



# Doctoral Thesis

## MULTIFUNCTIONAL SYSTEM: BUILDING GREENING AND PHOTOVOLTAIC

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Doctor of Science in Civil Engineering  
of the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

---

### Dissertation

## MULTIFUNKTIONALE SYSTEMLÖSUNG: GEBÄUDEBEGRÜNUNG UND PHOTOVOLTAIK

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der technischen Wissenschaft  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen  
von

**Arch. María Soledad Peñaranda Moren**

Matrikelnummer 1227907

Josefstädter Straße 51/1/30, 1080 Wien

- Betreuer:** Prof. Dr. Dipl.-Ing. **Azra Korjenic**  
Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/206-02, A - 1040 Wien
- Gutachter:** Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. **Andreas Kolbitsch**  
Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich Hochbaukonstruktion und Gebäudeerhaltung  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/206-04, A - 1040 Wien
- Gutachter:** Priv. Doz. Dipl.-Ing. Dr. **Ulrike Pitha**  
Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau  
Department für Bautechnik und Naturgefahren  
Universität für Bodenkultur Wien  
Peter Jordan-Straße 82, A-1190 Wien

Wien, im Mai 2018

.....



## Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meiner Familie bedanken - meinem Mann Richard und meinen Kindern Carolina und Richard - für ihre uneingeschränkte, liebevolle und vielseitige Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Azra Korjenic, die mich ermutigt hat, das Doktoratsstudium zu absolvieren und die mir die Entwicklung und Erforschung dieses neuen Systems „multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik“ (MFS) anvertraut hat. Ein bis dato unerforschtes Thema, an dessen positiven Ausgang viele gezweifelt haben. Ich danke Ihnen, dass Sie mir immer und bei allen Angelegenheiten meiner Forschungsarbeiten beiseite stand.

Ich danke dem Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, das mich ein Jahr lang mit dem Forschungsstipendium „Österreichische Graduierte – Beihilfen für Zwecke der Wissenschaft 2015/16“ unterstützt hat, sodass ich mich auf meine Dissertation konzentrieren konnte.

Meinen Dank richte ich auch an Gernot Becker („ATB-Becker green technologies e.U.“), der uns die PV-Anlage zur Verfügung gestellt hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei Harald Hofbauer und Manfred Grüner bedanken, für die zahlreichen Gespräche und Ratschläge über Messtechnik. An Harald einen besonderen Dank für seine Hilfe bei der Montagearbeit und weiteren Optimierungsarbeiten der MFS. Auch hier bedanke ich mich für weitere Arbeiten an der MFS bei Edrin Drijo für das Fertigstellen des Lehmputztes und bei Michael Mitterböck für die Hilfe bei der weiteren Anpassung des Montagesystems.

Sabine Wolny, Jutta Hollands und meiner guten Freundin, Jaya Mohan, danke ich für ihre Hilfe bei den Korrekturen der schriftlichen Bereitstellung der wissenschaftlichen Publikationen und dieser Dissertation. Ein abschließendes Dankeschön an alle, die mich während meiner Doktorarbeit begleitet und unterstützt haben.

Ich widme dieser Arbeit meiner Familie, die der Antrieb meines Lebens ist.

Danke!

## Kurzfassung

Die Suche nach ökologischen und nachhaltigen, multifunktionalen Lösungen, die helfen können die 2020 und 2030 Klimaziele der Europäischen Union zu erreichen [1], sowie gleichzeitig die Energieeffizienz der Gebäude zu steigern und erneuerbare Energien in diese zu integrieren, sind die Motivation dieser Dissertation.

Gebäudebegrünung und Photovoltaik sind bekannte Maßnahmen, die aufgrund ihrer ökologischen und umweltfreundlichen Eigenschaften als Klimaschutzanpassungsstrategien in mehreren Städten Europas bereits eingesetzt werden. Sowohl die Gebäudebegrünung als auch Photovoltaik werden für eine maximale Ausnutzung im Sommer optimiert und erfordern ebenso beide die maximale Nutzung der Solarstrahlung. Aus diesem Grund stehen diese Systeme normalerweise bei geeigneten Gebäudeflächen in Konkurrenz zueinander.

Ziel dieser Dissertation war die Entwicklung eines neuen, multifunktionalen Fassadensystems, welches die Wechselwirkungen von Gebäudebegrünung und Photovoltaik erforscht. Darüber hinaus wird die Ausnutzung ihrer bauphysikalischen Synergien betrachtet, um gleichzeitig Energie zu gewinnen, Heiz- und Kühlenergie zu sparen, Staub zu binden, die Luftqualität zu erhöhen und Lärm zu mindern. Dieses multifunktionale System soll eine nachhaltige Lösung für die Städte der Zukunft darstellen.

Der Kern dieser kumulativen Dissertation bilden drei wissenschaftliche SCI-Publikationen. Die ersten zwei Publikationen präsentieren die Entwicklung der neuen „multifunktionalen Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik“ (MFS) und die durchgeführte Analyse der Wechselwirkungen ihrer Komponenten. Anknüpfend an diese Erkenntnisse präsentiert die dritte Publikation die Untersuchungen an der Dachvariante dieser Kombination: PV+Gründach.

In der ersten Publikation der Dissertation, „Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules. Multifunctional system: Building greening and photovoltaics“ [2], wurde die Analyse der Wechselwirkungen zwischen der MFS auf den Photovoltaikmodulen präsentiert. Hier wurde der Einfluss der Begrünung (Grünpufferraum-Schicht des Systems) auf die Betriebstemperaturen der Photovoltaikmodule (PV-Schicht) ermittelt sowie mögliche Wirkungen auf die Erträge analysiert. Zur Validierung der Ergebnisse wurden diese mit einer Systemvariante ohne Begrünung, aber mit einem gleichen Pufferraum (Luftschicht) verglichen. Es wurde festgestellt, dass durch die Synergien der Schichten des Systems die Betriebstemperaturen das ganze Jahr über zwischen 2°C und 4°C reduziert werden konnten.

Die zweite Publikation, „Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System“ [3], präsentiert die Forschungsergebnisse der Einflüsse der Synergien der MFS auf die Oberflächentemperatur der Fassadenkonstruktion (Fassaden-Schicht). Diese Ergebnisse bestätigen die ganzjährige thermische Funktion der MFS, die sich an die zeitlichen thermischen Anforderungen anpasst und somit sowohl Sommer- als auch Winterschutz bietet. Der extreme Anstieg der Fassadenoberflächentemperaturen an heißen Tagen wurde nahezu aufgehoben. Für die monatlichen Höchsttemperaturen der Fassadenoberfläche, ist ein Unterschied von 20°C im Sommerdurchschnitt und von bis zu 30°C bei Temperaturspitzen, verglichen mit der Wand ohne MFS erkennbar. Während der kalten Tage bremst die MFS die Abkühlung der Wand und die minimalen Oberflächentemperaturen liegen zwischen 1,3°C und 3°C im Monatsdurchschnitt über den Oberflächentemperaturen der Wand ohne MFS. Auch die weitere nächtliche Abkühlung einer kahlen Wand [4, 5] wird gestoppt.

Abschließend in der dritten und letzten Publikation der Dissertation, „Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung“ [6], wurde die Kombination Photovoltaik und Begrünung auf der Dachkonstruktion

erforscht: PV+Gründach. Diese Untersuchung wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „GrünPlusSchule@Ballungszentrum“ durchgeführt. Hier wurden vorrangig die Wechselwirkungen der PV+Gründach Kombination auf die Temperaturen an der Schnittstelle zwischen Dachabdichtung und dem Substrat (Messstelle) detailliert untersucht. Die Ergebnisse wurden zur Validierung mit einer normalen extensiven Dachbegrünung (Gründach) mit einer Substratschicht von 7 bis 10 cm verglichen. Ähnliche Synergien und Wirkungen wie bei der MFS [2] wurden festgestellt. Die PV+Gründach-Variante funktioniert ebenso als ganzjähriger Wärmepuffer, der sowohl Sommer- als auch Winterschutz bietet und sich auch an die Wetterbedingungen anpasst. Im Vergleich zum normalen Gründach hat die PV+Gründach-Variante an der Messstelle um 7°C bis 9°C niedrigere Temperaturen an heißen Tagen aufgewiesen. Bei kühlen Außenlufttemperaturen (unter 10°C) war bei der PV+Gründach-Messstelle die Temperatur immer zwischen 2°C und 3,5°C wärmer. Auch hier, ebenso wie bei der Untersuchung der Fassadenkonstruktion MFS [3], wird die weitere nächtliche Abkühlung der Dachkonstruktion gebremst, aber in einer noch stärkeren Wirkung.

Neben den untersuchten und in den drei Publikationen erläuterten Effekten weist das MFS weitere positive Auswirkungen im Gebäudebereich auf. Dazu zählen unter anderen:

- Schutz der Fassadenelemente vor extremen Wetterereignissen wie z.B. Schlagregen, Wind, direkte Solareinstrahlung, wodurch die Lebensdauer der Materialien verlängert wird und mögliche Bauschäden, die durch extreme Temperaturschwankungen und das Eindringen von Wasser entstehen, vermindert werden.
- Schutz der Fassadenbegrünung bzw. der Pflanzen vor extremen Wetterereignissen wie z.B. Hagel, Kältewellen, Überhitzung
- Auf der Stadtebene stellt die MFS eine Ausgleichfläche bei steigender Verdichtung der Stadt dar und leistet dabei einen Beitrag zur Minderung negativer Auswirkungen des Hitzeinseleffekts (UHI), durch die Verbesserung des Mikroklimas, Luftreinigung (Staub und Schadstoffe) und CO<sub>2</sub>-Bindung.
- Auf der Energieversorgungsebene trägt die MFS darüber hinaus zur Minderung der Vulnerabilität des Energieversorgungssystems und zur Reduktion der Spitzenlasten bei.

Die Ziele dieser Dissertation, die Entwicklung und Erforschung einer neuen multifunktionalen Fassadensystemlösung sowie die weitere Nutzung der Vorteile der Synergien der MFS wurden erreicht. Die MFS wurde erfolgreich entwickelt und getestet. Außerdem wurde ein Patent angemeldet und die ersten Schritte auf dem Weg zum marktreifen Produkt sind unternommen. Das weitreichende Potential der MFS und der Kombination PV+Gründach wurde in dieser Dissertation aufgezeigt. Die Kombination PV+Grün kann einen bedeutenden Beitrag zur „Dekarbonisierung des EU-Gebäudebestands bis 2050“, zu den EU-2030 Klimazielen und zu den Strategieplänen zur Klimaanpassung leisten.

Im Rahmen dieser Forschung wurden auch weitere Forschungsfragen identifiziert, die bei der weiteren Entwicklung der MFS als Marktprodukt für breitere, innovative und effiziente Anwendungsmöglichkeiten untersucht werden, die einen optimierten Einsatz der MFS sowohl im Neubau als auch bei der Gebäudesanierung ermöglichen.

## Abstract

The search for ecological and sustainable multifunctional systems, that help to achieve the 2020 and 2030 climate goals of the European Union, as well as the simultaneously increase of the energy efficiency of the buildings and to integrate renewable energies in them, are the motivation of this dissertation.

Greening of buildings and photovoltaics are well-known measures that are used for their ecological and environmentally friendly properties as climate change adaptation strategies in several European cities. These two systems are optimized for maximum utilization during summer, and both require maximum use of solar radiation. For this reason, these systems usually compete for suitable building space.

The aim of this doctoral thesis (cumulative dissertation) was the development of a new multifunctional façade system, which researches the interaction of building greenery and photovoltaics, and to investigate the use of their building physics interactions and synergies to simultaneously produce energy, save heating and cooling energy, bind dust, improve air quality and to reduce noise. Thus, this multifunctional system should be a sustainable solution for the cities of the future.

At the heart of this cumulative dissertation are three scientific SCI publications. The first two publications present the development of the new “multifunctional system: building greening and photovoltaics” (MFS) as well as the analyses carried out on the interactions between its components. Based on these findings, the third publication presents the extension of this consideration to the roof construction and the research of the combination of green roofs and photovoltaics: PV+green-roof.

In the first paper of the dissertation, “Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules Multifunctional system: Building greening and photovoltaics” [2], the analysis of the interactions of the MFS on the photovoltaic modules were presented. Here were investigated the influences of greening (green buffer space layer of the system) on the operating temperatures of the photovoltaic modules (PV layer) and possible effects on the PV-yields were analysed. To validate the results, these were compared with a system variant without greening, but with an identical buffer space (air layer). Here it was shown that the synergies of the system allowed the operating temperatures to be reduced between 2°C and 4°C throughout the year.

The second paper, “Hotter and colder - How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System” [3], presents the research results of the influences of MFS synergies on the surface temperature of the facade construction (façade layer). The results confirm a year-round thermal function of the MFS, which adapts to the thermal requirements over time and thus offers both: summer and winter protection. The extreme increase in temperatures on the façade surface on hot days was almost cancelled out. For the monthly maximum temperatures of the facade surface, a difference of 20°C in summer average and of up to 30°C at temperature peaks can be seen compared to the wall without MFS. During the cold days, the MFS slows the cooling of the wall and the minimum surface temperatures are between 1.3°C and 3°C on a monthly average above the surface temperatures of the wall without MFS. Also, the further nocturnal cooling-down of a bare wall [4, 5] was stopped.

In the concluding third and last article of the dissertation, “Studies on year-round thermal insulation for variants of a combined roof structure with photovoltaics and greening” [6], the same combination was expanded to the roof construction and the combination PV + green roof was researched. This study was carried out within the framework of a research project “GrünPlusSchule@Ballungszentrum”. Here, the interactions of the PV+green-roof combination on the temperatures at the interface between the roofing membrane and the substrate (measuring point) was investigated in detail. To

validate the results were compared with a normal extensive green roof with a substrate layer of 7cm to 10cm. The findings show similar synergies and effects as with the MFS. The PV + green-roof also works as a year-round heat buffer, which offers both summer and winter protection and also adapts to the weather conditions. Compared to a normal extensive green roof the PV + green roof option showed at the measuring point temperatures of 7°C to 9°C lower on hot days. With cool outside air temperatures (below 10°C), the temperature at the measuring point was always between 2°C and 3.5°C warmer in the PV + green roof option. Here too, as in the research of the MFS [3], the further nocturnal cooling of the roof construction is slowed down, but with an even stronger effect.

In addition to the effects investigated and explained in the three publications, the MFS shows further positive effects in the building sector. These include, among others:

- Protection of façade elements against extreme weather events such as driving rain, wind, direct solar radiation, which prolongs the life of the materials and reduces the building damage caused by extreme temperature fluctuations and the ingress of water.
- Protection of the facade greening or plants against extreme weather events such as hail, cold spells, overheating.
- At the urban level, the MFS provides a compensation area as the city becomes more dense, thereby helping to reduce the negative effects of the heat island effect (UHI) by improving the microclimate, air cleaning (dust and pollutants) and CO<sub>2</sub> binding.
- In addition, at the energy supply level, MFS contributes to reducing the vulnerability of the energy supply system as well as to reducing peak loads.

The objectives of this dissertation, the development and research of a new multifunctional façade system solution as well as the further use of the advantages of the synergies of the MFS have been achieved. The MFS has been successfully developed and tested. In addition, a patent has been filed and the first steps on the way to a marketable product have already been taken. The potential of the MFS and the combination PV+green-roof was demonstrated in this dissertation. The combination of PV +Green can make a major contribution to the "decarbonisation of the EU building stock by 2050", to the EU 2030 climate goals and to the Strategic Climate Adaptation Plans.

As part of this research, further research topics were identified which will be investigated in the further development of MFS as a market product for broader, innovative and efficient application possibilities, which will enable an optimised use of MFS both in new buildings and in the renovation of buildings.

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	I
Kurzfassung .....	II
Abstract .....	IV
1. Ausgangssituation und Problemstellung.....	2
2. Ziele .....	7
3. Methodik und Vorgehensweise bei der Auswertung.....	13
3.1. Einflüsse der aktuellen Entwicklungen der EU-Ziele und der Digitalisierung auf Auswertungsmethoden.....	13
3.2. Business Intelligence und Data Science.....	13
3.3. Auswertungsmethoden .....	15
4. Zusammenfassung der wissenschaftlichen Publikationen.....	18
4.1. Zusammenfassung der ersten Publikation ( 1).....	18
4.2. Zusammenfassung der zweiten Publikation (2) .....	20
4.3. Zusammenfassung der dritten Publikation (3).....	21
5. Wissenschaftlicher Beitrag der Dissertation .....	24
6. Literaturverzeichnis.....	28
Wissenschaftlichen Publikationen.....	36
1. Publikation 1 Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules Multifunctional system: Building greening and photovoltaic .....	36
2. Publikation 2 Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System .....	56
3. Publikation 3 Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung.....	76
Publikationen und Konferenzbeiträge .....	89
Patentanmeldung .....	90
Lebenslauf .....	92



<b>Nomenklatur</b>	
<b>MFS</b>	multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik
<b>PV</b>	Photovoltaik / Photovoltaik Modul / Photovoltaik-Schicht
<b>F#</b>	Versuchsfeld / Versuchsfläche
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>UN</b>	Vereinte Nationen
<b>F&amp;E</b>	Forschung und Entwicklung
<b>CO2</b>	Kohlenstoffdioxid-Emissionen
<b>UHI</b>	Hitzeinseleffekt
<b>Gebäudebegrünung</b>	Dach- und/oder Fassadenbegrünung
<b>Gründach</b>	extensive Dachbegrünung
<b>PV+Grün</b>	Kombination Photovoltaik und Gebäudebegrünung (entweder Fassaden- oder Dachbegrünung)
<b>PV+Gründach</b>	Kombination PV+Grün auf der Dachkonstruktion mit einer extensiven Dachbegrünung
<b>BIPV</b>	Gebäudeintegrierte Photovoltaik
<b>FS</b>	Fassaden-Schicht der MFS
<b>GPR</b>	Grünpufferraum-Schicht der MFS
<b>BI</b>	Business Intelligence
<b>DS</b>	Data Science
<b>Werkzeuge (Methodenbereich)</b>	Anwendungen, Tools und Sprachen aus BI und DS
<b>Ö</b>	österreichische-

## 1. Ausgangssituation und Problemstellung

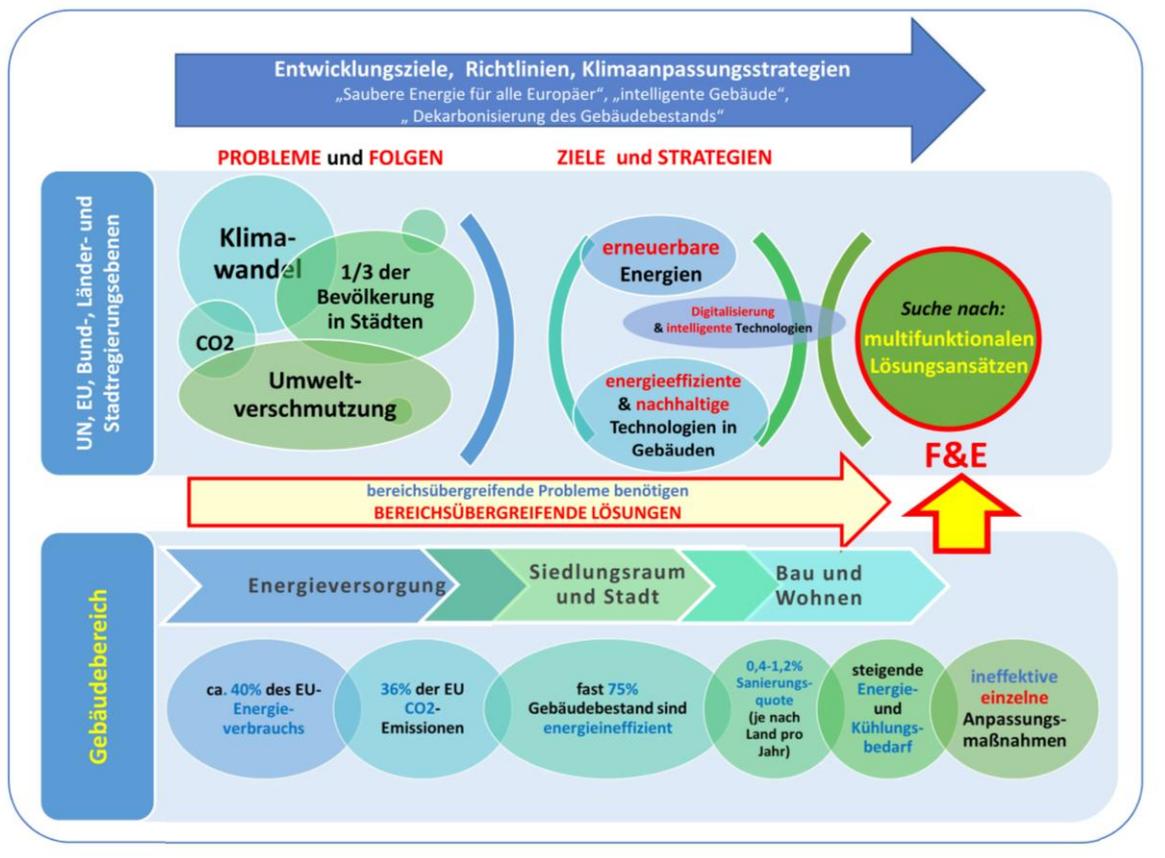


Abb. 1: Grafische Darstellung der Ableitung der Zusammenhänge der Gründe dieser Dissertation (Quelle: eigene Darstellung)

Globale Probleme wie das ungebremste städtische Wachstum – laut einem UN-Bericht werden bis zu zwei Drittel der Weltbevölkerung im Jahr 2050 in Städten leben – der Klimawandel und seine Folgen, Umweltverschmutzung sowie die Reduktion der Treibhausgasemissionen stellen große Herausforderungen dar [7].

Der Gebäudesektor ist verantwortlich für die Emission von fast einem Drittel der klimaschädlichen Treibhausgase und verbucht fast 40% des gesamten Energieverbrauchs der EU. Die Einsparpotentiale des Gebäudesektors sind erheblich. So kann die Sanierung des Gebäudebestands den EU-Energieverbrauch um 5-6% reduzieren, sowie ca. 5% des CO<sub>2</sub>-Austoßes einsparen. Dabei kann der Gebäudesektor auch einen großen Beitrag zur Verbesserung des Wohlfindens und der Gesundheit der Nutzer/innen leisten [1].

Die EU stellt hohe Ansprüche an neue Gebäude und an die Sanierung des Gebäudebestands wie auch in der vor kurzem veröffentlichten Änderung der Richtlinie 2010/31/EU [8] im Rahmen des Pakets „Saubere Energie für alle Europäer“ und die „Dekarbonisierung des EU-Gebäudebestands bis 2050“ [9] deutlich wird. Durch die Integration technologischer Entwicklungen werden Gebäude in „intelligente Gebäude“ verwandelt, um die Erreichung der genannten Ziele und ein nachhaltiges Wachstum zu gewährleisten.

Auf regionaler Ebene hat die Bekämpfung der Folgen des Klimawandels in allen Metropolen Europas hohe Priorität, um die Lebensqualität in den Städten zu erhalten. Die innerstädtische Verdichtung, die erhöhten Temperaturen in der Stadt sowie alle damit verbundenen Auswirkungen wie beispielsweise der Hitzeinseleffekt (UHI-Effekt) werden sich noch weiter verschärfen [10, 11, 12].

Tabelle 1: Österreichische Statistiken der Folgen des Klimawandels und besondere Merkmale. Quelle: eigene Darstellung aus Angaben des Umweltbundesamtes [13, 14], des österreichischen Strategieplans zur Anpassung an den Klimawandel [15] und die ÖKS15: Klimaszenarien für Österreich [16].

ÖSTERREICH - KLIMAÄNDERUNG STATISTIKEN und MERKMALE	ANGABEN
Anstieg der Durchschnittstemperatur seit Beginn des 20 Jh.: Österreich (1767-2016) globaler Anstieg (1850-2016)	1,9 °C 0,9 °C
Erwärmung der <b>bodennahen Atmosphäre</b> (2001-2016)	0,19 °C
Zunahme der <b>Jahresniederschlagssumme</b> (JN – 1901-2000)	↑ 11 %
<b>Niederschlagstage</b> : Frühling und Herbst	↗ ca. 10%
<b>Frosttage</b> ( → Absenkung um - 13,8 Tage auf)	↓ 135 Tage
<b>Prognosen</b>	
<b>Hitzetage</b> (Temperatur > 30 °C) ( → Anstieg um +2,8 Tage)	↑ 9 Tage
<b>Sommertage</b> (Temperatur > 20°C und < 30 °C) ( →Anstieg um +8,2 Tage)	↑ 15 Tage
Dauer der <b>Vegetationsperiode</b> (Anstieg um + 13,5 Tage)	↑ 212 Tage
<b>Anmerkungen:</b> ↗ leichte und mäßige Zunahme ↘ leichte und mäßige Abnahme	↑ starke Zunahme ↓ starke Abnahme

Der österreichische Strategieplan zur Anpassung an den Klimawandel [15] unterteilt die Folgen des Klimawandels anhand der festgestellten klimatischen Änderungen (Tabelle 1) und zahlreichen Studien [14] in Bereiche, um die vorgeschlagenen Maßnahmen in Sektoren gliedern zu können. Zu den betroffenen gebäudenahen Bereichen gehören unter anderem: die Energieversorgung, Siedlungsraum/Stadt sowie Bau und Wohnen. Es wird damit gerechnet, dass der Klimawandel eine geringere Stromproduktion verursachen wird. Zusammen mit einem verstärkten Kühlungsbedarf, der sich bis 2050 versechsfachen kann<sup>1</sup> und einer wachsenden Energienachfrage in den Ballungsräumen wird dies zu einer Überlastung und großen Vulnerabilität der Energieversorgung führen. Durch das erwartete Wachstum in den Ballungsräumen<sup>2</sup> und die dafür notwendige Fläche<sup>3</sup> werden diese Folgen sich noch weiter verstärken. Abb. 2 stellt eine Zusammenfassung dieser Folgen und die dafür jeweilige Ursache dar.

Dabei wird besonders die Notwendigkeit hervorgehoben, effizientere und sektorübergreifende Lösungsansätze zu finden, die Synergien zwischen Energieeffizienz-, Sanierungs- und Klimaanpassungsmaßnahmen darstellen [15, 17]. Diese sollen zur Reduktion des Energieverbrauchs sowie zur Erhöhung der energetischen Versorgungssicherheit durch alternative und energieeffiziente Technologien beitragen. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes, der Minimierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs und der Verringerung der Umweltbelastung.

<sup>1</sup> Das österreichische Forschungsprogramm KlimAdapt hat die erste umfassende Studie über die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Energiesektor bis 2050 durchgeführt [22]. Im zugehörigen Endbericht wurden Anpassungsmaßnahmen abgeleitet, mit besonderem Augenmerk auf die *Energienachfrage für Heizen und Kühlen, die Stromversorgung* und die Biomasse-Bereitstellung, die die am meisten betroffenen Bereiche des Klimawandels sind. Dort wurde für das schlechte Szenario („business-as-usual“) des Kühlbedarfs mit ca. 10 TWh<sub>el</sub> bis zum Jahr 2050 Energieverbrauch für den Kühlbedarf gerechnet.

<sup>2</sup>Die Wiener Umweltschutzabteilung – MA22 berichtet in ihrem Strategieplan für Wien über ein Wachstum auf 2 Millionen bis zum Jahr 2030. 2018 liegt die Einwohnerzahl bei 1,8 Millionen.

<sup>3</sup> Der österreichische Strategieplan zur Anpassung an den Klimawandel [15] verweist zu einer hoch eingestuftem Bevölkerungsdichte im besiedelten und wirtschaftlich geprägten Raum, von 250 Einw./km<sup>2</sup> – das bedeutet das ca. 2,5-fache der ganzen Bevölkerungsdichte (2008-Statistik Austria)

Um diese Ziele zu erreichen werden besonders F&E-Programme gefördert, deren Kernziel die Suche nach Systemlösungen ist, die eine Vielfalt der Gebäudfunktionen erfüllen und somit den Anforderungen gerecht werden können, effizientere und ressourcenschonende Lösungsansätze für die Energieeffizienz-, Sanierungs- und Klimaanpassungsmaßnahmen zu bieten [18, 19, 20, 21].

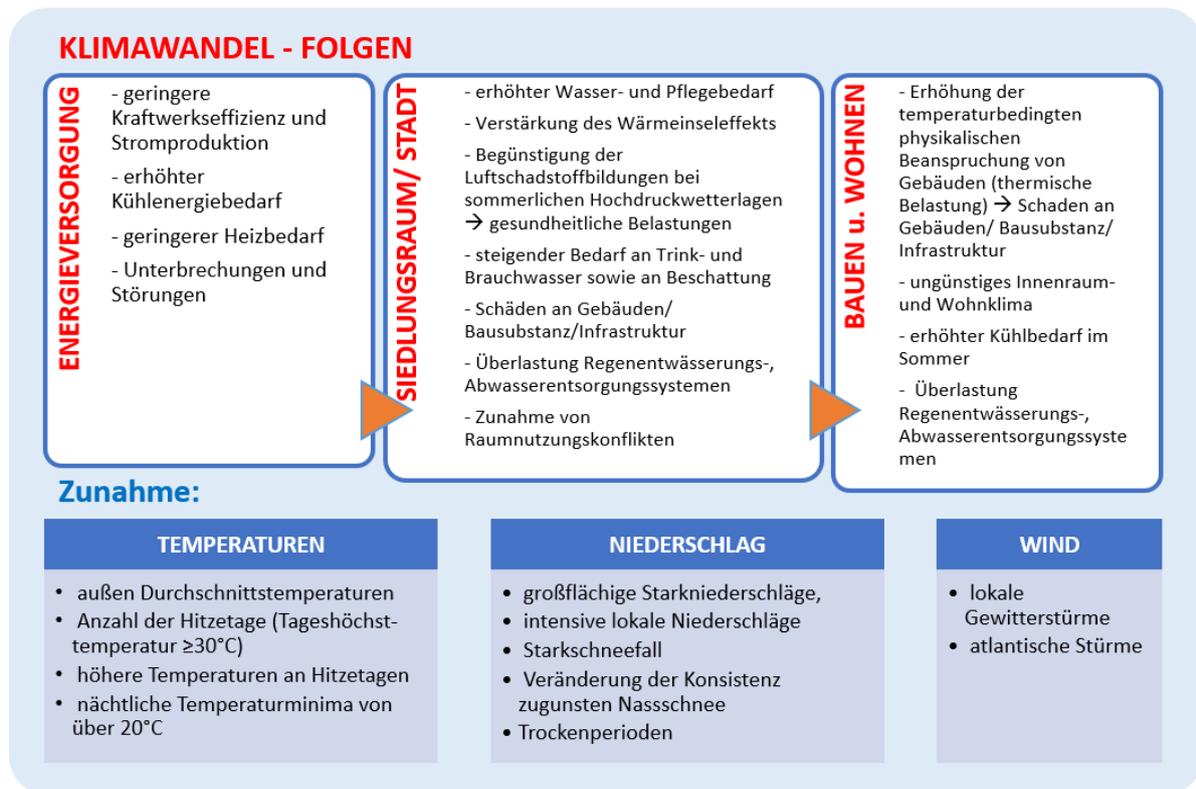


Abb. 2: Folgen des Klimawandels auf die Energieversorgung, Siedlungsräume und Städte. Quelle: eigene Darstellung Informationen des Umweltbundesamtes – Datenblätter den einzelnen Bereichen [14]

Unter den vorgeschlagenen Maßnahmen und als gemeinsame sektorübergreifende Maßnahme für die gebäudenahen Bereiche wird auf den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energieträger, ressourcenschonender Kühlmaßnahmen und die Möglichkeit der thermischen Sanierung hingewiesen [15, 22].

Gebäudebegrünung und Photovoltaik befinden sich unter diesen Maßnahmen aufgrund ihrer ökologischen, umweltfreundlichen und energieeffizienten Eigenschaften zur Klimaschutzanpassung und zur Erhöhung der Energieeffizienz [10, 15, 17].

Photovoltaik wird als nachhaltige Maßnahme zur Minderung der Vulnerabilität des Energieversorgungssystems eingesetzt. Das ist dank ihres zweifachen Nutzens, indem sie gleichzeitig zur Dezentralisierung des Systems und Reduktion der Spitzenlast beiträgt, da gerade in den Spitzenlaststunden die Photovoltaikerträge am höchsten sind [15].

Fassaden- und Dachbegrünung werden als ressourcenschonende passive Maßnahmen eingesetzt, die gleichzeitig das Mikroklima innerhalb und um das Gebäude herum verbessern sowie als natürliche Kühlung im Sommer agieren und zur Wärmedämmung im Winter beitragen. Außerdem tragen sie zur Reduktion der steigenden Flächenversiegelung der Städte und zur Regenwasserrückhaltung bei, sowie zur Verbesserung der Luftqualität und des Lärmschutzes und somit zur Minderung des Hitzeinseleffekts [15, 17, 23].

Beide Systeme, Photovoltaik und Gebäudebegrünung, werden normalerweise für eine maximale Nutzung im Sommer optimiert. Gleichzeitig haben diese Systeme als gemeinsame Anforderung für ihren Einsatz die maximale Nutzung der Solarstrahlung. Aus diesem Grund stehen die beiden Systeme für geeignete Gebäudeflächen in Konkurrenz zueinander. Der aktuelle Stand der Technik ermöglicht keine vollständige Nutzung der Fassade durch beide Systeme zur gleichen Zeit, wodurch auch die damit verbundenen Vorteile nicht vollständig ausgenutzt werden können. Bisher war daher eine Aufteilung der geeigneten Fassadenflächen für Photovoltaik und Begrünung notwendig. Beispiele solcher Einsätze sind in Abb. 3 (Projekt: Smart ist Grün – IBA 2013, Hamburg) zu sehen.



Abb. 3: Projektbeispiele mit Begrünung und Solarthermie. Quelle: Pfoster, Nicole "Gebäude Begrünung Energie: Potenziale und Wechselwirkungen. Leitfaden als Planungshilfe" [23].

Die Möglichkeiten der Einsätze von Gebäudebegrünungssystemen und eine detaillierte Darstellung der Eigenschaften und Vorteile, sowie die erreichbaren Synergien mit anderen nachhaltigen Systemen wurden in [23] zusammengefasst und anhand zahlreicher Projektbeispiele gezeigt (Abb. 3).

Die Photovoltaiktechnologie hat sich in den letzten Jahren von einfachen Energieanlagen für die Energieerzeugung zu einem neuen, architektonisch gestalterischen Element „BIPV“ entwickelt, das mehrere Gebäudefunktionen erfüllen kann und eine natürliche Integration von PV-Systemen in Gebäude erlaubt. Aus diesem Grund ist Gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV) [21] als Kernelement der Smart-Cities-Strategie verankert [24]. Detaillierte Einsatzmöglichkeiten und Eigenschaften von BIPV sind in [21, 25] zu finden.

### Konstruktive Kombinationsmöglichkeiten von PV und Gebäudebegrünung

Quelle: Pfoster, Nicole "Gebäude Begrünung Energie: Potenziale und Wechselwirkungen. Leitfaden als Planungshilfe"

**Flächen und Orientierung**

- Kombinationen in Dach und Fassade möglich
- ein Übereinander bzw. Nebeneinander für Kühleffekt erwünscht

— Energiesystem  
— Kombination mit Gebäudebegrünung

Abb. 132: Konstruktive Kombinationsmöglichkeiten von PV und Gebäudebegrünung: ① vorgehängte, hinterlüftete Fassade mit PV-Panel und wandgebundener Begrünung; ② Pfosten-Riegel-Fassade mit integrierter PV-Scheibe und bodengebundener Begrünung; ③ Flachdach mit aufgeständerter PV-Anlage und extensiver Gebäudebegrünung im Vergleich

zu einem konventionellen Dachbelag; ④ Schrägdach mit PV-„Solarziegeln“ in Kombination mit einem extensiven Begrünungssystem, Darstellung der Synergie über den Kühleffekt der Pflanze. (© Nicole Pfoster 2013)

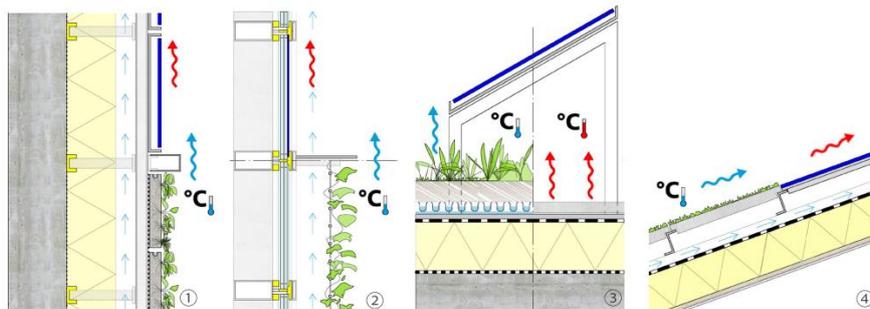


Abb. 4: Konstruktive Kombinationsmöglichkeiten von PV und Gebäudebegrünung. Quelle: Pfoster, Nicole "Gebäude Begrünung Energie: Potenziale und Wechselwirkungen. Leitfaden als Planungshilfe" [23].

Die beiden Maßnahmen, Photovoltaik und Begrünung, ergänzen sich hervorragend. Aus diesem Grund wurden bereits mehrere mögliche Einsatzkombinationen dieser Systeme am Gebäude getestet. Die bis heute bekannten Möglichkeiten der Kombination von PV und Begrünung können der Abb. 4 entnommen werden. Außer bei der Kombination PV+Gründach ist die Kombination auf der Fassade nur neben- oder untereinander angeordnet zu finden. Grund dafür ist die Konkurrenz beider Systeme für die Solarstrahlung und die möglichen hohen Temperaturen, die hinter einem PV-Modul bei einer hintereinanderliegenden Anordnung der Systeme herrschen.

Auf dem Dach hingegen wurden bereits vor einem Jahrzehnt die möglichen Synergien der Kombination von Photovoltaik (PV) und Dachbegrünung (Gründach) untersucht [26, 27, 28]. Heute ist die Kombination PV+Gründach aufgrund ihrer Vorteile wie der Erhöhung der Photovoltaikerträge, der weiterhin möglichen Nutzung der Dachbegrünungsvorteile und der Vermeidung der Konkurrenz für die geeignete Dachfläche in den Städten gut bekannt [29, 30, 31, 32]. Mehrere Firmen haben schon eigene Systemlösung für die Kombination PV+Gründach entwickelt, um von der gleichzeitigen Nutzung beider Systeme und möglichen besseren Erträge zu profitieren [33, 34].

## 2. Ziele

Das Zusammenwirken dieser zwei Systeme, Photovoltaik und Fassadenbegrünung, könnte Synergien und Vorteile bringen, die bereichsübergreifende Funktionen erfüllen.

Hauptziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer optimalen, dauerhaften, kostengünstigen und energieeffizienten multifunktionalen Lösung, die die gleichzeitige Nutzung der Vorteile und Synergien von Fassadenbegrünung und Photovoltaik erlaubt. Sie sollte ermöglichen gleichzeitig Energie zu gewinnen, Heiz- und Kühlenergie zu sparen, Staub zu binden, die Luftqualität zu erhöhen und Lärm zu mindern. Außerdem sollte die entwickelte Lösung beliebig multiplizierbar sein und sowohl für die Gebäudesanierung als auch im Neubau eingesetzt werden können. Zusammenfassend sollte sie die heutigen Anforderungen der Klimastrategien als effizienter und ressourcenschonender multifunktionaler Lösungsansatz erfüllen und somit eine nachhaltige Lösung für die Städte der Zukunft darstellen.

Fassadenbegrünungen und Photovoltaikanlagen bieten mehrere Lösungen gleichzeitig. Als neues multifunktionales System wird im Rahmen dieser Dissertation zum ersten Mal die gleichzeitige Nutzung beider Systeme erforscht (Abb. 5 und Abb. 11).

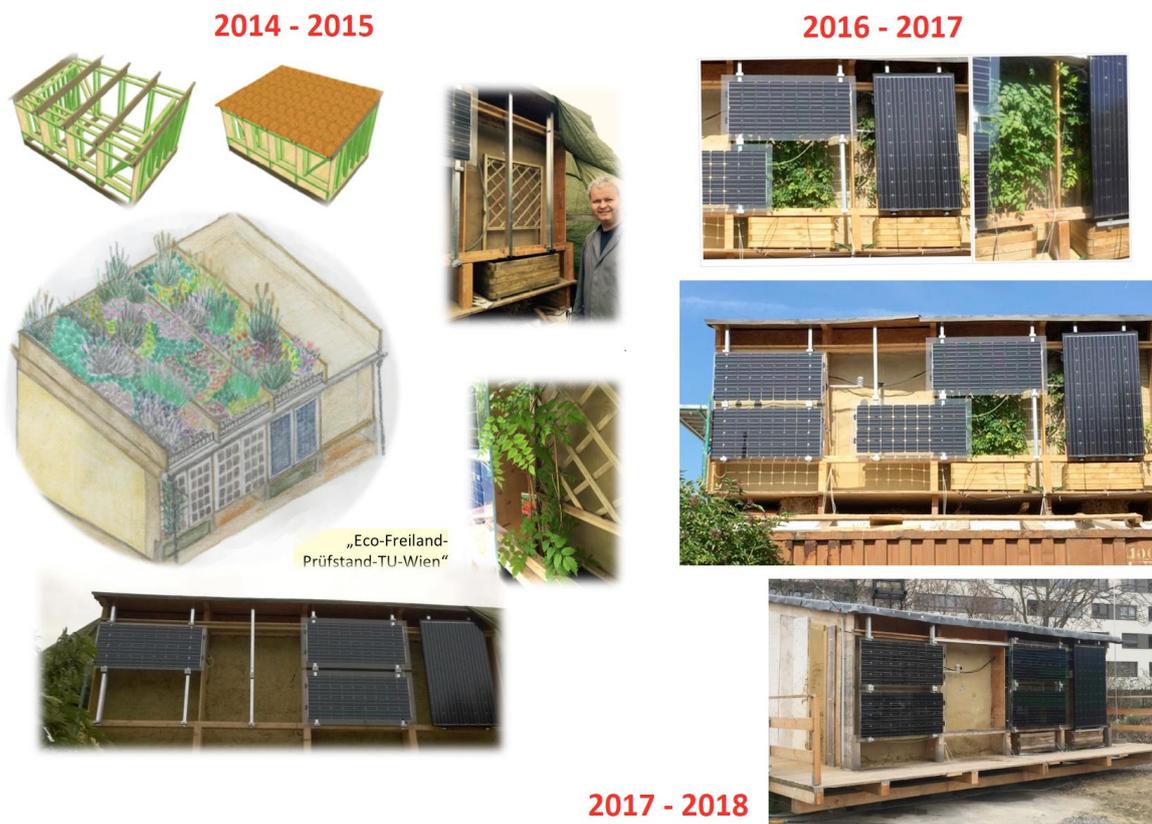


Abb. 5: Chronologische Entwicklung der MFS nach Jahren. Quelle: eigene Bilder

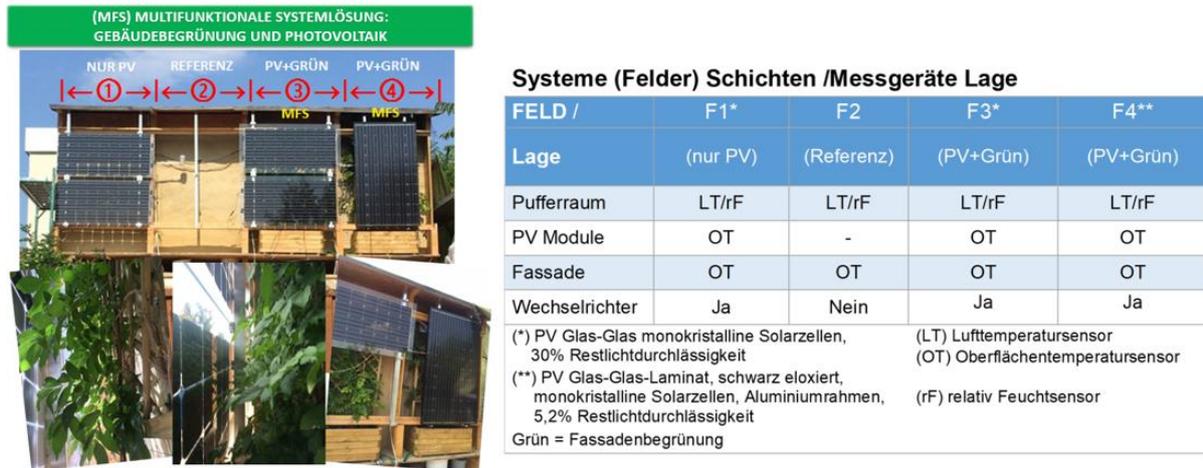


Abb. 6: Prüfstand - Systeme -Felder, MFS-Varianten, Sensoren Lage. Quelle: eigene Darstellung.

Für die Entwicklung der multifunktionalen Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik (MFS) wurden unterschiedliche Versuchsflächen bzw. Varianten der MFS auf der Ost-Fassade des Öko-Prüfstandes<sup>4</sup> aufgebaut. Der Öko-Prüfstand ist ein experimentelles Strohballen-Lehm-Gebäude mit Holzstruktur auf dem Versuchsgelände des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz. Die verschiedenen Varianten (Abb. 6) dienen zur Untersuchung, Prüfung und zum Vergleich sowie zur Validierung der Ergebnisse der Einflüsse und Wirkungen der einzelnen Systemkomponenten der MFS. Außerdem erlauben sie die Feststellung des Ausmaßes der Wirkungen.

Auf jeder Schicht des Systems und auf allen Versuchsfeldern wurden hygrothermische Parameter, Klimadaten und Photovoltaikerträge in 10-Minuten-Abständen geloggt. Die Lage und der Typ des Temperatursensors sind in Abb. 6 zusammengefasst dargestellt. Die Messwerte wurden von Juli 2015 bis Juli 2017 erfasst und gespeichert. Die verwendeten Außenklimadaten wurden von der eigenen Wetterstation am Gelände des Institutes aufgezeichnet.

Für die Auswahl der Pflanzen wurde zunächst eine Tabelle (Abb. 7) mit möglichen Kletterpflanzen erstellt. Da dieses Projekt das erste seiner Art war und es keine Kletterpflanzen-Empfehlungen für einen Einsatz unter solchen extremen Bedingungen gab, wurde für die endgültige Auswahl und Beschaffung besonders auf Kriterien wie die Verträglichkeit mit Halbschattenstandorten, sowie pflegeleichte und resistente Pflanzen geachtet. Letztendlich hat auch das Pflanzenangebot am Markt (Vegetationsperiode) die endgültige Auswahl beeinflusst.

Das Begrünungssystem wurde durch die Erfüllung von Kriterien ausgewählt. Zu den Kriterien zählten die erprobte und bekannteste Technologie, die Kosten und der Pflegeaufwand. Die Auswahl fiel auf die Variante „Bodengebundene Fassadenbegrünung mit Trögen“ und auf einen Substrattyp, der für den Aufbau von Dachbegrünung benutzt wird.

Für die Untersuchungen wurden die folgenden Varianten der MFS am Öko-Prüfstand aufgebaut:

- *MFS-Varianten*: Zwei Variationen der MFS wurden mit unterschiedlichen PV-Modul-Typen entwickelt, um die Einflüsse der Restlichtdurchlässigkeit, 30% (F3) und 5,2% (F4), monokristalline Solarzellen auf die Pflanzen zu testen.
- *Variante ohne Begrünung*: Eine dritte Versuchsvariante wurde mit einer gleich großen, leeren Pufferraumschicht (ohne Fassadenbegrünung) aufgebaut, um die Einflüsse der Begrünung zu testen.

<sup>4</sup> Der Öko-Prüfstand ist ein Versuchsgebäude für natürlichen und ökologischen Baumaterialien wie Stroh, Lehm, u.a. der Forschungsgruppe „Ökologische Bautechnologien“

- **Referenzfeld:** ein Feld wurde als Referenz benutzt, um die Ergebnisse der MFS-Varianten zu einer normalen kahlen Wand unter denselben Bedingungen untersuchen und vergleichen zu können.

Alle Systeme wurden unter denselben Bedingungen getestet und erforscht. Das erlaubte einen detaillierten Vergleich aller Parameter und Wechselwirkungen zur Referenzwand und somit die Quantifizierung der Wechselwirkungen.

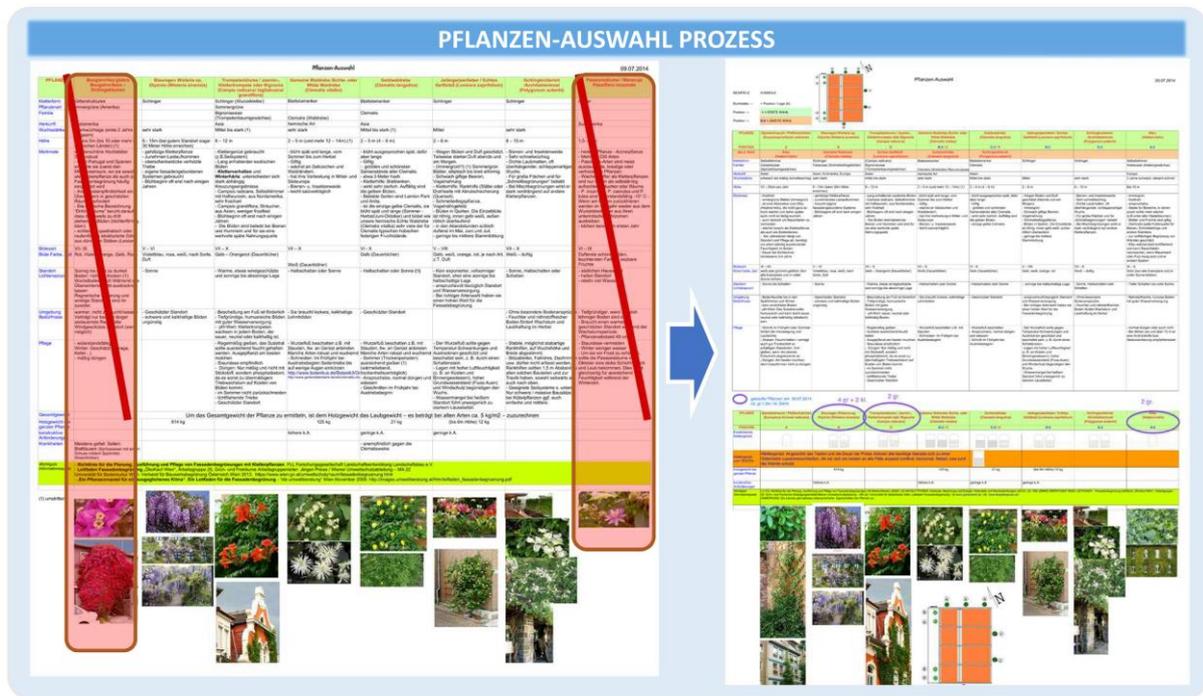


Abb. 7: Pflanzen-Auswahl Prozess. Links, erste erstellte Tabelle mit möglichen Kletterpflanzen und Haupteigenschaften für den Einsatz im MFS-Versuchsprojekt. Rechts, ausgewählten Kletterpflanzen mit Ersatzpflanzen-Optionen für die Beschaffung. Quelle: eigene Darstellung mit Informationen aus [23, 35, 36, 37, 38]

Die multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik (MFS) nutzt die Synergieeffekte beider Systeme aus, die durch die Anordnung ihrer Komponenten entstehen. Durch die gleichzeitige Nutzung von Photovoltaik und Fassadenbegrünung auf der Fassade entsteht ein grüner Pufferraum, der als Wärmepuffer und Schutz für die Fassade und die Photovoltaik (PV) agiert.

Durch die Anordnung des grünen Pufferraumes werden die drei Schichten der MFS entstehen: die Fassaden-, die Grünpufferraum- und die Photovoltaikschicht. Diese sind in Abb. 8 dargestellt.

Alle diese Schichten unterstützen sich gegenseitig und wiederum alle Schichten zusammen d.h. das gesamte System schützen die Gebäudefassade. Die drei Systemschichten werden im Folgenden beschrieben:

**Fassadenschicht (FS):** Durch den Abstand zwischen der Fassadenkonstruktion und dem Grünpufferraum entsteht eine Luftkammer, die als Puffer zwischen der Fassade und der Begrünung agiert und die Fassade schützt.

