiet
  - 2 Wohn(misch)gebiet mittlerer Dichte
  - 3 dichtes Wohn(misch)gebiet
  - 4 großvolumiger, solitärer Wohn(misch)bau
  - 5 Büro- und Verwaltungsstruktur
  - 6 solitäre Handelsstruktur
  - 7 Geschäfts-, Kern- und Mischgebiet
  - 8 Mischnutzung wenig dicht / alter Ortskern
  - 9 Industrie, Gewerbe, Großhandel, Lager
  - 10 Kultur, Freizeit, Religion, Messe
  - 11 Gesundheit und Einsatzorganisation
  - 12 Bildung
  - 13 Sport und Bad (indoor)
  - 14 militärische Anlage
  - 15 Kläranlage, Deponie
  - 16 Energieversorgung, Rundfunkanlage
  - 17 Wasserversorgung
  - 18 Transformationsfl., Baustelle, Materialgewinnung

- Kategorie: **Verkehr, Transport**
- 19 Strassenraum begrünt
  - 20 Strassenraum unbegrünt
  - 21 Parkplatz, Parkhaus
  - 22 Bahnhof, Bahnanlage
  - 23 Transport und Logistik, Lager

- Kategorie: **Grünland**
- 24 Park, Grünanlage
  - 25 Sport und Bad (outdoor), Camping
  - 26 Friedhof
  - 27 Acker
  - 28 Weingarten
  - 29 Gärtnerei, Obstplantage
  - 30 Wald
  - 31 Wiese

- Kategorie: **Wasser**
- 32 Gewässer inkl. Bachbett



Abbildung 8 Landnutzungsklassen von Wien (Zuvela-Aloise et al. / Urban Climate 10 (2014) 490–508)

### 3.2.8 Landnutzungsparameter

Jeder Landnutzungs-klassen sind bestimmte physische, vegetative und bautechnische Eigenschaften zuordenbar. Die Information dieser spezifischen Parameter (s. Tabelle 2) wird dem Modell in tabellarischer Form übergeben und beinhaltet 24 Größen, die typische

Vorgabewerte für die jeweilige Klasse bezüglich deren flächiger Erstreckung und bauphysikalischer Kennwerte darstellen. Für die ungenutzten Angabefelder werden allgemein gültige Werte seitens des Modells angenommen.

Tabelle 2 Landnutzungsparameter

Parameter	Beschreibung
<i>vg1</i>	Flächenanteil der Gebäude des ersten Typs an der Grundfläche [1]
<i>vg2<sup>(1)</sup></i>	Flächenanteil der Gebäude des zweiten Typs an der Grundfläche [1]
<i>wai1</i>	"Wandflächenindex" des ersten Gebäudetyps, typ. Verhältnis Wandfläche zu Grundfläche [1]
<i>wai2<sup>(1)</sup></i>	"Wandflächenindex" des zweiten Gebäudetyps [1]
<i>h1</i>	Höhe Gebäudetyp 1 [m]
<i>h2<sup>(1)</sup></i>	Höhe Gebäudetyp 2 [m]
<i>vs</i>	Versiegelungsgrad der Flächen zwischen Gebäuden [1]
<i>z0</i>	Bodenrauigkeit der gebäudefreien Flächen bzw. der Flächen unter Bäumen [m]
<i>hbm</i>	Baumhöhe [m]
<i>hst</i>	Höhe des Stammraums [m]
<i>bf0</i>	Blattflächendichte im Stammraum, bezogen auf einen Einzelbaum [m <sup>-1</sup> ]
<i>bf1</i>	Blattflächendichte im Kronenbereich, bezogen auf einen Einzelbaum [m <sup>-1</sup> ]
<i>lai</i>	Blattflächenindex der Canopy-Schicht [1]
<i>hca</i>	Bewuchshöhe der Canopy-Schicht [m]
<i>sigbm</i>	Bestandsdichte der Bäume (Baumbedeckungsgrad) [1]
<i>sigma</i>	Bodenbedeckung durch den Bewuchs der Canopy-Schicht [1]
<i>grant</i>	Anteil der Gründächer für Landnutzungsklassen mit Gebäuden [1]
<i>albw</i>	Albedo der Wände [1]
<i>albd</i>	Albedo der Dächer [1]
<i>albvs</i>	Albedo der versiegelten Bodenflächen [1]
<i>kwand<sup>(1)</sup></i>	k-Wert der Gebäudewände [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
<i>kdach<sup>(1)</sup></i>	k-Wert der Gebäudedächer [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
<i>cwand<sup>(1)</sup></i>	Spezifische Wärmekapazität der Gebäudewände [J/(K·m <sup>2</sup> )]
<i>cdach<sup>(1)</sup></i>	Spezifische Wärmekapazität der Gebäudedächer [J/(K·m <sup>2</sup> )]

<sup>(1)</sup> Parameter wurden gegenüber den Vorgabewerten des Modells nicht verändert bzw. wurde jeweils nur ein Gebäudetyp simuliert.

### 3.3 Energieeinsparung und Beiträge zum Klimaschutz durch Maßnahmen zur Vermeidung städtischer Wärmeinseln

#### 3.3.1 Direkte Klimaschutzmaßnahme – Reduktion des Strahlungsantriebes

Um den direkten Einfluss einer Albedoänderung auf den Strahlungshaushalt einer Stadt in Bezug auf das Gesamtklima abschätzen zu können, mussten für die detailgetreue Modellierung der möglichen Reduktion des Strahlungsantriebs infolge der Albedoänderung zusätzliche (über Tabelle 9 hinausgehende) Daten und Informationen herangezogen werden. Bei der Berechnung der direkten Klimaschutzmaßnahme wurden nur die Dachflächen berücksichtigt.

Tabelle 3 zeigt das Flächenausmaß und die Albedo verschiedener Dachtypen für Wien jeweils mit und ohne Schneebedeckung, während Tabelle 4 den durchschnittlichen

Prozentsatz der Schneebedeckung flacher und schräger Dächer mit unterschiedlicher Schneehöhe in % jener Tage pro Monat beinhaltet.

Tabelle 3: Dachflächen und deren spezifische Albedowerte mit und ohne Schneebedeckung für Wien als Mittelwertsbereiche (U.S. DOE (2004))

Dachflächen			Albedo (%)	
Dachtyp	Neigung	Fläche (1000 m <sup>2</sup> )	Mit Schneebedeckung	Ohne Schneebedeckung
Eternit-Ziegel	schräg	12,944	0.80	0.13
Glasdach	schräg	1,618	0.80	0.50
Schotterdach	flach	12,944	0.80	0.10
Gründach	flach	1,079	0.80	0.30
Ziegeldach (rot)	schräg	16,719	0.80	0.20
Blechdach	flach	4,854	0.80	0.13
Blechdach	schräg	3,775	0.80	0.13
Weisse Fläche	-	0	0.80	0.68
<b>Total</b>		<b>53,933</b>		

Tabelle 4: Durchschnittlicher Prozentsatz jener Tage pro Monat mit Schneebedeckung in Wien zwischen 1981 und 2015 (ZAMG, 2015a)

**Mittlerer Prozentsatz der Tage mit Schneebedeckung (%) zwischen Jänner und Dezember (1981-2015)**

Dach typ	Schnee höhe (cm)	Monat											
		Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
flach	>0cm	41	37	13	1	0	0	0	0	0	0	7	25
schräg	>5cm	31	29	10	1	0	0	0	0	0	0	4	16

Zusätzlich zur Abschätzung der Albedo-Werte für Dächer benötigt man einerseits Daten für die kurzweilige eingehende Globalstrahlung (auftreffende Solarstrahlung) oberhalb der Atmosphäre (TOA-Top of the Atmosphere) und andererseits die durchschnittliche atmosphärische Durchlässigkeit pro Monat (Transmissionsfaktor) für einen spezifischen Standort. Diese Werte sind in Tabelle 5 angeführt.

Da in den meisten verfügbaren Studien keine tatsächlichen Oberflächenmessungen der eingehenden Globalstrahlung vorhanden sind, könnten diese Werte von der NASA (2015) auf einem Raster beruhende Schätzung herangezogen werden. Für das Projekt KELVIN jedoch konnten Messungen der ZAMG für die Jahre 2004 bis 2014 herangezogen werden (ZAMG, 2015b). Dabei wurden zwei Transmissionsfaktoren zum Vergleich gegenübergestellt (geschätzt (NASA) und gemessen (ZAMG)), wobei für die weitere Berechnung die gemessenen Transmissionswerte verwendet wurden (Tabelle 5).

Die Berechnung der Reduktion des Strahlungsantriebs erfolgt unter Anwendung der von Lenton und Vaughan, 2009 bzw. Bright et al., 2012 entwickelten Methoden.

$$RF(y) = -S T_a^2 \Delta\alpha(y)$$



Wobei  $RF$  = Strahlungsantrieb ( $W/m^2$ ),  $S$  = eingehende Sonneneinstrahlung oberhalb der Atmosphäre ( $W/m^2$ ),  $T_a$  = atmosphärische Durchlässigkeit (Transmissionsfaktor),  $\Delta\alpha$  = die Differenz der Oberflächenalbedo und  $y$  = Anzahl der Jahre.

Der Strahlungsantrieb  $RF$  wurde im Anschluss daran unter Anwendung der von Schwaiger und Bird (2010) entwickelten Methode - in  $CO_2$  Emissionsreduktions-Äquivalente umgerechnet.

$$\Delta CO_{2,eq}(y) \approx RF(y) \frac{A_a CO_{2,ref}}{A_E \beta} \left[ \frac{m_{atm} M_{CO_2}}{1 \times 10^6 M_{air}} \right] \otimes InverseCO_2Decay(y)$$

Wobei  $\Delta CO_{2,eq}$  = Emission pro Jahr in  $CO_2$  Äquivalenten (Mg),  $A_a$  = das Flächenausmaß der Albedoänderung ( $m^2$ ),  $A_E$  = Fläche der Erde =  $5.1 \times 10^{14} m^2$ ,  $\beta$  = die Strahlungsantriebskonstante =  $5.35 W/m^2$  (IPCC, 2001),  $CO_{2,ref}$  = die referenzierte atmosphärische  $CO_2$  Konzentration = 400 ppmv (NOAA, 2015),  $m_{atm}$  = Masse der Atmosphäre =  $5.148 \times 10^{15} Mg$ ,  $M_{CO_2}$  = Molekularmasse von  $CO_2$  = 44.0095 g/mole,  $M_{air}$  = Molekularmasse der Luft = 28.95 g/mole und  $\otimes$  ist der Konvolutionsoperator.

Tabelle 5: Kurzwellige Globaleinstrahlung oberhalb der Atmosphäre (TOA-Top of the Atmosphere) und durchschnittliche Atmosphärische Durchlässigkeit für Wien über das Jahr. Geschätzte Werte je nach geographischer Position nach NASA (2015). Gemessene Werte als Mittelwert der ankommenden Globalstrahlung für die Jahre 2004 bis 2014, ZAMG (2015b)

Monat	TOA Globalstrahlung ( $J/cm^2$ )	Oberfläche (geschätzt nach geogr. Position- NASA)		Oberfläche (gemessen - ZAMG)	
		Einstrahlung ( $J/cm^2$ )	Transmissions- faktor (%)	Einstrahlung ( $J/cm^2$ )	Transmissions- faktor (%)
Jan	31,558	12,712	40,3	10,374	32,9
Feb	44,115	20,043	45,4	16,637	37,7
Mär	74,043	33,230	44,9	32,852	44,4
Apr	97,122	45,108	46,4	49,102	50,6
Mai	119,317	58,878	49,3	58,923	49,4
Jun	124,101	57,626	46,4	61,954	49,9
Jul	123,777	58,320	47,1	63,915	51,6
Aug	107,162	52,968	49,4	53,738	50,1
Sep	80,180	35,935	44,8	37,658	47,0
Okt	56,759	22,191	39,1	22,558	39,7
Nov	34,748	12,086	34,8	10,133	29,2
Dez	26,651	9,924	37,2	7,712	28,9

$InverseCO_2Decay(y)$  entspricht einer Zeitreihe die so berechnet wird, dass:

$$InverseCO_2Decay(y) \otimes CO_2Decay(y) = 1$$

und

$$CO_2Decay(y) = A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i e^{\frac{-y}{T_i}}$$

wobei  $A_0 = 0.2173$ ,  $A_1 = 0.2240$ ,  $A_2 = 0.2824$ ,  $A_3 = 0.2763$ ,  $T_1 = 394.4$  Jahre,  $T_2 = 36.54$ , und  $T_3 = 4,34$  Jahre (Joos et al. 2013).

### 3.3.2 Indirekter Klimaschutzeffekt – Reduktion des Strombedarfs

Zur Berechnung der indirekten Effekte von Maßnahmen zur Eindämmung städtischer Wärmeinseln und den einhergehenden Energiebedarf für die Raumkühlung wurde in erster Linie die Beziehung zwischen dem Stromverbrauch und der Temperatur analysiert. Dabei gelangten folgende Datensätze zur Anwendung:

- stündliche Stromlastdaten (von ENTSO-E für 2009-2013 (ENTSO-E, 2015)) für Österreich.
- die Stromlastdaten für Wien wurden zwar angefordert aber leider nicht zur Verfügung gestellt.
- Temperaturdaten für die großen Städte Österreichs bzw. für die Innenstadt von Wien (ZAMG, 2015b,c).

Die zusammengefassten Daten - hier als Beispiel für das Jahr 2009 - sind in Abbildung 9 dargestellt. Eine klare Beziehung zwischen Stromverbrauch und Temperatur wie durch Töglhofer et al., 2012 gezeigt, ist hier noch nicht ersichtlich (Abbildung 9a), weil die Daten von zwei unterschiedlichen zeitlichen Effekten beeinflusst werden, die auszuklammern sind und deshalb herauszurechnen sind. Dies ist zum einen die Abweichung innerhalb einer Woche (insbesondere an Samstagen und Sonntagen ist der Stromverbrauch stark reduziert) und die Abweichungen aufgrund der Schulferien im Sommer (viele Österreicher sind auf Urlaub). Erstere können als parallele Verbrauchswerte von etwa minus 20.000 und 40.000 MWh / Tag im Vergleich zu einem Wochentag (als Hauptdatenreihe) geschätzt werden, der Einfluss der Sommerferien kann durch die rund 10.000 MWh / Tagesrückgang zwischen dem Tag 195 (14. Juli) und Tag 233 (21. August) geschätzt werden (Abbildung 9b).

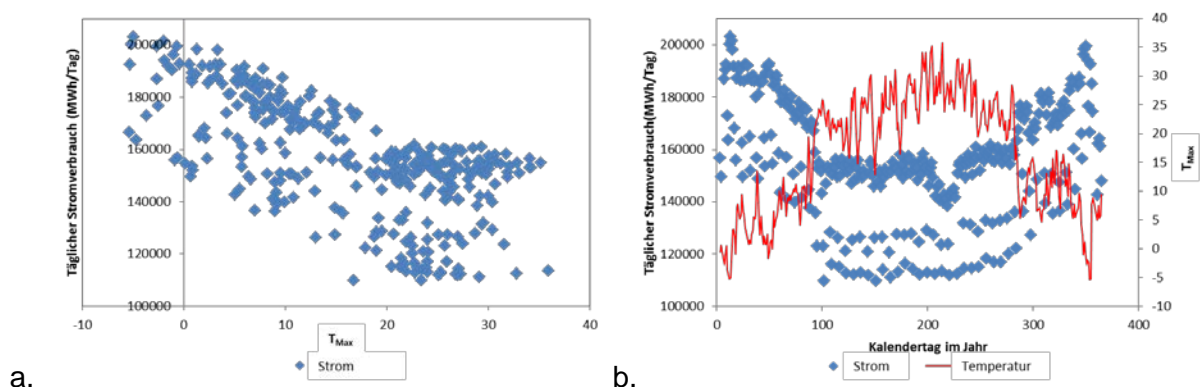


Abbildung 9: Nationale Stromverbrauchsdaten pro Tag dargestellt über der Temperatur für die Wiener Innenstadt (a) und der nationale Stromverbrauch und Maximaltemperatur für die Innenstadt von Wien dargestellt über das Jahr am Beispiel des Jahres 2009 (b). Feiertage sind nicht inkludiert.

Die Schwankungen innerhalb der Woche wurden anhand eines Normalisierungsfaktors korrigiert. Dies stellt sicher, dass auch Samstage und Sonntage, die generell weniger Stromverbrauch zeigen in der Berechnung berücksichtigt sind.

Die Schwankungen infolge der Sommerferien wurden so herausgerechnet, dass zuerst für jedes Jahr die prozentuelle Abnahme des Stromverbrauches in den Tagen 185 bis 195 in Relation zum Durchschnittsverbrauch berechnet wurde. Anschließend wurde die prozentuelle Abnahme über die Jahre gemittelt und die Durchschnittswerte anhand einer logistischen Funktion (Zwietering et al., 1990) angepasst (L2-Norm). Der Kehrwert der geglätteten Kurve wurde im Anschluss daran auf die ursprünglichen Daten angewendet.

Nach entsprechender Datenaufbereitung (Abbildung 10), zeigen die Daten ein ähnliches Muster wie durch Töglhofer et al., 2012 bereits erklärt, obwohl die Zunahme des Verbrauchs an Tagen mit Höchsttemperaturen über 18 ° C für das Jahr 2009 nicht so stark ersichtlich ist. Die Winterferien um die Zeit von Weihnachten und Neujahr, also zwischen dem Tag 354 (20. Dezember) und dem 6. Januar bzw. in den Semesterferien im Februar um den Tag 35 (4. Februar) wurden nicht korrigiert und sind in den Stromverbrauchsdaten erkennbar. Bei einer detaillierten Untersuchung der verarbeiteten Daten zeigt sich eine eindeutige Korrelation zwischen dem Stromverbrauch und der jeweiligen Tagesmaximaltemperatur (Abbildung 11).

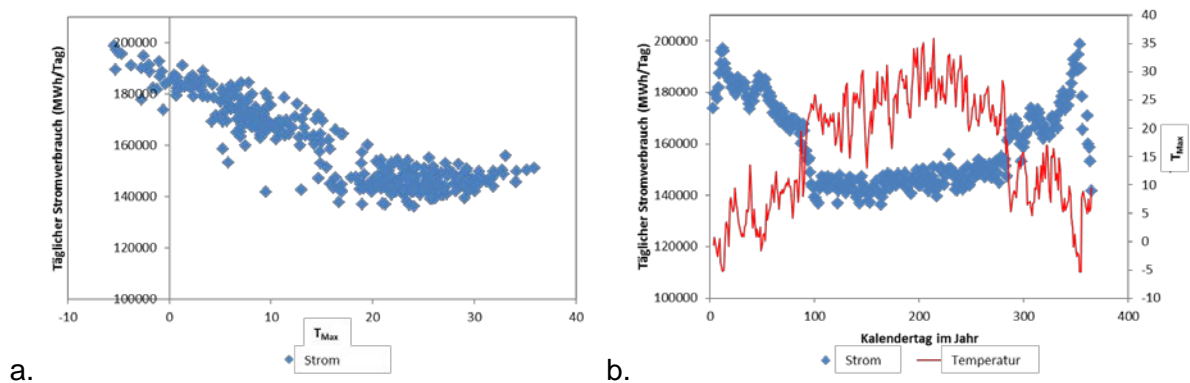


Abbildung 10: Korrigierte nationale Stromverbrauchsdaten pro Tag dargestellt über der Temperatur für die Wiener Innenstadt (a) und der korrigierte nationale Stromverbrauch und Maximaltemperatur für die Innenstadt von Wien dargestellt über das Jahr am Beispiel des Jahres 2009 (b). Feiertage sind nicht inkludiert.

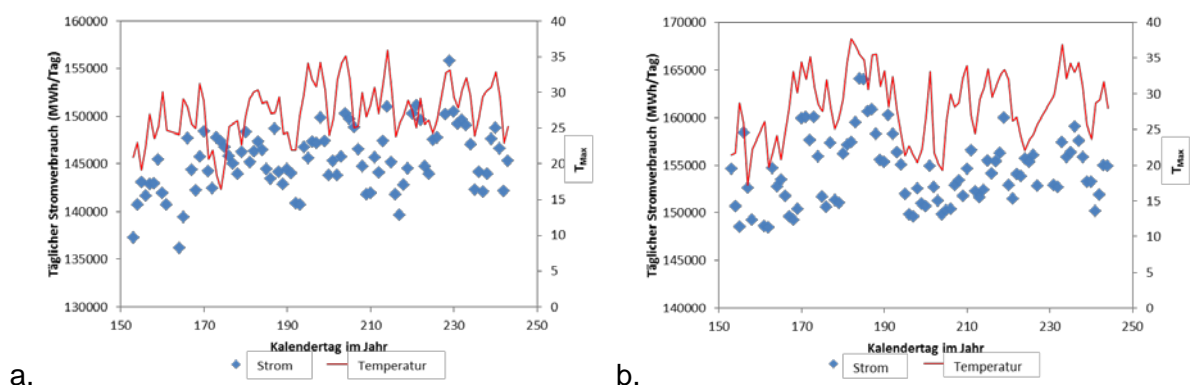


Abbildung 11: Korrigierter nationaler Stromverbrauch und Maximaltemperatur dargestellt für die Monate Juni, Juli und August in 2009 (a) und 2013 (b) für die Innenstadt von Wien. Feiertage sind nicht inkludiert.

In weiterer Folge sind zwei Methoden zur Darstellung des Zusammenhangs von Maximaltemperatur und Stromverbrauch dargestellt. Bei der ersten Methode wird davon ausgegangen, dass die Temperatur in der Innenstadt von Wien für ganz Österreich

repräsentativ ist. Die zweite Methode verwendet ein Modell, um die gemessenen Tageshöchsttemperaturen in den jeweiligen Landeshauptstädten auf den nationalen Stromverbrauch zu übertragen.

### Methode 1

Hier wird angenommen, dass die gemessenen Temperaturen der Stadt Wien (Innere Stadt) und der damit zusammenhängende Stromverbrauch für das gesamte Bundesgebiet als repräsentativ angesehen werden können. Demnach erfolgt die Berechnung des Zusammenhangs schrittweise, hier am Beispiel eines Zeitfensters von einem Monat näher erläutert:

1. Die Anzahl der Tage pro Jahr mit einer bestimmten Maximaltemperatur  $T_{max}$  wird den folgenden Temperaturbandbreiten (°C) zugeteilt:  $<0^{\circ} C$ ,  $0^{\circ}C-5^{\circ}C$ ,  $5^{\circ}C-10^{\circ}C$ ,  $10^{\circ}C-15^{\circ}C$ ,  $15^{\circ}C-20^{\circ}C$ ,  $20^{\circ}C-25^{\circ}C$ ,  $25^{\circ}C-30^{\circ}C$ ,  $30^{\circ}C-35^{\circ}C$ , und  $>35^{\circ} C$ ;
2. Der korrigierte Stromverbrauch wird für die einzelnen Temperaturbandbreiten pro Jahr ermittelt;
3. Der tägliche, durchschnittliche Stromverbrauch für die jeweiligen Temperaturbandbreiten wird gemäß der Schritte 1 und 2 berechnet;
4. Der tägliche, durchschnittliche Stromverbrauch für die jeweiligen Temperaturbandbreiten wird über die Jahre beibehalten, wobei sich für einen entsprechenden Tag mit  $T_{max}=20^{\circ}C-25^{\circ}C$  durch die Normalisierung des Durchschnittstagesverbrauchs pro Temperaturband (von Schritt 3) der Verbrauch im Temperaturband  $20^{\circ}C-25^{\circ}C$  ergibt;
5. Anschließend wird die mittlere Anzahl der Tage mit  $T_{max}=20^{\circ}C-25^{\circ}C$  für jeden Monat berechnet (unter Anwendung des Äquivalenzfaktors im Schritt 4);
6. Der Stromverbrauch für den entsprechenden Tag mit  $T_{max}=20^{\circ}C-25^{\circ}C$  (von Schritt 5) wird nun für jeden Monat und Jahr berechnet; und
7. Die Reduktion der Anzahl an Sommer- und Hitzetagen (von MUKLIMO\_3) wird anschließend auf Basis der Annahme bestimmt, dass diese Gesamtreduktion über alle Monate proportional dem Auftreten der Anzahl an Sommer- und Hitzetagen im Monat verteilt ist; und
8. Der neue Stromverbrauch pro Monat ergibt sich demzufolge insofern, dass die Neuverteilung der Tage gemäß den entsprechenden  $T_{max}=20^{\circ}C-25^{\circ}C$  Tagen erfolgt und mit dem monatlichen Verbrauch für den entsprechenden  $T_{max}=20^{\circ}C-25^{\circ}C$  Tag multipliziert wird.

### Methode 2

Für jedes einzelne Jahr wird der nationale Stromverbrauch abhängig von der Temperatur gemäß der nachstehenden Formel modelliert:

$$E_{day} = \sum_{city} pop_{city} E20cap_{city} (1 + TFactor_{city,day})$$

Wobei  $E_{day}$  = der nationale Stromverbrauch an einem bestimmten Tag;  $pop_{city}$  = die Einwohneranzahl der jeweiligen Stadt im Jahr der Berechnung,  $E20cap_{city}$  = der Prokopfstromverbrauch an einem Tag mit  $T_{max}=20^{\circ}C-25^{\circ}C$  in der jeweiligen Stadt, und

$TFactor_{city,day}$  = ein Korrekturfaktor für die Maximaltemperatur in der jeweiligen Stadt. Dieser Faktor wird einzeln den jeweiligen Temperaturbandbreiten in jeder Stadt zugeordnet.

Die Variablen  $E20cap_{city}$  und  $TFactor_{city,day}$  werden durch die Minimierung der Abweichungsquadratsummen zwischen den aktuellen und modellierten nationalen Verbrauchsdaten eines bestimmten Tages erhoben, wobei folgende zusätzliche Einschränkungen getroffen werden:

1.  $TFactor$  ist für alle Temperaturbandbreiten  $\geq 0^\circ\text{C}$ ;
2.  $TFactor(20^\circ\text{C}-25^\circ\text{C}) = 0$ ; und
3.  $TFactor(35^\circ\text{C}) \geq TFactor(30^\circ\text{C}-35^\circ\text{C}) \geq TFactor(25^\circ\text{C}-30^\circ\text{C})$ .

Sobald  $E20cap_{Vienna}$  und  $TFactor_{Vienna,day}$  bekannt sind, kann der Stromverbrauch für eine erfolgte Reduktion der Sommer- und Hitzetage in der Stadt Wien (von MUKLIMO\_3, Kapitel 3.2), unter der Annahme, dass die Gesamtreduktion über alle Monate proportional dem Auftreten der Anzahl an Sommer- und Hitzetagen im Monat verteilt ist, berechnet werden. Abschließend erfolgt eine Skalierung der berechneten Einsparungen gemäß des Verhältnisses des aktuellen und modellierten Stromverbrauchs.

Die Zusammenhänge bzw. Korrelationen zwischen den gemessenen Temperaturen in Österreichischen Städten sind in der Regel sehr hoch (Bestimmtheitsmaß  $>0.95$ ), da das Flächenausmaß Österreichs relativ klein ist. Z.b. liegen Wien und die Landeshauptstadt von Niederösterreich (St. Pölten) nur 65 km voneinander entfernt. Daher wurden die jeweiligen Landeshauptstädte in vier verschiedene Gruppen eingeteilt:

1. Graz – repräsentiert die Einwohner der Bundesländer Steiermark und Kärnten;
2. Innsbruck – repräsentiert die Einwohner der Bundesländer Tirol und Vorarlberg;
3. Linz – repräsentiert die Einwohner der Bundesländer Salzburg und Oberösterreich;  
und
4. Wien – repräsentiert die Einwohner der Bundesländer Burgenland, Niederösterreich und Wien;

Anhand der Berechnungen für die Stromeinsparung wird in weiterer Folge die Treibhausgasreduktionsmenge erhoben, wobei hierzu der nationale durchschnittliche Emissionsfaktor für Strom von derzeit  $103,33 \text{ g CO}_2\text{e} / \text{kWh}$  (E-Control, 2014) Anwendung findet. Das Stromeinsparungspotential kann darüber hinaus auch finanziell ausgedrückt werden, indem pro Haushalt Kosten von  $0,205 \text{ €/kWh}$  (Statistik Austria, 2015b) ausgegangen wird.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Ergebnisse der Literaturrecherche hinsichtlich der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Eindämmung städtischer Wärmeinseln

Zwar wurde im Methodenteil die Vorgangsweise der Literaturrecherche nicht näher erläutert (nur im „Stand der Technik“), die Erkenntnisse aus der durchgeführten Literatursuche aber in diesem Kapitel näher beschrieben.

#### 4.1.1 Parks und Grünflächen

Größere Grünflächen in städtischen Gebieten wie Parks, Grasflächen, Stadtwälder etc. sind vor allem infolge der kühlenden Wirkung der besonders am Tage stattfindenden Evapotranspiration (Wasserverdunstung des Bodens und der Vegetation) in der Lage das Auftreten von UHI's einzudämmen (vgl. auch Shashua-Bar et al., 2000, Peng et al., 2014, Gill et al., 2007). Yu und Hien, 2006 haben herausgefunden, dass in Singapur die Kühlwirkung von Grünflächen wie Parks etc. in der Stadt signifikant war. Nicht nur in den Parks selbst, sondern auch in den angrenzenden Stadtgebieten war dies zu beobachten. Deren Ergebnisse zeigten auch, dass durch die Vegetation Energieeinsparungen und somit eine Verringerung des Kühlaufwands von Gebäuden um bis zu 10% erreicht werden kann. In dieselbe Richtung gehen Untersuchungen für die Stadt Bochum in Deutschland, wo Klimamodellierungen gezeigt haben, dass zehn Prozent mehr Grünflächen in Städten ausreichen, um die Temperaturen trotz der Klimaerwärmung konstant zu halten<sup>1</sup>. Für die Stadt München fanden Alavipanah et al., 2015 in ihrer Studie heraus, dass in Stadtregionen mit hoher Vegetationsdichte durch einen besseren Luftaustausch die Stadtteile kühler sind, durch geringere Konvektion allerdings dieser Effekt bei sehr hohem Kronenschluss der Bäume über >80% wieder geringer wird. Die Ergebnisse zeigen auch ein abnehmendes und negatives Verhältnis zwischen Oberflächentemperatur und dem Anteil städtischer Vegetation, wenn der Trend auch nicht linear dargestellt werden kann. Ca et al., 1998 fand für Teile der Stadt Tokio heraus, dass das Vorhandensein von Vegetation besonders in den Mittagsstunden eine Senkung der Tagestemperatur bewirken kann und somit auch signifikant weniger Energie für Kühlzwecke erforderlich ist. Generell weisen viele Studien darauf hin, dass Vegetationsflächen in Stadtgebieten im Stande sind den UHI- Effekt einzudämmen und Energieaufwendungen für Kühlzwecke zu senken (Cao et al., 2010). Eine von Feyisa et al., 2014 in Addis Abeba durchgeführte Studie untersuchte ebenfalls den Kühleffekt von urbanen Grünflächen. Das Ergebnis zeigte einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Kronenschluss der Bäume und der Temperatur. Mit einer Bandbreite von 0,11°C - 6,72°C (je nach Kronenschluss) wurde ein durchschnittlicher Kühleffekt von 3,93°C gemessen. Die Studie zeigte auch den Kühleffekt der Grünflächen auf die sie umgebenden Gebiete, wobei die Flächengröße des Grünraums einen wichtigen Einfluss hat (vergleiche auch Bacci et al., 2003). Tabelle 6 zeigt den Kühleffekt von Grünflächen auf ihre angrenzende Umgebung in Abhängigkeit von der Entfernung, wobei die Autoren vorschlagen

---

<sup>1</sup> <http://www.3sat.de/page/?source=/nano/umwelt/175477/index.html>

Grünflächen als UHI Vermeidungsmaßnahme einzusetzen (Shashua-Bar und Hoffman, 2000).

