



Schlussbericht vom 25. Oktober 2024

---

## GreenPV

Potential Gebäudehülle – Lösungsansätze zur optimalen Fassadengestaltung mit PV und Begrünung im Hinblick auf den Klimawandel

---



Quelle: StockPhoto



# HSLU Hochschule Luzern

**Datum:** 25. Oktober 2024

**Ort:** Luzern

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Ko-Finanzierung:**

Steiner Lab Foundation  
Sternengasse 19  
4051 Basel  
[steinerlabfoundation.ch/](http://steinerlabfoundation.ch/)

Amt für Hochbauten Zürich  
Lindenhofstrasse 21  
Amtshaus III  
8001 Zürich  
[www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/ahb.html](http://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/ahb.html)

Stadt St. Gallen, Umwelt und Energie  
Vadianstrasse 6  
9001 St. Gallen  
[www.stadt.sg.ch/home/verwaltung-politik/direktionen/technische-betriebe/umwelt\\_energie.html](http://www.stadt.sg.ch/home/verwaltung-politik/direktionen/technische-betriebe/umwelt_energie.html)

**Subventionsempfänger/innen:**

Hochschule Luzern – Technik & Architektur  
Institut für Gebäudetechnik und Energie  
Technikumstrasse 21, 6048 Horw  
[www.hslu.ch](http://www.hslu.ch)

**Autor/in:**

Büttner Sina, Hochschule Luzern T&A (IGE), [sina.buettner@hslu.ch](mailto:sina.buettner@hslu.ch)  
Domingo Irigoyen Silvia, Hochschule Luzern T&A (IGE), [silvia.domingo@hslu.ch](mailto:silvia.domingo@hslu.ch)  
Settembrini Gianrico, Hochschule Luzern T&A (IGE), [gianrico.settembrini@hslu.ch](mailto:gianrico.settembrini@hslu.ch)  
Sotnikov Artem, Hochschule Luzern T&A (IGE), [artem.sotnikov@hslu.ch](mailto:artem.sotnikov@hslu.ch)  
Keiser Livio, Hochschule Luzern T&A (IGE), [livio.keiser@hslu.ch](mailto:livio.keiser@hslu.ch)  
Arnold Kilian, Hochschule Luzern T&A (IBI), [kilian.arnold@hslu.ch](mailto:kilian.arnold@hslu.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Eckmanns Andreas, Bereichsleiter «Gebäude und Städte», [andreas.eckmanns@bfe.admin.ch](mailto:andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)  
Vetterli Nadège, Leiterin Forschungsprogramm «Gebäude & Städte», [nadege.vetterli@anex.ch](mailto:nadege.vetterli@anex.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502400-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**



## Abstract

Das Projekt GreenPV untersuchte Lösungsansätze zur Fassadengestaltung mit PV und Begrünungen im Hinblick auf den Klimawandel. Dabei wurden die Hemmnisse und die Akzeptanz von Begrünungen und PV-Anlagen an Fassaden betrachtet. Zudem wurde der Einfluss von verschiedenen Fassadensystemen auf das Mikroklima sowie die Energiebilanz im Gebäude untersucht und dieser dem Potential der Energieerzeugung gegenübergestellt sowie Synergien aufgezeigt. Es wurde analysiert, was die entscheidenden Faktoren für eine gesamtheitliche Optimierung der Gebäudefassade im Hinblick auf den Klimawandel sind, wie eine Fassade mit PV und Begrünungen für Mensch, Energie und Umwelt optimal gestaltet werden kann und wie die Anwendung einer solchen Fassade im Gebäudepark gefördert werden kann.

Die Studie zeigt, dass Fassadenbegrünungen die Oberflächentemperaturen an der Fassade deutlich senken können. Am Fassadenprüfstand der Hochschule Luzern am Campus Horw konnten die Oberflächentemperaturen an einem milden, sonnigen Tag im Vergleich zur Messreferenzfassade um 13.9 K (bodengebundene Begrünung) und 14.9 K (wandgebundene Begrünung) gesenkt werden. Mittels Simulationen der Quartierklimamodellierung (QKM) wurde zudem die Physiological Equivalent Temperature (PET) in der Umgebung untersucht. In einem Abstand von 1 m zur Fassade konnte die PET um bis zu 4 K durch die bodengebundene Begrünung und um bis zu 8 K durch die wandgebundene Begrünung gesenkt werden. In einem Abstand von 5 m zur Fassade sind es noch 1.4 K (bodengebundenes System) und 3 K (wandgebundenes System). Dies zeigt, dass Fassadenbegrünungen die PET in der nahen Umgebung zwar deutlich zu senken vermögen, deren Einfluss jedoch mit zunehmender Entfernung rasch abnimmt. PV-Fassaden führten zu höheren Oberflächentemperaturen an der Fassade (bis zu 5 K im Vergleich zur Messreferenzfassade an einem milden, sonnigen Tag). Aufgrund der geringen solaren Rückstrahlung durch die tiefe Albedo der Module sowie auch durch die Umwandlung eines Teils der Einstrahlung in elektrische Energie ist jedoch kein negativer Einfluss auf die PET in der Umgebung vorhanden.

Neben dem Kühleffekt in den Sommermonaten bieten Fassadenbegrünungen zudem weitere Vorteile: sie fördern die Biodiversität, verbessern die Luftqualität durch die Bindung von Schadstoffen und der Sauerstoffproduktion, mindern die Schallausbreitung im Strassenraum, tragen zur Regenwasserretention bei und steigern somit die Aufenthaltsqualität und Attraktivität von Aussenräumen (1), was insbesondere in städtischen Gebieten von Bedeutung ist.

Auch PV-Fassaden bieten viele Vorteile, so erzeugen sie Strom und können eine positive Ökobilanz wie auch positive Lebenszykluskosten aufweisen. Die Amortisationszeit ist dabei stark abhängig von der Stromproduktion, was insbesondere vom Wirkungsgrad und der Anordnung der Module abhängig ist. So ist der jährliche Ertrag über ein PV-Modul (Wirkungsgrad: 20 %) an einer unverschatteten Südfassade bis zu 2.3 mal so hoch wie der an einer Nordfassade und ca. 1.2 mal so hoch wie an einer Ost- und Westfassade. Entscheidend ist die Anordnung der Module an unverschatteten Flächen: Bei einem PV-Modul im Erdgeschoss (Abstand zum gegenüberliegenden Gebäude gleich Gebäudehöhe) reduziert sich der Stromertrag um ca. 42 % (Nord-, Ost- und Westfassade) bis 45 % (Südfassade) im Vergleich zu einem unverschatteten Modul im obersten Geschoss. Dies wirkt sich somit auch auf die Ökobilanz und die Lebenszykluskosten aus. Eine unverschattete nach Süden ausgerichtete PV-Fassade kann die Umweltauswirkungen der Herstellung/Entsorgung des gesamten PV-Systems, bezogen auf die Treibhausgasemissionen (THGE), bereits nach 10.8 Jahren amortisieren (der vor Ort verbrauchte und eingespeisene Strom wurde in der Phase Betrieb gemäss Methode M1 «Investieren und verkaufen» des Forschungsprojektes «Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich» (2) abgezogen), während eine PV-Fassade mit Nordausrichtung dafür 25.2 Jahre benötigt. Bei einer verschatteten nach Norden ausgerichteten PV-Fassade kann die Amortisationszeit die Lebensdauer übersteigen. Ähnliche Aussagen können mit Blick auf die Lebenszykluskosten gemacht werden: während sich sinnvoll angeordnete Module (d.h. in Süd-, Ost- und Westausrichtung ohne Verschattung) über den Lebenszyklus amortisieren, ist mit Blick auf die Kosten eine Anordnung an der Nordfassade oder an verschatteten Fassadenflächen in allen Orientierungen mit Annahmen zu aktuellen Kosten (Strompreise, Förderung etc.) nicht rentabel.



Die Betrachtung der Stromproduktion im Tagesverlauf verdeutlichte zudem, dass es sinnvoll ist, PV-Module in verschiedenen Orientierungen (Süd, Ost und West, unverschattet) zu platzieren, um so die Stromproduktion über den gesamten Tag sicherzustellen und dadurch den Eigenverbrauch zu erhöhen. Im Dezember kann zudem mit einer südorientierten PV-Fassade bis zu 65 % (43% über die Wintermonate) mehr Strom produziert werden als mit einer PV-Dachanlage (Winkel 5° nach Süd orientiert), wodurch ein wichtiger Beitrag zur Deckung der Winterlücke geleistet werden kann. Die jährliche Stromproduktion über eine nach Süden ausgerichtete PV-Fassade liegt jedoch fast 20 % tiefer als über die PV-Dachanlage.

Im Gegensatz zu PV-Fassaden amortisieren sich Fassadenbegrünungen mit Blick auf die Ökobilanz und die Lebenszykluskosten auf Gebäudeebene i.d.R. nicht. Die geringen Einsparungen im Betrieb des Gebäudes (Energiebedarf und Leistungsbedarf), können den Mehraufwand für die Installation, Pflege und Instandhaltung nicht ausgleichen. Ein bodengebundenes System führt jedoch nur zu geringfügig höheren THGE (ca. 2 % mehr als die Referenzfassade) und 1.5 mal so hohen Kosten über den Lebenszyklus und ist deshalb gegenüber einem wandgebundenen System (ca. 10 % höhere THGE und mehr als 4 mal so hohe Kosten) zu bevorzugen. Bei Entscheidungen sind jedoch auch die zuvor genannten qualitativen Aspekte von Begrünungen insbesondere in städtischen Gebieten nicht vernachlässigbar und sollten mit einbezogen werden, auch wenn sich diese nicht direkt monetarisieren lassen. Da der gesellschaftliche Nutzen von Fassadenbegrünungen besonders hoch ist, empfiehlt es sich, diese Diskrepanz zwischen Kosten zu Lasten des Eigentümers und Nutzen zum Vorteil der Allgemeinheit bspw. durch Förderungen auszugleichen.

Die Studie hat gezeigt, dass sich PV und Begrünungen an Fassaden gut kombinieren lassen. PV-Fassaden sind an Flächen mit hohem Stromerzeugungspotential zu platzieren, was zumindest in Städten eher in den höheren Geschossen der Fall ist. Da Fassadenbegrünungen den Energiebedarf des Gebäudes nur geringfügig senken (insbesondere bei Neubauten), liegen die Vorteile der Systeme vor allem im Aussenraum. Begrünungen leisten nahe am Menschen den grössten Mehrwert, wodurch eine Platzierung in den unteren, in Städten oft beschatteten, Geschossen Sinn macht. Die Analyse von Systemkombinationen zeigte, dass ein sinnvoll kombiniertes System (bspw. obere Geschosse PV, untere Geschosse Begrünung, kein System an der Nordfassade) über den Lebenszyklus zu ca. 9 % höheren Kosten im Vergleich zur Referenzfassade führt, jedoch die Umweltauswirkungen bezogen auf die THGE um mehr als ein Viertel reduzieren kann.

Für lebenswerte Netto-Null-Städte sind sowohl Begrünungen als auch PV wichtige Elemente, wobei gesamtheitliche Lösungen anzustreben sind. Grünräume und PV-Anlagen sind arealübergreifend zu planen, die zur Verfügung stehenden Flächen von Dächern, Fassaden und Aussenräumen gezielt zu nutzen und die verschiedenen Potentiale der jeweiligen Systeme bewusst einzusetzen, um von deren Vorteilen zu profitieren.

## Résumé

L'objectif du projet GreenPV a été d'étudier des solutions pour combiner en façade des panneaux photovoltaïques et de la végétation dans le cadre du changement climatique. Les obstacles et l'acceptation de la végétalisation et du photovoltaïque (PV) en façade ont été tout particulièrement examinés. De plus, l'influence de différents systèmes de façade sur le microclimat et le bilan énergétique du bâtiment a été étudiée et comparée au potentiel de production d'énergie. Les synergies résultantes ont été mises en évidence. L'étude a porté sur les facteurs décisifs pour une optimisation globale de la façade en vue du changement climatique, sur comment une façade combinée PV et végétation peut être conçue de manière optimale pour le bien-être, l'énergie et l'environnement et sur comment promouvoir l'utilisation d'une telle façade dans le parc immobilier suisse.

L'étude a montré que la végétalisation des façades permettait de réduire considérablement les températures de surface. Sur le banc d'essai de façade de la Haute école spécialisée de Lucerne sur le campus de Horw, les températures de surface ont pu être réduites de 13.9 °C (végétalisation grimpante reliée au sol) et de 14.9 °C (végétalisation reliée au mur) par rapport à la façade de



référence de mesure lors d'une journée douce et ensoleillée. La « Physiological Equivalent Temperature (PET) » dans l'environnement du bâtiment a en outre été étudiée au moyen de l'outil de modélisation du climat de quartier (en Allemand « QKM »). À une distance de 1 m de la façade, la PET a pu être abaissée jusqu'à 4 K par la végétation grimpante reliée au sol et jusqu'à 8 K par la végétation reliée au mur. À une distance de 5 m de la façade, on pouvait encore noter une baisse de 1.4 K (système relié au sol) et de 3 K (système relié au mur). Cela a montré que les façades végétalisées sont certes capables d'abaisser sensiblement la PET dans l'environnement proche du bâtiment, mais que leur influence diminue rapidement avec la distance. Les façades PV ont en revanche entraîné des températures de surface plus élevées sur la façade (jusqu'à 5 K par rapport à la façade de référence lors d'une journée douce et ensoleillée). En raison de la faible réverbération solaire due au faible albédo des modules ainsi qu'à la conversion d'une partie du rayonnement en énergie électrique, il n'y a cependant pas d'influence négative sur la PET.

En plus de l'effet de rafraîchissement pendant les mois d'été, les façades végétalisées offrent d'autres avantages: elles favorisent la biodiversité, améliorent la qualité de l'air en fixant les polluants et en produisant de l'oxygène, réduisent la propagation du bruit dans les espaces routiers, contribuent à la rétention des eaux de pluie et augmentent ainsi la qualité de séjour et l'attractivité des espaces extérieurs (1) ce qui est particulièrement important dans les zones urbaines.