**Grünpufferraumschicht (GPR):** Durch den Abstand zwischen der GPR- und der Photovoltaikschicht (PV) entsteht eine Luftzirkulation, die beiden Schichten dient. Einerseits schützen und kühlen die GPR und die Luftschicht gemeinsam die PV, darüber hinaus schützen die PV und die Luftzirkulation die Pflanzen und regulieren das GPR-Mikroklima.

**Photovoltaikschicht (PV):** Die PV entsteht durch die Anordnung der gesamten Photovoltaikmodule. Sie schützt die GPR vor extremen Temperaturen und Wetterereignissen (Abb. 9).

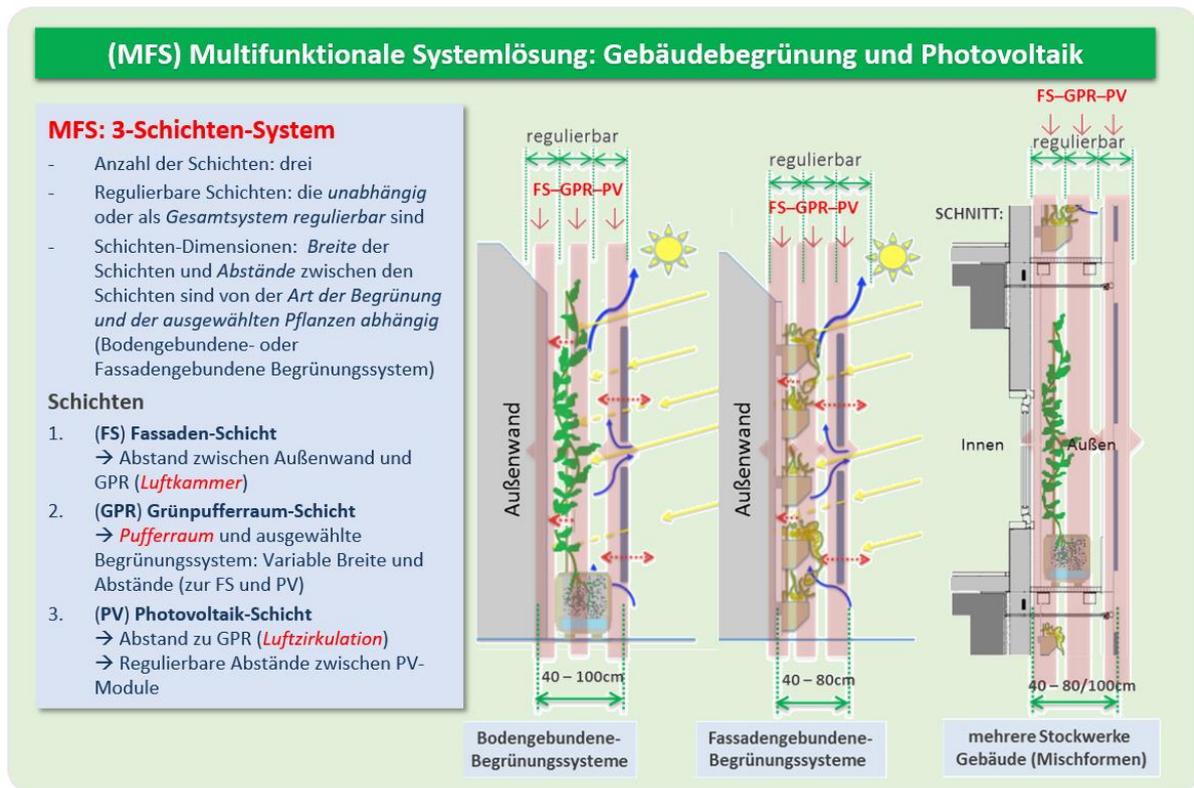


Abb. 8: MFS-Komponenten. Das Drei-Schichten System, Wechselwirkungen zwischen den Systemschichten. Quelle: eigene Darstellung.

Abschließend schützt das gesamte System (alle Schichten) die Fassadenkonstruktion vor abrupten Temperaturschwankungen und -änderungen sowie extremen Wetterereignissen (Hagel, Wind, Schlagregen) und agiert als eine ganzjährige Wärmedämmung, sowohl für den Winter- als auch für den Sommerschutz, und passt sich an die Klimabedingungen an.

Durch dieses Zusammenspiel der Wechselwirkungen zwischen den Schichten des Systems entstehen Synergien, die die einzelnen Eigenschaften und Vorteile der Komponenten verstärken und durch die neue Eigenschaften entstehen. So wirkt das gesamte System als eine Wärmedämmung für die Fassadenkonstruktion. Diese weist eine gleichmäßige Temperatur auf unabhängig von den Wetterbedingungen, den kurzfristigen Wärmegewinnen oder -verlusten sowie vom Zeitintervall. Diese Dämmwirkung verhindert sowohl die sommerliche Überhitzung als auch die winterlichen Wärmeverluste und passt sich an die Wetterbedingungen an, sodass nur gleichmäßige Temperaturänderungen entstehen. Eine Zusammenfassung der Eigenschaften, Vorteile, Einsatzmöglichkeiten und Ziele des Systems ist im Datenblatt der MFS zu sehen (Abb. 11).



Abb. 9: Grünpufferraum - Pflanzen im Jahresverlauf. Quelle: eigene Bilder.

Die MFS schützt außerdem die Fassadenmaterialien und verlängert deren Lebensdauern. Durch die Verhinderung von abrupten Temperaturschwankungen und den Schutz vor extremen Wetterereignissen werden Materialspannungen und -dehnungen sowie mögliche Bauschäden verhindert (Abb. 10).



Abb. 10: MFS- Schutz der Gebäudematerialien. Quelle: eigene Bilder

MFS - Datenblatt

(MFS) MULTIFUNKTIONALE SYSTEMLÖSUNG:  
GEBÄUDEBEGRÜNUNG UND PHOTOVOLTAIK

**Multifunktionale Systemlösung**  
 → Kombination von Gebäudebegrünung und Photovoltaik für Fassadensysteme

**Vorteile**

- einfache Anwendung
- Pflanzenentwicklung ab 5,2% *Lichtdurchlässigkeit* des PV-Moduls
- gleichzeitige Nutzung der Vorteile und gegenseitige Unterstützung → Verstärkung der Eigenschaften und Vorteile der einzelnen Systemkomponenten und Entstehung neuer Merkmale
- ganzjähriger Wärmeschutz, der sich an die Klimabedingungen anpasst (Verringerung des Energiebedarfs für Heizen und Kühlen sowie das Bremsen die weitere nächtliche Abkühlung der Wand)
- Verbesserung des Mikroklimas: Regulierung der Luftfeuchtigkeit, verbesserte Luftqualität durch Bindung von Staub und weiteren Luftschadstoffen
- Schutz der Gebäudefassade gegen extreme Wetterereignisse (z.B. Hagel, Schlagregen, Wind)
- eigene Energieerzeugung
- doppelte Vorteile in den Spitzenlaststunden: Unterstützung der Energieversorgung bei gleichzeitiger Minderung des Energieverbrauchs
- Vermeidung von PV-Ertragseinbußen (teilbestätigt) durch Minderung des Hitzestresses d.h. ganzjährige niedrigere Betriebstemperaturen (bestätigt)
- Minderung der Vulnerabilität des Energiesystems
- nachhaltige, energieeffiziente und ressourcenschonende passive Maßnahme für Gebäude

**Anmerkungen:**

- (1) M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules Multifunctional system: Building greening and photovoltaic“, Energy and Buildings, Bd. 146, pp. 364-382, 2017.
- (2) M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System“, Energy and Buildings, Bd. 147, pp. 123-141, 2017.
- (3) M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung“, Bauphysik, Bd. 40, Nr. 3, p. 12, 2018.
- (4) Niedrigerer Wasserverbrauch bei der getesteten Variante mit Holztrögen, Substrat (Dachbegrünung-Typ) und Drainageschicht
- (5) Bis dato wurden, außer der genannten Ansprüche, keine limitierenden Faktoren gefunden, die die Pflanzenauswahl einschränken könnten. Weitere Forschungsarbeiten werden diesbezüglich durchgeführt.

Stand: Mai, 2018

**Objekte: Häuser, Mehrfamilienhaus, Gebäude auf mehrere Stockwerke**

**Ziele**  
 → Häuser, Mehrfamilienhäuser und Gebäude auf mehreren Stockwerken  
 → Gebäudesanierung und Neubau

**Systemeigenschaften**

- einsetzbar in verschiedenen Varianten und Kombinationen
- regulierbares System: verschiebbar und/oder regulierbarer Abstand der PV-Module zur Wand
- sowohl für boden- als auch für fassadengebundene Begrünungssysteme geeignet
- Kompatibilität mit mehreren Bewässerungssystemen sowie niedriger Wasserverbrauch (4)
- Pflanzenansprüche (5): Verträglichkeit mit Halbschatten-Standorten, geringer Wasserbedarf. Es wird bevorzugt keine selbstkletternden Pflanzen einzusetzen.
- Auswahl der Pflanzen abhängig von der Lichtdurchlässigkeit der ausgewählten PV-Module

**Getestete PV-MODULE**

**STANDARD PV-MODULE:**

- Monokristalline Solarzellen
- Modultechnologie: Glas-Glas-Laminat, schwarz eloxiert

5,2% Lichtdurchlässigkeit

**SEMITRANSARENTE PV-MODULE:**

- Monokristalline Solarzellen
- Modultechnologie: Glas-Glas-Laminat
- 32 % Lichtdurchlässigkeit

**Art der Fassadenbegrünung**

1. *Fassadengebundene Begrünung:*
  - flächige Systeme oder Tröge an der Fassade
  - unterschiedliche Substrate möglich, abhängig vom ausgewählten Begrünungssystem (keine bekannte Einschränkung)
2. *Bodengebundene Begrünung:*
  - Begrünung wird direkt in die Erde oder in Kübel bzw. Kästen eingepflanzt und auf der Wand mit Hilfe eines Klettergerüsts geleitet
  - Pflanzen: Gerüstkletterpflanzen
3. *Mischformen als Kombination beider Systeme*

Abb. 11: Datenblatt der MFS. Wichtige Eigenschaften des Systems, Daten, Fakten und Ziele. Quelle: eigene Darstellung.

### 3. Methodik und Vorgehensweise bei der Auswertung

#### 3.1. Einflüsse der aktuellen Entwicklungen der EU-Ziele und der Digitalisierung auf Auswertungsmethoden

Einen sehr wichtigen Teil und auch eine große Herausforderung dieser Dissertation stellen die Behandlung von großen Datenmengen für die Durchführung der Analyse dar. Denn von diesen hängen die Erkennung wichtiger Zusammenhänge, Wechselwirkungen und Synergien und somit auch die Ergebnisse und erfolgreiche Entwicklung des neuen multifunktionalen Fassadensystems ab.

Die schon im Abschnitt „Ausgangssituation und Problemstellung“ [1] erwähnten Ziele und Anforderungen an neue Gebäude und an die Sanierung des Gebäudebestands [39], um die neue Ära von „intelligenten Gebäuden“ voranzutreiben [9], benötigen den Einsatz intelligenter Technologien und Monitoring-Systeme. Große Bedeutung weisen die Feststellung des Benutzerverhaltens und des tatsächlichen Energieverbrauchs auf, sowie die damit verbundene Anpassung des Energieverbrauchs der Gebäude und der Systeme. Durch die Integration intelligenter Technologien und Monitoring-Systeme befinden sich Big Data auf allen Ebenen und insbesondere im Bereich der Gebäude-Energieeffizienz [40, 41].

Im Forschungsbereich sind langfristige Messkampagnen notwendig, um detaillierte und zuverlässige Kenntnisse über die tatsächlichen Einflüsse, Wirkungen der Gebäudekomponenten und -materialien zu gewinnen, sowie über den tatsächlichen Energieverbrauch des Gebäudes: Big-Data ist da unerlässlich. Die Möglichkeiten, die diese Daten für die Forschung mit sich bringen, sind enorm. Sie erlauben eine genauere Betrachtung der Zusammenhänge und Analyse aller bauphysikalischen, klimatischen, energetischen und benutzerbedingten Wechselwirkungen, sowie die notwendige kurz- und langfristige Modellierung der Daten und das Validieren und Vergleichen der Ergebnisse. Beispiele dieser Datenanalysen und -modellierungsweisen sind in den veröffentlichten Publikationen im Zusammenhang mit dieser Dissertation zu sehen. Die Ergebnisse der Analysen und die Daten werden später wieder für weitere Simulationen neuer Einsätze dieser Materialien und Komponenten verwendet, um ihren gesamten Beitrag zur Gebäudeeffizienz und einen optimierten und effizienten Einsatz festzustellen.

Außerdem ändert der Klimawandel die gewohnten klimatischen Jahresabläufe [42, 43, 44]. Selten finden zwei Sommer- oder Winterjahreszeiten hintereinander unter denselben klimatischen Bedingungen statt und somit wird das Vergleichen der Jahres- und Jahreszeitergebnisse unter realen Bedingungen schwieriger. Als Folge werden noch längere Messkampagnen notwendig, um die Leistung von Gebäudeelementen unter realen Bedingungen festzustellen. Das Ausmaß und die Vielzahl der Daten werden immer größer.

Zusätzlich kommen die neuen EU-Anforderungen an verpflichtende Veröffentlichung der Daten von Forschungsprojekten für ihre Weiterbenutzung, sowie die Bereitstellung dieser Daten in „nutzbaren und Open-Source“ Datenformaten mit den dafür notwendigen „Metadaten“<sup>5</sup>. All dies verstärkt noch weiter die Notwendigkeit, Data Science Prozesse in den Forschungsbereichen zu verwenden [45].

#### 3.2. Business Intelligence und Data Science

Umfangreiche Messungen und Versuchsreihen wurden durchgeführt. So ergeben sich aus fast zwei Jahren ca. 2GB Messdaten im 10-Minutentakt für das multifunktionale System: Fassadenbegrünung

---

<sup>5</sup> Metadaten: Strukturierte Daten, die Informationen über Merkmale anderer Daten enthalten [77]

und Photovoltaik (MFS). Klimadaten, hygrothermische Konstruktionsparameter und Photovoltaikerträge wurden geloggt, verarbeitet, aufbereitet und schlussendlich analysiert.

Zur Analyse solcher großen Datenmenge sind die dafür normalerweise benutzten und gut bekannten Tabellenkalkulationsprogramme, wie z.B. Excel, nicht mehr geeignet [46]. Diese Programme bleiben am Ende der Prozesskette als ein Teil des gesamten Prozesses als Visualisierungsprogramme, der schon zuvor gesammelten, verarbeiteten und aufbereiteten Daten. Diese wiederum werden in den weiter folgenden Prozessschritten anhand wissenschaftlicher Methoden auf besondere Patterns (Muster), Trends, Eigenschaften und Beziehungen sowie Wechselwirkungen weiteruntersucht, um neue Zusammenhänge und mögliche Synergien des gesamten Systems zu entdecken (Data Mining und Predictive Analytics) [46, 47, 48, 49, 50].

Der gesamte Prozess wird durch die Verwendung von Anwendungen, Tools und Sprachen (Werkzeugen), die aus dem IT-, Wirtschafts-, Marketing-, Mathematik-, Statistik-, -und Wissenschaftsbereich stammen, durchgeführt. Diese Werkzeuge sind abhängig vom Zweck der Verwendung als Business Intelligence (BI) und Data Science (DS) Methoden bekannt [40, 47, 51, 50, 52, 53].

Business Intelligence (BI) wird vorwiegend für die Bereitstellung von Unternehmensdaten und deren Visualisierung benutzt. Data Science (DS) sind wissenschaftliche Prozesse und Methoden, um Wissen aus großen Datenmenge extrahieren zu können. In anderen Worten bedeutet dies: Das Umwandeln der Informationen in Wissen [40, 50]. Bei Data Science werden die Daten in wiederkehrenden Prozessen wiederverwendet, um weitere Kenntnisse zu gewinnen (Abb. 12). Da beide, BI und DS, als gemeinsame Voraussetzung die Vorbereitung und Bereitstellung der Daten [52] aufweisen, wird DS als ein logischer weiterfolgender Schritt des BI betrachtet.

BI und DS sind keine feste Lösung oder Software, sondern Sammlungen von neuen technologischen analytischen Werkzeugen, die sich ständig aktualisieren und ändern und zu einem bestimmten Zweck den jeweiligen Teilschritten der Prozessanalyse dienen. Da die Anzahl an Anwendungen zu groß ist und abhängig von der Komplexität des Einsatzes und der benötigten Kapazität variiert, wird für komplexere Projekte in Teams von Data Science Spezialisten gearbeitet [46, 54, 53]. So könnten z.B. Programmiersprachen, wie Python und R, für komplexe Daten zum Einsatz kommen, um spezifische Analysen durchführen zu können. Je komplexer die Daten sind, desto komplexer und spezialisierter werden die notwendigen Anwendungen sein.

Für Projekte, die sich an der Grenze zur Klassifizierung als Big Data befinden, aber Anforderungen an Prozesse aus beiden, BI und DS, haben, könnten neue technologische Entwicklungen die geeignete Lösung darstellen. Firmen wie Microsoft haben neue Lösungen entwickelt, wie Power Business Intelligence (PBI) [55], die sich an Kunden mit Datengrößen ähnlich zu denen von mittleren Unternehmen wenden. Mit benutzerfreundlich orientierten Lösungen bringen sie mehrere Anwendungen und Tools unter ein Dach, in einer Art „Self-Service“-Plattform, welche mit Hilfe von interaktiven Berichten und Dashboards erstellt wird [52]. Diese Lösungen haben den Vorteil, dass sie von Prozessen und Methoden beider Verfahren, BI und DS, profitieren, sowie von der wachsenden Kompatibilität mit anderen Anwendungen, die nicht von Microsoft entwickelt wurden. Mehr Flexibilität, Anwendungskompatibilität und Werkzeuge erlauben dem Benutzer die Entwicklung kreativer und personalisierter Lösungsansätze und stellen somit diese effizienteren Lösungen für Projekte dar, die nicht so eine hohe Komplexität an Daten, aber dafür Data Science Prozessanforderungen haben, so wie diese Dissertation [52]. Hier verschwimmen die klaren Grenzen beider Verfahren, die eine Zuordnung ihrer Teilprozesse zu einer BI- oder DS Gliederung erlauben.

Die Entscheidung, Verfahren aus dem Big Data Unternehmensbereich zu testen und für die Analyse der Daten dieser Dissertation zu benutzen, wurde nach einer langen, bis dahin erfolglosen Suche nach

einem geeigneten Programm für die Auswertung der Daten getroffen. Mehrere Programme wurden auf Kompatibilität mit den Zielen der Forschungsanalyse und der notwendigen Kapazität zur Datenanalyse untersucht. Die Anforderungen konnten nicht nur durch ein einziges Programm erfüllt werden. Dafür waren mehrere Programme notwendig, die oft untereinander nicht kompatibel waren und somit nicht einander ergänzend benutzt werden konnten, um eine holistische detaillierte Analyse durchzuführen. Außerdem waren eine wachsende Datenmenge und Flexibilität, um neue Parameter zu den schon durchgeführten Analysen hinzufügen zu können, zusätzliche Herausforderungen für die meisten Programme.

### 3.3. Auswertungsmethoden

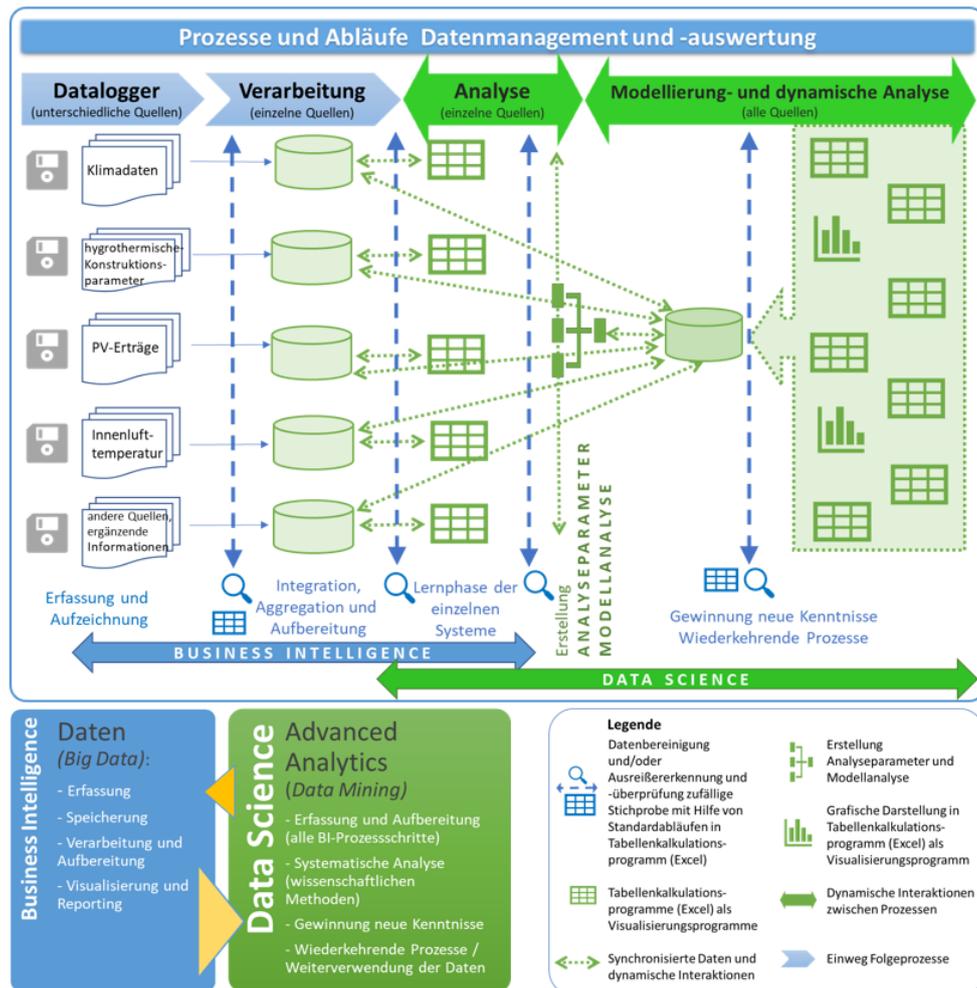


Abb. 12: Business Intelligence und Data Science. Struktur und Prozesse (Quelle: eigene Darstellung)

Wie im Abschnitt 3.2. erklärt wurde, wurden für die Analyse Anwendungen aus BI- und DS auf der BI-Plattform zusammen mit den Power-Werkzeugen (Power BI, Power Pivot, Power Query, DAX, M und R, u.a.) verwendet und abhängig vom Prozessschritt mit unterschiedlicher Intensität und in abwechselnden und wiederkehrenden Ablaufschritten eingesetzt (Abb. 12). Die Kompatibilität der Werkzeuge erlaubt es, dynamische Interaktionen zwischen den Modellen zu erstellen und somit auch eine holistische Annäherung der Analyse. Nach jeder Analyse und anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurden die Ziele des nächsten Schritts erneut überprüft, wenn notwendig aktualisiert und/oder neue Ziele hinzugefügt (Abb. 13). So wurden flexible, anpassbare, maßgeschneiderte und automatisierte Modelllösungen für jeden Prozessschritt der Analyse erstellt. Es ist ein sehr aufwendiger und umfangreicher Prozess, der jedoch notwendig war und sich als erfolgreiche Lösung herausstellte.

Die Messwerte wurden in 10-Minuten-Abständen geloggt. Aus diesen Werten wurden die stündlichen Mittelwerte ermittelt und anschließend über einen Zeitraum von zwei Jahren modelliert und ausgewertet.

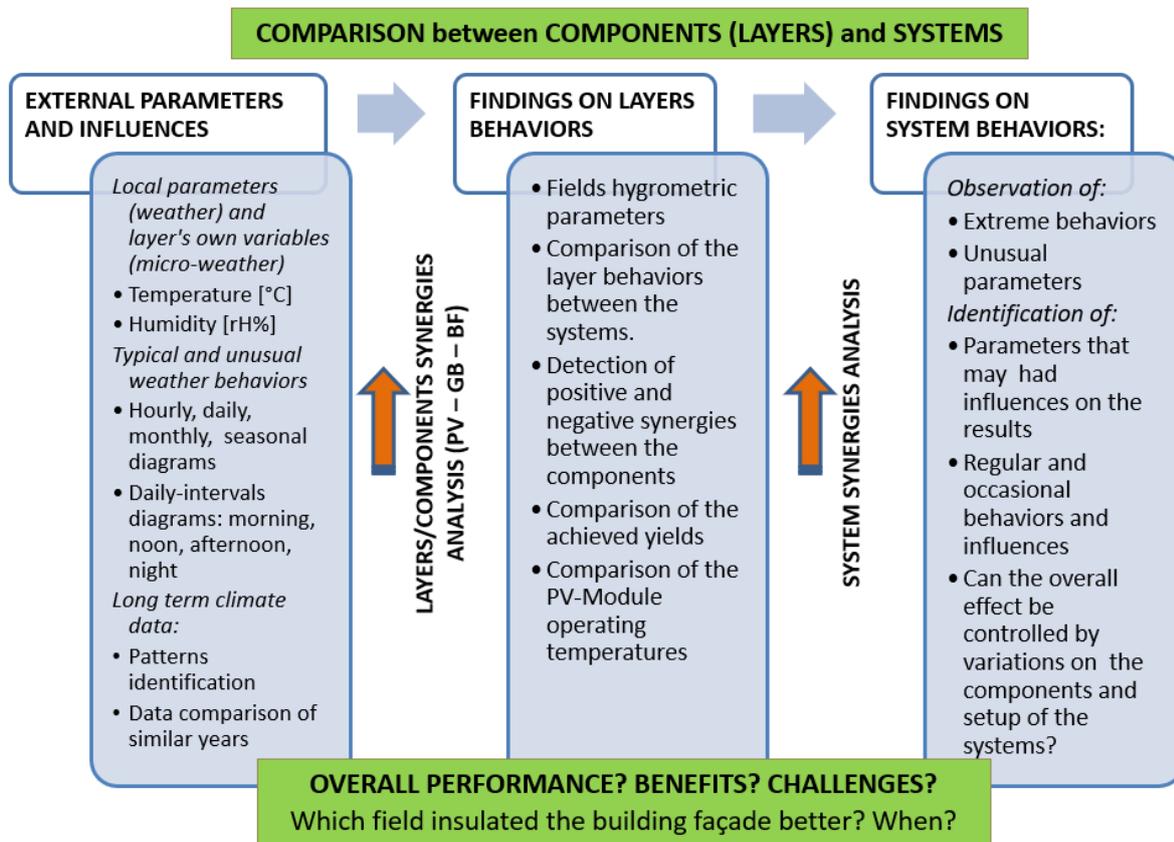


Abb. 13: Untersuchungsverfahren: Ziele der eingesetzten Prozessen und Methoden (1. und 2. Publikation). Quelle: Abbildung aus der zweiten Publikation [3]

Auf Basis der in Abb. 12 dargestellten Struktur und Prozessen und unter Berücksichtigung der einzelnen Prozessschrittziele und Oberziele (Abb. 13) wurden alle klimatologischen, physikalischen und energetischen Daten untersucht.

Jede einzelne der durchgeführten Analysen ergab essentielle Informationen für die gesamte Betrachtung aller Wechselwirkungen und Eigenschaften des analysierten Elements. Die Teilergebnisse erlaubten es, Annahmen zu bestätigen oder zu widerlegen, Zusammenhänge zu erkennen und somit neue Synergien zu entdecken (Abb. 13). Anhand wiederkehrender Prozesse wurden neue energetische, klimatologische oder hygrothermische Parameter und Determinanten zu den bestehenden Modellanalysen hinzugefügt und auf typisches sowie atypisches Verhalten aller Varianten erneut untersucht. All dies in unterschiedlichen Zeitintervallen und Jahresabschnitten dargestellt und miteinander verglichen. Die Teilergebnisse wurden dann verglichen und die Ziele für die nächsten Schritte überprüft und wenn notwendig dementsprechend modifiziert.

Diese Analysen wurden zuerst über größere Zeitspannen (jährlich, jahreszeitlich und monatlich) immer unter Bildung von Maximal-, Minimal- und Mittelwerten durchgeführt. In einem nächsten Schritt wurden diese Daten in für die Prozessziele bedeutsame, spezifische Zeitintervalle unterteilt und anschließend erneut untersucht. Ferner wurde besonders auffälliges Verhalten auf stündlicher Basis analysiert und über alle Zeitspannen modelliert. Bei den einzelnen Prozessschritten wurden die Daten anhand zufälliger Stichproben und Excel-Standardabläufen erneut überprüft und eventuelle Ausreißer bereinigt.

Für die Modellierung der Daten wurde ein dynamisches Klimamodell erstellt, sodass sich dieses an die gemessenen klimatischen und zeitabhängigen Tagesintervallbedingungen sowie an personalisierte, definierte Zeitintervalle anpasst. Beispiele hierzu sind in Abb. 14 dargestellt.

Die untersuchten Parameter unterteilen sich in klimatische und in zeitliche Parameter und berücksichtigen unter anderem folgende Einflüsse:

- *Klimatische Parameter:* Jahreszeit, Wärme- und Kälteperiode in Abhängigkeit der Solarstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Regenmenge
- *Zeitliche Parameter:* Tageslichtintervalle, Morgen- und Abenddämmerung, Tageslicht- und Nachtintervalle in Abhängigkeit der Solarstrahlung, PV-Erträgen und Jahreszeit

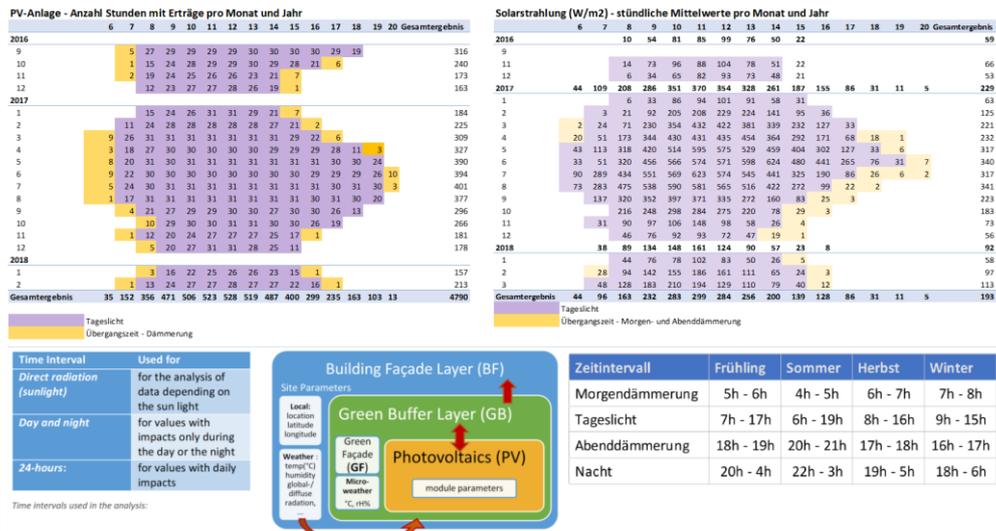


Abb. 14: Beispiele angewendete Parameter und Intervalle für die Modellierung der Daten und der Stellung des dynamischen Klimamodelles. Quelle: aus der dritten Publikation dieser Dissertation [2, 3, 6]

Diese Vorgehensweise erlaubt eine genauere Betrachtung aller möglichen Zusammenhänge zwischen bauphysikalischen, klimatischen, energetischen und benutzerbedingten Parametern, sowie den damit verbundenen Vor- und Nachteilen.

## 4. Zusammenfassung der wissenschaftlichen Publikationen

Nach der erfolgreichen ersten Testphase der MFS (Pflanzenentwicklung) hat die darauffolgende Analysephase der Wechselwirkungen der MFS mit ihren Komponenten oder Systemschichten begonnen. Zuerst wurden die Einflüsse der Grünpufferraumschicht (GPR) auf die PV-Schicht analysiert [2]. Darauf aufbauend wurden in einem zweiten Schritt der Prozessanalyse die Wechselwirkungen der Synergien der gesamten MFS auf die Fassadenschicht erforscht [3].

Letztendlich und um zu bestätigen, ob die Vorteile der Synergien der Kombination PV+Grün auf der Fassade (MFS) auch bei einer Dachvariante erzielt werden können, wurde in der dritten und letzten Publikation [6] die Kombination PV+Gründach erforscht. Der Fokus der Analysen lag in den Wechselwirkungen der PV+Gründach-Kombination auf die Temperaturen an der Schnittstelle zwischen Dachabdichtung und dem Substrat. Ähnliche Eigenschaften und Vorteile wie bei der MFS wurden festgestellt.

Die Datenauswertung folgte in jeder der drei angeführten Untersuchungen dem gleichen im Abschnitt 3.3 beschriebenen Verfahren. So wurden stets zuerst die Daten über größere Zeitspannen (jährlich, jahreszeitlich und monatlich) mit der Bildung der Maximal-, Minimal- und Mittelwerte analysiert. Danach wurden diese Daten wieder in Zeitintervalle unterteilt und anschließend erneut untersucht. Die Zeitintervalle wurden anhand der direkten Solarstrahlung und der Betriebsstunden unterteilt. Letztendlich wurden die stündlichen Erträge auf besonderes auffälliges Verhalten analysiert und über alle Zeitspannen wieder modelliert. Mit dieser Vorgehensweise konnte die zeitliche Unterstützung der MFS festgestellt werden sowie unter welchen Bedingungen diese aufgetreten sind.

In den folgenden Abschnitten befinden sich die Zusammenfassungen der wissenschaftlichen Publikationen dieser Analysen.

### 4.1. Zusammenfassung der ersten Publikation ( 1)

#### **Einflüsse des grünen Pufferraums auf die Betriebstemperaturen von Photovoltaikmodulen Multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik**

*(Original Titel: Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules. Multifunctional system: Building greening and photovoltaics [2])*

In dieser Publikation wird zum ersten Mal die neuentwickelte, multifunktionale Systemlösung aus Fassadenbegrünung und Photovoltaik (MFS) präsentiert [2]. Fassadenbegrünung und Photovoltaik sind bekannte Systeme, die für ihre nachhaltigen, energieeffizienten und ökologischen Eigenschaften oft als Energieeffizienz- und Klimaanpassungsmaßnahme eingesetzt werden.

Beide Systeme werden normalerweise für den Sommer optimiert und haben zugleich als Anforderung für ihren Einsatz die maximale Nutzung der Solarstrahlung. Aus diesem Grund stehen beide Systeme für die geeignete Fassadenfläche in Konkurrenz zueinander.

Ziel der multifunktionalen Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik (MFS) ist die gleichzeitige volle Nutzung der Vorteile und Synergien beider Systeme. Mit dem aktuellen Stand der Technik ist die gleichzeitige Nutzung, in einer hintereinanderliegenden Anordnung auf der Fassade nicht möglich. Somit wird, bis Dato, beim gleichzeitigen Einsatz der Systeme die dafür geeignete Fassadenfläche zwischen beiden aufgeteilt. Durch die Entwicklung der MFS muss nun keine Entweder-Oder-Entscheidung mehr getroffen werden, sondern ein gleichzeitiger Einsatz ist möglich. Der Stand der Technik hat sich durch dieses neuentwickelte System verändert.

Die MFS entsteht durch die hintereinanderliegende Anordnung ihrer Komponenten auf der Fassade. Beim Aufbau der PV-Module vor der Fassadenbegrünung einer Wand entsteht ein grüner Pufferraum,

der als Wärmepuffer und Schutz für die Fassade und die Photovoltaik agiert. Diese Anordnung ermöglicht die gleichzeitige Nutzung von Photovoltaik und Fassadenbegrünung. Das System besteht aus drei Schichten: die Fassaden-(FS), die Grünpufferraum-(GPR) und die Photovoltaikschicht (PV). Alle diese Schichten unterstützen sich gegenseitig und wiederum alle Schichten zusammen, d.h. das gesamte System, schützen die Fassadenkonstruktion. Nach einer erfolgreichen Testphase, in der das Wachstum der Pflanzen in der GPR bestätigt wurde, wurden die ersten Analysen der Wirkungen der GPR auf die Betriebstemperaturen der PV-Module durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse werden in dieser Publikation präsentiert. Die analysierten Daten beziehen sich auf den Zeitraum von Juli 2015 bis September 2016.

Nach Untersuchung der Daten, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, wurde bestätigt, dass die MFS die Betriebstemperaturen der PV-Module das ganze Jahr hindurch, in stetig weitersinkenden Bereichen, zwischen 2°C und 4°C, reguliert (Abb. 15).

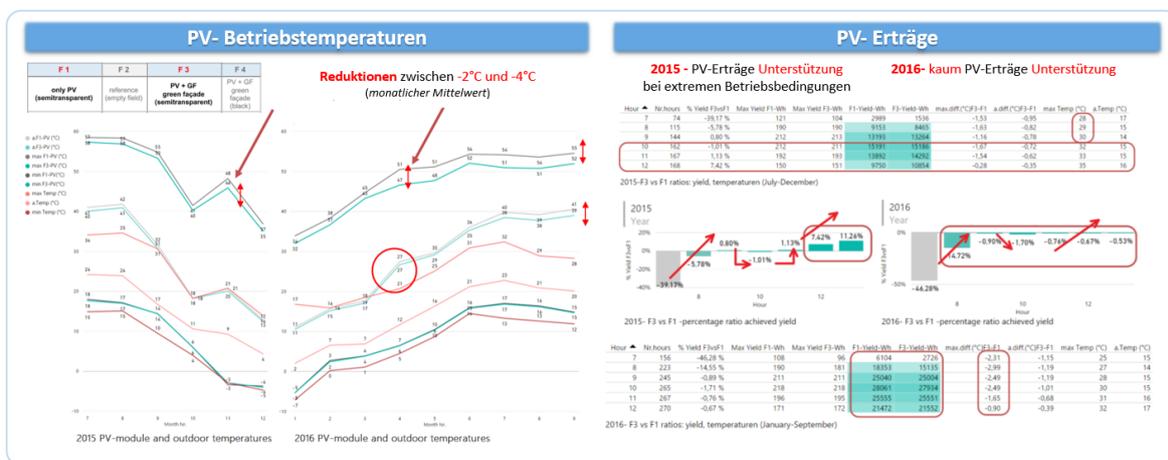


Abb. 15: Links: absenkender PV-Betriebstemperaturen. Rechts: bedingte Unterstützung der PV-Erträge. Quelle: erste Publikation [2].

Der Unterschied zwischen den Betriebstemperaturen der MFS und den PV-Modulen ohne Fassadenbegrünung wird mit der Zeit stetig größer (Abb. 15). Wodurch der Einfluss des GPR bestätigt wird und auf eine Korrelation zwischen der Entwicklung der Pflanzen (Wachstum und Laubmasse) und den niedrigeren Betriebstemperaturen hingedeutet wird. In der ersten Jahreshälfte betragen die maximalen Betriebstemperaturunterschiede zwischen 1°C bis 2°C und in der zweiten Jahreshälfte zwischen 2°C und 4°C. Die durchschnittlichen Betriebstemperaturunterschiede lagen zwischen 1°C und 2°C.

Einflüsse auf die Photovoltaikerträge wurden in den Zeitintervallen mit extremen Betriebsbedingungen (maximale Solarstrahlung und hohe Lufttemperaturen) und bei maximaler Leistung der PV-Module beobachtet. Die Zeitpunkte, zu denen bessere Leistungen beobachtet wurden, variieren dementsprechend abhängig von den Jahreszeiten (Sonnenwinkel). Dieser Effekt konnte in der ersten Hälfte des Jahres und in den Jahreszeiten mit ausgeprägten Temperaturen im Sommer und Winter eindeutig beobachtet werden. In den Übergangsjahreszeiten war dieser Effekt kaum zu erkennen.

Eine direkte Korrelation zwischen besseren PV-Erträgen und niedrigeren Betriebstemperaturen konnte nur während der ersten Jahreshälfte beobachtet werden. Der Ertragsunterschied zwischen den PV-Modulen der MFS und der Variante ohne Begrünung betragen im Durchschnitt zwischen 2% und 4%. In Einzelfällen lag sie sogar zwischen 15% und 24%. Die Entwicklung dieses Effekts in der zweiten Jahreshälfte war widersprüchlich: Trotz der weiteren Senkung der PV-Betriebstemperaturen der MFS-Variante und somit einer Steigerung des Unterschiedes der Betriebstemperaturen im Vergleich zur

Variante ohne Begrünung erzielte die MFS-Variante keine besseren PV-Erträge. Die früher erkennbaren besseren Erträge bei extremen Betriebsbedingungen und maximaler Leistung waren in der zweiten Jahreshälfte kaum zu erkennen.

Mit dem erfolgreichen Abschluss der ersten Testphase der MFS (Pflanzenentwicklung) wurde die Entstehung eines neuen multifunktionalen Systems bestätigt, welches die Synergien von Fassadenbegrünung und Photovoltaik ausnutzt.

Die Ergebnisse der ersten Analyse der PV-Betriebstemperaturen bestätigen, dass durch die Synergien der MFS eine effektive und anhaltende Reduktion der Betriebstemperaturen erzielt werden kann. Temperaturreduktion zwischen 2°C und 4°C wurden das ganze Jahr hindurch erreicht. Dennoch konnte eine direkte Korrelation zwischen niedrigeren Betriebstemperaturen und besserer PV-Leistung (PV-Erträge) wider Erwarten nicht festgestellt werden. Bessere PV-Leistungen wurden in den Zeitintervallen mit extremen Betriebsbedingungen beobachtet, meist in der ersten Hälfte des Jahres. Weitere Forschungsarbeiten sind notwendig, um diese Wirkung besser zu verstehen.

Die Eigenschaften der MFS sind vielversprechend und können einen wichtigen Beitrag zur Sanierung des Gebäudebestands leisten und auch bei Neubauten eingesetzt werden. Von besonderem Vorteil ist, dass die hier getestete Variante der MFS mit den kostengünstigen Varianten der einzelnen Technologien gestaltet wurde. Die nächsten Schritte der MFS sollten die Einflüsse auf die Fassadenkonstruktion feststellen. Wenn wie erwartet bestätigt wird, dass die MFS als ein Wärmeschutz agiert, könnten ihre vielfältigen Vorteile mehrere Gebäudefunktionen übernehmen und somit würde dies eine ökologische, kostengünstige und einfach replizierbare Lösung darstellen, die für eine Vielzahl an Gebäuden eingesetzt werden kann.

#### 4.2. Zusammenfassung der zweiten Publikation (2)

##### **Wärmer und Kälter - Wie Photovoltaiksysteme und Begrünung die Außenoberflächentemperatur der Fassade beeinflussen: Die Synergien eines multifunktionalen Systems.**

*(Original Titel: Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System)*

In dieser zweiten Publikation [3] werden die Analysen der Wechselwirkungen der Synergien der gesamten MFS auf die Fassadenschicht präsentiert.

Die MFS wurde schon erfolgreich getestet und die ersten Ergebnisse ihrer Vorteile und Synergien, die Reduktion der Betriebstemperaturen von PV-Module und der Schutz ihrer Komponenten, wurden in [2] präsentiert. In weiteren Analysen, die in dieser Publikation dargestellt werden, wurden die Auswirkungen der MFS auf die Oberflächentemperaturen der Fassadenkonstruktion untersucht. Die Daten wurden in unterschiedlichen Zeitintervallen und Jahresabschnitten modelliert und auf typisches sowie atypisches Verhalten aller Varianten untersucht und miteinander verglichen.

In dieser Publikation, ebenso wie in der ersten Publikation, wurde das gleiche Verfahren wie in Abschnitt 3.3 beschrieben zur Untersuchung der Daten benutzt. Die analysierten Daten beziehen sich auf den Zeitraum von Juli 2015 bis November 2016.

In allen Analysen, die das gesamte Jahr betrachten, wurde ein stabiles Verhalten der Oberflächenfassadentemperaturen der MFS (F3) festgestellt. Diese bewegen sich in derselben Größenordnung und Bereich wie die Außenlufttemperaturen und somit wird die Pufferwirkung der MFS bestätigt. Die Unterschiede zur Außenlufttemperatur lagen ca. 1°C bis 2°C höher oder niedriger, abhängig von der wetterbedingten notwendigen Sommer- oder Winterschutzfunktion. Abrupte und

extreme Außenlufttemperaturschwankungen, sowohl bei Erhöhung als auch bei Senkung der Außenlufttemperatur, werden durch den Wärmepuffereffekt der MFS fast vollständig gedämpft (Abb. 16).

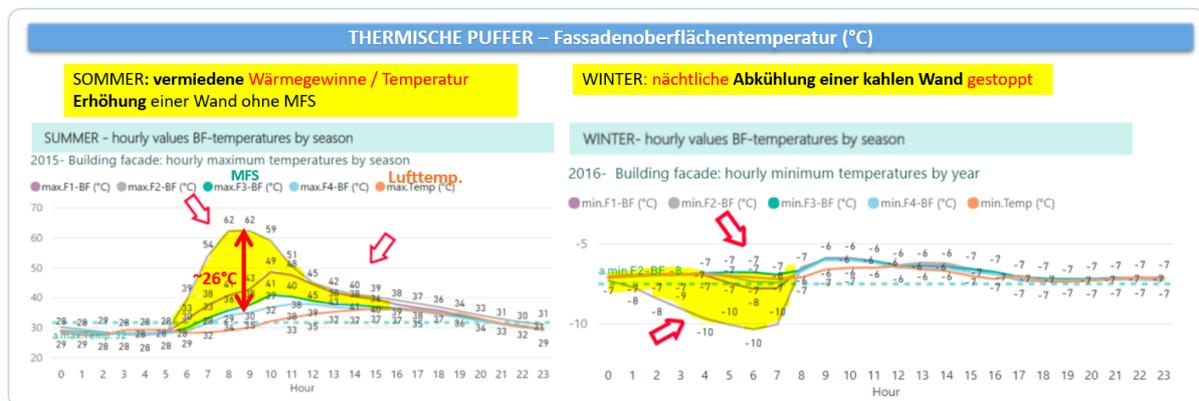


Abb. 16: MFS als ganzjähriger thermischer Schutz, sowohl für Sommer- als für Winterschutz. Links: im Sommer vermeidet die Wärmegewinne durch die Solarstrahlung. Rechts: im Winter stoppt die nächtliche weitere Abkühlung einer kahlen Wand. Quelle: zweite Publikation [3].

Im Vergleich zur Referenzwand (F2) zeigt die MFS-Wand (F3) für die monatlichen Höchsttemperaturen der Fassadenoberfläche einen Unterschied von 20°C im Sommerdurchschnitt und von bis zu 30°C bei Temperaturspitzen. Im Winter bremst die MFS die Abkühlung der Wand. Diese ist bezogen auf die jahreszeitliche Durchschnittstemperatur um 1,3°C bis 3°C wärmer. Außerdem verhindert die MFS die weitere nächtliche Abkühlung einer kahlen Wand [4, 5] im Durchschnitt um ca. 3°C, wenn die Außenlufttemperaturen unter den Gefrierpunkt fallen.

Zwischen den beiden untersuchten MFS-Varianten, F3 (35% PV-Lichtdurchlässigkeit) und F4 (5,2% PV-Lichtdurchlässigkeit) konnten während der ersten Jahreshälfte (2015) kaum Unterschiede beobachtet werden, aber in der zweiten Jahreshälfte (2016) zeigte F3 eine bessere Pufferwirkung als F4.

Die Ergebnisse bestätigen eine ganzjährige thermische Funktion der MFS, die sich an die zeitlichen thermischen Anforderungen anpasst und somit sowohl Sommer- als auch Winterschutz bietet. Die Schutzwirkung der MFS zeigt sich stärker bei extremen Außentemperaturen.

Die hier präsentierten Ergebnisse bestätigen das Potential der MFS als eine multifunktionale, effiziente und nachhaltige Systemlösung.

### 4.3. Zusammenfassung der dritten Publikation (3)

**Titel: „Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung“**

In der dritten und letzten Publikation der Dissertation [6] wurde eine andere Betrachtung der Kombination PV+Grün auf die Dachkonstruktion (PV+Gründach) erforscht. Im Gegensatz zur Kombination Fassadenbegrünung und PV (MFS) ist die Kombination PV+Gründach schon heute in den Städten als Maßnahme zur Energieeffizienz und zur Klimaanpassung gut bekannt [56, 57, 31, 32]. Zu den bereits bekannten Vorteilen zählen unter anderem: die Erhöhung der Photovoltaikerträge aufgrund der Kühlung durch die Pflanzen, die weiterhin mögliche Nutzung der Dachbegrünungsvorteile, wie ihre guten thermischen Eigenschaften und die Vermeidung der Konkurrenz für die geeigneten Dachflächen. Trotz der Kenntnisse der thermischen Eigenschaften der Dachbegrünung (Gründach) konzentrieren sich derzeit alle in der Literatur gefundenen Untersuchungen auf den Bereich der PV-Erträge, -Leistung und -Betriebstemperaturen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „GrünPlusSchule@Ballungszentrum“ in Wien [58] wurden im Projektteil „PV+Grün“ unterschiedliche Varianten der Kombination PV+Gründach und PV+Grünfassade untersucht. Diese Publikation präsentiert die Untersuchung der Einflüsse der PV+Gründach auf die Temperaturen der Schnittstelle zwischen Dachabdichtung und dem Substrat (Messstellen F4 und F5) sowie an mehreren Stellen mit einem normalen, extensiven Gründach (GD).

Die Grundlage der Analyse erfolgte nach dem gleichen Verfahren wie in den anderen Publikationen (Abschnitte 3.3 und 4). Zusätzlich und als Weiterentwicklung der vorherigen Untersuchungen wurde für die Modellierung der Daten ein interaktives Klimamodell erstellt, sodass sich diese an die gemessenen klimatischen und zeitabhängigen Tagesintervallbedingungen, sowie an die Analyseparameter aller Jahreszeiten anpasst. Die dynamische Analyse erlaubt ein noch besseres Verständnis der Einflüsse und Wechselwirkungen. Die ausgewerteten Daten beziehen sich auf den Zeitraum April 2017 bis Februar 2018.

Die PV+Gründach- Kombination funktioniert als ganzjähriger Wärmepuffer, der sowohl Sommer- als auch Winterschutz bietet, sich ebenso an die Wetterbedingungen anpasst und abhängig von den Außenlufttemperaturen als Schutz gegen Hitze oder gegen Kälte wirkt (Abb. 17).

Im Vergleich zu einem normalen extensiven Gründach (Messstelle Gründachmitte) mit einer Substratschicht von 7 cm bis 10 cm verringert die PV+Gründach-Kombination (Messstelle F5) die Überhitzung der Dachkonstruktion im Sommer um 7°C bis 9°C an den Stunden des maximalen Wärmegebietes der Solarstrahlung. Die Wärme wird am Abend verglichen mit dem Gründach langsamer wieder abgegeben.

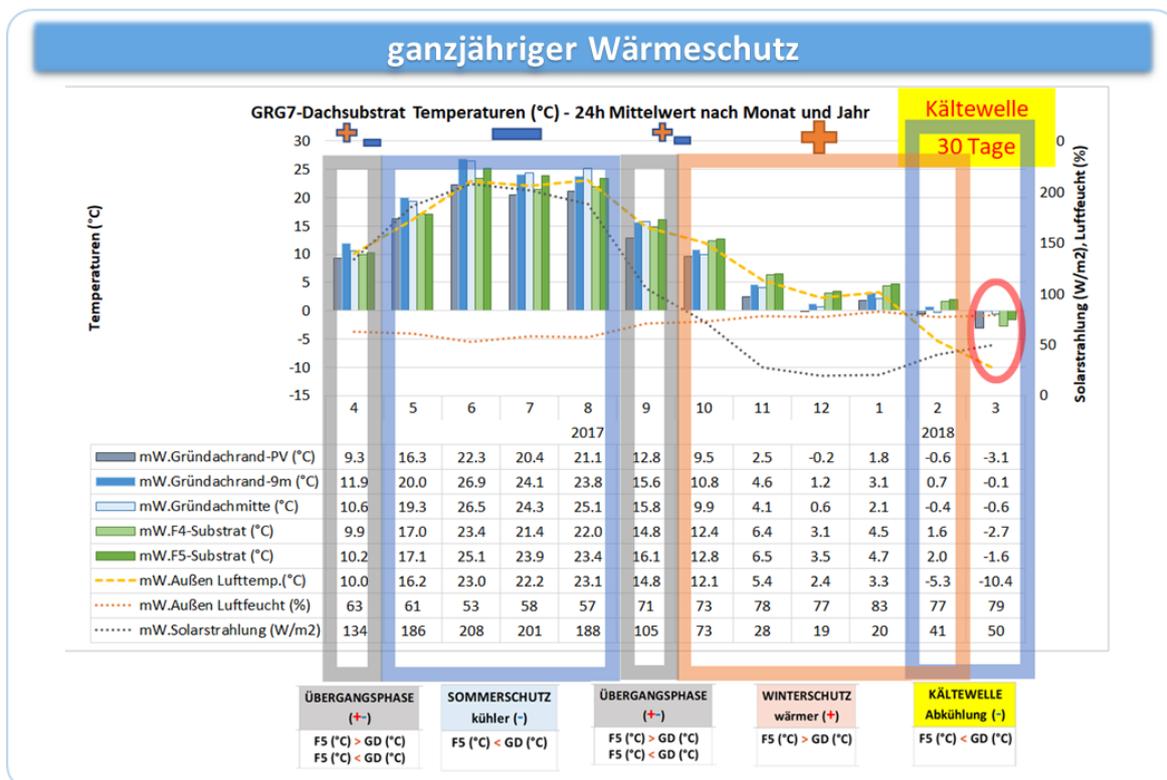


Abb. 17: Monatliche Ansicht der Mittelwerte der Temperaturen. Klare Identifizierung des Systemverhaltens des PV+Gründaches: kühler im Sommer, wärmer im Winter. Auch die Übergangsphasen sind deutlich identifizierbar. Quelle: eigene Darstellung.