Tabelle 6: Kühlungseffekt außerhalb der Grünflächen, Quelle: Shashua-Bar und Hoffman, 2000

Cooling effect outside the site boundary (°C); time: 1500 h (averages for the days of measurement)

Site	Outside observation point	Orientation	$T_r$ (°C)	Cooling effects (K)				
				Distances from site boundary				
				Border	20 m	40 m	60 m	80 m
(1) Hayered Avenue	Hashtil St.	E-W	31.8	2.3	2.0	1.3	0.8	0.2
(1) Hayered Avenue	Square	S-N	31.8	1.9	1.8	1.6	1.2	0.5
(2) Meltz Garden	Amsterdam St.	E-W	33.2	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4
(3) Emanuel Avenue	Amsterdam St.	E-W	33.2	2.7	0.9	0.5	0.3	0.3
(3) Emanuel Avenue	Emanuel St.	S-N	33.2	2.9	2.3	1.8	1.5	-
(4) Rothschild Avenue	Bar Ilan St.	E-W	32.3	1.9	1.8	1.0	0.7	-
(4) Rothschild Avenue	Bar Ilan St.	W-E	32.3	1.9	1.8	1.4	1.1	-
(5) Hen Avenue	Hashofim St.	E-W	32.3	2.2	2.2	0.4	0.1	-
(5) Hen Avenue	Hashofim St.	W-E	32.3	2.2	2.2	0.7	0.4	-
(6) Borochoy Square	K.K.L. st.	S-N	32.3	2.9	2.1	1.1	0.1	0.1
Average	-	-	32.5	2.15	1.77	1.04	0.67	0.30

#### 4.1.2 Bäume und Vegetation

Eine Reihe von Studien beschäftigt sich mit dem Thema der Bepflanzung von Straßenzügen und Parkräumen, der Beschattungen durch Bäume und dem Effekt auf die Lebensqualität in diesen Gebieten (Rosenfeld et al., 1995, Akbari et al., 2005, Akbari, 2002, Akbari et al., 2004; Walz und Hwang, 2007). Matzarakis, 2013 zeigt in seiner Untersuchung mit welchen geeigneten Mitteln der Stadtplanung der Hitzestress für die Einwohner von Stadtgebieten vermindert werden könnte. Dazu zählen die Pflanzung von breitkronigen Bäumen (künftige Schattenwirkung), sowie Flächenumnutzungen bzw. Dach- und Fassadenbegrünungen (siehe auch gesonderte Beurteilung der Wirkung von Fassadenbegrünungen). Pollak et al., 2011 unterstreichen hier auch noch den zusätzlich positiven Effekt einer hohen Bepflanzungsdichte und eines großen Kronendurchmessers. Darüber hinaus kann eine Temperaturzunahme durch eine intensive Begrünung mit Vegetationsflächen und Bäumen weitestgehend aufgefangen werden. Entlang von Fassaden können Baumreihen den größten Effekt erzielen, wobei die klimatische Wirkung bei erfolgtem Kronenschluss am größten ist. Generell ist eine Integration von Vegetations- und Wasserflächen in Aufenthaltsbereichen von Menschen als sehr positiv zu bewerten. In einer anderen Studie weisen Takebayashi et al., 2014 darauf hin, dass im kleinklimatischen Bereich in Straßenzügen Beschattungen durch Bäume und helle Straßenbeläge zur Verringerung der Oberflächentemperaturen führen können. Durch die Beschattung von Bäumen kann auch dieselbe Kühlwirkung erzielt werden, wie sie beispielsweise durch Wind hervorgerufen wird (Akbari et al., 1997). Solecki et al., 2005 sehen ein eindeutiges Energieeinsparungspotential bei Klimaanlage durch das Vorhandensein von Baumbeständen in Straßenzügen. Auf der anderen Seite konnte allerdings auch festgestellt werden, dass Beschattungen durch Bäume (insbesondere Nadelbäumen) auch einen höheren Heizenergiebedarf in den Wintermonaten bewirken können (McPherson et al., 1988).

Shashua-Bar et al., 2009 untersuchte sechs verschiedenartige urbane Räume, auf denen unterschiedliche Kombinationen von Bäumen, Rasen und künstlichen Schattenspendern zu finden waren. Der maximale Kühleffekt wurde in Innenhöfen mit Bäumen und Grasbewuchs

gemessen (32,2°C statt 34,3°C). Von Jansson et al., 2007 wurde ein Park mit 0,15km<sup>2</sup> mit hauptsächlich Grasbewuchs und sommergrünen Bäumen untersucht. Die Lufttemperatur im Vergleich zu bebautem Gebiet war um 0,5°C-0,8°C geringer, mit maximalen Unterschieden jeweils am Abend.

#### **4.1.3 Dachbegrünung**

Dachbegrünungen helfen generell das Phänomen UHI einzudämmen (Lehmann, 2014). Sie stellen eine moderne Art der Bebauung städtischer Wohngebiete dar und verbessern das Wohnklima, indem sie eine Filterwirkung der Luft erzielen, durch ihre aktive Transpiration einen kühlenden Einfluss auf das Mikroklima haben, die Dachflächentemperatur wesentlich absenken und auch einen Schutz gegen Hochwasser darstellen (Hirano und Fujita, 2012, Takebayashi et al., 2007, Kohler et al., 2002). Niachou et al., 2001 beweisen, dass die Temperaturschwankungen (Tag/Nacht) durch Dachbegrünung abgemildert werden können und demnach auch Energie eingespart werden kann. Anhand einer großen Studie zum Thema „Grüne Infrastruktur“ erforschen Foster et al., 2011 die Auswirkungen von Grünflächen und unterschiedlichen Dachflächen auf deren UHI-Eindämmungspotential. Sie kommen zu dem Schluss, dass begrünte Dachflächen in den USA ein erhebliches Energieeinsparungspotential von 15-45% aufweisen. Auch Kolokotsa et al., 2013 weisen auf ein großes Energieeinsparungspotential durch „green roofs“ hin. Hinsichtlich der Auswirkungen von Dachbegrünung auf das Mikroklima kamen Pollak et al., 2011 zu dem Ergebnis, dass eine Dachbegrünung (besonders durch eine Baumbepflanzung) eine reduzierende Auswirkung auf die Lufttemperatur der Umgebung hat.

#### **4.1.4 Fassadenbegrünung**

Pérez et al., 2011 führten ein Experiment durch, welches die Auswirkungen grün bepflanzter Fassaden auf den Energiebedarf von Gebäuden in mediterranen Regionen untersuchte. Im Durchschnitt war die Oberflächentemperatur von Gebäudeteilen ohne Beschattung um 5,5°C höher als jene von Gebäudeteilen mit zumindest teilweiser Begrünung. Der maximale Unterschied konnte im August und September festgestellt werden (bis zu 15,2°C). Eine weitere Studie von Mazzali et al., 2013 untersuchte die thermischen Eigenschaften von drei begrünten Fassaden in Lonigo, Venedig und Pisa. Während der sonnigen Tage betrug der Temperaturunterschied der nicht begrünten Fassaden +12 bis 20°C. Cameron et al., 2014 kamen im Zuge ihrer experimentellen Studie zu dem Ergebnis, dass eine Bepflanzung von Fassaden die Temperaturerhöhung während der Sonneneinstrahlung im Vergleich zu nicht bepflanzten Mauern wesentlich abschwächt. Als möglicher Nebeneffekt stellte sich jedoch heraus, dass in den Abendstunden die begrünten Mauerfassaden eine höhere Temperatur ausweisen als jene von Mauern ohne Begrünung. Olivieri et al., 2014 führten ein Experiment im Norden Madrids während der Sommermonate 2012 durch. Die maximale Reduktion der äußeren Oberflächentemperatur durch begrünte Fassaden betrug zwischen 15,1°C und 31,9°C. Der Durchschnittswert betrug 25,1°C. Im Zuge einer Studie die in den Vereinten Arabischen Emiraten von Haggag et al., 2014 durchgeführt wurde, konnten die Auswirkungen von grünen Fassaden auf die Innentemperatur von Gebäuden untersucht werden. An der begrünten Fassade konnte an sieben aufeinanderfolgenden Tagen im Juni



eine um 6°C kühlere Außentemperatur gemessen werden, als es bei der unbegrünten Fassade der Fall war. Der Temperaturunterschied war an der Innenseite des Gebäudes gleich hoch. Wong et al., 2009 bzw. Pollak et al. 2011 zeigten in ihrer Untersuchung über die Effekte von Fassadenbegrünungen und deren Einfluss auf den Energieverbrauch von Gebäuden, dass auch hier Energieeinsparungsmöglichkeiten in Richtung eines geringeren Kühlaufwandes bestehen. Zusammenfassend führten Hunter et al., 2014 eine Literaturrecherche an Studien zu diesem Thema durch und kamen zu dem Schluss, dass grüne Fassaden zwar ein großes Potential haben die Gebäudetemperaturen im Innenbereich zu beeinflussen, jedoch nicht in jedem Stadtklima und jeder Gebäudeart die gleiche hohen Effekte zu erwarten sind.

#### **4.1.5 Albedoänderung von Dachflächen und Fassaden**

In seiner Studie zeigt Taha H., 1997, 1999 bereits Ende des vorigen Jahrhunderts, dass durch eine Verwendung hochreflektierender Materialien die Strahlungsbilanz städtischer Strukturen wesentlich verbessert werden kann und demzufolge die Sommertagetemperatur in städtischen Gebieten um bis zu 4°C, bzw. die Ozon Belastung um bis zu 16% gesenkt werden kann. Eine Veränderung der Albedo von städtischen Gebieten gehört neben Dachbegrünungen zu den wirksamsten Mittel den UHI-Effekt einzudämmen (Santamouris, 2013, 2014).

Akbari et al. (2012) simulierten den langfristigen weltweiten Kühlungseffekt durch die Erhöhung der Albedo von Landnutzungsflächen zwischen 20° und 45° nördl. Breite um 1% mit  $3 \times 10^{-15}$  K/m<sup>2</sup> korrespondierend mit einer THG (Treibhausgas) Einsparung von 7 kg CO<sub>2</sub> Equiv./m<sup>2</sup>. Beschränkt auf die städtischen Regionen ergibt sich ein Potential von 0.01-0.07 K bzw. 25-150 x 10<sup>-15</sup> g CO<sub>2</sub> Equiv. pro m<sup>2</sup>. Wie schon für begrünte Dachflächen weisen Foster et al., 2011 ein weiteres Energieeinsparungspotential durch weiße Dachflächen von bis zu 60% aus. Für New York City in den USA definieren Rosenzweig et al. (2009) neben den Strategien der Umsetzung von Gründächern und verstärkter städtischer Forstwirtschaft auch die Veränderung der Albedo versiegelter Stadtflächen als sehr geeignete Maßnahme die Eindämmung städtischer Wärmeinseln zu forcieren. Einen wesentlichen Vorteil dabei sieht er in der Verfügbarkeit dafür nutzbarer großer Flächen und den relativ geringen Kosten.

Rosenfeld et al. (1995) stellten einen Zusammenhang zwischen Albedo und Energieverbrauch her. Demnach konnte ein Einzelgebäude durch die Veränderung der Dach- und Fassadenalbedo (weiß) 20-40% an direktem Energieaufwand zur Kühlung einsparen. Eine andere Studie fand zwischen 10-70% Einsparungspotential zur Kühlung in Wohngebäuden (Bretz und Akbari, 1997). Porritt et al., 2001 beobachteten starke Kühleffekte in Hitzeperioden durch hell gestaltete Hausfassaden vor allem in südlich exponierten Räumen. Selbst Tondachziegel mit spezieller Oberflächenbeschichtung zur Eindämmung der Wohnraumtemperatur im Sommer wurden entwickelt und eigneten sich sehr gut zur Reduktion der Wohnrauminnentemperaturen (Pisello et al., 2014). Auch die Studie von Ferrari et al, 2015 geht in diese Richtung, wobei hier spezielle Oberflächenbeschichtungen für Dachziegel entwickelt wurden, die den Rückstrahleffekt eingehender Sonneneinstrahlung signifikant erhöhen. Zu etwas anderen Ergebnissen kamen

Pollak et al., 2011, die beobachteten, dass je höher die Albedo, also je mehr Sonneneinstrahlung von den Fassaden reflektiert wird, desto mehr erwärmen sich auch die Oberflächen in der direkten Umgebung. Sie geben dabei allerdings zu bedenken, dass sich bei geringerer Albedo die beschienene Fassade selbst stärker erwärmt und sowohl tagsüber als auch nach Ende der direkten Sonneneinstrahlung zur Erwärmung der Umgebung durch langwellige Abstrahlung beiträgt und somit einer nächtlichen Abkühlung entgegenwirkt. Somit ist festzuhalten, dass durch ihre starke Reflexion der Sonneneinstrahlung helle Oberflächen die von den Fassaden aufgenommene Sonnenenergie minimieren und somit auch der Überhitzung im Sommer entgegenwirken.

Im bereits zuvor erwähnten Central Europe Projekts der Europäischen Kommission wurden von Fallmann J. et al., 2014 auch die Auswirkungen unterschiedlicher Stadtplanungsmaßnahmen auf dynamische Prozesse im Stadtklima untersucht, bzw. die Wirksamkeit einzelner Strategien bewertet. Dabei zeigte sich, dass auch eine Veränderung der Reflexionseigenschaften von Oberflächen, verglichen mit Begrünung oder Veränderung der Bebauungsdichte, einen großen Einfluss auf bodennahe Lufttemperaturen hat (Abbildung 12). Laut Modellergebnis kann durch die Verwendung von sehr stark reflektierenden Dachmaterialien und Außenanstrichen die Tagesmaximaltemperatur um bis zu 2 °C herabgesetzt werden, wohingegen innerstädtische Grünflächen die Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland für das in folgender Abbildung angeführte Szenario d) im Mittel nur um 1 °C verringern können.

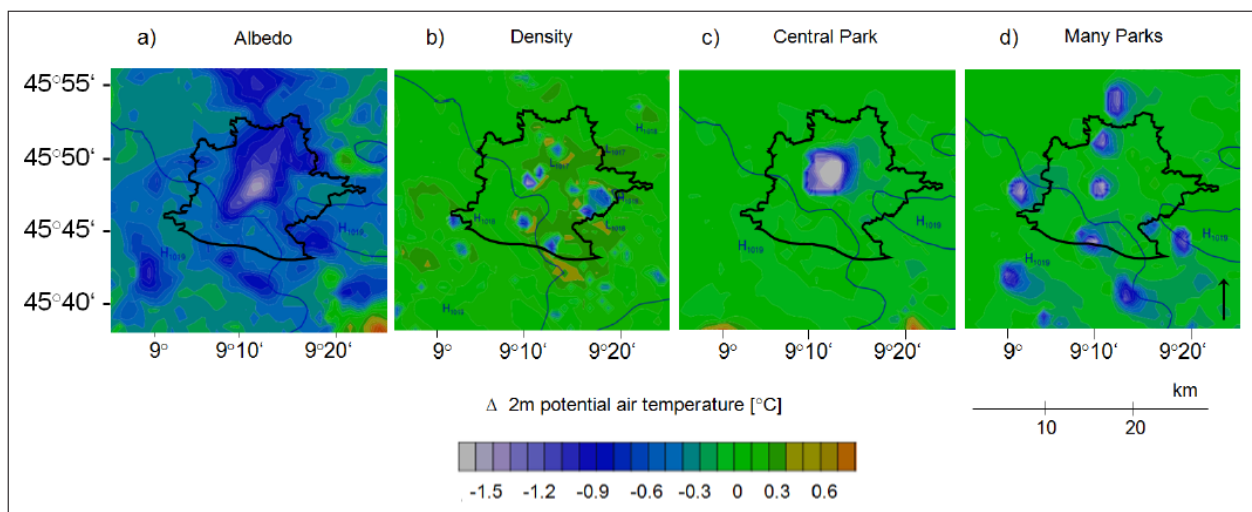


Abbildung 12: Unterschied im Potential von Lufttemperaturveränderungen im Stadtgebiet von Stuttgart in einer Höhe von 2m: a) veränderte Albedo für Dächer und Wände, b) modifizierte Proportionen von Straßenbreite und Gebäudehöhe, bzw. unterschiedliche Begrünungsszenarien mittels eines großen c) und mehreren kleinen Parks d) (Fallmann J. et al. (2014))

Akbari und Mathews, 2012 fordern eine internationale Kampagne für den Einsatz von hochreflexiven Materialien bei Dachflächen und Straßenbelägen in temperierten und tropischen Regionen, um dadurch nicht nur den UHI-Effekt, sondern auch den Klimawandel aktiv zu bekämpfen. Pollak et al., 2011 weisen in ihrer Studie ebenfalls darauf hin, dass eine erhöhte Albedo von Dachflächen und Fassaden zu einer Reduzierung der mittleren

Abstrahltemperatur beitragen kann. Die richtige Auswahl von Materialien zur aktiven Bekämpfung des UHI-Effekts ist dabei besonders wichtig (Alchapar et al., 2014).

Auch Haider et al. (2003) haben gezeigt, dass mittels Veränderungen der Albedo in Stadtgebieten (am Beispiel von Sacramento, CA, USA) ein großes Stromeinsparungspotential vorhanden ist. Memon et al., 2008 haben ebenfalls herausgefunden, dass die Rückstrahleigenschaften von städtischen Strukturen einen wesentlichen Einfluss auf die Entstehung von UHI's haben und dass sich die zukünftige Forschung in diesem Bereich auf Gebäudedesigns und Stadtplanung in dieser Hinsicht ausrichten sollte. Zwei unterschiedliche Dachformen mit Hinblick auf deren Albedo haben Coutts et al., 2013 in Melbourne Australien untersucht. Beim Vergleich von weißen (hohe Albedo) mit begrünten Dächern zeigte sich, dass eine hohe Dachalbedo (kombiniert mit einer Dachdämmung) wahrscheinlich zu den wichtigsten Möglichkeiten zählt, das Mikroklima innerhalb und außerhalb eines Hauses und damit das Stadtklima generell zu verbessern. Begrünte Dachflächen erreichen erst dann vergleichbare positive Werte, wenn sie mit ausreichender Bodenfeuchtigkeit ausgestattet sind (Li D. et al., 2014).

#### **4.1.6 Albedoänderung versiegelter, anderer horizontaler Flächen**

Die Oberflächenbeschaffenheit anderer horizontaler Flächen wie beispielsweise Straßen, Gehwege, Parkflächen, Plätze etc. die bis zu einem Viertel der Stadtfläche ausmachen können, spielt, wie bereits oben erwähnt, ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Eindämmung des UHI-Effekts. Hier spielen folgende Faktoren eine Hauptrolle: a) das Flächenausmaß, b) die Absorptionsfähigkeit und c) die thermische Kapazität des Materials. Doulos et al., 2004 untersuchten verschieden Materialien in dieser Hinsicht und fanden heraus, dass vor allem raue und dunkle Materialien besonders viel Sonnenenergie absorbieren und daher eher in kühleren Klimazonen eingesetzt werden sollten. In einer anderen weit angelegten Studie von Santamouris et al., 2011 kamen die Autoren zum Schluss, dass die Verwendung von unterschiedlichen Materialien einen wesentlichen Einfluss auf das Mikroklima einer Stadt hat. So verfügen besonders helle Materialien mit hohem Reflexions- und Emissivitätsverhalten im Kurzwellenbereich ein hohes Potential den UHI-Effekt in Städten einzudämmen. Selbst hohe Reflexionseigenschaften im Infrarot können die Materialoberflächentemperatur um einige °C abkühlen. Materialien mit spezifischen optischen Eigenschaften (wie z.B. retro-reflektierende Materialien) liefern ähnlich Ergebnisse (Rossi F. et al., 2014). Die Albedo von Gehsteigen und deren Auswirkung auf den Lebenskomfort und das Behagen der Fußgänger haben Lin et al., 2010 untersucht. Sie verglichen vier unterschiedliche Oberflächen wie Gras, Pflasterungen, Beton- und Asphaltflächen und kamen zu dem Schluss, dass eine helle Albedo sehr positive Wirkungen auf das Wohlbefinden der Fußgänger bzw. auf den UHI-Effekt hat. Die mikroklimatischen Simulationen, die für die Stadt Aspern von Pollak et al., 2011 durchgeführt wurden, zeigten, dass eine Asphaltfläche im Vergleich zu Grünflächen das Kleinklima einer Stadt deutlich negativ beeinflusst. Generell gehen die Empfehlungen der Autoren in die Richtung, dass versiegelte Flächen derart gestaltet werden sollen, dass die Versiegelung sich auf Fahrbahnen und Gehsteige beschränkt und alle anderen zu begehenden Flächen offenporig gestaltet bzw. beschattet werden - etwa durch Kiesflächen, besser durch Rasenflächen, sowie durch Pflanzung von großen Einzelbäumen als

Schattenspender. Auch ein Grüngürtel ist ein ideales Element zur Reduzierung von UHI's (Pollak et al., 2011). Ganz generell sollte aus mikroklimatischen Aspekten eine Versiegelung von Flächen so gering wie möglich gehalten werden.

#### **4.1.7 Zusammenhang von UHIs und dem Stromverbrauch in Städten**

In einer Studie in den USA zeigen Kats und Glassbrook, 2015, dass „cool roofs“ genauso zu leistbarerem Wohnen beitragen können, wie die Installation von z.B. PV-Anlagen um Energie zu sparen. In einem Bericht über die Beziehung des zukünftigen und vergangenen Energieverbrauchs zur Heizung und Kühlung in Europa, kommen Toleikyte et al., 2012 zu dem Schluss, dass allen untersuchten Studien zu Folge durch den UHI-Effekt der Heizaufwand im Winter sinken und der Kühlaufwand im Sommer steigen wird.

Durch das Auftreten des UHI-Effekts in bebauten Gebieten haben Radhi et al., 2013 gezeigt, dass der Stromverbrauch in städtischen Regionen Bahrains im Sommer um 10% höher liegt als im Umland von Stadtgebieten. Auch Vardoulakis et al., 2013 beobachtet einen höheren Kühlenergieverbrauch in einer kleinen Stadt Westgriechenlands im Vergleich zum Umland mit Spitzen von über 36% für den Monat August. Die Simulationsergebnisse von Pollak et al., 2011 für die Jahre 2040-2050 (mit prognostiziertem Klimawandel) zeigen, dass für die Seestadt Aspern im 22. Wiener Gemeindebezirk die zukünftigen Heizlasten niedriger sein dürften (um etwa 15 %), während die Kühllasten wahrscheinlich deutlich steigen werden (um etwa 23 %). Diese Resultate legen nahe, dass in Zukunft der Kühlenergieverbrauch in Österreich steigen könnte. Derzeit wird in österreichischen Wohngebäuden eine aktive Kühlung selten benötigt. Wenn sich das durch die Klimaerwärmung und den sich dadurch auch zu erwartenden höheren UHI-Effekt ändern sollte, könnte der Energieverbrauch stark ansteigen.

Weltweit ist nach Isaac et al., 2008 davon auszugehen, dass sich der Energieverbrauch für Raumwärme und Kühlung bis 2100 durch den Klimawandel nur unwesentlich verändern wird, obwohl der Heizbedarf drastisch sinken (-34%), der Energieaufwand zur Raumkühlung mit +72% jedoch erheblich steigen wird (vgl. auch Pezzutto, 2014). Europaweit ist davon auszugehen, dass in Zukunft die Anzahl an Installationen neuer Klimaanlage steigen wird (Hitchin et al., 2013). Innerhalb des Projekts EL.ADAPT erforschten Töglhofer et al., 2012 die Auswirkungen des Klimawandels auf den Strombedarf zu Heiz- und Kühlzwecken in Österreich. Dabei wurde ermittelt, dass der Bedarf 2011-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1961 -1990 zwischen -7% und -14% für Heizzwecke, und zwischen +37% und +144% für Kühlzwecke ausmachen wird. Daraus ergibt sich ein Nettoeinsparungseffekt von -270 GWh/Jahr bis zu -670 GWh/Jahr, was wiederum -0.5% bis -1.2% des gesamten Stromverbrauchs in Österreich gleich kommt. In Memon et al., 2010 wird aufgezeigt, dass sich der Energieaufwand zu Kühlzwecken in allen untersuchten Stadtgebieten infolge des UHI-Effekts im Vergleich zu ländlichen Gebieten als höher erwiesen hat. Der UHI-Effekt zeigt sich in Nächten stärker ausgeprägt als an Tagen. Demnach könnte der Energieaufwand zu Kühlzwecken besonders in Nächten höher liegen als an Tagen, beim Energieaufwand zu Heizzwecken könnte es in den Nachtstunden eine Verringerung geben. Levinson et al., 2010 untersuchten verschiedenste Geschäftsgebäude in 236 Städten in den USA, um den Einfluss

und das Potential von Albedoänderungen von Dachflächen abschätzen zu können. Ganz generell kann gesagt werden, dass typischer Weise bei Geschäftsgebäuden der Einsatz von „Cool roofs“ (hellen Dächern) einen größeren Beitrag zur Energieeinsparung bei der Raumkühlung im Sommer bewirkt, als er umgekehrt zu erhöhtem Heizaufwand im Winter beiträgt. Parker et al., 2002 beziffern die Einsparung des Energieverbrauchs im Wohnbereich für Raumkühlung in Florida, USA mit 18-26%, wenn hoch reflektierende Dachflächen zur Anwendung kommen. Auch Hoff, 2014 beschreibt in seiner Studie den Einsatz von „cool roofs“ in den USA als signifikante Möglichkeit Energiekosten zu Kühlzwecken einzusparen. Hinsichtlich der Einflüsse auf den Heiz- bzw. Kühlbedarf von Gebäudekomplexen zeigen die Simulationen von Pollak et al, 2011 jedoch andererseits, dass bei den betrachteten Fassadentypen (weißer, grüner bzw. dunkler Putz sowie PV-Fassade) keine signifikanten Unterschiede in Heiz- und Kühllasten zu beobachten waren. Auch die Ergebnisse der Szenarien mit verschiedenen Dachvarianten (Gründach und Schotterdach) zeigten keine signifikanten Unterschiede. Allerdings zeigte der Beschattungseffekt durch den Einsatz von Baumreihen vor Fassaden ein großes Reduktionspotential der Gebäudekühllast, idealerweise aber kein umgekehrtes Ergebnis bei der Heizlast im Winter (keine Belaubung der Bäume, daher keine Abschattung der Bäume).

Der Einsatz von PV-Anlagen auf Dächern hat ebenfalls einen positiven Einfluss auf das Stadtklima. Der Studie von Massen et al., 2014 zu Folge kann alleine durch die Abschattung der PV Paneele auf Dachflächen ein positiver Effekt auf das städtische Wohn- und Mikroklima erzeugt werden.

Die in der Literatur beschriebenen Maßnahmen wurden spezifisch auf ihre positiven, potentiellen Auswirkungen auf das Stadtklima untersucht und in Tabelle 7 zusammengefasst. Tabelle 7 beschreibt für die untersuchten Maßnahmen deren Auswirkung auf den UHI-Effekt, deren Durchführbarkeit sowie weitere positive Nebeneffekte auf das Stadtklima und den Wohnkomfort in Städten. Anhand dieser Ergebnisse wurde in weiterer Folge beurteilt, welche Maßnahmen in der anschließenden Modellsimulation näher betrachtet werden.

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass ein wichtiger Parameter zur Eindämmung des UHI-Effekts auch die Albedoänderung horizontaler und vertikaler Flächen sein kann und daher näher untersucht werden soll. Dach- und Fassadenbegrünungen, bzw. das Vorhandensein von Baumbeständen in Straßen dürften im Vergleich dazu ein ähnliches Potential darstellen. Hier gilt es in erster Linie den positiven Effekt in Bezug auf die Kühllastsenkung von Wohngebäuden herauszustreichen. Die Vergrößerung von Park und Vegetationsflächen (z.B. Grüngürtel etc.) im Verhältnis zu versiegelten Flächen haben in der Regel ein sehr großes UHI-Reduktionspotential, sind aber in ihrer Quantität und Durchführbarkeit abhängig von bestehenden und zukünftig geplanten Stadtstrukturen.

Auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche wird empfohlen, die Parameter **Albedoänderung von Dachflächen, aber auch anderer horizontaler Flächen** einerseits, und andererseits den Einfluss von **Gründächern bzw. Fassadenbegrünungen** zu modellieren, um so nähere Auskünfte hinsichtlich der menschlichen Einflussnahme auf das Mikroklima in Wien zu erhalten.