Les façades photovoltaïques offrent également de nombreux avantages: elles produisent de l'électricité et peuvent présenter un bilan écologique positif ainsi que des coûts de cycle de vie positifs. La durée d'amortissement dépend fortement de la production d'électricité, qui dépend elle-même du rendement et de la disposition des modules. Ainsi, le rendement solaire annuel via un module PV (avec un rendement électrique de 20 %) sur une façade sud non ombragée est jusqu'à 2.3 fois plus élevé que celui sur une façade nord et environ 1.2 fois plus élevé que celui sur une façade est et ouest. L'élément déterminant est la disposition des modules sur des surfaces non ombragées: Pour un module PV situé au rez-de-chaussée (distance par rapport au bâtiment d'en face égale à sa hauteur), le rendement électrique est réduit d'environ 42 % (façades nord, est et ouest) à 45 % (façade sud) par rapport à un module non ombragé situé au dernier étage du bâtiment. Cela se répercute donc également sur le bilan écologique et les coûts du cycle de vie. Une façade PV non ombragée orientée vers le sud peut amortir l'impact environnemental de la production/ démantèlement de l'ensemble du système PV en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES) après 10,8 années seulement (l'électricité consommée et injectée sur place a été déduite dans la phase d'exploitation selon la méthode M1 « Investir et vendre » du projet de recherche « Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich » (2), alors qu'il faut 25.2 ans pour une façade PV orientée vers le nord. Dans le cas d'une façade PV ombragée et orientée vers le nord, la durée d'amortissement peut dépasser la durée de vie des modules. Des conclusions similaires peuvent être tirées en ce qui concerne les coûts du cycle de vie: alors que les modules orientés de manière judicieuse (c'est-à-dire orientés vers le sud, l'est et l'ouest sans ombrage) sont amortis sur le cycle de vie, en ce qui concerne les coûts, une orientation nord ou sur des surfaces de façade ombragées dans toutes les orientations n'est pas rentable avec les hypothèses sur les coûts actuels (prix de l'électricité, subventions, etc.).

L'examen de la courbe de production électrique au cours de la journée a également mis en évidence l'intérêt de placer des modules PV dans différentes orientations (sud, est et ouest, non ombragés) afin d'assurer une production d'électricité tout au long de la journée et d'augmenter ainsi l'autoconsommation. En décembre, une façade PV orientée vers le sud permet en outre de produire jusqu'à 65 % d'électricité en plus (43 % sur les mois d'hiver) qu'une installation PV en toiture (angle de 5° orienté vers le sud), ce qui peut contribuer de manière importante à combler le déficit hivernal. La production annuelle d'électricité via une façade PV orientée vers le sud est toutefois inférieure de près de 20 % à celle d'une installation PV en toiture.

Contrairement aux façades photovoltaïques, les façades végétalisées ne sont généralement pas amorties en termes de bilan écologique et de coûts du cycle de vie au niveau du bâtiment. Les faibles économies réalisées au niveau de l'exploitation du bâtiment (besoins en énergie et en puissance nécessaire), ne peuvent pas compenser les dépenses supplémentaires liées à l'installation, à l'entretien et à la maintenance de la façade verte. Cependant, un système relié au sol n'entraîne



qu'une légère augmentation des émissions de gaz à effet de serre GES (environ 2 % de plus que la façade de référence) et des coûts 1.5 fois plus élevés sur le cycle de vie, et est donc préférable à un système relié au mur (environ 10 % de GES supplémentaires et des coûts au moins 4 fois plus élevés). Toutefois, lors de la prise de décisions, les aspects qualitatifs des systèmes de végétalisation mentionnés précédemment, en particulier dans les zones urbaines, ne sont pas négligeables et doivent être pris en compte, même s'ils ne peuvent pas être directement monétarisés. Étant donné que les bienfaits sociaux des façades vertes sont particulièrement élevés, il est recommandé de compenser cet écart entre les coûts (à la charge du propriétaire) et les avantages (pour la communauté), par exemple par des subventions.

L'étude a montré que le PV et la végétalisation des façades se combinent bien. Les façades PV doivent être placées sur des surfaces à fort potentiel de production électrique, ce qui est plutôt le cas, du moins dans les villes, dans les étages supérieurs. Comme les façades végétalisées ne réduisent que faiblement les besoins énergétiques du bâtiment (en particulier pour les nouveaux bâtiments bien isolés), les avantages de ces systèmes prennent surtout dans l'espace extérieur. C'est près des personnes que la végétalisation apporte la plus grande valeur ajoutée, ce qui rend judicieux son positionnement aux étages inférieurs, souvent ombragés dans les villes. L'analyse des combinaisons de systèmes a montré qu'un système judicieusement combiné (par exemple, étages supérieurs avec des modules PV, étages inférieurs végétalisés, pas de système sur la façade nord) entraîne des coûts plus élevés d'environ 9 % sur le cycle de vie par rapport à la façade de référence, mais peut réduire l'impact environnemental de plus d'un quart en termes de GES.

Les espaces verts et le PV sont des éléments importants pour les villes de type "zéro émission nette". Des solutions globales doivent être trouvées. Les espaces verts et les installations PV doivent être planifiés à l'échelle de la zone considérée, les surfaces disponibles des toits, des façades et des espaces extérieurs doivent être utilisées de manière ciblée et les différents potentiels des systèmes respectifs doivent être mis en œuvre de manière consciente afin de profiter de leurs avantages.

## Summary

The "GreenPV" project explored solutions for integrating photovoltaic (PV) systems and greenery into building façades in response to climate change. The study therefore investigated the barriers to and acceptance of greenery and PV systems on façades. In addition, the impact of different façade systems on the microclimate was quantified and the energy balance calculated. Finally, the potential of energy generation through PV was evaluated and synergies were identified. The decisive factors for a holistic optimisation of the building façade were analysed with regard to climate change. In addition, questions of how a façade with PV and greenery can be optimally designed for people, energy and the environment and how the use of such a façade can be promoted in the building stock were addressed.

The study shows that façade greening reduces the surface temperatures significantly. At the façade test stand at Lucerne University of Applied Sciences and Arts, surface temperatures on a mild, sunny day were reduced by 13.9 K with ground-based greening and 14.9 K with wall-based greening compared to the reference façade. The Physiological Equivalent Temperature (PET) in the surrounding area was assessed through simulations using the district climate modelling tool "Quartierklimamodellierung" (QKM). At 1 meter distance from the façade, PET was reduced by up to 4 K with ground-based greening and up to 8 K with wall-based greening. At 5 meters distance from the façade, the reductions were 1.4 K respectively 3 K. This indicates that while façade greening can significantly lower PET in the immediate vicinity, its effect diminishes rapidly with distance. Conversely, PV façades were associated with higher surface temperatures (up to 5 K above the reference façade), but due to the low albedo of the modules and the conversion of some incoming radiation into electrical energy, they did not negatively impact PET in the surrounding area.

Beyond their cooling effect in summer, façade greening offers additional benefits, including foster biodiversity, improving air quality by binding pollutants and producing oxygen whilst reducing the propagation of sound and contributing to rainwater retention. Greenery on buildings also improves the quality of life and contributes to the attractiveness of outdoor spaces particularly in urban areas.



PV façades provide numerous benefits, including electricity generation, favorable life cycle assessment and cost. The payback period is highly dependent on the electricity production, which is influenced by the efficiency and arrangement of the PV modules. For instance, the annual yield from a PV module (20% efficiency) on an unshaded south façade can be up to 2.3 times higher than on a north façade and about 1.2 times higher than on an east or west façades. The placement of modules on unshaded surfaces is critical; for example, placing a PV module on the ground floor (with the distance to the opposite building equal to its height) results in a 42–45 % reduction in electricity yield compared to an unshaded module on the top floor. This also affects the life cycle assessment and costs. An unshaded south-facing PV façade can offset the environmental impact of production and disposal related to greenhouse gas emissions (GHG) after about 10.8 years (the electricity consumed and fed in on site was deducted in the operating phase, in accordance with method M1 'Invest and sell' of the research project «Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich» (2)), while a north-facing PV façade requires 25.2 years. For a shaded north-facing PV façade, the amortization period may exceed the system's service life. Similar conclusions can be drawn regarding life cycle costs: while sensibly arranged modules (i.e., in south, east, and west orientations without shading) can amortize over their life cycle, installations on north-facing façades or shaded areas in any orientation are not economically viable under current cost assumptions (e.g., electricity prices, subsidies).

Looking at electricity production over the course of the day illustrates the sensible placement of PV modules on south, east, and west-facing unshaded façades to ensure electricity production throughout the day and thus increase self-consumption. In December, a south-facing PV façade can produce up to 65% more electricity (43 % over the winter months) than a PV roof system (tilted 5° south), contributing significantly to covering the winter gap. However, the annual electricity production of a south-facing PV façade is almost 20 % lower than that of a PV roof system.

Unlike PV façades, green façades typically do not offset their life cycle costs and environmental impact at the building level. The small operational savings in energy and power demand are insufficient to cover the additional costs of installation, care, and maintenance. However, a ground-based system results in only slightly higher GHG emissions (about 2 % higher than the reference façade) and 1.5 times higher life cycle costs, making it more favorable than a wall-based system (about 10 % higher GHG emissions and more than four times higher costs). Decision-making should also consider the qualitative benefits of greening, especially in urban areas, even if they cannot be directly monetized. Given the significant public benefits of façade greening, it is advisable to address the discrepancy between private costs and public benefits, for example, through subsidies.

The study concluded that PV and green façades can be effectively combined. PV systems should be installed on areas with high electricity generation potential, which is more likely to occur on upper floors in urban environments. Since façade greening only marginally reduces a building's energy demand (especially in new construction), its primary benefits are found in outdoor spaces. Greenery provides the most value in proximity to people, suggesting that lower floors, often shaded in urban settings, are ideal for such installations. The analysis of combined systems indicated that a well-integrated approach (e.g., PV on upper floors, greenery on lower floors, no systems on the north façade) results in approximately 9 % higher life cycle costs compared to the reference façade but can reduce environmental impacts related to GHG emissions by more than 25 %.

Both greenery and PV systems are crucial for developing livable, net-zero cities and require comprehensive solutions. Green spaces and PV installations should be planned holistically, with targeted use of available roof, façade, and outdoor areas, and careful consideration of the specific potential of each system to maximize their combined benefits.



## Take-home messages

- **PV-Fassaden** zahlen sich bei einer sinnvollen Anordnung der Module sowohl ökonomisch als auch ökologisch (hinsichtlich der THGE) aus. Obwohl die jährliche Stromproduktion einer unverschatteten, nach Süden ausgerichteten Fassadenanlage um 20 % geringer ist als die einer Dachanlage (Winkel 5° nach Süd orientiert), erzeugt sie im Winter 43 % mehr Strom.
- **Fassadenbegrünungen** rentieren sich ökonomisch für private Investoren/innen nicht, jedoch profitiert die Allgemeinheit aufgrund der vielfältigen qualitativen Vorteile (Hitzeminderung, Steigerung der Biodiversität, Verbesserung der Luftqualität, Reduktion von Lärmbelastungen, Regenwasserretention, höhere Attraktivität des öffentlichen Raums). Mit Blick auf das Gebäude verschlechtert sich die Ökobilanz nur geringfügig.
- Verglichen mit horizontalen Grünflächen und Bäumen verfügen **Fassadenbegrünungen** über eine kleinere Kühlleistung, sie können jedoch an Orten mit knappen Platzverhältnissen angewandt werden, wo kein Platz für andere Begrünungen vorhanden ist. Den grössten Kühleffekt erreichen Begrünungen an besonnten und windarmen, vom städtischen Wärmeinseleffekt betroffenen Standorten.
- **PV-Fassaden** heizen sich in den Sommermonaten zwar stärker auf (höhere Oberflächentemperaturen), auf die PET in der Umgebung haben sie jedoch keinen negativen Einfluss und können diese sogar positiv beeinflussen.
- Durch die gezielte **Kombination von Begrünungen und PV** an der Fassade lassen sich mit einem geringfügigen Mehraufwand an Lebenszykluskosten (ca. 9 % im Vergleich zur Referenzfassade) die Ökobilanz bedeutend verbessern (Reduktion der TGHE um mehr als ein Viertel), der städtische Wärmeinseleffekt reduzieren und die Aufenthaltsqualität trotz der zunehmenden städtischen Verdichtung erhalten.





## Verdankung

Die Autoren danken herzlich den Vertretern/innen der Begleitgruppe sowie allen Workshopteilnehmenden für die Unterstützung, die Anregungen, den fachlichen Austausch und das Interesse. Die Beauftragten danken zudem dem Bundesamt für Energie (BFE), der Steiner Lab Foundation (SLF), dem Amt für Hochbau der Stadt Zürich (AHB) sowie der Stadt St. Gallen für (SSG) die finanzielle Unterstützung und dem themenspezifischen Engagement.