In den Übergangsjahreszeiten, wenn die Außenlufttemperaturen zwischen „warm“ während des Tages und „kalt“ in der Nacht alternieren, passt sich die Schutzfunktion an. So waren die Temperaturen der Messstelle F5 im Vergleich zur Messstelle Gründachmitte zwischen 6°C und 9°C kühler bei

Außenlufttemperaturen über 16°C und zwischen 2°C und 3,5°C wärmer bei Außenlufttemperaturen unter 10°C.

Im Winter bei Außenlufttemperaturen unter 5°C war die Temperatur von F5 um ca. 3°C wärmer als die Messstelle Gründachmitte. Außerdem wurde die weitere nächtliche Abkühlung der Dachkonstruktion gebremst. Darüber hinaus, wenn die Außenlufttemperaturen sich im Minusbereich befinden, hält PV+Gründach die Temperaturen an der Messstelle F5 über dem Gefrierpunkt und verhindert somit das Absinken der Dachtemperaturen unter den Gefrierpunkt. Dieser Effekt ist bei Minusaußenlufttemperaturen bis -10°C feststellbar. Ein besonderer Fall stellen Außenlufttemperaturen dar, die sich permanent und für mehr als 5 Tage tiefer als -10°C halten. Hier ist die Pufferwirkung der PV+Gründach-Kombination nach fünf Tagen aufgebraucht und wird sich weiter abkühlen bis sich die Außenlufttemperaturen wieder über -10°C erhöhen.

Auch die Ergebnisse der PV+Gründach-Kombination sind vielversprechend und können ebenso wie die MFS einen wichtigen Beitrag zur Sanierung des Gebäudebestands leisten und auch bei Neubauten eingesetzt werden. Von besonderem Vorteil ist, dass die Systemlösungsvarianten, die in PV+Gründach getestet wurden, mit gut erprobten und wirtschaftlichen Varianten der einzelnen Technologien gestaltet worden sind: extensive Dachbegrünung und Flachdach PV-Anlage. Somit ist die PV+Gründach nicht nur eine ökologische und nachhaltige Lösung, sondern stellt auch eine wirtschaftliche und einfache Lösung in der Umsetzung dar, die für die Sanierung einer Vielzahl von Gebäuden eingesetzt werden kann.

## 5. Wissenschaftlicher Beitrag der Dissertation

Der Klimawandel setzt Baukonstruktionen extremen Temperaturen und Wetterereignissen wie Hitzebelastung, Schlagregen, Hagel und Überschwemmungen aus. Diese können Schäden an Gebäuden und an der Infrastruktur verursachen [11, 15, 43], wie z.B. Veränderungen an Materialien aufgrund von Temperatureinwirkungen (Längenänderung, Verformung, Schubkräfte, Rissbildungen) sowie Kondenswasserbildung an der Bauteiloberfläche (Tauwasserbildung) aufgrund steigender Temperaturdifferenz zwischen der Bauteiloberfläche und der Außenlufttemperatur unter Beachtung der relativen Luftfeuchte [59].

EFFEKT	URSACHE	FOLGE	LEISTUNGS_ POTENZIAL- MFS (*)
<b>Konvektion</b>	Wärmetransport – erhöhte Wärmeleitfähigkeit (Feuchte, Strahlung, Temperatur)	höhere Wärmeverluste	+++
<b>Materialänderungen</b>	Temperatureinwirkungen	Längenänderung, Verformung, Schubkräfte, Rissbildungen [59]	+++
<b>Minderung der Wasserdampfdiffusion</b>	Klima	verändertes Raumklima [59]	++
<b>Kondenswasserbildung (Tauwasserniederschlag)</b>	Bauteiloberflächentemperatur, Raumtemperatur und relative Raumluftfeuchte	Gebäudeschäden [59]	+++
<b>Feuchtschaden</b>	Schlagregen	- Pilzbefall, Wassereintritt, Tauwasseranfall, Fäulnis, Salzausblühungen, Frostschäden, Korrosion Erhöhung der Transmissionswärme: - Erhöhung Wärmeleitfähigkeit	+++
<b>Minderung des Wärmetransports</b>	Temperaturgradient	Wärmeverluste	+++
<b>Winterschutz</b>	- Minderung der Abkühlung der Fassaden- und Dachkonstruktion und somit auch der Wärmeverluste - Verhinderung der nächtlichen Abkühlung sowie der möglichen Bauschäden in Folge der Befeuchtung der Gebäudematerialien	MFS und PV+Gründach - Wärmeschutz - Reduktion des Einsatzes von Dämmmaterialien und des Wärmebedarfs	++
<b>Nächtliche Abkühlung (Cooling-Down) der Wand/Decke [5, 4]</b>	Sinkende Außenoberflächentemperaturen. Wand-/Dach Oberflächentemperatur unter der Außenlufttemperatur (Taupunkttemperatur)	- Mangelnde Beurteilung von Frost-Tau-Belastungen - Befeuchtung durch Tauwasser. Gefahr von Algen- und Pilz Wachstum auf Außenfassaden [5, 4]	+++
<b>Sommerschutz</b>	Verhinderung: - der sommerlichen Überhitzung - der Temperaturschwankungen der Materialien	MFS und PV+Gründach - Sommerschutz - Vermeidung von Kühlungsanlagen	+++
<b>Verlängerung des Lebens der Materialien u. Fassadelementen</b>	Verhinderung Bauschäden in Folge von Wetterereignissen	MFS und PV+Gründach - Schutz vor den klimatischen Bedingungen (Solarstrahlung, Schlagregen, etc.)	+++
<b>U-Wert: Verschlechterung Schwierigkeiten beim Feststellen des tatsächlichen Wärmedurchgangskoeffizienten und somit des Wärmebedarfs [61, 62]</b>	Klimazeitliche Einflüsse und Einwirkungen auf die In-Situ-Messungen: Solarstrahlung, Regen, Wind	erhöhte Wärmeverluste im Winter sowie Überhitzungen im Sommer. Erhöhter Energiebedarf des Gebäudes. Falsche Dimensionierung der Bauelemente sowie Heiz- u. Kühlsysteme	+++
(*) POTENZIAL = Bewertung basiert auf den bisherigen Ergebnissen und Potentialen der Kapazität der MFS, physikalische und hygrothermische Schäden zu mindern			
Minderung (+), gut (++), sehr gut (+++)			

Abb. 18: Beschreibung der potenziellen bauphysikalischen Leistungen der MFS, basierend auf den möglichen Bauschäden als Folge des Klimawandels, sowie klimatischer Ereignisse, wie z.B. Regen, Solarstrahlungen. Quelle: eigene Darstellung.

Laut Riets [60] ist die deutliche Mehrzahl von Schäden an Gebäuden direkt oder indirekt auf das Einwirken von Wasser zurückzuführen. Anteilig verursacht es bei Fassaden 83% und bei Dächern 48% der Schäden. Feuchte im Bauwerk wurde als eine der wichtigsten Ursachen von Gebäudeschäden herausgestellt. Damit dient ihre Vermeidung der Sicherung und Verlängerung der Lebensdauer der Gebäude. Die Wechselwirkungen der MFS erlauben die Dämpfung der Schwankungen der klimatischen Gegebenheiten, sowie den Schutz der Gebäudematerialien vor diesen klimatischen Ereignissen. Dank der MFS befinden sich die Gebäudematerialien in einer stabilen und geschützten Umgebung, die die Vermeidung von solchen Bauschäden unterstützt.

Die direkten physikalischen und hygrothermischen Einwirkungen, zusammen mit ihren Folgen auf die Gebäudematerialien sind in Abb. 18 zusammengefasst sowie das Leistungspotenzial beider PV+Grün Kombinationen, Fassade (MFS) und Dach (PV+Gründach), zur Minderung und Vermeidung dieser Folgen.

Die Vorteile und Beiträge der MFS und der Kombination PV+Gründach in Bezug auf die Klimaanpassung sind vielfältig und beschränken sich nicht nur auf den hygrothermischen Gebäudebereich, sondern erstrecken sich sektorübergreifend über den Staat und den Siedlungs- sowie den Energieversorgungssektor.

Der Ö-Strategieplan zur Anpassung an den Klimawandel hat diese Sektoren und die dafür notwendigen Anpassungsmaßnahmen in Bereiche unterteilt [15]. In Abb. 19 sind die gebäudenahen Bereiche der Ö-Klimastrategie, ihre Effekte und Auswirkungen, sowie die möglichen Beiträge der MFS zur Klimaanpassung zusammengefasst.

Es wird nach bereichsübergreifenden multifunktionalen Lösungsansätzen gesucht, die den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes betrachten (Herstellung, Errichtung, Nutzung und Entsorgung) sowie nach ressourcenschonenden und nachhaltigen Lösungen. Die multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik (MFS) sowie die Kombination PV+Gründach erfüllen diese Anforderungen. Sie sind nachhaltige und ressourcenschonende Systemlösungen, die einen guten Beitrag zur Minderung des Klimawandels leisten können und den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes betrachten wie z.B.:

- Bei der *Herstellung*; durch die Vermeidung und den Ersatz von umwelt- und klimabelastenden Materialien wie Dämmstoffen
- Bei der *Errichtung*; durch die Verwendung ökologischer und/oder leicht wiederverwertbarer Materialien
- Bei der *Benutzung*; durch die Verringerung des Energiebedarfs für das Heizen und Kühlen, die wiederum durch eine eigene Stromproduktion (PV) unterstützt wird. Zusätzlich tragen diese zur Minderung der Vulnerabilität der Energieversorgung und zur Reduktion der Spitzenlasten bei. Und letztendlich: durch ökologische Ausgleichflächen gegen die Versiegelung der Städte und durch die Verbesserung des Mikroklimas
- Bei der *Entsorgung*; durch die Benutzung von Systemkomponenten, die entweder zu 100 Prozent abbaubar sind (Pflanzen) oder langlebig und recycelbar sind (PV-Struktur und -Module)

Die multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik (MFS) ist eine neuartige innovative Lösung für die Fassade. Es wurde nachgewiesen, dass die Synergien zwischen Begrünung (Fassade und Dach) und Photovoltaikanlagen, viel größere Potentiale durch die gleichzeitige Nutzung der Systeme und niedrigere PV-Betriebstemperaturen ermöglichen. Die Ergebnisse bestätigen, dass die MSF eine multifunktionale, ökologische und ressourcenschonende Systemlösung ist, mit der man gleichzeitig Primärenergie sparen kann und die Lebensqualität der Menschen verbessert. Eine Lösung mit viel Potential für die „intelligenten Gebäude“ der Zukunft und die Herausforderungen der Klimaanpassung.

Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte multifunktionale Systemlösung (MFS) wurde zum Patent angemeldet und das Projekt befindet sich derzeit auf dem Weg zur Produkt-Entwicklung. Weitere Arbeiten werden durchgeführt, um die MFS zu einem optimalen, flexiblen und effizienteren Produkt zu entwickeln und das Potential der MFS in einem Demonstrationsprojekt zu zeigen.

## MFS & PV+Grün – Beiträge zur Minderung der Folgen des Klimawandels

Folgen aus der Liste betroffener Bereiche des Umweltbundesamts und aus dem Aktionsplan der österreichischen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel

MÖGLICHE EFFEKTE	MÖGLICHE AUSWIRKUNGEN	MFS-BEITRAG
<b>ENERGIEVERSORGUNG</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringere Kraftwerkseffizienz und Stromproduktion</li> <li>- erhöhter Kühlenergiebedarf</li> <li>- geringerer Heizbedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zunahme des Kühlenergiebedarfs kann zu höherem Stromverbrauch und höheren Bedarfsspitzen führen</li> <li>- höherer Verbrauch bei gleichzeitig geringerer Produktion kann zu Engpässen bzw. Stromimporten führen</li> <li>- Ertragseinbußen erneuerbarer Energieträger durch Hitzestress</li> <li>- Unterbrechungen und Störungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion der Kühllasten dank des Sommerschutzes (1) der MFS</li> <li>• doppelte Vorteile für die Spitzenlaststunden: Unterstützung der Energieversorgung (2,3) bei gleichzeitiger Minderung des Energieverbrauchs (1) d.h. Stromproduktion + Sommerschutz</li> <li>• Dezentralisierung der Energieerzeugung, Minderung der Vulnerabilität des Energiesystems und des Energiebedarfs d.h. eigene Stromproduktion (2,3)</li> <li>• Potential zur Vermeidung von PV-Ertragseinbußen (2) durch Minderung des Hitzestresses d.h. niedrigere Betriebstemperaturen (3)</li> <li>• Wärmeschutz und Reduktion des Wärmebedarfs. Minderung der Abkühlung der Fassaden- bzw. Dachkonstruktion sowie Verhinderung der nächtlichen Abkühlung (1)</li> </ul>
<b>SIEDLUNGSRAUM/ STADT</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verlängerte Vegetationszeit</li> <li>- Verstärkung des Wärmeinseleffekts</li> <li>- Begünstigung der Luftschadstoffbildungen bei sommerlichem Hochdruckwetter→ gesundheitliche Belastungen</li> <li>- Zunahme von Raumnutzungskonflikten</li> <li>- lokale Gewitterstürme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- erhöhter Wasser- und Pflegebedarf</li> <li>- gesundheitliche Belastungen</li> <li>- steigender Bedarf an Trink- und Brauchwasser sowie an Beschattung</li> <li>- Überlastung der Regenentwässerungs-, Abwasserentsorgungssysteme</li> <li>- Schäden an Gebäuden/ Bausubstanz/Infrastruktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• die untersuchten PV+Grün und Gründach Varianten (4) wurden bezüglich eines niedrigen Wasserkonsums und pflegeleichter Arbeiten optimiert</li> <li>• Begrünungsflächen verbessern das Mikroklima, reinigen die Luft, filtern Staub, Schmutz und Schadstoffe und wirken sich positiv auf den Schallschutz aus</li> <li>• Fassaden- und Dachbegrünungen sind natürliche Wasserspeichern und ökologische Ausgleichflächen, die als Maßnahmen gegen die Versiegelung der Bodenfläche in den Städten eingesetzt werden</li> <li>• Gebäudebegrünung schützt die Dach- und Fassadenkonstruktion vor extremen Wetterereignissen wie Hagel, Schlagregen, extremen Temperaturen, Wind u.a.</li> </ul>
<b>BAUEN u. WOHNEN</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhöhung der temperaturbedingten physikalischen Beanspruchung von Gebäuden (thermische Belastung)</li> <li>- ungünstiges Innenraum- und Wohnklima</li> <li>- erhöhter Kühlbedarf im Sommer</li> <li>- Hochwasser/ Überschwemmungsgefahr</li> <li>- lokale Gewitterstürme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schäden an Gebäuden/ Bausubstanz/Infrastruktur</li> <li>- gesundheitliche Belastungen</li> <li>- negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit und das Wohlbefinden</li> <li>- Überlastung der Regenentwässerungs-, Abwasserentsorgungssysteme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrünungsflächen verbessern das Mikroklima, reinigen die Luft, filtern Staub, Schmutz und Schadstoffen und wirken sich positiv auf den Schallschutz aus</li> <li>• die Kombination PV+Grün schützt das Gebäude, das Dach und die Fassade vor Wetterereignissen wie abrupter Temperaturschwankungen, dadurch wird die Lebensdauer der einzelnen Gebäudeelemente verlängert</li> <li>• Fassaden- und Dachbegrünungen sind natürliche Wasserspeichern und ökologische Ausgleichflächen, die als Maßnahmen gegen die Versiegelung der Bodenfläche in den Städten eingesetzt werden</li> </ul>
<p><b>Anmerkungen:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ganzjährig flexibler Wärmeschutz, der sich an die Wetterbedingungen anpasst: Sommer- und Winterschutz [2,3]</li> <li>2. Teilweise bestätigt. Weitere Forschungsarbeiten werden diesen Effekt weiter untersuchen, um ein besseres Verständnis der Einflüsse sowie der Steuerung dieser Wirkung zu erlangen [1].</li> <li>3. Ganzjährige niedrigere PV-Betriebstemperaturen (2°C - 4°C) konnten bestätigt werden [2].</li> <li>4. Erste Ergebnisse zeigen das MFS-Wirkungspotential. Genauere Angaben über das Ausmaß der Wirkung werden in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter untersucht.</li> <li>5. Die schon bekannten Eigenschaften der einzelnen MFS-Komponenten werden verstärkt und ergänzt [2,3]</li> </ol>		
<p><b>Referenzen</b></p> <p>[1] M. S. Penaranda Moren and A. Korjenic, „Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules Multifunctional system: Building greening and photovoltaic“, Energy and Buildings, Bd. 146, pp. 364-382, 2017.</p> <p>[2] M. S. Penaranda Moren and A. Korjenic, „Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System“, Energy and Buildings, Bd. 147, pp. 123-141, 2017.</p> <p>[3] M. S. Penaranda Moren and A. Korjenic, „Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung“, Bauphysik, Bd. 40, Nr. 3, p. 12, 2018.</p>		

Abb. 19: Beiträge der MFS und die Kombination PV+Gründach zur Minderung der Folgen des Klimawandels

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] European Commission, „Energy, Topics, Energy Efficiency, BUILDINGS. Commission and its priorities. Policies, information and services.“ [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>. [Zugriff am 20 10 2017].
- [2] M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules Multifunctional system: Building greening and photovoltaic,“ *Energy and Buildings*, Bd. 146, pp. 364-382, 2017.
- [3] M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System,“ *Energy and Buildings*, Bd. 147, pp. 123-141, 2017.
- [4] M. Kehrer und T. Schmidt, „Temperaturverhältnisse an Außenoberflächen unter Strahlungseinflüssen,“ [Online]. Available: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-66690.html>. [Zugriff am 15 01 2018].
- [5] K. Sedlbauer, M. Krus, K. Lenz und M. Paul, „Fraunhofer IBP-Mitteilung 438. Einfluss der Außenwandkonstruktion auf nächtliche Betauung und mikrobiellen Bewuchs,“ 2004. [Online]. Available: <http://www.irbnet.de/daten/rswb/04079022328.pdf>.
- [6] M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung,“ *Bauphysik*, Bd. 40, Nr. 3, p. 12, 2018.
- [7] Vereinte Nationen, „UN Bericht: Ziele für nachhaltige Entwicklung 2030,“ Vereinte Nationen, New York, 2016.
- [8] Europäische Kommission - Pressemitteilung, „Kommission begrüßt endgültige Einigung auf neue Vorschriften zur Energieeffizienz von Gebäuden,“ 17 04 2018. [Online]. Available: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-18-3374\\_de.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-3374_de.htm). [Zugriff am 20 04 2018].
- [9] Amtsblatt der Europäischen Union, „2017/C 288/11 Stellungnahme zur „Mitteilung der Kommission: Schnellere Innovation im Bereich der sauberen Energie“,“ 31 8 2017. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52017AE0103&qid=1524655635957>. [Zugriff am 20 03 2018].
- [10] BMUB, „Klima - Stadt - Wandel. Strategien und Projekte für die Klimaanpassung in der Region Stuttgart,“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit [BMUB], 2016.
- [11] D. U. f. M. u. Umwelt, „Handlungsfeldübergreifende Schwerpunkte der Folgen des Klimawandel,“ 29 5 2015. [Online]. Available: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/handlungsfelduebergreifende\\_schwerpunkte\\_der\\_folgen\\_des\\_klimawandels\\_1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/handlungsfelduebergreifende_schwerpunkte_der_folgen_des_klimawandels_1.pdf). [Zugriff am 25 05 2017].
- [12] W. Ansel, „Leitfaden Dachbegrünung für Kommunen: -Nutzen, Fördermöglichkeiten, Praxisbeispiele,“ Deutscher Dachgärtner Verband e. V., Nürtingen, 2011.

- [13] Umweltbundesamt, „Wie hat sich das Klima bereits geändert?“, 16.04.2018. [Online]. Available: [http://www.klimawandelanpassung.at/ms/klimawandelanpassung/de/kwa\\_oesterreich/kwa\\_aenderung/](http://www.klimawandelanpassung.at/ms/klimawandelanpassung/de/kwa_oesterreich/kwa_aenderung/). [Zugriff am 30.04.2018].
- [14] Umweltbundesamt, „Was sind die Folgen der Klimaänderung?“, 2018. [Online]. Available: [http://www.klimawandelanpassung.at/ms/klimawandelanpassung/de/kwa\\_oesterreich/kwa\\_a\\_folgen/](http://www.klimawandelanpassung.at/ms/klimawandelanpassung/de/kwa_oesterreich/kwa_a_folgen/). [Zugriff am 28.03.2018].
- [15] BMLFUW, „Die Österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Teil 2 – Aktionsplan Handlungsempfehlungen für die Umsetzung. Aktualisierte Fassung Jänner 2017“, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 2017.
- [16] BMNT, „Zusammenfassung für Entscheidungstragende. ÖKS15: Klimaszenarien für Österreich“, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien, 2016.
- [17] Magistrat der Stadt Wien- Wiener Umweltschutzabteilung – Magistratsabteilung 22, „Urban Heat Islands. Strategieplan Wien“, Wien, 2015.
- [18] S. Krawietz und J. Poortmans, „Building Integrated Photovoltaics (BIPV) as a core element for Smart Cities. Integrated Research, Innovation and Competitiveness Strategies within the Energy Union“, 2016.
- [19] European Commission, „Public consultation on the Energy Performance of Buildings Directive“.
- [20] AEE-INTEC, „IEA EBC Annex 56 – Cost Effective Energy and Carbon Emission Optimization in Building Renovation“, 2011-2015. [Online]. Available: <https://www.aee-intec.at/index.php?seitenName=projekteDetail&projektId=145>. [Zugriff am 8.2017].
- [21] G. Eder, L. Maul, P. Illich und W. Folkerts, „BIPV research teams & BIPV R&D facilities. An international mapping. IEA PVPS Task 15, Subtask E“, 2017.
- [22] Kranzl, L.; Haas, R.; Kalt, G.; Müller, A.; Nakicenovic, N.; Redl, C.; Formayer, H.; Haas, P.; Lexer, M.J.; Seidl, R.; Schorghuber, S.; Nachtnebel, „Endbericht: KlimAdapt - Energie der Zukunft. Ableitung von prioritäreren Maßnahmen zur Adaptation des Energiesystems an den Klimawandel“, Klima- und Energiefonds, FFG-Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH, Wien, 2010.
- [23] N. Pfoster und T. U. Darmstadt, „Gebäude Begrünung Energie: Potenziale und Wechselwirkungen. Leitfaden als Planungshilfe“, Bonn, 2014.
- [24] European Technology & Innovation Platform Photovoltaics, „European Technology & Innovation Platform Photovoltaics“, [Online]. Available: [www.etip-pv.eu](http://www.etip-pv.eu). [Zugriff am 20.10.2017].
- [25] S. Robert und N. Guariento, Gebäudeintegrierte Photovoltaik. Ein Handbuch, Basel: Birkhäuser Basel, 2009.

- [26] W. Ansel, „Leitfaden Dachbegrünung für Kommunen: -Nutzen, Fördermöglichkeiten, Praxisbeispiele,“ Deutscher Dachgärtner Verband e. V., Nürtingen, 2011.
- [27] Zebe, Hanns-Christoph, „BundesBauBlatt: Gruendach und Solar Energetisch sinnvolle Ergaenzung,“ 03 2010. [Online]. Available: [http://www.bundesbaublatt.de/artikel/bbb\\_2010-03\\_Gruendach\\_und\\_Solar\\_Energetisch\\_sinnvolle\\_Ergaenzung\\_851390.html](http://www.bundesbaublatt.de/artikel/bbb_2010-03_Gruendach_und_Solar_Energetisch_sinnvolle_Ergaenzung_851390.html). [Zugriff am 15 01 2018].
- [28] ASLA 2013 Annual Meeting & EXPO, „Solar Panels and Green Roofs Fully Integrated,“ Boston, 2013.
- [29] S. Clermont, „Eco-Work: Is the combination of a green roof with a photovoltaic system possible?,“ 21 07 2016. [Online]. Available: <https://www.ecowork.cc/en/articles/is-the-combination-of-a-green-roof-with-a-photovoltaic-system-possible>. [Zugriff am 18 02 2018].
- [30] K. Wölfl, „ZinCo: Dachbegrünung erhöht Erträge der Photovoltaik,“ [Online]. Available: <https://www.zinco.de/dachbegrünung-erhöht-erträge-der-photovoltaik>. [Zugriff am 02 2018].
- [31] Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, „ISE-Fraunhofer Preseinformation: Agrophotovoltaik - nachhaltige Landnutzung für Energie und Nahrung. Pilotprojekt am Bodensee,“ 25 03 2015. [Online]. Available: [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2015/0815\\_ISE\\_PI\\_AgroPV\\_d.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2015/0815_ISE_PI_AgroPV_d.pdf). [Zugriff am 12 12 2017].
- [32] Optigrün International AG, „Systemlösungen-Dachbegrünung "Solargründach", Lösung 1: Sun-Root 15,“ [Online]. Available: <https://www.optigruen.de/systemloesungen/solargruendach/sun-root-15/>. [Zugriff am 12 12 2017].
- [33] ZinCo GmbH, „Gründach und Solarnutzung – eine Kombination mit Mehrwert,“ [Online]. Available: <https://www.zinco.de/solar>. [Zugriff am 10 2017].
- [34] Optigrün International AG, [Online]. Available: <https://www.optigruen.de/systemloesungen/solargruendach/sun-root-15/>. [Zugriff am 12 12 2017].
- [35] Arbeit des AK Fassadenbegrünungen und Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, *Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen mit Kletterpflanzen*, Bohn: FLL, 2000.
- [36] R. Gunkel, Fassadenbegrünung, Kletterpflanzen und Klettergerüste, Stuttgart: Ulmer, 2004.
- [37] G. Hüfing, „Ein Pflanzenmantel für ein ausgeglichenes Klima : ein Leitfaden für die Fassadenbegrünung,“ Die Umweltberatung, Wien, 2009.
- [38] J. Preiss, „Leitfaden Fassadenbegrünung,“ Wien : Magistrat d. Stadt Wien, Programm f. umweltgerechte Leistungen, 2013.

- [39] V. Bürger, T. Hesse, A. Palzer, B. Köhler, S. Herkel und P. Engelmann, „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2017.
- [40] D. M. Blei und P. Smyth, „Science and Data Science,“ *PNAS Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 16 06 2017.
- [41] I. Hamilton, T. Oreszczyn, A. Summerfield, P. Steadman, S. Elam und A. Smith, „International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction. Co-benefits of Energy and Buildings Data: The Case For supporting Data Access to Achieve a Sustainable Built Environment,“ Bd. 118, pp. 958-968, 2015.
- [42] Deutsches Umweltbundesamt für Mensch und Umwelt, „Was sind die Ursachen von Klimaänderungen?,“ 03 08 2013. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/was-sind-die-ursachen-von-klimaaenderungen>. [Zugriff am 05 2016].
- [43] B. Weller, M. Fahrion, S. Horn, T. Naumann und J. Nikolowski, *Baukonstruktion im Klimawandel*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [44] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), „Klima - Informationsportal Klimawandel - Klimavergangenheit - Neoklima - Lufttemperatur,“ [Online]. Available: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/lufttemperatur>. [Zugriff am 17 03 2018].
- [45] S. Huemer, V. Dolovai und S. Rainalter, *Veranstaltung: EU-Vertragsmanagement und H2020-Verträge*, Technische Universität Wien: Fachbereich Europäischer und Internationaler Forschungssupport (EIFS), 2018.
- [46] B. K. Daniel, „Reimaging Research Methodology as Data Science,“ *MDPI Big Data and Cognitive Computing*, Bd. 2, p. 4, 01 02 2018.
- [47] Datenbanken Verstehen für Anfänger und Profis, „Datenbanken, Data Warehouse & Business Intelligence einfach verstehen,“ [Online]. Available: <http://www.datenbanken-verstehen.de/>. [Zugriff am 16 6 2017].
- [48] Datenbanken Verstehen für Anfänger und Profis, „Data Mining – Was ist Data Mining?,“ [Online]. Available: <http://www.datenbanken-verstehen.de/business-intelligence/data-mining-grundlagen/data-mining/>. [Zugriff am 16 6 2017].
- [49] A. Speulmanns, „Universität Siegen-Wirtschafts Informatik-Vorträge-Data Warehouse und Business Intelligence,“ 19 01 2007. [Online]. Available: [https://www.wiwi.uni-siegen.de/wirtschafts\\_informatik/vortraege/document/as\\_20070118\\_vortrag\\_bi\\_uni\\_siegen.n.pdf](https://www.wiwi.uni-siegen.de/wirtschafts_informatik/vortraege/document/as_20070118_vortrag_bi_uni_siegen.n.pdf). [Zugriff am 20 12 2017].
- [50] A. Gandomi und M. Haider, „Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics,“ *International Journal of Information Management*, Bd. 35(2), pp. 137-144, 04 2015.
- [51] Datenbanken Verstehen für Anfänger und Profis, „Was ist Business Intelligence?,“ [Online]. Available: <http://www.datenbanken-verstehen.de/business-intelligence/business-intelligence-grundlagen/business-intelligence/>. [Zugriff am 18 04 2018].

- [52] G. Presser, „Initiative Deutschland Digital - Business Intelligence und Data Science: Erfolgreiche Organisationen Benötigen Beides,“ 21.07.2017. [Online]. Available: <http://initiative-deutschland-digital.de/2017/07/21/business-intelligence-und-data-science-erfolgreiche-organisationen-benoetigen-beides/>. [Zugriff am 20.04.2018].
- [53] Fraunhofer-Allianz Big Data, „Data Scientist: Werden Sie zertifizierter Data Scientist. Das Fraunhofer-Weiterbildungsprogramm mit Zertifizierung,“ [Online]. Available: <https://www.bigdata.fraunhofer.de/de/datascientist/zertifizierungen.html>. [Zugriff am 28.04.2018].
- [54] Wikibooks, „Data Science: An Introduction,“ [Online]. Available: [https://en.wikibooks.org/wiki/Data\\_Science:\\_An\\_Introduction](https://en.wikibooks.org/wiki/Data_Science:_An_Introduction). [Zugriff am 15.02.2018].
- [55] Microsoft Corporation, „Bessere Entscheidungen beginnen mit bessere Business Insights. Wertvolle Business Insights für alle,“ [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/de-de/sql-server/business-intelligence>. [Zugriff am 20.04.2018].
- [56] S. Clermont, „Eco-Work: Is the combination of a green roof with a photovoltaic system possible?,“ 21.07.2016. [Online]. Available: <https://www.ecowork.cc/en/articles/is-the-combination-of-a-green-roof-with-a-photovoltaic-system-possible>. [Zugriff am 18.02.2018].
- [57] K. Wölfl, „ZinCo GmbH,“ [Online]. Available: <https://www.zinco.de/dachbegrue-nung-erhoeht-ertraege-der-photovoltaik>. [Zugriff am 02.2018].
- [58] Stadt der Zukunft, „GrünPlusSchule@Ballungszentrum - Hocheffiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik Kombination; optimale Lösung für die Energieeffizienz in gesamtökologischer Betrachtung,“ Stadt der Zukunft, [Online]. Available: <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/gruenplusschule-ballungszentrum-hocheffiziente-fassaden-und-dachbegruenung-mit-photovoltaik-kombination-optimale-loesung-fuer-die-energieeffizienz-in-gesamtoekologischer-betrachtung.php>. [Zugriff am 12.12.2017].
- [59] M. Star, Bausanierung, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [60] Rietz, Andreas; Asam, Claus; Schütz, Heidemarie, „Feuchte im Bauwerk. Ein Leitfaden zur Schadensvermeidung,“ IEMB-Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin, Berlin, 2007.
- [62] W. Swan, R. Fitton, C. Gorse, D. Farmer und M. Benjaber, „The Staged Retrofit of a Solid Wall Property under Controlled Conditions,“ *Energy & Buildings*, Bd. 156, pp. 250-257, 28.09.2017.
- [63] M. O. Support, „Datenbankgrundlagen,“ 18.04.2017. [Online]. Available: <https://support.office.com/de-de/article/Datenbankgrundlagen-a849ac16-07c7-4a31-9948-3c8c94a7c204>.
- [64] T. Baumann, D. Schär, F. Carigiet, A. Dreisiebner und F. Baumgartner, „Performance Analysis of PV Green Roof Systems,“ in *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Munich, 2016.

- [65] I. A. Atsonios, I. D. Mandilaras, D. A. Kontogeorgos und M. A. Founti, „A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls,“ *Energy & Buildings*, Bd. 154, pp. 198-206, 1 11 2017.
- [66] Deutsches Umweltbundesamt für Mensch und Umwelt, „Wird das Klima extremer? Sind die sich häufenden Überschwemmungen ein Indiz dafür?,“ 03 08 2013. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wird-das-klima-extremer-sind-die-sich-haeufenden>. [Zugriff am 11 11 2016].
- [67] Europäische Kommission, „Results of the Public Consultation on sustainable buildings. The Stakeholder Consultation - Executive Summary,“ European Commission, 2013.
- [69] European Commission-Environment, „Level(s)-Building sustainability performance,“ [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/environment/eussd/buildings.htm>. [Zugriff am 22 01 2018].
- [70] Europäische Kommission, „Level(s) Nachhaltigkeitsleistung von Gebäuden. Build Circular,“ 2017. [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/Level\(s\)\\_flyer-DE-web.pdf](http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/Level(s)_flyer-DE-web.pdf). [Zugriff am 23 02 2018].
- [71] Europäische Kommission, „Kommission lanciert erstes EU-weites Instrument zur Berichterstattung über die Nachhaltigkeitsleistung von Gebäuden,“ *Europäische Kommission Pressemitteilung*, 28 09 2017.
- [72] Optigrün international AG, „Dachbegrünung-Ratgeber. Mehrfachnutzen Dachbegrünung im Überblick,“ [Online]. Available: <http://www.dachbegruenung-ratgeber.de/dachbegruenung>. [Zugriff am 10 2017].
- [73] Fachbereich Umwelt und Stadtgrün, „Dachbegrünung und Photovoltaik,“ Landeshauptstadt Hannover, Hannover, 2015.
- [74] Europäische Kommission, „COM/2017/0687 final. Bold Bewertung der Fortschritte der Mitgliedstaaten hinsichtlich der nationalen Energieeffizienzziele für 2020 und bei der Durchführung der Richtlinie zur Energieeffizienz,“ Brüssel, 2017.
- [75] European Commission-Climate Strategies & Targets, „2030 Climate & Energy Framework,“ 10 2014. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en). [Zugriff am 20 9 2017].
- [76] D. Tudiwer und A. Korjenic, „The effect of living wall systems on the thermal resistance of the facade,“ *Energy and Buildings*, Bd. 135, pp. 10-19, 2017.
- [77] M. Mitterböck und A. Korjenic, „Analysis for improving the passive cooling of building’s surroundings through the creation of green spaces in the urban built-up area,“ *Energy and Buildings*, Bd. 148, p. 166–181, 2017.
- [78] Wikipedia-Autoren, „Metadaten,“ 28 12 2017. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Metadaten&oldid=172368605>. [Zugriff am 30 04 2018].

- [79] C. u. P. Giczy, Regisseur, *NEWTON: Stadt 4.0: Grün statt Grau*. [Film]. Österreich, Wien: Der ORF, 2018.
- [80] W. Kolb und T. Schwarz, *Dachbegrünung intensiv und extensiv*, Stuttgart (Hohenheim): Ulmer, 1999.
- [81] ISO NORM, *ISO 9869-1:2014-08: Titel: Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method*, ISO, 2014.

---

**TEIL II**  
**PUBLIKATIONEN**

## Wissenschaftlichen Publikationen

### 1. Publikation 1

Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules  
Multifunctional system: Building greening and photovoltaic

<b>STATUS</b>	Veröffentlicht
<b>Titel: (Deutsch)</b>	Grüner Pufferraum Einflüsse auf die Betriebstemperaturen Photovoltaikmodule. Multifunktionale Systemlösung: Gebäudebegrünung und Photovoltaik
<b>Original Titel: (Englisch)</b>	Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules. Multifunctional system: Building greening and photovoltaic
<b>Autorinnen:</b>	Penaranda Moren, María Soledad; Korjenic, Azra
<b>ISBN/ISSN:</b>	ISSN: 0378-7788; DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.04.051
<b>Sprache:</b>	Englisch
<b>Schlagwörter:</b>	Green Façade; Vertical Greening; Green Walls; Building Greening; Photovoltaics; PV Temperature Losses; PV Cooling; PV Performance; Greening and PV; Green Buffer
<b>Quelle:</b>	Energy & Buildings, 1 July 2017, Vol.146, pp.364-382 [Peer Reviewed Journal] ScienceDirect (Elsevier B.V.)

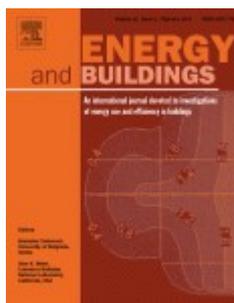


RightsLink®

Home

Create Account

Help



**Title:** Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules Multifunctional system: Building greening and photovoltaic

**Author:** María Soledad Penaranda Moren, Azra Korjenic

**Publication:** Energy and Buildings

**Publisher:** Elsevier

**Date:** 1 July 2017

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

**LOGIN**

If you're a **copyright.com user**, you can login to RightsLink using your copyright.com credentials.

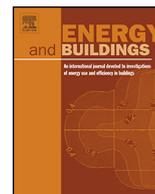
Already a **RightsLink user** or want to [learn more?](#)

Please note that, as the author of this Elsevier article, you retain the right to include it in a thesis or dissertation, provided it is not published commercially. Permission is not required, but please ensure that you reference the journal as the original source. For more information on this and on your other retained rights, please visit: <https://www.elsevier.com/about/our-business/policies/copyright#Author-rights>

BACK

CLOSE WINDOW

Copyright © 2018 [Copyright Clearance Center, Inc.](#) All Rights Reserved. [Privacy statement](#). [Terms and Conditions](#).  
Comments? We would like to hear from you. E-mail us at [customercare@copyright.com](mailto:customercare@copyright.com)



# Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules

## Multifunctional system: Building greening and photovoltaic



María Soledad Penaranda Moren\*, Azra Korjenic

Vienna University of Technology, Institute for Building Construction and Technology, Research Centre of Building Physics and Sound Protection, Karlsplatz, 13/206-2, 1040 Vienna, Austria

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 18 November 2016  
Received in revised form 18 March 2017  
Accepted 18 April 2017  
Available online 23 April 2017

#### Keywords:

Green façade  
Vertical greening  
Green walls  
Building greening  
Photovoltaics  
PV temperature losses  
PV cooling  
PV performance  
Greening and PV  
Green buffer

### ABSTRACT

This paper focuses on influences of a “green-buffer-space” (GB) on the photovoltaic-module (PV) temperatures. The described results correspond to the first year of research. They are part of an ongoing project-development: “Multifunctional System: Building Greening and Photovoltaic” (MFS). The MFS combines two well-known systems: photovoltaics and green façades. The aim is to evaluate the synergies and benefits of the system on its components – the PV, buffer space (BS) and green facade (GF) – on the building façade (BF). The presented outcome shows the effects of the GB layer on the PV layer. The analysis focusses on two PV systems of the same technology and power output, but with different buffer spaces: one with a GF and the other one without a GF. The first two assumptions were confirmed: the plants can grow behind PV mounted on a façade, and the GB acts as a temperature regulation tool. The GB reduces the PV operating temperatures in increasing ranges, about 1 °C up to 4 °C. Temperature differences increase by outdoor temperatures above 20 °C, i.e. the GB benefits are higher under higher outdoor temperatures. The third one, GB benefits on the PV performance were positive for specific time intervals: when the PV module was operating under extreme conditions, what requires further research.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

### 1.1. Multifunctional system – description and target

Photovoltaic Systems (PV) and Green Facades (GF) are both well-known systems, utilized as strategies for improving building energy savings, thermal performance, sound mitigation, and improving life quality (air quality, noise damping and aesthetics). These characteristics of the systems were discussed in many scientific studies, along with their implementation possibilities on the façade [1–13].

The maximum benefits of both systems are at summer time; what arises is a competition for surface use between them [10,11]. So far, these façade systems have been used in isolation, and have not been brought together to work in synergy. The underlying assumption is that plants receive only limited amounts of indirect sunlight (filtered through the PV-module). Thus, their potential for growth is limited or non-existent.

The target of this research work is the development of a multifunctional system as an optimal, long lasting, cost-effective and energy efficient solution, which can be replicated for future constructions and moreover, for the renovation of old buildings.

### 1.2. Main objectives of the project and assumptions

The main objective of this project is developing and examining a system that simultaneously uses PV and GF by the creation of a transitional or green buffer space (GB) between these two systems (Figs. 1 and 2). This GB has its own hygrometric characteristics, which influences and interacts with the other components or layers: the building façade (BF) and the PV modules (Fig. 1). This paper focuses on the assessment of the GB influences on the PV layer, i.e. module temperature regulation and influences on PV performance. It also provides a better understanding of how the green buffer interacts with this component of the system.

The first assumption of the project is that plants can flourish on a façade behind PV modules. Several scientific research works on green-roofs and PV systems are described at [4–6,10,11], but none on green façades and PV systems on façades (GF behind PV).

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [maria.penaranda@tuwien.ac.at](mailto:maria.penaranda@tuwien.ac.at) (M.S. Penaranda Moren), [azra.korjenic@tuwien.ac.at](mailto:azra.korjenic@tuwien.ac.at) (A. Korjenic).

### Nomenclature

GB	Green buffer
GF	Green façade
PV	Photovoltaics
BF	Building façade
<i>PRatio</i>	Performance ratio
<i>gRadiat</i>	Global radiation
<i>difRadiat</i>	Diffuse radiation
<i>MFS</i>	Multifunctional system: building greening and photovoltaics
<i>F#</i>	Field number – variants of the system for comparison purposes
F1	Field 1 – PV (semitransparent) + buffer space (no green façade)
F2	Reference (empty field)
F3	Field 3 – PV (semitransparent) + green buffer (with a green façade)
F4	Field 4 – PV (black-standard) + green buffer (with a green façade)
<i>F# vs F#</i>	Comparison between systems – fields (F#)
<i>F#/F#</i>	Ratios between systems (F#)
<i>a</i>	Average
<i>max</i>	Maximum
<i>min</i>	Minimum
<i>diff</i>	Difference
<i>temp</i>	Temperature
<i>radiat</i>	Radiation

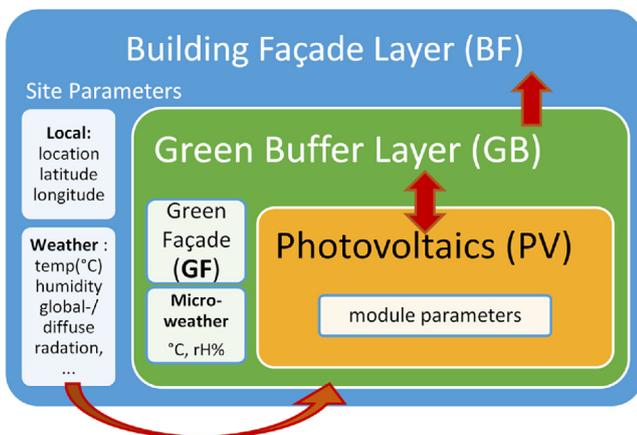


Fig. 1. Layers and interactions.

Thus, one of the most important parts was the validation of this assumption. A test period of a month confirmed it: the plants had a good development behind the PV modules. Second, efficiency losses due to higher PV-module operating temperatures are well known problem in PV efficiency [16,18,19]. The GB should act as a temperature regulation tool for both adjacent layers, the PV and BF. It should regulate the PV module operating temperatures as well as the temperature of the building façade, acting as an insulation.

Third, and as a consequence of the second assumption – GB as a temperature regulation tool- the PV performance should also be enhanced.

To validate these assumptions the assessment was carried out from a general approach (years, months and days) to a detailed hourly analysis.

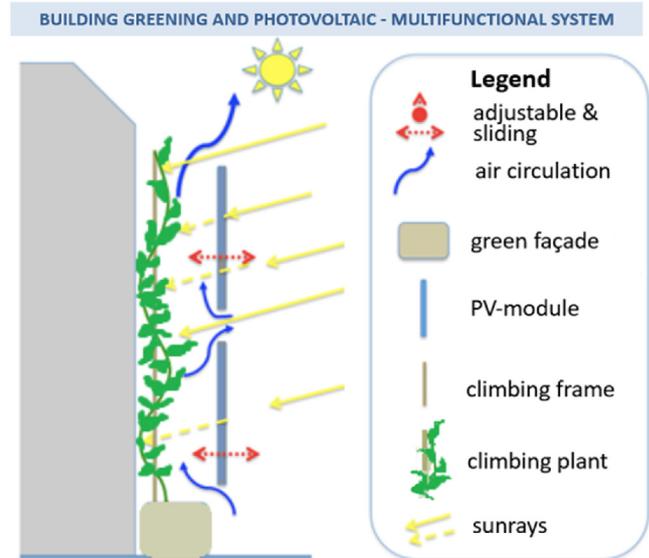


Fig. 2. Schematic of the Multifunctional System: for Green Facades.

#### 1.2.1. How does the green buffer space interact with the photovoltaic (PV) system?

In Fig. 2 can be observed that the GB is a layer between the PV and the BF. The PV layer supports the growth of the climbing plants, while offering protection from the extremely high temperatures in summer and from the cold winds and rains during the wintertime. At the same time the GB layer provides a cooling effect for PV and BF, due to the transpiration of plants. The PV layer semi encloses and protects it.

Each layer has a positive influence on the others, working in synergy to reach the desired goals.

The described project is a living project, the results are limited to a certain period of time, and could vary in the future, as the involved plants live, grow and evolve on a daily basis, thereby affecting the retrieved data.

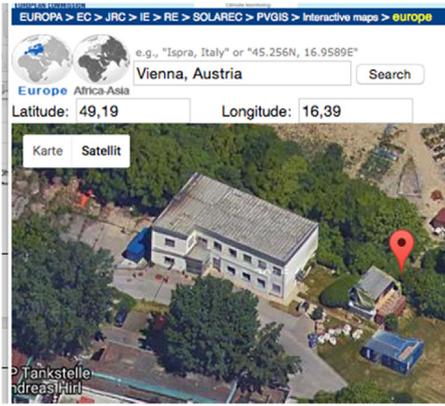
## 2. Materials and methods

The PV system on the east façade of the Eco-Testing-Station (“Öko-Prüfstand”) – Test Area of the Research Center of the Building Physics and Sound Protection (Fig. 3) – was operable in July 2015, thereby the practical part of project started. All testing surfaces were equipped with monitoring devices to control and save the data of the hygrometric parameters throughout a year for a posterior analysis. The Institute’s weather station established for monitoring purposes at the same site provided the weather data. The data was analyzed on an hourly basis.

The Eco-Testing-Station is a construction at the institute that serves as a test site for analyzing natural and ecological materials [1,3,9]. The exterior walls are made of a wood structure filled and insulated with straw balls and finished with various types of clay and lime plasters.

### 2.1. Specific project conditions – test site location

The preexisting site conditions and the available test area influenced layout, material and methods of the project. Non-ideal testing conditions listed below gave a more realistic approach, i.e. more realistic conditions (site and buildings constrains). Thus, the analysis provides valuable evidence for the overall impact of this research. The existing conditions are described below.



**Location:**

Institute's "Öko-Prüfstand" or test area.

- Address* Vienna, Adolf-Blamauer-Gasse 1-3
- Orientation* -59° East
- Inclination* 90° Façade
- Latitude* 49.190206°
- Longitude* 16.392941°
- Altitude above Sea level* 186 m
- Façade area:* 14 m<sup>2</sup> (5.82 x 2.40m)

Fig. 3. Aerial view Eco-Testing-Station.

Source: PVGIS-solarec-Europa.

**Table 1**  
System variations and components. Each Field (F #) corresponds to a variation of the system.

Test Field (F)	F 1	F 2	F 3	F 4
Green buffer (GB) components	<b>only PV (semitransparent)</b>	reference (empty field)	<b>PV + GF green façade (semitransparent)</b>	PV + GF green façade (black)
Field area (m2)	<b>3,5</b>	3,5	<b>3,5</b>	3,5
PV area (m2)	<b>2,16 (*)</b>	-	<b>2,56 (*)</b>	1,66

(\*) The only difference between the PV-modules of F1 and F3, is a 5 cm wider glass border, as seen in the picture above.  
Source: SOLARWATT data sheet "Glass-Glass-Module: SOLARWATT 36M glass/XL glass".

Source: SOLARWATT data sheet "Glass-Glass-Module: SOLARWATT 36 M glass/XL glass".

10 Photovoltaik-Fibel 2015

Yield losses can be minimized by optimum orientation and tilt

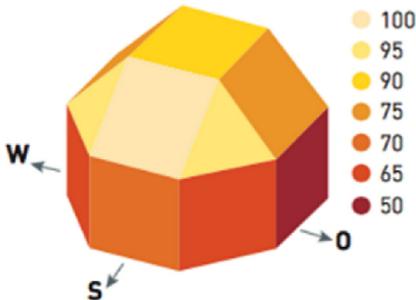


Fig. 4. Expected PV losses due to a PV mounting on the facade and an east orientation can count up to 50% of yield output losses [17].

- *Orientation:* not optimal as it is East-facing → In contrast, a South orientation would help to achieve a higher yield of electricity production due to more hours of direct sun light.
  - Direct sun light only in the mornings until approx. 12 h (noon – Fig. 5)
  - PVs implications: High losses of production. Expected yield 50 – 60%(Fig. 4 [17])
    - *Limited space for the green façade:* fields with only 45 cm depth to install the troughs of the green façade.
    - *Materials:* The materials used had to be ecological, simple, economical and readily available. Thus, the Eco-Testing-Station and test fields were constructed by researchers with the help of the institute's staff and students.