Tabelle 7: Low-Tech Maßnahmen zur Reduzierung des UHI-Effekts in Städten und der zu erwartende Effekt auf das Mikroklima bzw. auf den Stromverbrauch in Wien (+ positiver Beitrag, 0 neutral, - negativer Beitrag)

Low Tech-Maßnahmen	Zu erwartender Effekt in Bezug auf UHI Reduktion	Mögliche realistische Durchführbarkeit der Maßnahme inkl. Kosten	Zusätzliche positive Effekte auf das Stadtklima	Zusätzliche positive Effekte auf den Wohnkomfort in Gebäuden
<b>Parks und Grünflächen</b>	++	0 (+)	++	0 (+)
<b>Bäume und Vegetation</b>	+	+++	++	++
<b>Dachbegrünung</b>	++	++	++	++
<b>Fassadenbegrünung</b>	++	+	++	+++
<b>Albedoänderung von Dachflächen und Fassaden</b>	++	++	+	++
<b>Albedoänderung anderer horizontaler Flächen</b>	+++	+	0	0

Für die praktische Umsetzung schlägt das Projektteam anhand der vorhandenen Studien und dem “State of the Art“ Review die Anwendung eines Methodenmix vor, wobei in erster Linie die Berücksichtigung der praktischen Umsetzbarkeit / Auswirkungen / Kosten zum Tragen kommt. Die Modellierungsvarianten die im Projekt in weiterer Folge berechnet wurden sollen dabei einen wesentlich Beitrag zur Entscheidungsfindung liefern. Die weitere Modellierung der Veränderungen an **Parks- und Grünflächen** wird in dieser Studie nicht weiter verfolgt.

## 4.2 Erhebung der Dachflächentypen und der Oberflächenalbedo aus Fernerkundungsdaten

### 4.2.1 Erhebung der Dachflächentypen von Wien

Die Flächenanteile unterschiedlicher Dachkategorien wurden für die Berechnung der direkten Klimaschutzmaßnahme, der Reduktion des Strahlungsantriebes herangezogen (Kapitel 3.3.1 und 4.4.1). Um die Flächenanteile ausgewählter Dachkategorien abzuschätzen, wurde eine Stichprobenerhebung durchgeführt. Dazu wurden mittels Zufallsauswahl 10.000 Stichprobenpunkte über das Stadtgebiet verteilt und visuell im geographischen Informationssystem interpretiert. Als Basis für die Interpretation wurde das Orthofotomosaik der Stadt Wien mittels Web-Map-Service eingebunden und die in der u.a. Tabelle angeführten Kategorien interpretiert. Die Auswertung erfolgte einerseits für das gesamte Stadtgebiet von Wien und andererseits für die in folgender Abbildung zur Kategorie „Wien-Zentrum“ zusammengefassten Bezirken.



Abbildung 13: Stratifizierung für die Stichprobenerhebung wobei die Bezirke die zur Kategorie „Wien Zentrum“ zusammengefasst wurden in orange und die restlichen Bezirke in blau dargestellt sind.

Tabelle 8: Flächenanteile ausgewählter Dachkategorien aus Stichprobeninventur

Gesamtfläche (km <sup>2</sup> )	Gesamt Wien		Wien Zentrum	
	Anteil (%)	Fläche (km <sup>2</sup> )	Anteil (%)	Fläche (km <sup>2</sup> )
Wien	100	414,87	33	138,71
Dachflächen:	87	360,94	77	106,80
Nicht-Dachflächen:	13	53,93	23	31,90
Blechdach - flach	9	4,85	7	2,23
Blechdach - schräg	7	3,78	8	2,55
Gründach - flach	2	1,08	2	0,64
Eternitdach - schräg	24	12,94	24	7,66
Glas - schräg	3	1,62	3	0,96
Beton/Schotter - flach	24	12,94	20	6,38
Ziegeldach - schräg	31	16,72	36	11,48

Gegenüber einer flächendeckenden Erhebung kann eine derartige Stichprobeninventur mit relativ geringem Aufwand auch kurzfristig umgesetzt werden, wobei durch Wiederholungsinventuren, z.B. nach Vorliegen aktualisierter Orthofotodaten auch Trendanalysen möglich sind. Eine derartige stichprobenbasierte Inventur könnte auch für weitere Fragestellungen umgesetzt werden, wie z.B. zur genauen Abschätzung des Versiegelungsgrades, Änderungen des Versiegelungsgrades über die Zeit, durch Bäume überschirmte Fläche usw..

#### 4.2.2 Oberflächenalbedo aus Satellitenbild-Zeitreihen

Die Oberflächenalbedo des Wiener Stadtgebiets wurde für den Zeitraum 2000-2014 mittels einer MODIS Satellitenbild Zeitreihe mit einem Zeitintervall von 8 Tagen bestimmt. Während MODIS Daten eine hohe radiometrische Genauigkeit und auch eine hohe zeitliche Auflösung besitzen, ist die räumliche Auflösung mit 250m bis 500m gering.

Tabelle 9: Übersicht von MODIS-Landsat basierten Albedomessungen verschiedener Landnutzungskategorien in %

Landnutzungskategorie	Gesamt	Sichtbarer Bereich	Naher Infrarot Bereich
Locker bebautes Wohn(misch)gebiet	15,0	9,3	20,0
Wohn(misch)gebiet mittlerer Dichte	15,0	9,3	19,3
dichtes Wohn(misch)gebiet	14,0	10,3	17,3
Großvolumiger, solitärer Wohn(misch)bau	15,0	11,3	18,3
Büro- und Verwaltungsstrukturen	16,0	13,7	18,3
solitäre Handelsstrukturen	18,0	15,3	20,0
Geschäfts-, Kern- u. Mischgebiet	15,0	13,5	17,3
Mischnutzung wenig dicht / alter Ortskern	15,3	10,3	20,0
Industrie, prod. Gewerbe, Großhandel inkl. Lager	17,0	14,7	19,7
Kultur, Freizeit, Religion, Messe	15,3	11,0	19,0
Gesundheit und Einsatzorganisationen	15,0	11,0	18,0
Bildung	16,0	12,7	19,3
Sport und Bad (Indoor)	20,2	16,2	23,3
Militärische Anlagen	15,8	12,0	19,2
Kläranlage, Deponie	15,2	12,7	17,0
Energieversorgung, Rundfunkanlagen	17,0	13,0	19,7
Wasserversorgung	16,3	9,7	22,3
Transformationsfl., Baustelle, Materialgewinnung	18,0	13,7	23,3
Straßenraum begrünt	16,5	10,0	22,0
Straßenraum unbegrünt	13,8	11,8	15,5
Parkplätze, Parkhäuser	16,2	13,5	19,7
Bahnhöfe, Bahnanlagen	14,7	12,7	16,7
Transport und Logistik inkl. Lager	16,3	13,7	19,3
Park, Grünanlage	16,0	9,0	22,0
Sport und Bad (Outdoor), Camping	18,0	10,3	24,7
Friedhof	16,0	10,3	21,0
Acker	17,3	10,7	23,7
Weingarten	17,0	10,3	23,7
Gärtnerei, Obstplantage	17,0	12,3	21,3
Wald	15,7	7,7	23,0
Wiese	17,3	9,0	25,3
Gewässer inkl. Bachbett	7,7	9,3	5,0



Daher wurde die hohe zeitliche Auflösung der MODIS Daten mit der höheren räumlichen Auflösung von „Landsat Thematic Mapper“ Satellitenbilddaten verbunden. Die daraus resultierende Karte der Albedowerte dient dabei als Input für das MUKLIMO\_3 Stadtklima-Modell (siehe Kapitel 3.2).

### 4.3 Stadtklimatologische Simulationen zur Vermeidung der Hitzebelastung

#### 4.3.1 Referenzsimulation

Um quantitative Aussagen über die zu untersuchenden Auswirkungen städtebaulicher Veränderungen tätigen zu können, bedarf es einer möglichst realitätsnahen Simulation des klimatologischen Istzustandes der gegenwärtigen Bebauung und der daran gekoppelten Landnutzungsparametrisierung (Tabelle 10), der Referenzsimulation. Diese dient als Bezug für alle nachfolgend gezeigten Ergebnisse, die jeweils die Änderungen gegenüber der als repräsentativen Istzustand interpretierten Referenzsimulation anzeigen. Die allgemeine Beschreibung der Parameter ist in Tabelle 2 angeführt, die Landnutzungsklassen sind in Abbildung 8 dargestellt.

Exemplarisch sei hier für die Landnutzungsklasse 1 die Wertezuordnung der Flächenanteile gezeigt: innerhalb einer Gitterzelle der Landnutzungsklasse 1 beträgt der Flächenanteil der Gebäude des ersten Typs ( $vg1$ ) 0,19 der von der Gitterzelle überdeckten Grundfläche von 1ha. Abzüglich des Anteils dieser Gebäudegrundfläche ( $vg1$ ) werden die verfügbaren  $(1-vg1)$  dh.  $(100-19)\% = 81\%$  der Gitterzelle in versiegelte ( $vs$ ) und unversiegelte Flächenanteile getrennt (vgl. auch Tabelle 2). Die Flächenanteile der versiegelten Flächen, dh. der Versiegelungsgrad der Flächen zwischen Gebäuden ( $vs$ ), beziehen sich auf die verfügbare unbebaute Fläche, dh. bei einem Versiegelungsgrad  $vs = 0,21$  entsprechen 21% von 81% der Gitterzelle 17% der Fläche dieser Gitterzelle. Analog ist der Anteil der unversiegelten Flächen zwischen den Gebäuden über  $(1-vs) = (1-0,21) = 0,79$  bestimmbar, das entspricht nach  $79\% \times 81\%$  etwa 64% der Gitterzellenfläche. Die Anteile der Gebäude, der versiegelten und unversiegelten Flächen zwischen diesen Gebäuden ergeben in Summe wiederum die Gitterzellenfläche:  $0,19 + 0,17 + 0,64 = 1$ . Der Anteil der bewachsenen Fläche an den unversiegelten Flächen, dh. die Bodenbedeckung durch den Bewuchs der Canopy-Schicht ( $\sigma$ ), berechnet sich bezogen auf die unversiegelten Flächen aus  $(1-vg1) \times (1-vs) \times \sigma = 0,81 \times 0,79 \times 0,95 = 0,64 \times 0,95$  zu etwa 61% der Gitterzellenfläche, der unbewachsenen Flächen analog aus  $0,64 \times (1-0,95)$  zu ca. 3% des Flächeninhalts der Gitterzellen.

Zusammengefaßt bedeutet das: auf eine Gitterzelle mit 1ha Fläche der Landnutzungsklasse1 entfallen 1900m<sup>2</sup> auf Gebäude, 1701m<sup>2</sup> auf versiegelte Flächen zwischen diesen Gebäuden, 6399m<sup>2</sup> auf unversiegelte Flächen, von denen wiederum 6079m<sup>2</sup> bewachsen, die übrigen 320m<sup>2</sup> unbewachsen sind.

Tabelle 10: Landnutzungsparametrisierung der Referenzsimulation

Kategorie	Klasse	vg1	wai1	h1	vs	z0	hbm	hst	bf0	bf1	lai	hca	sigbm	sigma	grant	albw	albd	albvs
Baulandnutzung	1	0,19	1,20	5	0,21	0,2	0	0	0	0	1	0,5	0	0,95	0	0,3	0,150	0,138
	2	0,28	1,80	8	0,27	0,2	0	0	0	0	1	0,5	0	0,90	0	0,3	0,150	0,138
	3	0,55	2,10	15	0,38	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,80	0	0,3	0,140	0,138
	4	0,33	2,75	17	0,34	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,85	0	0,3	0,150	0,138
	5	0,58	2,75	17	0,41	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,60	0	0,3	0,160	0,138
	6	0,50	1,30	9	0,46	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,60	0	0,3	0,180	0,138
	7	0,74	3,20	20	0,37	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,60	0	0,3	0,150	0,138
	8	0,33	1,30	6	0,27	0,2	0	0	0	0	1	0,5	0	0,71	0	0,3	0,153	0,138
	9	0,37	0,90	8	0,44	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,70	0	0,3	0,170	0,138
	10	0,36	1,90	12	0,38	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,75	0	0,3	0,153	0,138
	11	0,28	2,30	13	0,34	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,71	0	0,3	0,150	0,138
	12	0,38	2,58	11	0,32	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,60	0	0,3	0,160	0,138
	13	0,62	2,40	10	0,37	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,51	0	0,3	0,202	0,138
	14	0,22	2,30	9	0,37	0,2	0	0	0	0	1	0,3	0	0,65	0	0,3	0,158	0,138
	15	0,07	0,50	6	0,64	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,43	0	0,3	0,152	0,138
	16	0,17	1,50	10	0,37	0,2	0	0	0	0	1	0,3	0	0,65	0	0,3	0,170	0,138
	17	0,05	0,90	5	0,16	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,97	0	0,3	0,163	0,138
	18	0,09	0,90	6	0,53	0,2	0	0	0	0	1	0,4	0	0,52	0	0,3	0,180	0,138
Verkehr, Transport	19	0	0	0	0,60	0,1	9	5	0,8	0,05	1	0,4	0,42	0,80	0	0,3	0,165	0,138
	20	0	0	0	0,63	0,1	9	5	0,8	0	1	0,5	0,22	0,60	0	0,3	0,138	0,138
	21	0,15	1,60	9	0,53	0,1	0	0	0	0	1	0,4	0	0,52	0	0,3	0,162	0,138
	22	0,33	1,30	7	0,57	0,1	0	0	0	0	1	0,5	0	0,44	0	0,3	0,147	0,138
	23	0,21	0,40	8	0,53	0,1	0	0	0	0	1	0,4	0	0,38	0	0,3	0,163	0,138
Grünland	24	0	0	0	0,35	0,2	10	5	0,8	0,05	1	0,4	0,28	0,95	0	0,3	0,160	0,138
	25	0	0	0	0,28	0,2	10	5	0,8	0,05	1	0,3	0,14	0,66	0	0,3	0,180	0,138
	26	0	0	0	0,25	0,2	9	5	0,8	0,05	1	0,6	0,25	0,90	0	0,3	0,160	0,138
	27	0	0	0	0,07	0,1	7	3	0	0,03	1	0,5	0,03	0,91	0	0,3	0,173	0,138
	28	0	0	0	0,06	0,1	7	3	0,3	0,03	1	0,6	0,07	0,92	0	0,3	0,170	0,138
	29	0	0	0	0,38	0,1	7	3	0,3	0,03	1	0,4	0,06	0,69	0	0,3	0,170	0,138
	30	0	0	0	0	0,2	20	8	0,9	0,10	1,5	1	0,90	0,95	0	0,3	0,157	0,138
	31	0	0	0	0	0,1	11	6	0,1	0,05	1	0,5	0,25	0,78	0	0,3	0,173	0,138
Wasser	32	0	0	0	0	0,001	0	0	0	0	1	0	0,00	0	0,3	0,077	0,138	

Für die in den Folgeexperimenten vornehmlich betroffene Kategorie der Baulandnutzung, liegen die charakteristischen Werte für *vg1*, den Gebäudeflächenanteil an der Grundfläche, im Bereich 0,2 bis 0,6 mit einem Maximum für die Klasse 7, jene des Geschäfts-, Kern- und Mischgebiets, von 0,74. Der auf die nicht bebauten Bereiche bezogene Versiegelungsgrad *vs* der Flächen zwischen den Gebäuden ist z.B. in den solitären Handelsstrukturen und industriell, gewerblich genutzten Klassen im Vergleich zu Landnutzungsklassen der Wohngebiete höher, mit einem Höchstwert von 0,64 für die Klasse der Kläranlage, Deponie, das entspricht etwa 60% der Gesamtfläche der Landnutzungsklasse15. Hingegen liegt der Versiegelungsgrad *vs* der Wohn(misch)gebiete zwischen 0,21 und 0,38 und ergibt einen versiegelten Flächenanteil von etwa 18% an der jeweiligen Gesamtfläche der Klassen1-3. Der Grünanteil *grant* und die Albedo der Wandflächen *albw* unterliegen hier keinen Änderungen gegenüber den Vorgabewerten *grant* = 0 und *albw* = 0,3 innerhalb des Modells MUKLIMO\_3. Der Vorgabewert für die Albedo der versiegelten Flächen *albvs* wurde aus dem Mittelwert der, aus den Satellitenbild-Zeitreihen bestimmten, Albedowerte jener Landnutzungsklassen die in der Referenz nahezu nur aus versiegelten Flächen bestehen definiert mit *albvs* = 0,138. Die Werte für den Parameter der Dachalbedo *albd* wurden gemäß der Ergebnisse aus der aktuellen Untersuchung der Oberflächenalbedo aus Satellitenbild-Zeitreihen (Tabelle 9) gesetzt, und liegen in einem Bereich von 0,140 bis 0,202. Diese Referenzsimulation wurde mittels Cuboid-Methode bezüglich der Klimanormalperiode 1981-

2010 ausgewertet, und zeigt in Abbildung 14 ein möglichst realitätsnahes Abbild des Istzustandes für den Klimaparameter der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage (ST) ( $T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$ ). Aus den Stationszeitreihen ergeben sich für diese Periode für die Station Wien Innere-Stadt (WIS) und die Station Wien Hohe-Warte (WHW) Werte für ST von 72,3 Tagen und 64,1 Tagen und für HT von 21,2 Tagen und 15,2 Tagen.

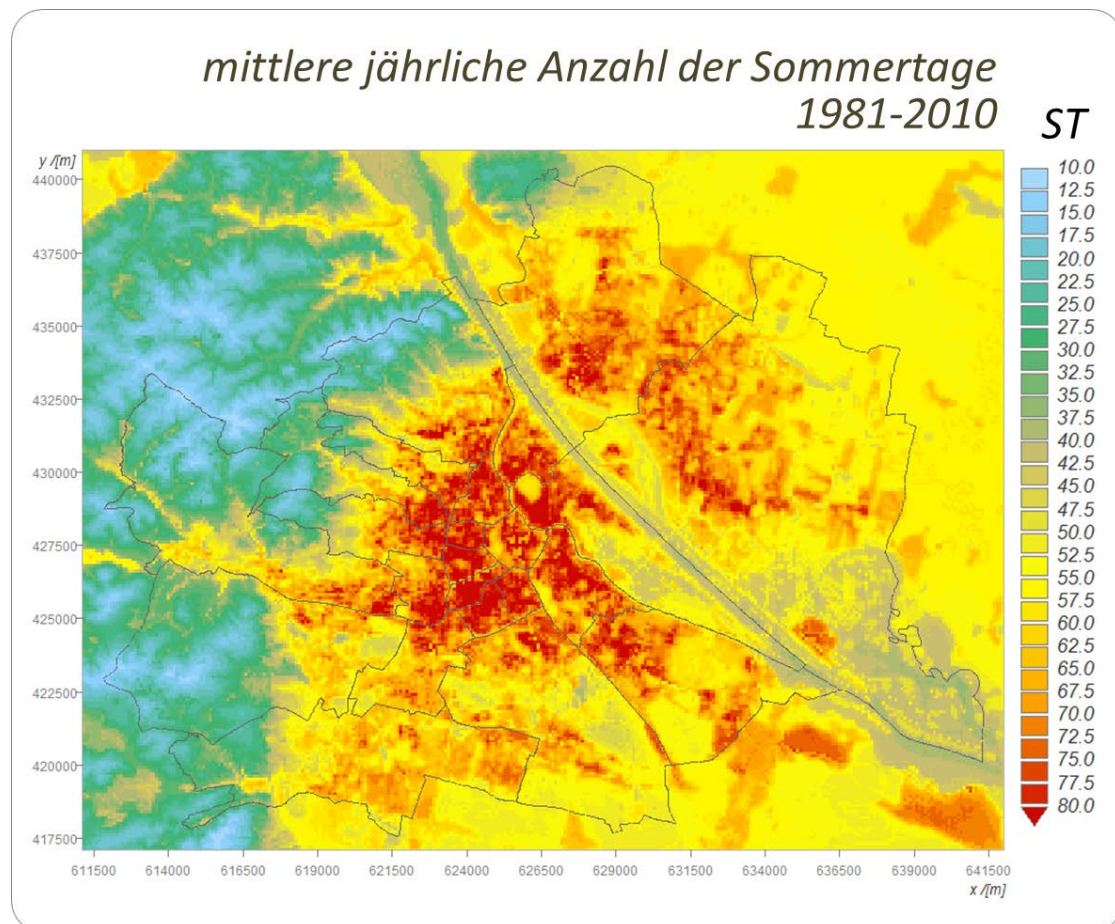


Abbildung 14: Auswertung der Referenzsimulation: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage (ST) für Wien bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010

Die leichte Überschätzung in dieser Simulation gegenüber jenen Werten die aus den Beobachtungszeitreihen berechnet wurden, wurde als eine für die Folgeergebnisse annehmbare Abweichung eingestuft, insbesondere, weil das Augenmerk der Ergebnisse auf Differenzfeldern liegt, und die Flächenverteilung des Parameters die typische Charakteristik der Domaine in der verwendeten Modellversion gut wiedergibt.

#### **4.3.2 Simulationsergebnisse**

Thematisch gruppiert, wurden insgesamt 44 Simulationen durchgeführt. Diese Gliederung umfasst Simulationen, die aufgrund des gewählten Parametersettings theoretische Aussagen zulassen, um einen Eindruck von Qualität und Quantität der simulierten Einzelmaßnahme zu gewinnen, sowie Experimenten, die konkrete kombinierte Adaptierungsmaßnahmen simulieren. Eine Übersicht ist in Tabelle 11 angeführt. Gewählte Einzelexperimente, deren Eingangsparameter und ihre ableitbaren Effekte werden im Anschluss näher diskutiert.

Tabelle 11: Übersicht der durchgeführten Simulationen (Ex id = Experiment Nr.)

Ex.id	Kurzbeschreibung des Experiments [Landnutzungsparameter] [betroffene Landnutzungs-klasse]
Albedo der Dachflächen	
01	Verminderung der Dachalbedo um 0,10 [ $albd = albd_{ref} - 0,10$ ] [1-18]
02	Verminderung der Dachalbedo um 0,05 [ $albd = albd_{ref} - 0,05$ ] [1-18]
03	Erhöhung der Dachalbedo um 0,05 [ $albd = albd_{ref} + 0,05$ ] [1-18]
04	Erhöhung der Dachalbedo um 0,10 [ $albd = albd_{ref} + 0,10$ ] [1-18]
05	Erhöhung der Dachalbedo um 0,15 [ $albd = albd_{ref} + 0,15$ ] [1-18]
06	Erhöhung der Dachalbedo um 0,20 [ $albd = albd_{ref} + 0,20$ ] [1-18]
07	Erhöhung der Dachalbedo um 0,25 [ $albd = albd_{ref} + 0,25$ ] [1-18]
08	Erhöhung der Dachalbedo um 0,30 [ $albd = albd_{ref} + 0,30$ ] [1-18]
09	Erhöhung der Dachalbedo um 0,50 [ $albd = albd_{ref} + 0,50$ ] [1-18]
Anteil der Gründächer	
10	Grünanteil der Dachfläche: 5% [ $grant = 0,05$ ] [1-18]
11	Grünanteil der Dachfläche: 10% [ $grant = 0,10$ ] [1-18]
12	Grünanteil der Dachfläche: 20% [ $grant = 0,20$ ] [1-18]
13	Grünanteil der Dachfläche: 30% [ $grant = 0,30$ ] [1-18]
14	Grünanteil der Dachfläche: 50% [ $grant = 0,50$ ] [1-18]
15	Grünanteil der Dachfläche: 75% [ $grant = 0,75$ ] [1-18]
16	Grünanteil der Dachfläche: 100% [ $grant = 1,00$ ] [1-18]
Anwendung gewählter Materialien bestimmter Albedo: versiegelte Flächen	
17	Erhöhung der Albedo der versiegelten Flächen entsprechend der Anwendung heller Farbe [ $albvs = 0,71$ ] [1-18]
18	Erhöhung der Albedo der versiegelten Flächen entsprechend der Anwendung hellgrauer Farbe [ $albvs = 0,30$ ] [1-18]
Anwendung gewählter Materialien bestimmter Albedo: Wandflächen	
19	Verminderung der Albedo der Wandflächen entsprechend der Adaptierung mit Photovoltaikerelementen [ $albw = 0,1$ ] [1-18]
20	Erhöhung der Albedo der Wandflächen entsprechend der Anwendung heller Fassadenfarbe [ $albw = 0,8$ ] [1-18]
21	Verminderung der Albedo der Wandflächen entsprechend der Anwendung dunkler Fassadenfarbe [ $albw = 0,2$ ] [1-18]
Anwendung gewählter Materialien bestimmter Albedo auf spezifische Landnutzungs-klassen	
22	Erhöhung der Albedo der Dachflächen entsprechend der Anwendung hochreflektierender, weißer Dachziegel [ $albd = 0,680$ ] [1-3]
23	Erhöhung der Albedo der Dachflächen entsprechend der Anwendung hellfarbiger Dachsteine [ $albd = 0,328$ ] [1-3]
24	Verminderung der Albedo der Dachflächen entsprechend der Adaptierung mit Photovoltaikerelementen [ $albd = 0,1$ ] [1-18]
25	Adaptierung des proportional auf alle Landnutzungs-klassen angewandten Flächenanteils von 40% der Blech- und Schotterdächer an der gesamten Dachfläche Wiens, entsprechend einer Bedeckung realisiert mit hochreflektierendem Aluminiumblech mit Albedo 0,73 [ $albd = (albd_{ref} \cdot (1-0,40) + Albedo_{Alu} \cdot 0,40) / 2$ ] [1-18]
26	Adaptierung der Dachflächen der Landnutzungs-klassen großvolumigen Wohnbaues, industriell-gewerblich gewidmeter Objekte und öffentlicher Gebäude entsprechend einer Bedeckung, realisiert mit hochreflektierendem Aluminiumblech mit Albedo 0,73 [ $albd = 0,73$ ] [4, 5, 9-18]
27	Adaptierung des proportional auf die gewählten Landnutzungs-klassen angewandten Flächenanteils von 40% der Blech- und Schotterdächer an der gesamten Dachfläche Wiens, entsprechend einer Bedeckung realisiert mit hochreflektierendem Aluminiumblech mit Albedo 0,73 [ $albd = (albd_{ref} \cdot (1-0,40) + Albedo_{Alu} \cdot 0,40) / 2$ ] [4, 5, 9-18]
28	Adaptierung des proportional auf alle Landnutzungs-klassen angewandten Flächenanteils von 55% der Ziegel- und Eternitdächer an der gesamten Dachfläche Wiens, entsprechend einer Bedeckung realisiert mit hochreflektierender weißer Keramik mit Albedo 0,68 [ $albd = (albd_{ref} \cdot (1-0,55) + Albedo_{weisse\ Keramik} \cdot 0,55) / 2$ ] [1-18]
29	Adaptierung der Dachflächen der Landnutzungs-klassen der Wohn-, Geschäfts- und Bildungsgebäude entsprechend einer Bedeckung, realisiert mit hochreflektierender weißer Keramik mit Albedo 0,68 [ $albd = 0,68$ ] [1-3, 7, 8, 12]
30	Adaptierung des proportional auf die gewählten Landnutzungs-klassen angewandten Flächenanteils von 55% der Ziegel- und Eternitdächer an der gesamten Dachfläche Wiens, entsprechend einer Bedeckung realisiert mit hochreflektierender weißer Keramik mit Albedo 0,68 [ $albd = (albd_{ref} \cdot (1-0,55) + Albedo_{weisse\ Keramik} \cdot 0,55) / 2$ ] [1-3, 7, 8, 12]
Anteil der Realisierung des potentiellen Gründachanteils	
31	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 10% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 0,1 \cdot potgrant$ ] [1-18, 21-23]
32	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 20% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 0,2 \cdot potgrant$ ] [1-18, 21-23]
33	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 30% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 0,3 \cdot potgrant$ ] [1-18, 21-23]
34	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 50% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 0,5 \cdot potgrant$ ] [1-18, 21-23]
35	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 75% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 0,75 \cdot potgrant$ ] [1-18, 21-23]
36	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 100% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 1,0 \cdot potgrant$ ] [1-18, 21-23]

Fortsetzung Tabelle 11

Ex.lid	Kurzbeschreibung des Experiments [Landnutzungsparameter] [betroffene Landnutzungs-kategorie]
Kombinierte Anwendung gewählter Materialien und Gründächern auf Dachflächen und andere Oberflächen	
37	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 50% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 0,5 \cdot potgrant$ ] und Adaptierung der verbleibenden Dachrestfläche mit Photovoltaik-elementen [ $albd = 0,1$ ] [1-18, 21-23]
38	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 50% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 0,5 \cdot potgrant$ ] und Adaptierung der verbleibenden Dachrestfläche mit hellfarbigen Dachsteinen [ $albd = 0,328$ ] [1-18, 21-23]
39	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 50% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 0,5 \cdot potgrant$ ] und Adaptierung der verbleibenden Dachrestfläche mit hochreflektierenden, weißen Dachziegeln [ $albd = 0,680$ ] [1-18, 21-23]
40	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 100% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 1,0 \cdot potgrant$ ] und Adaptierung der verbleibenden Dachrestfläche mit Photovoltaik-elementen [ $albd = 0,1$ ] [1-18, 21-23]
41	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 100% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 1,0 \cdot potgrant$ ] und Adaptierung der verbleibenden Dachrestfläche mit hellfarbigen Dachsteinen [ $albd = 0,328$ ] [1-18, 21-23]
42	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 100% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 1,0 \cdot potgrant$ ] und Adaptierung der verbleibenden Dachrestfläche mit hochreflektierenden, weißen Dachziegeln [ $albd = 0,680$ ] [1-18, 21-23]
43	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 50% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 0,5 \cdot potgrant$ ], Adaptierung der verbleibenden Dachrestfläche mit hochreflektierendem Deckmaterial, landnutzungsabhängig entsprechend weiße Keramik [ $albd = 0,680$ ] bzw. Aluminiumblech [ $albd = 0,730$ ], Erhöhung der Albedo der Wandflächen entsprechend der Anwendung heller Fassadenfarbe [ $albw = 0,8$ ] und Erhöhung der Albedo der versiegelten Flächen entsprechend der Anwendung heller Farbe (Weißbeton) [ $albs = 0,71$ ] [1-18, 21-23, 1-32]
44	Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 100% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche [ $grant = 1,0 \cdot potgrant$ ], Adaptierung der verbleibenden Dachrestfläche mit hochreflektierendem Deckmaterial, landnutzungsabhängig entsprechend weiße Keramik [ $albd = 0,680$ ] bzw. Aluminiumblech [ $albd = 0,730$ ], Erhöhung der Albedo der Wandflächen entsprechend der Anwendung heller Fassadenfarbe [ $albw = 0,8$ ] und Erhöhung der Albedo der versiegelten Flächen entsprechend der Anwendung heller Farbe (Weißbeton) [ $albs = 0,71$ ] [1-18, 21-23, 1-32]

Für jedes Experiment wurde die mittlere jährliche Anzahl der Sommertage bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010 via Cuboid-Methode berechnet und dieses Ergebnis mit jenem der Referenzsimulation verglichen. Aus diesen Differenzfeldern wurde für die Stationsorte WIS und WHW jeweils ein Mittelwert aus den umgebenden vier Gitterwerten berechnet, sowie für die Landnutzungskategorie der Baulandnutzung und explizit für die repräsentative Landnutzungs-kategorie 3, dichtes Wohn(misch)gebiet, ein Mittelwert ( $\Delta ST$ ) mit zugehöriger Standardabweichung (sd) der Selektion. (Tabelle 12 - Tabelle 17) Bei der Interpretation der numerischen Ergebnisse sei darauf hingewiesen, dass Änderungen  $\Delta ST < 1$  Tag unterhalb der Modellgenauigkeit liegen.