Folgende Personen haben als **Begleitgruppe** oder als Teilnehmende im Rahmen von Workshops und Meetings oder im direkten Austausch einen Beitrag zum Projekt geleistet:

**Roger Ingold (Ingold Gartenbau und Begrünung), Thomas Kessler (Stadt Zürich, Amt für Hochbauten), Markus Koschenz (HSLU, IGE), Maria Sciavarrello (SLF), Nadège Vetterli (BFE), Peter Wenig (SSG), Thomas Wüest (HSLU, IBI), Moritz Zwahlen (EPRO ENGINEERING),** Alberto Arengi (Università di Brescia), Julian Dänzer (3S Solar Plus), Nicolas Disch (Stadt Zürich, Grün Stadt Zürich), Heike Eichler (Stadt Zürich, Dep. industrielle Betriebe), Markus Fierz (Raderschallpartner AG, Landschaftsarchitekten bsla sia), Corinna Gutri (Stadt Zürich, Fachbereich Klimaschutz Netto-Null), Valérie Leimgruber (Stadt Zürich, Architektur und Stadtraum), Marcel Nufer (Amstein + Walthert AG Zürich), Saskia Kohler (Amstein + Walthert AG Zürich), Hans-Christian Rufer (Stadt Zürich, Amt für Städtebau), Andreas Luible (USLU, IBI), Urs-Peter Menti (HSLU, IGE), Roger Buser (HSLU, IGE), Camilla Perra (Università di Brescia), Maurus Schifferli (Landschaftsarchitekt), Michael Schiltknecht (SLF), Veronika Sutter (Stadt Zürich, Umwelt und Gesundheitsschutz), Philippe Willareth (Dr. Lüchinger + Meyer Bauingenieure AG), Lukas Schmid (Landscape AG), Miriam Nietlispach (Cerca Research & Design Lab), Michael Gerber (Schweizerische Fachvereinigung Gebäudebegrünung), Elsa Katharina Jacobi (Stadt Zürich, Amt für Städtebau), Miriam Hodel (Hodel & Partner AG), François Cliquet (Steiner AG), Jonas Brunner (Gartenmann Engineering), Lukas Bäurle (BE Netz AG), Pascal Bach (Penzel Valier AG), Francisco Bouzas (aplantis AG), Fabian Meier (Skygardens AG), Alexander Knecht (damals Skygardens AG)

**Herzlichen Dank!**



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>4</b>
<b>Summary</b> .....	<b>6</b>
<b>Take-home messages</b> .....	<b>8</b>
<b>Verdankung</b> .....	<b>9</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>10</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>15</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>16</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>35</b>
1.1 Ausgangslage .....	35
1.2 Zielsetzung .....	36
1.3 Motivation .....	37
1.3.1 Vorhergehende Studien.....	37
1.3.2 Parallel laufende HSLU-Studien.....	38
1.3.3 Parallel laufende Studien in anderen Institutionen.....	39
<b>2 State of the Art</b> .....	<b>39</b>
2.1 Fassadenbegrünung.....	39
2.1.1 Klassifizierung und Eigenschaften von Fassadenbegrünungen, Projektbeispiele.....	39
2.1.2 Wasserbedarf .....	44
2.1.3 Brandschutz.....	46
2.2 PV-Anlagen im Fassadenbereich.....	51
2.2.1 Klassifizierung und Eigenschaften von PV-Fassaden, Projektbeispiele .....	51
2.2.2 Brandschutz.....	54
2.3 Kombination von PV und Begrünungen .....	60
<b>3 Vorgehensweise</b> .....	<b>62</b>
<b>4 Systemgrenzen und Annahmen</b> .....	<b>63</b>
4.1 Klimadaten, Szenarien und relevante Jahre .....	63
4.2 Standort .....	64
4.3 Quartier.....	64
4.4 Gebäude .....	66
4.5 Fassadenbegrünungen und PV-Systeme .....	67
4.6 Übersicht Bewertungskriterien.....	71
<b>5 Methodik</b> .....	<b>73</b>
5.1 Qualitative Analyse.....	73
5.2 Quantitative Analyse.....	73



5.2.1	Gebäudesimulationen.....	73
5.2.2	Berechnung Ökobilanz (LCA).....	77
5.2.3	Berechnung Lebenszykluskosten (LCC).....	79
5.2.3.1.	Eingabegrößen.....	80
5.2.3.2.	Investitions-, Instandsetzungs- und Unterhaltskosten.....	81
5.2.3.3.	Restwert.....	87
5.2.3.4.	Energiekosten.....	88
5.2.3.5.	Förderung für PV und Begrünungen .....	90
5.3	Messinfrastruktur .....	92
5.4	Quartierklimamodellierung (QKM).....	95
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der qualitativen Analyse.....</b>	<b>100</b>
6.1	Lärm in Städten .....	100
6.2	Luftqualität .....	105
6.3	Biodiversität .....	109
6.4	Regenwasserrückhalt.....	113
6.5	Attraktivität der Aussenräume .....	117
6.6	Zusammenfassung .....	122
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der quantitativen Analyse .....</b>	<b>124</b>
7.1	Thermisches Wohlbefinden im Innenraum: Temperaturen und Überhitzungsstunden (Sommerhalbjahr).....	126
7.1.1	Referenzgebäude «Neubau» .....	126
7.1.2	Referenzgebäude «Altbau».....	128
7.1.3	Referenzgebäude «sanierter Altbau».....	130
7.1.4	Kapitelzusammenfassung .....	131
7.2	Betrieb des Gebäudes: Wärme, Kälte und Stromverbrauch.....	133
7.2.1	Referenzgebäudes «Neubau».....	134
7.2.2	Referenzgebäude «Altbau».....	136
7.2.3	Referenzgebäude «sanierter Altbau».....	137
7.2.4	Kapitelzusammenfassung .....	139
7.3	Stromproduktion der PV-Fassade, Solarpotential und saisonale Betrachtung.....	141
7.3.1	Jährliche Stromerzeugung.....	142
7.3.2	Saisonale Betrachtung .....	143
7.3.3	Betrachtung im Tagesverlauf.....	148
7.3.4	Kapitelzusammenfassung .....	150
7.4	Betrieb und Erstellung: gesamtheitliche Ökobilanz (LCA) .....	153
7.4.1	Erstellung und Unterhalt.....	153
7.4.2	Erstellung und Betrieb (inkl. Unterhalt).....	155
7.4.3	Kapitelzusammenfassung .....	160
7.5	Ökonomische Betrachtung: Initial- und Lebenszykluskosten (LCC).....	164



7.5.1	Investitions-, Instandsetzungs-, Unterhalts- und Energiekosten sowie Restwerte .....	164
7.5.2	Annualisierte Kosten als Barwert .....	168
7.5.3	Kapitelzusammenfassung .....	171
7.6	Zusammenfassung der quantitativen Analyse .....	174
<b>8</b>	<b>Ergebnisse der Messungen.....</b>	<b>177</b>
8.1	Einfluss der Fassadensysteme im Sommer .....	178
8.1.1	Oberflächentemperaturen der Fassadenprototypen .....	178
8.1.2	Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen).....	180
8.2	Einfluss der Fassadensysteme im Winter .....	183
8.2.1	Oberflächentemperaturen der Fassadenprototypen .....	183
8.2.2	Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen).....	185
8.3	Zusammenfassung .....	187
<b>9</b>	<b>Ergebnisse der Quartierklimamodellierung (QKM).....</b>	<b>189</b>
9.1	Ausgangslage: PET im Strassenraum (ohne Begrünung oder PV) .....	189
9.2	Einfluss der Fassadensysteme auf den thermischen Komfort im Aussenraum.....	192
9.3	Wirkung der Fassadensysteme im Tagesverlauf .....	196
9.4	Wirkung der Fassadensysteme auf Arealebene .....	199
9.5	Einfluss des Windes auf die Wirkung der Fassadensysteme .....	202
9.6	Einfluss von Rasenflächen und Bäumen auf das Umgebungsklima.....	203
9.7	Zusammenfassung .....	206
<b>10</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>207</b>
10.1	Fasadengestaltung mit PV und Begrünungen, Bewertung von Systemkombinationen hinsichtlich LCA und LCC.....	208
10.1.1	Ökobilanz (LCA) der Szenarien.....	211
10.1.2	Lebenszykluskosten (LCC) der Szenarien .....	213
10.1.3	Kapitelzusammenfassung, Ökobilanz vs. Lebenszykluskosten .....	215
10.2	Einflussfaktoren auf die Ökobilanz (LCA) von PV-Fassaden (Sensitivitätsanalyse).....	216
10.2.1	Anpassungen der KBOB-Liste: Version 2016 vs. 2022 sowie künftige Entwicklungen .....	216
10.2.2	Auswirkungen der dynamischen Bewertung der Umweltauswirkungen von Strom.....	217
10.2.3	Auswirkungen der methodischen Bilanzierung der Einspeisung von Strom und zeitliche Auflösung bei der Bestimmung des Eigenstromanteils .....	219
10.3	Einfluss des statischen Mehraufwands verschiedener Begrünungssysteme auf die Ökobilanz (LCA) .....	221
10.4	Einflussfaktoren auf die Lebenszykluskosten (LCC) (Sensitivitätsanalyse).....	222
10.5	Bedeutung von Begrünungen und PV im städtischen und ländlichen Kontext .....	224
10.6	Erweiterung der Systemgrenze: gesamtheitliche Gestaltung mit Begrünungen und PV .....	227
10.7	Hemmnisse und Massnahmen zur Steigerung der Akzeptanz von Begrünungen und PV im Fassadenbereich .....	229
10.7.1	Hohe Initialkosten, zusätzliche Kosten für Pflege- und Instandhaltung bei Begrünungen.....	230



10.7.2	Erhöhter Planungsaufwand, fehlende Erfahrungen, Unklarheiten und Unsicherheiten bei Planenden.....	233
10.7.3	Fehlende Erfahrungen und Unklarheiten bei der Ausführung, Fachkräftemangel, Engpass Lieferungen (Abhängigkeit von Importprodukten) .....	234
10.7.4	Brandschutz.....	234
10.7.5	Denkmalschutz .....	235
10.7.6	Attraktivität, Ästhetik und fehlende Akzeptanz .....	236
10.7.7	Überblick Hemmnisse und Massnahmen zur Steigerung der Akzeptanz .....	236
<b>11</b>	<b>Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>237</b>
11.1	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	237
11.2	Handlungsempfehlungen.....	238
11.2.1	Handlungsempfehlungen für Planende .....	238
11.2.2	Handlungsempfehlungen für Bauherrschaften.....	240
11.2.3	Handlungsempfehlungen für Behörden.....	241
<b>12</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>242</b>
12.1	Die Rolle von Standards und Label.....	242
12.2	Themenfelder für mögliche weiterführende Untersuchungen .....	242
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>244</b>
<b>14</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>251</b>
14.1	Datengrundlagen für die Simulationen .....	251
14.1.1	Konstruktionen.....	252
14.1.1.1.	«Wohnen Neubau».....	252
14.1.1.2.	«Wohnen Altbau» .....	254
14.1.1.3.	«Wohnen sanierter Altbau» .....	256
14.1.2	Verglasung und Verschattungssystem.....	257
14.1.3	Lüftung / Nachtauskühlung.....	257
14.1.4	Geräte.....	257
14.1.5	Beleuchtung.....	258
14.1.6	Personenbelegung .....	258
14.1.7	Heiz- und Kühlsystem.....	258
14.2	Datengrundlagen für die Ökobilanz der Fassadesysteme (LCA).....	258
14.3	Interviewleitfaden.....	267
14.3.1	Expertengespräch: Fassadenbegrünung .....	267
14.3.2	Expertengespräch: PV.....	268
14.4	Messergebnisse .....	270
14.4.1	Bewölkter Sommertag .....	270
14.4.2	Regnerischer Sommertag.....	274
14.4.3	Bewölkter, milder Tag.....	278
14.4.4	Regnerischer, milder Tag .....	282



14.4.5	Sonniger, kalter Tag .....	286
14.4.6	Bewölker, kalter Tag.....	290
14.4.7	Regnerischer, kalter Tag .....	294
14.4.8	Sonniger Wintertag.....	298
14.4.9	Regnerischer Wintertag.....	302



## Abkürzungsverzeichnis

BIPV	<i>Building integrated photovoltaic</i> (Gebäude integrierte Photovoltaik)
CdTe	<i>Cadmium Telluride</i> (Cadmiumtellurid)
CIGS	<i>Copper indium gallium selenide solar cell</i> (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid). Auch bezeichnet als CIS.
c-Si	<i>Crystalline silicon</i> (Kristallines Silizium)
DSSC	<i>Dye-sensitized solar cell</i> (Farbstoffsolarzelle)
EW	Elektrizitätswerk
HSLU	Hochschule Luzern
IGE	Institut für Gebäudetechnik und Energie
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
LCC	<i>Life Cycle Cost</i> (Lebenszykluskosten)
NCCS	<i>National Center for Climate Services</i>
NOCT	<i>Normal Operating Cell Temperature</i> (Nennbetriebstemperatur der Zelle)
OPV	<i>Organic photovoltaic</i> (Organische Photovoltaik)
PEne	Nicht erneuerbare Primärenergie (Graue Energie)
PET	<i>Physiological equivalent temperature</i> (physiologisch äquivalente Temperatur)
PV	<i>Photovoltaik</i>
QKM	Quartierklimamodellierung
RCP2.6	<i>Representative Concentration Pathway 2.6</i> <sup>1</sup> (Repräsentative Konzentrationspfade)
RCP8.5	<i>Representative Concentration Pathway 8.5</i> <sup>1</sup> (Repräsentative Konzentrationspfade)
RF	<i>Réaction au feu</i> (Brandverhalten)
SIA	Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (Standardtestbedingungen)
STP	Stand-der-Technik-Papier
THGE	Treibhausgasemissionen
UBP	Umweltbelastungspunkte
UHIE	<i>Urban Heat Island Effect</i> (Städtischer Wärmeinseleffekt)
VHF	Vorgehängte hinterlüfteten Fassadenkonstruktion
VKF	Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen

<sup>1</sup> Representative Concentration Pathways (RCPs), IPCC: [https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5\\_scenario\\_process/RCPs.html](https://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html)



# Zusammenfassung

## Ausgangslage

Laut dem *National Center for Climate Services* NCCS könnte die Jahresmitteltemperatur in der Schweiz bei ungebremst steigenden Treibhausgasemissionen um 3.3 – 5.4 °C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ansteigen<sup>2</sup>. Diese Entwicklung könnte künftig massive Auswirkungen auf den **Energiebedarf (insbesondere die Kühlung)** und die **Behaglichkeit (Zunahme von Hitzetagen)** unserer Gebäude haben.

Der Kältebedarf wird vorwiegend dann anfallen, wenn die Solarstrahlung am intensivsten sein wird. Diese zeitliche Koinzidenz spricht dafür, dass der **Energiebedarf für die Kühlung** durch die Stromerzeugung mit **PV-Anlagen** gedeckt wird. Der Druck bzw. die Notwendigkeit – zusätzlich zu den Dachflächen – auch Fassaden mit PV-Elementen zu belegen, wird dadurch immer grösser.

Klimageräte produzieren Kälte für die Innenräume, führen dabei aber die entzogene Wärme nach aussen. Dieser Wärmeübertrag auf die Aussenluft ist nicht vernachlässigbar und kommt zum **städtischen Wärmeinseleffekt** hinzu. Dieser allein kann die Überhitzungsstunden in ungekühlten Innenräumen in Zukunft um 50 % ansteigen lassen (3). **Grünflächen** sind deshalb im **urbanen Gebiet** äusserst wichtig. Die Vorteile von Begrünungen sind vielfältig, vor allem leisten sie aber einen wesentlichen Beitrag zur **Abkühlung der Aussenluft**. Bei knappen Platzverhältnissen stellen Begrünungen an Gebäuden dabei eine sinnvolle Variante zu anderen Grünelementen (Bäumen, Rasenflächen, etc.) dar.

Während die Vorteile von Begrünungen und PV-Systemen im Dachbereich bereits vermehrt genutzt werden, bleibt das **hohe Potential von Gebäudefassaden** bisher weitestgehend ungenutzt. Der bewusste Umgang mit Fassadenoberflächen als Potential im Hinblick auf den Klimawandel kommt in der heutigen Architektursprache nicht genügend zum Ausdruck. Hier setzt das Projekt an.