2.2. Test fields – description and systems variations

The BF was divided into four fields. Each field corresponds to a system's variation, to achieve a better comparison and evaluation

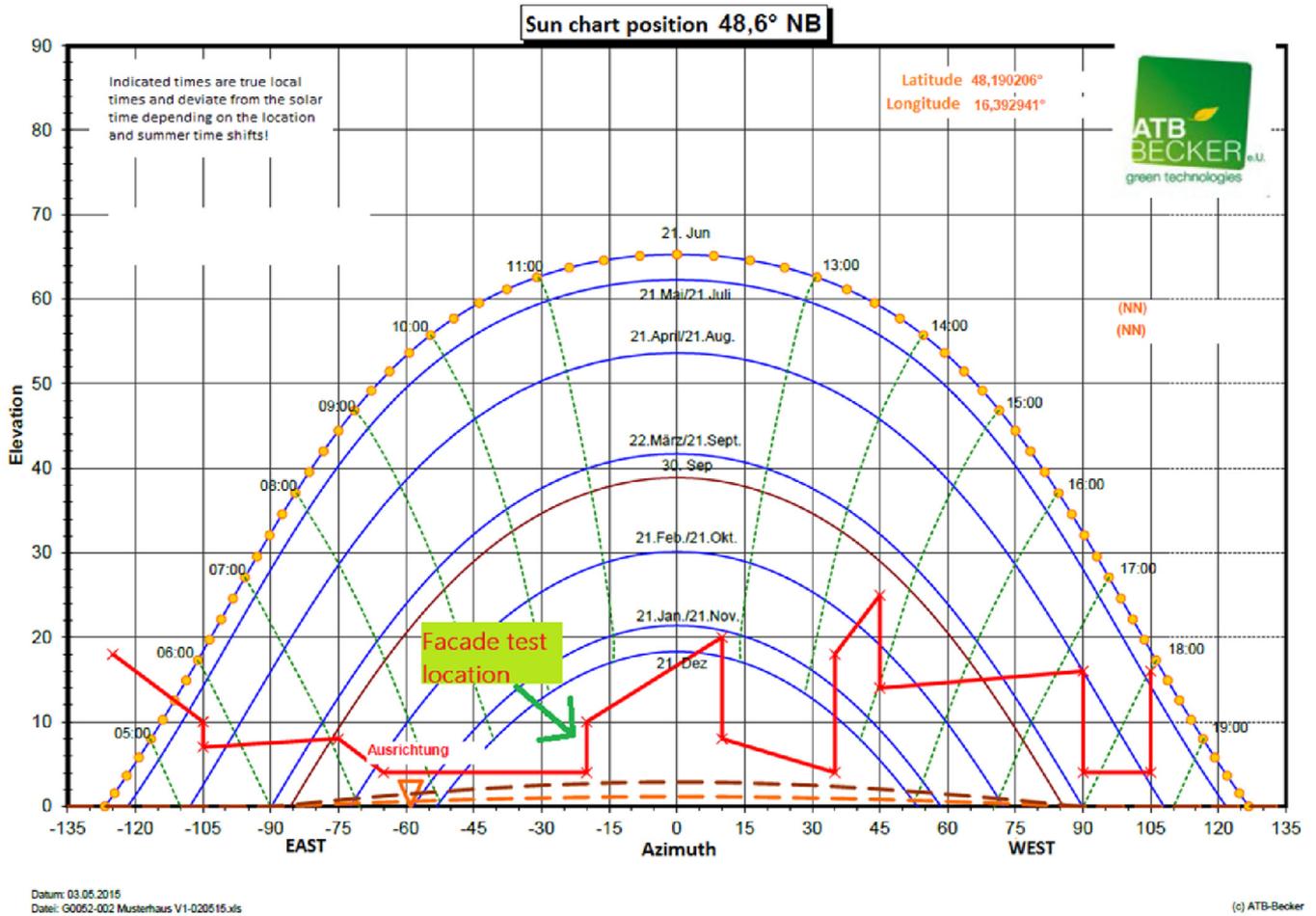


Fig. 5. Solar diagram of the test location.



Fig. 6. Test area distribution. The differences between the components of each field's layout target the comparison of system-variations (fields – F#).

of the effects and impacts of a system with a GB and without a GB (Fig. 6 and Table 1).

The number of modules per field varies, depending on its size. They were mounted to cover, as better as possible, the test field surface. In field F1 and F3 were mounted two transparent PV modules of the same technology respectively.

This paper analyzes two fields, F1 and F3, with the same PV system technology and power output. The difference between the analyzed fields is: F1 has no GF while F3 has a GF (Table 1).

### 2.3. Layers-layout and measurement devices

Each layer was equipped with monitoring devices to control the hygrometric parameters (temperature and humidity) and to set up to enable a better layer and comparison between the system variations (Table 2).

Table 2  
System-Layers components and measurement devices.

System (Fields) layers /measurement devices location				
Field/	F1*	F2	F3*	F4**
Layer	(only PV)	(reference = empty)	(PV+ green façade)	(PV+ green façade)
Exterior	T/H	T/H	T/H	T/H
PV module (PV)	T	No	T	T
Buffer space	T/H	T/H	T/H	T/H
Green façade (GF)	No	No	Yes	Yes
Building façade (BF)	T	T	T	T
Inverter	Yes	No	Yes	Yes
(*) same technology, semitransparent.			(T) Temperature device	
(**) different technology, black.			(H) Humidity device	



**Fig. 7.** F3–F4 GB – pictures. Above: inside of the GB and view of the GF behind both types of PV-modules, semitransparent and standard. Below: comparison of the plants evolution in one year and outside view.

2.4. GB – the green buffer layer (buffer space with a green façade)

The green buffer (GB) is a semi-enclosed space, created when mounting PV-modules in front of the green façade (Fig. 7).

There are several systems for greening of façades. It is important to differentiate green façades from the term “green walls”, which is used to describe different methods and technologies to growing plants on, up, or against the façade of a building [14]. We tested the most basic of building greening: green façades, which consists of climbing plants (creepers, vines etc.) and a support or climbing frame [7,14,20], at the base of the wall (Table 3).

2.5. Data assessment – variables and objectives

All presented results correspond to the first year of analysis (July 2015–September 2016).

The analysis has two parts: First, temperature influences on the PV module. Second, with the observations founded on the module temperature analysis a detailed hourly analysis on influences on the PV performance was performed. Each level of analysis gave more

information about specific behaviors or possible patterns, which validated or rejected the assumptions.

It is important to remark, that the objective of the analysis is a detailed evaluation (hourly) of the PV module temperatures behavior and its influences. As a second part and as a result of the first part, an analysis on possible influences on the PV performance was done. The analysis did not assess the performance as a total production.

2.5.1. Time variables – time intervals

A meteorological season is used for the analysis (Table 4). Meteorological seasons are based on the annual temperature cycle [22], instead of astronomical seasons, which are based on the position of the Earth’s orbit (equinoxes and solstices) [23].

Besides the own parameters, the system and the site parameters, time variables play an important role for analyzing data (Table 5).

Three sub-time-intervals, related to the PV operating behavior, were founded during the assessment and used later to identified other possible influences on PV performance (Fig. 8).

The hourly analysis revealed at what time-interval of the day these interactions occurred, and allowed a comparison with different time-intervals. This provided more indications on other

**Table 3**  
GF – Green facade components.

Support System	Greenery	Growing media	Irrigation system	Plants type
Wooden trellis and galvanized steel framework	Green façade establishes with climbing plants on wood troughs	Substrate used in green roof installations	SUMMER: with a typical home used irrigation system. WINTER: manual	Climbing plants: 1. Wisteria sinensis 2. Campis radicans 3. Leonicera henryi (added later- Nov. 2015)

**Table 4**  
Season variables.

Meteorological seasons	
<b>Spring</b>	March–May
<b>Summer</b>	June–August
<b>Autumn</b>	September–November
<b>Winter</b>	December–February

**Table 5**  
Time intervals used for the data-analysis.

Time Interval	Used for
<b>Direct radiation (sunlight)</b>	analysis of data depending on the sun light
<b>Day and night 24-h:</b>	values with impacts only during the day or the night values with daily impacts

Day interval - direct sunlight	
<b>07:00 – 08:00</b>	early morning
<b>09:00 – 10:00</b>	morning
<b>11:00 – 13:00</b>	noon / late morning

Fig. 8. Sub-time-intervals used in the analysis.

possible influences and impacts, thus enabling a better understanding of the behavior and the circumstances in which these effects occurred.

**3. PV analysis**

Fields F3-F1 were set up with the same PV technology i.e. glass-glass technology, monocrystalline solar cells. Fig. 9 and Table 6 show the PV-module characteristics. To appraise the differences of each PV systems one micro-inverter was installed per field. A Data-Logger monitored and saved the gathered information.

The module specifications are in Table 6. The expected yields, inclusive expected losses of 40% (Fig. 4) for F1 and F3, are 187 Wh respectively, from a total power of 312 Wp. The PV modules in this project had a shorter testing time interval, due to the east orientation, as compared to a normally well-design south facing PV generator.

An independent parameter—Performance Ratio (PRatio)—was introduced to assess the quality of the PV performance, and to compare PV systems (Table 7). This is the ratio between the achieved yield ( $E_{real}$ ) and the target yield ( $E_{ideal}$ ), sometimes called “Quality Factor”. It is expressed as a percentage, to its ideal total capacity (target yield). Since it refers to the achieved yield, the system losses

are already considered and provides reliable information on the differences between the systems [15].

Since the impacts of the presence/absence of a green buffer are already included in the results, it provides the information needed to validate assumptions related to the influences of a green buffer on the PV layer.

The data analyzed were filtered depending on the objectives of the analysis and its variables.

For PV performance assessment, the analysis focused on the search for patterns of possible behaviors and to show when, how much and how often these scenarios occurred. Then, for deeper evaluation, other variables were added like: different ranges of performance ratios and time intervals and weather variables, to finally conduct a further hourly analysis with the most relevant data.

For comparison purposes and when possible, values corresponding to the same month or season but from different years are placed behind each other in the tables below.

**3.1. PV module temperatures analysis**

**3.1.1. Yearly and monthly values: outdoor temperatures, solar radiation and PV operating temperatures**

2015–2016 *Yearly and monthly outdoor temperatures*: milder temperatures for 2016 with values more alike for the minimum and average temperatures in both years. Monthly greater values with a peak of 6 °C more in September 2015 for the maximum temperatures (Fig. 10).

2015–2016 *Yearly solar radiation*: values more alike for the global solar radiation in both years, with greater values in 2016. The maximum value for diffuse solar with low and high peaks in both years, especially for August and September 2015 (Fig. 11).

In the monthly analysis (Fig. 11) the PV module temperatures differences, between the PV with a GF (F3) and without a GF (F1), are increasing through the time for both levels, the average and the maximum. Only the minimum values of the module’s temperatures were alike. Even for the winter time, the values are increasingly higher. The figure shows increasing values on the maximum module temperature differences – F1 and F3—for outdoor temperatures are above 20 °C. The diffuse solar radiation can also play an important role (depending on the weather), as can be seen in peaks of F1, which was more influenced than F3 from changes in the diffuse solar radiation. An example of this was in April 2016 when a peak in the maximum value of the diffuse solar radiation resulted in F1’s temperature being almost 4 °C greater than F3.

- Maximum and average temperature values of F3 were lower than F1, in ranges about 2 °C up to 4 °C lower for the maximum and about 1 °C to 2 °C lower for the average.

The hourly analysis (Fig. 12) shows also greater differences in the modules maximum temperatures values for the year 2016. But,

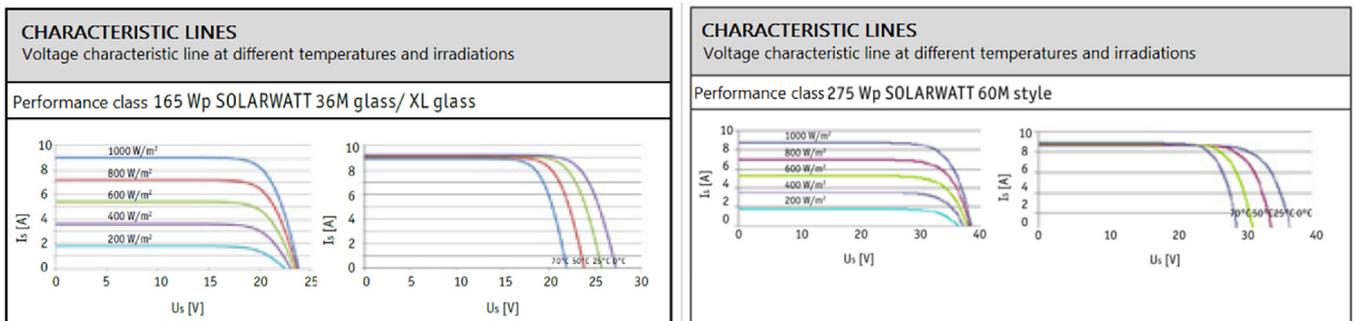
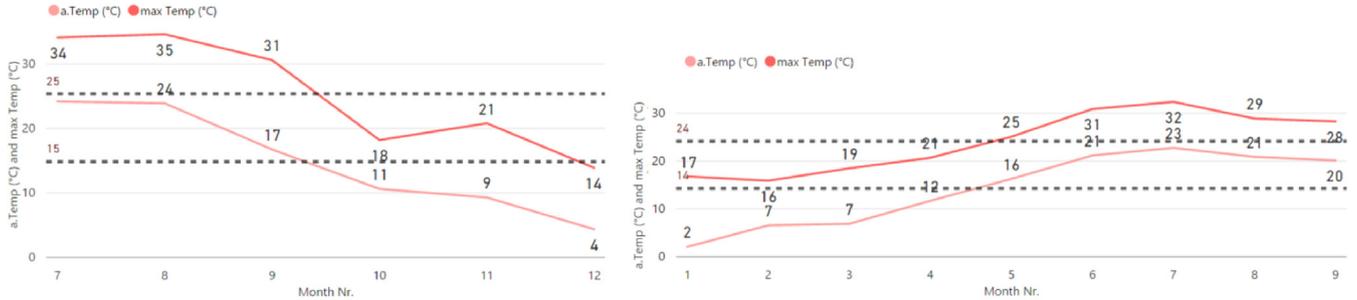


Fig. 9. PV-Modules. Voltage characteristic lines at different temperature and irradiances. Left side: F1 and F3 PV-modules. Right: F4-PV-module. Source: SOLARWATT data sheet “Glass-Glass-Module: SOLARWATT 36M glass/XL glass”.

2015	-5	15	35
Jahr	min Temp (°C)	a.Temp (°C)	max Temp (°C)
2016	-7	15	32
Jahr	min Temp (°C)	a.Temp (°C)	max Temp (°C)

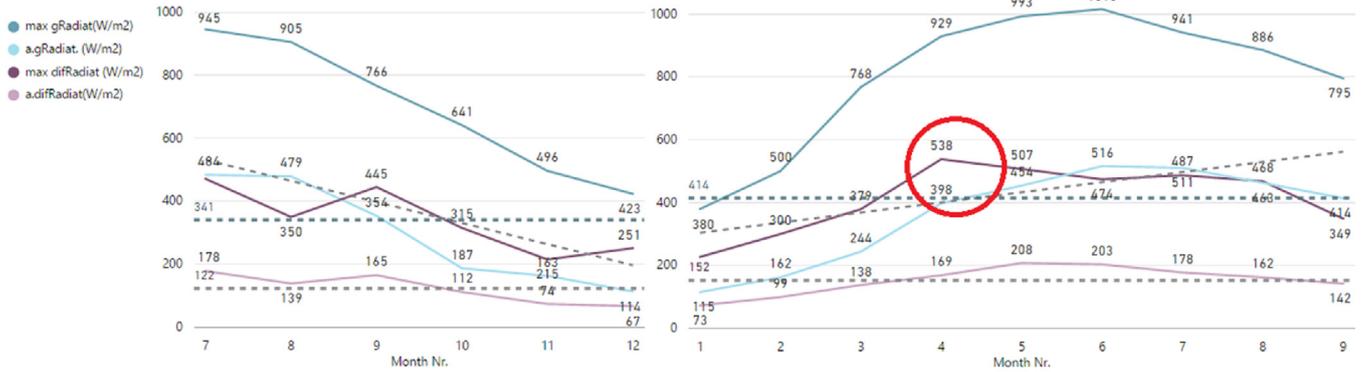
2015 -2016 Outside temperatures



2015 -Monthly outside temperatures

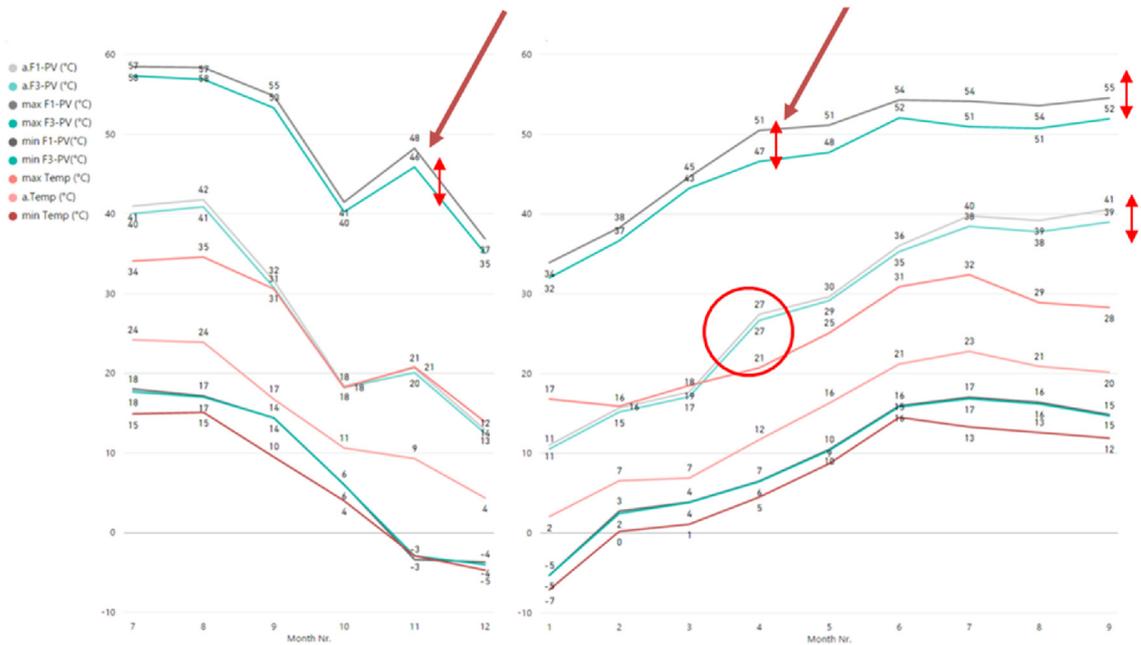
2016 -Monthly outside temperatures

Fig. 10. Yearly average outdoor temperatures.



2015 -Yearly solar radiation by month

2016 - Yearly solar radiation by month



2015 PV-module and outdoor temperatures

2016 PV-module and outdoor temperatures

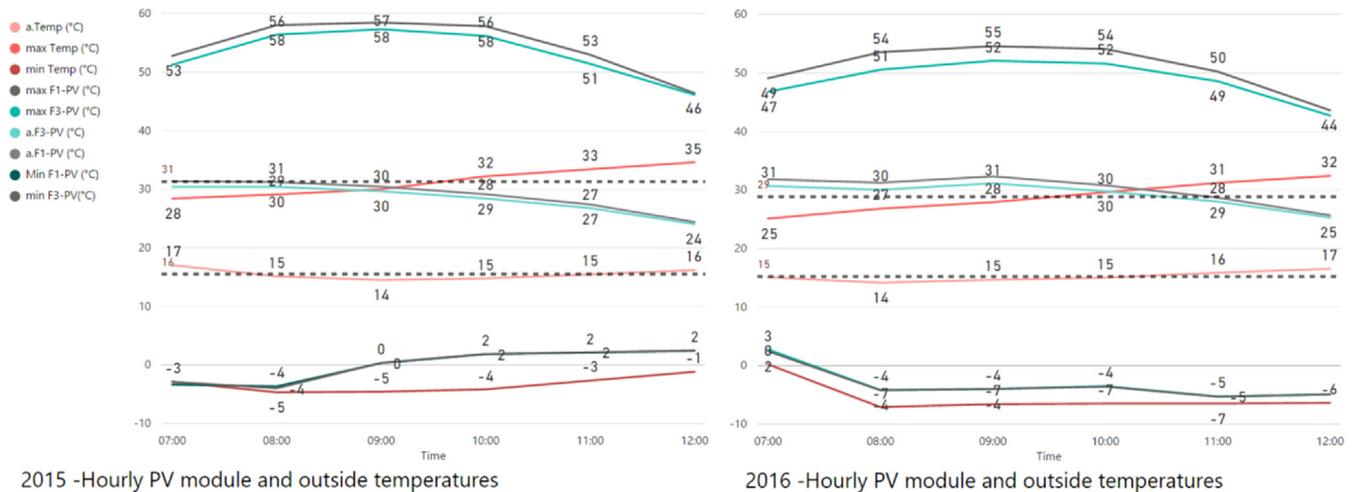
Fig. 11. Maximum, average and minimum monthly values for solar radiation, PV-module temperatures and outdoor temperatures.

**Table 6**  
Photovoltaic modules specifications.

Test Field Number	F 1	F 3	F 4
Manufacturer	SOLARWATT	SOLARWATT	SOLARWATT
Technologies	glass–glass M semi-transparent	glass–glass XL semi-transparent	glass–glass laminate, aluminum frame, black
Transparency	19%	32%	5,2%
Dimension	1520 × 710 × 9	1600 × 800 × 9	1680 × 990 × 40
L x W x H (mm)			
Total area (m2)	2,16	2,56	1,66
Solar cells (monocrystalline)	36M	36M	60M
Qty. modules/Wp	2 × 156 Wp	2 × 156 Wp	1 × 264 Wp
Total Power [Wp]	312	312	264
Expected Yield [%]	60%	60%	60%
Expected Yield [Wh]	187	187	158
Inverter		AE-Micro-Inverter INV350-60	
Data logger		AE-Data-Logger RS485	

**Table 7**  
Analysis parameters.

Calculations for	Total Power (Wp)	Parameter used	% Ratio
All fields/systems F1-F3-F4	same or different	Performance Ratio [PRatio]	$PR = \frac{Yield\ real}{Yield\ ideal}$
F1 vs F3 Fields/systems	same	Yield Ratio [YR]	$PR = \frac{Yield\ green\ buffer}{Yield\ NO\ green\ buffer}$



**Fig. 12.** Hourly PV-module and outdoor temperatures by year.

for the time interval between 11 h and 12 h the differences of the maximum values of module temperatures decreased as the outdoor temperatures increases, on a yearly average.

3.2. PV performances analysis

3.2.1. 2015–2016–Yearly values F3 – F1

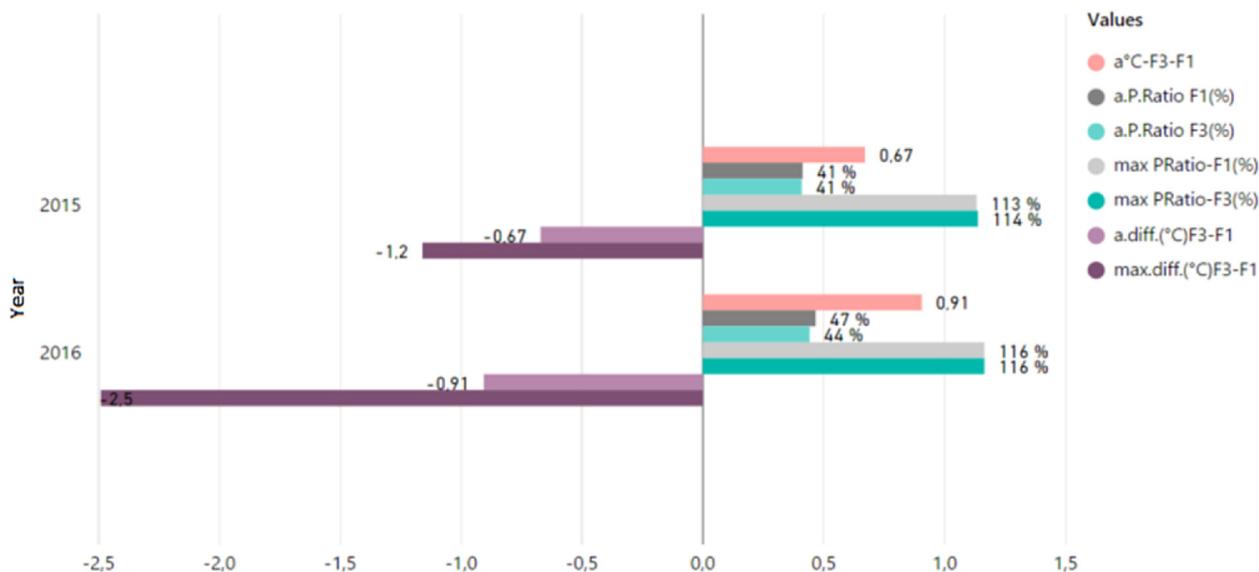
- **Performance ratio:** Yearly maximum performance ratio: in 2015 differences F3 (PV+ GF) was 1% greater than F1, but in 2016 both systems achieved the same values. The average values for both systems, F1 and F3, for 2015 were the identical (41%) and, in 2016, F1 had a better performance than F3 for 3%. (Fig. 13).
- The ranges of the **temperatures differences** between F1 and F3 can be seen better. It is noteworthy that despite lower values for outdoor temperatures (Fig. 10) and lower values for the maximum PV-operating temperatures in 2016 than 2015, the average values of PV- operating temperatures in 2016 were higher than 2015 (Figs. 11–13).

3.2.2. 2015–2016 – monthly analysis  
2015, July–December

- **Performance ratio:** F3 achieved a slightly better maximum performance of about 1% than F1 in the month of September. The same difference was for F1 (greater than F3) in December. Equals yields were achieved in July, August, October and November. The values of the maximum achieved performance ratios exceeded the expected yields for about 13–14% in both years (Fig. 14).

2016, January–September

- **Performance ratio:** 2016 was characterized for monthly lower average yields for F3, from about 1% to 5% lower than F1, but with some peaks (Fig. 15) in the maximum performance ratio, with values greater than F1. May, July, August, the daily and hourly analysis exposed the time intervals in which these peaks took place (Fig. 15).
- **Temperatures:** It is remarkable that despite important temperature differences, the achieved yield (PRatio) of F3 was lower than F1. In January, the cold temperatures and a better angle of incidence on the PV modules (orientation) helped a good performance. The values of the temperature differences are of note, since even in winter, the GB still had a positive impact on the



2015	0,67	41 %	41 %	113 %	114 %
Year	a°C-F3-F1	a.P.Ratio F1(%)	a.P.Ratio F3(%)	max P.Ratio-F1(...)	max P.Ratio-F3(%)
-0,67	-1,2	29	28	58	57
a.diff.(°C)F3-F1	max.diff.(°C)F3-...	a.F1-PV (°C)	a.F3-PV (°C)	max F1-PV (°C)	max F3-PV (°C)
2016	0,91	47 %	44 %	116 %	116 %
Year	a°C-F3-F1	a.P.Ratio F1(%)	a.P.Ratio F3(%)	max P.Ratio-F1(...)	max P.Ratio-F3(%)
-0,91	-2,5	30	29	55	52
a.diff.(°C)F3-F1	max.diff.(°C)F3-...	a.F1-PV (°C)	a.F3-PV (°C)	max F1-PV (°C)	max F3-PV (°C)

2015-2016 average and maximum values for performance ratios and PV-modules temperature difference F3-F1

Fig. 13. Yearly overview performance ratio and temperatures.

PV module temperature (the same counts for February 2016 and December 2015 – Fig. 15).

3.2.3. Values filtered by performance rates greater than 70% of its expected yield by month

- Performance ratio over 70%: the monthly highest values of P.Ratios remained almost equal between F3 and F1, with alternating differences of 1% between both systems. Losses due to higher temperatures can be observed over July, August and September in 2015 and from April to September in 2016 (Figs. 16 and 17). Despite highest solar radiation values in 2016 from May until July, 993, 1016 and 941 W/m<sup>2</sup> respectively (Fig. 11), the P.Ratios achieved were lower, than in months with less solar radiation, like February, March, August and September, where the maximum performance ratios achieved from 109% (August) up to 116% (April). Here, lower outdoor temperatures supported the PV performance.
- Temperature: Rapid module temperatures increase for module operating temperatures above 35°, followed by a decrease on the PV performance. As can be seen on Fig. 17, where a rapid increase of 7 °C in the module operating temperatures took place in one month for F1 (March to April), at which point the fall of the performance value was observed. April onwards the temperature differences between F1 and F3 oscillated between 2 °C to 3 °C lower for F3, and continued to increase until reaches 55 °C

on September. In August and September 2016 even the module temperatures reached peaks of 55 °C for F1 and 52 °C for F3, the PV systems achieved good yields, 110 and 109% respectively (Fig. 17).

Figs. 18 and 19 show the monthly frequency and values by month and maximum outdoor temperatures. Remarkable the better achieved yields of F3 in 2015. In July and August F3 had often very good performances by higher outdoor temperatures in. For 2016 the frequency and the performance were reduced.

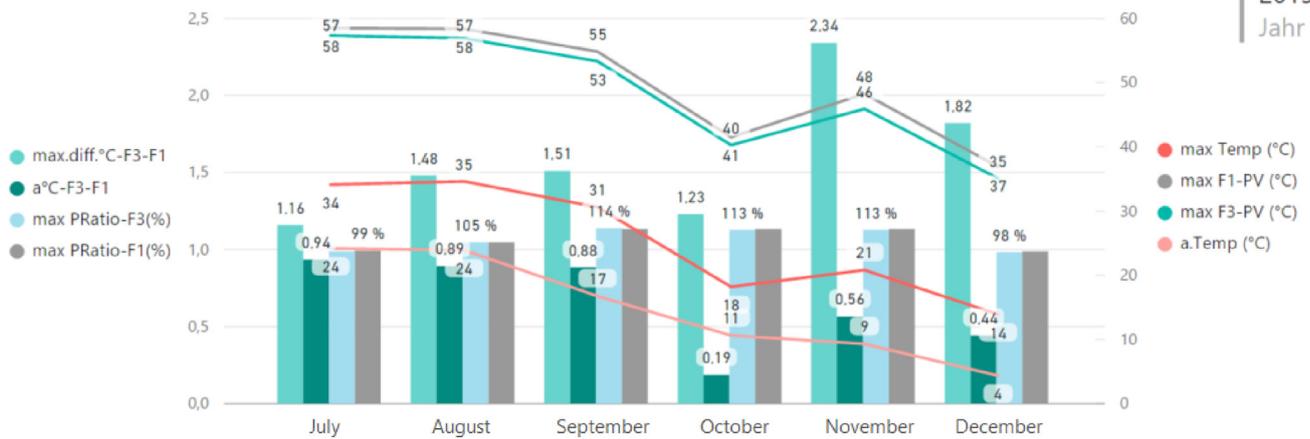
2015–2016 Hourly solar radiation: values more alike for the diffuse solar radiation in both years and greater values for the global radiation in 2016 (Fig. 20).

2015–2016 Hourly outdoor temperatures: 2016 was had milder temperatures than 2015, with greater differences in the maximum values of the temperatures. About 11 °C of difference for the interval of time between 10 h and 12 h and about 6 °C for the first three hours, between 7 h and 9 h (Fig. 20).

3.2.4. Hourly yield and percentage of total yield

2015–2016 Production hours by hourly time interval: for the specific orientation of the test area (East), the largest contribution to the total production is made during the time interval from 9 h to 11 h, with almost 65% of the total production, followed by 12 h and 8 h, with 17% and around 15% respectively. The first hour of production, 7 h, account for only around 5% of the total production (Fig. 21).

2015  
Jahr



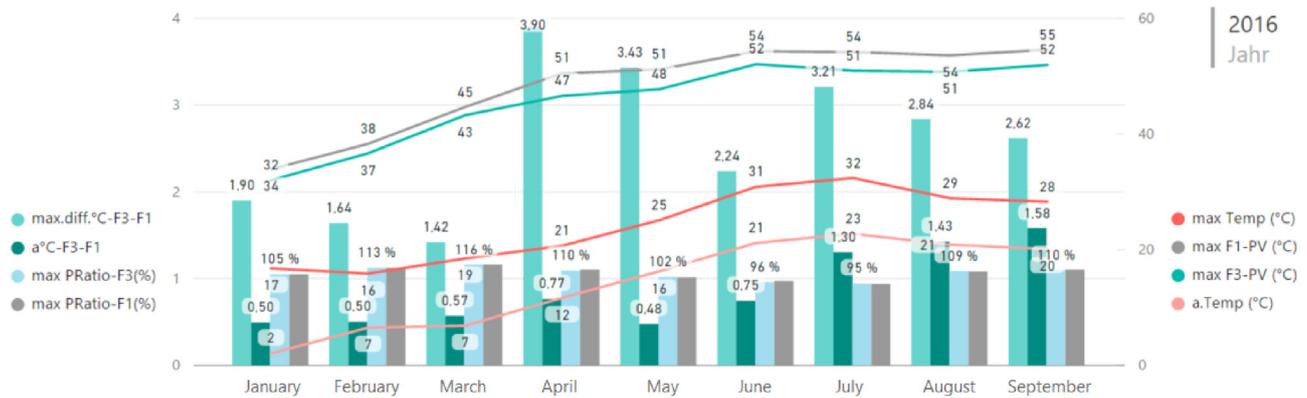
2015 - Monthly temperatures differences and maximum performance ratio PV modules

Year	Month.N	max.diff.°C-F3-F1	a°C-F3-F1	max F1-PV (°C)	max F3-PV (°C)	max PRatio-F1(%)	max PRatio-F3(%)	max Temp (°C)	a.Temp (°C)
2015	December	1,82	0,44	37	35	99 %	98 %	14	4
2015	November	2,34	0,56	48	46	113 %	113 %	21	9
2015	October	1,23	0,19	41	40	113 %	113 %	18	11
2015	September	1,51	0,88	55	53	113 %	114 %	31	17
2016	September	2,62	1,58	55	52	111 %	110 %	28	20
2015	August	1,48	0,89	58	57	105 %	105 %	35	24
2016	August	2,84	1,43	54	51	108 %	109 %	29	21
2015	July	1,16	0,94	58	57	99 %	99 %	34	24
2016	July	3,21	1,30	54	51	94 %	95 %	32	23
2016	June	2,24	0,75	54	52	97 %	96 %	31	21

2015-2016 Monthly comparison: temperatures differences and maximum performance ratio PV modules

Fig. 14. 2015 – PV performance ratio and temperature analysis.

2016  
Jahr



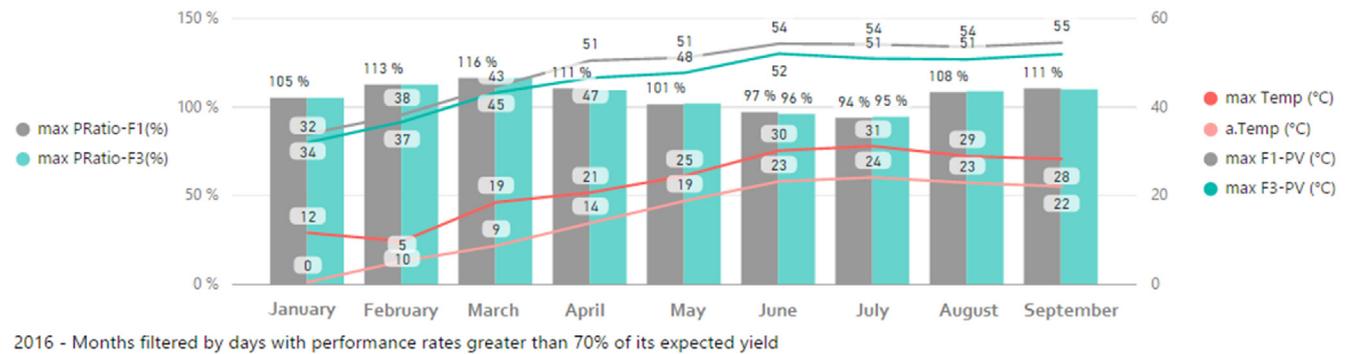
Year	Month.N	max.diff.°C-F3-F1	a°C-F3-F1	max F1-PV (°C)	max F3-PV (°C)	max PRatio-F1(%)	max PRatio-F3(%)	max Temp (°C)	a.Temp (°C)	%Perf.Ratio F3/F1
2016	January	1,90	0,50	34	32	105 %	105 %	17	2	1 %
	February	1,64	0,50	38	37	113 %	113 %	16	7	-0 %
	March	1,42	0,57	45	43	116 %	116 %	19	7	-0 %
	April	3,90	0,77	51	47	111 %	110 %	21	12	-2 %
	May	3,43	0,48	51	48	101 %	102 %	25	16	-2 %
	June	2,24	0,75	54	52	97 %	96 %	31	21	-3 %
	July	3,21	1,30	54	51	94 %	95 %	32	23	-3 %
	August	2,84	1,43	54	51	108 %	109 %	29	21	-6 %
	September	2,62	1,58	55	52	111 %	110 %	28	20	-4 %
	<b>2016 average</b>	<b>2,49</b>	<b>0,91</b>	<b>55</b>	<b>52</b>	<b>116 %</b>	<b>116 %</b>	<b>32</b>	<b>15</b>	<b>-2 %</b>

2016 - Monthly temperatures differences and maximum performance ratio PV modules

Fig. 15. 2016 – PV performance ratio and temperature analysis.



Fig. 16. 2015 – Performance rates greater than 70%.



2015-2016 - Months and days filtered by performance rates greater than 70% of its expected yield

Fig. 17. 2016 – Performance ratios greater than 70%.

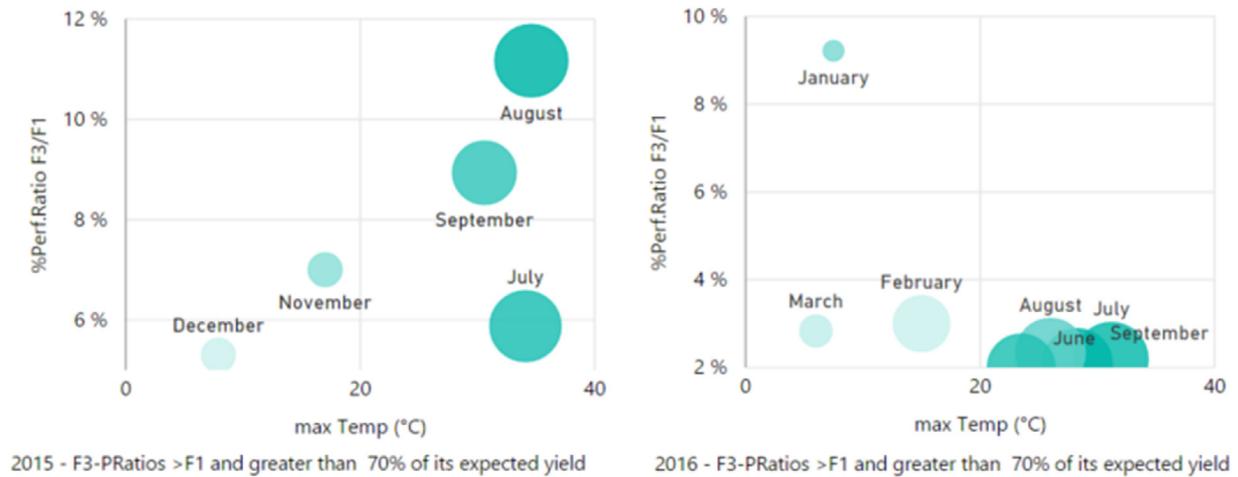


Fig. 18. F3 > F1 by performance ratios greater than 70% of its expected yield and max. outdoor temperature.

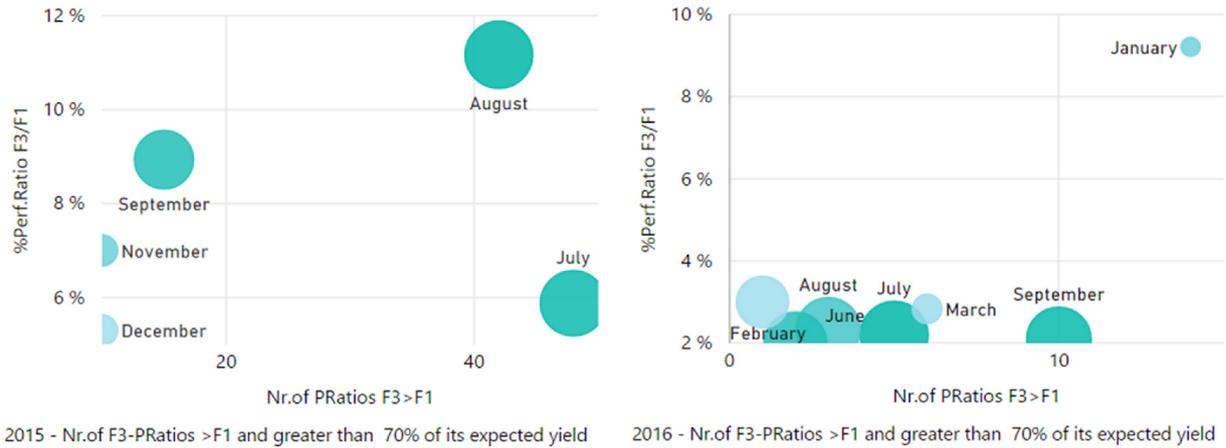


Fig. 19. Number of performance ratios where F3 > F1 by performance ratios greater than 70% of its expected yield and month.

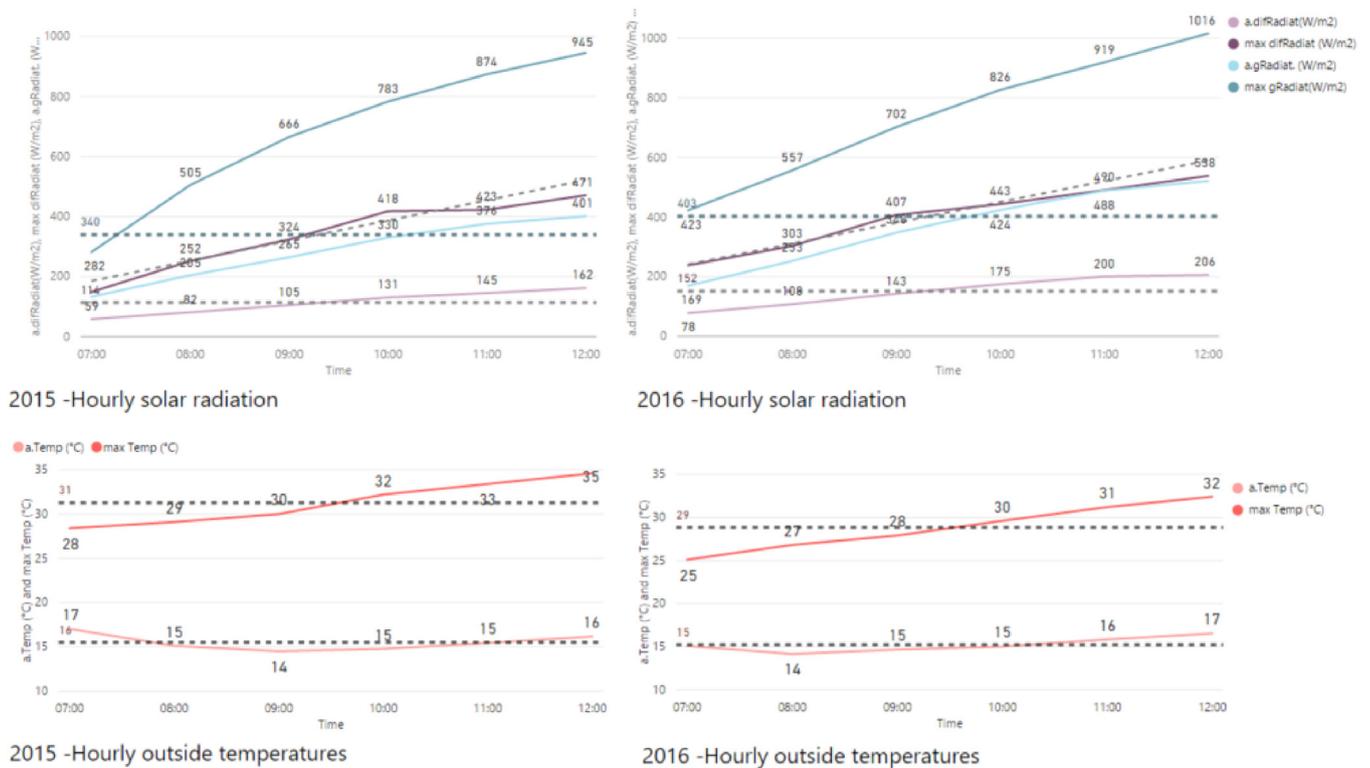


Fig. 20. Hourly weather data.

### 3.2.5. Hourly performance ratio and temperature differences by year

Hourly direct ratio comparison: A direct ratio comparison of the achieved yields between F3 and F1 was applied (Table 7) and expressed in percentage (%Yield F3 vs F1). The analysis aimed to a deeper understanding of the yield's behaviors observed before:

- time intervals in which they arose
- production ranges
- relation to other parameters
- identification of possible patterns – i.e. when, how and how much

Relevant productions took place from 9 h until 11 h, time intervals: morning and noon (Fig. 21).

The performance differences in 2015 (Fig. 22) exposed three subintervals of time. The time intervals are corresponding and

delimited by greater or lesser differences of the performance ratios of F3 vs F1: F3 equal to F1 (zero values), F3 greater than F1 (positive values) and F3 less than F1 (negative values). These subintervals were classified according to the time in which the occurred as:

- Early-morning: from 7 h and 8 h (almost 20% of the total production)
- Morning: from 9 h to 10 h (almost 45% of the total production)
- Noon or late-morning: from 11 h to 13 h (almost 37% of the total production)

In 2015, the hourly average yield comparison showed an alternately dominance of each system, with F1 dominating the early-morning and F3 the noon. The morning interval was more a transitional interval between both systems, with performances

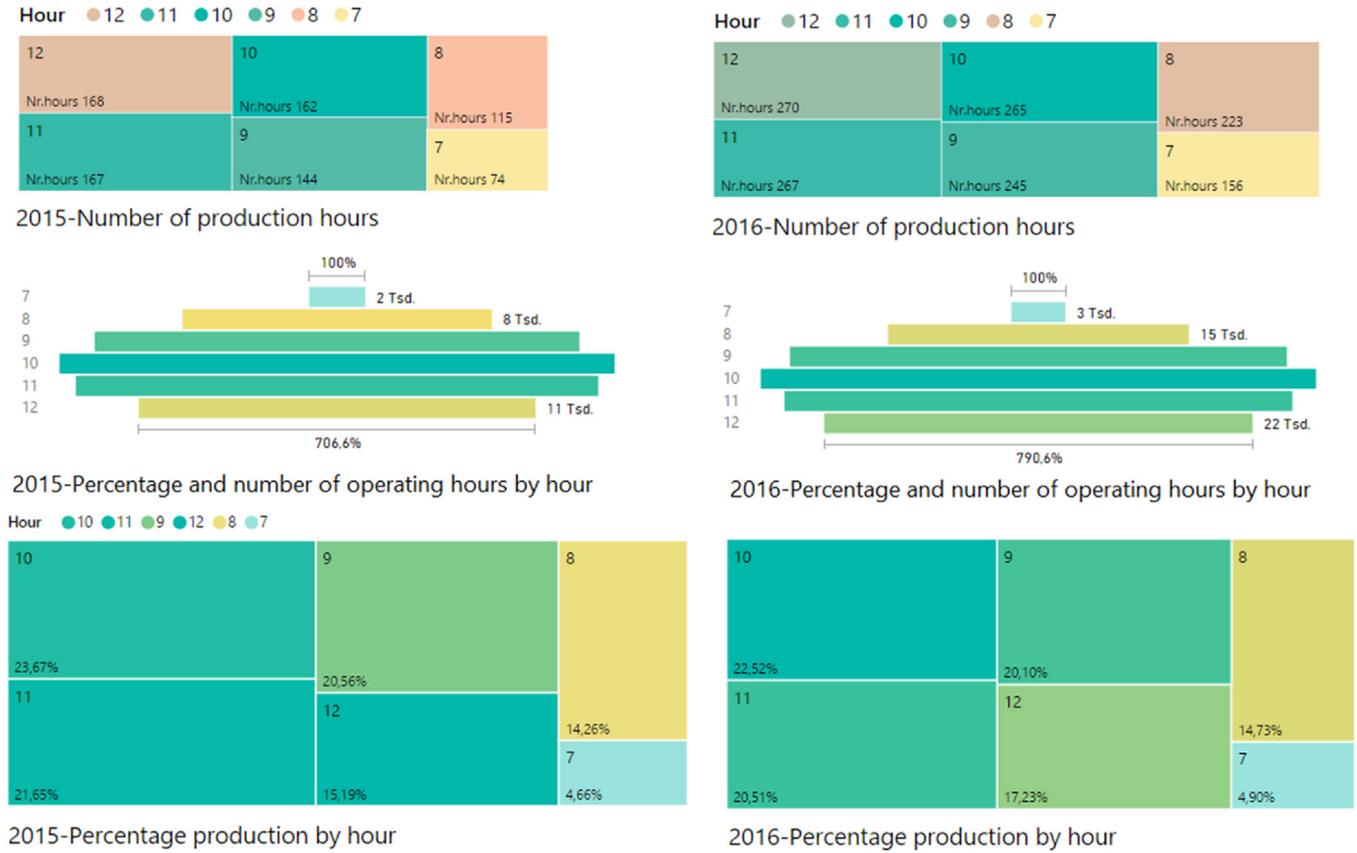


Fig. 21. Hourly yield, percentage of yield and number of production hours. Contribution to the total production also expressed by the intensity of the color in the graphic.

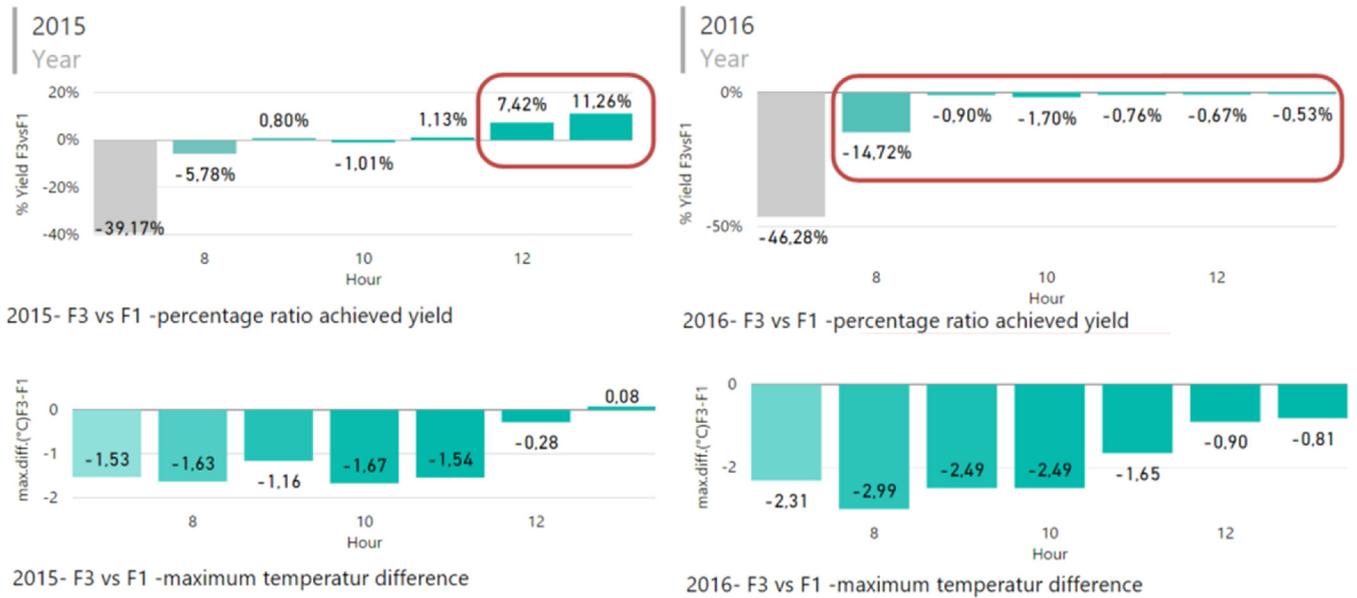


Fig. 22. F3 vs F1 – Comparison hourly performance ratio and temperatures differences by year and hour. Temperatures differences with increasingly differences over the time. Hourly performance ratios not good as expected Ratio achieved yields and PV maximum temperature differences by hour.

more alike (+/-1%) and with the more relevant production of the day (Fig. 21, Figs. 23 and 25).

In 2016, the hourly average yield comparison confirms the completely dominance of F1 (Fig. 25). The observed subintervals in 2015 (early-morning, morning and noon) were no longer easily to recognize, but still similarities were founded in growth and decline

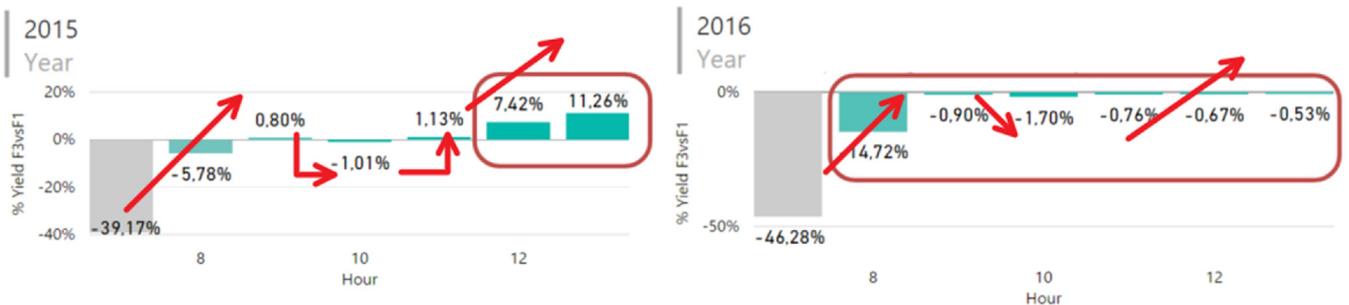
of the values, especially in the early morning (Fig. 24). Maximum achieved yields as in 2015 are not present in 2016 (Fig. 25).