Innerhalb der Experimente 1 - 9 wurde eine stufenweise Verminderung bzw. Erhöhung der Albedo der gesamten Dachflächen aller Klassen der Baulandkategorie simuliert. Der Mittelwert der realen Albedo des baulichen Istzustandes für die Baulandkategorie beträgt ca. 0,16. Von diesem Wert ausgehend ergeben sich unter Berücksichtigung der Rückstrahleigenschaften real einsetzbarer Baustoffe (Tabelle 11, Experimente 22-30), die eine abzudeckende Spannweite der Dachalbedo von ca. 0,1 bis 0,7 vorgeben, die gewählten Abstufungen: -0,10, -0,05, +0,05, +0,1, +0,15, +0,2, +0,25, +0,3, +0,5. Die Experimente 10-16 zur Dachbegrünung setzen ihren Bezug ebenso auf die gesamte Dachfläche. Diese steht zwar für diese Nutzung real nicht zur Verfügung, jedoch ermöglicht diese Gruppe an Simulationen einen direkten Vergleich mit der zuvor genannten. Das gestattet eine vergleichende Abschätzung der Effekte betreffend der Maßnahmen Dachalbedo vs. Gründach. Die numerischen Ergebnisse in Tabelle 12 zeigen, dass die Auswirkungen dieser baulichen Maßnahmen für vergleichbar ausgeprägte Intensitäten dieser Maßnahmen, wie in z.B. Simulation 3 vs. 10 und Simulation 9 vs. 15, quantitativ ähnlich sind, d.h. die Reduktion

betreffend die mittlere jährliche Anzahl der Sommertage liegt für die Maßnahmen Änderung der Dachalbedo und Gründachnutzung in der gleichen Größenordnung.

Tabelle 12: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) 1981-2010 der Experimente: 1-9: Albedo der Dachflächen (links) bzw. Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) 1981-2010 der Experimente 10-16: Anteil der Gründächer (rechts)

Ex.ID	Beobachtungsort bzw. Landnutzungs-kategorie	$\Delta ST$	sd
01	Wien Innere Stadt	1,5	
	Wien Hohe Warte	0,9	
	LN-Klasse 3	1,2	$\pm 0,3$
	LN-Klasse 1-18	0,7	$\pm 0,4$
02	Wien Innere Stadt	0,7	
	Wien Hohe Warte	0,4	
	LN-Klasse 3	0,5	$\pm 0,2$
	LN-Klasse 1-18	0,3	$\pm 0,2$
03	Wien Innere Stadt	-0,7	
	Wien Hohe Warte	-0,5	
	LN-Klasse 3	-0,6	$\pm 0,2$
	LN-Klasse 1-18	-0,4	$\pm 0,2$
04	Wien Innere Stadt	-1,5	
	Wien Hohe Warte	-0,8	
	LN-Klasse 3	-1,2	$\pm 0,3$
	LN-Klasse 1-18	-0,7	$\pm 0,4$
05	Wien Innere Stadt	-1,9	
	Wien Hohe Warte	-1,3	
	LN-Klasse 3	-1,8	$\pm 0,5$
	LN-Klasse 1-18	-1,1	$\pm 0,6$
06	Wien Innere Stadt	-2,4	
	Wien Hohe Warte	-1,7	
	LN-Klasse 3	-2,4	$\pm 0,6$
	LN-Klasse 1-18	-1,5	$\pm 0,8$
07	Wien Innere Stadt	-3,5	
	Wien Hohe Warte	-2,4	
	LN-Klasse 3	-3,0	$\pm 0,8$
	LN-Klasse 1-18	-1,8	$\pm 0,9$
08	Wien Innere Stadt	-4,6	
	Wien Hohe Warte	-2,9	
	LN-Klasse 3	-3,6	$\pm 0,9$
	LN-Klasse 1-18	-2,2	$\pm 1,1$
09	Wien Innere Stadt	-7,4	
	Wien Hohe Warte	-5,6	
	LN-Klasse 3	-6,1	$\pm 1,6$
	LN-Klasse 1-18	-3,8	$\pm 1,9$

Ex.ID	Beobachtungsort bzw. Landnutzungs-kategorie	$\Delta ST$	sd
10	Wien Innere Stadt	-0,5	
	Wien Hohe Warte	-0,4	
	LN-Klasse 3	-0,4	$\pm 0,2$
	LN-Klasse 1-18	-0,3	$\pm 0,2$
11	Wien Innere Stadt	-1,2	
	Wien Hohe Warte	-0,7	
	LN-Klasse 3	-0,9	$\pm 0,3$
	LN-Klasse 1-18	-0,5	$\pm 0,3$
12	Wien Innere Stadt	-1,8	
	Wien Hohe Warte	-1,1	
	LN-Klasse 3	-1,7	$\pm 0,5$
	LN-Klasse 1-18	-1,0	$\pm 0,6$
13	Wien Innere Stadt	-2,7	
	Wien Hohe Warte	-1,9	
	LN-Klasse 3	-2,6	$\pm 0,7$
	LN-Klasse 1-18	-1,5	$\pm 0,8$
14	Wien Innere Stadt	-5,3	
	Wien Hohe Warte	-3,3	
	LN-Klasse 3	-4,3	$\pm 1,1$
	LN-Klasse 1-18	-2,5	$\pm 1,4$
15	Wien Innere Stadt	-7,9	
	Wien Hohe Warte	-5,5	
	LN-Klasse 3	-6,6	$\pm 1,8$
	LN-Klasse 1-18	-3,8	$\pm 2,0$
16	Wien Innere Stadt	-10,2	
	Wien Hohe Warte	-7,5	
	LN-Klasse 3	-9,0	$\pm 2,5$
	LN-Klasse 1-18	-5,3	$\pm 2,8$

Exemplarisch ist für die Experimente der Gruppe Albedo der Dächer (weiße Dächer) 7, 9 die flächenhafte Verteilung der Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage in Abbildung 15 dargestellt, die die vom Stadtkern ausgehende radiale Abnahme zu den Bereichen geringerer Baudichte und teils deutliche lokale Unterschiede zeigt.

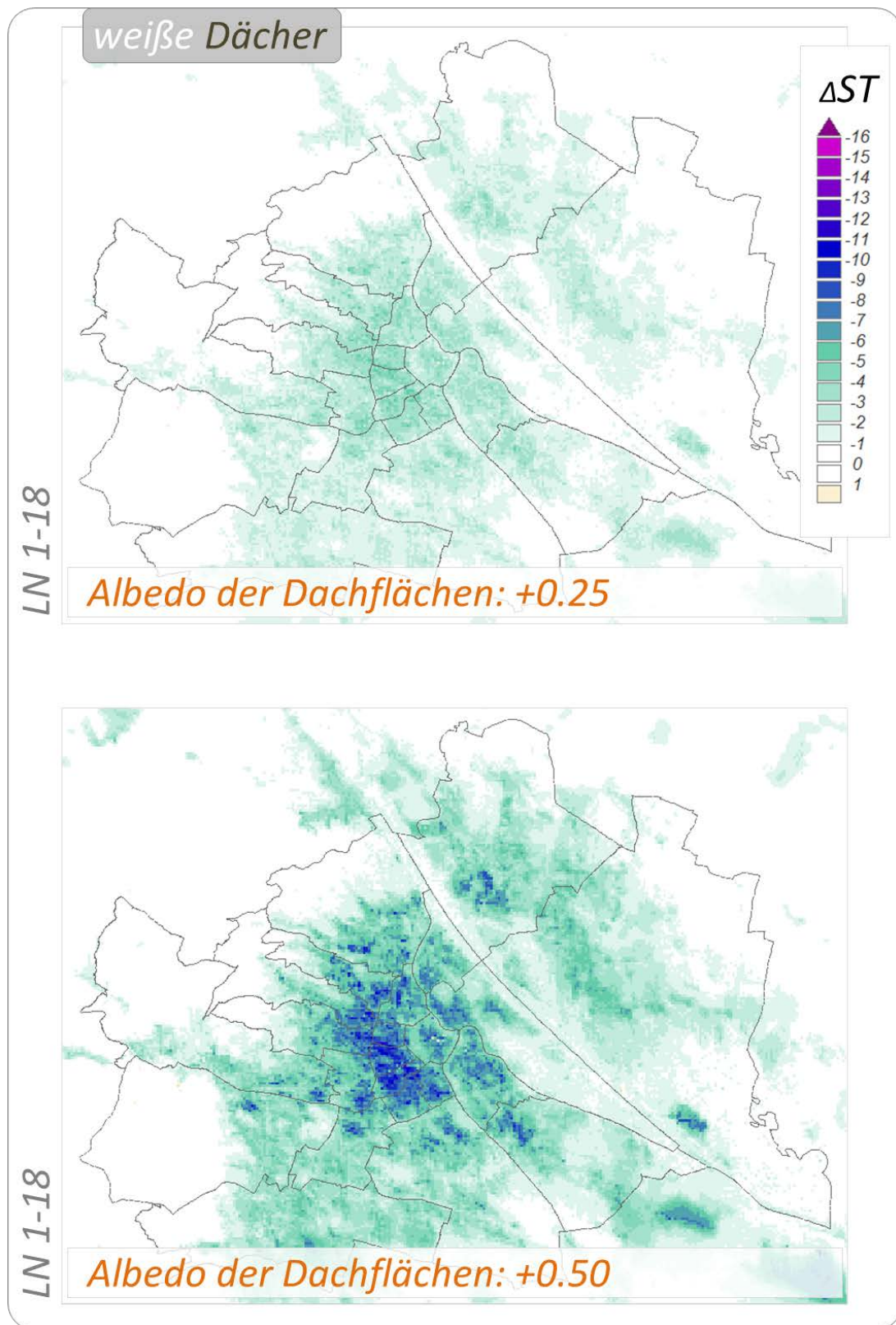


Abbildung 15: Auswertung der Experimentsimulationen 07 (oben) und 09 (unten): Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010

Für die Experimente zur Änderung der Albedo der versiegelten Flächen (Tabelle 13, links), d.h. jener wasserundurchlässiger Flächen des städtischen Raums, die nicht direkt Gebäuden zugeordnet werden, wurden zwei Vorgabewerte gewählt. Im Experiment 17 ist der Wert für

die Albedo auf ein real erzielbares Optimum von 0,71, der Albedo von Weißbeton gesetzt (Abbildung 16), im Folgeexperiment 18 auf einen durchschnittlichen Wert gängigen Normalbetons von 0,30 (Peyerl et al., 2008).

Tabelle 13: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) 1981-2010 der Experimente: 17-18: Anwendung gewählter Materialien bestimmter Albedo: versiegelte Flächen (links) bzw. Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) 1981-2010 der Experimente: 19-21: Anwendung gewählter Materialien bestimmter Albedo: Wandflächen (rechts)

Ex.ID	Beobachtungsort bzw. Landnutzungs-klasse	$\Delta ST$	sd
17	Wien Innere Stadt	-1,9	
	Wien Hohe Warte	-2,4	
	LN-Klasse 3	-2,2	$\pm 1,0$
	LN-Klasse 1-18	-3,0	$\pm 1,5$
18	Wien Innere Stadt	-0,8	
	Wien Hohe Warte	-0,7	
	LN-Klasse 3	-0,7	$\pm 0,3$
	LN-Klasse 1-18	-0,9	$\pm 0,5$

Ex.ID	Beobachtungsort bzw. Landnutzungs-klasse	$\Delta ST$	sd
19	Wien Innere Stadt	1,5	
	Wien Hohe Warte	1,2	
	LN-Klasse 3	1,4	$\pm 0,4$
	LN-Klasse 1-18	1,1	$\pm 0,5$
20	Wien Innere Stadt	-3,8	
	Wien Hohe Warte	-3,9	
	LN-Klasse 3	-4,1	$\pm 1,3$
	LN-Klasse 1-18	-3,1	$\pm 1,3$
21	Wien Innere Stadt	0,7	
	Wien Hohe Warte	0,8	
	LN-Klasse 3	0,7	$\pm 0,3$
	LN-Klasse 1-18	0,5	$\pm 0,3$

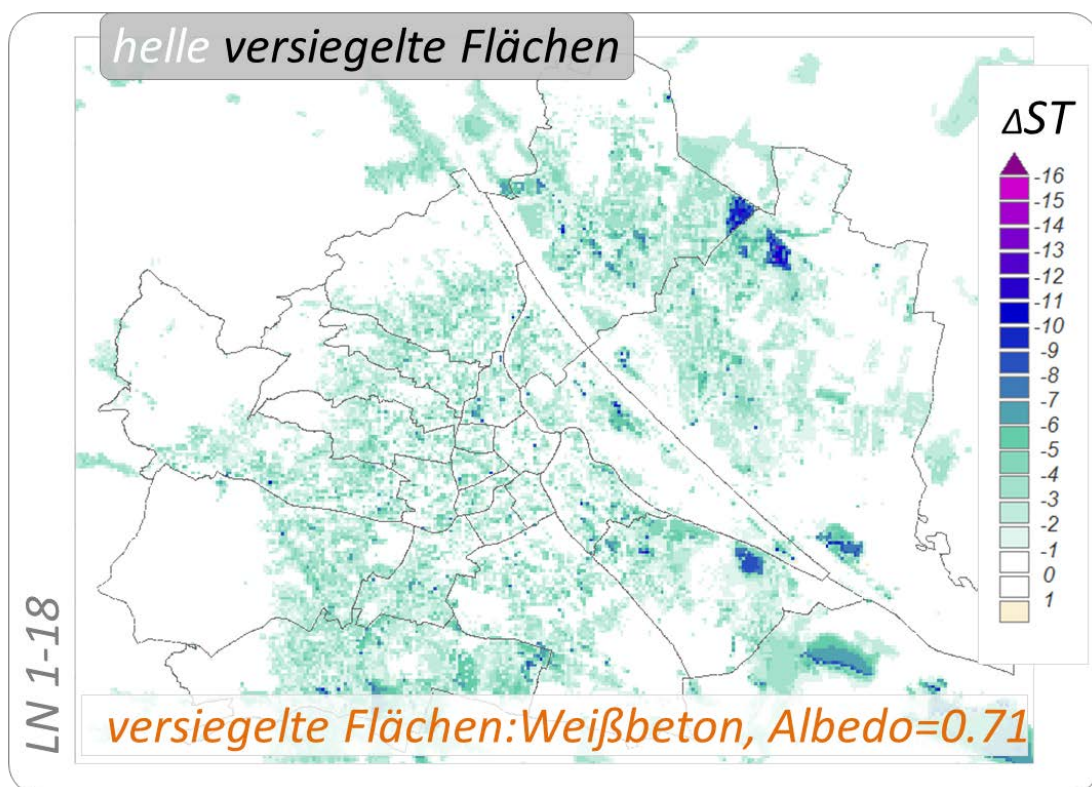


Abbildung 16: Auswertung der Simulationen 17: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010



In der Gruppe der Experimente zur Änderung der Albedo der Wandflächen (Tabelle 13, rechts) wurde bei der Wahl der Eingangsparameter auf Ergebnisse des Projekts Aspern+ Subprojekt 1 „Freiraum und Mikroklima“ (Pollak C., et al., 2011) zurückgegriffen, aus denen die Festlegung der Werte für die Albedo von PV-Elementen und heller sowie dunkler Fassadenputzfarbe erfolgte. Die Experimente 19 – 21 wurden wiederum auf alle Landnutzungsklassen der Kategorie Baulandnutzung angewendet. Erwartungsgemäß zeigt auch hier die Anwendung von PV eine generelle leichte Zunahme in der mittleren jährlichen Anzahl an Sommertagen. Eine im Experiment 20 (Abbildung 17) simulierte, durchgehende Anwendung heller/weißer Putzfarbe zeigt im Flächenmittel der Baulandkategorie ein ähnliches Ergebnis wie die Anwendung von Weißbeton für die versiegelten Flächen, ruft allerdings eine stärkere Abnahme von  $\Delta ST$  im innerstädtischen Bereich hervor.

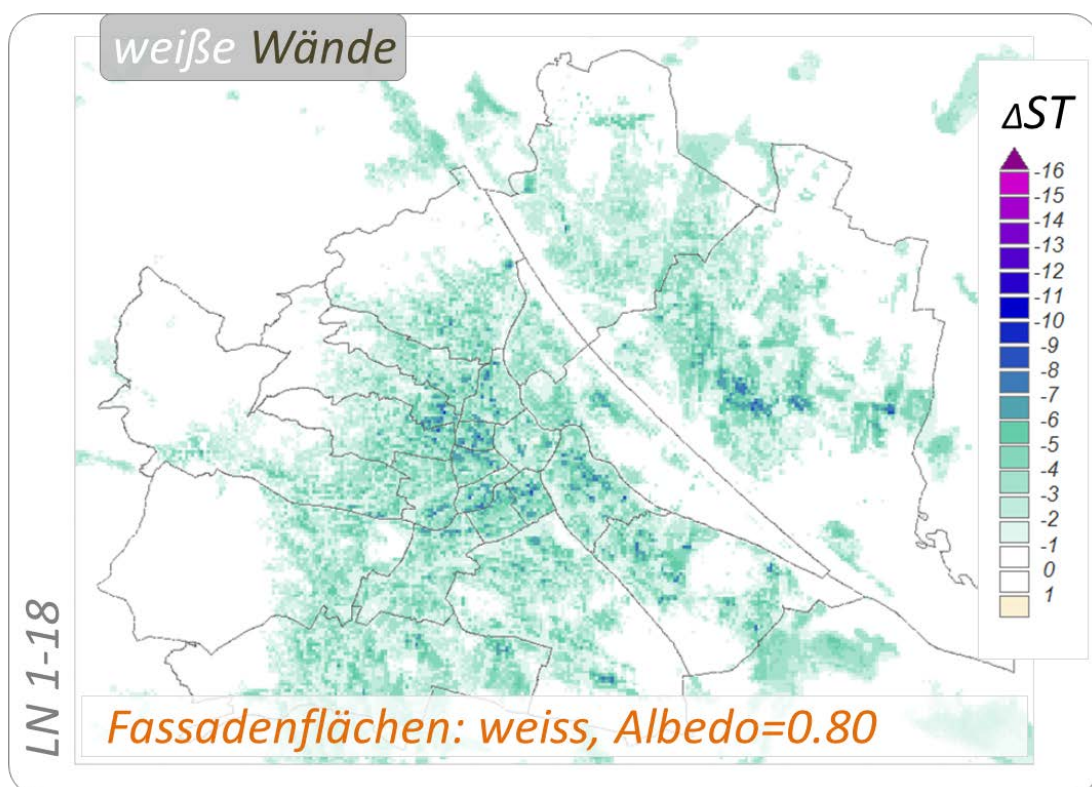


Abbildung 17: Auswertung der Experimentsimulation 20: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010

In den vorangegangenen Experimenten, die primär einer Abschätzung des Gesamteffekts dienen, wurden die jeweiligen Maßnahmen durch Eingangsparameter dem Modell übergeben, denen zum Teil abseits der Modellvorgabewerte keine davon abweichenden konkreten bauphysikalischen Werte hinterlegt waren (Dachalbedo) oder ggfs. deren Anwendung nicht flächig selektiv erfolgte. In der Gruppe der Experimente Anwendung gewählter Materialien / spezifische Landnutzungsklassen 22 – 30 (Tabelle 14) wird nunmehr darauf eingegangen.

Tabelle 14: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) 1981-2010 der Experimente: 22-30: Anwendung gewählter Materialien bestimmter Albedo auf spezifische Landnutzungsklassen

Ex.ID	Beobachtungsort bzw. Landnutzungsklasse	$\Delta$ ST	sd
22	Wien Innere Stadt	-6,8	
	Wien Hohe Warte	-5,2	
	LN-Klasse 3	-5,5	$\pm 1,7$
	LN-Klasse 1-18	-2,7	$\pm 1,8$
23	Wien Innere Stadt	-2,0	
	Wien Hohe Warte	-1,4	
	LN-Klasse 3	-1,9	$\pm 0,6$
	LN-Klasse 1-18	-0,9	$\pm 0,6$
24	Wien Innere Stadt	0,6	
	Wien Hohe Warte	0,4	
	LN-Klasse 3	0,5	$\pm 0,2$
	LN-Klasse 1-18	0,3	$\pm 0,2$
25	Wien Innere Stadt	-0,6	
	Wien Hohe Warte	-0,5	
	LN-Klasse 3	-0,5	$\pm 0,2$
	LN-Klasse 1-18	-0,3	$\pm 0,2$
26	Wien Innere Stadt	-1,1	
	Wien Hohe Warte	-0,6	
	LN-Klasse 3	-0,9	$\pm 0,5$
	LN-Klasse 1-18	-1,3	$\pm 1,6$
27	Wien Innere Stadt	-0,1	
	Wien Hohe Warte	-0,1	
	LN-Klasse 3	-0,1	$\pm 0,1$
	LN-Klasse 1-18	-0,1	$\pm 0,1$
28	Wien Innere Stadt	-1,2	
	Wien Hohe Warte	-0,7	
	LN-Klasse 3	-0,9	$\pm 0,3$
	LN-Klasse 1-18	-0,5	$\pm 0,3$
29	Wien Innere Stadt	-7,4	
	Wien Hohe Warte	-5,6	
	LN-Klasse 3	-5,8	$\pm 1,8$
	LN-Klasse 1-18	-2,9	$\pm 2,0$
30	Wien Innere Stadt	-1,2	
	Wien Hohe Warte	-0,7	
	LN-Klasse 3	-0,9	$\pm 0,3$
	LN-Klasse 1-18	-0,4	$\pm 0,3$

Für die Simulationen zur Albedo der Dächer, der Gruppe Anwendung gewählter Materialien bestimmter Albedo auf spezifische Landnutzungsklassen, wurden hinsichtlich einer Deckungsausführung mit Dachziegel einerseits Werte für optimierte, hochreflektierende, weiße Dachziegel mit einer Albedo von 0,680 und andererseits durchschnittliche hellfarbige Dachsteine mit einer Albedo von 0,328 der Literatur entnommen (s. Prado R.T.A. et al., 2005). Bezüglich der Eingangsparameter für die Adaptierung mit PV-Elementen (Albedo 0,1) wurde wiederum auf Ergebnisse des Projekts Aspern+ Subprojekt 1 „Freiraum und Mikroklima“ (Pollak C. et al., 2011) zurückgegriffen. Die Experimente 22, 23 beziehen sich aufgrund der simulierten Baumaßnahme Dachziegel, auf die Landnutzungsklassen 1-3, für die einerseits ebendort ein ausgeprägtes Vorkommen dieser Dachbedeckungsform gegeben

ist, und andererseits damit die bezüglich des Humankomforts wichtigen Bereiche der Untergruppe der Wohnbauwidmungen aus der Kategorie Baulandnutzung explizit berücksichtigt werden. Das Ergebnis zu Experiment 22 zeigt eine ausgeprägte Abnahme  $\Delta ST$  in zentrumsnahen, dicht bebauten Bereichen, analog Experiment 23 in entsprechend abgeschwächtem Ausmaß. Das Experiment 24 zur Belegung der Dachflächen mit PV-Elementen wurde wiederum auf alle Klassen der Kategorie Baulandnutzung angewendet, um einen Vergleichbarkeit mit Experiment 19 herzustellen. Diese zeigt gegenüber der entsprechenden Adaptierung der Wandflächen eine geringere Erhöhung  $\Delta ST$ .

Experiment 25 nimmt Bezug darauf, dass im referenzierten Istzustand ca. 40% der gesamten Dachfläche Wiens in Form von Blech- und Schotterdächern ausgeführt. Auf diesen Flächenanteil wird eine Adaptierung mit hochreflektierendem Aluminiumblech mit einer Albedo von 0,73 (Prado R.T.A. et al., 2005) derart simuliert, dass proportional auf alle Landnutzungsklassen der Kategorie Baulandnutzung der Parameter der Dachalbedo aus einem gewogenen Mittel der Referenzalbedo und jener von Aluminium, in das Modell nach  $albd = (albd_{ref} \cdot (1-0,40) + Albedo_{Alu} \cdot 0,40) / 2$  eingeht. Im Experiment 26 wird die Bedeckung der Landnutzungsklassen 4, 5, 9-18, jene des großvolumigen Wohnbaues, industriell-gewerblich gewidmeter Objekte und öffentlicher Gebäude, exklusiv mit hochreflektierendem Aluminiumblech mit einer Albedo 0,73 realisiert, mit erkennbarem Effekt, der entsprechend dezentral verteilt ist. Das Experiment 27 verlief analog zu Experiment 25, jedoch selektiv für die Landnutzungsklassen 4, 5, 9-18, wodurch der Verminderungseffekt in  $\Delta ST$  naturgemäß hier noch schwächer ausfällt.

Das Experiment 28 nimmt Bezug auf die Gegebenheit, dass ca. 55% der gesamten Dachfläche Wiens in Form von Ziegel- und Eternitdächern ausgeführt ist. Adaptiert man diese mit hochreflektierender weißer Keramik mit einer Albedo von 0,68 (s. Prado R.T.A. et al., 2005), derart, dass wiederum mit einem gewogenen Mittel der Referenzalbedo und jener von weißer Keramik, für den Eingangsparameter der Dachalbedo  $albd = (albd_{ref} \cdot (1-0,55) + Albedo_{weisse\ Keramik} \cdot 0,55) / 2$  gilt, so erzielt man in den Kontrollpunkten ähnliche Werte wie in Experiment 26, jedoch mit noch geringerem Effekt  $\Delta ST$  für die Gesamtfläche Wiens. Das Experiment 30 wurde analog zu Experiment 28 angesetzt, und zeigt interessanterweise trotz der selektiven Adaptierung auf die Landnutzungsklassen 1-3, 7, 8, 12 nahezu das gleiche Ergebnis. In Experiment 29 (s. Abbildung 18) wurde die Adaptierung der Dachflächen mit hochreflektierender weißer Keramik mit Albedo 0,68 exklusiv für die Landnutzungsklassen der Wohn-, Geschäfts- und Bildungsgebäude 1-3, 7, 8, 12 simuliert, und zeigt eine deutliche Abnahme  $\Delta ST$ , die im innerstädtischen Bereich bei ca. -10 ST und für die Kategorie der Baulandnutzung bei ca. -3 ST liegt.

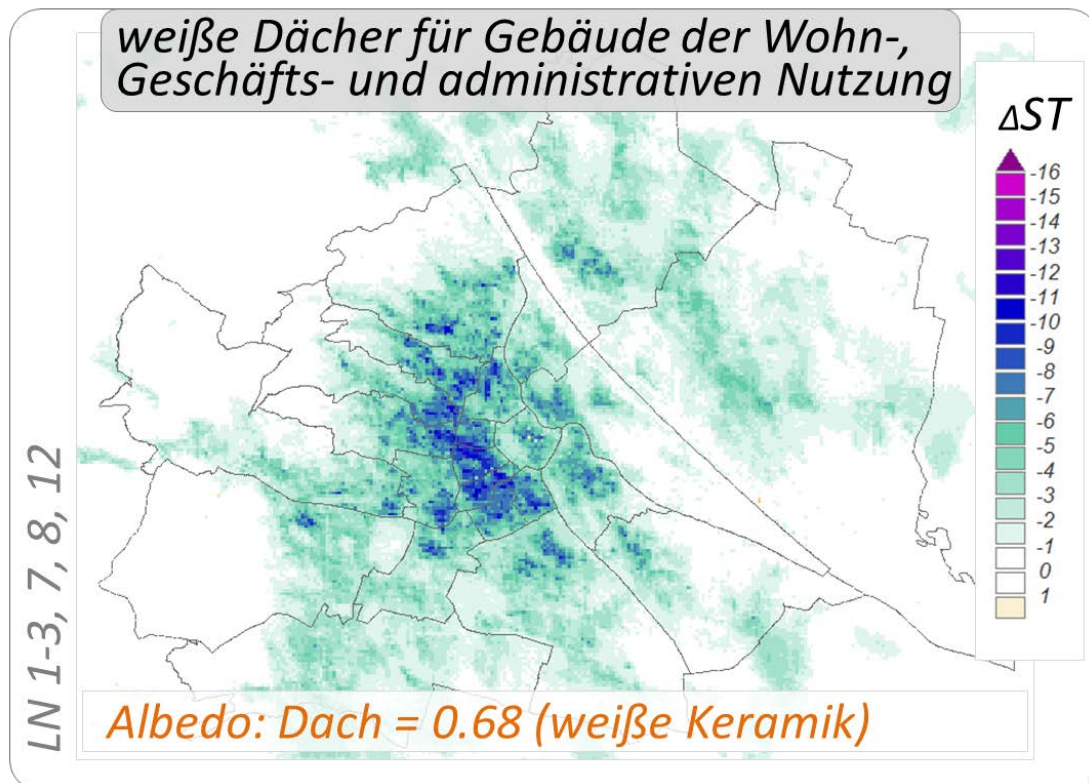


Abbildung 18 Auswertung der Experimentsimulationen 29: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010

In den weiteren Gruppen durchgeführter Experimente wird auf das real verfügbare Nutzungspotential der Dachbegrünung eingegangen. In Übereinstimmung mit der Untersuchung zu den Dachflächen Wiens (Gallaun et al., 2014) wurde, unter Verwendung der im Wien Umweltgut – Themenstadtplan: Gründachpotentialkataster öffentlich bereitgestellten Rasterinformation der MA der Stadt Wien des aktuell vorhandenen Gründachpotentials, zu jeder Landnutzungsklasse das zugehörige Potential, d.h. der jeweils maximal mögliche Flächenanteil an den Dachflächen der jeweiligen LN-Klasse, der einer Nutzung in Form einer Begrünung gewidmet werden kann, berechnet (Tabelle 15, rechts). Diese Werte des potentiellen Gründachanteils, der im Gesamtmittel ca. 45% beträgt, bilden für die nachstehenden Experimente die Basis des Eingangsparameters *grant* (Tabelle 15, links).