## Ziel des Projekts

Ziel des Projekts war es, den **Hemmnissen** und der **Akzeptanz** hinsichtlich des Einsatzes von Begrünungen und PV an Gebäudefassaden nachzugehen. Dabei wurden Hinweise zum **Einfluss** von verschiedenen Fassadensystemen auf das **Mikroklima am Gebäude** sowie die **Energiebilanz im Gebäude** gegeben und diese dem **Potential** der **Energieerzeugung** gegenübergestellt sowie Synergien aufgezeigt. Bei der Abwägung der Systeme bzw. bei der Bestimmung der **optimalen Fassadengestaltung** spielen neben dem Standort auch finanzielle, energetische, gestalterische, soziale und umweltbezogene Aspekte eine Rolle. Im **partizipativen Diskurs** mit und zwischen relevanten Playern und basierend auf bestehenden sowie laufenden Forschungsprojekten und -erkenntnissen wurden deshalb u.a. Antworten auf folgende Fragestellungen erarbeitet:

- Welches sind die entscheidenden Faktoren, die bei der gesamtheitlichen Optimierung der Gebäudefassade im Hinblick auf dem Klimawandel zu berücksichtigen sind?
- Wie kann die Fassade mit PV und begrünten Flächen gestaltet werden, damit ein maximaler Nutzen für Mensch, Energie und Umwelt entsteht?
- Wie kann die ermittelte, multifunktionale Fassade in das Gebäude integriert und wie kann deren Anwendung im Gebäudepark gefördert werden?

Normative Aspekte wie zum Beispiel Brandschutzanforderungen werden zwar thematisiert, jedoch nicht beurteilt. Details sind in den Kapiteln 2.1.3 und 2.2.2 zu finden.

---

<sup>2</sup> <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/zahlen-und-fakten/temperatur.html>





## Vorgehensweise

Bei der Bestimmung der optimalen Fassadengestaltung sowie zur Ermittlung von praxistauglichen Lösungsansätzen wurde im partizipativen Diskurs und basierend auf bestehenden sowie laufenden Forschungsprojekten und -erkenntnissen gearbeitet. Das Projekt baute deshalb auf einer Untersuchung auf drei Ebenen auf: theoretische Grundlagen, dem Einbezug von relevanten Stakeholdern und Messungen.

(i) In einem **Analyse-/ Simulationsteil** wurde die optimale Aufteilung der Fassadenfläche unter Berücksichtigung verschiedener Parameter (thermischer Komfort, Betriebs- und graue Energie, Kosten u.a.) rechnerisch ermittelt. Ebenso wurden qualitative Aspekte der Aussenraumgestaltung betrachtet. Dabei wurden typologisch repräsentative Referenzgebäude herangezogen und vier charakteristische Fassadensysteme analysiert (bodengebundene und wandgebundene Begrünung, opake und transparente PV-Module).

(ii) Der **Wissensaustausch und -aufbau**, bzw. das Zusammenführen von gegensätzlichen Interessen, wurde durch Workshops mit und zwischen den relevanten Playern sichergestellt. Dazu wurden Fachplaner/innen aus der Solarbranche, (Landschafts-) Architekten/innen, Stadtverwaltung, Städte- und Fassadenplaner/innen, Investoren/innen usw. eingeladen.

(iii) Mit der Auswertung von **Messungen** an realen Fassadenprototypen sowie **Quartierklimamodellierungen (QKM)**<sup>3</sup> wurde der Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf die Umgebungstemperatur überprüft und verifiziert.

## Klimadaten, Referenzgebäude und Fassadensysteme

Die Quantifizierung der Auswirkungen der Fassadenbegrünungen auf das Aussen- und Innenklima sowie der Stromerzeugung von PV-Anlagen und deren Kosten- und Umweltauswirkungen hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, wie z. B. dem Standort, der Geometrie des Gebäudes und der Umgebung sowie der Bauweise des Gebäudes und den Eigenschaften der analysierten Systeme.

Die Betrachtungen wurden mit Blick auf ein **künftiges Klimaszenario** durchgeführt. Als Referenz in dieser Studie wurde die **Periode 2060 und das Szenario RCP 8.5** verwendet, was einem extremen Treibhausgasszenario entspricht. Dadurch konnte die Bedeutung und das Potential von Begrünungsmassnahmen und PV-Systemen verdeutlicht werden. Als Referenzstandort wurde die **Stadt Zürich** verwendet. Mit der Klimastation Zürich Kaserne wurde auch der städtischen Wärmeinseleffekt in den Simulationen berücksichtigt.

In der Studie wurden insgesamt **drei Referenzgebäude** («Neubau», «Altbau», «sanierter Altbau») betrachtet, wobei sich der «Altbau» und der «sanierter Altbau» lediglich in den thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle unterscheiden. Abbildung 1 zeigt den 8-geschossigen «Neubau» (links) sowie den 4-geschossigen «Altbau» / «sanierter Altbau» im städtischen Kontext (fiktives Quartier, Gebäudekubatur analog dem jeweiligen Referenzgebäude, Gebäudehöhe und -abstand analog dem Referenzgebäude «Altbau» / «sanierter Altbau»). Als Referenzfassade wurde bei allen Referenzgebäuden eine hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten angenommen.

Es wurden insgesamt **zwei Typologien von Fassadenbegrünungen** (bodengebunden und wandgebunden) sowie **zwei Typologien von PV-Fassaden** (transparente und opake Module) betrachtet.

---

<sup>3</sup> <https://www.hslu.ch/de-ch/hochschule-luzern/forschung/projekte/detail/?pid=5767>

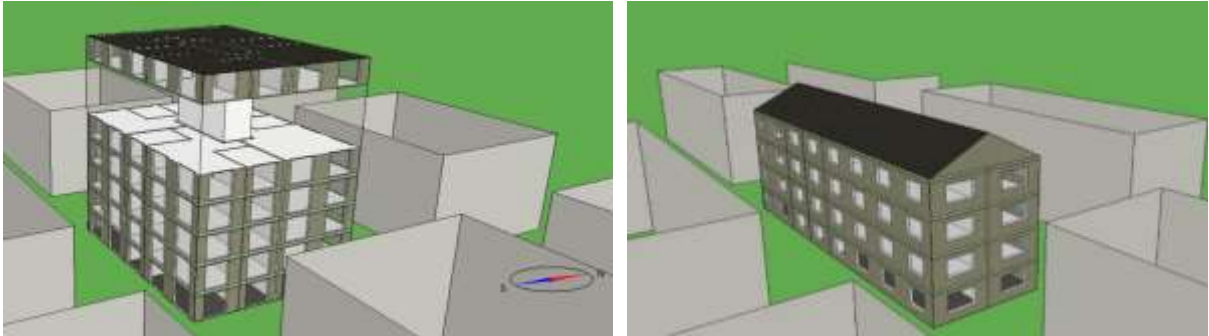


Abbildung 1: Simulationsmodelle der Referenzgebäude im städtischen Kontext, links: Referenzgebäude «Neubau», rechts: Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau» (gleiche Geometrie, gleicher Kontext).

## **Bewertungskriterien**

Die Beurteilung der verschiedenen Fassadensysteme erfolge anhand verschiedener qualitativer und quantitativer Aspekte.

### Qualitative Aspekte

- Lärm in Städten
- Luftqualität
- Biodiversität
- Regenwasserrückhalt
- Attraktivität der Aussenräume

### Quantitative Aspekte

- Thermisches Wohlbefinden in Innenräumen: Temperatur und Anzahl Überhitzungsstunden (Sommerhalbjahr)
- Betrieb des Gebäudes: Wärme, Kälte und Stromverbrauch
- Stromproduktion der PV-Fassade, Solarpotential und saisonale Betrachtung
- Betrieb und Erstellung: gesamtheitliche Ökobilanz (LCA)
- Ökonomische Betrachtung: Initial- und Lebenszykluskosten (LCC)
- Mikroklima: Temperatur an der Fassade und PET (physiologisch äquivalente Temperatur) in der näheren Umgebung

## **Ergebnisse der qualitativen Analyse (Kapitel 6)**

Die verschiedenen Fassadensysteme wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die zuvor genannten qualitativen Aspekte analysiert. Dazu wurde zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, um bestehende Grundlagen und Erkenntnisse zu den genannten Themenfeldern zusammenzutragen. Basierend auf diesem Wissen wurden die vier Fassadensysteme anschliessend im Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) bewertet. Tabelle 1 fasst die Ergebnisse zusammen.



Tabelle 1: Übersichtstabelle, dargestellt ist der Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf verschiedene qualitative Aspekte im Vergleich zu einer hinterlüfteten Fassade mit Faserzementplatten (Referenz).

Qualitative Aspekte <i>Bewertung im Vergleich zur Referenzfassade (Faserzementplatten hinterlüftet)</i>	Fassadenbegrünung		PV-Fassade	
	bodengebunden <i>(sommergrün, Wuchshöhe bis 3. OG)</i>	wandgebunden <i>(immergrün, modulares System)</i>	opak	transparent <i>(Transparenz 30%)</i>
<b>Lärm in Städten</b> – beurteilt wurde das Potenzial in einer engen Strassenschlucht mit starkem Strassenverkehr (~ 80 dB, sehr laut.)				
EG	+++	++++	-	-
1.OG	+++	++++	-	-
2.OG	+++	++++	-	-
3.OG	++	+++	neutral	neutral
≥ 4.OG	neutral	++	neutral	neutral
<b>Luftqualität</b> – beurteilt wurde das Potenzial in einer engen Strassenschlucht mit starkem Strassenverkehr.				
EG	+++	++++	neutral	neutral
1.OG	++	+++	neutral	neutral
2.OG	+	+	neutral	neutral
3.OG	+	+	neutral	neutral
≥ 4.OG	neutral	neutral	neutral	neutral
<b>Biodiversität</b> – dargestellt ist das Potenzial zur Förderung von neuen Lebensräumen und der Artenvielfalt, die Gefahr durch Spiegelungen wurde bei den PV-Fassaden berücksichtigt.				
EG	+++	++++	-	-
1.OG	+++	++++	-	-
2.OG	+++	++++	-	-
3.OG	+++	++++	-	-
≥ 4.OG	neutral	++++	-	-
<b>Regenwasserrückhalt</b> – das Potenzial von Begrünungen ist an den Wetterseiten Nord/Nord-West/West am grössten.				
EG	++++	++++	neutral	neutral
1.OG	+++	++++	neutral	neutral
2.OG	+++	++++	neutral	neutral
3.OG	+++	++++	neutral	neutral
≥ 4.OG	neutral	++++	neutral	neutral
<b>Attraktivität der Aussenräume</b> – bewertet wurde das Gestaltungspotenzial der Fassadensysteme durch Farbe, Muster, Transparenzgrade, Blühzeiten, etc.				
EG	+++	++++	neutral	+
1.OG	+++	++++	neutral	+
2.OG	++	+++	neutral	+
3.OG	++	+++	neutral	+
≥ 4.OG	neutral	++	neutral	+

**Legende:**

- +      geringer Einfluss    ++      mittlerer Einfluss    +++      hoher Einfluss    ++++      sehr hoher Einfluss  
 + + + +      positiver Einfluss    - - - -      negativer Einfluss



### Lärm in Städten (Kapitel 6.1)

**Begrünungen** können die **Schallausbreitung im Strassenraum mindern**. Die Wirkung hängt dabei stark vom umgebenden Kontext sowie dem Schallpegel (**Art und Entfernung zur Emissionsquelle**) ab. Bewertung wurde eine enge Strassenschlucht mit starkem Strassenverkehr (~ 80 dB, sehr laut) angenommen, wodurch der Effekt der Fassadensysteme insbesondere in den untersten Geschossen am grössten ist. **PV-Module** haben eine harte, glatte Oberfläche, wodurch ein Grossteil des einfallenden Schalls reflektiert wird und der Einfluss im Vergleich zur Referenzfassade als **geringfügig negativ** in den unteren Geschossen bewertet wurde.

### Luftqualität (Kapitel 6.2)

**Begrünungen** können diverse Schadstoffe binden, Sauerstoff produzieren und somit einen **positiven Mehrwert für die Luftqualität** leisten. Auch bei diesem Aspekt ist die Nähe zur Emissionsquelle entscheidend, weshalb das Potential in den unteren Geschossen (bis ca. 1. OG) am höchsten bewertet wurde. **PV-Fassaden** können keinen direkten Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität leisten. **Indirekt** kann durch den Einsatz erneuerbarer Energien jedoch auch ein wichtiger Beitrag zur Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen geleistet werden.

### Biodiversität (Kapitel 6.3)

Begrünungen leisten einen wesentlichen Beitrag zur **Förderung der Biodiversität**. Insbesondere in **städtischen Gebieten**, wo es weniger Platz für Grünflächen, Bäume oder andere Grünelemente gibt, können **Fassadenbegrünungen** eine gute Massnahme darstellen. Besonders hoch ist das Potential dann, wenn Fassadenbegrünungen als «Grüngürtel» eingesetzt werden und grüne Bereiche in Städten miteinander verbinden. **PV-Fassaden** können keinen direkten Beitrag zur Förderung der Biodiversität leisten, hinzu kommen mögliche Spiegelungen über die Paneele, was bspw. für Vögel, eine Gefahr darstellen kann. Dies gilt es bei der Planung zu berücksichtigen.

### Regenwasserrückhalt (Kapitel 6.4)

Insbesondere über die Substratschicht (Infiltration), aber auch durch die Blattstrukturen können **Begrünungen** einen **positiven Beitrag für das Regenwassermanagement in Städten** leisten. Die Wirkung ist dabei insbesondere an den Wetterseiten Nord/Nord-West/West am grössten. **PV-Fassaden** verhalten sich hier ähnlich wie die Referenzfassade und leisten keinen direkten Beitrag.

### Attraktivität der Aussenräume (Kapitel 6.5)

PV und begrünte Fassaden können als architektonisches Gestaltungsmittel eingesetzt werden. Bei den **PV-Fassaden** gibt es heutzutage eine **diverse Auswahl an Farben, Mustern, Transparenzgraden, etc.** Im Vergleich zur Referenzfassade, welche ebenso verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten bietet, wurde dieses Fassadensystem jedoch als «neutral» (opake Module) bis «leicht positiv» (transparente Module) bewertet. **Fassadenbegrünungen** können neben den gestalterischen Eigenschaften (Blühzeiten, Pflanzenarten und Farben, etc.) ebenso die **Aufenthaltsqualität verbessern**. Grünräume haben einen positiven Effekt auf die menschliche Gesundheit, fördern die Kreativität, Produktivität, mindern Stress, etc. Den Grössten Effekt können Begrünungen dabei insbesondere **nahe am Menschen** erreichen (i.d.R. in den unteren Geschossen).