- *Temperatures:* in 2015 F3 showed lower temperature in almost all the productions hours, about 1,5 °C lower than F1, except for 13 h, when F1 had slightly lower temperature (0,08 °C) than F3

Hour ▲	Nr.hours	% Yield F3vsF1	Max Yield F1-Wh	Max Yield F3-Wh	F1-Yield-Wh	F3-Yield-Wh	max.diff.(°C)F3-F1	a.diff.(°C)F3-F1	max Temp (°C)	a.Temp (°C)
7	74	-39,17 %	121	104	2989	1536	-1,53	-0,95	28	17
8	115	-5,78 %	190	190	9153	8465	-1,63	-0,82	29	15
9	144	0,80 %	212	213	13193	13264	-1,16	-0,78	30	14
10	162	-1,01 %	212	211	15191	15186	-1,67	-0,72	32	15
11	167	1,13 %	192	193	13892	14292	-1,54	-0,62	33	15
12	168	7,42 %	150	151	9750	10854	-0,28	-0,35	35	16

2015-F3 vs F1 ratios: yield, temperature (July-December)

Fig. 23. 2015, F3 vs F1 – Values ratio achieved yields and PV maximum temperature differences by hour (See Table A1 in Appendix A for table with values).



2015- F3 vs F1 -percentage ratio achieved yield

2016- F3 vs F1 -percentage ratio achieved yield

Fig. 24. Hourly production pattern. Evolution through the time: 2015 a more pronounced pattern and in 2016 almost not noticeable.

Hour ▲	Nr.hours	% Yield F3vsF1	Max Yield F1-Wh	Max Yield F3-Wh	F1-Yield-Wh	F3-Yield-Wh	max.diff.(°C)F3-F1	a.diff.(°C)F3-F1	max Temp (°C)	a.Temp (°C)
7	156	-46,28 %	108	96	6104	2726	-2,31	-1,15	25	15
8	223	-14,55 %	190	181	18353	15135	-2,99	-1,19	27	14
9	245	-0,89 %	211	211	25040	25004	-2,49	-1,19	28	15
10	265	-1,71 %	218	218	28061	27934	-2,49	-1,01	30	15
11	267	-0,76 %	196	195	25555	25551	-1,65	-0,68	31	16
12	270	-0,67 %	171	172	21472	21552	-0,90	-0,39	32	17

2016- F3 vs F1 ratios: yield, temperature (January-September)

Fig. 25. 2016, F3 vs F1 –Values ratio achieved yields and PV maximum temperature differences by hour (See Table A2 in Appendix A for table with values).

(Fig. 22) – In 2016 these differences were almost doubled and F3 had lower modules temperatures in all time intervals – The evolution of the temperatures through the hours, with ups and downs, had similarities to production’s pattern (Fig. 24).

3.2.6. Hourly-seasonal PV performance and temperatures

Special relevance had the yields-behavior between the yields at noon – when F3 had better performance than F1-, the temperature differences at noon and at the hour before noon, related to the outdoor temperatures. When F3 start to had better yield than F1, the temperature difference decreased, but still lower than F1 (Fig. 26). At the same time, this exchange of better production levels between F1 and F3 began with the increase in the both temperatures, module and outdoor temperatures.

The hourly seasonal analysis (Fig. 27) showed the same behavior pattern as the hourly analysis by year. Specially attention deserves the module temperature differences, which despite winter time kept growing, and improved the lower values for 8 h and 13 h of 2015.

3.2.7. Time intervals: F3 > F1 – early morning, morning and noon/late morning by year, season and month (for performance differences greater than 1%)

The time intervals where F3 had better performances change with the season (Fig. 28): noon for the summer, autumn as a transitional season and morning for the winter. In 2016 the noon interval for summer and autumn, morning for the winter and early morning for the spring.

3.2.8. Time intervals: F3 > F1 – early morning, morning and noon/late morning by day

Figs. 28 and 29:

- F3, 2015-summer: the greater performance differences, when F3 > F1, occurred at the noon interval → when the outdoor temperatures are at its maximum and above 30 °C, but direct sunlight almost gone, PV module temperatures above 40 °C.
- F3, 2015/2016-winter: the greater performance differences, when F3 > F1, occurred at the morning interval → when the outdoor temperatures are about 20 °C, direct sunlight hits at its maximum, PV module temperatures above 45 °C.

4. Results

The analysis of the data corresponding to the period July 2015 to September 2016 confirmed the main assumptions:

- it is possible to grow plants behind PV-modules mounted on a façade, and
- the GB regulates the operating temperature of the PV-modules (synergies).

For evaluation purposes, it is important to keep in mind that usually a well-designed PV generator (south orientation) would have more operating-hours under extreme conditions, i.e. more hours of higher operating temperatures at higher outdoor temperatures. As mentioned above, in 2.1, due to the east orientation, the PV pro-



Fig. 26. Seasons F3-F1 variables by hour.

duction hours are limited only to the morning until approximately 12 p.m.

The outcomes of the analysis and comparison of the PV-systems, with a GB (F3) and without a GB (F1), can be classified as follows:

*MFS – Relation of the system components: PV-module influences on the green buffer*

- The first achievement of this research is the validation of the assumption that the plants can develop behind a PV system mounted on a façade. Even with a very low PV-transparence coefficient percentage, 5.2% (standard PV module – F4).

#### PV-module temperatures

- The assumption that a GB would reduce the higher PV module operating temperatures is confirmed. The analysis showed that the growth of the plants is directly related to the lower temperatures of the PV-modules.
- The increasing differences of the PV-module operating temperatures between the systems with and without a GB over 2015 and 2016, highlighted the relation between the development of the plants (plant size and leaves density) and lower module temperatures.

- Main characteristics of the temperatures findings are:

- Increasingly lower PV-module operating temperatures over the time for the PV with a GB (F3): Ranges increased in about 2 °C up to 4 °C lower for the maximum values and about 1 °C to 2 °C lower for the average values, throughout the period of analysis.

#### PV- Performances

- The assessment showed the relation between lower PV operating temperatures of F3 and its better performances than F1 in 2015.
- The benefits of the GB on the PV performance were observed when the PV module was operating under extreme conditions.
- Weather conditions and the season of the year play a key role for this effect to take place. The effect became more evident in clearly defined seasons, i.e. through temperatures differences and the elevation of the sun: summer and winter.
- The different time intervals where this effect took place were more frequently observed:
  - In Summer, the GB benefits the PV performance when both, PV-module operating temperature and outdoor temperature are at its maximum, i.e. operating under extreme conditions → noon interval



Fig. 27. Seasons F3-F1 variables by hour (Observations: No data available for Spring 2015).

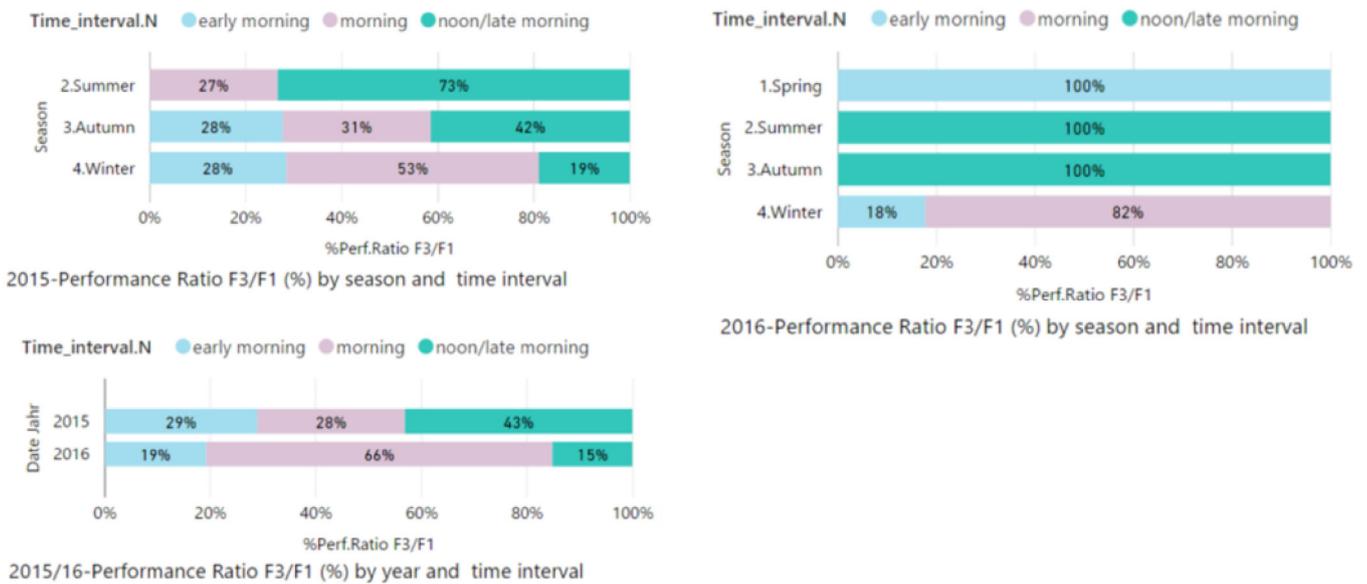


Fig. 28. F3-Yearly and seasonal percentage of total production by time interval.

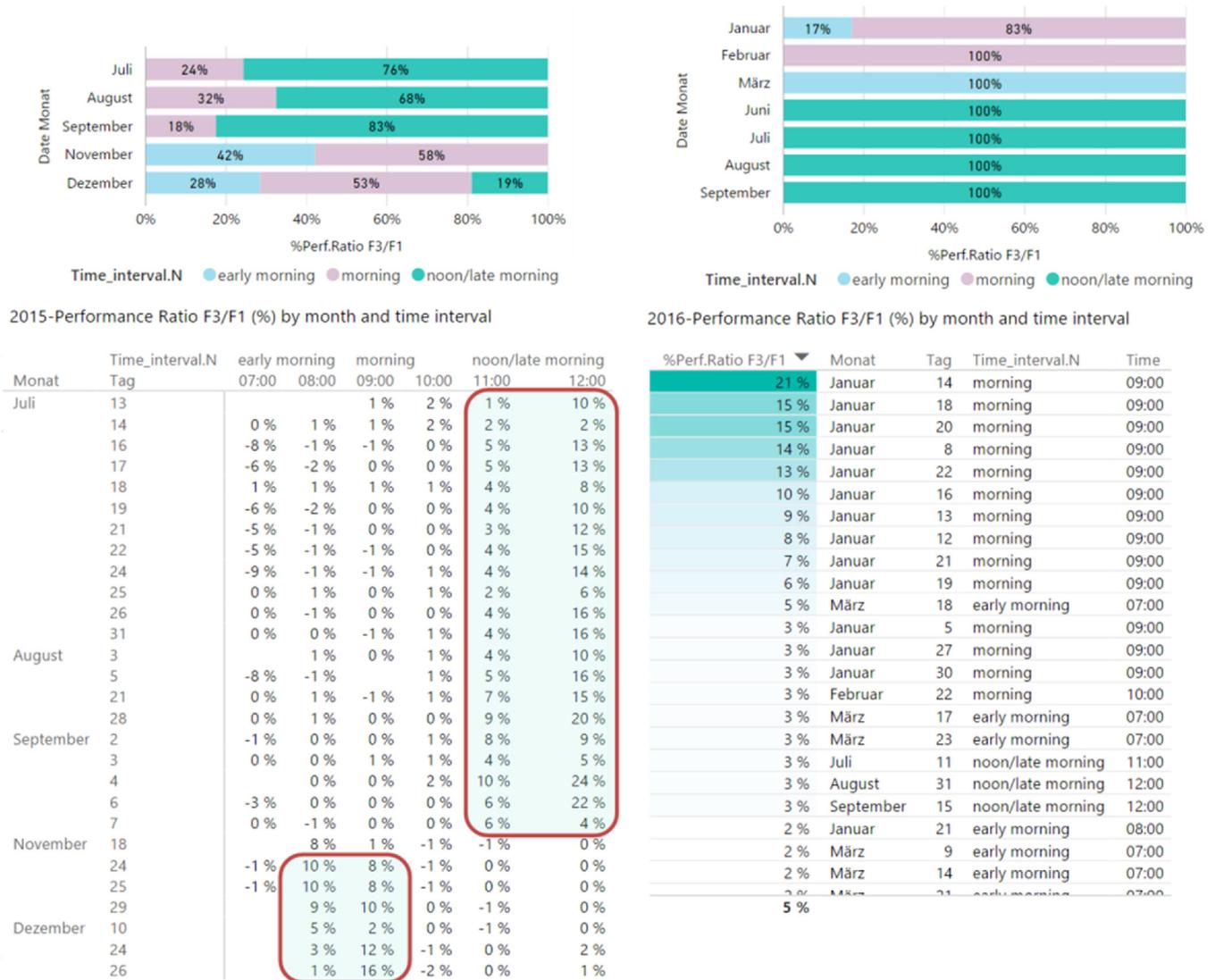


Fig. 29. F3–monthly and daily percentage of total production by time interval.

- In Winter, with lower outdoor temperatures, the PV-module reaches its peaks operating temperatures as the sun hits it more directly → morning interval.
  - These intervals coincide with the moment of greater PV production. The GB benefits the PV performance, keeping its operating temperature lower than the PV-module without a GB.
- Despite the fact that the temperatures in 2016 were even lower than in 2015, F3 did not achieved better performances than F1 in 2016. The time intervals where F3 had better performances than F1 were much less frequent in 2016.
- Further investigation on possible future influences of the plants growth and its effect on the PV performances is needed.

*Extreme PV-operating conditions:*

- The relation between better performances of F3 on extreme operating conditions: higher operating temperatures and higher outdoor temperatures – usually at noon – showed a direct relation of the GB with the better PV-performances.
- The often-better performances of F3 at the noon interval (11 h–13 h) arose when the outdoor temperatures reached its peaks of the day, and the PV-modules were operating under

extreme conditions. This could be interpreted as the benefit of a GB allowing the PV-modules to work better under extreme operating conditions.

- When this effect took place, F3 performance ratios achieved values of up to 24% greater than F1. This effect happened more often in the hottest months of the summer 2015.
- Milder temperatures in 2016 did not allow a comparison under the same conditions to confirm this assumption. Thus, more data and further analysis are needed.
- The east orientation of the PV generator does not allow to evaluate if this effect continues until the afternoon.

**5. Discussions**

The validation of the main assumptions allowed the further development of the objective of the “Multifunctional System: Building Greening and Photovoltaics” (MFS).

Testing the system under different site conditions is desired. A south, south-west orientation will allow more hours of direct sunlight and thus, more hours under extreme operating conditions (noon – afternoon). This will provide the necessary data to validate the relation between better PV-performances, extreme operating conditions and the GB.

### PV-performances

- The hourly assessment highlighted the time intervals where the GB had an impact on the PV-module performance. In these intervals two different behaviors were denoted for 2015 and 2016. One with positive effects on the PV performance and another with some contradictory ones. This pointed out the need of more data collection and confirmed the necessity of further testing the system under different site conditions (orientation).
- A south orientation will provide the needed information for a better understanding of this effect, and will also help to expand and enhance its benefits, and to avoid undesirable ones. Furthermore, this will validate if, as believed, the GB could allow consistently better PV performances than those found under an east orientation.

#### Further research, system development and next steps

A long test-period will be done in order to:

- validate these findings
- long term effects analysis
- compare and analyze influences of the synergies of the system:
  - on its own components (GB, PV)
  - as a system (MFS) on the BF
  - weather influences (different and similar seasons)

Further development and research will be done on:

- variations of the system
  - under other scenarios (orientation, building constrains)
- wider variety of plants
- other green wall systems
- quantifying the benefits on its own components and as a system (MFS) on the BF
- understand and regulate its effects on the PV-performance
- use on large applications.

Its use on buildings may also bring attached new challenges to meet the special needs:

- mounting system
  - flexibility to adapt to different façades and building types (modular system)
  - simple, light weight, robust, and secure
- costs and maintenance requirements

#### Maintenance

The required maintenance to date, as a simple system, was no more than the usual required by any of the individual systems –GF and PV. A long-term validation of at least 3 years would be desirable.

The results are encouraging, but more work is needed to secure a steadily positive effect on the PV performance and avoid undesirable effects as seen on 2016 (F3 lower performance).

## 6. Conclusions

Two major tasks and challenges of the system are solved. It has been adequately demonstrated that:

- The plants can growth behind PV systems on façades
- It is possible to simultaneously use green facades and photovoltaic systems on a building façade, thus no more competition between green façades and photovoltaic systems (MFS)

In addition to these achievements one objective of the PV-layer's objectives was achieved.

- The green buffer has positive influences on the PV module temperature throughout the year. In increasing ranges about 2 °C up to 4 °C it lowers the maximum temperature values, and it lowers the average values (about 1 °C–2 °C)

Other benefits of the system that need further investigation:

Positive effect of GB on PV performance: Under extreme operation conditions the GB supports the PV performance in summer and winter:

- Summer: when the PV performance starts to decrease due to higher outdoor temperatures and PV module operating temperatures, the GB supports the yield output. It keeps the module temperature lower in comparison to the PV module without GB. Thus, it enhances the yield output for this specific time interval.
- Winter: Despite lower outdoor temperatures, the PV performance starts to decrease as the PV module temperature reaches temperatures above the standard test conditions (25 °C). At this point the GB supports the performance by keeping the module temperature lower, decreasing the losses, and thus enhancing the yield output.

These are the first results related to the influences of Multifunctional System- Building Greening and Photovoltaics system on the photovoltaic modules.

At this point of development, it is a simple system, which could be used without major modifications for small applications at not higher costs, since green facades are the most simple, affordable and well-known system.

The MFS will allow a better use of the surface of the building façades, it fulfills its goals: it is simple, ecological, affordable and easy to replicate. Additional benefits are expected to be found in the next step: the evaluation of the effects of the MFS on the building façade. If the assessment corroborates, as expected, that the MFS acts as an insulation tool for the BF, mayor and enhanced benefits can be expected, and consequently a broader range of new applications for the system.

## Acknowledgments

This research was developed in the course of “GrünPlusSchule@Ballungszentrum” project, which is supported by the Austrian Ministry of Transport, Innovation and Technology (BMVIT) and the Austrian Research Promotion Agency (FFG) under the project number 850124.

The second year on research is funded by the Federal Ministry for Science, Research and Economy (Forschungsstipendium – Österreichische Graduierte – Beihilfen für Zwecke der Wissenschaft – Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft).

The authors would like to thank to ATB-BECKER green technologies e.U, which provided the PV system [21].

## Appendix A.

**Table A1**

Values corresponding to Fig. 23: 2015, F3 vs F1 – Values ratio achieved yields and PV maximum temperature differences by hour.

Hour	no of hours	% Yield F3vsF1	max. Yield F1-Wh	max. Yield F3-Wh	F1-Yield-Wh	F3-Yield-Wh	max. diff. (°C) F3-F1	a. diff. (°C) F3-F1	max Temp (°C)	a. Temp (°C)
7	74	-39.17%	121	104	2989	1536	-1.53	-0.95	28	17
8	115	-5.78%	190	190	9153	8465	-1.63	-0.82	29	15
9	144	0.80%	212	213	13193	13264	-1.16	-0.78	30	14
10	162	-1.01%	212	211	15191	15186	-1.67	-0.72	32	15
11	167	1.13%	192	193	13892	14292	-1.54	-0.62	33	15
12	168	7.42%	150	151	9750	10854	-0.28	-0.35	35	16

**Table A2**

Values corresponding to Fig. 25: 2016, F3 vs F1 – Values ratio achieved yields and PV maximum temperature differences by hour.

Hour	Nr. hours	% Yield F3vsF1	max. Yield F1-Wh	max. Yield F3-Wh	F1-Yield-Wh	F3-Yield-Wh	max. diff. (°C) F3-F1	a. diff. (°C) F3-F1	max Temp (°C)	a. Temp (°C)
7	156	-46.28%	108	96	6104	2726	-2.31	-1.15	25	15
8	223	-14.55%	190	181	18353	15135	-2.99	-1.19	27	14
9	245	-0.89%	211	211	25040	25004	-2.49	-1.19	28	15
10	265	-1.71%	218	218	28061	27934	-2.49	-1.01	30	15
11	267	-0.76%	196	195	25555	25551	-1.65	-0.68	31	16
12	270	-0.67%	171	172	21472	21552	-0.9	-0.39	32	17

## References

- [1] A. Korjenic, Energy Globe Wien für das Bauen mit Öko-Materialien. <http://www.energie-bau.at/bauen-sanieren/2164-energy-globe-wien-fuer-das-bauen-mit-oeko-materialien>, [Accessed on 20.08.2015].
- [2] A. Korjenic, V. Petráněk, J. Zach, J. Hroudova, Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources, *Energy Build.* 43 (9) (2011) 2518–2523.
- [3] A. Korjenic, J. Zach, J. Hroudova, The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions, *Energy Build.* 116 (2016) 45–58.
- [4] M. Köhler, W. Wiatarilla, R. Feige, Interaction between PV-Systems and extensive green roofs, in: Session 3.3: Energy and Thermal Performance, Minneapolis, 2007.
- [5] N. Pfoster, Energieeffizientes bauen mit begrünten Fassaden; 7, FBB-Symposium Fassadenbegrünung (2014) 31–32.
- [6] Chr. Lamnatou, D. Chemisana, Photovoltaic-green roofs: a life cycle assessment approach with emphasis on warm months of Mediterranean climate, *J. Clean. Prod.* 72 (2014) 57–75.
- [7] M. Manso, J. Castro-Gome, Green wall systems: a review of their characteristics, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41 (2015) 863–871.
- [8] I. Susorova, Green façades and living walls: vertical vegetation as a construction material to reduce building cooling loads, *Eco-Effic. Mater. Mitigat. Build. Cool. Needs* (2015) 127–153.
- [9] A. Schoof, A. Korjenic, Ökologische und ökonomische gebäudebewertung für ein einfamilienhaus in varianten, *Bauphysik* 38 (2) (2016) 88–97.
- [10] N. Pfoster, Gebäude Begrünung Energie: Potenziale und Wechselwirkungen, *Leitfaden als Planungshilfe* 114 (2015) 92–94.
- [11] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (publisher), Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung: Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung. Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung, 2010. Pages 30–31; [www.gebaeudekuehlung.de/SenStadt.Regenwasser.dt.gross.pdf](http://www.gebaeudekuehlung.de/SenStadt.Regenwasser.dt.gross.pdf) [Access on 15 February 2016].
- [12] D. Tilley, A. Alexander, A. Chang, C. Price, A. Welch, B. Wells, S. Tjadem, Green Facades: Ecologically Designed Vertical Vegetation Helps Create a Cleaner Environment, University of Maryland Extension and the Department of Environmental Science and Technology, 2014, Publication FS-978.
- [13] J. Maas, R.A. Verheij, P.P. Groenewegen, P. S.Vries, Spreeuwenberg Green space, urbanity, and health: how strong is the relation? *J. Epidemiol. Commun. Health* 60 (2006) 587–5927.
- [14] UK Green Wall Association Types of green wall; [www.urbangreening.info/green-wall-types](http://www.urbangreening.info/green-wall-types) [Accessed on 15 June 2016].
- [15] The German Solar Energy Society: planning installing photovoltaic systems, in: A Guide for Installers, Architects and Engineers, The German Solar Energy Society, Ecofys, 2005.
- [16] A. Falk, C. Dürschner, K. Remmers, Fotovoltaica para Profesionales: Diseño, instalación y comercialización de plantas solares fotovoltaicas; Solarpraxis-Censolar, 2006.
- [17] Klima- und Energiefonds. Photovoltaik-Fibel 2015; Guide. Klima- und Energiefonds, Vienna, 2015.
- [18] A. Gail, Study of the Operating Temperature of a PV Module. Project Report 2013 Gail-Angee, Dept. of Energy Sciences, Faculty of Engineering, Lind University, Sweden, 2013.
- [19] Fraunhofer institut monitoring of photovoltaic systems: good practices and system analysis, in: European PV Solar Energy Conference, Paris, 2013.
- [20] Greenscreen: Considerations for Advanced Green Façade Design; Paper, Continuing Education Course-Greenscreen; Greenscreen: Considerations for Advanced Green Façade Design; Paper, Continuing Education Course-Greenscreen; <http://greenscreen.com/docs/Education/greenscreen.Advanced%20Green%20Facade%20Design.CEU.pdf> [Accessed on 15 May 2016].
- [21] ATB-BECKER green technologies e.U. Website: [www.atb-becker.eu](http://www.atb-becker.eu) [Accessed on 15 May 2016].
- [22] Wiener Arbeitsgemeinschaft für Astronomie (WAA), Jahreszeiten. Site; <http://www.waa.at/hotspots/jahreszeiten/jahreszeiten.html> [Accessed on 18 September 2016].
- [23] Mett Office UK's National Meteorological Service. Website: [www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/how-weather-works/when-does-spring-start](http://www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/how-weather-works/when-does-spring-start) [Accessed on 20 September 2016].

2. Publikation 2

Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System

<b>STATUS</b>	Veröffentlicht
<b>Titel: (Deutsch)</b>	Wärmer und Kälter - Wie Photovoltaiksysteme und Begrünung die Außenoberfläche Temperatur der Fassade beeinflussen: Die Synergien eines multifunktionalen Systems
<b>Original Titel: (Englisch)</b>	Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System
<b>Autorinnen:</b>	Penaranda Moren, María Soledad; Korjenic, Azra
<b>ISBN/ISSN:</b>	ISSN: 0378-7788; DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.04.082
<b>Sprache:</b>	Englisch
<b>Schlagwörter:</b>	Green Façade; Vertical Greening; Green Walls; Building Greenin; PV and Greening; Wall Temperature; Green Cooling Effect
<b>Quelle:</b>	Energy & Buildings, 15 Juli 2017, Vol.147, S.123-141 [Peer Reviewed Journal] ScienceDirect (Elsevier B.V.)

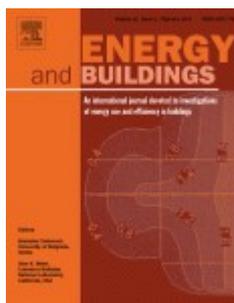


RightsLink®

Home

Create  
Account

Help



**Title:** Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System

**Author:** María Soledad Penaranda Moren, Azra Korjenic

**Publication:** Energy and Buildings

**Publisher:** Elsevier

**Date:** 15 July 2017

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

**LOGIN**

If you're a **copyright.com user**, you can login to RightsLink using your copyright.com credentials.

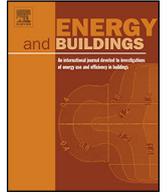
Already a **RightsLink user** or want to [learn more?](#)

Please note that, as the author of this Elsevier article, you retain the right to include it in a thesis or dissertation, provided it is not published commercially. Permission is not required, but please ensure that you reference the journal as the original source. For more information on this and on your other retained rights, please visit: <https://www.elsevier.com/about/our-business/policies/copyright#Author-rights>

BACK

CLOSE WINDOW

Copyright © 2018 [Copyright Clearance Center, Inc.](#) All Rights Reserved. [Privacy statement](#). [Terms and Conditions](#).  
Comments? We would like to hear from you. E-mail us at [customercare@copyright.com](mailto:customercare@copyright.com)



# Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System



María Soledad Penaranda Moren\*, Azra Korjenic

*Institute for Building Construction and Technology, Research Centre of Building, Physics and Sound Protection, Vienna University of Technology, Austria*

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 5 January 2017  
Received in revised form 25 April 2017  
Accepted 27 April 2017  
Available online 30 April 2017

### Keywords:

Green façade  
Vertical greening  
Green walls  
Building greening  
PV and greening  
Wall temperature  
Green cooling effect

## ABSTRACT

This paper presents the results of the analysis on the impact and influences of the “Multifunctional System: Building Greening and Photovoltaic” (MFS) on the building façade (BF) temperatures. The MFS is an ongoing project-development. It combines two well-known systems: photovoltaics (PV) and green façades (GF). The simultaneous use of PV and GF creates a green buffer (GB), which acts as an insulation tool for the PV and the BF. In addition, the MFS protects its components, the GF, the PV and the BF, especially from extreme temperatures. To validate the influences of the MFS, similar systems were setup with variations on the GB: with and without a GF. The assessment was based on the comparison of these systems with a bare wall. Findings revealed temperature reductions on the BF of up to 30 °C and an average of 21.4 °C for the maximum temperatures. In winter, it limits the cooling down effect of the wall by about 3 °C on average, when outdoor temperatures drop below 0 °C. The presented results correspond to the first period of research: from July 2015 to November 2016.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Photovoltaics (PV) and green facades (GF) are systems widely used as strategies for improving building energy consumption, energy savings, thermal performance, sound mitigation, and improving life quality: air quality, noise damping and aesthetics [1,2]. These characteristics and benefits of the systems were discussed in many scientific studies, along with their implementation possibilities on the façade [3–14].

Both systems have their maximum benefits during the summer; therefore, they are optimized to exploit their potential benefits in the same time, i.e. summer, what arises is a competition for surface use between them [16]. Until now, these façade systems (PV and GF) have been used in isolation, and have not been brought together to work in synergy. The underlying assumption is that plants would receive only limited amounts of indirect sunlight (filtered through the PV-module). Consequently, their potential for growth is limited or non-existent. The development of the “Multifunctional System: Building Greening and Photovoltaic” (MFS) demonstrated that this assumption was false [17].

Existing scientific literature has several research works on the influences of GF on the building envelope and on its thermal properties [7–11,20], but none on GF behind PV systems mounted on a façade, as the MFS does and demonstrated in [17].

A summary of the most significant previous studies on greenery systems, green walls (GW) and GF, founded in the literature is presented and analyzed in [6]. The encountered difficulties for a proper comparison, due to the specific test conditions and the differences of each used system, are highlighted. Tables with key factors of the studies are proportionated. The tables show that most of the studies were done only for one season of the year, mostly summer, with lack of studies relating to winter data. Big variabilities on the obtained temperature reductions were also founded.

The MFS was conceived with the purpose to develop a system-solution for all year round, where the synergies of PV and GF work together, to bring an optimal, long lasting, cost-effective and energy efficient solution, which can be replicated for future constructions and moreover, for the renovation of old buildings.

In Fig. 1, it can be observed that the green buffer (GB) is a layer between the PV and the BF. The PV layer supports the growth of the climbing plants, while offering protection from the extreme temperatures in summer and winter, and from extreme weather events, like cold winds and hails.

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [maria.penaranda@tuwien.ac.at](mailto:maria.penaranda@tuwien.ac.at) (M.S. Penaranda Moren), [azra.korjenic@tuwien.ac.at](mailto:azra.korjenic@tuwien.ac.at) (A. Korjenic).

### Nomenclature

GB	Green buffer
GF	Green facade
PV	Photovoltaics
BF	Building facade
PRatio	Performance ratio
gRadiat	Global radiation
difRadiat	Diffuse radiation
MFS	Multifunctional system: building greening and photovoltaics
F#	Field number - variants of the system for comparison purposes
F1	Field 1 - PV (semitransparent) + buffer space (no GF)
F2	Reference (empty field = bare wall)
F3	Field 3 - PV (semitransparent) + green buffer (with a GF)
F4	Field 4 - PV (black-standard) + green buffer (with a GF)
F# vs F#	Comparison between systems - fields
(F#) F# / F#	Ratios between systems (F#)
HC	Hygrometric characteristics
a	Average
max	Maximum
min	Minimum
diff	Difference
temp	Temperature
radiat	Radiation

At the same time, the GB layer provides a cooling effect for PV and BF, due to the transpiration of plants. In turn, the PV layer semi-encloses the GB and protects it. Then, the synergies of both components together, PV and GB, benefit the BF. In other words, each layer has positive influences on the others, and the system as a whole enhances the benefits of its components, the PV and the GB, working in synergy to achieve the desired goals. As a consequence of these synergies, the benefits of the MFS are enhanced and prolonged beyond the summer throughout the year.

The effects of MFS project is to proportionate an all-year round solution, as well as for the summer as for the winter. The here presented results, “influences of the MFS on the BF”, and the previous presented results on “influences of the MFS on the PV” [17], analyzed the performance of the system and its components throughout the year. In order to validate its aims and benefits.

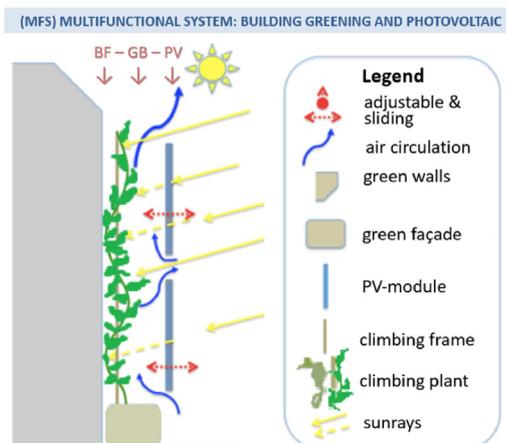


Fig. 1. Schematic of the Multifunctional System: Building Greening and Photovoltaic for Green Facades.

### 1.1. Multifunctional system – description and target

The simultaneous use of PV and GF creates a GB space, which has its own hygrometric characteristics (HC). The GB interacts with the other components or layers: the BF and the PV, acting as an insulation tool. It regulates the temperatures on the BF as well as the operating temperatures of the PV-modules throughout the year.

The influences of the GB on the PV were detailed analyzed in the first article on the benefits and influences of the MFS: “Green Buffer Space Influences on the Temperature of Photovoltaic Modules” [17]. The results showed that the GB reduces the PV operating temperatures in increasing ranges, about 1 °C up to 4 °C. Temperature differences increase by outdoor temperatures above 20 °C.

The validation of the assumptions on the development of plants behind a PV on a façade, was also addressed in the first paper of the MFS-research project [17].

The target of this paper is to assess the MFS influences on the BF temperatures.

The described project is a living project, the presented results correspond to the first period of research: from July 2015 to November 2016, and could vary in the future, as plants are involved. Plants live, grow and evolve on a daily basis, thereby affecting the retrieved data.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Specific project conditions – test site location

The test areas used for the MFS are mounted on the Eco-Testing-Station (“Öko-Prüfstand”) – Test Area of the Research Center of the Building Physics and Sound Protection (Fig. 2). It has been operable since July 2015, when the practical part of project started. The Eco-Testing-Station is a construction at the institute that serves as a test site for analyzing natural and ecological materials [15,17,18]. The exterior walls are made of a wood structure filled and insulated with straw balls and finished with various types of clay and lime plasters. The preexisting site conditions and the available test area influenced layout, material and methods of the project. Non-ideal testing conditions listed below gave a more realistic approach (site and building constrains).

- **Orientation:** East. Not optimal for the PV production.
- **Limited space for the green façade:** fields with only 45 cm depth to install the troughs of the green façade.
- **Materials:** The materials used had to be ecological, simple, economical and readily available. Thus, the Eco-Testing-Station and test fields were constructed by researchers with the help of the institute’s staff and students.
- **Climate:** Temperate climatic zone with continental influences, colder winters and hotter summers with moderate precipitation throughout the year. Coldest month usually January. Winter snow from late December through March. Temperatures in summers of about 30 °C or more (35 °C in July). Summer evenings usually cool. Precipitations evenly distributed over the year, with April and November usually as the wettest periods. Driest months: May, September and the first half of October [22].

### 2.2. Test fields - description and systems variations

The BF was divided into four fields. Each field corresponds to a system’s variation, to achieve a better comparison and evaluation of the effects and impacts of a system with a GB and without a GB (Figs. 3–5).

The number of modules per field varies, depending on its size. They were mounted to cover, as best as possible, the test field sur-

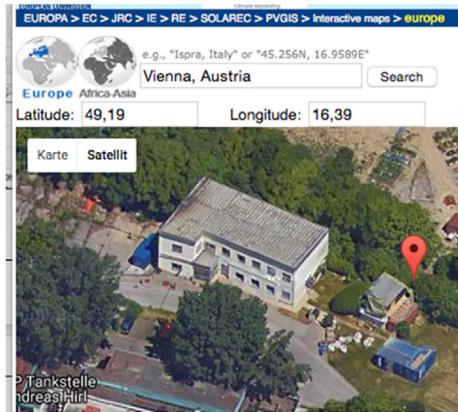


Figure 2: aerial view Eco-Testing-Station “Öko-Prüfstand”. Source: PVGIS-solarec-Europa.

**Location:**

Institute’s Eco-Testing-Station (“Öko-Prüfstand”) or test area.

- Address Vienna, Adolf-Blamauer-Gasse 1-3
- Orientation -59° East
- Inclination 90° Façade
- Latitude 49.190206°
- Longitude 16.392941°
- Altitude above 186 m
- Sea level
- Façade area: 14 m<sup>2</sup> (5.82 x 2.40m)

Fig. 2. aerial view Eco-Testing-Station “Öko-Prüfstand”.

Source: PVGIS-solarec-Europa.

**Table 1**

System variations and components. Each Field (F #) corresponds to a variation of the system.

Test Field (F)	F 1	F 2	F 3	F 4
Green buffer (GB) components	only PV (semitransparent)	reference (empty field)	PV + GF green façade (semitransparent)	PV + GF green façade (black)
Field area (m2)	3.5	3.5	3.5	3.5
PV area (m2)	2.16	–	2.56	1.66

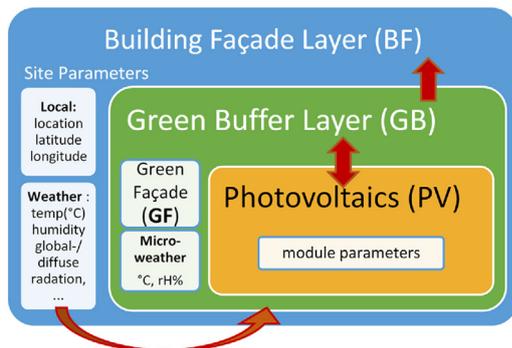


Fig. 3. Layers and interactions.

face. Two transparent PV modules of the same technology were mounted respectively in fields F1 and F3 (Table 1, Fig. 4).

2.3. Layers: layout and measurement devices

All testing surfaces were equipped with monitoring devices to control and save the data of the hygrometric parameters (temperature and humidity) for a posterior analysis. The Institute’s weather station established for monitoring purposes at the same site provided the weather data. The data was analyzed on an hourly basis (Table 2).

2.4. GB - the green buffer layer (BS-buffer space with a GF-green façade)

The green buffer (GB) is a semi-enclosed space, created when mounting PV-modules in front of the green façade (Fig. 5).

There are several systems for greening of façades. It is important to differentiate green façades from the term “green walls”, which is used to describe different methods and technologies to growing plants on, up, or against the façade of a building [14]. The most basic of building greening was tested, i.e. green facades, which consists of climbing plants (creepers, vines etc.) and a support or climbing frame [5,16,19,21] at the base of the wall (Table 3).

2.5. Data assessment – variables and objectives

All presented results correspond to the first period of research: from July 2015 to November 2016.

The assessment of the MFS was carried out using a broad-based approach (years, seasons, months and days) as well as a detailed hourly analysis, with the objective to obtain a comprehensive overview of the behavior of the system under different weather conditions throughout the year. In this way, the validated data confirmed under which conditions the system worked better. It also identified the constraints to be taken into account for its use.



Fig. 4. Test area distribution. The differences between the components of each field’s layout target the comparison of system-variations (fields – F#).

**Table 2**  
System Layers components and measurement devices. System (Fields) layers/measurement devices location.

Field/ Layer	F1* (only PV)	F2 (reference = empty)	F3* (PV+ green façade)	F4** (PV+ green façade)
Exterior	T/H	T/H	T/H	T/H
PV module (PV)	T	No	T	T
Buffer space	T/H	T/H	T/H	T/H
Green façade (GF)	No	No	Yes	Yes
Building façade (BF)	T	T	T	T
Inverter	Yes	No	Yes	Yes

(\*) Same technology, semitransparent. (T) Temperature device.

(\*\*) Different technology, black. (H) Humidity device.

**Table 3**  
Green facade components.

Support System	Greenery	Growing media	Irrigation system	Plant types
Wooden trellis and galvanized steel framework	Green façade establishes with climbing plants on wood troughs	Substrate used in green roof installations	SUMMER: with a typical home used irrigation system. WINTER: manual	Climbing plants: 1. Wisteria sinensis 2. Campis radicans 3. Leonicea henryi (added later- Nov.2015)



F3 – Green buffer (GB)



F4 - Temperature and Humidity Sensors, PV-Inverter



F4 – Green buffer (GB)



F3 – F4 Views  
July 2015



July 2016



July 2016

**Fig. 5.** F3 – F4 GB – pictures. Above: inside of the GB and view of the GF behind both types of PV-modules, semitransparent and standard. Below: comparison of the plants evolution in one year and outside view.

### 2.5.1. Time variables – time intervals used for the analysis

Besides the individual characteristics and parameters of the system and the site parameters, time variables play an important role for analyzing data. Specific time intervals (Fig. 6) and seasonal (Fig. 7) variables were utilized for the assessment of the data, in order to evaluate all possible time and weather scenarios.

A meteorological season is used for the analysis (Fig. 6). Meteorological seasons are based on the annual temperature cycle [23],

instead of astronomical seasons, which are based on the position of the Earth's orbit (equinoxes and solstices) [24].

## 3. Analysis

Table 4 below shows a list of the colors coding for the figures used in the analysis.

**Table 4**  
Color coding for the figures.

Color coding for the analysis (figures)				
<ul style="list-style-type: none"> <li>● max.F1-BF (°C)</li> <li>● a.F1-BF (°C)</li> <li>● min.F1-BF (°C)</li> </ul>	<b>F1</b>	only PV (empty buffer space)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● max.F4-BF (°C)</li> <li>● a.F4-BF (°C)</li> <li>● min.F4-BF (°C)</li> </ul>	<b>F4</b> GF + PV (standard)
<ul style="list-style-type: none"> <li>● max.F2-BF (°C)</li> <li>● a.F2-BF (°C)</li> <li>● min.F2-BF (°C)</li> </ul>	<b>F2</b>	reference	<ul style="list-style-type: none"> <li>● max.Temp (°C)</li> <li>● a.Temp (°C)</li> <li>● min.Temp (°C)</li> </ul>	outdoor air temperatures
<ul style="list-style-type: none"> <li>● max.F3-BF (°C)</li> <li>● a.F3-BF (°C)</li> <li>● min.F3-BF (°C)</li> </ul>	<b>F3</b>	GF + PV (semitransparent)		

Time Interval	Used for
<b>Direct radiation (sunlight)</b>	analysis of data depending on the sun light
<b>Day and night</b>	values with impacts only during the day or the night
<b>24-hours:</b>	values with daily impacts

Fig. 6. Time intervals used for the data-analysis.

Meteorological seasons	
<b>Spring</b>	March, April, May
<b>Summer</b>	June, July, August
<b>Autumn</b>	September, October, November
<b>Winter</b>	December, January, February

Fig. 7. Seasons variables.

To analyze and validate the effectiveness of the MFS, system variations were setup – systems with the same characteristics but one with a GF and one without a GF – and compare to a bare wall (reference field). In this way, it is possible to analyze the synergies

and influences of each component of the MFS –PV, GB, GF, BF – as well as the system as a whole (Fig. 8).

The data analyzed were filtered using the time intervals depending on the objectives of the analysis and its variables. In this way was possible the identification of regular and unusual behaviors and patterns under typical and unusual component’s influences and external parameters.

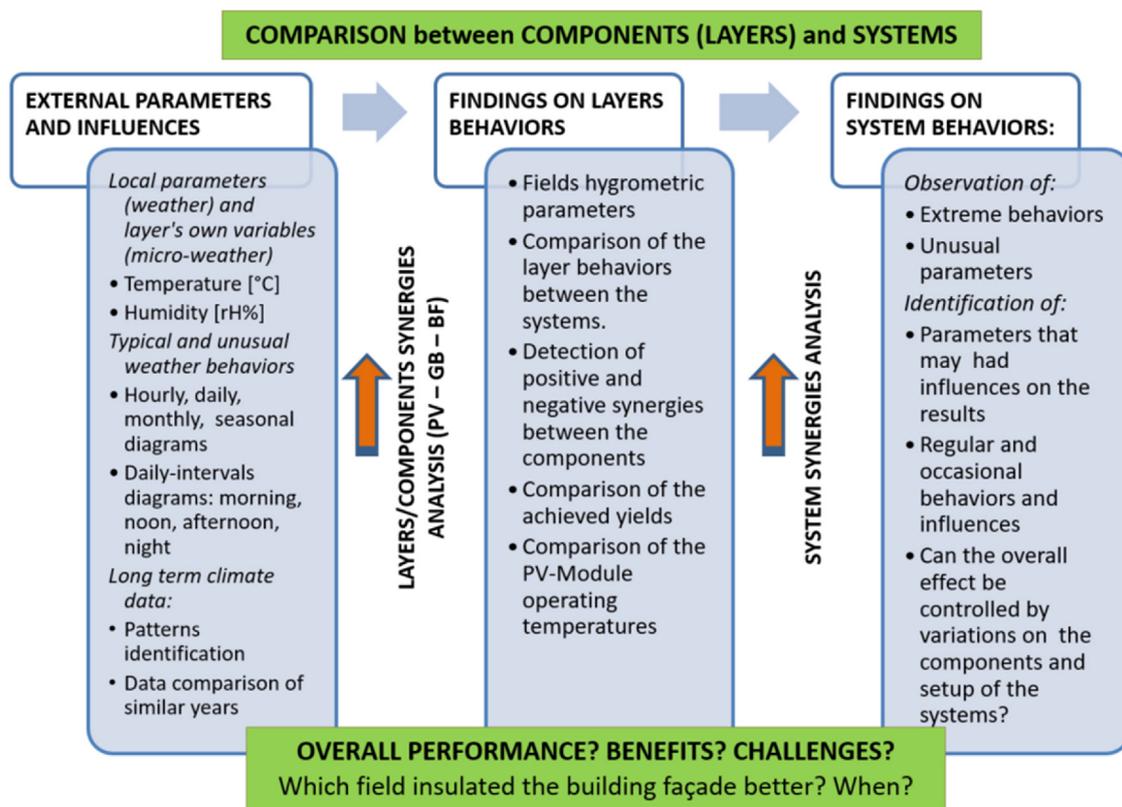


Fig. 8. Testing scheme of the system variations and its components.

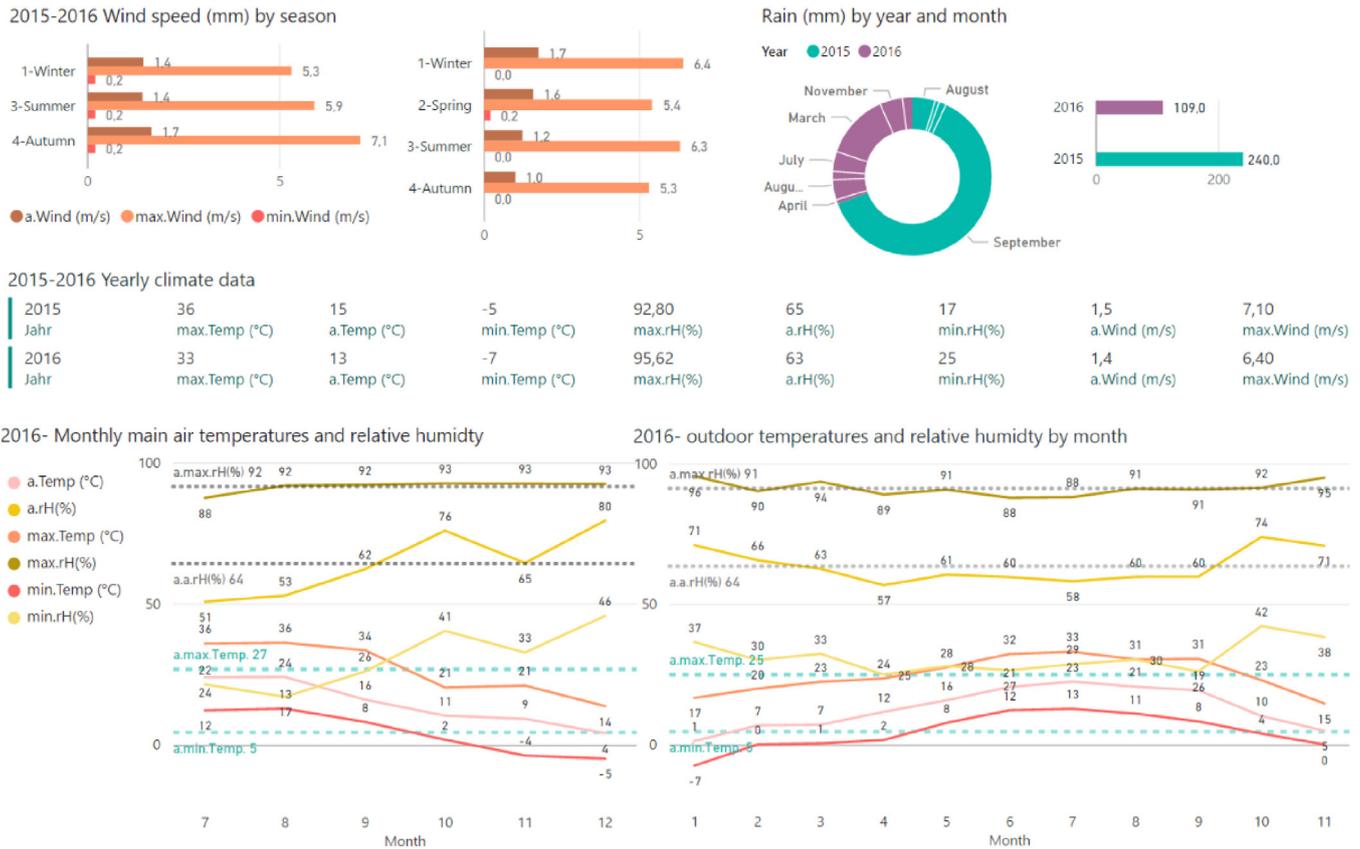


Fig. 9. 2015 – 2016 Climate data.

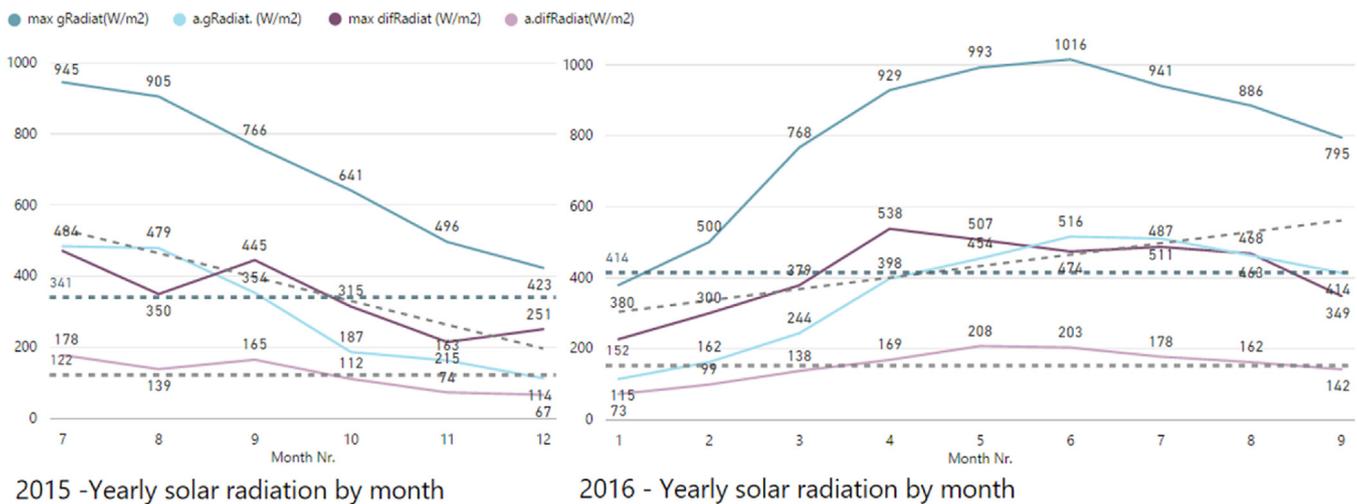


Fig. 10. Monthly values global and diffuse solar radiation.

For comparison purposes and when possible, values and graphs are placed side by side each other in the tables below.