Tabelle 15: Gründachpotential der Landnutzungs-klassen Wiens (links) bzw. Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) 1981-2010 der Experimente: 31-36: Anteil der Realisierung des potentiellen Gründachanteils (rechts).

Experiment Ex.id	Dachfläche			Ex.ID	Beobachtungsort bzw. Landnutzungs-klasse	$\Delta$ ST	sd
	Gesamtfläche /[ha]	potentiell geeignet für Gründach- nutzung /[ha]	potentieller Gründach- anteil [%]				
01	778,7	294,2	38	31	Wien Innere Stadt	-0,4	
02	661,4	250,3	38		Wien Hohe Warte	-0,3	
03	1781,9	552,8	31		LN-Klasse 3	-0,3	$\pm 0,1$
04	140,3	83,8	60		LN-Klasse 1-18	-0,2	$\pm 0,2$
05	129,8	71,2	55	32	Wien Innere Stadt	-0,7	
06	139,5	106,7	76		Wien Hohe Warte	-0,6	
07	47,8	16,5	35		LN-Klasse 3	-0,6	$\pm 0,2$
08	109,7	38,6	35	LN-Klasse 1-18	-0,5	$\pm 0,3$	
09	585,8	460,8	79	33	Wien Innere Stadt	-1,2	
10	95,5	44,1	46		Wien Hohe Warte	-0,7	
11	69,2	41,2	60		LN-Klasse 3	-1,0	$\pm 0,3$
12	153,9	89,6	58		LN-Klasse 1-18	-0,7	$\pm 0,4$
13	15,5	11,5	74	34	Wien Innere Stadt	-1,7	
14	24,7	13,8	56		Wien Hohe Warte	-1,1	
15	12,3	7,5	61		LN-Klasse 3	-1,7	$\pm 0,4$
16	27,9	20,7	74		LN-Klasse 1-18	-1,2	$\pm 0,7$
17	1,8	1,0	56	35	Wien Innere Stadt	-2,6	
18	15,6	9,4	60		Wien Hohe Warte	-1,8	
19	6,8	2,6	38		LN-Klasse 3	-2,5	$\pm 0,6$
20	72,9	27,8	38		LN-Klasse 1-18	-1,8	$\pm 1,1$
21	14,8	11,3	76	36	Wien Innere Stadt	-3,5	
22	103,5	70,8	68		Wien Hohe Warte	-2,5	
23	78,6	62,6	80		LN-Klasse 3	-3,4	$\pm 0,8$
24	12,5	5,8	46		LN-Klasse 1-18	-2,5	$\pm 1,4$
25	36,7	25,2	69				
26	5,4	2,6	48				
27	2,6	1,4	54				
28	1,8	0,8	45				
29	45,1	24,6	54				
30	5,4	2,2	40				
31	6,6	3,5	54				
32	0,7	0,5	67				
-	5184,3	2355,3	45				

In den Experimenten der Gruppe Anteil der Realisierung des potentiellen Gründachanteils, Experimente 31-36 (Tabelle 15), wird der Gründachanteil aller Landnutzungs-klassen der Kategorie Baulandnutzung und jener Landnutzungs-klassen der Transportkategorie die Gebäude beinhalten, stufenweise von 10% bis zu 100% des möglichen Gründachpotentials simuliert.

Die Ergebnisfelder  $\Delta ST$  der Cuboid-Auswertung zur Nutzung des potentiellen Gründachteils zeigen im Vergleich zu Experimenten der Dachalbedo etwas geringere Effekte, die sich jedoch in der Gesamtfläche relativ homogen erstrecken (Abbildung 19).

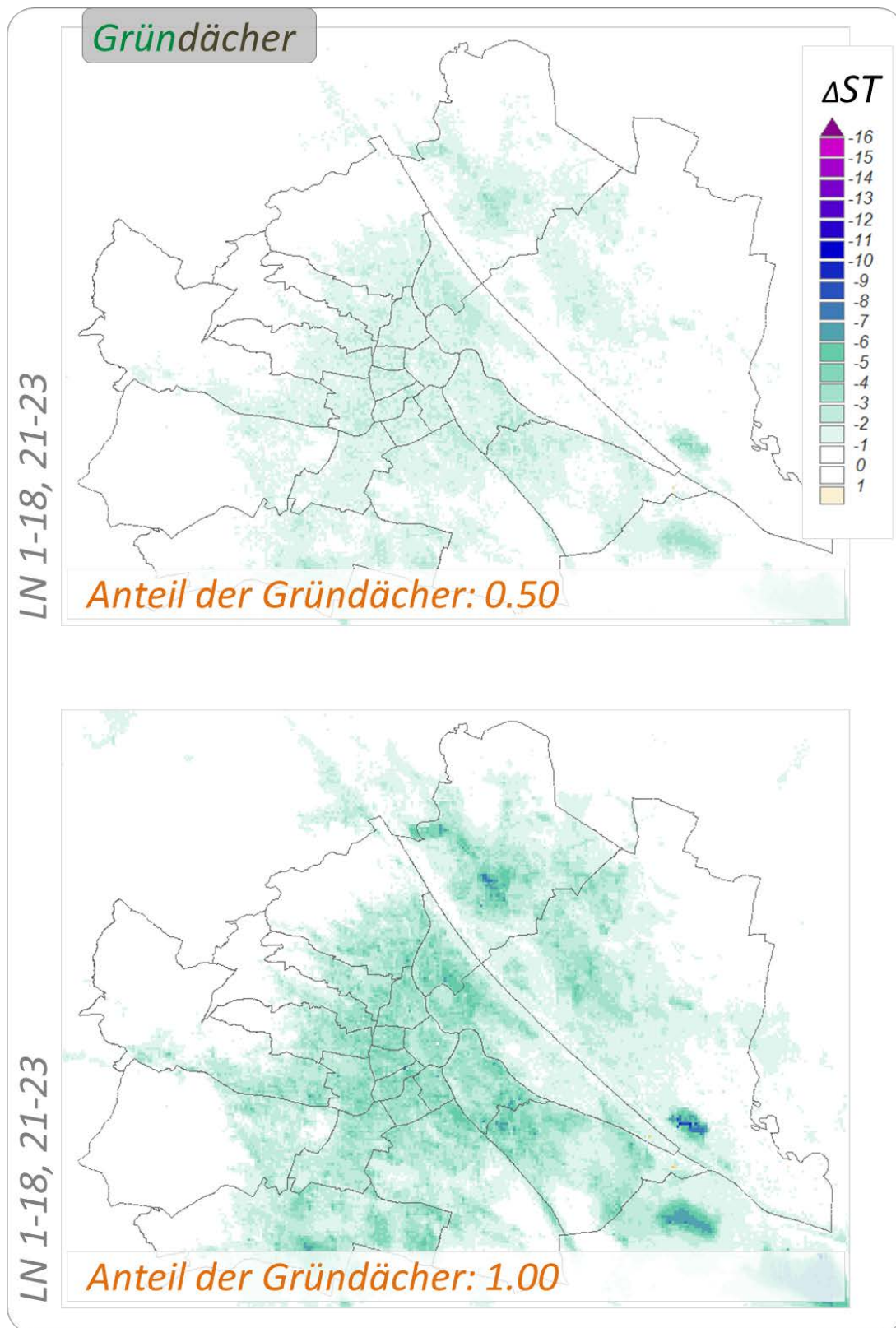


Abbildung 19: Auswertung der Experimentsimulationen 34 (oben), 36 (unten): Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010

In der letzten Gruppe (s. Tabelle 16) der Experimente 37-44 wurden selektive Kombinationen von, in vorangegangenen Experimenten beschriebenen, Einzelmaßnahmen, angewendet auf die LN-Klassen 1-18, 21-23, simuliert. Diese berücksichtigen alle Typen von Oberflächen, jene der Dachflächen, der Wandflächen und der versiegelten Flächen.

Tabelle 16: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) 1981-2010 der Experimente: 37-44: Kombinierte Anwendung gewählter Materialien und Gründächern auf Dachflächen und andere

Ex.ID	Beobachtungsort bzw. Landnutzungs-kategorie	$\Delta$ ST	sd
37	Wien Innere Stadt	-1,4	
	Wien Hohe Warte	-0,7	
	LN-Klasse 3	-1,2	$\pm 0,3$
	LN-Klasse 1-18	-0,9	$\pm 0,6$
38	Wien Innere Stadt	-4,1	
	Wien Hohe Warte	-2,7	
	LN-Klasse 3	-3,5	$\pm 0,9$
	LN-Klasse 1-18	-2,3	$\pm 1,2$
39	Wien Innere Stadt	-7,9	
	Wien Hohe Warte	-6,6	
	LN-Klasse 3	-7,4	$\pm 1,8$
	LN-Klasse 1-18	-4,6	$\pm 2,2$
40	Wien Innere Stadt	-3,0	
	Wien Hohe Warte	-2,2	
	LN-Klasse 3	-3,0	$\pm 0,7$
	LN-Klasse 1-18	-2,3	$\pm 1,4$
41	Wien Innere Stadt	-5,6	
	Wien Hohe Warte	-4,2	
	LN-Klasse 3	-4,9	$\pm 1,1$
	LN-Klasse 1-18	-3,3	$\pm 1,7$
42	Wien Innere Stadt	-8,5	
	Wien Hohe Warte	-6,9	
	LN-Klasse 3	-7,9	$\pm 1,9$
	LN-Klasse 1-18	-4,9	$\pm 2,4$
43	Wien Innere Stadt	-18,7	
	Wien Hohe Warte	-16,7	
	LN-Klasse 3	-18,1	$\pm 2,9$
	LN-Klasse 1-18	-13,9	$\pm 4,5$
44	Wien Innere Stadt	-19,3	
	Wien Hohe Warte	-17,2	
	LN-Klasse 3	-18,8	$\pm 3,0$
	LN-Klasse 1-18	-14,3	$\pm 4,7$

Die Experimente 37-39, 43 sehen jeweils eine Umsetzung von 50% des landnutzungs-klassenspezifischen Gründach-potentials, jene von den Experimenten 40-42, 44 eine 100%ige, vor, wobei der von der Gründachnutzung unabhängige, verbleibende Dachflächenanteil entsprechend einer Adaptierung mit Materialien unterschiedlicher Albedo - für Experiment 37, 40 PV: 0,10, für Experiment 38, 41 helle Dachsteine: 0,328 und für Experiment 39, 42 weiße Dachziegel: 0,680 – simuliert wird. Das Modell MUKLIMO\_3 berechnet intern für jede Landnutzungs-kategorie eine Dachalbedo, die dem gewogenen Mittel der Albedo dieser kombinierten Adaptierung entspricht, wobei für die Gründachanteile

explizit ein Vorgabewert von 0,17, dem Mittelwert jener Landnutzungsklassen die in der Referenz nahezu nur aus unversiegelten Flächen bestehen, definiert wurde.

Die Ergebnisse für diese Kombinationen sind entsprechend der Albedo der eingesetzten Dachbedeckungsmaterialien unterschiedlich, wobei erkennbar ist, dass die Kombination Gründach-PV im Gegensatz zur reinen PV-Anwendung (vgl. Experiment 24) in beiden Experimenten zu einer, wenn auch geringen, Reduktion  $\Delta ST$  führt. Ebenso, zeigen die Kombinationen mit Dachziegeln, hier in Kombination mit genutztem Gründachpotential, eine jeweils verstärkte Reduktion in  $\Delta ST$ ; z.B. zeigt Experiment 42 (s. Abbildung 20), die Kombination von voller Gründachnutzung und Bedeckung der Dachrestfläche mit weißer Keramik entsprechend einer Albedo von 0,68, betreffend vergleichbarer Anwendungsgebiete gegenüber dem allgemeinen Experiment 09, in dem die Dachalbedo nach Erhöhung um 0,5 für die LN-Klassen 1-18 bei 0,661 liegt, eine weitere Reduktion in der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage  $\Delta ST$  um ca. einen Tag, für Wien Innere Stadt hier auf eine Gesamtabnahme von  $\Delta ST$  um 12% bezogen auf die Beobachtungsmittel der Klimanormalperiode 1981-2010.

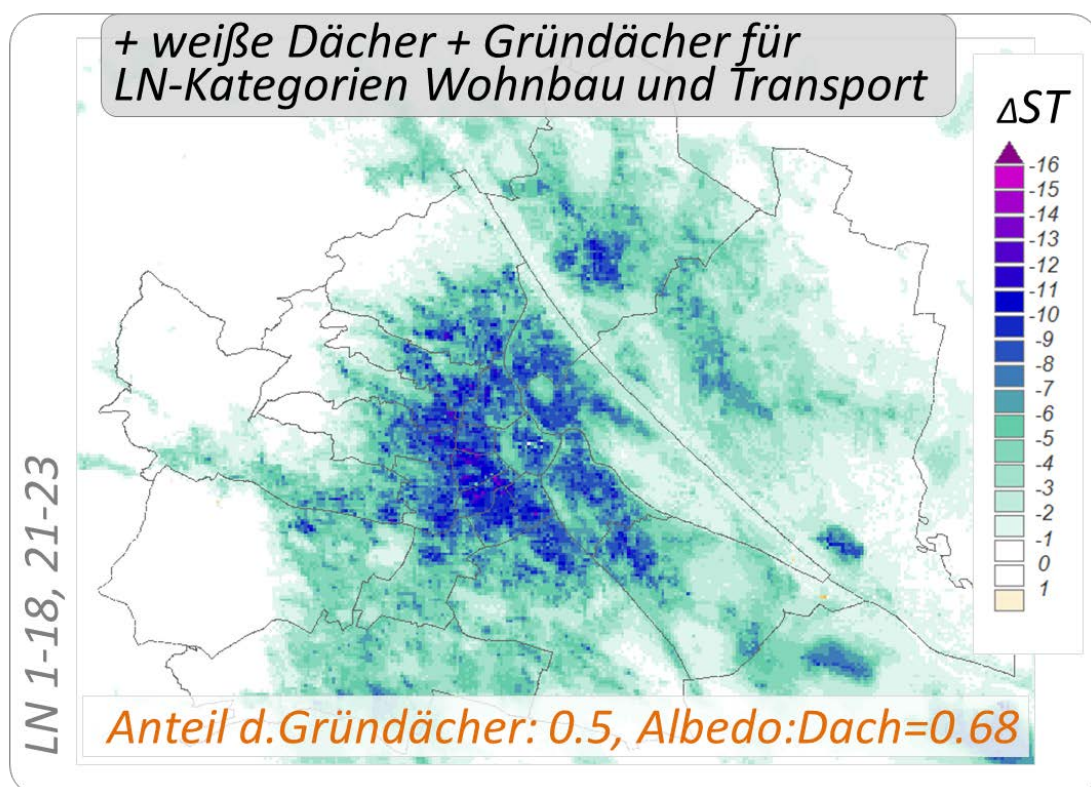


Abbildung 20: Auswertung der Experimentsimulation 42: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010



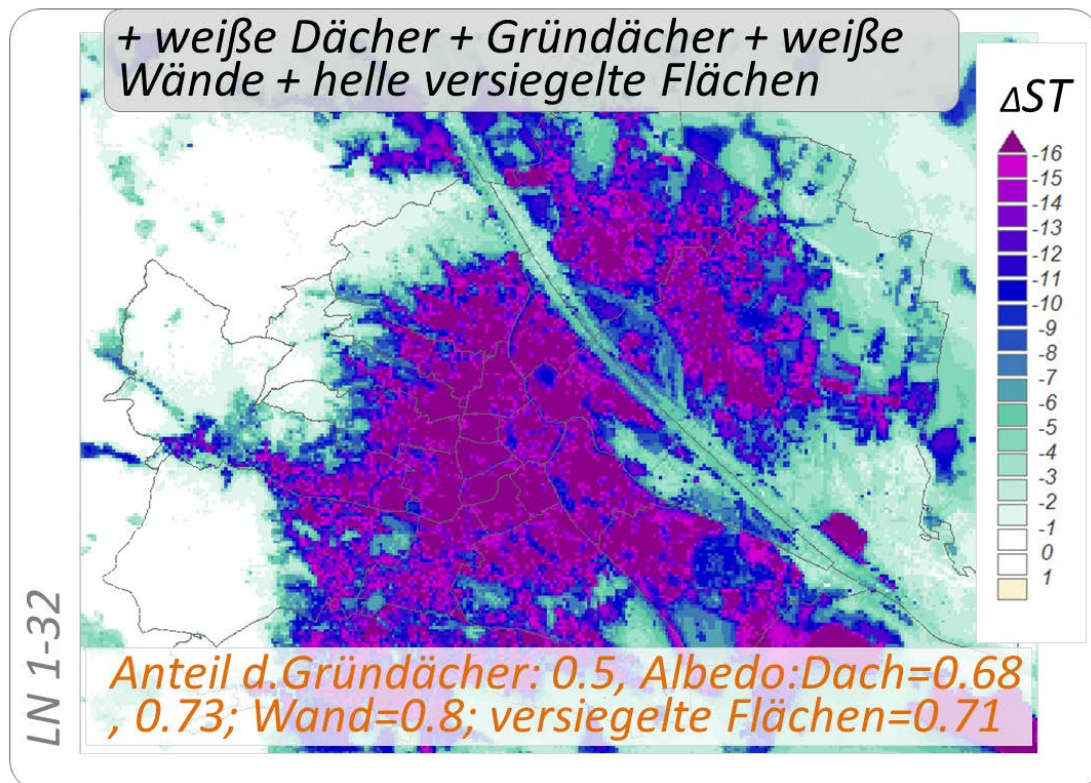


Abbildung 21: Auswertung der Experimentsimulation 43: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010

In den Experimenten 43 (s. Abbildung 21) und 44 wurden die genutzten Gründachanteile landnutzungsabhängig mit unterschiedlichen Deckmaterialien kombiniert. Jenen Landnutzungsklassen, die vorwiegend gewerblich-industriell gewidmet sind bzw. großvolumige Baukörper beinhalten, wurde eine Albedo von 0,73 entsprechend einer Deckung mit Aluminiumblech, den anderen LN-Klassen eine Albedo von 0,68 entsprechend der Adaptierung mit weißen Dachziegeln, vorgegeben. Für die Wandflächen wurde eine Realisierung entsprechend weißer Putzfarbe mit einer Albedo von 0,8, für die versiegelten Flächen die Verwendung von Weißbeton mit einer Albedo von 0,71, angenommen. Somit dienen diese experimentellen Simulationen der Abschätzung des klimatologischen Effekts, der, mit maximierten bauphysikalischen Adaptionsmaßnahmen, d.h. optimierter Oberflächenalbedo unter Verwendung derzeit verfügbarer Baustoffe, erzielt werden kann, und geben somit einen Grenzwert der derart erzielbaren Hitzebelastung für die Stadt Wien.

Sichtbar wird in diesen Simulationen, dass der Einfluss des Anteils der Gründächer mit zunehmender Gesamtalbedo aller Oberflächen abnimmt, beide Experimente resultieren in einer relativen Abnahme der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage  $\Delta ST$  von ca. 26% für WIS, für die mittlere jährliche Anzahl der Hitzetage  $\Delta HT$  ergibt sich der reduzierende Gesamteinfluss der Baumaßnahmen auf ca. 52% gegenüber den Beobachtungswerten der Klimanormalperiode 1981-2010 an diesem Beobachtungsort. Die Analyse der Ergebnissfelder wurde analog zur Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage  $\Delta ST$  ebenso für die Anzahl der Hitzetage  $\Delta HT$  durchgeführt. Eine zusammenfassende Gegenüberstellung ist in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) und Hitzetage ( $\Delta$ HT) 1981-2010 aller durchgeführten Experimente gegenüber der Referenzsimulation. Die Werte an den Beobachtungsorten Wien Innere Stadt und Wien Hohe Warte resultieren aus den nächstgelegenen vier Gitterpunktwerten, jene für die selektierten Klassen aus einem Flächenmittel entsprechend der Landnutzungswidmung. Rot eingerahmte Experimente wurde für weitere Berechnungen im Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 herangezogen.

Ex.ID	Änderung $\Delta$ ST der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ für 1981-2010						Änderung $\Delta$ HT der mittleren jährlichen Anzahl der Hitzetage $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ für 1981-2010									
	Wien Innere Stadt		Wien Hohe Warte		Landnutzungs-klasse 3		Landnutzungs-klasse 1-18		Wien Innere Stadt		Wien Hohe Warte		Landnutzungs-klasse 3		Landnutzungs-klasse 1-18	
	$\Delta$ ST	$\Delta$ ST	$\Delta$ ST	sd	$\Delta$ ST	sd	$\Delta$ HT	$\Delta$ HT	$\Delta$ HT	sd	$\Delta$ HT	sd	$\Delta$ HT	sd	$\Delta$ HT	sd
01	1,5	0,9	1,2	± 0,3	0,7	± 0,4	0,6	0,5	0,8	± 0,3	0,4	± 0,3				
02	0,7	0,4	0,5	± 0,2	0,3	± 0,2	0,4	0,2	0,4	± 0,2	0,2	± 0,2				
03	-0,7	-0,5	-0,6	± 0,2	-0,4	± 0,2	-0,6	-0,1	-0,4	± 0,2	-0,2	± 0,2				
04	-1,5	-0,8	-1,2	± 0,3	-0,7	± 0,4	-1,0	-0,3	-0,8	± 0,3	-0,4	± 0,3				
05	-1,9	-1,3	-1,8	± 0,5	-1,1	± 0,6	-1,4	-0,6	-1,2	± 0,4	-0,7	± 0,4				
06	-2,4	-1,7	-2,4	± 0,6	-1,5	± 0,8	-1,9	-0,7	-1,6	± 0,5	-0,8	± 0,6				
07	-3,5	-2,4	-3,0	± 0,8	-1,8	± 0,9	-2,5	-1,0	-2,0	± 0,7	-1,1	± 0,7				
08	-4,6	-2,9	-3,6	± 0,9	-2,2	± 1,1	-3,0	-1,4	-2,4	± 0,8	-1,3	± 0,9				
09	-7,4	-5,6	-6,1	± 1,6	-3,8	± 1,9	-5,0	-2,4	-4,0	± 1,3	-2,1	± 1,4				
10	-0,5	-0,4	-0,4	± 0,2	-0,3	± 0,2	-0,4	-0,1	-0,3	± 0,1	-0,2	± 0,1				
11	-1,2	-0,7	-0,9	± 0,3	-0,5	± 0,3	-0,6	-0,1	-0,6	± 0,2	-0,3	± 0,2				
12	-1,8	-1,1	-1,7	± 0,5	-1,0	± 0,6	-1,3	-0,4	-1,2	± 0,4	-0,6	± 0,4				
13	-2,7	-1,9	-2,6	± 0,7	-1,5	± 0,8	-1,9	-0,8	-1,7	± 0,6	-0,9	± 0,6				
14	-5,3	-3,3	-4,3	± 1,1	-2,5	± 1,4	-3,7	-1,4	-2,9	± 1,0	-1,4	± 1,0				
15	-7,9	-5,5	-6,6	± 1,8	-3,8	± 2,0	-5,2	-2,4	-4,3	± 1,4	-2,1	± 1,5				
16	-10,2	-7,5	-9,0	± 2,5	-5,3	± 2,8	-7,4	-3,2	-5,7	± 2,0	-2,9	± 2,0				
17	-1,9	-2,4	-2,2	± 1,0	-3,0	± 1,5	-1,6	-1,0	-1,7	± 0,9	-1,7	± 1,0				
18	-0,8	-0,7	-0,7	± 0,3	-0,9	± 0,5	-0,6	-0,2	-0,6	± 0,3	-0,5	± 0,3				
19	1,5	1,2	1,4	± 0,4	1,1	± 0,5	0,6	0,6	0,8	± 0,3	0,5	± 0,3				
20	-3,8	-3,9	-4,1	± 1,3	-3,1	± 1,3	-2,1	-1,2	-2,4	± 0,9	-1,5	± 0,9				
21	0,7	0,8	0,7	± 0,3	0,5	± 0,3	0,4	0,3	0,4	± 0,2	0,3	± 0,2				
22	-6,8	-5,2	-5,5	± 1,7	-2,7	± 1,8	-4,6	-2,2	-3,7	± 1,4	-1,5	± 1,3				
23	-2,0	-1,4	-1,9	± 0,6	-0,9	± 0,6	-1,5	-0,7	-1,3	± 0,5	-0,6	± 0,5				
24	0,6	0,4	0,5	± 0,2	0,3	± 0,2	0,3	0,2	0,3	± 0,1	0,2	± 0,2				
25	-0,6	-0,5	-0,5	± 0,2	-0,3	± 0,2	-0,5	-0,1	-0,4	± 0,2	-0,2	± 0,2				
26	-1,1	-0,6	-0,9	± 0,5	-1,3	± 1,6	-0,7	-0,2	-0,5	± 0,4	-0,7	± 1,0				
27	-0,1	-0,1	-0,1	± 0,1	-0,1	± 0,1	0,0	0,0	0,0	± 0,1	0,0	± 0,1				
28	-1,2	-0,7	-0,9	± 0,3	-0,5	± 0,3	-0,7	-0,2	-0,6	± 0,2	-0,3	± 0,2				
29	-7,4	-5,6	-5,8	± 1,8	-2,9	± 2,0	-5,0	-2,4	-3,9	± 1,4	-1,6	± 1,4				
30	-1,2	-0,7	-0,9	± 0,3	-0,4	± 0,3	-0,6	-0,1	-0,6	± 0,2	-0,3	± 0,2				
31	-0,4	-0,3	-0,3	± 0,1	-0,2	± 0,2	-0,2	0,0	-0,2	± 0,1	-0,1	± 0,1				
32	-0,7	-0,6	-0,6	± 0,2	-0,5	± 0,3	-0,6	-0,1	-0,4	± 0,2	-0,3	± 0,2				
33	-1,2	-0,7	-1,0	± 0,3	-0,7	± 0,4	-0,7	-0,2	-0,7	± 0,2	-0,4	± 0,3				
34	-1,7	-1,1	-1,7	± 0,4	-1,2	± 0,7	-1,3	-0,4	-1,1	± 0,4	-0,7	± 0,5				
35	-2,6	-1,8	-2,5	± 0,6	-1,8	± 1,1	-1,9	-0,7	-1,6	± 0,5	-1,0	± 0,8				
36	-3,5	-2,5	-3,4	± 0,8	-2,5	± 1,4	-2,6	-1,0	-2,2	± 0,7	-1,4	± 1,0				
37	-1,4	-0,7	-1,2	± 0,3	-0,9	± 0,6	-0,8	-0,2	-0,8	± 0,3	-0,5	± 0,4				
38	-4,1	-2,7	-3,5	± 0,9	-2,3	± 1,2	-2,9	-1,3	-2,4	± 0,8	-1,3	± 0,9				
39	-7,9	-6,6	-7,4	± 1,8	-4,6	± 2,2	-5,7	-2,8	-4,8	± 1,5	-2,6	± 1,7				
40	-3,0	-2,2	-3,0	± 0,7	-2,3	± 1,4	-2,4	-0,9	-2,0	± 0,6	-1,3	± 1,0				
41	-5,6	-4,2	-4,9	± 1,1	-3,3	± 1,7	-3,8	-1,7	-3,2	± 1,0	-1,8	± 1,2				
42	-8,5	-6,9	-7,9	± 1,9	-4,9	± 2,4	-6,1	-3,2	-5,0	± 1,6	-2,7	± 1,8				
43	-18,7	-16,7	-18,1	± 2,9	-13,9	± 4,5	-11,2	-6,6	-10,1	± 2,7	-6,4	± 3,2				
44	-19,3	-17,2	-18,8	± 3,0	-14,3	± 4,7	-11,3	-6,8	-10,4	± 2,8	-6,5	± 3,3				

Sowohl die Berechnung der direkten Klimaschutzmaßnahme – Reduktion des Strahlungsantriebes (Kapitel 4.4.1), als auch die Auswirkungen der indirekten Klimaschutzmaßnahme – Reduktion des Stromverbrauchs (Kapitel 4.4.2) wurden anhand einer Auswahl der MUKLIMO\_3 Simulationen als Maßnahmen identifiziert (siehe Tabelle 17), welche in Tabelle 18 dargestellt sind. Dabei werden die stadtklimatologischen Simulationsergebnisse der Reduktionen der Sommer- und Hitzetage in Wien ( $\Delta$

Sommertage,  $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$  und  $\Delta$  Hitzetage ( $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) für die weitere Modellierung der Klimaauswirkungen übernommen.

Tabelle 18: Durchschnittliche jährlich Reduktion der Anzahl an Sommertagen ( $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ ) und Hitzetagen ( $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) in Wien – Innere Stadt für verschiedene Varianten der Veränderung horizontaler und vertikaler Gebäudeoberflächen. Zeithorizont ist 1981-2010 ( $\alpha$ = Albedo).

<b>Angenommene Maßnahmen</b> (Experimente aus Tabelle 17)	<b><math>\Delta</math> Sommertage</b> in Tagen [%]	<b><math>\Delta</math> Hitzetage</b> in Tagen [%]
1. Alle Dächer wurden in Gründächer umgewandelt ( $\alpha = 0,17$ ), Experiment 16	-10,2 [-14,1]	-7,4 [-34,9]
2. Alle Dächer für Bebauungskategorien wurden in Dächer mit hoher Albedo umgewandelt ( $\alpha = 0,68$ ), Experiment 22	-6,8 [-9,4]	-4,6 [-21,7]
3. 100% des Potentials für Dachbegrünung werden umgesetzt ( $\alpha = 0,17$ ), alle anderen Dachformen in Dächer mit hohem Albedo ( $\alpha = 0,68$ ), Experiment 42	-8,5 [-11,8]	-6,1 [-28,8]
4. 50% des Potentials für Dachbegrünung werden umgesetzt ( $\alpha = 0,17$ ), alle Fassaden werden weiß gestrichen ( $\alpha = 0,80$ ), alle anderen Dachformen in Dächer mit hohem Albedo ( $\alpha = 0,68$ ), Blechdächer werden in weiße Aluminiumdächer umgewandelt ( $\alpha = 0,73$ ), alle anderen versiegelten Stadtflächen (außer Straßen) werden in helle Betonflächen umgewandelt ( $\alpha = 0,71$ ), Experiment 43	-18,7 [-25,9]	-11,2 [-52,8]
5. 100% des Potentials für Dachbegrünung werden umgesetzt ( $\alpha = 0,17$ ), alle Fassaden werden weiß gestrichen ( $\alpha = 0,80$ ), alle anderen Dachformen in Dächer mit hohem Albedo ( $\alpha = 0,68$ ), Blechdächer werden in weiße Aluminiumdächer umgewandelt ( $\alpha = 0,73$ ), alle anderen versiegelten Stadtflächen (außer Straßen) werden in helle Betonflächen umgewandelt ( $\alpha = 0,71$ ), Experiment 44	-19,3 [-26,7]	-11,3 [-53,3]

Die Ergebnisse der Modellberechnungen der direkten und indirekten Auswirkungen auf das Klima sind in weiterer Folge im Kapitel 4.4 dargestellt.