### Zusammenfassung der qualitativen Aspekte (Kapitel 6.6)

Die Analyse der qualitativen Aspekte hat gezeigt, dass insbesondere **Fassadenbegrünungen einen positiven Mehrwert** leisten und vor allem nahe am Menschen den grössten Einfluss nehmen können. Im betrachteten städtischen Kontext ist somit der **Effekt von Begrünungen speziell in den unteren Geschossen am grössten**. Die **PV-Fassaden** verhalten sich auf die Aspekte meist **ähnlich wie die Referenzfassade**. Bei einigen Aspekten, wie bspw. Lärm in Städten oder Biodiversität, ist eine PV-Fassade im betrachteten Kontext sogar leicht negativ zu bewerten.



## Ergebnisse der quantitativen Analyse (Kapitel 7)

Die verschiedenen Fassadensysteme wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die zuvor genannten quantitativen Aspekte analysiert. Dazu wurden Simulationen und Berechnungen anhand der Referenzgebäude («Neubau», «Altbau» und «sanierter Altbau») durchgeführt.

### Thermisches Wohlbefinden in Innenräumen: Temperatur und Anzahl Überhitzungsstunden im Sommerhalbjahr (Kapitel 7.1)

Die Analyse hat gezeigt, dass **Fassadenbegrünungen** im Sommerhalbjahr einen **positiven Einfluss auf die Innenraumtemperatur und die Anzahl Überhitzungsstunden** nehmen können. Der **positive Effekt der Begrünungen ist im Altbau klar am grössten**, die maximal empfundene Temperatur wie auch die Anzahl Überhitzungsstunden können hier am deutlichsten reduziert werden. Das liegt daran, dass die Fassade deutlich **weniger gut gedämmt** ist als bei den anderen Referenzgebäuden und die Fassadenbegrünungen somit einen merkbaren Mehrwert hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit im Innenraum leisten kann. Beim «Neubau» ist der Effekt aufgrund der gut gedämmten Fassade hingegen **deutlich geringer**.

### Betrieb des Gebäudes: Wärme, Kälte und Stromverbrauch (Kapitel 7.2)

**Fassadenbegrünungen** können einen **Einfluss auf den Energiebedarf und den Leistungsbedarf** von Gebäuden im Sommer und Winter nehmen. **Im Sommer** ist dieser Effekt, bezogen auf den Klimakälte- bzw. den Klimakälteleistungsbedarf, **immer positiv**. In den Wintermonaten ist der Einfluss der Fassadenbegrünung, bezogen auf den Heizwärme- bzw. dem Heizwärmeleistungsbedarf, abhängig vom Gebäudestandard. Beim «Altbau», mit einer schlecht gedämmten Hülle und einem geringeren Fensterflächenanteil, wird der Energie- und Leistungsbedarf durch die Begrünung gesenkt. Beim «Neubau», mit einer gut gedämmten Hülle und einem höheren Fensterflächenanteil, führt die Begrünung aufgrund der Beschattung und der dadurch verminderten solaren Einstrahlung zu einem Anstieg des Heizwärme- bzw. des Heizwärmeleistungsbedarfs. Generell ist der Effekt von Fassadenbegrünungen auf den Betrieb des Gebäudes jedoch als **gering** einzustufen, insbesondere bei einem gut gedämmten Gebäude.

### Stromproduktion der PV-Fassade, Solarpotential und saisonale Betrachtung (Kapitel 7.3)

Die Höhe des Stromertrags über PV-Module an der Fassade hängt von verschiedenen Faktoren ab. Neben dem **Wirkungsgrad** der Module spielt insbesondere die **Orientierung** sowie eine mögliche **Verschattung von Fassadenflächen** durch Nachbargebäude, natürliche Elemente (Bäume, etc.) oder topografische Gegebenheiten eine entscheidende Rolle für die Effizienz. Abbildung 2 zeigt das jährliche Strompotential über eine PV-Fassade (Wirkungsgrad 20 %) im städtischen Kontext.

PV-Module können vor allem an Flächen ohne Verschattung und in den Orientierungen Süd, Ost und West (in dieser Reihenfolge) den höchsten Stromertrag erzielen. Aber auch an der Nordfassade besteht ein Stromerzeugungspotential, dieses beträgt im EG ca. 40 kWh/m<sup>2</sup>, im 3. OG ca. 60 kWh/m<sup>2</sup> und ohne Verschattung ca. 67 kWh/m<sup>2</sup>. Im Vergleich zu einer Südfassade ohne Verschattung (ca. 155 kWh/m<sup>2</sup>) ist das Stromerzeugungspotential der **Nordfassade jedoch fast 2.5-Mal** geringer.

Die Südfassade (ohne Verschattung) hat über das Jahr gesehen somit das grösste Potential. Im **Vergleich zu einer Dachanlage** ist dieses jedoch tiefer (fast 190 kWh/m<sup>2</sup>, Südausrichtung, Winkel 5°). Im **Winterhalbjahr (Oktober bis Februar)** liefert eine PV-Anlage im 3. OG und ohne Verschattung an der Südfassade jedoch **mehr Strom** als auf dem Dach.

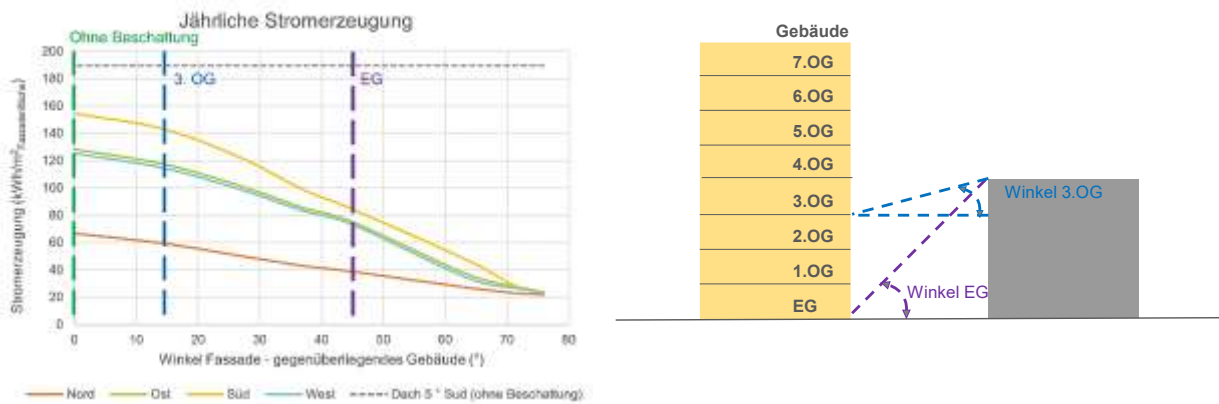


Abbildung 2: Jährliche Stromerzeugung in kWh/m<sup>2</sup> an einer Fassade (vertikale Fläche, 90 °) in den vier Ausrichtungen Nord, Ost, Süd und West (Wirkungsgrad PV-Module 20%). Eine Verschattung durch Nachbargebäude wurde mitberücksichtigt und durch den Winkel zwischen den beiden Gebäudefassaden dargestellt (die blau-gestrichelte Linie stellt die saisonale Stromerzeugung im 3. OG und die lila-gestrichelte Linie die im EG dar, Annahme: beide Fassaden sind parallel zueinander). Zum Vergleich wurde ebenso die jährliche Stromerzeugung eines Flachdachs mit nach Süden ausgerichteten Modulen in einem Winkel von 5° dargestellt (grau-gestrichelte Linie).

Wird der **Stromertrag im Tagesverlauf** betrachtet, liefert eine PV-Fassade ostexponiert am Morgen und westexponiert am Nachmittag am meisten Strom, eine Südfassade dagegen über den ganzen Tag hinweg, mit dem Peak am Mittag. Um im Verlauf des Tages einen gleichmässigen Ertrag zu erreichen, kann es empfehlenswert sein, die **PV-Modulen in verschiedenen Ausrichtungen** zu positionieren. Für einen hohen Ertrag sollten dabei auch hier mögliche Verschattungen vermieden werden. In Kapitel 7.3.3 sind Grafiken zum Stromertrag im Tagesverlauf zu finden.

Eine **Kombination von PV-Modulen auf dem Dach sowie an der Fassade** in verschiedenen Orientierungen (abgestimmt auf die Nutzungszeiten und zur Steigerung des Eigenverbrauchs) kann somit über das ganze Jahr betrachtet sehr attraktiv sein und zu einem hohen Stromertrag (hohes Flächenpotential durch die Kombination Dach und Fassade) führen.

Betrieb und Erstellung: gesamtheitliche Ökobilanz (Kapitel 7.4)

Werden die **Umweltbelastungen (THGE, PEnE und UBP'21)** betrachtet, welche bei der **Erstellung und dem Unterhalt der Fassadensystem** anfallen, weist die Referenzfassade die geringsten Werte auf. Die bodengebundene Begrünung erhöht die Umweltbelastung im Vergleich zur Referenz nur geringfügig, die wandgebundene Begrünung führt zu etwas höheren Werten. Im Vergleich zu den PV-Systemen liegen die Umweltbelastungen für die Erstellung und den Unterhalt der Fassadenbegrünungen jedoch deutlich tiefer.

Wird die **Umweltauswirkung im Betrieb** mit einbezogen, schneiden die PV-Systeme – aufgrund der hohen Gewinne im Betrieb – deutlich besser ab als die übrigen Systeme. **Mit Blick auf die THGE führt eine gezielte Anordnung der PV-Module an der Fassade zu einer besseren Bilanz.** In Bezug auf **PEnE und UBP'21** ist es jedoch vorteilhafter, sämtliche Fassaden mit opaken PV-Modulen zu belegen, auch wenn der Ertrag bei einer nach Nord ausgerichteten Fassade deutlich geringer ist als in den anderen Orientierungen. In jeden Fall sollte jedoch eine **hohe Effizienz / ein hoher Wirkungsgrad der PV-Module** angestrebt werden, um die Umweltbelastungen über den Lebenszyklus möglichst gering zu halten. Die **Fassadenbegrünungen** (bodengebunden und wandgebunden) weisen über den Lebenszyklus gesehen **nur geringfügig höhere Umweltbelastungen** auf als die Referenzfassade. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau», für die Altbauten können ähnliche Aussagen getroffen werden.

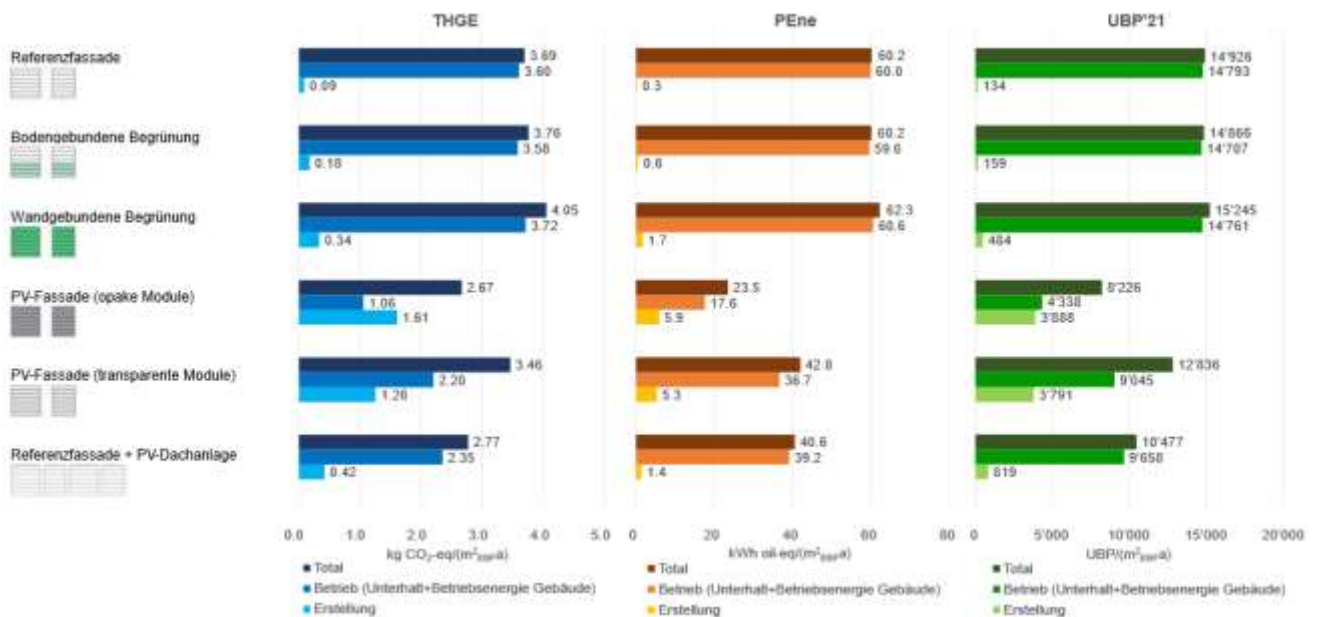


Abbildung 3: Treibhausgasemissionen (links), nicht erneuerbare Primärenergie (Mitte) und Umweltbelastungspunkte (rechts) der Referenzfassade, der verschiedenen Fassadensysteme sowie der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade). Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau».

### Ökonomische Betrachtung: Initial- und Lebenszykluskosten (Kapitel 7.5)

Die Referenzfassade hat die niedrigsten **Investitions- und Unterhaltskosten**. Bei der bodengebundenen Begrünung sind die Investitionskosten nur geringfügig höher, allerdings fallen höhere Unterhaltskosten an. Bei der wandgebundenen Begrünung sind die Investitions-, Instandsetzungs- und Unterhaltskosten am höchsten. Die Investitionskosten einer PV-Fassade (transparent und opak) sind i.d.R. geringer als die der wandgebundenen Begrünung, jedoch deutlich höher als die der Referenzfassade oder die der bodengebundenen Begrünung.

Die **annualisierten Kosten** sind bei der wandgebundenen Begrünung mit Abstand am höchsten, danach kommt die bodengebundene Begrünung sowie die transparente PV-Fassade. Die PV-Fassade mit opaken Modulen kann über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren die anfänglichen Kosten durch die Einsparungen im Betrieb amortisieren. Über den Lebenszyklus gesehen schneidet dieses System somit besser ab als die Referenzfassade. Aus wirtschaftlicher Sicht sind somit PV-Module mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad zu bevorzugen. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau», für die Altbauten können ähnliche Aussagen getroffen werden.