3.1. Climate data overview

Milder temperatures were observed for 2016 with lower values than 2015 of up to 2 °C for the yearly maximum, average and minimum temperatures. Relative humidity was constant for 2016. A peak was noted in October 2015, a month which received more rainfall than all of 2016. Air temperature had greater monthly values in 2015 in July and August, of about 6 °C, and a peak in

September (Fig. 9). Yearly solar radiation: values more alike for the global solar radiation in both years, with greater values in 2016. The maximum value for diffuse solar with low and high peaks in both years, especially for August and September 2015 (Fig. 10).

3.2. Temperatures on the building façade – yearly overview

3.2.1. 24 h – temperatures average by month and year

Similar behaviors can be observed in the yearly overview by month, daylight and night time values (Figs. 10 and 11). The slopes of the trendlines are influenced by the solar radiation and the air

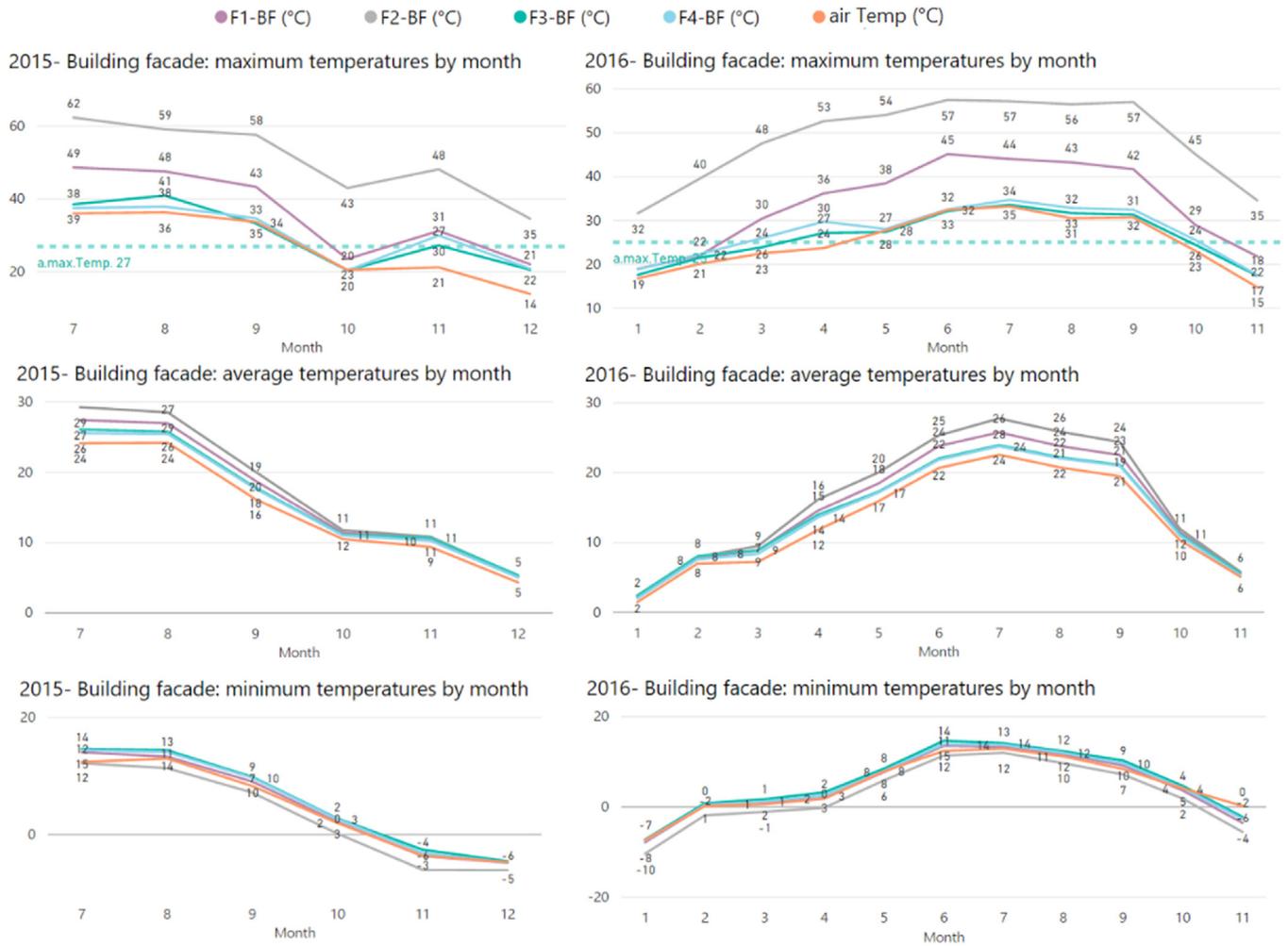


Fig. 11. Trend lines BF temperatures – Monthly mean maximum, average and minimum surface temperatures.

temperatures. The trendlines of the maximum temperatures values, clearly show the thermal insulation effect of the MFS on the BF (F3-F4). While the temperatures of both systems with a GF (F3-F4) show trend lines similar to the air temperatures (orange trend line), the trend lines of the reference system (F2) and the system with only PV (F1) show a sharpened increase in temperatures of about 20 °C and more. It is noteworthy how F3 and F4 stay stable during the day and show no rise in temperatures even when the outside air temperature is at its maximum.

The greatest changes in behavior are observed in reference system (F2), especially when outside temperatures are at their highest or lowest. For changes in air temperature, it showed increases in temperature of about 13 °C up to 24 °C for the maximum values and for the minimum values, the temperatures of F2 were even lower than the air temperatures, with differences of -3 °C, thereby underlining the sensitivity of a bare wall.

When looking at average temperatures, the trend lines reflect a measured effect and follow the air temperatures.

### 3.2.2. Daylight/Nighttime interval – temperatures average by month and year

Similar behaviors can also be observed in the during the daylight interval (Fig. 12). The trend lines of the reference system (F2) and the system with only PV (F1) are very influenced by the solar radiation and temperature increases through the day. The same behavior can be recognized on the average values, but in less

degree. Remarkable is the cooling down of the reference field (F2), when the temperatures drop below 0 °C.

F3-F4 showed almost no influence on the temperature with values more alike to the air temperatures (orange trend line) for all values, maximum, average and minimum.

For the minimum temperatures, all systems performed alike. F3 and F4 slight better than F1 (only PV).

The temperatures for the minimum values showed a behavior more alike of the daylight and 24 h' values. F3-F4 with temperatures slight higher in most cases than the air temperatures.

Lower temperature differences between the systems observed for the night time interval (Fig. 13). Temperature behaviors more alike were observed for almost all systems (F1-F3-F4), with exception of the reference field (F2).

F3-F4 showed also an insulation effect during the night interval. Even when the temperatures drop below 0 °C, F3 and F4 have better values than F1 and F2.

F2 showed a more alike behavior to F3 and F4 for the night values.

### 3.3. F3 vs F# system comparison - Temperature differences - average values by month and year

By the monthly average of temperatures differences, compare to the other systems – F1, F2 and F4-F3 showed a very good performance. Also by the total average value over 18 months,

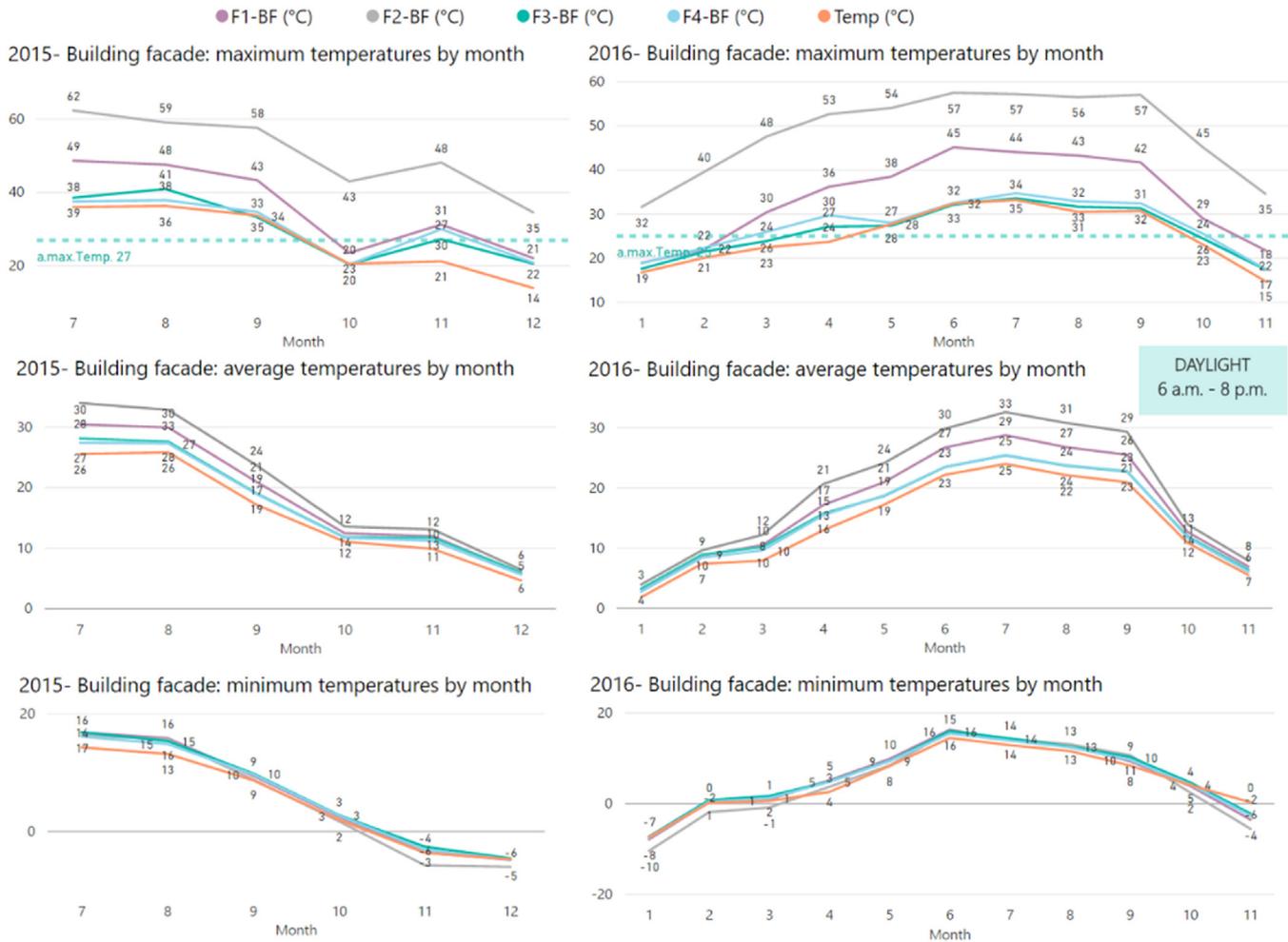


Fig. 12. Daylight values – Trend lines BF temperatures – Monthly mean maximum, average and minimum surface temperatures.

F3 showed notorious temperature differences respect F1 and F2 (Figs. 14 and 15).

The comparison of F3 with the other systems presents how often F3 had lower temperatures than the other systems, and illustrates the extent of insulation effect of the F3 system. The extent of these values can be observed from a yearly average perspective and becomes greater when analyzed further, as Figs. 14–19 shown.

The illustration of the F3 vs F# comparison data, ordered by the “top” greater values, by year and monthly average, illustrates that the insulation effect of the F3 occurs throughout the year, and not only during the summer. These values also reconfirm that the effect becomes more obvious over a longer period of time.

In the year 2015, both systems with a GF (F3-F4) had minimal temperature differences, with slight alternations in comparative performances. However, by 2016, F3 had outperformed the other fields most of the times, as showed the top values on Figs. 17 and 19.

#### 3.4. Winter time - system's behaviors - selected cases

For the maximum temperature values in winter, a similar behavior among the systems – F1, F3 and F4–was observed (Fig. 20). F2 exposed the sensibility to air temperature changes of a bare wall, with rapid gain or loss in temperature.

In winter, by temperatures below 0 °C a different response pattern was observed (Fig. 21), but with the same insulation effect. When temperatures dropped below the 0 °C, F1-F3-F4 prevented the cooling down of the BF, showing a good insulation performance.

Between both systems with a GB, F3 performed slightly better than F4, with differences ranging from about 0.1 °C up to 1.1 °C. In comparison, F3 vs F2 (reference system-bare wall), the temperature differences ranged up to 2 °C. See details in Table 5 below.

Winter behavior: The systems F1, F3 and F4 reduced the cooling down effect of F2 (reference field-bare wall). The most positive response showed F3 and F4, with temperatures differences from about 2 °C up to 3.6 °C (Fig. 22).

#### 3.5. Hourly analysis BF temperatures by year

The peaks on the slopes observed in the hourly analysis (Fig. 23) correspond to the time interval when the sunlight hits the BF, i.e. in the morning, due to the East orientation.

Important changes in behavior were observed for maximum temperatures of F2, what reflected the vulnerability of a bare wall. Temperatures were up to 34 °C above the air temperature (Fig. 23).

#### 3.6. Hourly analysis BF temperatures by season

The hourly analysis revealed (Figs. 23–27) the impact of direct sunlight on the wall. The smooth trend line slope of F3 shows its thermal insulation, in comparison to F1 and F2, which show a sharp increase in temperature during the hours where the sunlight hits the wall directly.

The morning sharp slopes of F1 and F2 gradually decreased through the afternoon until the evening, where they reached tem-

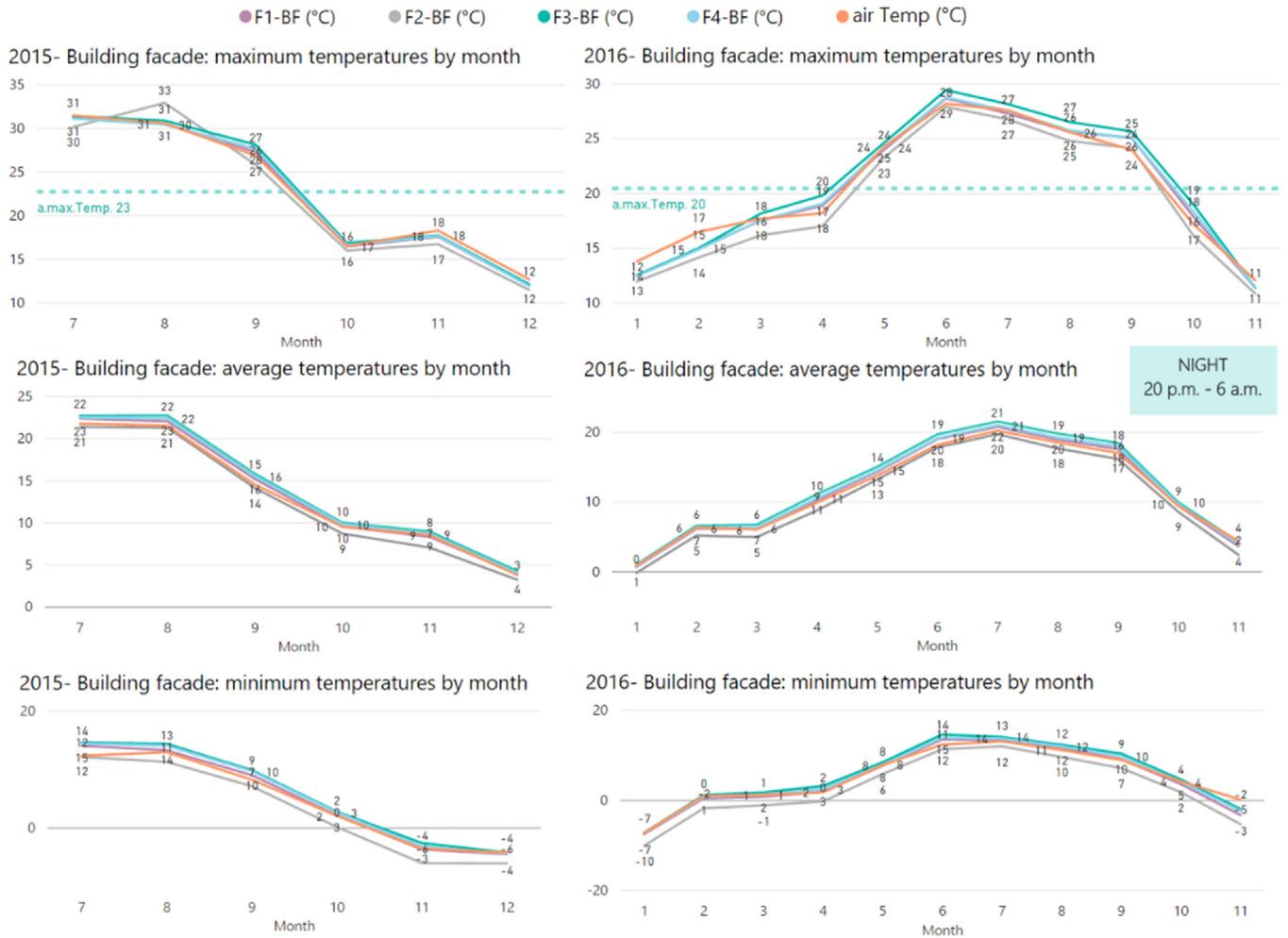
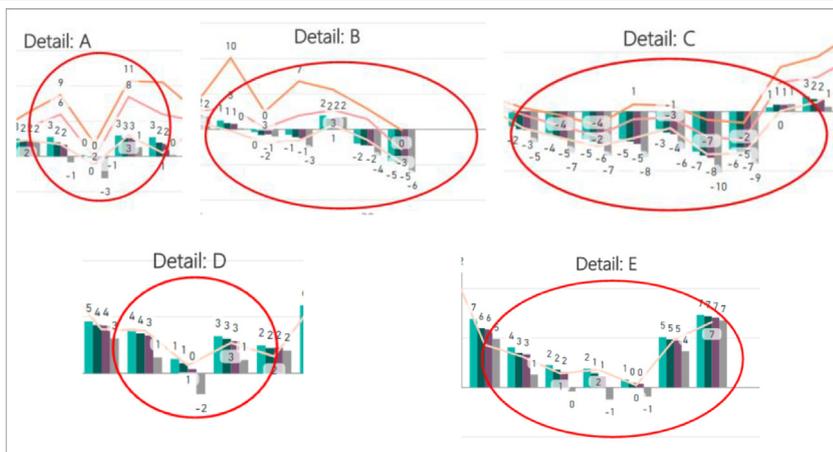


Fig. 13. Nighttime values – Trend lines building facade temperatures – Monthly mean maximum, average and minimum surface temperatures.

Table 5

Winter 2015, in the graphic sections below, the degree of the insulation effect for temperatures under  $-4^{\circ}\text{C}$  can be observed, during the months of December 2015, January and February 2016.



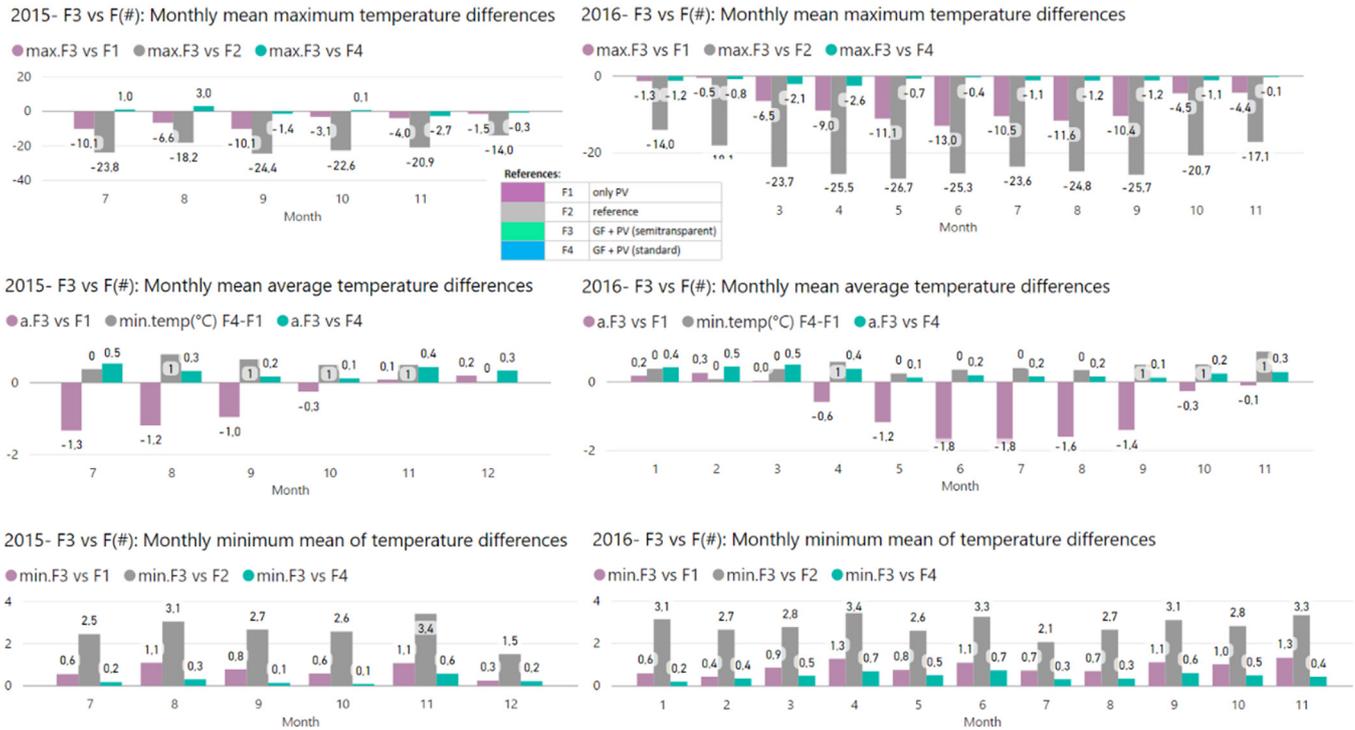


Fig. 14. F3 vs F(##) System temperatures comparison. The significant temperature differences of F3, especially for maximum temperatures, demonstrate the thermal insulation effect of the system on the building façade. This effect takes place for extreme higher and lower temperatures.

2015-16 (F3-F#) System comparison. Temperature differences by monthly average

Year	Month	max.F3 vs F1	a.F3 vs F1	min.F3 vs F1	max.F3 vs F2	a.F3 vs F2	min.F3 vs F2	max.F3 vs F4	a.F3 vs F4	min.F3 vs F4
2015	7	-10,1	-1,3	0,6	-23,8	-3,2	2,5	1,0	0,5	0,2
2015	8	-6,6	-1,2	1,1	-18,2	-2,7	3,1	3,0	0,3	0,3
2015	9	-10,1	-1,0	0,8	-24,4	-2,3	2,7	-1,4	0,2	0,1
2015	10	-3,1	-0,3	0,6	-22,6	-0,6	2,6	0,1	0,1	0,1
2015	11	-4,0	0,1	1,1	-20,9	-0,1	3,4	-2,7	0,4	0,6
2015	12	-1,5	0,2	0,3	-14,0	0,1	1,5	-0,3	0,3	0,2
2016	1	-1,3	0,2	0,6	-14,0	0,0	3,1	-1,2	0,4	0,2
2016	2	-0,5	0,3	0,4	-18,1	0,1	2,7	-0,8	0,5	0,4
2016	3	-6,5	0,0	0,9	-23,7	-0,6	2,8	-2,1	0,5	0,5
2016	4	-9,0	-0,6	1,3	-25,5	-2,2	3,4	-2,6	0,4	0,7
2016	5	-11,1	-1,2	0,8	-26,7	-2,7	2,6	-0,7	0,1	0,5
2016	6	-13,0	-1,8	1,1	-25,3	-3,3	3,3	-0,4	0,2	0,7
2016	7	-10,5	-1,8	0,7	-23,6	-3,8	2,1	-1,1	0,2	0,3
2016	8	-11,6	-1,6	0,7	-24,8	-3,7	2,7	-1,2	0,2	0,3
2016	9	-10,4	-1,4	1,1	-25,7	-3,3	3,1	-1,2	0,1	0,6
2016	10	-4,5	-0,3	1,0	-20,7	-0,7	2,8	-1,1	0,2	0,5
2016	11	-4,4	-0,1	1,3	-17,1	-0,2	3,3	-0,1	0,3	0,4
<b>Total</b>		<b>-7,7</b>	<b>-0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>-21,4</b>	<b>-1,8</b>	<b>3,1</b>	<b>3,0</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>

Fig. 15. F3 vs F(##) System temperatures comparison – monthly average. The thermal insulation effect is seen on F3 in comparison to the other systems, especially to the reference wall (F2) and to the system without a GF (F3).

peratures similar to the air temperature. From the evening until dawn, all system's temperatures remain similar with slightly temperature differences.

Autumn and winter: during average and minimum temperatures, the fields F3, F4 and F1 have almost the same performance and insulated the wall from abrupt changes in air temperatures (Figs. 25 and 26). For maximum temperatures however, the behavior differs, as autumn behavior follows that of summer (Fig. 24).

Despite the obvious similarities in behavior through the seasons, differences can be observed. Lower temperatures have a greater impact on the F2 system, follow by F1, F4 and F3. F3 and F4 limit

the impact of the cold down when the temperature is at its lowest, by almost 2 °C.

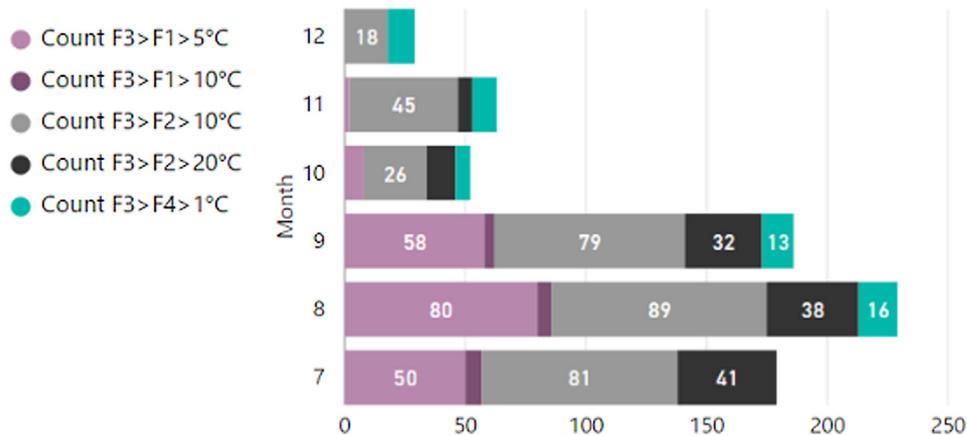
During the nighttime (8 p.m.–6 a.m.) air temperature changes are mitigated by F3-F4, but reflected by F1-F2, as can be seen in (Figs. 23–27).

The most important changes in the behavior of the BF temperatures occur during the morning, due to the East orientation, as shown in Fig. 23 (year overview). The time interval where the most important heat gains occur is between 9 a.m. and 11 a.m. Fig. 28 shows a detailed comparison of the systems for every hour of time interval. The values in the figure also confirm the previous analyzes.

## System Comparison 2015

Frequency of temperature fluctuations between F3 vs F#

Month	Count F3>F1>5°C	Count F3>F1>10°C	Count F3>F2>10°C	Count F3>F2>20°C	Count F3>F4>1°C
7	50	7	81	41	
8	80	6	89	38	16
9	58	4	79	32	13
10	8		26	12	6
11	2		45	6	10
12			18		11
<b>Total</b>	<b>198</b>	<b>17</b>	<b>338</b>	<b>129</b>	<b>56</b>



**Fig. 16.** 2015 – System comparison of F3 to F#. Frequency of the temperature differences in the indicated ranges by month. The figure represents the stability of the temperatures maintained in the F3 system as compared with the other systems, due to the positive effect of the PV/GF throughout the year. Graphic representation of these values is also included. The column head shows the reference temperatures used for this comparison and the frequency of temperature variations in the month.

### 2015 - Top values F3 temp. < F# temp

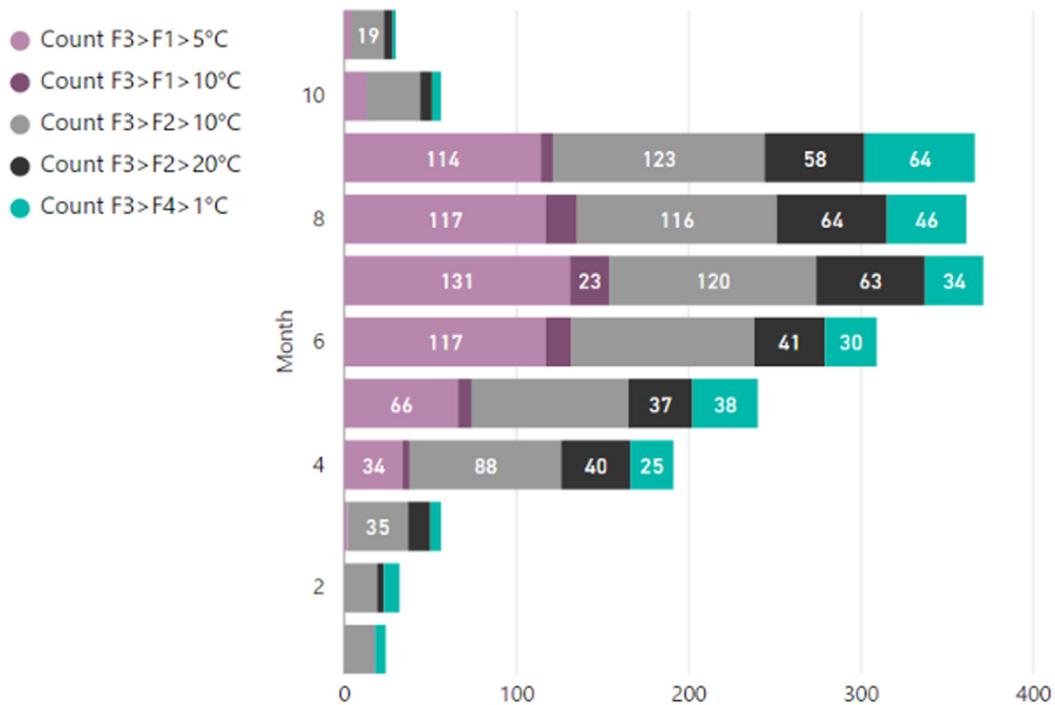
Year	Month.	F3 vs F1	Year	Month.	F3 vs F2	Year	Month.	F3 vs F4
2015	September	-11,6	2015	July	-10,0	2015	November	-4,3
2015	September	-11,6	2015	August	-10,1	2015	November	-4,1
2015	September	-10,8	2015	November	-10,1	2015	December	-3,5
2015	September	-10,4	2015	September	-10,1	2015	December	-3,3
2015	July	-11,8	2015	August	-10,1	2015	December	-3,3
2015	July	-11,2	2015	October	-10,2	2015	December	-3,2
2015	July	-10,6	2015	September	-10,2	2015	December	-3,1
2015	July	-10,6	2015	October	-10,2	2015	December	-3,1
2015	July	-10,4	2015	October	-10,3	2015	December	-3,0
2015	July	-10,2	2015	October	-10,4	2015	November	-2,7
2015	July	-10,2	2015	September	-10,4	2015	November	-2,7
2015	August	-12,7	2015	September	-10,4	2015	September	-2,1
2015	August	-12,3	2015	September	-10,5	2015	October	-2,0
2015	August	-11,8	2015	November	-10,5	2015	August	-1,9
2015	August	-11,6	2015	November	-10,6	2015	August	-1,9
2015	August	-11,0	2015	September	-10,6	2015	November	-1,8
2015	August	-10,0	2015	December	-10,7	2015	August	-1,8

**Fig. 17.** 2015 – Top values – F3 < temperature of other systems.

## System Comparison 2016

Frequency of temperature fluctuations between F3 vs F#

Month ▲	Count F3>F1>5°C	Count F3>F1>10°C	Count F3>F2>10°C	Count F3>F2>20°C	Count F3>F4>1°C
1			18		6
2			19	4	9
3	2		35	13	6
4	34	4	88	40	25
5	66	8	91	37	38
6	117	15	106	41	30
7	131	23	120	63	34
8	117	18	116	64	46
9	114	7	123	58	64
10	13		31	7	5
11	4		19	5	2
<b>Total</b>	<b>598</b>	<b>75</b>	<b>766</b>	<b>332</b>	<b>265</b>



**Fig. 18.** 2016 – System comparison of F3 to F#. Frequency of the temperature differences in the indicated ranges by month. This figure represents the stability of the temperatures maintained in the F3 system as compared with the other systems, due to the positive effect of the PV/GF throughout the year. Graphic representation of these values is also included. The column head shows the reference temperatures used for this comparison and the frequency of temperature variations in the month.

### 4. Results

The analysis showed the impact and the direct relation of the solar radiation and the air temperatures on BF temperatures. The systems variations' comparison exposed the different degree of insulation of the systems, and validate the better performance of the systems with a GB.

#### 4.1. F3-F4, thermal insulation effect

The thermal insulation effect of the MFS on the building façade is clearly demonstrated by the behavior of F3 and F4, which matched outside air temperatures on average throughout the year, even with abrupt changes in air temperature or heat gains due to solar gains.

While a more rapid impact was felt by the other systems (F1 and F2), where a sudden rise or fall in temperature was observed, most noticeably in F2.

Temperature reductions of up to 30 °C and an average of 21.4 °C for the maximum temperatures were observed. Benefits are higher under higher air temperatures. In winter, it limits the cooling down effect of the wall by about 3 °C on average when air temperatures drop below 0 °C.

Because of the orientation of the test-field (East) – direct sunlight hits only during the morning hours – consequently, it is expected that for a South, South-West or West oriented façade, the thermal insulation effect will be greater. Other orientations accumulate greater heat gains throughout the day than the East-

2016 - Top values F3 temp.<F# temp

Year	Month.	F3 vs F1	Year	Month.	F3 vs F2	Year	Month.	F3 vs F4
2016	September	-12,5	2016	August	-31,2	2016	January	-4,8
2016	September	-11,4	2016	September	-31,0	2016	April	-4,1
2016	September	-11,0	2016	August	-30,3	2016	April	-3,9
2016	September	-10,9	2016	April	-30,3	2016	February	-3,7
2016	September	-10,9	2016	August	-30,2	2016	February	-3,5
2016	September	-10,7	2016	August	-30,0	2016	March	-3,5
2016	September	-10,3	2016	August	-29,9	2016	February	-3,4
2016	May	-13,8	2016	May	-29,8	2016	February	-3,0
2016	May	-13,8	2016	August	-29,5	2016	February	-2,9
2016	May	-13,3	2016	May	-29,4	2016	April	-2,7
2016	May	-11,6	2016	April	-29,3	2016	January	-2,6
2016	May	-11,6	2016	August	-29,3	2016	April	-2,6
2016	May	-11,4	2016	May	-29,3	2016	January	-2,5
2016	May	-11,2	2016	August	-29,2	2016	April	-2,3
2016	May	-10,1	2016	April	-29,2	2016	March	-2,2
2016	June	-15,1	2016	August	-29,2	2016	April	-2,2
2016	June	-15,1	2016	April	-29,2	2016	April	-2,2
2016	June	-15,0	2016	August	-29,1	2016	October	-2,1
2016	June	-15,0	2016	April	-29,0	2016	August	-2,1
2016	June	-14,9	2016	August	-28,8	2016	Septe...	-2,1
2016	June	-14,6	2016	September	-28,8	2016	January	-2,1
2016	June	-14,4	2016	August	-28,8	2016	April	-2,0
2016	June	-14,0	2016	September	-28,8	2016	August	-2,0
2016	June	-12,4	2016	September	-28,6	2016	July	-1,9
2016	June	-12,1	2016	August	-28,6			

Fig. 19. 2016 Top values – F3 < temperature of other systems.

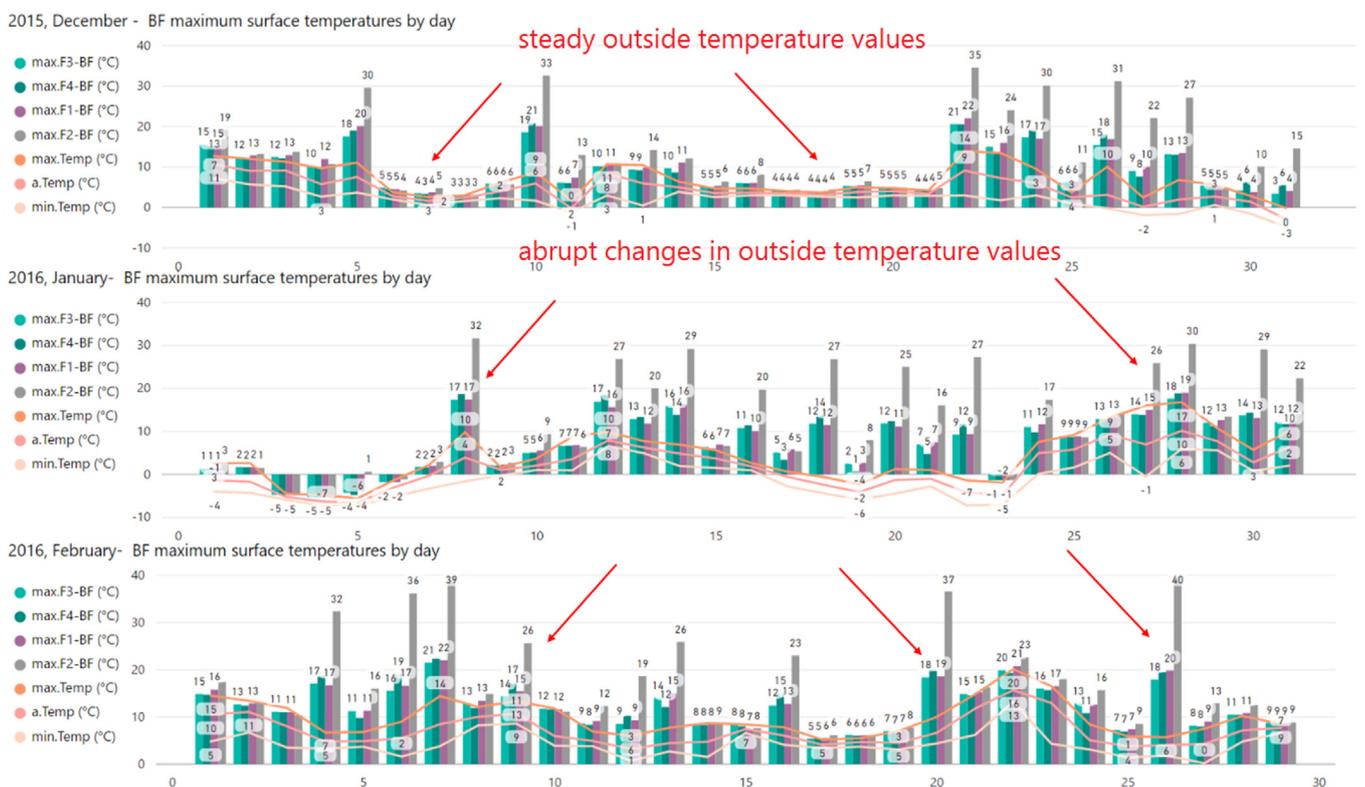


Fig. 20. Behavior example of winter temperatures. For the values of maximum temperatures in the BF, the values more alike between the systems. F2 exposed the sensibility to temperature changes of a bare wall. The values correspond to: December 2015, January and February 2016.



Fig. 21. Winter 2015 – daily average minimum BF surface temperatures. The values correspond to: December 2015, January and February 2016.

orientation, since the sunlight hits them directly for a longer period of time and at the hottest hours of the day.

While the thermal insulation effect of F3 and F4 is a desirable effect for the summer, i.e. the façade does not become overly heated and maintains a temperature similar to that of the air, for the winter further research is needed. Next step is a heat gain balance of the BF. It is expected a good energy balance, since the MFS also controlled the heat losses of the BF by very low air temperatures.

#### 4.2. F3-F4 systems differences (green buffer)

Slight differences between both systems with a green façade (GF) were noted, especially when examined over a period of time. While F3 and F4 maintained an almost parallel performance in 2015, F3 clearly established itself as a more stable insulation system in 2016. The reason behind these differences requires further research. It also exposes that slight variations on the components of the system, have an impact on the behavior of the MFS. Further research is needed to identify and control the influences in this issue.

#### 4.3. F2-Reference (bare wall)

The reference wall (F2) was directly influenced by air temperature changes in all the periods analyzed, especially when temperatures were at their maximum and minimum throughout the year. With temperatures above 0°C, the F2 surface temperatures stay above the minimum air temperatures. When air temperatures dropped below 0°C, F2 presented even lower temperatures than the air temperatures, as shown in Table 5.

#### 4.4. F1-only PV

F1 system also showed a measurable insulation effect on the BF. However, it was more susceptible to temperature fluctuations and

the performance was not comparable in magnitude to the systems with a GB (F3 and F4).

While its performance was behind F3-F4, it improved during the colder months. However, it still did not match the MFS.

## 5. Conclusions

- **Protection:** The MFS clearly protects itself and its components (PV and BF) from extreme temperatures as well as sharp fluctuations. Both F3 and F4 maintained temperatures similar to air temperatures in both summer and winter (including high and low), as well as in milder temperatures. Abrupted changes in temperature were almost not noticed by the systems with a GB. The systems behavior exhibited a measured, steady reaction, thereby demonstrating a good thermal insulation to the building façade against air temperature changes.
- **Annual and all-weather:** The benefits of the MFS can be observed throughout the year, and not only during the summer. The system absorbed and neutralized the impact of abrupt changes in temperatures throughout the year. It is noteworthy that the bare wall was in average 24°C and up to 30° higher in temperature than the air temperature.
- **Impact on BF temperature:** The system achieved average reductions of 21.4°C up to 30°C for the maximum temperatures observed in summer. The insulation effect was better observed in higher temperatures. In winter, the system inhibited heat loss on the wall up to 3°C on average in comparison to the other systems, when the air temperature dropped below 0°C.
- **Further research:** Further research needs to be done to assess whether the insulation effect of the MFS (F3-F4), in the cold seasons of the year; winter and autumn, can represent a positive balance for heat gain and losses on the BF. The slight differences on the behavior of both systems with a GB also need further analysis.

F3-F# Temperature differences for air temperatures below 2°C

Year	Month	Day	min temp BF F2 (°C)	min temp BF F3 (°C)	min temp BF F1 (°C)	min temp BF F4 (°C)	F3-F2	F3-F1	F3-F4	min air temp (°C)
2015	Dezember	10	-0.8	2.8	1.6	2.0	3.6	1.1	0.8	2
2016	Januar	22	-10.3	-6.8	-7.8	-7.4	3.6	1.0	0.7	-7
2015	November	23	-2.1	1.4	0.5	0.8	3.5	1.0	0.7	1
2016	April	29	-0.2	3.3	2.0	2.7	3.5	1.3	0.5	2
2016	April	26	-0.2	3.2	2.1	2.5	3.4	1.2	0.7	2
2015	November	25	-6.0	-2.6	-3.6	-3.1	3.4	1.1	0.6	-4
2016	November	15	-5.5	-2.2	-3.5	-2.6	3.3	1.3	0.4	N/A
2015	Dezember	11	-3.1	0.2	-0.8	-0.2	3.3	0.9	0.4	-1
2016	Januar	21	-6.3	-3.0	-3.8	-3.5	3.3	0.8	0.6	-3
2016	Januar	18	-7.0	-3.7	-4.7	-4.2	3.3	0.9	0.5	-4
2015	November	3	-0.8	2.5	1.3	2.1	3.2	1.2	0.3	1
2015	November	24	-3.1	0.1	-0.9	-0.6	3.2	1.0	0.7	-1
2016	Februar	12	-1.9	1.3	0.4	0.9	3.1	0.9	0.4	1
2016	Februar	26	-1.2	1.9	1.1	1.4	3.1	0.8	0.5	2
2016	Januar	20	-7.7	-4.7	-5.5	-5.0	3.1	0.8	0.4	-5
2016	November	4	-1.8	1.2	0.1	0.8	3.0	1.1	0.4	0
2016	März	17	-1.0	1.9	1.0	1.4	2.9	0.9	0.5	1
2016	November	14	-2.7	0.2	-0.8	-0.1	2.9	1.0	0.3	0
2016	März	10	-1.1	1.8	0.8	1.3	2.9	1.0	0.5	1
2016	Januar	19	-7.5	-4.7	-5.5	-5.2	2.8	0.9	0.5	-6
2016	Januar	17	-5.2	-2.5	-3.2	-3.0	2.7	0.7	0.5	-3
2016	März	9	-1.0	1.7	1.1	1.2	2.7	0.6	0.5	2
2016	Februar	25	-0.4	2.3	1.6	1.8	2.7	0.7	0.4	1
2016	März	14	-0.1	2.6	1.9	2.0	2.7	0.7	0.6	2
<b>Total</b>			<b>-10.3</b>	<b>-7.2</b>	<b>-7.8</b>	<b>-7.4</b>	<b>3.1</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>	<b>-7</b>

Fig. 22. BF temperatures and temperatures differences of F3 compare to the other systems (F3-F#). Values for air temperatures below 2 °C.

Hourly values BF-temperatures by year

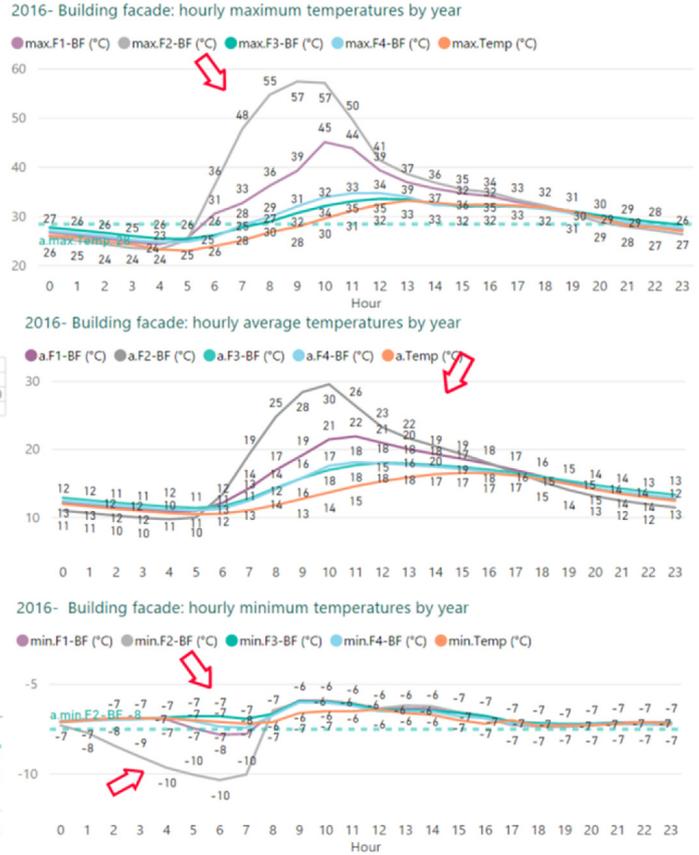
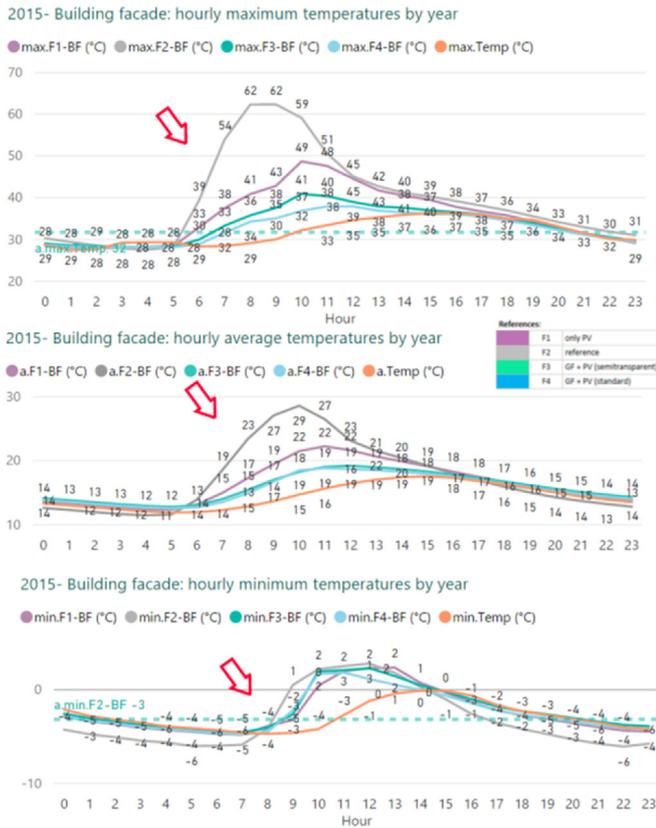


Fig. 23. Hourly analysis of building facade temperatures. Maximum, average and minimum values by year. The trend lines slopes in the figures above show the impact of the direct and indirect sunlight throughout the day. Maximum, average and minimum temperature values for the sunlight hours (6 a.m.–8 p.m.) are used.

SUMMER - hourly values BF-temperatures by season

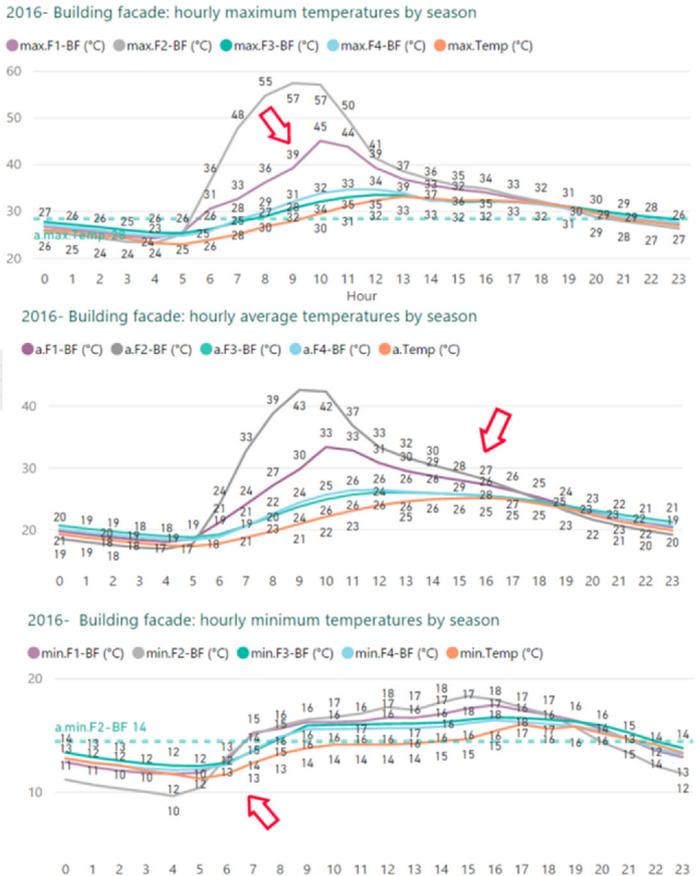
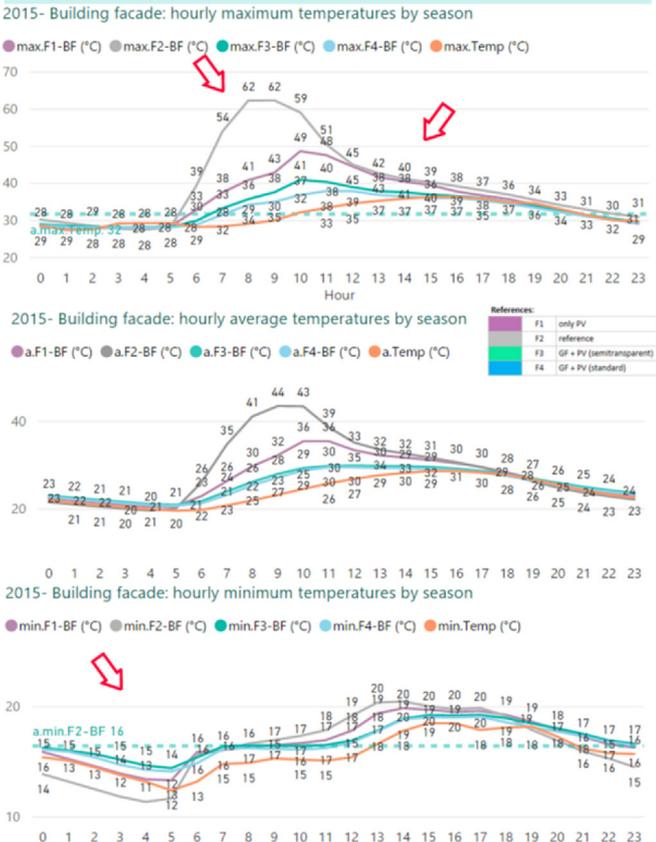


Fig. 24. Hourly analysis of building facade temperatures. The trend lines slopes in the figure above show the impact of the direct and indirect sunlight throughout the day for the summer.