## 4.4 Energieeinsparung und Beiträge zum Klimawandel durch Maßnahmen zur Vermeidung städtischer Wärmeinseln

### 4.4.1 Direkte Vermeidungsstrategie des Klimawandels – Reduktion des Strahlungsantriebes

Die modellierten Änderungen des Strahlungsantriebes und die kumulative Änderung der Treibhausgasemissionen in CO<sub>2</sub> Äquivalenten sind in Abbildung 22 dargestellt, unter der Annahme dass die in Tabelle 18 gelisteten Maßnahmen über eine 10 Jahresperiode übernommen werden. Die Aktivitäten verursachen bis 2025 eine Änderung des Strahlungsantriebes, danach wird angenommen, dass keine weitere Änderung hinsichtlich der Maßnahmen durchgeführt wird. Die Treibhausgasemissionen in CO<sub>2</sub> Äquivalenten werden aber auch nach 2025 weiterhin eingespart.

Maßnahme 1 – Umwandlung aller Dächer in begrünte Dächer - hat die geringste Wirkung, da die Albedo grüner Dächer ( $\alpha = 0,17$ ) im Vergleich zu der Albedo von Dachziegeln mit hohem Reflexionsgrad ( $\alpha = 0,68$ ) wesentlich niedriger ist. Maßnahme 2 – Umwandlung/Ausstattung aller Dächer mit Dachziegeln hoher Albedowerte - hat aus demselben Grund eine sehr hohe Auswirkung. Maßnahme 3 - Umwandlung aller potenziellen begrünten Dächer und die Ausstattung der restlichen Dachflächen mit Dachziegeln hohen Reflexionsgrades - liegt, wie man erwarten konnte zwischen Maßnahme 1 und 2. Maßnahmen 4 und 5 bewirken ebenfalls große Änderungen, sowohl des Strahlungsantriebs, als auch dementsprechend kumulierten CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, weil durch die gepflasterten Flächen eine umfangreiche zusätzliche Oberfläche von 15,6 Mio. m<sup>2</sup> (29%) mit einer veränderten Albedo hinzugefügt wird. Allerdings ist die verhältnismäßige Größenordnung des reduzierten Strahlungsantriebs bzw. der Einsparung der kumulierten CO<sub>2</sub>-Äquivalente für alle Maßnahmen signifikant anders als die verhältnismäßige Größenordnung der berechneten Sommertage und Hitzetage. Beispielsweise ist die Maßnahme 2 im Vergleich zur Maßnahme 1 bei der Reduktion an Hitzetagen nur 62% so effektiv (vgl. Tabelle 18), bei der Erhebung des reduzierten Strahlungsantriebs jedoch dreimal so hoch (Abbildung 22 a. und b.). Dies wird im nächsten Abschnitt detaillierter erörtert. Maßnahmen 2, 4, und 5 speichern rund 75.000 t CO<sub>2</sub> eq. pro Jahr über 50 Jahre.

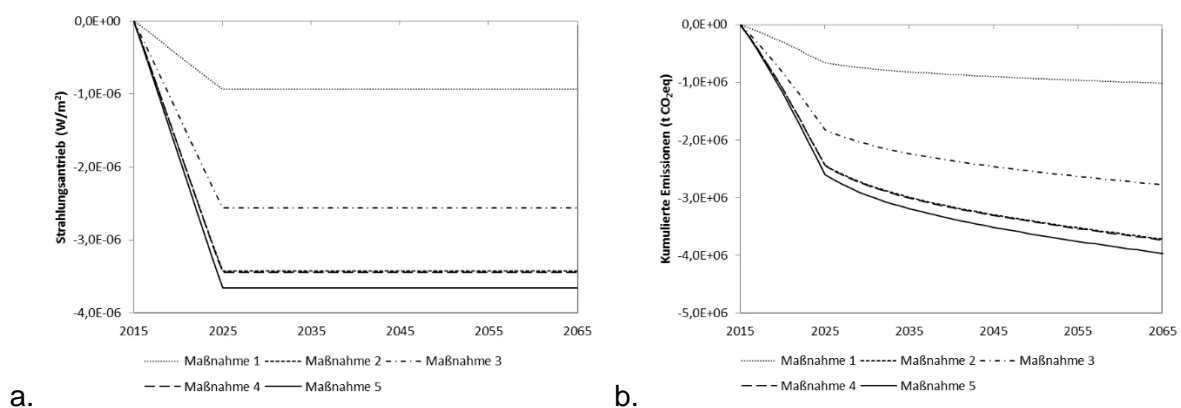


Abbildung 22: Modellierte Änderung des Strahlungsantriebes (W/m<sup>2</sup>) in a) und kumulative Änderung der allein daraus resultierenden Treibhausgasemissionen in CO<sub>2</sub> Äquivalenten (t CO<sub>2</sub> eq) in b).

#### 4.4.2 Indirekter Klimaschutzeffekt – Reduktion des Strombedarfs

Abbildung 23 zeigt die Ergebnisse für den ermittelten Stromverbrauch in Abhängigkeit von der Temperatur auf Basis der Modellberechnungen für die Jahre 2009 (a.) und 2013 (b.) u. Die Resultate zeigen, dass für Österreich die modellierten Werte sehr gut mit den Messwerten des Stromverbrauchs zusammenpassen. Die Modelle haben jeweils Werte der Korrelationskoeffizienten von 0,609 für 2009 und von 0,778 für 2013. Die äquivalenten Werte für die Student'sche t-Verteilung sind 7,12 und 11,62 (Werte von 2 sind bei einem 5% Level signifikant).

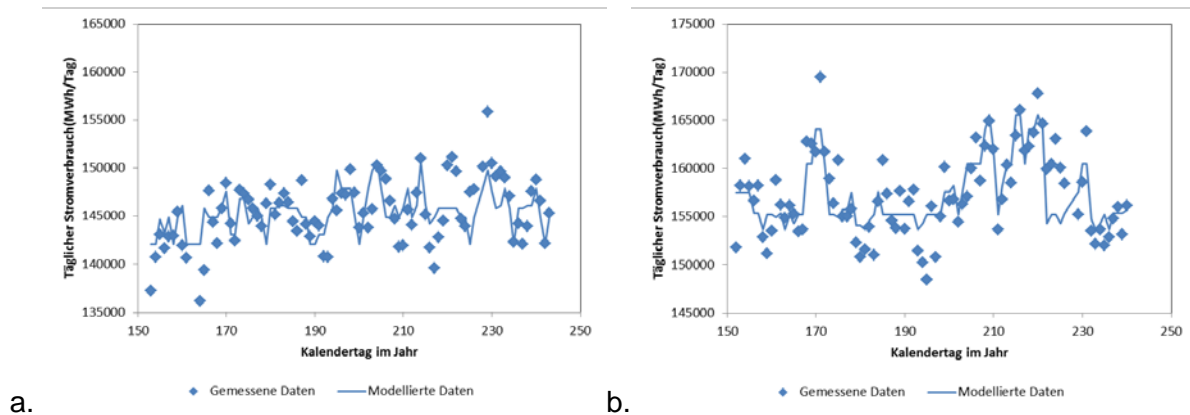


Abbildung 23: Verifizierung des Modells: tatsächliche und modellierte Stromverbrauchsdaten für Juni, Juli und August im Jahr 2009 a) und im Jahr 2013 b).

Abbildung 24a zeigt den mit Methode 1 kalkulierten täglichen nationalen Stromverbrauch pro Person im Zusammenhang mit der Temperatur in den Monaten Juni, Juli und August und in Abbildung 24b die entsprechenden mit Methode 2 für Wien berechneten Werte auf. Im Allgemeinen zeigen die Daten den Trend des niedrigsten Verbrauches für die  $20^{\circ}\text{C} < T_{\text{max}} < 25^{\circ}\text{C}$  Temperaturbandbreite und Verbrauchszunahmen bei höheren und niedrigeren Temperaturen auf. Darüber hinaus kann in jedem der dokumentierten Temperaturbandbreiten eine jährliche Zunahme des Verbrauchs beobachtet werden. Der Gesamtstromverbrauch pro Person ist in Wien höher als auf nationaler Ebene.

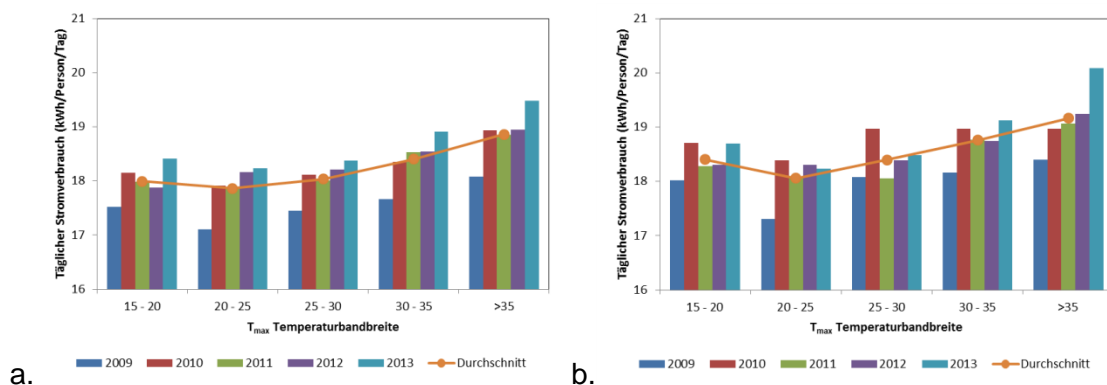


Abbildung 24: Kalkulierter täglicher Stromverbrauch pro Person (in kWh/Person/Tag) für unterschiedliche Temperaturbandbreiten im Juni, Juli und August der Jahre 2009 -2013 bei Anwendung der Methode 1 in a) und der Methode 2 in b)

Die Schätzung auf Basis von Methode 2 für Wien zeigt im Vergleich mit den Werten des nationalen Durchschnittes jedoch weitere Variationen zwischen den Jahren auf. Dies trifft insbesondere für die Jahre 2010 und 2013 zu.

In Abbildung 25 wurde der aus den Jahren 2009 – 2013 ermittelte durchschnittliche tägliche Stromverbrauch für die Temperaturbandbreite  $20^{\circ}\text{C} < T_{\text{max}} < 25^{\circ}\text{C}$  gleich 100% gesetzt. In Abbildung 25a sind die nationalen Werte, die mit Methode 1 berechnet wurden, dargestellt und in Abbildung 25b jene, die mit Methode 2 für die Wiener Innenstadt berechnet wurden. Es zeigt sich, dass der Stromverbrauch an Tagen mit niedrigeren aber auch mit höheren Temperaturen größer ist. Die Werte für die Wiener Innenstadt weisen eine höhere Variation zwischen den Jahren auf als jene des nationalen Durchschnittes (Abbildung 11). Darüber hinaus ist dieser Indikator im Durchschnitt empfindlicher auf Temperaturen in Wien als auf nationaler Ebene, da die Variationen der Diagrammbalken in den anderen Temperaturbandbreiten höher sind. Die möglichen Gründe für diese Variation und einer erhöhten Empfindlichkeit wird im nächsten Abschnitt erörtert.

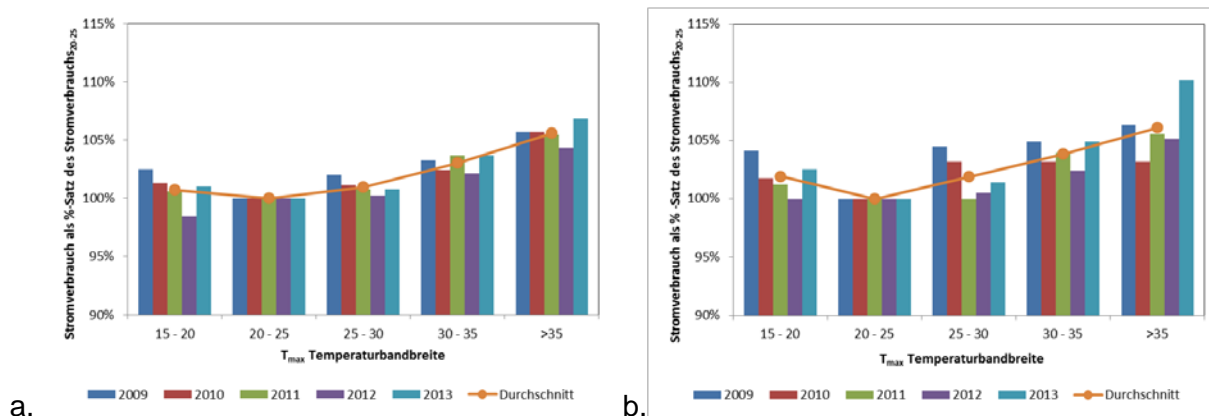


Abbildung 25: Kalkulierter Stromverbrauch in % des durchschnittlichen täglichen Stromverbrauchs für die Temperaturbandbreite  $20 < T_{\text{max}} < 25^{\circ}\text{C}$  im Juni, Juli und August der Jahre 2009 – 2013 bei Anwendung der Methode 1 für nationale Werte in a. und der Methode 2 für Werte der Wiener Innenstadt in b.

Die geschätzte Reduktion des Stromverbrauches, der eingesparten Treibhausgasemissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten und der finanziellen Einsparungen bei Umsetzung der oben angeführten Maßnahmen bzw. durchgeführten Experimente (siehe Tabelle 17 und Tabelle 18) sind in Tabelle 19 dokumentiert. Generell sind die Abschätzungen der Reduktionen und Einsparungen mit Methode 2 um das 1,3-fache höher als jene Werte, die mittels Methode 1 erzielt wurden.

Die Einsparungen am Stromverbrauch in MWh/Jahr verhalten sich naturgemäß ähnlich jenen der Reduktion an Sommer- und Hitzetagen für alle 5 Maßnahmen. Je größer die Reduktion der Maßnahme an Sommer-, oder Hitzetag, desto höher fällt dementsprechend auch die Stromverbrauchsreduktion aus.

Demnach sind durch die Einzelmaßnahme 5 (Einsparungen in der Größenordnung zwischen 14.600 und 19.200 MWh/Jahr zu erwarten, was einer Einsparung in THG Äquivalenten von 1.500 bis 2.000 t CO<sub>2</sub>/Jahr entspricht. Im Vergleich zur direkten Vermeidungsstrategie (Reduktion des Strahlungsantriebes, siehe Kapitel 4.4.1) und die damit zusammenhängende

Reduktion der Treibhausgasemissionen sind die Auswirkungen der indirekten Vermeidungsstrategie (Reduktion des Stromverbrauchs) als eher gering zu bezeichnen.

Tabelle 19: Ergebnisse der Reduktion des Stromverbrauchs, der damit erzielten Treibhausgaseinsparung und der damit verbundenen finanziellen Einsparungen. Ein Treibhausgas-Mix für die Stromerzeugung von 103.3 g/kWh und Stromkosten von 0.205 €/kWh wurden der Abschätzung zugrunde gelegt

Maßnahmen	Einsparungen (Methode 1)			Einsparungen (Methode 2)		
	MWh/Jahr	t CO <sub>2</sub> e/Jahr	€/Jahr	MWh/Jahr	t CO <sub>2</sub> e/Jahr	€/Jahr
1	9,014	931	1,848,000	11,174	1,155	2,291,000
2	5,710	590	1,170,000	7,210	745	1,478,000
3	7,452	770	1,528,000	9,264	957	1,899,000
4	14,397	1,488	2,951,000	18,788	1,941	3,851,000
5	14,626	1,511	2,998,000	19,204	1,984	3,937,000

Die Ergebnisse zeigen auch, dass eine Berücksichtigung des Reflexionsverhaltens von Dachflächen, aber auch versiegelten Flächen zusätzlich zu den bekannteren Maßnahmen wie Dachbegrünung, Fassadenbegrünung und Parkerweiterungen bzw. Baumpflanzungen in Stadtgebieten wesentlich zur Eindämmung städtischer Wärmeinseln beitragen kann. Das Projekt dient somit den Zielen des Programms „Stadt der Zukunft“, da durch solche Maßnahmen hinsichtlich des Klimawandels resiliente Städte und Stadtteile hoher Lebensqualität entstehen. Auch können österreichische Unternehmen, insbesondere Dachziegelhersteller, Städtebauer, Architekten und Firmen, die sich mit Fassaden- und Gründachherstellung beschäftigen, etc. durch dieses Know-how zusätzliche Wettbewerbsvorteile am heimischen, besonders aber am internationalen Markt nutzen.

#### 4.4.3 Diskussion der Ergebnisse hinsichtlich der zu erwartenden Energieeinsparung und der Beiträge zum Klimawandel

##### 4.4.3.1 Direkte Vermeidungsstrategie des Klimawandels – Reduktion des Strahlungsantriebes

Man könnte annehmen, dass die Reduktion der Anzahl der Tage mit Temperaturen  $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$  (Sommertage) und  $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$  (Hitzetage) durch die verschiedenen Maßnahmen 1-5 auch gleichzeitig vom Ausmaß der Reduktion des Strahlungsantriebes abhängig ist, sobald die Maßnahmen bis 2025 vollständig umgesetzt werden. Ein direkter Zusammenhang ist allerdings gemäß Abbildung 26 nicht erkennbar.

Es gibt zahlreiche Gründe warum diese beiden Parameter nicht direkt verglichen werden sollten. Der Strahlungsantrieb ist eine globale Klimaschätzung, während die Abschätzung der Reduktion von Sommertagen einen Mikro-Klima-Effekt darstellt. Letzterer Mikro-Klima-Effekt beinhaltet demzufolge Punkte, die im makroklimatischen Bereich wenig bis gar keine Rolle spielen, wie z.B.:

1. Die Struktur des Stadtgebietes (z.B. die Ausrichtung der Längsachse von Schrägdächern);
2. Die Auswirkungen von Mehrfachreflexionen (z.B. weiße Fassaden in Maßnahmen 4 & 5); und

3. Die positiven Kühleffekte durch latente Verdunstungswärme (wichtig für begrünte Dächer).

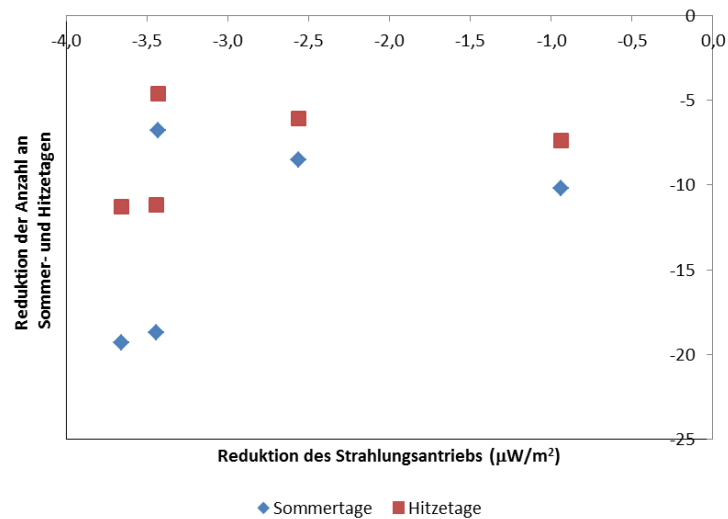


Abbildung 26: Die Reduktion der Anzahl der Sommer- und der Hitzetage als Funktion des Strahlungsantriebes für Maßnahmen 1 bis 5, wobei kein korrelativer Zusammenhang erkennbar ist.

Aus der Sicht einer rein globalen Betrachtungsebene bewirken die Maßnahmen 2, 4 und 5 die höchsten umgerechneten Reduktionen an äquivalenten Treibhausgasemissionen. Auf einer lokalen, stadtklimatologischen Ebene jedoch führen die Maßnahmen 1, 4 und 5 zur größten Reduktion der Sommer- und Hitzetage. Es ist hier eine gewisse Ähnlichkeit zu beobachten, nämlich dass die Maßnahmen 4 und 5 die umfangreichsten Flächen/Areale betreffen.

#### 4.4.3.2 Indirekte Klimaschutzmaßnahme – Reduktion des Stromverbrauches

Da Wien die Bundeshauptstadt und damit das geschäftliche und wirtschaftliche Zentrum von Österreich ist, kann erwartet werden, dass der tägliche Stromverbrauch pro Person (Methode 2) höher ist als der des nationalen Durchschnittes (Methode 1). Der ungewöhnlich hohe Verbrauch pro Person in Wien in den Jahren 2010 und 2013 erfordert jedoch eine genauere Betrachtung, nämlich den Einfluss des Tourismus.

Der Tourismus ist in Österreich ein sehr wichtiger Wirtschaftssektor. In den Monaten Juni, Juli und August liegen durchschnittlich rund 29 Millionen Übernachtungen von Nicht-Österreichern vor (Statistik Österreich, 2015c). Der Tourismus ist nicht gleichmäßig auf die Regionen verteilt. Im Jahr 2010 sanken österreichweit die Übernachtungen um 0,8%, in Wien stiegen sie hingegen um 4,3%. Wenn die Auswirkungen des Tourismus miteinbezogen werden, kommt es zu einer allgemeinen Abnahme des täglichen Stromverbrauchs pro Person, weil sich die Anzahl der Einwohner um jene der Touristen erhöht. Die außergewöhnliche Abweichung in Wien für das Jahr 2010 wird dadurch aufgehoben (siehe Abbildung 24b). Die Anomalie im Jahr 2013 ist jedoch geblieben und zeigt sich insbesondere für die Temperaturbandbreite von  $30^\circ\text{C} < T_{\text{max}} < 35^\circ\text{C}$  und  $T_{\text{max}} > 35^\circ\text{C}$ . Der tägliche Stromverbrauch als Prozentsatz an einem Tag mit einer Temperatur von  $20^\circ\text{C} < T_{\text{max}} < 25^\circ\text{C}$  verändert sich durch die Mitberücksichtigung der Touristen nicht.



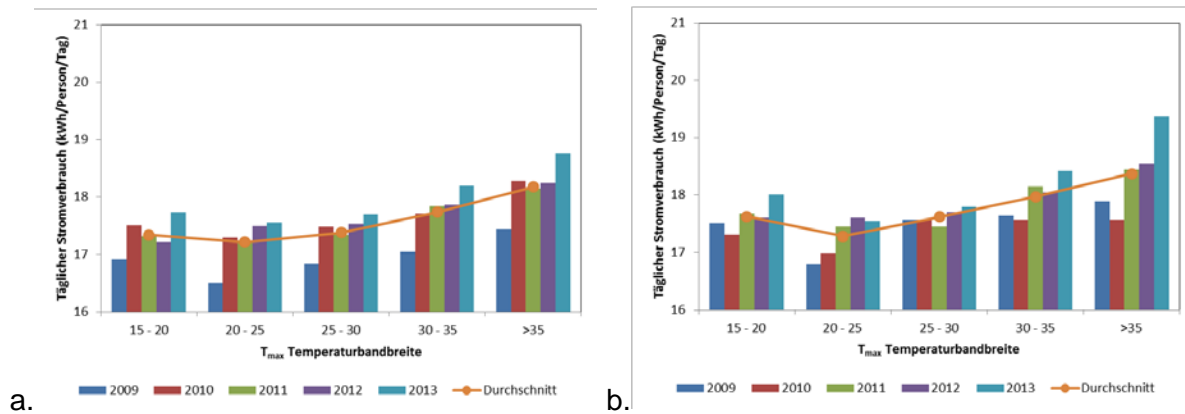


Abbildung 27: Berechneter täglicher Stromverbrauch pro Person über die gewählten Temperaturbandbreiten für die Monate Juni, Juli und August – inclusive Tourismus: a) national mittels Methode 1 und b) geschätzt für Wien mittels Methode 2

Eine oberflächliche Analyse der Temperaturverteilungen in Wien Innere Stadt für die Jahre 2009-2013 zeigt, dass die Jahre 2010 und 2011 relativ kühl waren, während das Jahr 2012 ein relativ warmes Jahr war (Abbildung 28). Das Jahr 2013 hingegen ist durch extreme Wetterereignisse gekennzeichnet mit 36 zusätzlichen Tagen der Temperaturbandbreiten  $15^{\circ}\text{C} < T_{\text{max}} < 20^{\circ}\text{C}$  und  $T_{\text{max}} > 35^{\circ}\text{C}$ . Es wird angenommen, dass im warmen Jahr 2012 der Kauf von Klimaanlage anstieg, die dann im Jahr 2013 auch verwendet wurden. Es wurden zwar keine Statistiken gefunden, die diese Behauptung unterstützen, jedoch besaßen 2012 ca. 7% der Haushalte in Österreich und 25% in Kroatien Klimaanlage (Euromonitor International, 2013). Es kann also mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass mit steigender Temperatur auch die österreichischen Haushalte vermehrt in Klimaanlage zur Raumkühlung investieren. Der Anstieg des Kaufes von Haushaltsklimaanlagen und ein damit verbundener Zuwachs des Stromverbrauches im Sommer konnte bereits festgestellt werden (Radio Steiermark, 2015).

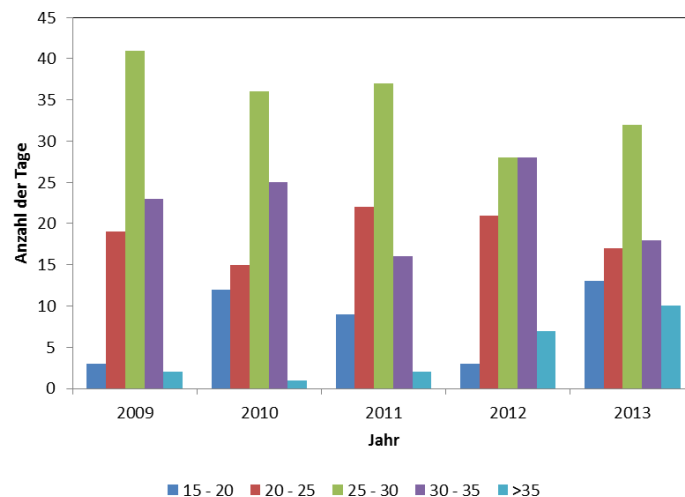


Abbildung 28: Verteilung der Anzahl der Tage in den definierten Temperaturbandbreiten für Wien in den Jahren 2009 bis 2013

Bei Mitberücksichtigung des Tourismus sind die geschätzten Reduktionen des Stromverbrauch und der Treibhausgasemissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten und die finanziellen Einsparungen (Tabelle 20) geringer als zu erwarten war.

An dieser Stelle sei der Leser nochmals daran erinnert, dass die Analysen nur auf dem aktuellen Stromverbrauch basieren. Eine Änderung des Konsumverhaltens in Richtung eines verstärkten Einsatzes von Klimaanlage würde zweifellos den Stromverbrauch erhöhen, besonders an Tagen mit Temperaturen über 25°C und damit auch durch eine entsprechende Änderung der Albedo das Potenzial zur Stromeinsparung erhöhen.

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass diese Analyse nur für die Sommermonate durchgeführt wurde. Das Ändern der Albedo kann auch die städtische Wärmeinsel in den Wintermonaten verringern und die Zahl der Tage mit T<sub>max</sub> <15°C erhöhen, was wiederum den Stromverbrauch erhöhen würde (vergleiche auch Abbildung 9). Auf der anderen Seite wird die Temperaturabnahme aufgrund der Albedoänderung unter 15°C jedoch nicht so groß sein wie die Temperaturzunahme an Tagen über 25°C. Grund dafür ist die geographische Lage Wiens auf einem relativ hohen Breitengrad (48.209), mit relativ starker Wolkenbedeckung im Winter (72% Bewölkung- ZAMG, 2015b), niedriger Luftdurchlässigkeit und einer möglichen Schneebedeckung in den Monaten Dezember, Januar und März. Für eine umfassendere Abschätzung der Stromeinsparung ist es notwendig, die Auswirkungen der Änderung der Albedo über das ganze Jahr in Betracht zu ziehen.

Tabelle 20: Abschätzung der Reduktion des Stromverbrauchs, der damit erzielten Treibhausgaseinsparung und der damit verbundenen finanziellen Einsparungen unter Berücksichtigung des Tourismus. Ein Treibhausgas-Mix für die Stromerzeugung von 103.3 g/kWh und Stromkosten von 0.205 €/kWh wurden der Berechnung zugrunde gelegt

Maßnahmen	Einsparungen (Methode 1)			Einsparungen (Methode 2)		
	MWh/Jahr	t CO <sub>2</sub> /Jahr	€/Jahr	MWh/Jahr	t CO <sub>2</sub> /Jahr	€/Jahr
1	8,804	910	1.805.000	11,248	1,162	2.306.000
2	5,577	576	1.143.000	7,257	750	1.488.000
3	7,278	752	1.492.000	9,325	964	1.912.000
4	14,062	1,453	2.883.000	18,910	1,954	3.876.000
5	14,285	1,476	2.928.000	19,329	1,997	3.962.000

#### 4.4.3.3 Vergleich der Effektivität einzelner Vermeidungsmaßnahmen

Die Berechnung der direkten Treibhausgasemissionsreduktionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten durch einen reduzierten Strahlungsantrieb der Stadt mit einem erhöhten Rückstrahlvermögen ist etwa 50-mal höher als die indirekt eingesparten Treibhausgasemissionen, die sich aus der Verringerung des Stromverbrauchs ergeben.