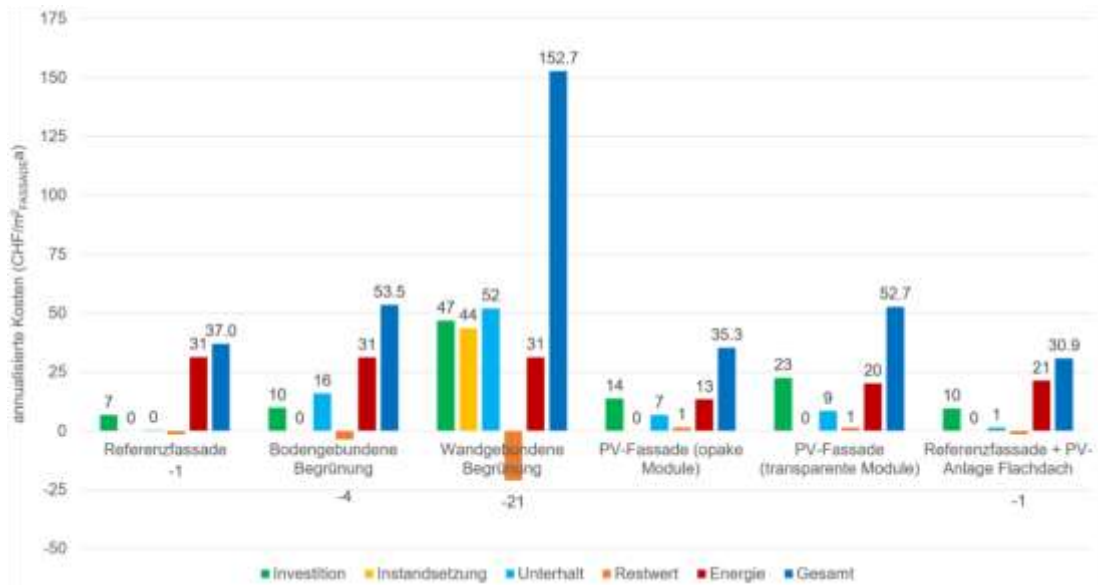


Abbildung 4: Annualisierte Kosten (Barwert) der Referenzfassade, der verschiedenen Fassadensysteme und der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade) über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren, dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau».

### Zusammenfassung der quantitativen Analyse (Kapitel 7.6)

Basierend auf den Erkenntnissen der quantitativen Analyse wurden die vier Fassadensysteme abschliessend im Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) bewertet. Tabelle 2 fasst die Ergebnisse zusammen. Bei den quantitativen Aspekten spielen die **Orientierung** und eine mögliche **Verschattung** der Fassade durch Nachbargebäude eine wesentliche Rolle. Dies wurde in der Übersichtstabelle berücksichtigt.

Tabelle 2: Übersichtstabelle, dargestellt ist der Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf verschiedene quantitative Aspekte im Vergleich zu einer hinterlüfteten Fassade mit Faserzementplatten (Referenz).

Quantitative Aspekte <i>Bewertung im Vergleich zur Referenzfassade (Faserzementplatte hinterlüftet)</i>	Fassadenbegrünung				PV-Fassade			
	bodengebunden		wandgebunden		opake Module		transparente Module	
	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet
<b>Thermisches Wohlbefinden im Innenraum: Temperaturen und Überhitzungsstunden</b> – die Bewertung wurde basierend auf den Neubau bezogen, bei Altbauten mit einer schlecht gedämmten Gebäudehülle kann der Einfluss grösser sein.								
Nord	+	+	+	+	neutral	neutral	neutral	neutral
Ost	+	+	+	++	neutral	neutral	neutral	neutral
Süd	+	+	+	++	neutral	neutral	neutral	neutral
West	+	+	+	++	neutral	neutral	neutral	neutral
<b>Betrieb des Gebäudes (Heiz- und Kühlbedarf)</b> – maximales Potenzial an der Ost- > Süd- > West- > Nordfassade.								
Nord	+	+	+	+	neutral	neutral	neutral	neutral
Ost	+	+	+	+	neutral	neutral	neutral	neutral
Süd	+	+	+	+	neutral	neutral	neutral	neutral





Quantitative Aspekte <i>Bewertung im Vergleich zur Referenzfassade (Faserzementplatte hinterlüftet)</i>	Fassadenbegrünung				PV-Fassade			
	bodengebunden		wandgebunden		opake Module		transparente Module	
	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet
West	+	+	+	+	neutral	neutral	neutral	neutral
<b>Stromerzeugung ganzjährig – Stromerzeugungspotenzial (maximales Potenzial auf dem Dach- &gt; an der Süd- &gt; Ost- &gt; West- &gt; Nordfassade).</b>								
Nord	neutral	neutral	neutral	neutral	++	++	+	+
Ost	neutral	neutral	neutral	neutral	++	+++	+	++
Süd	neutral	neutral	neutral	neutral	++	++++	+	+++
West	neutral	neutral	neutral	neutral	++	+++	+	++
<b>Stromerzeugung Winter – Stromerzeugungspotenzial (maximales Potenzial an der Südfassade- &gt; auf dem Dach- &gt; an der Ost- / West- &gt; Nordfassade).</b>								
Nord	neutral	neutral	neutral	neutral	+	+	+	+
Ost	neutral	neutral	neutral	neutral	+	++	+	++
Süd	neutral	neutral	neutral	neutral	+	++++	+	++++
West	neutral	neutral	neutral	neutral	+	++	+	++
<b>Erstellung – Graue Treibhausgasemissionen (THGE) – im Vergleich zur Referenzfassade wird bei einer bodengebunden Fassadenbegrünung zusätzliches Material benötigt und die anderen Systeme sind emissionsintensiver als eine Faserzementplatte.</b>								
Nord	-	-	--	--	----	----	----	----
Ost	-	-	--	--	----	----	----	----
Süd	-	-	--	--	----	----	----	----
West	-	-	--	--	----	----	----	----
<b>Erstellung und Betrieb – kumulierter Aufwand (inkl. Stromproduktion) – in Bezug auf THG mit einer 30-jährigen Amortisationszeit.</b>								
Nord	-	-	--	--	--	+	----	neutral
Ost	-	-	--	--	++	++++	++	+++
Süd	-	-	--	--	+++	++++	++	++++
West	-	-	--	--	++	++++	+	+++
<b>Investitionskosten – der verschiedenen Systeme im Vergleich, alle Fassadensysteme führen zu höheren Investitionskosten als die Referenzfassade.</b>								
Nord	-	-	----	----	----	----	----	----
Ost	-	-	----	----	----	----	----	----
Süd	-	-	----	----	----	----	----	----
West	-	-	----	----	----	----	----	----
<b>Lebenszykluskosten (LCC) – Investitions-, Instandhaltungs- Unterhalts- und Betriebskosten inkl. Restwert mit einer 30-jährigen Betrachtungsdauer.</b>								
Nord	--	--	----	----	neutral	neutral	--	--
Ost	--	--	----	----	neutral	+	--	-
Süd	--	--	----	----	neutral	+	--	-
West	--	--	----	----	neutral	+	--	-

**Legende:**

+ geringer Einfluss    ++ mittlerer Einfluss    +++ hoher Einfluss    ++++ sehr hoher Einfluss  
 + + + + positiver Einfluss    - - - - negativer Einfluss



## Ergebnisse der Messungen (Kapitel 8)

Am Campus der HSLU in Horw wurde im Rahmen des Projekts ein Prüfstand mit vier Fassadensystemen (bodengebundene und wandgebundene Begrünung, opake und transparente PV-Module) errichtet. Abbildung 5 zeigt den Fassadenprüfstand.



Abbildung 5: Messinfrastruktur an der Südfassade der Vegasin-Halle an der Hochschule Luzern Technik & Architektur.

Mittels Messungen wurde der Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf die **Temperatur an der Fassade (Oberflächentemperaturen)** sowie auf die **Temperatur hinter den Fassadensystemen (Temperatur an der Gebäudefassade)** über das gesamte Jahr untersucht. Verglichen wurden die Messwerte mit der Messreferenzfassade, einer gut gedämmten (Dämmstärke ca. 40 cm) hinterlüfteten Fassade mit einer Aussenwandbekleidung aus Aluminiumblechen.

### Einfluss der Fassadensysteme im Sommer (Kapitel 8.1)

Im Sommer erfolgt der Anstieg der **Oberflächentemperaturen** analog zur Globalstrahlung, Höchstwerte werden jeweils zwischen 12:00 und 15:00 Uhr an allen Fassadensystemen erreicht. Die maximale Oberflächentemperatur an der **opaken und transparenten PV-Fassade** übersteigt diejenige an der Messreferenzfassade – die Temperatur der opaken Module liegt dabei höher als die der transparenten Module. Die Temperaturen an der Gebäudefassade hinter den PV-Elementen werden durch deren Verschattung jedoch positiv beeinflusst (tiefere Werte als die Messreferenzfassade). Die Wirkung von opaken und transparenten Modulen ist dabei ähnlich temperaturmindernd.

Deutlich erkennbar ist der **positive Effekt der Begrünungen auf die Oberflächentemperatur** der Fassadenprototypen: Im Vergleich zur Messreferenzfassade können hier Temperaturdifferenzen ( $\Delta T_{\max}$ ) von maximal **- 13.9 °C bei der bodengebundenen Begrünung und - 14.9 °C bei der wandgebundenen Begrünung** verzeichnet werden. Diese Angaben beziehen sich auf **Messwerte für milde, sonnige Tage**. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich dieser positive Effekt der Hitzeminderung an heissen, sonnigen Tagen weiter verstärkt. Auch auf die Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen) haben die Begrünungssysteme einen positiven Einfluss. Die Temperaturen steigen im Tagesverlauf aufgrund der Verschattung der Systeme weniger stark an, insbesondere das wandgebundene System hat hier einen grossen Einfluss (100 % Verschattung). Das bodengebundene System lässt die Solarstrahlung teilweise durch (Durchlassgrad abhängig von der Blattdichte der verwendeten Pflanzen).



### Einfluss der Fassadensysteme im Winter (Kapitel 8.2)

Beim Temperaturverlauf der Oberflächentemperaturen an den Fassadenprototypen verhalten sich die **opaken und transparenten PV-Fassaden** ähnlich wie die Messreferenzfassade. Die PV-Systeme wärmen sich tagsüber etwas langsamer auf, kühlen dafür in der Nacht langsamer ab und führen so nachtsüber zu leicht höheren Oberflächentemperaturen.

Die **Fassadenbegrünungen (bodengebunden und wandgebunden)** verhindern das Aufheizen der Fassade tagsüber und mindern das Abkühlen der Fassade in der Nacht, wodurch geringere Temperaturschwankungen im Tagesverlauf entstehen. Werden die Temperaturen an der Gebäudefassade miteinander verglichen, treten die grössten Temperaturschwankungen im Tagesverlauf an der Messreferenzfassade (kein zusätzliches System) auf. Alle Fassadenprototypen führen dazu, dass die Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen) tagsüber weniger stark ansteigen (Verschattung) und in der Nacht weniger stark absinken (zusätzliche Schicht).

### **Ergebnisse der Quartierklimamodellierung (Kapitel 9)**

Mittels «Quartierklimamodellierung» (QKM) wurde der Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf das Mikroklima in der näheren Umgebung während einer Hitzeperiode untersucht. Anhand der PET (physiologisch äquivalente Temperatur) wurde analysiert, wie die empfundene Temperatur im Aussenraum in verschiedenen Abständen zur Fassade durch die Systeme beeinflusst wird. Dabei konnte festgestellt werden, dass PV-Module zwar an der Fassade zu höheren Oberflächentemperaturen führen (Kapitel 8), die Umgebung jedoch nicht negativ beeinflussen. Das liegt einerseits daran, dass die einfallende Strahlung in Strom umgewandelt wird, andererseits haben die Paneele eine geringe Albedo (geringe Reflexion der einfallenden Strahlung an die Umgebung). Fassadenbegrünungen können nicht nur die Oberflächentemperaturen an der Fassade, sondern auch die PET in der näheren Umgebung positiv beeinflussen. Abbildung 6 zeigt den Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf die PET an einem Messpunkt in 1 m Abstand zur Fassade.

Bei den Fassadenbegrünungen konnte zudem aufgezeigt werden, dass der kühlende Effekt am stärksten direkt an der Fassade spürbar ist und mit zunehmendem Abstand zur Fassade abnimmt. Abbildung 7 zeigt diesen Effekt am Beispiel der wandgebundenen Begrünung im Areal zu verschiedenen Tageszeiten.

Die Wirkung von Begrünungen kann dabei durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden: Bei direkter Sonneneinstrahlung ist der positive Effekt auf die PET am grössten (Kapitel 9.3), durch Wind kann der unmittelbare Effekt der Begrünung gemindert werden (Kapitel 9.5).

Im Vergleich zu anderen Begrünungselementen (Kapitel 9.6), wie bspw. Bäumen, ist der Effekt einer Fassadenbegrünung jedoch geringer. Dies liegt insbesondere daran, dass ein Baum neben dem kühlenden Effekt (Verdunstungskühlung) ebenso Schatten spendet, wodurch die PET zusätzlich positiv beeinflusst wird. Ebenso wurde der Vergleich zu einer Rasenfläche (der asphaltierte Strassenraum wurde durch eine begrünte Fläche ersetzt) hergestellt. Auch hier konnte ein grösserer Effekt im Vergleich zur Fassadenbegrünung erreicht werden, dies ist insbesondere auf die höhere Substratschicht (Boden) und der deutlich grösseren Grünfläche (m<sup>2</sup>) zurückzuführen. Allgemein kann gesagt werden, dass Bäume von den drei betrachteten Grünelementen am effektivsten sind. In städtischen Gebieten ist jedoch häufig das Platzangebot begrenzt, weshalb Fassadenbegrünungen eine gute Option darstellen.