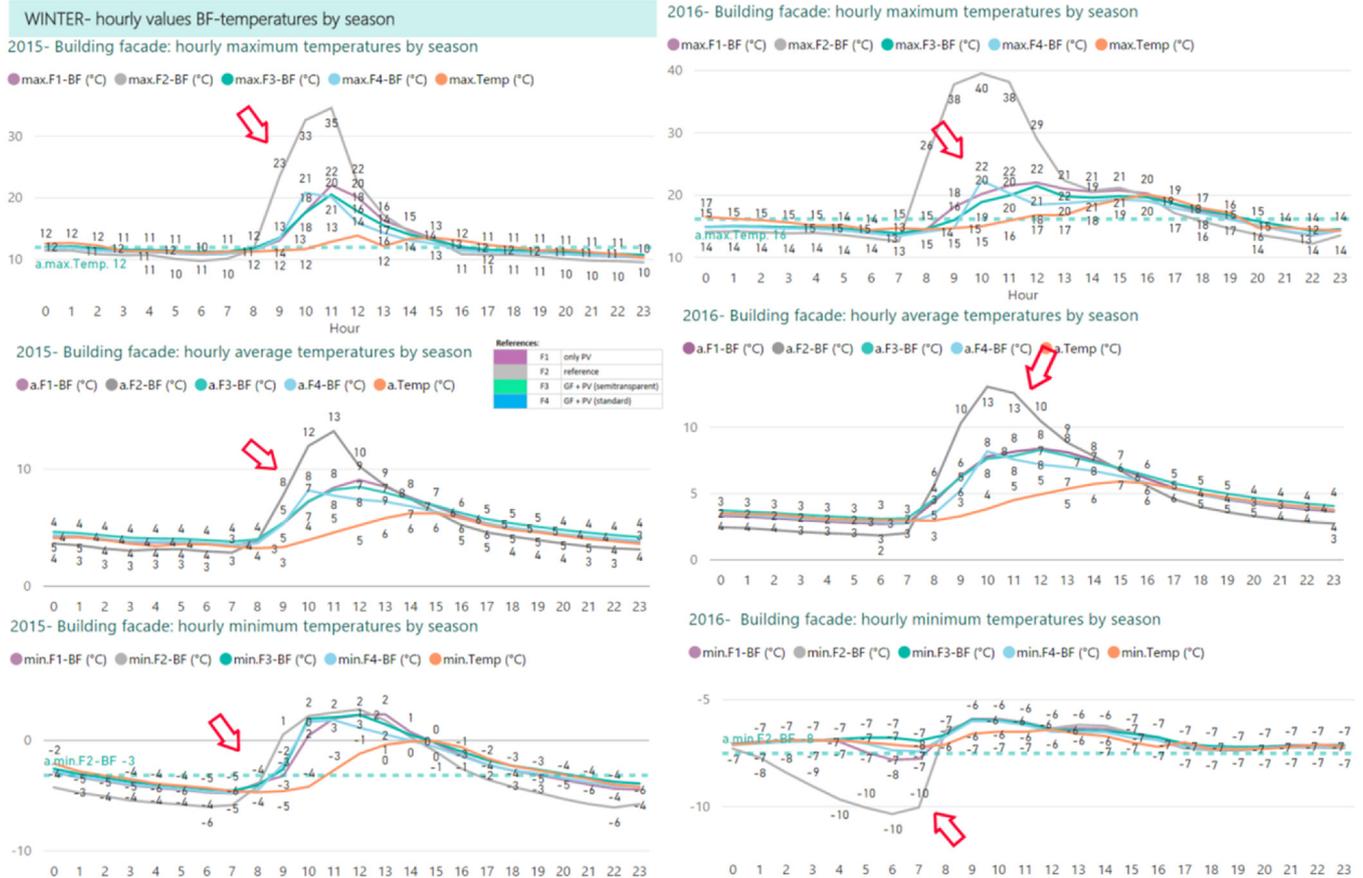


Fig. 25. Hourly analysis of building facade temperatures. The trend lines slopes in the figure above show the impact of the direct and indirect sunlight throughout the day for the winter.

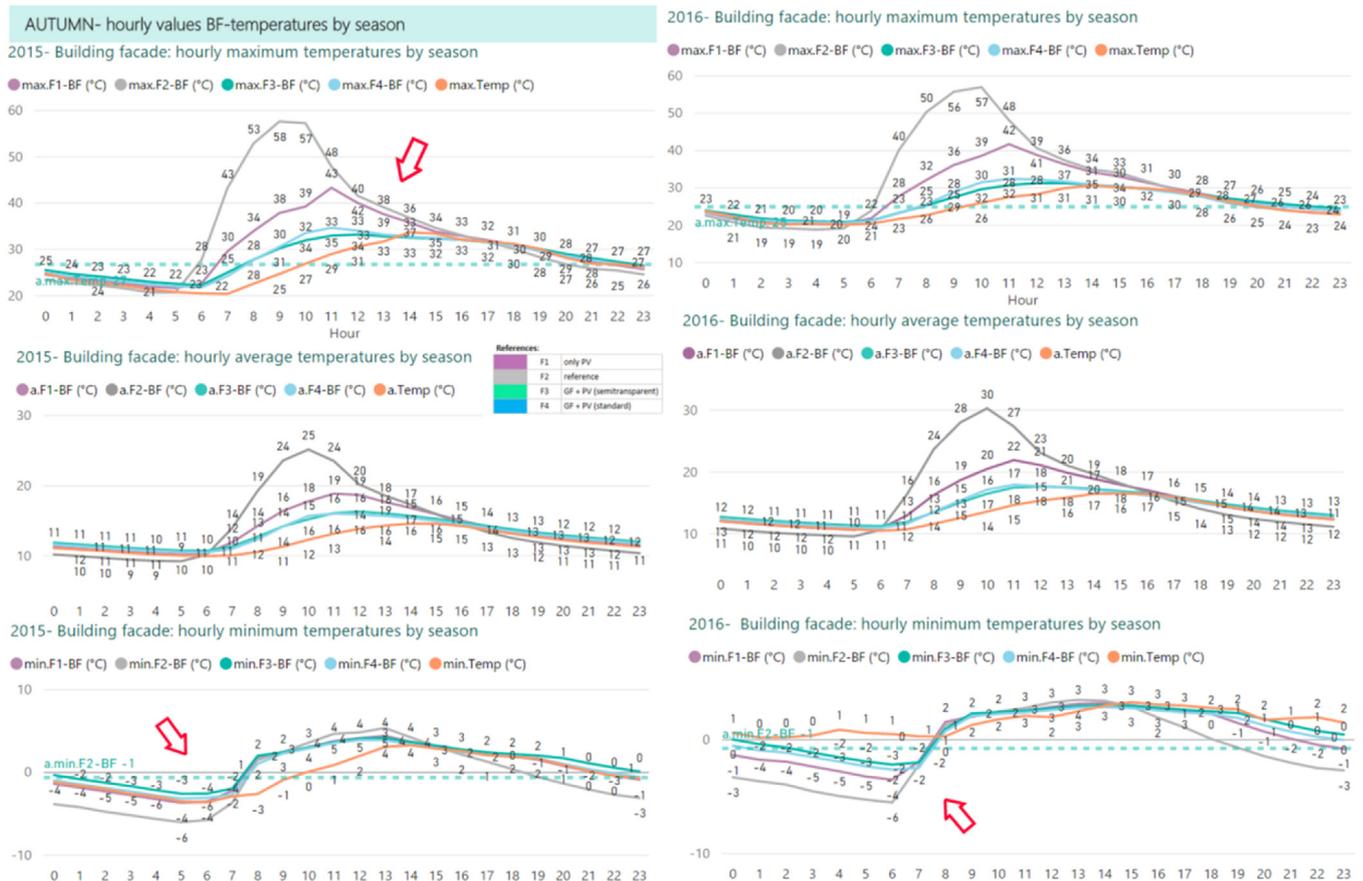


Fig. 26. Hourly analysis of building facade temperatures. The trend lines slopes in the figure above show the impact of the direct and indirect sunlight throughout the day for the autumn.

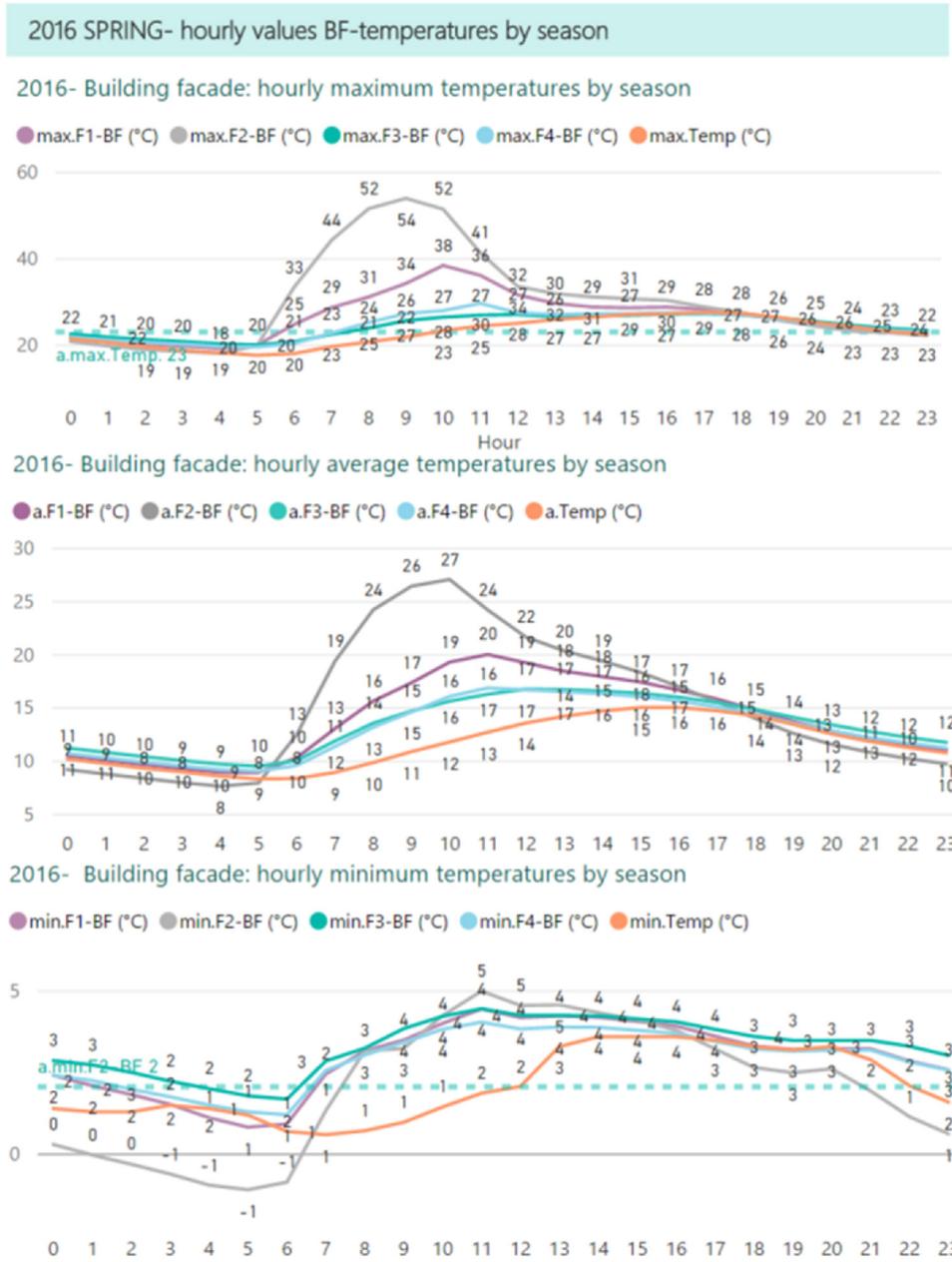


Fig. 27. Hourly analysis of building facade temperatures. The trend lines slopes in the figure above show the impact of the direct and indirect sunlight throughout the day for the spring (no data available for spring 2015).

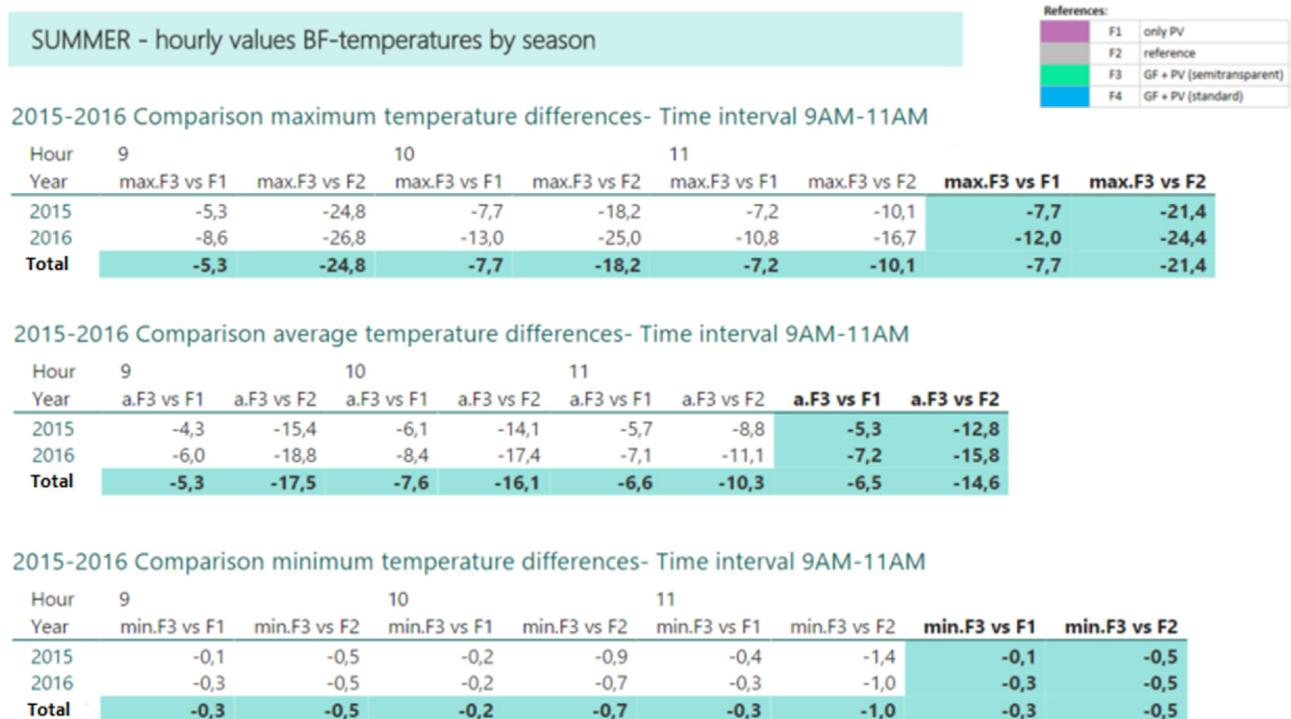


Fig. 28. Comparison temperature differences by year and time interval (9 a.m.–11 a.m.).

## Acknowledgments

This research was developed in the course of “GrünPlusSchule@Ballungszentrum” project, which is supported by the Austrian Ministry of Transport, Innovation and Technology (BMVIT) and the Austrian Research Promotion Agency (FFG) under the project number 850124. The second year on research is funded by the Federal Ministry for Science, Research and Economy (Forschungsstipendium – Österreichische Graduierte – Beihilfen für Zwecke der Wissenschaft – Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft).

The authors would like to thank to ATB-BECKER green technologies e.U [25], which provided the PV system.

## References

- [1] A. D.Tilley, A. Alexander, C. Chang, A. Price, B. Welch, S. Wells, Tjadem Green Facades: Ecologically Designed Vertical Vegetation Helps Create a Cleaner Environment, University of Maryland Extension and the Department of Environmental Science and Technology, 2014, Publication FS-978.
- [2] J. Maas, R.A. Verheij, P.P. Groenewegen, P. S.Vries, Spreuunberg Green space, urbanity, and health: how strong is the relation? *J. Epidemiol. Commu. Health* 60 (2006) 587–5927.
- [3] N. Pfoster Energieeffizientes Bauen mit begrünten Fassaden. 7. FBB-Symposium Fassadenbegrünung. (2014), 31–32.
- [4] A. Othman, S. Ridzwan, Norshamira vertical greening façade as passive approach in sustainable design, *Proc.-Soc. Behav. Sci.* 222 (2016) 845–854.
- [5] M. Manso, J. Castro-Gomes, Green wall systems: a review of their characteristics, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41 (2015) 863–871.
- [6] J. Coma, G. Pérez, A.de Gracia, S. Burés, M. Urrestarazu, L.F. Cabeza, Vertical greenery systems for energy savings in buildings: a comparative study between green walls and green facades, *Build. Environ.* 111 (2017) 228–237.
- [7] A. Antonyová, P. Antony, A. Korjenic, Evaluation the hygrothermal effects of integration the vegetation into the building envelope, *Energy Build.* 136 (2017) 121–138, ISSN 0378-7788.
- [8] A. Korjenic, Bauphysikalische Wirkung von begrünten Fassaden/Building physical effects of green facades. ÖIAZ – Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (invited), 159, Book 1–12/2014, 2015, 223–227.
- [9] C.Y. Cheng, Ken K.S. Cheung, L.M. Chu, Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls, *Build. Environ.* 45 (8) (2010) 1779–1787.
- [10] D. Tudiwer, A. Korjenic, The effect of living wall systems on the thermal resistance of the facade, *Energy Build.* 135 (2017) 10–19.
- [11] I. Susorova, Green façades and living walls: vertical vegetation as a construction material to reduce building cooling loads, *Eco-Eff. Mater. Mitig. Build. Cool. Needs* (2015) 127–153.
- [12] H. Feng, K. Hewage, Energy saving performance of green vegetation on LEED certified buildings, *Energy Build.* 75 (2014) 281–289.
- [13] G. Perez, J. Coma, I. Martorell, L.F. Cabeza, Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39 (2014) 139–165.
- [14] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (publisher), Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung: Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung. Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung, 2010, 30–31.
- [15] A. Korjenic Energy Globe Wien für das Bauen mit Öko-Materialien. <http://www.energie-bau.at/bauen-sanieren/2164-energy-globe-wien-fuer-das-bauen-mit-oeko-materialien>. (Accessed on 20 August 2015).
- [16] Pfoster, N., Gebäude Begrünung Energie: Potenziale und Wechselwirkungen. Leitfaden als Planungshilfe, 2015, 92–94, 114.
- [17] M.S.A. Penaranda Korjenic, Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules – multifunctional system: building greening and photovoltaic, *Energy Build.* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.051>.
- [18] A. Korjenic, V. Petránek, J. Zach, J. Hroudova, Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources, *Energy Build.* 43 (9) (2011) 2518–2523.
- [19] UK Green Wall Association Types of green wall, [www.urbangreening.info/green-wall-types](http://www.urbangreening.info/green-wall-types). (Accessed on 15 June 2016).
- [20] [www.gebaeudekuehlung.de/SenStadt.Regenwasser.dt.gross.pdf](http://www.gebaeudekuehlung.de/SenStadt.Regenwasser.dt.gross.pdf). (Accessed on 15 February 2016).
- [21] Greenscreen Considerations for Advanced Green Façade Design; Paper, Continuing Education Course-Greenscreen. <http://greenscreen.com/docs/Education/greenscreen.Advanced%20Green%20Facade%20Design.CEU.pdf>. (Accessed on 15 April 2016).
- [22] Austrian Embassy Washington Facts & Figures: Climate. Website: [www.austria.org/climate](http://www.austria.org/climate) (Source: <http://www.weatheronline.co.uk/reports/climate/Austria.htm>). (Accessed on 15 December 2016).
- [23] Mett Office UK’s National Meteorological Service. Website: [www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/how-weather-works/when-does-spring-start](http://www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/how-weather-works/when-does-spring-start). (Accessed on 20 September 2016).
- [24] Wiener Arbeitsgemeinschaft für Astronomie (WAA). Jahreszeiten. Site: <http://www.waa.at/hotspots/jahreszeiten/jahreszeiten.html>. (Accessed on 18 September 2016).
- [25] ATB-BECKER green technologies e.U. Website: [www.atb-becker.eu](http://www.atb-becker.eu). (Accessed on 15 May 2016).

3. Publikation 3

Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung

<b>STATUS</b>	Angenommene Publikation
<b>Titel: (Deutsch)</b>	Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung
<b>Autorinnen:</b>	Penaranda Moren, María Soledad; Korjenic, Azra
<b>ISBN/ISSN:</b>	DOI: 10.1002/bapi.201810016
<b>Sprache:</b>	Deutsch
<b>Schlagwörter:</b>	Photovoltaik; Dachbegrünung; PV+Begrünung-Kombination; Sommerlicher Wärmeschutz; Winterlicher Wärmeschutz
<b>Quelle:</b>	Bauphysik 40 (2018), Heft 3 Ernst & Sohn Verlag

# Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung

Bereits vor einem Jahrzehnt wurden Versuchsprojekte über mögliche Synergien der Kombination Photovoltaik (PV) und Dachbegrünung (Gründach) durchgeführt. Heute ist diese Kombination aufgrund ihrer Vorteile, wie z. B. Erhöhung der PV-Erträge aufgrund der Kühlung durch die Pflanzen, uneingeschränkte Nutzung der Vorteile der Dachbegrünung und gute thermische Eigenschaften, gut bekannt. Alle bisherigen Untersuchungen an Kombinationen PV+Gründach in der Literatur konzentrieren sich auf den Bereich der PV-Erträge, -Leistung und -Betriebstemperaturen. Im Rahmen des Forschungsprojektes „GrünPlusSchule@Ballungszentrum“ in Wien wurden im Projektteil „PV+Grün“ unterschiedliche Varianten der Kombination PV+Gründach und PV+Grünfassade untersucht. Dieser Aufsatz präsentiert die Ergebnisse der Temperaturmessungen an der Schnittstelle zwischen der Dachabdichtung und dem Substrat bei der Kombination PV+Gründach sowie an mehreren Stellen mit einem gewöhnlichen, extensiven Gründach (GD). Spannende Ergebnisse konnten festgestellt werden: das PV+Gründach-System funktioniert als Wärmepuffer über das ganze Jahr hinweg.

**Stichworte:** Photovoltaik; Dachbegrünung; PV+Begrünung-Kombination; Sommerlicher Wärmeschutz; Winterlicher Wärmeschutz

## 1 Allgemeines

Bereits vor einem Jahrzehnt wurden Versuchsprojekte über mögliche Synergien der Kombination Photovoltaik (PV) und Dachbegrünung (Gründach) durchgeführt [1], [2], [3]; heute sind die Vorteile dieser Kombination bekannt [4], [5], [6], [7]. Um die Lebensqualität in den Städten der Zukunft zu erhalten, stellt die Bekämpfung der Folgen des Klimawandels eine Priorität aller Metropolen Europas dar. Die innerstädtische Verdichtung, die erhöhten Temperaturen in der Stadt sowie alle damit verbundenen Auswirkungen, wie unter anderem der UHI-Effekt (auch als „städtische Hitzeinsel“ bekannt), werden sich noch weiter verschärfen. Beide Technologien – Photovoltaik und Dachbegrünung – zählen schon lange zu den bekannten Maßnahmen, die in den Strategien mehrerer Städte Europas zur Klimaanpassung und Milderung der Folgen des Klimawandels Berücksichtigung finden. Dies belegen mehrere städtische Klima-Strategie-Berichte [9], [10], [11].

Photovoltaik (PV) wird als Maßnahme für umweltfreundliche, ökologische und regionale Energieerzeugung eingesetzt. Dafür sind die Synergien der Kombination

**Investigation of the year-round thermal buffering effect of a combined green roof with photovoltaics.** *Research projects on the possible synergies of green roof (GR) and photovoltaics (PV) carried out a decade ago. Today, this combination is well known for its advantages to achieve better yields, through the cooling process of evapotranspiration of the plants, the simultaneous use of the GR's advantages and very good thermal properties. All previous studies on combinations PV+green-roof in the literature focus on PV optimization, PV yield and PV temperatures. Within the scope of the research project „GrünPlusSchule@Ballungszentrum“ in Vienna, different combinations of PV+greening (façade and/or roof) were tested. This article presents temperature measurement results of PV+green-roofs and its comparison to a normal extensive GR. Exciting results were founded: the combination PV+GR works as a year-round thermal buffer.*

**Keywords:** Photovoltaics; Green roof; PV+green roofs-combination, Summer thermal insulation; Winter thermal protection

PV+Gründach von vielfachem Nutzen. So profitieren PV-Anlagen von den Wechselwirkungen der Begrünung in Form von niedrigen Betriebstemperaturen: Die Verdunstung der Pflanzen verursacht einen Kühleffekt, welcher sich wiederum in einer Verbesserung der PV-Erträge widerspiegelt. Außerdem schützen sie die Dachhaut vor Durchdringungen und Beschädigungen und helfen bei der Vermeidung von punktuellen schweren Lasten [12], [13].

Zu den Vorteilen und Funktionen, weswegen Dachbegrünungen als Anpassungsmaßnahme in den Klimastrategien der Städte genutzt werden [9], [10], [11], zählen:

- Gebäudeerhaltung: Schutz der Dachabdichtung vor extremen Temperatur- und Wetterereignissen;
- Wärmedämmschutz, Schallschutz, Strahlenschutz;
- Verbesserung des Mikroklimas;
- ökologische Ausgleichsflächen;
- Filterung von Luftschadstoffen und Feinstaub, sowie Minderung von Elektromog;
- Trinkwassereinsparungen: Möglichkeit der Mehrfachnutzung des Wassersüberschusses für Pflanzenbewässerung oder Toilettenspülung;
- Verbesserung des Arbeits- und Wohnumfeldes;

- optische Aufwertung;
- Wasserrückhaltung: Beitrag zum Hochwasserschutz, Einsparung von Abwassergebühren;
- Wohn-, Nutz- und Erholungsfläche.

Die Synergien, die durch die Kombination von Photovoltaikanlagen und Dachbegrünungen entstehen, nutzen und erweitern die einzelnen Eigenschaften der Systemkomponenten. Mit der Vielfalt an Vorteilen und Funktionen der PV+Grün-Kombination kann diese eine wichtige Rolle bei den Klimaschutzanpassungsstrategien einnehmen [14], [15], [16], [17].

## 2 PV+Gründach – Systembeschreibung

An einer Wiener Schule (Bundesgymnasium & Bundesrealgymnasium Wien 7 – GRG 7) werden im Rahmen des Forschungsprojekts GrünPlusSchule@Ballungszentrum unterschiedliche Gebäudebegrünungssysteme und Pflanzen sowie Substrate mit PV-Modulen kombiniert und verglichen. Erläutert werden unter anderem ihr Einfluss auf das hygrothermische Verhalten, auf das Energiesparpotenzial, auf die Raumluftqualität, auf die Luft-

feuchtigkeit, die Beschattung, die Lärminderung sowie auf die Wasserrückhaltung und den Wärmeinseleffekt [8]. Im Projektteil „PV+Grün“ des Forschungsprojektes wurden am Dach und an der Fassade der Schule unterschiedliche PV-Grün-Systemkombinationen getestet und bezüglich ihrer thermischen Eigenschaften untersucht (Bild 1). Die Ergebnisse der Studie werden folgend vorgestellt.

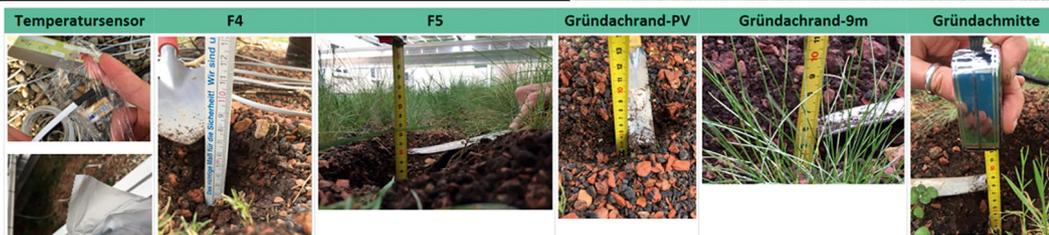
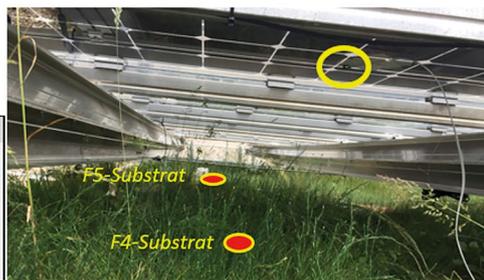
Im Projekt wurde eine PV-Flachdachanlage in Kombination mit einer extensiven Dachbegrünung errichtet. Die Vegetation und Dachbegrünung wurden vom Projektpartner, der Universität für Bodenkultur Wien, ausgewählt und betreut. Der Aufbau des Dachsubstrates weist Höhen zwischen 5 cm und 15 cm auf. Die Messsensoren wurden an der Grenze zwischen dem Substrat und der Dachabdichtung der jeweiligen Messstelle installiert. Ihre Tiefe entspricht die Höhe des Substrates für die gegebene Messstelle. Die PV-Anlage wurde in zwei PV-Gruppen (F4 und F5) geteilt. Diese sind jeweils mit 12 Glas-Glas monokristallinen PV-Modulen mit einer Restlichtdurchlässigkeit von 30% und einer gesamten Leistung von 3,72 kWp ausgestattet. Die Komponenten des Systems und die Lage der Sensoren sind in Bild 1 dargestellt.



### TEMPERATURSENSOR

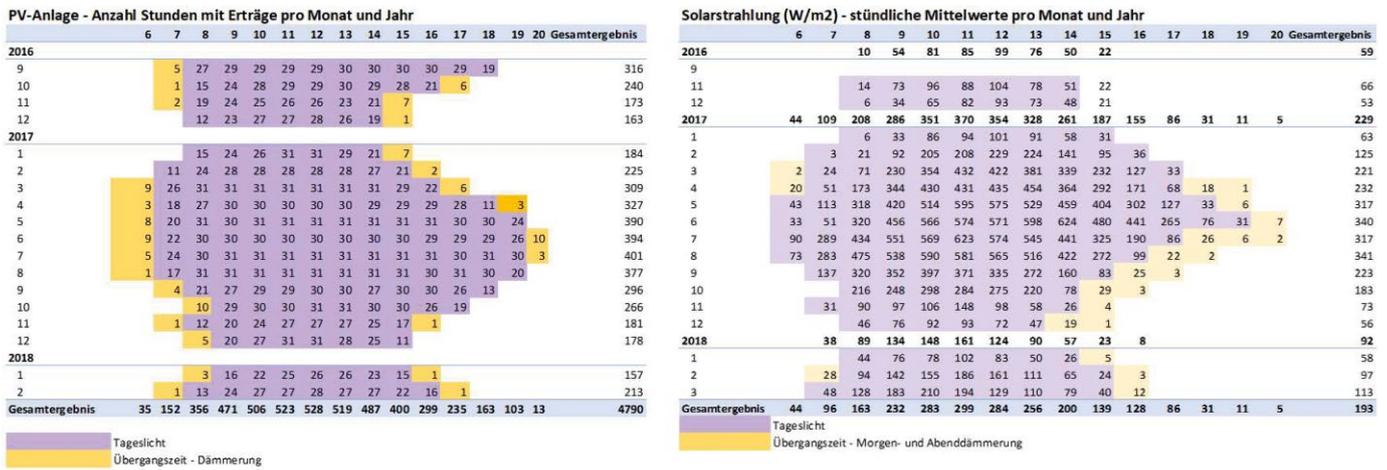
Maxim Integrated DS18B20  
Eindrahtige Digitalthermometer  
Misst Temperaturen von -55°C bis 125°C  
Genauigkeit +/-0,5°C von -10°C bis +85°C

● Lage Sensoren im Substrat		Tiefe
Gründachrand-9m	9 m entfernt von PV	6 cm
Gründachrand-PV	neben PV	5 cm
Gründachmitte	mitte-Substrat Dachbegrünung	8 cm
F4-Substrat	mitte-unten PV-Gruppe	7 cm
F5-Substrat	mitte-unten PV-Gruppe	10 cm



**Anmerkung:** Die Messsensoren wurden an der Grenze zwischen Substrat und Dachabdichtung der jeweiligen Messstelle installiert und ihre Tiefe entspricht die Höhe des Substrates für die gegebene Messstelle

Bild 1. PV+Grün-Kombination: Untersuchte Fassaden- und Dachsystem-Varianten (Quelle: eigene Bilder)  
Fig. 1. „PV+Green“combination: Examined façade and roof system variants (Source: own pictures)



Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
Morgendämmerung	5h - 6h	4h - 5h	6h - 7h	7h - 8h
Tageslicht	7h - 17h	6h - 19h	8h - 16h	9h - 15h
Abenddämmerung	18h - 19h	20h - 21h	17h - 18h	16h - 17h
Nacht	20h - 4h	22h - 3h	19h - 5h	18h - 6h

Bild 2. Erstellung der klimatischen- und zeitlichen Parameter in Abhängigkeit der Jahreszeit und des betrachteten Zeitintervalls (Quelle: eigene Daten)

Fig. 2. Establishment of the climatic- and daylight parameters in relation to the season and time interval (Source: own calculations)

### 3 Auswertungsmethode

Die Messwerte wurden in 10-Minuten-Abständen geloggt. Aus diesen Werten wurden die stündlichen Mittelwerte ermittelt. Die Daten wurden anschließend über einen zehnmönatigen Zeitraum modelliert und ausgewertet. Für die Modellierung der Daten wurde ein interaktives Klimamodell erstellt, sodass sich diese an die gemessenen klimatischen und zeitabhängigen Tagesintervallbedingungen (Bild 2) sowie an die Analyseparameter aller Jahreszeiten und Zeitintervallen anpasst. Die Daten wurden überprüft und um Fehlerwerte bzw. eventuelle Ausreißer bereinigt.

Für die Auswertung wurden die Daten auf typisches sowie atypisches Verhalten aller Varianten untersucht, in unterschiedlichen Zeitintervallen und Jahresabschnitten dargestellt und miteinander verglichen. In einem ersten Schritt erfolgte die Analyse über größere Zeitspannen (jährlich, monatlich und jahreszeitlich) mit der Bildung von Maximal-, Minimal- und Mittelwerten. In einem zweiten Schritt wurden diese Daten in Zeitintervalle unterteilt und anschließend erneut untersucht. Ferner wurde besonders auffälliges Verhalten auf stündlicher Basis analysiert und über alle Zeitspannen modelliert. Diese detaillierte Analyse erlaubt ein gutes Verständnis der unterschiedlichen Eigenschaften und Pufferwirkungen aller Varianten sowie ihrer Vor- und Nachteile.

#### 3.1 Parameter und Intervalle

Die untersuchten Parameter unterteilen sich in klimatische und in zeitliche Parameter und berücksichtigen u. a. folgende Einflüsse:

- **Klimatische Parameter:** Jahreszeit, Wärme- und Kälteperiode in Abhängigkeit der Solarstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Regenmenge.
- **Zeitliche Parameter:** Tageslichtintervalle, Morgen- und Abenddämmerung, Tageslicht- und Nachtintervalle in Abhängigkeit der Solarstrahlung und Jahreszeit.

### 4 Analyse der Messdaten

#### 4.1 Klimadaten

Die monatlichen Klimawerte (Bild 3) zeigen den Sommer 2017 mit hohen Lufttemperaturen und Regenmangel. Es ist zu erkennen, dass in den Monaten Mai, Juni und August starke Trockenheit herrscht und sehr viel Nässe im Juli, September und Oktober. Die Sommermonate weisen gleich hohe Maximaltemperaturen (32°C bis 34°C) und die Wintermonate gleich tiefe Temperaturen (-10°C bis 12°C) auf. Der Februar 2018 wird mit weniger als der Hälfte der Solarstrahlung im Vergleich zu Februar 2017 als sehr trüb bezeichnet.

#### Extreme Wetterereignisse

Extrem langanhaltende niedrige Temperaturen wurden im Februar und März 2018 gemessen – eine 30 Tage andauernde Kältewelle mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Während dieser Zeit ist ein atypisches und extremes Verhalten des PV-Gründach-Systems zu beobachten, wie in den Bildern 4, 7 und 10 dargestellt ist. Um mögliche unerwünschte Einflüsse auf die Werte des typischen Verhaltens der PV+Gründach-Kombination im Verlauf des Jahres 2017 zu vermeiden, wird diese Kältewelle getrennt von den anderen Daten analysiert.

## 4.2 Jahresansicht

Die monatlichen Mittelwerte der Temperaturen (Bild 4) erlauben eine schnelle Identifizierung des Systemverhaltens der PV+Gründach-Kombination: kühler im Sommer,

wärmer im Winter. Auch die Übergangsphasen mit abwechselnden sommerlichen und winterlichen Pufferwirkungen und mäßigen Temperaturen bei allen Systemen sind deutlich identifizierbar. Ein atypisches Verhalten ist im Februar und März erkennbar. Die extremen kalten Au-

KLIMADATEN: Temperatur, Feuchtigkeit, Regenmenge und Solarstrahlung nach Monat und Jahr

	Min. Lufttemp.(°C)	mW. Lufttemp. (°C)		Max. Lufttemp. (°C)	min.rFeucht. (rF%)	mW.rFeucht. (rF%)		Regenmenge (mm)	Max. Regenmenge (mm)	Anzahl Regentage	Max.Solarstrahlung (W/m2)	mW.Solarstrahlung (W/m2)
		Lufttemp. (°C)	Max. Lufttemp. (°C)			mW.rFeucht. (rF%)	Max. Regenmenge (mm)					
<b>2017</b>												
Jan	-12.0	-3.8	5.0	18.3	43	78	9.3	3.7	7	165	18	
Feb	-3.7	6.0	18.3	29	77	39.1	9.6	9	436	48		
Mrz	2.6	7.9	19.2	32	69	50.8	26.0	10	682	70		
Apr	-0.5	9.3	24.0	35	69	85.2	25.2	17	855	106		
Mai	3.8	14.1	27.4	32	68	50.4	16.4	12	853	132		
Jun	13.3	22.5	32.3	23	51	45.0	9.5	13	862	235		
Jul	12.6	21.3	34.3	24	63	105.6	22.8	15	882	169		
Aug	15.0	22.1	33.9	32	68	57.2	28.8	6	690	113		
Sep	8.1	13.8	29.0	34	78	113.0	67.9	14	804	74		
Okt	4.1	10.9	23.0	23	74	89.8	21.2	15	618	52		
Nov	-1.2	4.4	9.2	51	82	42.8	10.0	14	378	17		
Dez	-3.7	2.5	8.6	67	82	52.2	13.9	8	130	17		
<b>2017 Ergebnis</b>	<b>-12.0</b>	<b>11.0</b>	<b>34.3</b>	<b>23</b>	<b>72</b>	<b>740.4</b>	<b>67.9</b>	<b>140</b>	<b>882</b>	<b>86</b>		
<b>2018</b>												
Jan	-3.0	3.2	8.7	55	83	51.3	11.0	18	228	17		
Feb	-10.1	-3.8	5.3	49	85	17.7	5.5	8	369	24		
<b>2018 Ergebnis</b>	<b>-10.1</b>	<b>1.1</b>	<b>8.7</b>	<b>49</b>	<b>83</b>	<b>69.0</b>	<b>11.0</b>	<b>26</b>	<b>369</b>	<b>19</b>		
<b>Gesamtergebnis</b>	<b>-12.0</b>	<b>9.4</b>	<b>34.3</b>	<b>23</b>	<b>74</b>	<b>809.4</b>	<b>67.9</b>	<b>166</b>	<b>882</b>	<b>75</b>		

Bild 3. Klimadaten: Monatliche Maximal-, Minimal- und Mittelwerte (Quelle: eigene Daten. Regendaten vom Institut für Meteorologie der BOKU Wien, Website: <https://meteo.boku.ac.at/wetter/mon-archiv>)

Fig. 3. Climate data: Monthly maximum, average and minimum values (Source: own measured values. Rain values obtained from the BOKU Institute for Meteorology, Vienna, Website: <https://meteo.boku.ac.at/wetter/mon-archiv>)

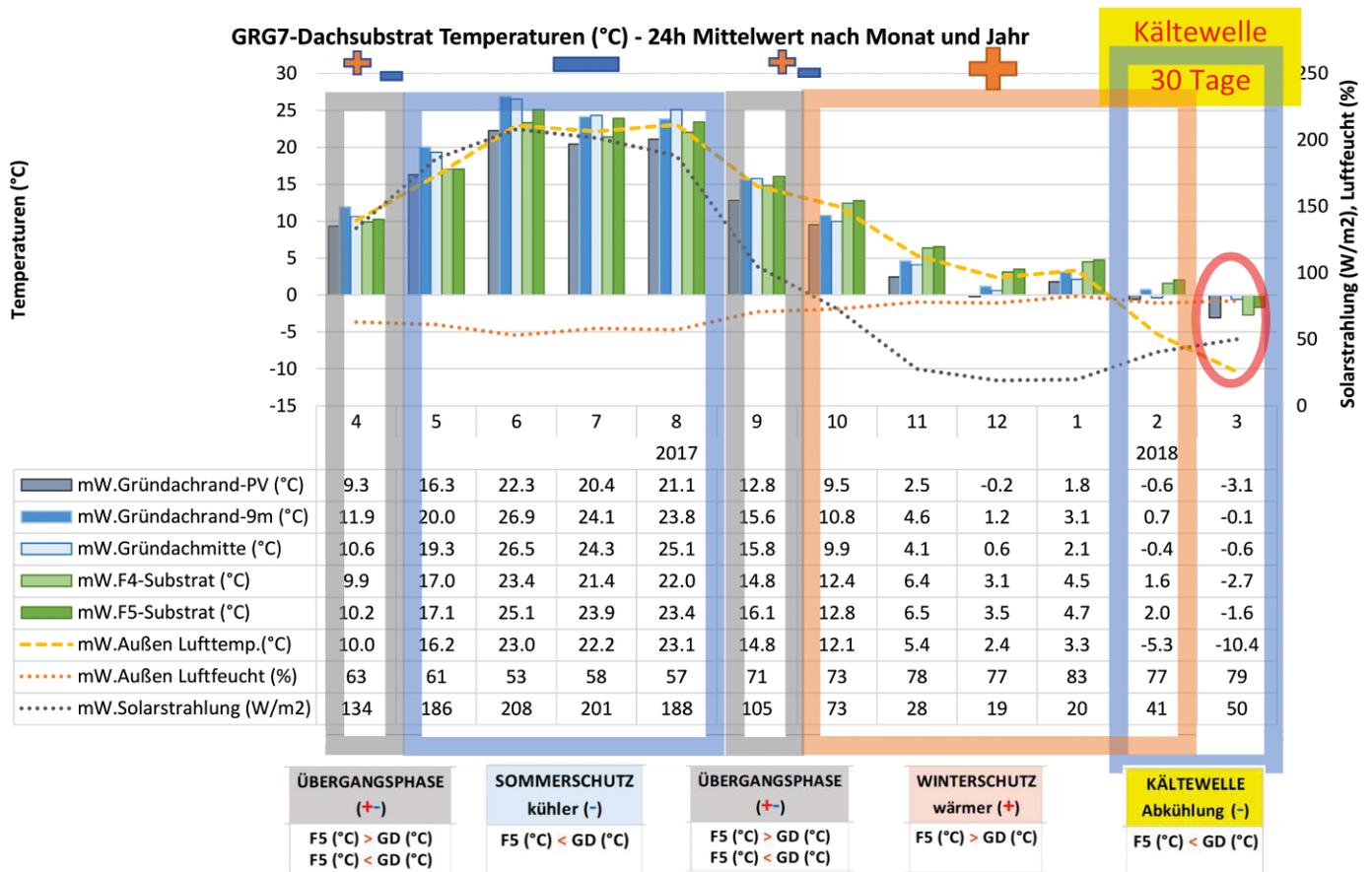


Bild 4. Monatliche Mittelwerte der Temperaturen

Fig. 4. Monthly average temperatures. Easy identification of the PV+green system behaviors: Warmer during the winter and cooler during the summer; also, the transition phase is clearly identified.

**System Vergleich: Gründach vs F5 und F5 vs F4. Max. und Min. Temperaturen und Temperaturunterschiede nach Monat**  
Zeitintervall: NACHT

Systeme / Monat	Max. Gründach mitte (°C)	Max. F5-Substrat (°C)	Max.Diff-Gründach-F5	Max. Lufttemp. (°C)	Min. Gründach mitte (°C)	Min. F5-Substrat (°C)	Min. Diff-Gründach-F5	Min. Lufttemp. (°C)	Min.F4-Substrat (°C)	Min. Diff.F5-F4	Max. F4-Substrat (°C)	Max.Diff. F5-F4 (°C)
<b>2017</b>												
Apr	20.8	18.5	2.3	18.7	1.0	2.9	-1.9	0.5	2.6	0.3	18.3	0.2
Mai	32.1	27.6	4.5	22.7	6.1	8.9	-2.8	1.9	7.5	1.3	29.4	-1.8
Jun	31.0	28.9	2.1	23.4	20.4	22.4	-2.0	17.6	20.3	2.1	26.8	2.2
Jul	35.3	30.5	4.8	25.9	14.1	17.2	-3.1	13.0	15.5	1.7	27.1	3.4
Aug	33.4	30.7	2.7	28.4	14.8	18.0	-3.2	13.2	16.6	1.5	29.3	1.4
Sep	27.7	26.0	1.7	20.3	8.1	11.3	-3.2	8.1	10.9	0.4	22.9	3.1
Okt	14.1	17.8	-3.7	16.0	1.7	6.4	-4.7	3.6	5.9	0.5	17.8	0.0
Nov	8.6	11.3	-2.7	13.2	-0.3	2.5	-2.8	-1.2	1.9	0.5	11.7	-0.4
Dez	4.6	7.6	-3.0	11.1	-1.1	0.9	-2.0	-4.0	0.1	0.8	7.9	-0.3
<b>2018</b>												
Jan	6.7	9.1	-2.4	11.1	-1.0	0.1	-1.1	-3.2	-0.2	0.3	9.6	-0.5
Feb	3.5	6.1	-2.6	2.7	-1.2	-0.3	-0.9	-18.3	-2.7	2.4	5.3	0.8
Mrz	-0.5	-0.4	-0.1	-6.2	-0.7	-2.6	1.9	-17.1	-4.3	1.6	-1.1	0.8
<b>Gesamt</b>	<b>35.3</b>	<b>30.7</b>	<b>4.6</b>	<b>28.4</b>	<b>-1.2</b>	<b>-2.6</b>	<b>1.4</b>	<b>-18.3</b>	<b>-4.3</b>	<b>1.6</b>	<b>29.4</b>	<b>1.3</b>

**System Vergleich: Gründach vs F5 und F5 vs F4. Max. und Min. Temperaturen und Temperaturunterschiede nach Monat**  
Zeitintervall: TAGESLICHT

Zeilenbeschriftungen	Max. Gründach mitte (°C)	Max. F5-Substrat (°C)	Max.Diff-Gründach-F5	Max. Lufttemp. (°C)	Min. Gründach mitte (°C)	Min. F5-Substrat (°C)	Min. Diff-Gründach-F5	Min. Lufttemp. (°C)	Min.F4-Substrat (°C)	Min. Diff.F5-F4	Max. F4-Substrat (°C)	Max.Diff. F5-F4 (°C)
<b>2017</b>												
Apr	22.8	17.2	5.6	27.6	0.8	2.7	-1.9	-0.5	2.3	0.4	17.7	-0.5
Mai	37.1	28.1	9.0	30.6	4.5	7.6	-3.1	4.5	6.4	1.2	31.0	-2.9
Jun	36.9	30.5	6.5	32.1	18.2	21.0	-2.8	18.0	18.6	2.4	28.4	2.0
Jul	41.7	33.7	8.0	34.4	13.2	16.4	-3.2	13.9	14.8	1.6	28.9	4.8
Aug	39.6	32.1	7.5	37.8	13.5	16.8	-3.3	14.1	15.6	1.2	31.2	0.9
Sep	30.6	23.4	7.2	29.0	7.8	11.1	-3.3	9.9	10.6	0.5	20.8	2.6
Okt	14.9	17.5	-2.6	23.0	2.3	6.2	-3.9	5.1	5.7	0.5	17.8	-0.4
Nov	9.7	11.5	-1.8	15.0	-0.4	2.8	-3.2	-0.5	1.9	0.9	12.1	-0.6
Dez	4.6	8.1	-3.5	13.0	-0.9	0.6	-1.5	-1.7	0.0	0.6	7.9	0.2
<b>2018</b>												
Jan	6.7	8.6	-1.9	13.2	-0.9	0.1	-1.0	-2.5	-0.1	0.2	9.3	-0.8
Feb	3.4	5.5	-2.1	5.3	-1.2	-0.3	-0.9	-15.8	-2.0	1.6	5.0	0.4
Mrz	-0.5	-0.6	0.1	-5.2	-0.7	-2.8	2.1	-16.9	-4.4	1.6	-0.9	0.3
<b>Gesamt</b>	<b>41.7</b>	<b>33.7</b>	<b>8.0</b>	<b>37.8</b>	<b>-1.2</b>	<b>-2.8</b>	<b>1.6</b>	<b>-16.9</b>	<b>-4.4</b>	<b>1.6</b>	<b>31.2</b>	<b>2.5</b>

Bild 5. Systemvergleich: Gründach-F5 und F5-F4. Zeitintervalle Tageslicht und Nacht, Maximal- und Minimaltemperaturen und Temperaturunterschiede nach Monaten. Sommerlicher- und winterlicher Wärmeschutz zusammengefasst nach Jahreszeit für die Maximal- und Minimaltemperaturen

Fig. 5. System comparison: Green roof vs F5 and F5 vs F4. Daylight and Night values, max. and min. temperature and temperature differences values

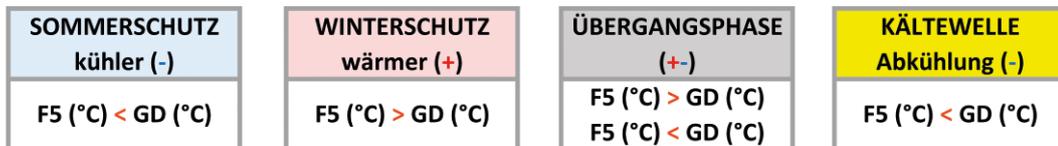


Bild 6. Farbkonvention für die Interpretation der Daten (Quelle: eigene Darstellung).

Fig. 6. Color-convention for the interpretation of the data (Source: own research).

ßenlufttemperaturen haben eine negative Wirkung auf die Messstellen unter dem Substrat F4 und F5: Zum ersten Mal sind die Temperaturen an diesen Messstellen unter den Gefrierpunkt gefallen. Dieser Effekt wird in 4.6 erläutert.

Die zunehmenden Temperaturunterschiede zur Gründach-Variante lassen das Ausmaß der Pufferwirkung erkennen (Bild 5). Die Werte bei Tageslicht sind bei F5 zwischen 7 °C und 9 °C kühler als bei der Gründach-Variante. Bei den nächtlichen Werten beträgt die Differenz zwischen 2 °C und 4,8 °C. Die sommerliche

Pufferwirkung kehrt sich für die kalten Monate um. F5 weist um bis zu 2,8 °C höhere Temperaturen als die Gründach-Variante auf. Die Pufferwirkung äußert sich als Wärmeschutz.

Die Gründach-Variante war im Sommer nur bei den Minimaltemperaturen kühler als die Variante F5 der PV+Gründach Kombination. Die Temperaturen bei Variante F4 lagen stets leicht unter denen der Variante F5. Da dies auch während der kalten Monaten auftrat, wird eine größere Empfindlichkeit bezüglich kälterer klimatischer Bedingungen gezeigt.

### 4.3 Monatsansicht: Maximal-, Minimal- und Mittelwerte ausgewählter Monate

Die Monatsansicht der ausgewählten Monate eignet sich besonders gut zur Darstellung des ermittelten Verhaltens der Systeme im Jahresverlauf sowie zur Identifizierung des neuen und typischen Verhaltens. Bild 7 stellt die Verläufe dar und beurteilt die Systeme nach ihrem Verhalten:

- *Proportionales bzw. ähnliches Verhalten:* Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Temperaturen in allen Monaten, außer Februar/März (Kältewelle).
- *Gleiches Verhalten:* für alle Juli-Temperaturwerte, Minimal-, Maximal- und Mittelwerte.
- *Unterschiedliches Verhalten:* für die Werte der Minimaltemperaturen aller Monate, sowie für das Minimum und die Durchschnittstemperaturen von Februar und März 2018.