Für die THG-Einsparungen durch den Strahlungsantrieb allein schätzten Akbari et al., 2009 weltweit Einsparungen von 0,1 und 0,05 t CO<sub>2</sub> pro m<sup>2</sup> durch Änderungen hin zu weißen und reflexionsstarken Dächern. Unsere Abschätzung für Dächer mit hoher Albedo (Maßnahme 2) würden innerhalb der nächsten 50 Jahre zu Einsparungen in Höhe von 3,7 Mio. t CO<sub>2</sub> (Abbildung 22) führen. Werden 100 Jahre als Betrachtungszeitraum herangezogen, betragen

die Einsparungen 4,4 Mio. t CO<sub>2</sub> bzw. 0,08 t CO<sub>2</sub> /m<sup>2</sup>. Einige der Unterschiede ergeben sich aus der geographischen Lage Wiens (relativ hoher Breitengrad), den Bewölkungsverhältnissen und dem Vorhandensein von Schnee. In Chennai (Indien), Mexiko City (Mexiko) und Los Angeles (USA) beispielsweise induziert die gleiche Albedo-Änderung etwa eine 2-mal höhere Veränderung des Strahlungsantriebes und der damit sich ergebenden theoretisch reduzierten Treibhausgasemissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Nichtsdestotrotz sind die entsprechenden Emissionsminderungen mit 75.000 t CO<sub>2</sub> e pro Jahr signifikant. Diese entsprechen anders ausgedrückt im Schnitt den jährlichen Treibhausgasemissionen von ungefähr 7.500 Österreichern.

Akbari und Matthews, 2012 haben auch mittels eines bottom-up Ansatzes ein Stromeinsparungspotential von 2,5 bis 10 kWh pro m<sup>2</sup> Dachfläche für Städte berechnet, in den Raumkühlung eine große Rolle spielt. Der Top-Down Ansatz dieses Projekts unter Heranziehung des MUKLIMO\_3 Modells zur Ermittlung des Mikroklimas von Wien ergibt Werte von etwa 0,2 bis 0,4 kWh pro m<sup>2</sup>, also um eine Größenordnung kleiner. Dies ist zum Teil wie schon oben erwähnt auf den relativ hohen Breitengrad von Wien, die Bewölkungsverhältnisse und das Vorhandensein von Schnee im Winter zurückzuführen. Aufgrund des hohen Breitengrades ist Wien bis heute im Verhältnis zu den von Akbari und Matthews, 2012 analysierten Städten noch keine Stadt mit umfangreicher Gebäudeklimatisierung in den Sommermonaten.

## 5 Schlussfolgerungen

Das Projekt hat gezeigt, wie wichtig die Betrachtung verschiedenster Maßnahmen zur Eindämmung städtischer Wärmeinseln ist. Besonders die Erhöhung der Oberflächenalbedo, also die Steigerung des Reflexions- und Rückstrahlungsverhalten von Dachflächen, Fassaden und sonstiger versiegelter Flächen kann - zusätzlich zu den bisher bereits besser bekannten Maßnahmen wie Dachbegrünung, Fassadenbegrünung, Parkflächenerweiterung und dem Pflanzen von Bäumen in Straßenzügen – einen wesentlichen Beitrag in Richtung einer Verbesserung des Mikroklimas Stadt (kühlende Wirkung), aber auch in Richtung Stromverbrauchssenkung und damit einhergehende THG-Reduktion liefern. Auch die makroklimatischen Auswirkungen solcher Maßnahmen auf den Klimawandel sind als sehr positiv zu beurteilen.

Die durchgeführten Experimente zur Änderung der Oberflächenalbedo zeigen, abhängig von der Art und der Intensität der simulierten baulichen Adaptierung, unterschiedliche Ausprägungen der Verminderung der Hitzebelastung anhand des berechneten, reduzierten Auftretens der Parameter „mittlere jährliche Anzahl der Sommertage bzw. Hitzetage“.

Aus den allgemeinen Experimenten zur Erhöhung der Dachalbedo und der Dachbegrünung folgt, dass der Verminderungseffekt der Hitzebelastung durch beide Maßnahmen in der gleichen Größenordnung liegt: die vollflächige mittlere Erhöhung der Dachalbedo auf nahezu optimales Niveau (ca. 0,661) zeigt denselben Kühlungseffekt wie eine theoretische 75%ige Dachbegrünung. Zwar ist die Albedo für Dachbegrünung bei weitem geringer als jene der

erhöhten Dachalbedo, jedoch gleicht der Verdunstungseffekt diesen Unterschied in Bezug auf eine Verringerung der UHI wieder aus. Daher liegt es nahe, eine Kombination beider Adaptierungsmaßnahmen anzudenken. Die Dachbegrünung weist dabei weitere vorteilhafte Effekte, wie das Wasserrückhaltevermögen vor, welche einen höheren bautechnischen Investitionsbedarf rechtfertigen könnten. Aus den Kombinationsexperimenten zeigt sich, dass der Reduktionseffekt bezüglich der Hitzebelastung für die Maßnahme „Gründach“ ab einem Nutzungsgrad von ca. 50% der potentiell verfügbaren Dachfläche (45% der Gesamtdachfläche), stark abnimmt, d. h. von den Reduktionseffekten der erhöhten Dachalbedo nahezu verdeckt wird. Für die konkrete Umsetzung der Maßnahme „Erhöhung der Dachalbedo für die von der Dachbegrünung nicht betroffenen Dachflächen“ zeigt die Adaptierung mit hochreflektierenden Dachziegeln mit einer Albedo von 0,68 ungefähr die zweifache Verminderung der Hitzebelastung gegenüber einer Verwendung von gewöhnlichen, hellen Dachziegeln mit einer Albedo von 0,328.

Somit stellt sich eine Kombination aus 50%iger Dachbegrünung des vorhandenen Potentials bei gleichzeitiger Erhöhung der Dachalbedo, landnutzungsabhängig bzw. der gegebenen Dachform und den örtlichen Ensemblebestimmungen entsprechend, einerseits ausgeführt mit hochreflektierenden Dachziegeln vor allem im Stadtkern und den Wohngebieten und andererseits der Bedeckung mit Aluminiumblech für die schwerpunktmäßig in den großvolumigen, gewerblichen, industriellen u. Ä. gewidmeten Bereichen vorhandenen Flachdächer, unter dem Gesichtspunkt einer realistischen Umsetzung, als effektivste Maßnahme dar. Diese Interventionen zeigen bezüglich ihrer Flächenwirkung einen ausgeprägten Effekt in der Reduktion der Hitzebelastung in zentralen, dicht bebauten Gebieten, der etwa doppelt so groß ist wie die mittlere Reduktion der Hitzebelastung für das gesamte Baulandgebiet. Dieser heterogenen räumlichen Verteilung kann mit den Maßnahmen betreffend die Fassaden- und versiegelten Flächen gut ergänzend begegnet werden. Die Adaptierungsmaßnahmen können durch hochreflektierende Fassadenputzfarbe mit einer Albedo von 0,8 und baulicher Ausführung der versiegelten horizontalen Flächenanteile mit Weißbeton entsprechender Oberflächenwirkung realisiert werden, die über das Modellgebiet gleichmäßig verteilte Effekte bewirken. Diese Maßnahmen fördern ebenso auch die potentiellen Randlagen des Stadtgebiets, die zukünftig einer überproportionalen Verdichtung unterliegen werden.

Basierend auf Rückstrahleigenschaften konkreter Baumaterialien, kann die in Experiment 34 angewendete Kombination von Adaptierungsmaßnahmen der unterschiedlichen Oberflächen, als in ihren Umsetzungsannahmen idealisierte, jedoch nachvollziehbare Gesamtmaßnahme, als richtungsweisend betrachtet werden:

- Realisierung der Gründächer im Ausmaß von 50% der potentiell dafür geeigneten Dachfläche,
- Adaptierung der verbleibenden Dachrestfläche mit hochreflektierendem Deckmaterial (ev. speziell entwickelte Dachziegeloberflächen, ev. neutraler Farbgebung, jedoch erhöhter Albedo), landnutzungsabhängig/dachformabhängig entsprechend weißer Keramik [0,680] bzw. Aluminiumblech [0,730],

- Erhöhung der Albedo der Fassadenflächen durch Anwendung heller Fassadenfarbe [0,8],
- Erhöhung der Albedo der versiegelten Flächen durch Anwendung heller Farbe (Weißbeton) [0,71].

Die im Wesentlichen zwei Aspekte umfassende Ermittlung der Klimaauswirkungen durch die Veränderung der Oberflächenalbedo von Stadtflächen, nämlich a) die Abschätzung der direkten Veränderung des Strahlungsantriebs und b) die Ermittlung des Stromeinsparungspotentials und einhergehende indirekte Treibhausgasreduktion haben gezeigt, dass solche Maßnahmen eine effektive Möglichkeit darstellen den Klimawandel zu bekämpfen. Bezogen auf einen m<sup>2</sup> Dachfläche in Wien entfiel das Reduktionspotential etwas geringer aus als dies von Akbari et al. (2009) als globaler Durchschnittswert ermittelt wurde.

Je nach Maßnahme (vergl. Tabelle 18) betragen die direkten Einsparungen an theoretischen Treibhausgasemissionen durch die Veränderung des Strahlungsantriebs bis zu 75.000 t CO<sub>2</sub> eq /Jahr über die nächsten 50 Jahre. Das indirekte THG-Einsparungspotential durch die Senkung des Stromverbrauchs, hervorgerufen durch die Reduktion an Sommer- und Hitzetagen innerhalb der Stadt Wien fällt im Vergleich dazu geringer aus. Hauptgrund dafür ist einerseits der geringe Raumkühlungsbedarf in den Sommermonaten und andererseits die zu weiten Teilen erneuerbare und damit CO<sub>2</sub> neutrale Erzeugung des Österreichischen Strommixes. Nichtsdestotrotz kann der Stromverbrauch durch die Veränderung der Oberflächenalbedo je nach Maßnahme zwischen 5.000 und 20.000 MWh betragen, was einer THG-Reduktion von ca. 600-2.000 t CO<sub>2</sub>/Jahr und einer Kosteneinsparung der Konsumenten von 1,1 bis 4 Mio. € entspricht. Es ist zu erwarten, dass die berechneten Einsparungen sich im Zuge eines möglichen, zukünftig erhöhten Raumkühlungsbedarfs in Wien (Installation von zusätzlichen Klimaanlage) ausdehnen werden.

Im speziellen sei an dieser Stelle auch noch der regionale Aspekt der Ergebnisse zu erwähnen. Hier zeigten sich bei den Modellierungen große Unterschiede: für den Bereich der „inneren Stadt“ waren die Modellergebnisse der gewählten Maßnahmen wesentlich deutlicher zu erkennen, als dies für die äußeren Gebiete ersichtlich wurde. Dies zeigt, dass für Umsetzungsmaßnahmen auch kleinere, besonders stadtkernnahe Quartiere und Stadtteile, bzw. auch einzelne Straßenzüge herangezogen werden können, um deutliche Verbesserungen hinsichtlich des UHI-Effekts zu erzielen.

## 6 Ausblick und Empfehlungen

Die Ergebnisse der Mikroklimatischen Simulation für die Stadt Wien haben gezeigt, dass eine Erhöhung des Rückstrahlpotentials und der weitere Ausbau der Gründächer und Fassadenbegrünungen das Phänomen Städtischer Wärmeinseln deutlich abschwächen können. Aufgrund der Tatsache, dass im mitteleuropäischen Bereich städtische Dachlandschaften das kulturelle Erscheinungsbild von Städten wesentlich beeinflussen, ist die praktische Umsetzung der Erhöhung von Rückstrahleigenschaften bei bestehenden

Gebäuden allerdings nur schwer möglich. Können Fassaden und ev. versiegelte Flächen noch hell gestaltet werden, sind helle oder sogar weiße Dachflächen zumeist öffentlich nicht erwünscht. Allerdings zeigen die Ergebnisse, dass auch kleinräumige Verringerungen des UHI-Effekts durch entsprechende Maßnahmen auf lokaler Ebene auftreten. Beispielsweise sei hier die Oberflächenausprägung für zukünftige Siedlungsbereiche wie z.B. im Bereich Aspern+ angeführt.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich auch dahingehend orientieren, innovative Oberflächenbeschichtungen für Dachziegel zu untersuchen, die den Kriterien eines höheren Reflexionsvermögens bei gleichbleibender Farbgebung und Wetterbeständigkeit gerecht werden. Wichtig erscheint für die Stadt Wien auch der konsequente Ausbau potentieller Gründachflächen, da bis zum heutigen Zeitpunkt lediglich 2% des vorhandenen Potentials umgesetzt wurden.

Zukünftige Projekte zum Thema Eindämmung Städtischer Wärmeinseln könnten sich auf die Betrachtung anderer Städte ausweiten, da hier mikroklimatisch starke Unterschiede zu erwarten sind. Forschungsarbeiten in den Bereichen „Urban Forestry“ bzw. die mikroklimatischen Auswirkungen von Dach- und Fassadenbegrünungen in punkto „Transpiration und Abkühlung durch Pflanzen“, sowie ein möglicher positiver Einfluss von Gründächern auf die Feinstaubabscheidung in Städten könnten zukünftig von Interesse sein. Auch die Beschattung von Geschäftsstraßen und deren Einfluss auf das Kaufverhalten von Passanten stellen neue, interessante Forschungsgebiete dar, die das Zusammenleben und den Humankomfort in Städten zukünftig betreffen. In Zusammenhang mit erhöhten Albedowerten von Oberflächen (v.a. von Fassade und Boden) und deren direkte Auswirkungen auf den menschlichen Komfort (ev. thermischer und visueller Stress (Blendwirkung) durch die vom Menschen empfangene höhere Reflexion) sollten zukünftige Forschungsprojekte zu diesem Thema ebenfalls eingehen.

Die im Projekt angewandten Methoden können auch für die Beurteilung von Stadtentwicklungskonzepten herangezogen werden, wobei bereits im Planungsprozess mögliche Probleme bezüglich UHI quantifiziert werden und unterschiedliche Szenarien zur Verringerung des UHI-Effekts gegenübergestellt werden können.

In einem Folgeprojekt möchte das Projektteam eine Standardisierung hinsichtlich der für die Modelle benötigten Eingangsdaten (wie z.B. Landnutzungsdaten aus bereits vorliegenden Urban-Atlas Daten der EU) und die standardisierte Übertragbarkeit der Modellierung auf andere Städte untersuchen. Dabei soll durch die automatisierte Aufbereitung bereits vorliegender Eingangsdaten sowie die standardisierte Anwendung der Modelle eine sehr kostengünstige Möglichkeit der Stadtklimamodellierung geschaffen werden.

# 7 Verzeichnisse

## 7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der zu erwartenden Hitzewellen und die damit einhergehende Gefahr verstärkten Auftretens von UHI's in europäischen Städten zwischen 2071 und 2100. Quelle: EEA (2012) .....	14
Abbildung 2: Technische Maßnahmen zur Vermeidung und Anpassung an den UHI-Effekt in Wien (Quelle: Czachs et al., 2013). .....	16
Abbildung 3: Stromverbrauch an Werktagen in Österreich (1960-2010) .....	21
Abbildung 4: Albedo für das Stadtgebiet von Wien basierend auf Landsat-5 Thematic Mapper Aufnahme vom 31. Juli 2005. Darstellung in Grauwerten von 5% Albedo in Schwarz bis 25% Albedo in Weiß mit einer Auflösung von 30m mal 30m je Bildelement.....	24
Abbildung 5: Ausschnitt Albedo und Vergleich mit Echtfarb-Aufnahme. ....	24
Abbildung 6: Ausschnitt – Realnutzungskartierung (gelbe Linien über Echtfarb-Luftbild) die für die Ableitung von Mittelwerten der Albedo herangezogen wurde. Die Flächen innerhalb der gelben Linien stellen jeweils eine zusammenhängende Landnutzungskategorie dar. ....	25
Abbildung 7 Illustration der tri-linearen Interpolation der Quader-Methode (Früh et al., 2010, Zuvela-Aloise et al., 2014) .....	27
Abbildung 8 Landnutzungsklassen von Wien (Zuvela-Aloise et al. / Urban Climate 10 (2014) 490–508) .....	29
Abbildung 9: Nationale Stromverbrauchsdaten pro Tag dargestellt über der Temperatur für die Wiener Innenstadt (a) und der nationale Stromverbrauch und Maximaltemperatur für die Innenstadt von Wien dargestellt über das Jahr am Beispiel des Jahres 2009 (b). Feiertage sind nicht inkludiert.....	33
Abbildung 10: Korrigierte nationale Stromverbrauchsdaten pro Tag dargestellt über der Temperatur für die Wiener Innenstadt (a) und der korrigierte nationale Stromverbrauch und Maximaltemperatur für die Innenstadt von Wien dargestellt über das Jahr am Beispiel des Jahres 2009 (b). Feiertage sind nicht inkludiert.....	34
Abbildung 11: Korrigierter nationaler Stromverbrauch und Maximaltemperatur dargestellt für die Monate Juni, Juli und August in 2009 (a) und 2013 (b) für die Innenstadt von Wien. Feiertage sind nicht inkludiert.....	34
Abbildung 12: Unterschied im Potential von Lufttemperaturveränderungen im Stadtgebiet von Stuttgart in einer Höhe von 2m: a) veränderte Albedo für Dächer und Wände, b) modifizierte Proportionen von Straßenbreite und Gebäudehöhe, bzw. unterschiedliche Begrünungsszenarien mittels eines großen c) und mehreren kleinen Parks d) (Fallmann J. et al. (2014)) .....	41
Abbildung 13: Stratifizierung für die Stichprobenerhebung wobei die Bezirke die zur Kategorie „Wien Zentrum“ zusammengefasst wurden in orange und die restlichen Bezirke in blau dargestellt sind. ....	46

Abbildung 14: Auswertung der Referenzsimulation: Mittlere jährliche Anzahl der Sommertage (ST) für Wien bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010.....	50
Abbildung 15: Auswertung der Experimentsimulationen 07 (oben) und 09 (unten): Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010.....	54
Abbildung 16: Auswertung der Simulationen 17: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010 .....	55
Abbildung 17: Auswertung der Experimentsimulation 20: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010.....	56
Abbildung 18 Auswertung der Experimentsimulationen 29: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010.....	59
Abbildung 19: Auswertung der Experimentsimulationen 34 (oben), 36 (unten): Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010.....	61
Abbildung 20: Auswertung der Experimentsimulation 42: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010.....	63
Abbildung 21: Auswertung der Experimentsimulation 43: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) für Wien gegenüber der Referenzsimulation bezogen auf die Klimanormalperiode 1981-2010.....	64
Abbildung 22: Modellierter Änderung des Strahlungsantriebes ( $W/m^2$ ) in a) und kumulative Änderung der allein daraus resultierenden Treibhausgasemissionen in $CO_2$ Äquivalenten ( $t CO_2 eq$ ) in b). .....	67
Abbildung 23: Verifizierung des Modells: tatsächliche und modellierte Stromverbrauchsdaten für Juni, Juli und August im Jahr 2009 a) und im Jahr 2013 b).....	68
Abbildung 24: Kalkulierter täglicher Stromverbrauch pro Person (in kWh/Person/Tag) für unterschiedliche Temperaturbandbreiten im Juni, Juli und August der Jahre 2009 -2013 bei Anwendung der Methode 1 in a) und der Methode 2 in b) .....	68
Abbildung 25: Kalkulierter Stromverbrauch in % des durchschnittlichen täglichen Stromverbrauchs für die Temperaturbandbreite $20 < T_{max} < 25 C^\circ$ im Juni, Juli und August der Jahre 2009 – 2013 bei Anwendung der Methode 1 für nationale Werte in a. und der Methode 2 für Werte der Wiener Innenstadt in b. ....	69
Abbildung 26: Die Reduktion der Anzahl der Sommer- und der Hitzetage als Funktion des Strahlungsantriebes für Maßnahmen 1 bis 5, wobei kein korrelativer Zusammenhang erkennbar ist. ....	71
Abbildung 27: Berechneter täglicher Stromverbrauch pro Person über die gewählten Temperaturbandbreiten für die Monate Juni, Juli und August – inclusive Tourismus: a) national mittels Methode 1 und b) geschätzt für Wien mittels Methode 2 .....	72



Abbildung 28: Verteilung der Anzahl der Tage in den definierten Temperaturbandbreiten für Wien in den Jahren 2009 bis 2013.....72

## 7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einflussfaktoren die den UHI-Effekt verstärken oder reduzieren können (Quelle: EEA, 2012).....	15
Tabelle 2 Landnutzungsparameter .....	30
Tabelle 3: Dachflächen und deren spezifische Albedowerte mit und ohne Schneebedeckung für Wien als Mittelwertsbereiche (U.S. DOE (2004) .....	31
Tabelle 4: Durchschnittlicher Prozentsatz jener Tage pro Monat mit Schneebedeckung in Wien zwischen 1981 und 2015 (ZAMG, 2015a) .....	31
Tabelle 5: Kurzwellige Globaleinstrahlung oberhalb der Atmosphäre (TOA-Top of the Atmosphere) und durchschnittliche Atmosphärische Durchlässigkeit für Wien über das Jahr. Geschätzte Werte je nach geographischer Position nach NASA (2015). Gemessene Werte als Mittelwert der ankommenden Globalstrahlung für die Jahre 2004 bis 2014, ZAMG (2015b).....	32
Tabelle 6: Kühlungseffekt außerhalb der Grünflächen, Quelle: Shashua-Bar und Hoffman, 2000.....	38
Tabelle 7: Low-Tech Maßnahmen zur Reduzierung des UHI-Effekts in Städten und der zu erwartende Effekt auf das Mikroklima bzw. auf den Stromverbrauch in Wien (+ positiver Beitrag, 0 neutral, - negativer Beitrag).....	45
Tabelle 8: Flächenanteile ausgewählter Dachkategorien aus Stichprobeninventur.....	46
Tabelle 9: Übersicht von MODIS-Landsat basierten Albedomessungen verschiedener Landnutzungskategorien in % .....	47
Tabelle 10: Landnutzungsparametrisierung der Referenzsimulation.....	49
Tabelle 11: Übersicht der durchgeführten Simulationen (Ex id = Experiment Nr.).....	51
Tabelle 12: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) 1981-2010 der Experimente: 1-9: Albedo der Dachflächen (links) bzw. Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) 1981-2010 der Experimente 10-16: Anteil der Gründächer (rechts) .....	53
Tabelle 13: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) 1981-2010 der Experimente: 17-18: Anwendung gewählter Materialien bestimmter Albedo: versiegelte Flächen (links) bzw. Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) 1981-2010 der Experimente: 19-21: Anwendung gewählter Materialien bestimmter Albedo: Wandflächen (rechts).....	55
Tabelle 14: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) 1981-2010 der Experimente: 22-30: Anwendung gewählter Materialien bestimmter Albedo auf spezifische Landnutzungsklassen .....	57
Tabelle 15: Gründachpotential der Landnutzungs-klassen Wiens (links) bzw. Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta$ ST) 1981-2010 der Experimente: 31-36: Anteil der Realisierung des potentiellen Gründachanteils (rechts).....	60

Tabelle 16: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) 1981-2010 der Experimente: 37-44: Kombinierte Anwendung gewählter Materialien und Gründächern auf Dachflächen und andere.....	62
Tabelle 17: Änderung der mittleren jährlichen Anzahl der Sommertage ( $\Delta ST$ ) und Hitzetage ( $\Delta HT$ ) 1981-2010 aller durchgeführten Experimente gegenüber der Referenzsimulation. Die Werte an den Beobachtungsorten Wien Innere Stadt und Wien Hohe Warte resultieren aus den nächstgelegenen vier Gitterpunktwerten, jene für die selektierten Klassen aus einem Flächenmittel entsprechend der Landnutzungswidmung. Rot eingerahmte Experimente wurde für weitere Berechnungen im Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 herangezogen. ....	65
Tabelle 18: Durchschnittliche jährlich Reduktion der Anzahl an Sommertagen ( $T_{max} \geq 25^{\circ}C$ ) und Hitzetagen ( $T_{max} \geq 30^{\circ}C$ ) in Wien – Innere Stadt für verschiedene Varianten der Veränderung horizontaler und vertikaler Gebäudeoberflächen. Zeithorizont ist 1981-2010 ( $\alpha =$ Albedo). ....	66
Tabelle 19: Ergebnisse der Reduktion des Stromverbrauchs, der damit erzielten Treibhausgaseinsparung und der damit verbundenen finanziellen Einsparungen. Ein Treibhausgas-Mix für die Stromerzeugung von 103.3 g/kWh und Stromkosten von 0.205 €/kWh wurden der Abschätzung zugrunde gelegt.....	70
Tabelle 20: Abschätzung der Reduktion des Stromverbrauchs, der damit erzielten Treibhausgaseinsparung und der damit verbundenen finanziellen Einsparungen unter Berücksichtigung des Tourismus. Ein Treibhausgas-Mix für die Stromerzeugung von 103.3 g/kWh und Stromkosten von 0.205 €/kWh wurden der Berechnung zugrunde gelegt .....	73

### 7.3 Literaturverzeichnis

- Akbari H, S. Konopacki (2004), Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada. *Energy* 2004;29:191–210.
- Akbari H, S. Konopacki (2005), Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy* 2005;33:721–56.
- Akbari H. (2002), Shade trees reduce building energy use and CO<sub>2</sub> emissions from power plants. *Environmental Pollution* 2002;116:119–26.
- Akbari H., D. M. Kurn, S. E. Bretz, J. W. Hanford (1997), Peak power and cooling energy saving of shade trees. *Energy and Buildings* 1997;25:139–48.
- Akbari H., Menon, S., A. Rosenfeld (2009), Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub>. *Climatic Change*, 94(3-4), 275-286.
- Akbari H., D. Matthews (2012), Global cooling updates: Reflective roofs and pavements, *Energy and Buildings* 55 (2012) 2–6, Elsevier, doi:10.1016/j.enbuild.2012.02.055.
- Akbari H., H. D. Matthews, D. Seto (2012), The long-term effect of increasing the albedo of urban areas, *Environ. Res. Lett.* 7 (2012) 024004 (10pp), IOP Publishing, doi:10.1088/1748-9326/7/2/024004.
- Akbari H. H. D. Matthews (2012), Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. *Energy and Buildings*, 55, 2-6.
- Alavipanah S., M. Wegmann, S. Qureshi, Q. Weng, T. Koellner (2015), The Role of Vegetation in Mitigating Urban Land Surface Temperatures: A Case Study of Munich, Germany during the Warm Season; *Sustainability* 2015, 7, 4689-4706; doi:10.3390/su7044689; ISSN 2071-1050.
- Alchapar N. L., Correa E. N., Cantón M. A. (2014), Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones, *Energy and Buildings*, Volume 69, February 2014, Pages 22–32, Elsevier, doi:10.1016/j.enbuild.2013.10.012.
- Allex B., A. Arnberger, A. Wanka, R. Eder, H.-P. Hutter, M. Kundi, P. Wallner, F. Kolland, B. Blättner, H. A. Grewe (2013), The Elderly under Urban Heat Pressure – Strategies and Behaviours of Elderly Residents against Urban Heat, *Proceedings REAL CORP 2013 Tagungsband 20-23 May 2013, Rome, Italy*, ISBN: 978-3-9503110-5-1, Editors: Manfred SCHRENK, Vasily V. POPOVICH, Peter ZEILE, Pietro ELISEI.
- APCC (2014), Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten. ISBN 978-3-7001-7699-2
- Arya S. P. (2001), *Introduction to Micrometeorology*, Second Edition. Academic Press, San Diego, 420pp.

- Bacci L., M. Morabito, A. Raschi, F. Ugolini (2003), Thermohygrometric conditions of some urban parks of Florence (Italy) and their effect on human wellbeing. Proceedings of "Fifth International Conference on Urban Climate", 1-5 September Lodz, Poland.
- BMVBS / BBSR (Hrsg.) (2009), Ursachen und Folgen des Klimawandels durch urbane Konzepte begegnen. BBSR-Online-Publikation 22/2009. urn:nbn:de:0093-ON2209R158.
- Bornstein R. D., E. Gutierrez, J. Gonzalez, A. Martilli, F. Chen, and J. K. Ching, (2012), Effect of Sub-Kilometer Grid-Spacing and Time Step Magnitude on the Formation of Horizontal-Vorticies in Urbanized-WRF Simulations of NYC, 92nd American Meteorological Society Annual Meeting, January 22-26, 2012, New Orleans.
- Bretz S. E., H. Akbari (1997), Long-term performance of high-albedo roof coating. *Energy and Buildings* 1997;25(2):159–67.
- Bright R. M., Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2012). Climate impacts of bioenergy: Inclusion of carbon cycle and albedo dynamics in life cycle impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 37, 2-11.
- Bruse M. (1999), Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima. Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen. Diss. Univ. Bochum.
- Ca V. T., T. Asaeda, E. M. Abu (1998), Reductions in air conditioning energy caused by nearby park. *Energy and Buildings* 1998; 29:83–92.
- Cameron R. W. F., J. E. Taylor, M. R. Emmett (2014), What's 'cool' in the world of green facades? How plant choice influences the cooling properties of green walls, *Elsevier, Building and Environment* 73 (2014) 198-207, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.005>.
- Cao X., A. Onishi, J. Chen, H. Imura (2010), Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape and Urban Planning* 2010;96:224–31.
- Chapman L., C. L. Muller, D. T. Young, C.S.B. Grimmond, C. Xai; A high-density, low-cost urban air temperate network for UHI assessment, in preparation, <http://www.birmingham.ac.uk/schools/gees/centres/bucl/hitemp/index.aspx>
- Coutts A. M., E. Daly, J. Beringer, N. J. Tapper (2013), *Building and Environment*, Elsevier, Volume 70, December 2013, Pages 266–276, doi:10.1016/j.buildenv.2013.08.021.
- Czachs Ch., Reinwald F. Brandenburg Ch., Gantner B., Alex B., Preiss J., Liebl U. (2013), Urban Heat Islands – Strategy Plan Vienna, Proceedings REAL CORP 2013 Tagungsband 20-23 May 2013, Rome, Italy, ISBN: 978-3-9503110-5-1, Editors: Manfred SCHRENK, Vasily V. POPOVICH, Peter ZEILE, Pietro ELISEI.
- Despini F., Ferrari, C., Bigi, A., Libbra, A., Teggi, S., Muscio, A., & Ghermandi, G. (2015), Correlation between remote sensing data and ground based measurements for solar reflectance retrieving. *Energy and Buildings*, 2015.

Development and application of mitigation and adaptation strategies and measures for counteracting the global Urban Heat Islands phenomenon, Project implemented through the CENTRAL EUROPE Programme co-financed by the ERDF, <http://eu-uhi.eu/de>.