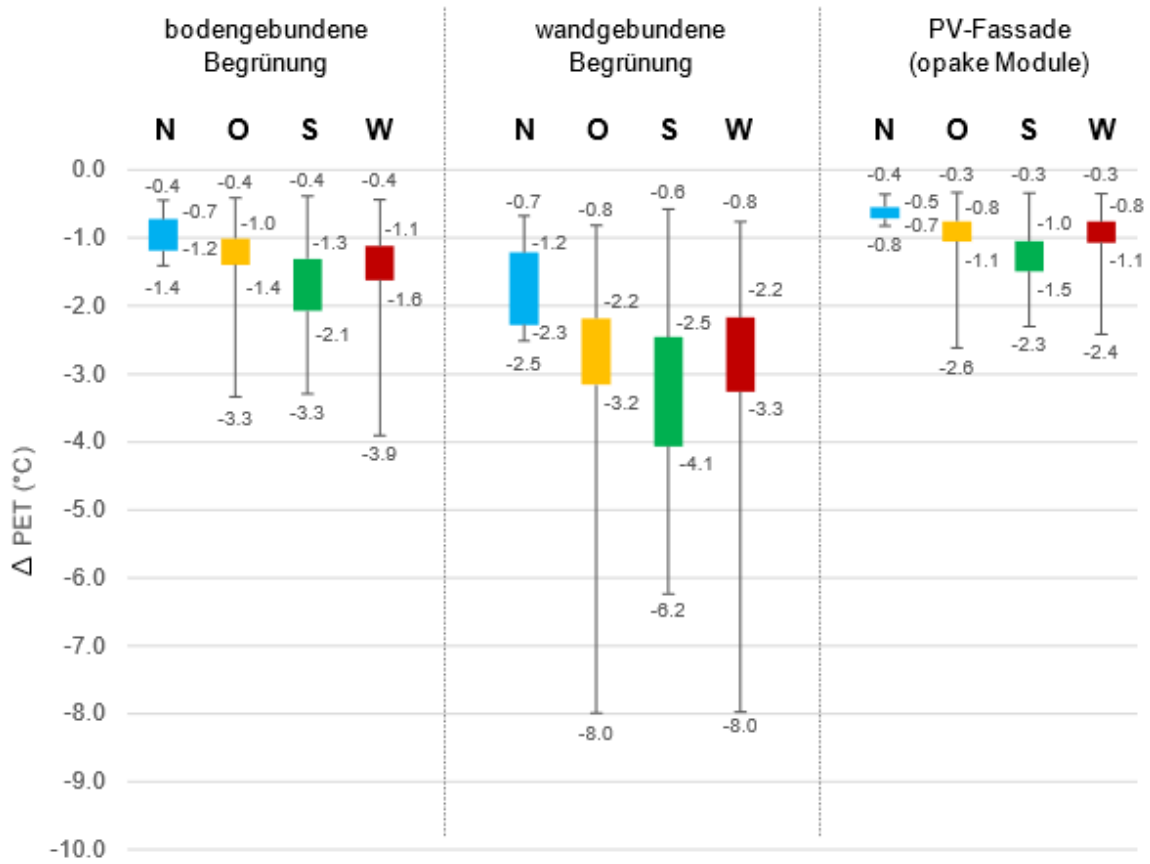


Abbildung 6: Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf die PET an einem Messpunkt in 1 m Abstand zur Fassade. Dargestellt ist die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade an einem sonnigen Sommertag in den verschiedenen Orientierungen mit einem Wind von 1 m/s aus den vier Richtungen (Nord, Ost, Süd und West). Die schwarze Linie zeigt die Minimal- und Maximalwerte (bei «ungünstiger» und «günstiger» Windrichtung), welche im Tagesverlauf erreicht werden. Die Balken zeigen den Tages-Mittelwert.

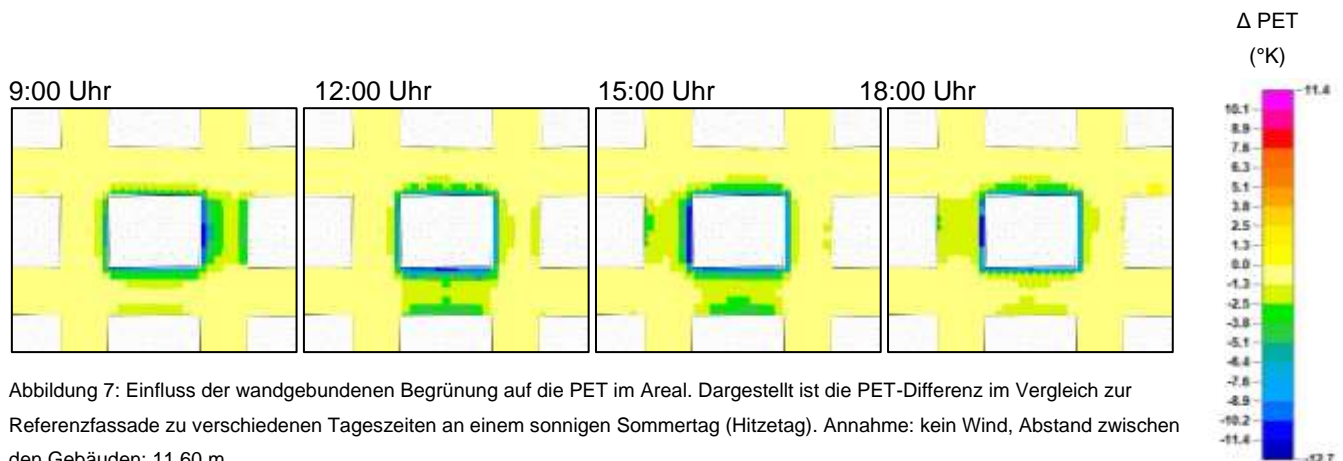


Abbildung 7: Einfluss der wandgebundenen Begrünung auf die PET im Areal. Dargestellt ist die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade zu verschiedenen Tageszeiten an einem sonnigen Sommertag (Hitzetag). Annahme: kein Wind, Abstand zwischen den Gebäuden: 11.60 m.



## Fassadengestaltung mit PV und Begrünungen, Bewertung von Systemkombinationen hinsichtlich LCA und LCC (Kapitel 10.1)

Die Analyse der qualitativen und quantitativen Aspekte zeigte, dass PV und Begrünungen an der Fassade unterschiedliche Vorteile bieten. **Begrünungen** können insbesondere einen **qualitativen Mehrwert im Aussenraum** leisten, dazu gehören u.a. eine bessere Aufenthaltsqualität, eine höhere Biodiversität und ein besseres Regenwassermanagement. Hinzu kommt das Potential zur Hitzeminderung, welches insbesondere in Städten mit Blick auf den Klimawandel immer mehr an Bedeutung gewinnen wird. Aber auch die **Stromerzeugung über PV-Fassaden wird in Zukunft immer wichtiger** werden und eine wichtige Massnahme zur nachhaltigen Energieversorgung der Schweiz darstellen. Durch eine **Kombination von PV und Begrünung** an der Fassade könnten die **Vorteile beider Systeme** miteinander vereint werden.

Die bisherigen Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Analyse haben gezeigt, dass sich die Systeme dabei i.d.R. nicht konkurrenzieren: **Fassadenbegrünungen** erzielen nahe am Menschen angeordnet den grössten Effekt, d.h. in den meisten Fällen sind das die **unteren Bereiche/ Geschosse** des Gebäudes. **PV-Module** sollten hingegen an Fassadenflächen mit hohem Stromerzeugungspotential angeordnet werden, d.h. also an Süd-, Ost- und Westfassaden ohne Verschattung. Dies betrifft i.d.R. vor allen die **oberen Geschosse** des Gebäudes, da insbesondere in städtischen Gebieten meist die unteren Geschosse durch Nachbargebäude verschattet werden.

Die Betrachtung wurde dementsprechend erweitert. Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen wurde die **Kombination der verschiedenen Systeme** am Gebäude untersucht (in der Folge **Szenarien** genannt). Dabei wurde dargelegt, inwieweit eine kombinierte Verteilung von Begrünung und PV an der Fassade (Szenario 1 bis 3) oder eine optimierte Anordnung von PV-Modulen an der Fassade (Szenario 4) einen Einfluss auf die Ökobilanz (LCA) sowie die Lebenszykluskosten (LCC) haben kann. Bei der Fassadenbegrünung wurde dabei jeweils ein **bodengebundenes System** angenommen, da dieses geringere Umweltbelastungen aufweist und kostengünstiger ist als ein wandgebundenes System. Bei der PV-Fassade wurden die **opaken Module** gewählt, da diese aufgrund des höheren Wirkungsgrads ebenso ökologische und ökonomische Vorteile bieten. Abbildung 8 zeigt die Szenarien 1 bis 4.

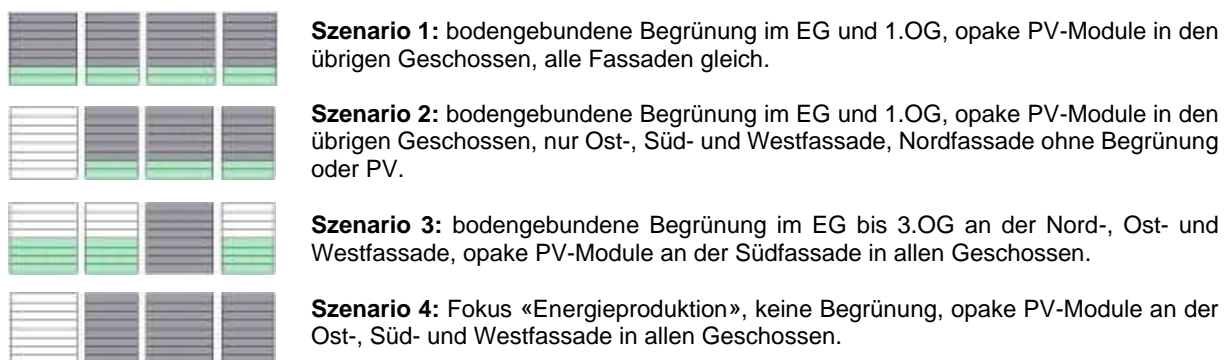


Abbildung 8: Die vier Szenarien im Überblick. Szenario 1 bis 3 zeigen Kombinationen von einer bodengebundenen Begrünung mit einer PV-Fassade (opake Module). Szenario 4 zeigt eine optimierte Anordnung der PV-Module an der Fassade. Die Grafiken zeigen die Fassaden in Nord, Ost, Süd und West (in dieser Reihenfolge). «Grün» markiert sind die Geschosse mit einer bodengebundenen Begrünung, «grau» die mit opaken PV-Modulen. «Weiss» zeigt die Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten, ohne zusätzliches System).

In Abbildung 9 sind die THGE und die annualisierten Kosten (LCC) der Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten), der vier Fassadensysteme, der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade) sowie der vier untersuchten Szenarien zusammengefasst. Die wandgebundene



Begrünung führt zu deutlich höheren Investitions- und Lebenszykluskosten als die übrigen Varianten. Weshalb die übrigen Varianten rechts in der Abbildung nochmals vergrössert dargestellt wurden.

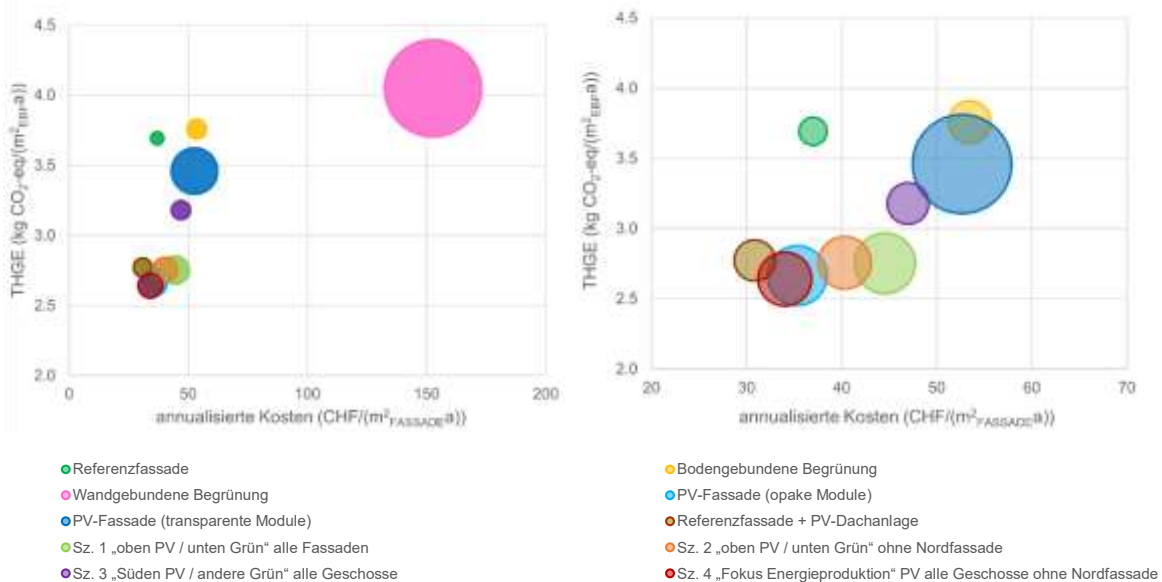


Abbildung 9: THGE und annualisierte Kosten während der 30-jährigen Betrachtungsperiode (links: alle Varianten; rechts: vergrösserte Darstellung ohne die wandgebundene Begrünung). Die Grösse des Kreises zeigt die Investitionskosten. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau».

Über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren liegen die **annualisierten Kosten (Barwert)** der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade), des Szenario 4 und der PV-Fassade (opake Module) unter denen der Referenzfassade. Szenario 2 weist geringfügig höhere annualisierte Kosten auf, bei Szenario 1 und 3 ist die Differenz zur Referenzfassade etwas höher. Bei den **THGE** liegt die Referenzfassade höher als die meisten Systeme sowie Kombinationen. Die niedrigsten Umweltbelastungen fallen bei Szenario 4 und der PV-Fassade (opake Module) an, gefolgt von Szenario 1, Szenario 2 und der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade). Szenario 3 liegt im Vergleich etwas höher, ebenso die transparente PV-Fassade (über den Betrachtungszeitraum jedoch immer noch tiefer als die Referenzfassade).

Allgemein kann gesagt werden, dass durch eine **gezielte Anordnung von PV** bzw. durch die **Kombination von PV und Begrünung** an der Fassade die THGE über den Lebenszyklus im Vergleich zur Referenzfassade gesenkt werden können (**ökologische Vorteile**). Gleichzeitig führt eine gezielte **Kombination von PV und Begrünung** über den Lebenszyklus **nur zu geringen Mehrkosten** (im Vergleich zur Referenzfassade).