**In der Winterzeit können folgende Beobachtungen gemacht und Erkenntnisse gewonnen werden:**

- *Gründachmitte:* schwankende Temperaturen spiegeln die Einflüsse der Außenlufttemperaturen und Solarstrahlung wider (sowohl für Minustemperaturen als für Plusstemperaturen). Schnelle Erwärmung und Abkühlung des Substrates. Kaum erkennbare Pufferwirkung.
- Die Gründachmitte ist von den Solarstrahlungen und Außenlufttemperatur sehr beeinflussbar. Sie erwärmt

sich unter den solaren Einflüssen und höheren Lufttemperaturen sehr schnell (4°C höher als F5), gibt diese Wärme aber schnell wieder ab (-5°C bis -6°C kälter als F5). Dieser Effekt ist in den Maximaltemperaturen während des Sommers und in den Minimaltemperaturen während der Nacht erkennbar.

### Pufferwirkung – Vermeidung von Temperaturen unter dem Gefrierpunkt:

- In allen Wintermonaten, mit Ausnahme der Kältewelle im Februar 2018, erreicht die Kombination F5 der PV+Gründach-Variante keine negativen Temperaturen, während das Gründach und die andere Variante mehrmals den Gefrierpunkt unterschreiten.
- F4 weist weniger Pufferwirkung als F5 auf und unterliegt einem stärkeren Einfluss durch Temperaturschwankungen. Mitte Januar erreicht F4 einige Male Temperaturen unter dem Gefrierpunkt (0,2°C). Dies ist auf die dünnere Substratschicht zurückzuführen.
- Die Pufferwirkung von F5 ist am Anfang der Winterzeit stärker und wird geringer je weiter der Winter fortschreitet. Langsam verringern sich die Temperaturunterschiede zwischen der Messstelle F5 und der Gründachmitte. Trotzdem wird der Gefrierpunkt nicht unterschritten. Die Temperaturschwankungen und die Klimadaten zeigen die Einflüsse der Solarstrahlung und Lufttemperaturen auf die Pufferwirkung.

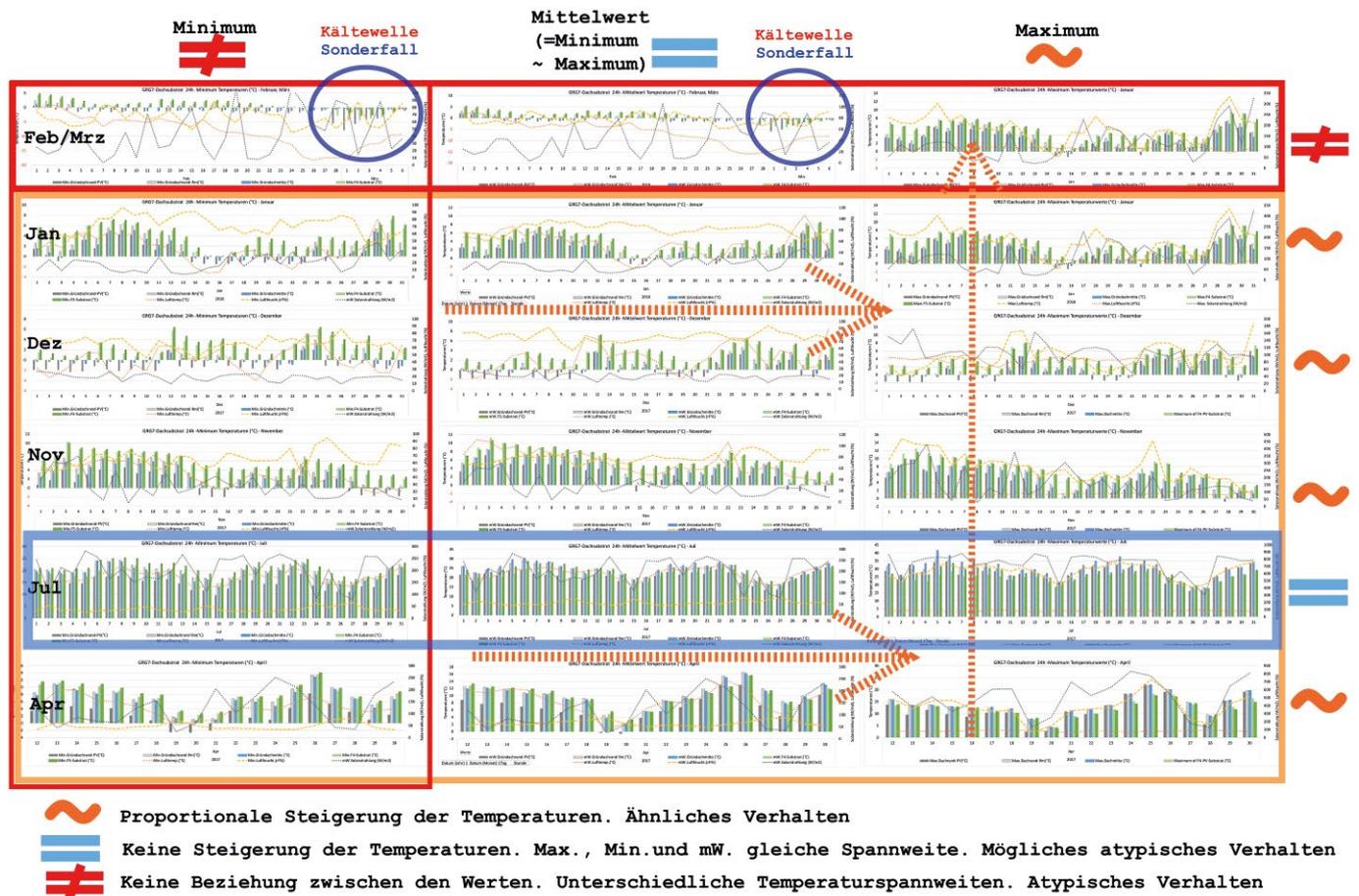


Bild 7. Maximum, Minimum und Mittelwerte ausgewählter Monate mit Kennzeichnung des typischen Systemverhaltens  
 Fig. 7. Maximum, average and minimum temperatures of selected months with the typical system behavior marked

### 4.4 Zeitintervalle: Auswertung nach Jahreszeiten

Bild 8 stellt deutlich die Pufferwirkung der PV+Gründach-Kombination für alle Jahreszeiten und Wertebereiche dar und zeigt deren Anpassung an die klimatischen Bedingungen zu jeder Jahreszeit. Im Sommer und Winter sind deutliche Unterschiede bei den Maximal- und Minimaltemperaturen erkennbar. In den Übergangsphasen Frühling und Herbst treten lediglich mäßige Unterschiede auf.

matischen Bedingungen zu jeder Jahreszeit. Im Sommer und Winter sind deutliche Unterschiede bei den Maximal- und Minimaltemperaturen erkennbar. In den Übergangsphasen Frühling und Herbst treten lediglich mäßige Unterschiede auf.

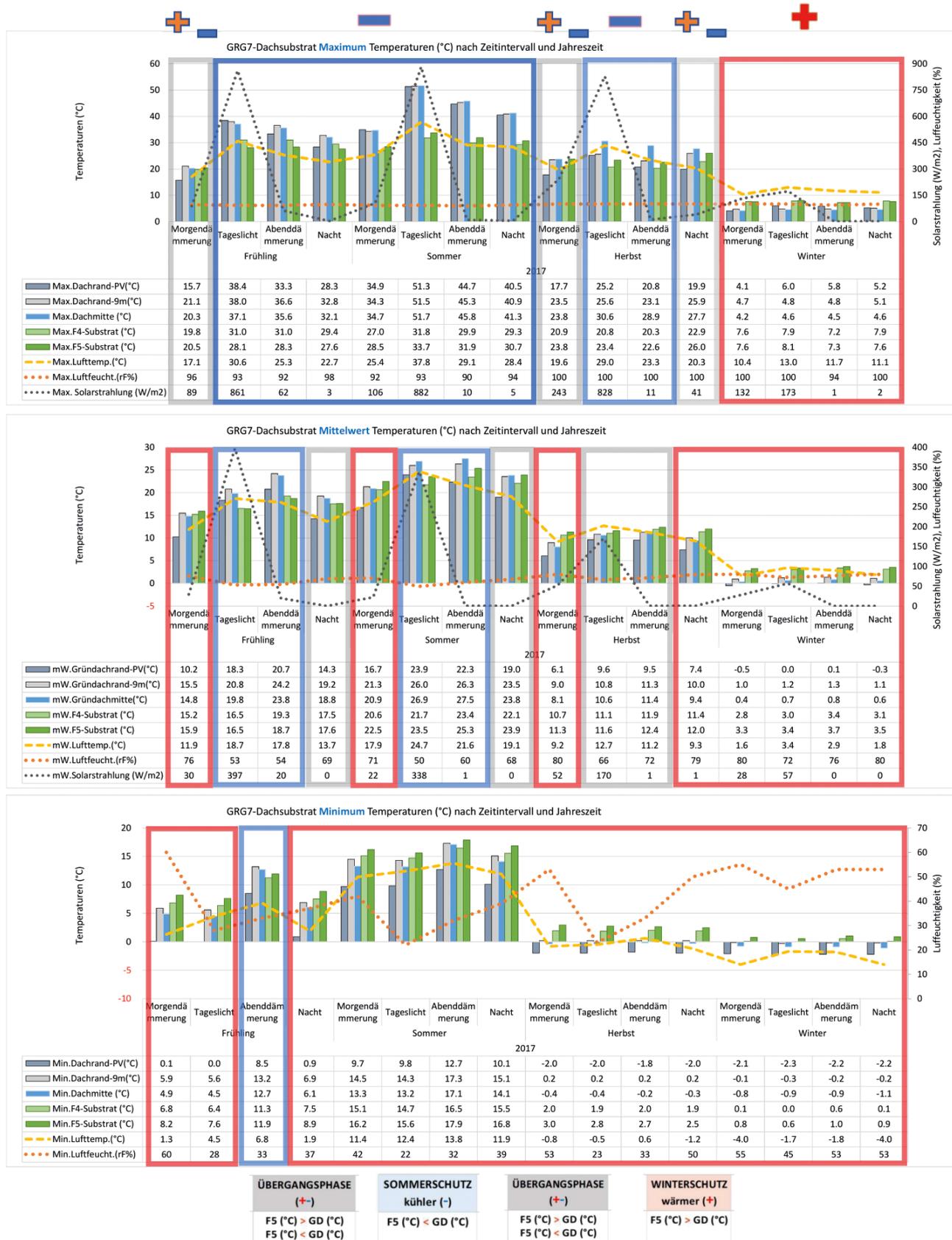


Bild 8. Maxima, Minima und Mittelwerte der Temperaturen nach Zeitintervallen und Jahreszeit  
 Fig. 8. Maximum, minimum and average system variations temperatures by time interval and season

**Wärmeschutz im Winter:**

In der Darstellung der Zeitintervalle unterteilt nach Jahreszeiten (Bild 8) ist die Wärmepufferwirkung der PV+Gründach-Kombination gut erkennbar. Dieser Wärmepuffer verhindert die Abkühlung des Substrates bei Temperaturen im Bereich des Gefrierpunktes und darunterliegender Temperaturen.

**Sommerlicher Wärmeschutz:**

Ebenfalls in Bild 8 ist der sommerliche Wärmeschutz durch die PV+Gründach-Kombination für die Maxima und Mittelwerte der Temperaturen im Sommer und für alle Zeitintervalle eindeutig erkennbar. Dieser Effekt wird auf die Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst für die Zeitintervalle mit großen Solargewinnen und höheren Lufttemperaturen verlängert. Diese Zeitintervalle zeichnen sich durch Tageslicht und Abenddämmerung aus. Bei den kühleren Zeitintervallen in den Übergangsjahreszeiten, der Nacht und der Morgendämmerung, kehrt sich dieser Effekt entsprechend den kälteren Temperaturen um und verhindert eine weitere Abkühlung des Daches.

**4.5 Vergleich von Gründach und der PV+Gründach-Variante F5 – Tagesverlauf**

Der Tagesverlauf der Temperaturen (Max., Min. und Mittelwert) des F5-Systems (PV+Gründach) und die Gründachmitte (Bild 9) zeigen im Detail den Verlauf der Pufferfunktion für alle Jahreszeiten. Auch die Unterschiede zwischen den Maximal- und Minimaltemperaturen sind erkennbar. Die Phasenverschiebung ist von den Maxima

und den Minima der Lufttemperaturen abhängig. Diese legen fest, wann sich der sommerliche Wärmeschutz in winterlichen Wärmeschutz wandelt und umgekehrt. Durch diese Eigenschaft ist die Pufferwirkung anpassungsfähig an die Wetterbindungen.

- *Phasenverschiebung:* Diese dauert zwischen 7 h und 9 h in den Sommer- und Übergangszeiten (Frühling und Herbst). Im Winter wird sie in einen 24-stündigen, gleichmäßigen Wärmeschutz umgewandelt, wenn die Minimaltemperaturen unter 5°C fallen.
- *Übergangsphasen:* In diesen Phasen wechseln sich sommerlicher und winterlicher Wärmeschutz in Abhängigkeit von den Lufttemperaturen ab. Für die wärmeren Temperaturen des Tages wird ein sommerlicher Wärmeschutz und für die kalten Temperaturen während der Nacht ein winterlicher Wärmeschutz geboten. Die Dauer der Phasenverschiebung ist von der Art des Schutzes abhängig. Für den winterlichen Wärmeschutz dauert die Übergangsphase bei größeren Temperaturunterschieden zwischen 6 und 8 h und somit länger als für den sommerlichen Wärmeschutz bei einer Phasenverschiebung von 6 h und ähnlichen Minimaltemperaturen der beiden untersuchten Systeme.
- *Pufferwirkung:* Die zwei Pufferwirkungen in Form von sommerlichem und winterlichem Wärmeschutz sind deutlich erkennbar. Der sommerliche Wärmeschutz verhindert die Überhitzung der Dachbegrünung durch den Solargewinn und verzögert diese für die maximalen Temperaturen im Zeitraum von 10 bis 18 Uhr im Frühling mit einem Temperaturunterschied von ca. 4°C im Mittel und ca. 3,6°C im Sommer im Zeitraum von 8 bis 15 Uhr.

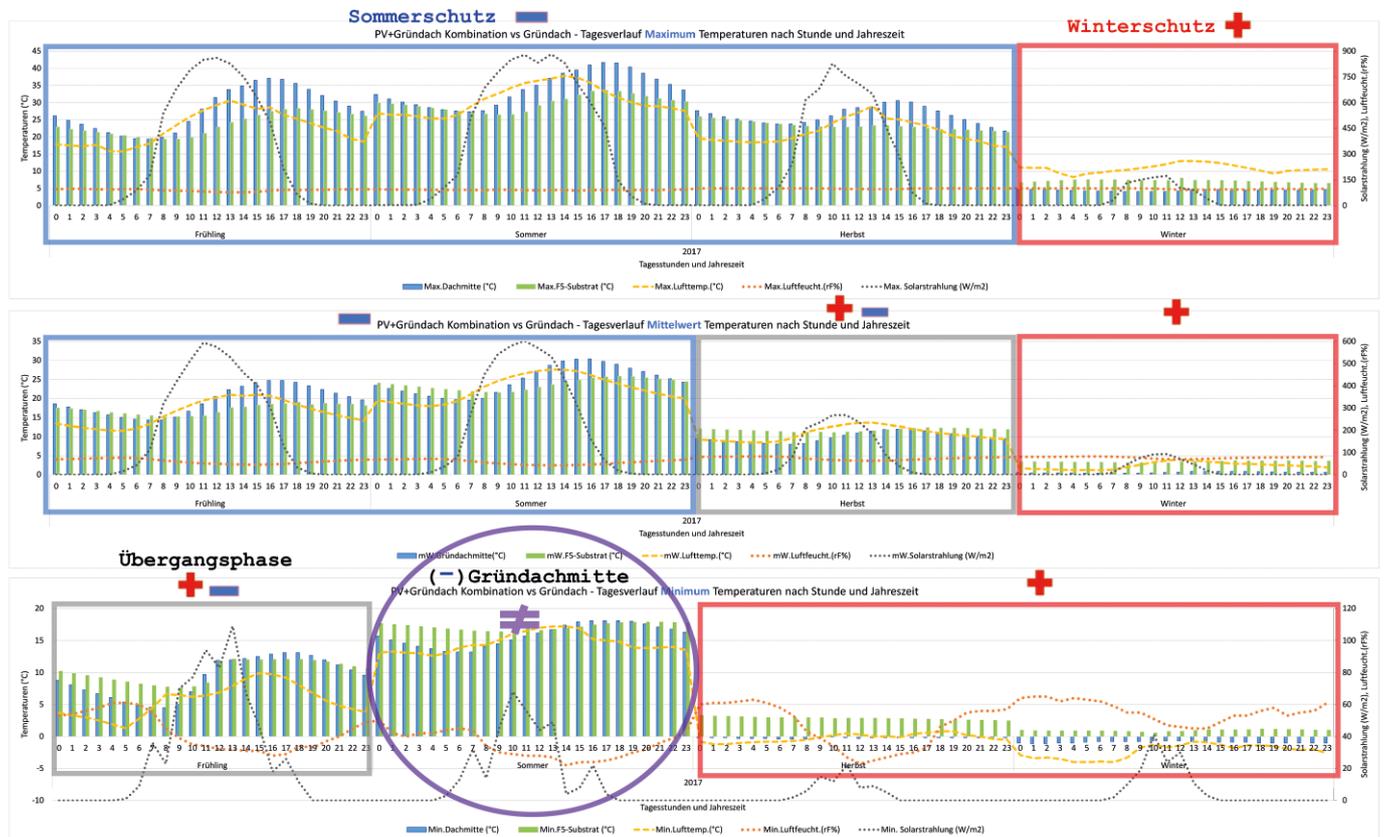


Bild 9. Tagesverlauf: Maximal-, Minimal- und Mittelwert der Temperaturen; Gründachmitte im Vergleich zu F5 nach Jahreszeit.

Fig. 9. Maximum, minimum and average system variations temperatures by time interval and season.

Auch der winterliche Wärmeschutz ist gut erkennbar. Die sommerliche Pufferwirkung wandelt sich in eine ganztägige gleichmäßige Winter-Pufferwirkung, die auftritt, wenn die Lufttemperaturen unter 5°C fallen. Der winterliche Wärmeschutz weist Temperaturunterschiede für den Mittelwert und Minimum-Temperaturen zwischen ca. 1°C und 3°C auf und verhindert Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Ausnahmen dieser Regel sind sehr extreme Minustemperaturen (< -10°C) über mehr als 10 Tage, wie es im Februar/März 2018 der Fall war. Dieser Ausnahmefall wird in Abschnitt 4.6 analysiert.

- **Gründachmitte:** Die Variante Gründachmitte weist für Minimaltemperaturen über 10°C und im Sommer gleiche und kurzzeitig sogar bessere Werte auf als F5. In der Gründachmitte treten im Mittel Temperaturen auf, die 1,8°C kühler als F5 sind. Dieses Verhalten äußert sich in den Nachtstunden (nächtliche Abkühlung durch Wärmestrahlung) bis zum Mittag des nächsten Tages, wenn die kumulativen Solargewinne zu groß werden. Ab diesem Zeitpunkt am Mittag bietet F5 einen besseren sommerlichen Wärmeschutz.

#### 4.6 Sonderfall – Kältewelle: Tagesverlauf für ausgewählte Tage

Im Februar und März 2018 trat eine 30 Tage andauernde Kältewelle auf (Bilder 4, 7, 10 und 11), die ein atypisches Verhalten bei der PV+Gründach-Kombination zur Folge hat. Um diesen Effekt besser zu verstehen, wurden die Werte auf stündlicher Basis analysiert und für ausgewählte Tage und Zeitintervalle dargestellt. Die Kältewelle erreichte Temperaturen zwischen -5°C und fast -16°C im Zeitraum 17. Februar bis 6. März 2018.

Erst als die Temperaturen die -10°C-Grenze unterschritten, fielen die Temperaturen der PV+Gründach-Kombination unter die Grenze des Gefrierpunktes und leichte Minuswerte wurden erreicht (F4 mit -1,7°C und F5 mit -0,2°C).

Dies testet die Pufferwirkung des PV+Gründaches gut. Ab dem Moment, in dem die Gründach-Variante negative Temperaturen erreicht hat, waren noch fast

fünf Tage unter diesen extremen klimatischen Ereignissen notwendig, bis auch F5 den Gefrierpunkt unterschritten hat.

Das Verhalten unter extremen Wetterereignissen während der Kältewelle wird anhand der Bilder 10 und 11 im Folgenden analysiert. Um diese extremen Wetterereignisse zu verstehen, ist es wichtig zu beachten, dass im Vergleich zur Gründach-Variante die PV+Gründach-Kombination die Wärme langsamer abgibt, aber diese auch langsamer wieder aufnimmt – was im Fall einer aufgebrauchten Pufferwirkung eine schnellere Wiederaufladung verhindert.

Beim Gründach ist das Gegenteil der Fall. Hier ist das System sehr von den Außenlufttemperaturen und von den Solargewinnen beeinflussbar, was ein schnelles Laden und Entladen des Gründaches ermöglicht, da die Solarstrahlungsgewinne direkt aufgenommen werden können, wodurch tagsüber die weitere Abkühlung des Substrates verhindert wird. Diese Eigenschaft ist in den abwechselnden Temperaturen zwischen dem Minus- und Plusbereich erkennbar.

#### 1. Entladung der Pufferwirkung:

Nach 5 Tagen mit anhaltenden Temperaturen unter -10°C entlädt sich der Puffer.

#### 2. Stark anhaltende weitere Abkühlung des Systems:

Die Pufferwirkung wurde aufgebraucht. Das System ist nun nicht mehr in der Lage, bei Außenlufttemperaturen unter -10°C, die weitere Abkühlung des Bodens zu verhindern. Es entsteht ein Risiko von gefrorenem Boden.

#### 3. Aufladung der Pufferwirkung:

Die Pufferwirkung wird wiederhergestellt, wenn die Außenlufttemperatur sich über die -5°C erwärmt und die Solarstrahlung stark genug ist, um dem Boden zu erwärmen.

In Bild 11 ist der Effekt der extrem kalten Periode anhand von stündlichen Werten dargestellt. Wenn extrem niedrige Temperaturen unter -10°C über mehr als fünf Tage für F4 und mehr als sieben Tagen für F5 anhalten, wie vom 28.02.2018 bis 02.03.2018, ist mit dem Risiko gefrorenen Bodens zu rechnen. Nach dieser Zeit ist die Pufferwir-

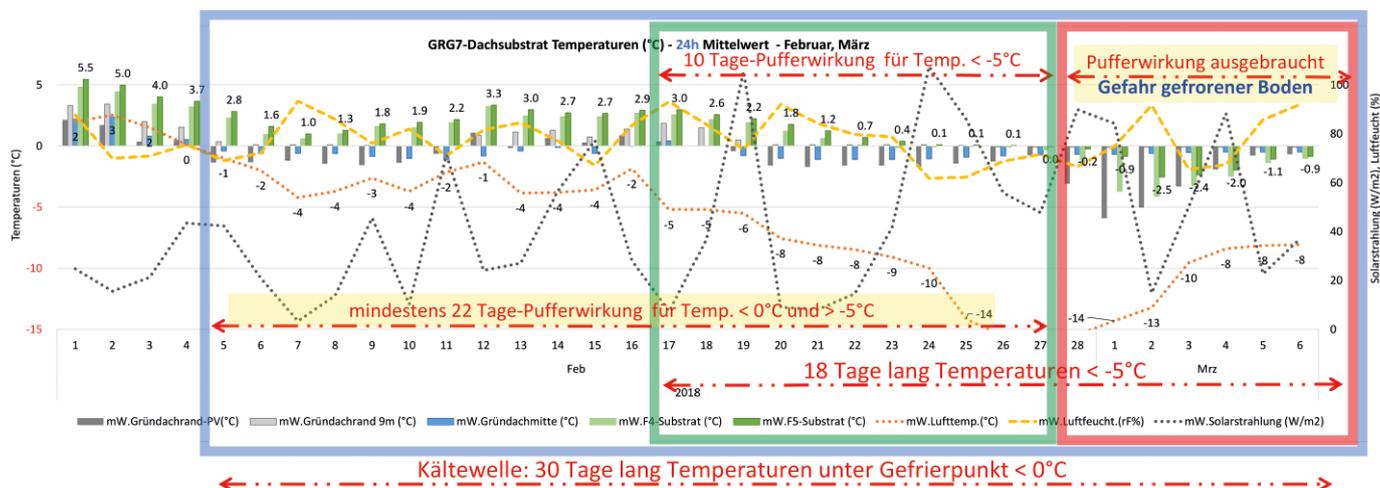


Bild 10. Phasen der Kältewelle im Februar 2018; Auswirkungen auf die Pufferwirkung den Systemen der PV+Gründach Kombination (F4-F5)

Fig. 10. Cold spell phases in February 2018; Consequences on the buffering effect of the PV+Green roof variations (F4-F5)

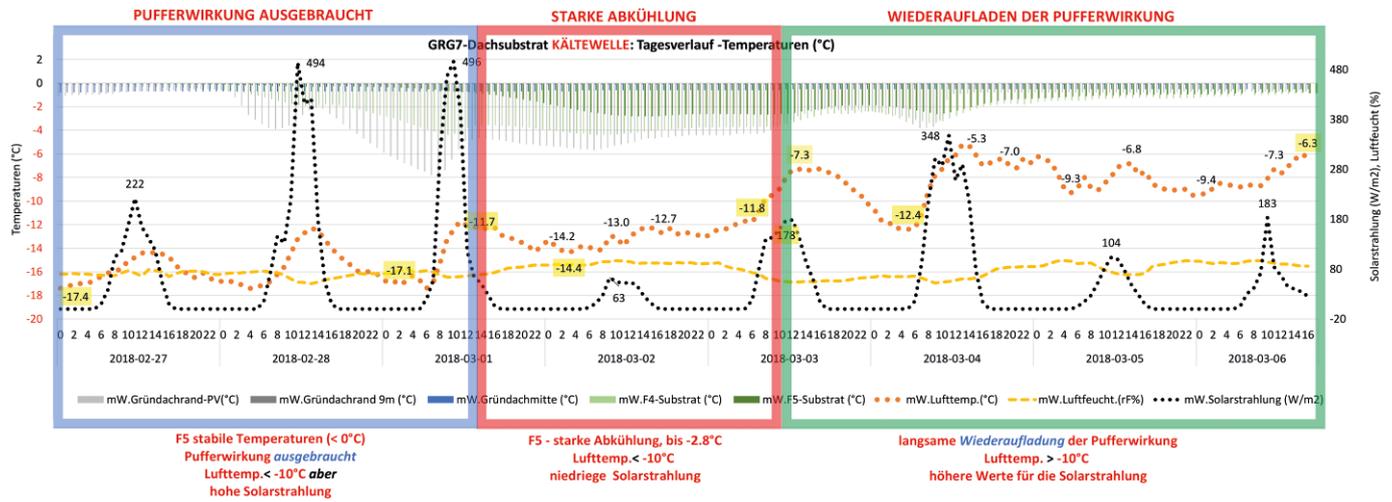


Bild 11. Sonderfall Kältewelle: 8 Tagesverläufe; Phasen des Ent- und Aufladens der Pufferwirkung  
 Fig. 11. Special case cold spell: Temperature variations over 8 days; Charging and discharging of buffer effect

kung des Systems aufgebraucht und wenn die tiefen Temperaturen weiter anhalten (siehe Tabelle 1), ist das System nicht mehr in der Lage, sich zu regenerieren. Anstatt sich aufzuwärmen, kühlt es somit immer weiter ab. Solange bis die Außenlufttemperaturen wieder über  $-10^{\circ}\text{C}$  steigen und die Solarstrahlung stark genug ist, um die weitere Abkühlung zu stoppen und den Boden wieder aufzuwärmen. Die Dämmleistungsfähigkeit bzw. die Pufferwirkung wurde ab dem Zeitpunkt, in dem die Außenlufttemperaturen über  $-10^{\circ}\text{C}$  lagen, langsam wiederhergestellt.

Dieser Effekt tritt stärker bei F4 als bei F5 auf.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 PV+Gründach-Kombination: Die Pufferwirkung

Zwischen den beiden Varianten F4 und F5 der PV+Gründach-Kombination hat sich F5 bezüglich der untersuchten

Kriterien als besseres System erwiesen. Die Gründe dafür werden nachstehend erläutert.

### Ganzjähriger Dämmschutz

Die PV+Gründach-Kombination als sommerlicher und winterlicher Wärmeschutz:

- Eine Dämm- und Pufferwirkung wird über das ganze Jahr und über alle Zeitintervalle beobachtet.
- Die Dämmwirkung passt sich an die Wetterbedingungen an.
- Bei niedrigeren Außenlufttemperaturen unter  $5^{\circ}\text{C}$  ist die Temperatur des Bodens um ca.  $3^{\circ}\text{C}$  wärmer als bei der Variante Gründach.
- Bei Jahresübergangszeiten mit schwankenden Außenlufttemperaturen passt sich die Dämmfunktion an den benötigten Schutz (Sommer- oder Winter) an (in Abhängigkeit von den Klimabedingungen im Zeitintervall).

Tabelle 1. Minimal- und Maximaltemperaturen während der Kältewelle

Table 1. Minimum and Maximum temperatures during the cold spell

Kältewelle 27.02.2018–06.03.2018 – Minimale Temperaturen Dachsubstrat nach Zeitintervall							
	Min. Dachrand-PV [°C]	Min. Dachrand-9m [°C]	Min. Dachmitte [°C]	Min. F4-Substrat [°C]	Min. F5-Substrat [°C]	Min. Lufttemperatur [°C]	Min. Luftfeuchte [rF%]
Morgendämmerung	-7,5	-0,1	-0,8	-4,4	-2,7	-17,4	65
Tageslicht	-7,9	-0,1	-0,7	-4,4	-2,8	-16,9	51
Abenddämmerung	-5,0	-0,1	-0,7	-3,9	-2,7	-15,5	56
Nacht	-7,0	-0,1	-0,8	-4,3	-2,6	-17,4	58
<b>Gesamtergebnis</b>	<b>-7,9</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,8</b>	<b>-4,4</b>	<b>-2,8</b>	<b>-17,4</b>	<b>51</b>

Kältewelle 27.02.2018–06.03.2018 – Maximale Temperaturen Dachsubstrat nach Zeitintervall							
	Max. Dachrand-PV [°C]	Max. Dachrand-9m [°C]	Max. Dachmitte [°C]	Max. F4-Substrat [°C]	Max. F5-Substrat [°C]	Max. Lufttemperatur [°C]	Max. Luftfeuchte [rF%]
Morgendämmerung	-0,7	-0,1	-0,5	-0,3	0,0	-8,7	146
Tageslicht	-0,6	-0,1	-0,5	-0,3	0,0	-5,2	496
Abenddämmerung	-0,6	-0,1	-0,5	-0,4	-0,1	-6,4	10
Nacht	-0,5	-0,1	-0,5	-0,2	0,0	-6,2	16
<b>Gesamtergebnis</b>	<b>-0,5</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,5</b>	<b>-0,2</b>	<b>0,0</b>	<b>-5,2</b>	<b>496</b>

- Bei höheren Außentemperaturen wird die Überhitzung der Dachkonstruktion während des maximalen Wärmegewinnes der Solarstrahlung verhindert (7°C bis 9°C niedrigere Temperatur an der Abdichtung als bei der Variante nur Gründach). Die Wärme wird am Abend, verglichen zur Dachbegrünung, langsamer wieder abgegeben.
- In den Übergangsjahreszeiten, in denen sich die Schutzfunktion abwechselnd äußert und die Außentemperaturen zwischen warm (Tag) und kalt (Nacht) schwanken, war F5 zwischen 6°C und 9°C kühler an Tagen mit maximalen Außenlufttemperaturen und zwischen 2°C und 3,5°C wärmer als das Gründach bei minimalen Temperaturen.
- Die im Sommer und in den Übergangsjahreszeiten schwankenden Außenlufttemperaturen ändern sich im Winter zu einer linearen niedrigen Temperatur, was sich in der Pufferwirkung widerspiegelt. Diese wandelt sich zu einem ganztägigen gleichmäßigen Puffer: dem winterlichen Wärmeschutz.

Das PV+Gründach-System funktioniert als ganzjährige Dämmung, sowohl für die Sommerzeit als auch für Winterzeit. Auch die Analyse in Abhängigkeit der Jahreszeit und für die unterschiedlichen Tagesintervalle (Nacht, Dämmerung, Tageslicht und Abenddämmerung) verdeutlichen die Dämmwirkung des PV+Gründaches. Dieses passt sich an die Wetterbindungen an. Bei höheren Temperaturen ist die Kombination an der Dachabdichtung immer zwischen 7°C und 9°C kühler (am Tag) als die Variante, die nur Begrünung aufweist und zwischen 2°C und 4,8°C in der Nacht.

#### **Lufttemperatur abhängige Pufferwirkung:**

- *Winterlicher Wärmeschutz:* bei Außenlufttemperaturen unter 10°C ist die PV+Gründach-Kombination immer wärmer als die reine Gründach-Variante.
- *Sommerlicher Wärmeschutz:* bei Außenlufttemperaturen über 15°C ist die PV+Gründach-Kombination immer kühler als die reine Gründach-Variante.
  - Die Variante F5 der PV+Gründach-Kombination schützt gegen Überhitzungen im Sommer für die Mittelwerte und Maxima der Außenlufttemperaturen (>15°C).
  - Sonderfall: Minimum der Außenlufttemperaturen im Sommer: Für die Minimalaußenlufttemperaturen <15°C ist die Gründach-Variante kühler als F5. Dieser Effekt wurde nur im Sommer beobachtet (Bild 9) und ist die Folge einer deutlich kürzeren Pufferwirkung mit einer schnelleren Abkühlung des Bodens in der Nacht. Weitere Informationen darüber in Abschnitt 5.2.
- *Übergangsjahreszeiten* (Frühling und Sommer): Puffer-schutz abwechselnd, abhängig von den Klimabedingungen kühler oder wärmer.

#### **Schutz gegen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt:**

Besonders wichtig ist, dass, wenn die Außenlufttemperaturen zwischen dem Gefrierpunkt und –5°C bis –7°C liegen und alle anderen Systemvarianten auch Minustemperaturen erreicht haben, die PV+Gründach-Kombination F5 die Temperaturen über dem Gefrierpunkt hält und eine weitere Abkühlung des Daches verhindert. Dieses Verhalten wurde im Herbst/Winter 2017 über mehrere Zeiträume mit Minustemperaturen sowie Anfang 2018 bis zur Kälte-

welle beobachtet. Eine Ausnahme stellt die F4-Variante der PV+Gründach-Kombination dar, wie später noch ausgeführt wird.

#### **Grenze aktueller Varianten, notwendige Optimierung und weitere Forschungsarbeiten:**

**Winter:** Weitere Forschungsarbeiten, sowie die Weiterentwicklung des Systems sind notwendig, um die Entladung der Pufferwirkung zu verhindern. Dieser Effekt ist der einzige Nachteil des Systems der bis jetzt gefunden wurde und tritt im Fall einer sehr langen kalten Periode mit anhaltenden sinkenden Temperaturen unter –10°C auf (siehe Abschnitt 4.6). In diesem Fall wird die Pufferwirkung des Systems aufgebraucht und es ist mit dem Risiko eines gefrorenen Bodens zu rechnen. Eine Folge ist die weitere Abkühlung des Bodens, solange die Temperaturen unter –10°C bleiben. Danach dauert die Wiederaufladung der Pufferwirkung im Vergleich zu der Variante nur Begrünung mehrere Tage. Bezogen auf diesen erkannten Nachteil ist weitere Forschung notwendig, um ein genaueres Bild des Verhaltens dieses Effekts sowie der Grenzwerte zu erhalten, sodass das System optimiert und weiterentwickelt werden kann.

#### **F4-Variante:**

Die Variante F4 weist immer leicht niedrigere Temperaturen unter dem Substrat auf als die Variante F5 und erreicht öfter und früher Temperaturen unter dem Gefrierpunkt im Verlauf der Kältewelle, wodurch eine größere Empfindlichkeit bezüglich kälteren klimatischen Bedingungen gezeigt wird. Ein Grund hierfür ist, dass die Substratschicht viel dünner ist. Hinzu kommt das Vorhandensein eines Bewässerungssystems (August 2017 bis November 2017). Weitere Forschungsarbeiten sind notwendig, um die Ursachen dieses Unterschieds besser zu verstehen und die passenden Maßnahmen zu finden, um diese Variante zu optimieren.

### **5.2 Bewässerungssystem**

Für den Zeitraum August 2017 bis November 2017 wurde ein Bewässerungssystem montiert, welches die Flächen von F4, Gründachrand-PV und Gründachrand-9 m versorgt. Das Vorhandensein dieser Bewässerung wurde in den niedrigeren Temperaturen von F4 im Vergleich zu F5 erfasst.

### **5.3 Weitere Varianten: Gründachmitte, Gründachrand-PV und Gründachrand-9 m Gründachmitte:**

Die 10 cm bis 15 cm Substrat des Gründaches sind durch die Wetterbedingungen sehr beeinflussbar. Solargewinne, nächtliche Abkühlung durch die Wärmestrahlung und Variationen des Feuchtegehalts des Bodens haben eine schnellere Erwärmung und Abkühlung des Bodens als Folge. Dieser zeigt eine kleine Pufferwirkung, die schnell aufgebraucht ist, aber auch schnell aufgeladen ist. Das im Vergleich zu den anderen Messstellen schnellere Erwärmen und Abkühlen der Gründachmitte zeigt sich sowohl als Vor- als auch als Nachteil. Dieses schnelle Laden und Entladen ist in zwei Fällen von Vorteil: im Winter während des Tages zum Aufwärmen und im Sommer während der Nacht zum Abkühlen. Ansonsten führt es zur Überhitzung

im Sommer während des Tages und zur Auskühlung im Winter während der Nacht.

### Gründachrand-PV und Gründachrand-9m:

Besonders empfindlich auf klimatische Bedingungen und kurzfristige Änderungen reagieren die Messstellen am Rand der Dachbegrünung. Die Einflüsse des Kiesrandes spielen eine wichtige Rolle für die stärkeren Temperaturschwankungen beider Messstellen. Mögliche zusätzliche negative Einflüsse an der Messstelle neben der PV-Anlage können unter anderem Wärmeverluste durch die Montagestruktur der PV-Anlage und eine zu dünne Substratschicht (5cm) sein.

## 5.4 Empfehlungen und Schlussfolgerungen

**F5:** Weitere Forschungsarbeiten und Optimierungsmaßnahmen sind notwendig, um die Empfindlichkeit des Systems bei Temperaturen unter  $-10^{\circ}\text{C}$  zu vermeiden.

**F4:** Untersuchungen aller möglichen Einflüsse, abgesehen von der dünnen Substratschicht, die zur Empfindlichkeit des Systems beitragen könnten, um dieses richtig zu optimieren.

Besonderes positiv und vielversprechend sind die Ergebnisse der Synergien der PV-Gründach-Kombination. Die Wechselwirkungen der Kombination ermöglichen eine ganzjährige und flexible Lösung, die sowohl für den sommerlichen als auch für den winterlichen Wärmeschutz einsetzbar ist. Somit kann die PV+Gründach-Kombination einen wichtigen Beitrag zur Sanierung des Gebäudebestands leisten und auch bei Neubauten eingesetzt werden. Von besonderem Vorteil ist, dass die Systemlösungsvarianten, die im PV+Gründach getestet wurden, mit den kostengünstigen Varianten der einzelnen Technologien gestaltet worden sind: extensive Dachbegrünung und Flachdach PV-Anlage. Kostengünstig und einfach in der Umsetzung, ist diese Kombination eine ausgezeichnete Maßnahme für die Sanierung einer breiten Palette von Gebäuden, die ansonsten, wie es derzeit noch üblich ist, auf solche Maßnahmen verzichten würden, wie z. B. Gemeindebauten.

### Danksagung:

Diese Publikation ist im Rahmen des Projektes „GrünPlus Schule@Ballungszentrum“ (FFG Projektnummer 850124) entstanden. Das Projekt wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) finanziell unterstützt.

### Literatur

- [1] Ansel, W.: Leitfaden Dachbegrünung für Kommunen: Nutzen, Fördermöglichkeiten, Praxisbeispiele. Deutscher Dachgärtner Verband e. V., Nürtingen, 2011.
- [2] Zebe, H.-C.: BundesBauBlatt, 03 2010. [Online]. [http://www.bundesbaublatt.de/artikel/bbb\\_2010-03\\_Gruendach\\_und\\_Solar\\_Energetisch\\_sinnvolle\\_Ergaenzung\\_851390.html](http://www.bundesbaublatt.de/artikel/bbb_2010-03_Gruendach_und_Solar_Energetisch_sinnvolle_Ergaenzung_851390.html). [Zugriff am 15 01 2018]
- [3] ASLA 2013 Annual Meeting & EXPO: *Solar Panels and Green Roofs Fully Integrated*. Boston 2013.

- [4] Clermont, S.: Eco-Work. Is the combination of a green roof with a photovoltaic system possible? 21. 07. 2016 [Online]. <https://www.ecowork.cc/en/articles/is-the-combination-of-a-green-roof-with-a-photovoltaic-system-possible>. [Zugriff am 18.02.2018]
- [5] Wölfl, K.: ZinCo: Dachbegrünung erhöht Erträge der Photovoltaik [Online]. <https://www.zinco.de/dachbegrue-nung-erhoeht-ertraege-der-photovoltaik>. [Zugriff am 18.02.2018]
- [6] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme: Agrophotovoltaik – nachhaltige Landnutzung für Energie und Nahrung. Pilotprojekt am Bodensee. 25.03.2015. [Online]. [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2015/0815\\_ISE\\_PI\\_AgroPV\\_d.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2015/0815_ISE_PI_AgroPV_d.pdf). [Zugriff am 12.12.2017].
- [7] Optigrün International AG [Online]. <https://www.optigruen.de/systemloesungen/solargruendach/sun-root-15/>. [Zugriff am 12.12.2017].
- [8] Stadt der Zukunft [Online]. <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/gruenplusschule-ballungszentrum-hocheffiziente-fassaden-und-dachbegruenung-mit-photovoltaik-kombination-optimale-loesung-fuer-die-energieeffizienz-in-gesamtoekologischer-betrachtung.php>. [Zugriff am 12.12.2017].
- [9] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit BMUB: Klima – Stadt – Wandel. Strategien und Projekte für die Klimaanpassung in der Region Stuttgart.
- [10] Fachbereich Umwelt und Stadtgrün, Landeshauptstadt Hannover: Dachbegrünung und Photovoltaik. 2015.
- [11] Magistrat der Stadt Wien, Wiener Umweltschutzabteilung – Magistratsabteilung 22: Urban Heat Islands. Strategieplan Wien. Wien, 2015.
- [12] Optigrün international AG: Dachbegrünung-Ratgeber. Mehrfachnutzen Dachbegrünung im Überblick, [Online]. <http://www.dachbegruenung-ratgeber.de/dachbegruenung> [Zugriff 10/2017].
- [13] ZinCo GmbH: ZinCo Gründach und Solar. Eine Kombination mit zahlreichen Synergie-Effekten. [Online]. <https://www.zinco.de/solar> [Zugriff 10/2017].
- [14] Tudiwer, D., Korjenic, A.: The effect of living wall systems on the thermal resistance of the facade. *Energy and Buildings*, Vol. 135, pp. 10–19, 2017.
- [15] Mitterböck, M., Korjenic, A.: Analysis for improving the passive cooling of building's surroundings through the creation of green spaces in the urban built-up area. *Energy and Buildings*, Vol. 148, p. 166–181, 2017.
- [16] Penaranda Moren, M. S., Korjenic, A.: Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System. *Energy and Buildings*, Vol. 147, pp. 123–141, 2017.
- [17] Penaranda Moren, M. S., Korjenic, A.: Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules (Multifunctional system: Building greening and photovoltaic. *Energy and Buildings*), Vol. 146, pp. 364–382, 2017.

### Autoren dieses Beitrages:

Arch. Maria Soledad Penaranda Moren, maria.penaranda@tuwien.ac.at  
Prof. Dr. Dipl.-Ing. Azra Korjenic, azra.korjenic@tuwien.ac.at

### Beide

Technische Universität Wien  
Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz  
Karlsplatz 13/206-02  
A-1040 Wien

## Publikationen und Konferenzbeiträge

1. M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „Untersuchungen zum ganzjährigen Wärmeschutz an Varianten eines kombinierten Dachaufbaus mit Photovoltaik und Begrünung,“ Bauphysik, Bd. 40, Nr. 3, p. 12, 2018
2. M. Penaranda Moren, A. Vaskova, A. Korjenic: "GREENfutureSCHOOLS-Green-Oasis-Schools for a New Era of Schools"; Poster: Skyberries - urban and vertical farming conference, Wien, Messe Wien Exhibition & Conference Center (eingeladen); 28.02.2018 - 02.03.2018.
3. M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules Multifunctional system: Building greening and photovoltaic“, Energy and Buildings, Bd. 146, pp. 364-382, 2017
4. M. S. Penaranda Moren und A. Korjenic, „Hotter and colder – How Do Photovoltaics and Greening Impact Exterior Facade Temperatures: The synergies of a Multifunctional System“, Energy and Buildings, Bd. 147, pp. 123-141, 2017.
5. D. Tudiwer, M. Penaranda Moren, E. Krasny: "Gebäudebegrünung, Energieeffizienz und ökologische Bauweise sind große Zukunftsthemen. Diese drei Doktoranden forschen in Wien dazu."; Heureka (eingeladen), 5 (2017), S. 4.
6. M. Penaranda Moren, A. Korjenic: "Multifunktionale Systemlösung Gebäudebegrünung Und Fotovoltaik"; Vortrag: Workshop Ökologisches Bauen und Sanieren - Ergebnisse des ÖKO-Freilandprüfstands, Wien (eingeladen); 11.11.2016.
7. M. Penaranda Moren, A. Korjenic: "Building Greening and Photovoltaic - Multifunctional System"; Vortrag: Vienna young Scientists Symposium 2015, Wien; 25.06.2015 - 26.06.2015; in: "Vienna young Scientists Symposium 2015", Published by Book-of-Abstracts.com, (2015), ISBN: 978-3-9504017-0-7; S. 76 - 77.
8. M. Penaranda Moren, A. Korjenic: "Building Greening and Photovoltaic - Multifunctional System"; Poster: Vienna young Scientists Symposium 2015, Wien (eingeladen); 25.06.2015 - 26.06.2015.

### Andere

1. C. u. P. Giczy, Regisseur, *NEWTON: Stadt 4.0: Grün statt Grau*. [Film]. Österreich, Wien: Der ORF, 2018.
2. Energy Globe Vienna 2015. „Öko-Prüfstand“ (Smart-Testing-Station for Eco Building Components). 2015-04-15 |Press release 44/2015]  
<http://www.bph.tuwien.ac.at/print/news/newsdetail/datum/2015/04/15/energy-globe-fuer-azra-korjenic/>

## Patentanmeldung

1. Korjenic und M. S. Penaranda Moren:  
„Photovoltaik-Fassade mit dahinterliegender Begrünung“  
Patentanmeldung A50268/2017; eingereicht:05.04.2017



### Empfangsbescheinigung

Hiermit wird bestätigt, dass der im folgenden bezeichnete Antrag auf Erteilung eines Österreichischen Patents übermittelt worden ist:

Eingangsnummer	15067	
Aktenzeichen	A50268/2017	
Aktenzeichen für Prioritätserklärungen		
Tag der Übermittlung	05. April 2017	
Ihr Zeichen	56191 Korjenic	
Anmelder	Korjenic, Azra	
Land	AT	
Titel	Photovoltaik-Fassade mit dahinterliegender Begrünung	
Eingereichte Dokumente	package-data.xml application-body.xml at-fee-sheet.pdf (1 p.) SPEC.pdf (26 p.) fop_debug.log	at-request.xml at-fee-sheet.xml at-request.pdf (2 p.) SPEC-1.pdf (2 p.)
Eingereicht von	CN=Andreas Gehring 37424	
Art der Einreichung	Online	
Tag und Zeit der Erstellung dieser Bescheinigung	05. April 2017, 09:14:53 Uhr	
Komprimat	97:4B:77:64:48:DB:60:8E:AE:F3:0C:23:49:6F:77:6C:88:E6:49:8E	

/Österreichisches Patentamt/

(ÖVR. 0078018)

2. Korjenic und M. S. Penaranda Moren:  
„Überdachungsvorrichtung“  
Patentanmeldung A50106/2018; eingereicht: 06.02.2018



### Empfangsbescheinigung

Hiermit wird bestätigt, dass der im folgenden bezeichnete Antrag auf Erteilung eines Österreichischen Patents übermittelt worden ist:

Eingangsnummer	18287	
Aktenzeichen	A50106/2018	
Aktenzeichen für Prioritätserklärungen		
Tag der Übermittlung	06. Februar 2018	
Ihr Zeichen	56894 Korjenic	
Anmelder	Korjenic, Azra	
Land	AT	
Titel	Überdachungsvorrichtung	
Eingereichte Dokumente	package-data.xml application-body.xml at-fee-sheet.pdf (1 p.) SPEC.pdf (30 p.) fop_debug.log	at-request.xml at-fee-sheet.xml at-request.pdf (2 p.) SPEC-1.pdf (1 p.)
Eingereicht von	CN=Andreas Gehring 37424	
Art der Einreichung	Online	
Tag und Zeit der Erstellung dieser Bescheinigung	06. Februar 2018, 08:33:02 Uhr	
Komprimat	F7:9C:E6:03:40:8D:0E:FA:26:81:8E:8A:BD:0A:82:9A:AD:87:F5:C4	

/Österreichisches Patentamt/

{DVR: 0078018}

## Lebenslauf

Arch. María Soledad Penaranda Moren

---

### Lebenslauf

#### Angaben zur Person:

ANGABEN ZUR PERSON



#### Peñaranda Moren, Maria Soledad

📍 Josefstädter Straße 51/1/30, 1080 Wien, Austria

✉ sole.penaranda@me.com

Staatsangehörigkeit: Österreich

#### Schul- und Berufsbildung:

- 2014 (aktuell) Doktoratsstudium an den technischen Wissenschaften, Fakultät für Bauingenieurwesen. TU-Wien
- 2015 Umweltmanagementbeauftragte – ISO 14001 (WIFI)
- 2014 Spezialseminar Vorbereitung zur Projektmanagementzertifizierung nach IPMA (TU-Wien)
- 2013 Energieberater, F-Kurs (ARGE-EBA), Österreich
- 2012 Energieberater, A-Kurs (ARGE-EBA), Österreich
- 2010 Experten Kurs: Bewirtschaftung und Entwicklung Erneuerbarer Energieprojekte. IUSC-Cadiz Universität, Spanien
- 1999 Intensiv Englisch Sprach Kurs. Intermediate 1 und 2 im Rahmen des American English and Culture Program. AIESEC – ASU, USA
- 1995 Universitäres Studium: Architektur, Katholische Universität Ntra. Sra. De la Asunción, Paraguay
- 1988 Matura in Asunción, Paraguay. Grundschule in Viña del Mar, Chile (Lateinamerika)

#### Berufserfahrungen:

- 2016-2018 Projektassistentin. Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz. Wien, Österreich
- 2015-2016 Assistentin. ISWA Waste to Energy Study Tour (Abfallbewirtschaftung Seminar und technische Tour. Österreich
- 2013-2016 Projektmanagerin. Prem-Consulting (Prem Unternehmensberatung). Ressourcen und Energieeffizienz – ISO 14001. Wien, Österreich
- 2013 Assistentin. ISWA Waste to Energy Study Tour (Abfallbewirtschaftung Seminar und technische Tour. Recherche Research Meeres-Treibgut (marine debris). Technische Übersetzungen. Österreich
- 2012-2013 Recherche umweltrelevante Geschäftsmöglichkeiten. UV&P Environmental Management and Engineering
- 2008 Projekt: Photovoltaik Bewässerungssystem für Landwirtschaft (Avocado Anbau)
- 1997-2007 Architektur: Selbstständig Projekte und Baumanagement. Privaten, gewerblichen und internationalen Kunden. Asunción, Paraguay (Sudamerika)

#### Sprachen:

Spanisch (Muttersprache), Deutsch und Englisch.