Doulos L., M. Santamouris, I. Livada (2004), Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy* 2004;77:231–49.

E-Control (2014), Stromkennzeichnungsbericht 2014. <http://www.e-control.at/documents/20903/-/-/206f7f9f-f3a9-42f0-a874-4403a6d153a2> Accessed 11 August 2015.

ENTSO-E – European Network of Transmission System Operators for Electricity (2015) Hourly load values for a specific country for a specific month. <https://www.entsoe.eu/db-query/consumption/mhlv-a-specific-country-for-a-specific-month>. Accessed 05 August 2015.

Eskeland G. S. and Mideska T.K. (2010), Electricity demand in a changing climate. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 15: 877-897.

Euromonitor International Ltd. (2013), Consumer Europe 2014, 29th edition. [http://www.euromonitor.com/medialibrary/PDF/Book\\_CE\\_2014.pdf](http://www.euromonitor.com/medialibrary/PDF/Book_CE_2014.pdf). Accessed 13 August 2015.

European Environment Agency - EEA (2012), Urban adaptation to climate change in Europe, EEA Report 2/2012, © EEA, Copenhagen, 2012, ISBN 978-92-9213-308-5, ISSN 1725-9177, doi:10.2800/41895.

Fallmann J., St. Emais, P. Suppan, (2014), Mitigation of urban heat stress – a modelling case study for the area of Stuttgart. –*DIE ERDE* 144 (3-4): 202-216, DOI: 10.12854/erde-144-15.

Ferrari Ch., A. Libbra, F. M. Cernuschi, L. De Maria, St. Marchionna, M. Barozzi, C. Siligardi, A. Muscio (2015), A composite cool colored tile for sloped roofs with high 'equivalent' solar reflectance, *Energy and Buildings*, Vol. 107, Elsevier, in press, Nov. 2015.

Feyisa G. L., K. Dons, H. Meilby (2014), Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning* 123 (2014) 87-95.

Formayer H., P. Haas, M. Hofstätter, S. Radanovics, H. Kromp-Kolb (2008), Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Temperaturszenarien für Wien und ausgewählte Analysen bezüglich Adaptionsstrategien. Endbericht einer Studie im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung – MA 22 der Stadt Wien gemeinsam mit der MA 27 – EU-Strategie und Wirtschaftsentwicklung, 82.

Foster J., A. Lowe, St. Winkelman (2011), The Value of Green Infrastructure for Urban Climate Adaptation, The Center for Clean Air Policy, February 2011

Früh B., P. Becker, T. Deutschländer, J.–D. Hessel, M. Kossmann, I. Mieskes, J. Namyslo, M. Roos, U. Sievers, T. Steigerwald, H. Turau, U. Wienert (2010), Estimation of Climate-

Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 50: 167–184. doi: 10.1175/2010JAMC2377.1

Früh B., Kossmann, M., Roos, M. (2011), Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. DWD Bericht, ISBN 978-3-88148-453-4.

Gaffin S. R., M. Imhoff, C. Rosenzweig, R. Khanbilvardi, A. Pasqualini, A. Y. Kong, E. Hartung (2012), Bright is the new black—multi-year performance of high-albedo roofs in an urban climate. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014029.

Gago E.J., J. Roldan, R. Pacheco-Torres, J. Ordóñez (2013), The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects, *Renewable and Sustainable Energy Review* s25 (2013) 749–758, Elsevier, doi:10.1016/j.rser.2013.05.057.

Gallaun H., A. Frewein (2014), Bericht zu Oberflächenalbedo mit Auswertung charakteristischer Landnutzungsänderungen in Wien. JOANNEUM RESEARCH.

Georgescu M., P. E. Morefield, B. G. Bierwagen, Ch. P. Weaver (2013), Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions, *PNAS Early Edition*, [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1322280111](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1322280111).

Gill S. E., J. F. Handley, A. R. Ennos, S. Pauleit (2007), Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure, *BUILT ENVIRONMENT VOL 33 NO 1*, p.p. 115-133.

Grimmond C. S. B., M. Blackett, M. Best, J. Barlow, J. J. Baik, S. Belcher, S. I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Dandou, K. Fortuniak, M. L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, T. Kawai, Y. Kawamoto, H. Kondo, E. S. Krayenhoff, S. H. Lee, T. Loridan, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, G. Pigeon, A. Porson, Y. H. Ryu, F. Salamanca, G. J. Steeneveld, M. Tombrou, J. Voogt, D. Young, N. Zhang (2010a), The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First results from Phase 1, *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 49, 1268-92, <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2010JAMC2354.1>

Grimmond C. S. B., M. Blackett, M. J. Best, J. -J. Baik, S. E. Belcher, J. Beringer, S. I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Coutts, A. Dandou, K. Fortuniak, M. L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, M. Kanda, T. Kawai, Y. Kawamoto, H. Kondo, E. S. Krayenhoff, S. – H. Lee, T. Loridan, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, R. Ooka, G. Pigeon, A. Porson, Y.- H. Ryu, F. Salamanca, G.-J. Steeneveld, M. Tombrou, J. A. Voogt, D. Young, N. Zhang (2010b), Initial Results from Phase 2 of the International Urban Energy Balance Comparison Project, *International Journal of Climatology* 31, 244-272 <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2227/abstract> .

Haggag M., A. Hassan, S. Elmasry (2014), Experimental study on reduced heat gain through green facades in a high heat local climate, Elsevier, *Energy and Buildings* 82 (2014) 668-674, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.087>.

- Haider T., H. Akbari, A. Rosenfeld, J. Huang (2003), Residential cooling loads and the urban heat island—the effects of albedo, Applied Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720, U.S.A., DOI: 10.1016/0360-1323(88)90033-9.
- Hamdi R., Daan Degrauwe, P. Termonia (2012), Coupling the Town Energy Balance (TEB) Scheme to an Operational Limited-Area NWP Model: Evaluation for a Highly Urbanized Area in Belgium. *Wea. Forecasting*, 27, 323–344. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-11-00064.1>.
- Helbig A.; J. Baumüller; M. J. Kerschgens (1999), *Stadtklima und Luftreinhaltung*, 2. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Heusinkveld B. G., L. W. A. van Hove, C. M. J. Jacobs, G. J. Steeneveld, J. A. Elbers, E. J. Moors, A. A. M. Holtslag (2010), Use of a mobile platform for assessing urban heat stress in Rotterdam. *Proc. 7th Conf. Biometeorol.* 12-14 April 2010, Freiburg, Germany, p 433-438.
- Heusinkveld B. G., L. W. A. van Hove, G. J. Steeneveld, C. M. J. Jacobs, A. A. M. Holtslag (2012), Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by vegetation cover and building density, in preparation.
- Hirano Y., T. Fujita (2012), Evaluation of the impact of the urban heat island on residential and commercial energy consumption in Tokyo. *Energy* 2012;37:371–83.
- Hitchin R., Pouta Ch., Riviere P., (2013), Assessing the market for air conditioning systems in European buildings, *Energy and Buildings* 58 (2013) 355–362, Elsevier, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.007>.
- Hoff J. (2014), “Reducing Peak Energy Demand: A Hidden Benefit of Cool Roofs,” Tegnos Research White Paper (2014).
- Hoff J. L., Gere K. & R. Carnick, (2014), Reducing peak energy demand: a hidden benefit of cool roofs.: TEGNOS Research, Inc.. [http://www.vinylroofs.org/documents/REDUCING-PEAK-ENERGY-DEMAND-A-HIDDEN-BENEFIT-OF-COOL-ROOFS\\_White-Paper.pdf](http://www.vinylroofs.org/documents/REDUCING-PEAK-ENERGY-DEMAND-A-HIDDEN-BENEFIT-OF-COOL-ROOFS_White-Paper.pdf)  
Accessed: 05 August 2015.
- Holt T., J. Pullen (2007), Urban Canopy Modeling of the New York City Metropolitan Area: A Comparison and Validation of Single- and Multilayer Parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 1906–1930. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR3372.1>.
- <http://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2011/EMS2011-463.pdf>.
- <http://www.coolrooftoolkit.org/knowledgebase/reducing-peak-energy-demand-a-hidden-benefit-of-cool-roofs>.
- [http://www.worldfuturecouncil.org/klimawandel\\_staedte.html](http://www.worldfuturecouncil.org/klimawandel_staedte.html).
- <https://ams.confex.com/ams/92Annual/flvgateway.cgi/id/20243?recordingid=20243>.

<https://ams.confex.com/ams/92Annual/webprogram/Paper199588.html>.

<http://earthexplorer.usgs.gov/>

Hunter A. M., N. S.G. Williams, J. P. Rayner, L. Aye, D. Hes, S. J. Livesley (2014), Quantifying the thermal performance of green facades: A critical review, Elsevier, Ecological Engineering 63 (2014) 102–113, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021>

Huttner S. (2012), Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met, Johannes Gutenberg-Universität in Mainz, Dissertation, <http://ubm.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2012/3112/pdf/doc.pdf>.

Isaac M., van Vuuren D. P. (2008), Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change, Energy Policy 37(2009)507–521, Elsevier, doi:10.1016/j.enpol.2008.09.051.

Jansson C. et al. (2007), Near surface climate in an urban vegetated park and its surroundings. Theor. Appl. Climatol. 89 (2007) 185-193.

Jarvi L., Hannuniemi, H., Hussein, T., Junninen, H., Aalto, P. P., Hillamo, R., Makela, T., Keronen, P., Siivola, E., Vesala, T., and Kulmala, M., 2009: The urban measurement station SMEAR III: Continuous monitoring of air pollution and surface-atmosphere interactions in Helsinki, Finland, Boreal Environ. Res., 14 (Suppl. A), 86–109.

Joos F., R. Roth, J. S. Fuglestedt, G. P. Peters, I. G. Enting, W. V. Bloh, A. J. Weaver (2013), Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(5), 2793-2825.

Kats G., K. Glassbrook (2015), Affordable Housing Smart Roof Report, Capital E, funded by JPB Foundation, <http://cap-e.com/affordable-housing-smart-roof/>.

Kenward A., D. Yawitz, T. Sanford, R. Wang (2014), Summer in the city: hot and getting hotter. Climate Central. <http://assets.climatecentral.org/pdfs/UrbanHeatIsland.pdf> Accessed: 05 August 2015.

Kohler M., M. Schmidt, F. W. Grimme, M. Laar, V. L. A. Paiva (2002), Tavares S. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics—far beyond the aesthetics. Environmental Management and Health 2002;13(4):382–91.

Kolokotsa D., M. Santamouris, S. C. Zerefos (2013), Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions, Solar Energy, Volume 95, September 2013, Pages 118–130, Elsevier, doi:10.1016/j.solener.2013.06.001.

Lazar R., W. Sulzer (2013), Stadtklimaanalysen Graz 1986 – 1996 – 2004 – 2011.



- Lehmann S. (2014), Low carbon districts: Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure, *City, Culture and Society*, Elsevier, Volume 5, Issue 1, March 2014, Pages 1–8, doi:10.1016/j.ccs.2014.02.002.
- Lenton T. M., N. E. Vaughan (2009), The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(15), 5539-5561.
- Levinson R. and H. Akbari (2010), Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants, *Energy Efficiency* (2010) 3:53–109, Springer, DOI 10.1007/s12053-008-9038-2.
- Li D. and E. Bou-Zeid (2013), Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts\*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2051-2064.
- Li D., E. Bou-Zeid, M. Oppenheimer (2014), The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies, *Environ. Res. Lett.* 9 (2014) 055002 (16pp), doi:10.1088/1748-9326/9/5/055002.
- Li H., J. Harvey, and A. Kendall (2013), Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance. *Building and Environment* 59 (2013): 536-546.
- Liang S. (2001), Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 213-238.
- Lin T.-P., A. Matzarakis, R. L. Hwang, Y.-C. Huang (2010), Effect of pavements albedo on long-term outdoor thermal comfort. In: Matzarakis, A., H. Mayer, F. - M. Chmielewski(Eds.), *Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology*. Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg No. 20, 498-504. [http://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/BIOMET7\\_Linetal\\_497\\_503.pdf](http://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/BIOMET7_Linetal_497_503.pdf)
- Loibl W., T. Tötzer, M. Köstl, J. Züger, M. Knoflacher (2011), Modelling Micro-climate Characteristics for Urban Planning and Building Design, pp. 605 -618. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, (IACT) 359, Springer. Heidelberg.
- Martilli A., A. Clappier, M. W. Rotach (2002), An urban surface exchange parameterization for mesoscale models', *Boundary-Layer Meteorol.*, 104, 261-304.
- Masson V. (2000), A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology* 94: 357-397.
- Masson V. (2006), Urban surface modelling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology* 84: 35-45.
- Masson V., M. Bonhomme, J. - L. Salagnac, X. Briottet, A. Lemonsu (2014), Solar panels reduce both global warming and urban heat island, *Front. Environ. Sci.*, 04 June 2014 | doi: 10.3389/fenvs.2014.00014.

- Matzarakis A (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas, Habilitation an der Universität Freiburg, Freiburg.
- Matzarakis A., F. Rutz, H. Mayer (2006), Modelling the thermal bioclimate in urban areas with the RayMan Model. PLEA 2006, Vol. II, 449-453.
- Matzarakis A., F. Rutz, H. Mayer (2010), Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments – Basics of the RayMan model. International Journal of Biometeorology 54, 131-139.
- Matzarakis A. (2013), Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels, Umweltmeteorologie, Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft 73 (2013) Nr.3 – März.
- Mazzali U., F. Peron, P. Romagnoni, R. M. Pulselli, S. Bastianoni (2013), Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate, Elsevier, Building and Environment 64 (2013) 57-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.005>.
- McPherson E. G., L.P. Herrington, G. M. Heisler (1988), Impacts of vegetation on residential heating and cooling. Energy and Buildings 1988;12:41–51.
- Memon R. A., D. Y. C. Leung, Ch. Liu, (2008), A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island, Elsevier, Journal of Environmental Sciences, Volume 20, Issue 1, 2008, Pages 120–128, DOI: 10.1016/S1001-0742(08)60019-4.
- Memon R. A., D. Y. C. Leung, Ch. Liu, M. K. H. Leung (2010), Urban heat island and its effect on the cooling and heating demands in urban and suburban areas of Hong Kong; Theor Appl Climatol (2011) 103:441–450 DOI 10.1007/s00704-010-0310-y.
- Mursch-Radlgruber E., H. Trimmel, T. Gerersdorfer (2009), Räumliche Differenzierung der mikroklimatischen Eigenschaften von Wiener Stadtstrukturen und Anpassungsmaßnahmen. Ergebnisse kleinklimatischer Messungen. Teil 2 der Studie "Räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Temperaturszenarien für Wien und ausgewählte Analysen bezüglich Adaptationsstrategien." Wiener Umweltschutzabteilung (MA 22), EU-Strategie und Wirtschaftsentwicklung (MA 27), 91.
- NASA (2015), Surface meteorology and Solar Energy: A renewable energy resource web site (release 6.0). <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> Accessed 05 August 2015.
- Nemec J., M. Žuvela-Aloise, J. Oberzaucher, M. Kossmann (2011), Application of an urban climate model to cities in complex terrain. Presented at EMS Annual Meeting Abstracts. 11th EMS /10th ECAM.
- Niachou A., K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou (2001), Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. Energy and Buildings 2001;33:719–29.
- NOAA (2015), Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html#global>. Accessed 06 August 2015.

- Noilhan J., S. Planton (1989), A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.*, 117, 536-549.
- OECD (2010), *Cities and Climate Change*, OECD Publishing. doi: 10.1787/9789264091375-en.
- Oke T. R. (1982), The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455) 1–24.
- Olivieri F., L. Olivieri, J. Neila (2014), Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal facade under summer conditions in a continental Mediterranean climate, *Elsevier, Building and Environment* 77 (2014) 61-76, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.019>.
- Orton P., N. J. Hoboken, J. Pullen, T. Meir, W. T. Thompson, T. R. Holt, M. Arend (2012), Observing and Forecasting Microclimatic Variations for Urbanized Coastal Regions, 92nd American Meteorological Society Annual Meeting, January 22-26, 2012, New Orleans, USA.
- Parker D. S., J. K. Sonne, J. R. Sherwin (2002), Comparative Evaluation of the Impact of Roofing Systems on Residential Cooling Energy Demand in Florida, *Residential Buildings: Technologies, Design, Performance Analysis, and Building Industry Trends – 1.219 - 1.234.*, Florida Solar Energy Center.
- Peng S., S. Piao, Ph. Ciais, P. Friedlingstein, C. Ottle, F. M. Bréon, H. Nan, L. Zhou, R. B. Myneni (2012), Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities, *Environ. Sci. Technol.*, 2012, 46 (2), pp 696–703, DOI: 10.1021/es2030438
- Pérez G., L. Rincón, A. Vila, J.M. González, L.F. Cabeza (2011), Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate, *Elsevier, Energy Conversion and Management* 52 (2011) 1861-1867. doi:10.1016/j.enconman.2010.11.008.
- Peyerl M., S. Krispel (2008), Sommerliches Überhitzen städtischer Strukturen – helle Betonflächen regulieren, *Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZfi), Abteilung Beton, Wien.*
- Pezzutto S. (2014), Analysis of the space heating and cooling market in Europe, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Department of Material Sciences and Process Engineering, PhD in Engineering, 2014.
- Pisello A. L., F. Cotana, L. Brinchi (2014), On a cool coating for roof clay tiles: development of the prototype and thermal-energy assessment, *Energy Procedia* 45 (2014) 453 – 462, Elsevier, doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.049.
- Pisello A. L., F. Rossi, F. Cotana (2014), Summer and winter effect of innovative cool roof tiles on the dynamic thermal behavior of buildings. *Energies*, 7(4), 2343-2361.
- Pollak C., W. Loibl, M. Knoflacher, R. Stiles, K. Hagen, H. Trimmel, A. Mahdavi, K. Orehounig (2011), Aspern+ Subprojekt 1 „Freiraum und Mikroklima“ D6.3 –

Gesamtbericht, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 2011, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

Pongracz R., J. Bartholy, Z. Dezso (2010), Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. *Physics and Chemistry of Earth*, 35: 95-99. doi: 10.1016/j.pce.2010.03.004 (IF: 0.975)

Porritt S., L. Shao, P. Cropper, Ch. Goodier (2011), Adapting dwellings for heat waves. *Sustainable Cities and Society*, 1 (2), pp. 81-90.

Prado R. T. A, F. L. Ferreira (2005), Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials, *Energy and Buildings* 37 (2005) 295–300, doi:10.1016/j.enbuild.2004.03.009.

Radhi H., St. Sharples (2013), Quantifying the domestic electricity consumption for air-conditioning due to urban heat islands in hot arid regions, *Applied Energy*, Volume 112, December 2013, Pages 371–380, Elsevier, doi:10.1016/j.apenergy.2013.06.013.

Radio Steiermark (2015), Der Stromverbrauch durch Klimaanlage steigt. Report am 15. Juli 2015. <http://steiermark.orf.at/news/stories/2721340/>, Heruntergeladen am 13. August 2015.

Rizwan A. M., L. Y. C. Dennis, Ch. Liu (2008), A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 20, Issue 1, 2008, Pages 120–128, doi:10.1016/S1001-0742(08)60019-4.

Robine J. M., S. L. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J. P. Michel, F. R. Herrmann (2008), Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C R Biol* 2008, 331(2):171-8.

Rosenfeld A. H., H. Akbari, S. Bretz, B. L. Fishman, D.M. Kurn, D. Sailor, H. Taha (1995), Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates. *Energy and Buildings* 1995;22:255–65.

Rosenzweig C., W. D. Solecki , L. Parshall, B. y Lynn, J. Cox, R. Goldberg, S. Hodges, St. Gaffin, R. B. Slosberg, P. Savio, F. Dunstan, M. Watson (2009), Mitigating New York Cities heat island, Integrating Stakeholder Perspectives and Scientific Evaluation, *American Meteorological Society*, Sept. 2009, BAMS, pp. 1297-1312.

Rosenzweig, C., W. D. Solecki, J. Cox, S. Hodges, L. Parshall, B. Lynn, F. Dunstan (2009), Mitigating New York City's heat island: Integrating stakeholder perspectives and scientific evaluation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(9), 1297-1312.

Rosenzweig C., W. D. Solecki, S. A. Hammer, S. Mehrotra (2011), *Climate Change and Cities – First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*, Cambridge: Cambridge University Press, ISBN 978-1-107-00420-7.


- Rossi F., A. L. Pisello, A. Nicolini, M. Filippini, M. Palombo (2014), Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model, *Applied Energy* 114 (2014) 621–631, Elsevier, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.038>.
- Salamanca F., A. Martilli (2010), A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations — Part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theor. Appl. Climatol.*, 99, 345–356.
- Sändig B., E. Renner (2011), The urban impact on the regional climate of Dresden. D. G. Steyn and S. Trini Castelli (Ed.), In: *Air pollution modeling and its application XXI : Proceedings of the 31th NATO/SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and Its Application (Torino, Italy, 27 September - 1 October 2010)*. Springer, Dordrecht, p. 181-185. (NATO Science for Peace and Security Series - C : Environmental Security).
- Santamouris M. (2013), Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 26, October 2013, Pages 224–240, Elsevier, doi:10.1016/j.rser.2013.05.047.
- Santamouris M. (2014), Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments, *Solar Energy*, Volume 103, May 2014, Pages 682–703, Elsevier, doi:10.1016/j.solener.2012.07.003.
- Santamouris M., A. Synnefa, T. Karlessi (2011), Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions, *Solar Energy* 85 (2011) 3085–3102, Elsevier, doi:10.1016/j.solener.2010.12.023.
- Santamouris M., C. Cartalis, A. Synnefa, D. Kolokotsa (2015), On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—a review. *Energy and Buildings*. 98(1), 119–124.
- Schubert S., S. Grossman-Clarke, A. Martilli (2012), A Double-Canyon Radiation Scheme for Multi-Layer Urban Canopy Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 145, 439-468. doi:10.1007/s10546-012-9728-3.
- Schwaiger H. P., D. N. Bird (2010), Integration of albedo effects caused by land use change into the climate balance: Should we still account in greenhouse gas units?. *Forest Ecology and Management*, 260(3), 278-286.
- Shashua-Bar L., D. Pearlmutter, E. Erell (2009), The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning*, 92(3), 179-186.
- Shashua-Bar L., M. E. Hoffman (2000), Vegetation as a climatic component in the design of an urban street, An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees, *Energy and Buildings* 31, 2000. 221–235, Elsevier, PII: S0378- 7788 99.00018-3.

- Sievers U., W. Zdunkowski (1986), A microscale urban climate model. Beitr. Phys. Atmosph. 59: 13-40.
- Sievers U. (1990), Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten. Umwelt-meteorologie, Schriftenreihe Band 15: Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Düsseldorf. S. 92-105.
- Sievers U. (1995), Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. Meteorol. Zeitschrift, N. F. 4, S. 3-15.
- Sievers U. (2012), Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO. Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 240 Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2012. ISBN 978-3-88148-465-7
- [http://www.diss.fu-berlin.de/docs/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDOCS\\_derivate\\_00000002198/121019\\_DWD\\_Bericht\\_240.pdf](http://www.diss.fu-berlin.de/docs/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDOCS_derivate_00000002198/121019_DWD_Bericht_240.pdf) Accessed: 05 August 2015.
- Solecki W. D., C. Rosenzweig, L. Parshall, G. Pope, M. Clark, L. Cox, M. Wiencke (2005), Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey, Environmental Hazards 6 (2005) 39-49, Elsevier, doi: 10.1016/j.hazards.2004.12.002
- Statistik Austria (2015a), Energy consumption of households. [http://www.statistik.at/web\\_en/statistics/EnergyEnvironmentInnovationMobility/energy\\_environment/energy/energy\\_consumption\\_of\\_households/035944.html](http://www.statistik.at/web_en/statistics/EnergyEnvironmentInnovationMobility/energy_environment/energy/energy_consumption_of_households/035944.html) Accessed 05 August 2015.
- Statistik Austria (2015b), Average annual prices and taxes for the most relevant fuels 2013. [http://www.statistik.at/web\\_en/statistics/Economy/Prices/energy\\_prices/080153.html](http://www.statistik.at/web_en/statistics/Economy/Prices/energy_prices/080153.html) Accessed 11 August 2015.
- Statistik Austria (2015c), Accommodation statistics since 1974 by calendar year. <http://statcube.at/superwebquest/login.do?quest=quest&db=detouextkal> Accessed 13 August 2015.
- Steenefeld G. J., S. Koopmans, B. G. Heusinkveld, L. W. A. van Hove, A. A. M. Holtslag (2011), Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands, Journal of Geophysical Research, 116(D20).
- Stone B., J. Vargo, D. Habeeb (2012), Managing climate change in cities: Will climate action plans work? Landscape and Urban Planning 107 (2012) 263– 271, Elsevier, <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.05.014>.
- Stull R. B. (1988), An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic
- Synnefa A., M. Santamouris, H. Akbari (2007), Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. Energy and Buildings, 39(11), 1167-1174.

- Taha H. (1997), Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* 1997; 25:99–103.
- Taha H, S. Konopacki, S. Gaberseck (1999), Impacts of large scale modifications on meteorological conditions and energy use: A 10-region modeling study, *Theoretical and Applied Climatology*, 62: 175-185.
- Takebayashi H., Y. Kimura, S. Kyogoku (2014), Study on the appropriate selection of urban heat island measure technologies to urban block properties, *Sustainable Cities and Society*, Elsevier, Volume 13, October 2014, Pages 217–222, doi:10.1016/j.scs.2014.01.008.
- Takebayashi H., M. Moriyama (2007), Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban island. *Building and Environment* 2007;42:2971–9.
- The Role of the Green Infrastructure, *Built Environment* (1978-) Vol. 33, No. 1, *Climate Change and Cities* (2007), pp. 115-133.
- Theeuwes N. E., G. J. Steeneveld, R. J. Ronda, L. W. A. van Hove, A. A. M. Holtslag (2012), The Influence of the Street Canyon Aspect Ratio on the Urban Heat Island: Column Model Approach Compared to Observations, in prep. [http://www.met.wau.nl/medewerkers/steeneveld/197\\_Theeuwes.pdf](http://www.met.wau.nl/medewerkers/steeneveld/197_Theeuwes.pdf).
- Töglhofer Ch., C. Habsburg-Lothringen, F. Prettenthaler, N. Rogler (2012), ‘Climate Change Impacts on Electricity Demand in Continental Europe’, Technical Report, University of Graz, Wegener Center for Climate and Global Change, 2012.
- Toleikyte A., M. Hummel, L. Kranzl (2012), Discussion of climate sensitive scenarios for the heating and cooling sectors in selected European countries, Deliverable 6.4 des Projekts “Power through Resilience of Energy Systems: Energy Crises, Trends and Climate Change (PRESENCE)” im ACRP - Austrian Climate Research Program.
- Trusilova K., S. Brienen, B. Früh, A. Walter (2011), New urban parameterization in COSMO-CLM, EMS Annual Meeting Abstracts, Vol. 8, EMS2011-463.
- U.S. DOE (2004), Federal Technology Alert: Green Roofs. Washington: Federal Energy Management Program. [http://energy.gov/sites/prod/files/2013/10/f3/fta\\_green\\_roofs.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2013/10/f3/fta_green_roofs.pdf) Accessed 05 August 2015.
- UN-HABITAT, 2011: *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements*, ISBN: 978-92-1-132298-9
- Urban B., K. Roth (2010), Guidelines for Selecting Cool Roofs. U.S. Department of Energy Building Technologies Program and Oak Ridge National Laboratory. Contract: DE-AC05-00OR22725. [https://heatland.lbl.gov/sites/all/files/coolroofguide\\_0.pdf](https://heatland.lbl.gov/sites/all/files/coolroofguide_0.pdf) Accessed: 05 August 2015.
- Vardoulakis E., D. Karamanis, A. Fotiadi, G. Mihalakakou (2013), The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy

- demands, *Solar Energy*, Volume 94, August 2013, Pages 128–144, Elsevier, doi:10.1016/j.solener.2013.04.016.
- Walz A., W. H. Hwang (2007), 'Large trees as a barrier between solar radiation and sealed surfaces: Their capacity to ameliorate urban heat if they are planted strategically to shade pavement, 7th Symposium on Urban Environment, American Meteorological Society, Sept. 9 -13 2007, San Diego, California.
- Wilbanks T. J., P. Romero Lankao, M. Bao, F. Berkhout, S. Cairncross, J. – P. Ceron, M. Kapshe, R. Muir-Wood, R. Zapata-Marti (2007), Industry, settlement and society. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 357-390.
- Wong N. H., A. Y. K. Tan, P.Y. Tan, N. C. Wong (2009), Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings* 2009;41:1401–8.
- Wood C. R., L. Järvi, R. D. Kouznetsov, A. Nordbo, A. Drebs, T. Vihm, A. Hirsikko, A. Suomi, C. Fortelius, E. J. O'Connor, D. Moiseev, S. Haapanala, J. Moilanen, M. Kangas, A. Karppinen, S. Joffre, T. Vesala, J. Kukkonen (2012), Overview of Helsinki UrBAN. *Bulletin of the American Meteorological Society*, in review.
- Yu C., W. N. Hien (2006), Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings* 2006;38:105–20.
- ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2015a), Tägliche Niederschlagsmenge: Wien Hohe Warte. 19810101-20150630.
- ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2015b), Klimaübersichten: Jahrbuch. <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch> Accessed 05 August 2015.
- ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2015c), Tägliche Lufttemperatur: Wien - Hohe Warte und Wien – Innere Stadt. 20080101 - 20150331.
- Žuvela-Aloise M., R. Koch, J. Nemeč, B. Früh (2012), Dynamical modelling of urban climate of Vienna. ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates, Dublin.
- Žuvela-Aloise M., R. Koch, A. Neureiter, R. Böhm, S. Buchholz (2014), Reconstructing urban climate of Vienna based on historical maps dating to early instrumental period. *Urban Climate* 10 (2014): 490-508.
- Žuvela-Aloise M. (2013), FOCUS-I: Adaption and mitigation of the climate change impact on urban heat stress based on model runs derived with an urban climate model ZAMG, ACRP final report, pp. 67.
- Zwietering M. H., I. Jongenburger, F. M. Rombouts, K. Van't Riet (1990), Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and environmental microbiology*, 56(6), 1875-1881.





**Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie**  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien  
[bmvit.gv.at](https://www.bmvit.gv.at)