### Einflussfaktoren auf die Resultate, Sensitivitätsanalyse (Kapitel 10.2 bis 10.4)

Die Ergebnisse der Studie beruhen auf den gewählten Datengrundlagen. Ändern sich diese Datengrundlagen, beeinflusst dies allenfalls die Ergebnisse, so zum Beispiel auf die Ökobilanz (Kapitel 10.2). Die Umweltauswirkungen von PV-Systemen in der KBOB-Liste reduzierten sich zum Beispiel von 2022 im Vergleich zu 2016 aufgrund der gesteigerten Material- und Energieeffizienz in der Herstellung (Kapitel 10.2.1). Auch die Wahl der Datengrundlagen beeinflusst die Ergebnisse. So unterscheidet sich die Umweltauswirkungen von Netzstrom bei einer dynamischen Bewertung von der verwendeten Bewertung in der KBOB-Liste (Kapitel 10.2.2). Beide Beispiele haben grosse



Auswirkungen auf die Resultate der Ökobilanz. Entscheidend ist die Methode zur Bilanzierung der Einspeisung von Strom sowie die zeitliche Auflösung bei der Bestimmung des Eigenstromanteils (Kapitel 10.2.3). In dieser Studie wurde die Umweltbelastung der Herstellung/Entsorgung des gesamten PV-Systems bei der Errichtung verbucht und die Umweltbelastung des verkauften bzw. eingespielten Stroms in der Phase Betrieb abgezogen (gemäss Methode M1 «Investieren und verkaufen» des Forschungsprojekts «Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich» (2)). Die dabei vorgesehene Aufteilung der Umweltbelastung nach Eigenverbrauchsanteil (oder Deckungsgrad) kann sich bei PV-Fassaden nachteilig auswirken, denn bei einer Anlage gleicher Grösse ist der Eigenverbrauchsanteil umso geringer, je höher der Wirkungsgrad der Anlage ist. Insbesondere die nach Süden ausgerichtete Fassade, die im Winter mehr Strom als eine PV-Dachanlage erzeugt, wird durch diesen methodischen Ansatz benachteiligt. Die Anwendung von saisonalen Korrekturfaktoren könnte Anlagen mit höherer Produktion während der Winterstromlücke hingegen begünstigen.

Ebenfalls einen Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat der statische Mehraufwand, welcher durch Begrünungssysteme verursacht wird (Kapitel 10.3). Nach Möglichkeit sollten daher Schwerlasten an der Fassade durch Pflanzgefässe, Substrat und grosse Pflanzen vermieden werden. Eine bodengebundene Begrünung kann hier von Vorteil sein. Eine Änderung der getroffenen Annahmen kann nicht nur die Ökobilanz verändern, sondern auch einen Einfluss auf die Lebenszykluskosten nehmen. Die Sensitivitätsanalyse in Kapitel 10.4 zeigte, dass der angenommene Kalkulationszinssatz, die Inflation, die Strompreisentwicklung, der Netzstromtarif, die Einspeisevergütung und die angenommene Stromproduktion die Ergebnisse der Lebenszykluskosten beeinflussen können.

### **Bedeutung von Begrünungen und PV im städtischen und ländlichen Kontext (Kapitel 10.5)**

Die **Urbanität** eines Standorts sollte bei einer Wahl der passenden Fassadensysteme und der Gebäudegestaltung berücksichtigt werden. So wird es in städtischen Gebieten im Vergleich zu umliegenden ländlichen Gebieten in den Sommermonaten deutlich wärmer (städtischer Wärmeineffekt). Mit Blick auf den Klimawandel wird sich dies künftig noch weiter verschärfen. Der Bedarf nach Kühlung wird somit insbesondere im städtischen Kontext an Bedeutung gewinnen, Begrünungen können hier eine wichtige Massnahme darstellen und eine Fassadengestaltung mit Begrünungen und PV-Anlagen in Kombination ist empfehlenswert. In ländlichen Gebieten ist i.d.R. mehr Platz für Grünflächen im Aussenraum vorhanden, zudem gibt es dort keinen städtischen Wärmeineffekt. Dies spricht dafür, Fassaden in ländlichen Gebieten bei einer entsprechenden Eignung als PV-Fassade zu verwenden. Zu beachten gilt es, dass die Fassaden der oft weniger hohen Gebäude im ländlichen Raum allenfalls durch Bäume beschattet werden könnten.

### **Erweiterung Systemgrenze: gesamtheitliche Gestaltung mit Begrünung und PV (Kapitel 10.6)**

Bei der Planung von Gebäuden und Arealen sollte immer eine **gesamtheitliche Gestaltung** stattfinden. PV und Grün können somit nicht nur an der **Fassade**, sondern auch auf **Dachflächen** und im **Aussenraum** (bspw. Grünflächen, Bäume, etc.) eingesetzt werden. Die verschiedenen Systeme bieten dabei diverse Vorteile, die miteinander kombiniert werden sollten. Um eine effiziente Stromproduktion über das ganze Jahr zu erzielen, sollten PV-Module sowohl auf dem Dach als auch an der Fassade angeordnet werden oder sogar arealübergreifende Lösungen in Betracht gezogen werden. Auch die Kombination verschiedener Grünelemente, d.h. von Fassadenbegrünungen, Dachbegrünungen, Bäumen und Rasenflächen kann verschiedene Vorteile miteinander verbinden. Welche Begrünungen vor Ort eingesetzt werden, ist anhand verschiedener Gegebenheiten abzuwägen, dazu gehören u.a. das verfügbare Platzangebot, statische Voraussetzungen, Zugänglichkeit, etc.



## Hemmnisse und Massnahmen zur Steigerung der Akzeptanz von Begrünungen und PV im Fassadenbereich (Kapitel 10.7)

Bei der Umsetzung von Fassadenbegrünungen und PV-Fassaden gibt es **Hemmnisse**, welche einer Umsetzung im Wege stehen können. Es ist wichtig, diese zu kennen und ihnen nach Möglichkeit entgegenzuwirken. Ein wichtiges Hemmnis stellen die **hohen Initialkosten** sowie die zusätzlichen Pflege- und Instandhaltungskosten dar (Kapitel 10.7.1). Mit einer guten Planung, einer langfristigen Betrachtung (Berücksichtigung der Amortisierung) und mit finanziellen Anreizen durch Fördergefässen kann die anfänglichen Kosten jedoch gemindert werden. Auch ein **erhöhter Planungsaufwand** kann anfallen. Dabei kann die in diesem Bericht in Kapitel 10.7.2 erstellte Checkliste eine gute Orientierungshilfe bilden, welche aufzeigt was bei PV und Begrünungen im Fassadenbereich in den verschiedenen Phasen zu beachten ist. Des Weiteren fehlen bis heute für PV-Fassaden an Gebäuden mittlerer Höhe und im Hochhausbereich klare **Brandschutzvorgaben**, was ebenfalls ein Hemmnis zur Umsetzung der Fassadensysteme darstellt (Kapitel 10.7.4). Auch durch den Denkmalschutz sind Begrünungen und PV-Module an gewissen Fassaden nicht möglich (Kapitel 10.7.5). Es bietet sich bei solchen Gebäuden jedoch an, Begrünungen an nicht sichtbaren Bereichen, wie z.B. Innenhöfen, zu platzieren. Sowohl bei Brandschutz als auch beim Denkmalschutz lohnt sich die frühe Kontaktaufnahme mit den zuständigen Behörden. Abbildung 10 fasst die in Kapitel 10.7 behandelten Hemmnisse und eruierten Massnahmen zur Steigerung der Akzeptanz zusammen.



Abbildung 10: Übersicht Hemmnisse von begrünungen und PV-Fassaden (gelbe Boxen) sowie mögliche Lösungsansätze (grüne Schrift).

## Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen (Kapitel 11)

Basierend auf den eruierten Hemmnissen und Lösungsansätzen wurden abschliessend Handlungsempfehlungen für Planende, Bauherrschaften und Behörden formuliert.

### Handlungsempfehlungen für Planende

Begrünungen und PV im Fassadenbereich stellt Planende vor neue Herausforderungen. **Fehlende Erfahrungen und Unsicherheiten** mit den Systemen führen häufig dazu, dass diese nicht umgesetzt werden. Um Planende im **Umgang mit diesen neuen Herausforderungen zu unterstützen** und Unsicherheiten zu reduzieren, wurde im Rahmen dieses Projekts eine **Broschüre mit den wichtigsten Grundlagen, Kennwerten und guten Beispielen** zu begrünungen und PV-Fassaden zusammengetragen. Die Broschüre umfasst dabei u.a. folgende Inhalte: Übersicht zu Vorteilen und Herausforderungen der einzelnen Systeme (bodengebundene und wandgebundene Fassadenbegrünungen, PV-Fassaden), Empfehlungen für die Fassadengestaltung mit Begrünungen und PV, Übersichtstabellen und Grafiken zu den in dieser Studie behandelten qualitativen und quantitativen Aspekten, wichtige Hinweise und Kennwerte bzgl. den Themen Brandschutz, Pflege- und Instandhaltung, Gestaltungsmöglichkeiten mit PV und Begrünungen sowie Fallbeispiele aus der Praxis. Die Broschüre steht als separates Dokument öffentlich zur Verfügung. Sie soll Planende künftig bei der Umsetzung von Begrünungen und PV im Fassadenbereich unterstützen, die Akteure motivieren und Unsicherheiten eliminieren.





### Handlungsempfehlungen für Bauherrschaften

Begrünungen und PV werden derzeit im Fassadenbereich nur selten umgesetzt. Grund dafür sind neben Unsicherheiten mit den Systemen insbesondere die hohen anfänglichen Initialkosten sowie die zusätzlichen laufenden Kosten für die Pflege- und Instandhaltung, was insbesondere bei Fassadenbegrünungen ein zentraler Punkt ist. Bauherrschaften wird empfohlen, sich frühzeitig mit dem **Nutzen der Systeme** auseinanderzusetzen, um den Mehrwert der jeweiligen Systeme zu quantifizieren. So kann eine **PV-Fassade finanziell langfristig sehr attraktiv** sein (Kapitel 7.5). Zudem kann eine **Zertifizierung mit Nachhaltigkeitslabeln** angestrebt werden. Eine solche kann zu einem **Imagegewinn** führen. **Fassadenbegrünungen** können zudem nicht nur einen deutlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit in Zeiten des Klimawandels leisten, sondern auch die **Attraktivität einer Immobilie deutlich steigern**. Ein grüner Arbeits- und Wohnort zieht das Interesse von Arbeitnehmern/innen und Mieter/innen an. Die Resultate sind eine gute Vermietbarkeit, langfristige Mietverhältnisse sowie eine höhere Produktivität, Kreativität und verbesserte Gesundheit. In Kapitel 10.1.3 wurde zudem aufgezeigt, dass eine **Kombination von Begrünungen und PV** an der Fassade **ökonomische und ökologische Vorteile** mit sich bringen kann und durchaus empfehlenswert ist. **Bauherrschaften** gilt es die verschiedenen Vorteile aufzuzeigen und sie diesbezüglich zu **sensibilisieren**. Die zu diesem Projekt erarbeitete **Broschüre** kann nicht nur für Planende, sondern auch für Bauherrschaften eine wichtige Grundlage zur Fassadengestaltung darstellen.

### Handlungsempfehlungen für Behörden

Behörden können durch verschiedene Massnahmen dazu beitragen, die Umsetzung von PV und Begrünungen im Fassadenbereich künftig voranzutreiben. Nachfolgend sind einige Empfehlungen formuliert, diese sind unterteilt in wirtschaftliche, rechtliche und sonstige Anreize (Tabelle 3).

Tabelle 3: Wirtschaftliche, rechtliche und sonstige Anreize zur Förderung der Umsetzung von Begrünungen und PV im Fassadenbereich.

PV-Fassaden	
Wirtschaftlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>• höhere Einspeisevergütungen in Wintermonaten &amp; schweizweit einheitliche Tarife</li> <li>• Steueransätze für den durch die PV-Anlage erzeugten Strom vermeiden</li> <li>• geringere Besteuerung des Gebäudes in Abhängigkeit vom Grad des Eigenverbrauchs</li> <li>• Erhöhung der Fördergelder bei vertikalen Anlagen</li> </ul>
Rechtlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vereinfachung von Baubewilligungen</li> <li>• Vereinheitlichung / klare Vorgaben für den Brandschutz</li> </ul>
Sonstige	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstellung von Richtlinien / Protokollen für die Planung, den Bau und die Wartung der Systeme</li> <li>• Förderung / Erleichterung der inländischen Produktion von PV-Anlagen</li> <li>• Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten, Kompetenzen aufbauen (Planung, Ausführung, Unterhalt, Herstellung und Wiederverwendung/-verwertung)</li> </ul>
Fassadenbegrünungen	
Wirtschaftlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mehr Förderprogramme anbieten, wobei sich die Höhe der Fördergelder nicht nur an den anfänglichen, sondern auch an den laufenden Kosten orientieren sollte</li> <li>• Senkung von Steuern, bspw. Wasserentnahmegebühren</li> </ul>
Rechtlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gesetzliche Mindestsätze für den Grünflächenfaktor, wie in der Stadt Graz, einführen</li> <li>• klare Vorgaben für den Brandschutz einführen</li> </ul>
Sonstige	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterhalt der Fassadenbegrünungen durch Stadtgärtnereien sicherstellen</li> <li>• Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten, Kompetenzen aufbauen (Planung, Ausführung, Pflege- und Instandhaltung)</li> </ul>



## Ausblick (Kapitel 12)

PV und Begrünungen werden künftig zunehmend an Bedeutung gewinnen. Dies zeigen u.a. auch die **revidierten Vorgaben im Rahmen der BFE-Labelfamilie** vom September 2023, wo die Nutzung von Fassadenflächen für PV und Begrünungen nun auch als Kriterium aufgenommen wurden. In der neusten Version (Version 2023.1) des Kriterienbeschreibs zum **SNBS-Hochbau** werden **Dach- und Fassadenbegrünungen** als **empfehlenswerte Massnahmen** genannt, welche sich vor allem bei dichten Überbauungen und versiegelten Flächen anbieten. Ebenso wurde das neue **Kriterium 143 «Mikroklima»** eingeführt, welches in einer expliziten Messgrösse vorgibt, dass Fassadenbereiche der ersten zwei Geschosse zu begrünen seien und diese Begrünung bodengebunden auszubilden sei (4). Unter den Neuerungen des **Minergie-Standards 2023**, welche auch im SNBS-Kriterienkatalog einfließen, ist zudem eine **bessere Ausnutzung des Solarenergiepotenzials auf Fassaden** vorgesehen (5). Diese Entwicklungen sind erfreulich und spricht dafür, dass künftig eine breitere Anwendung der Systeme zu erwarten ist.

Dies wird ebenso zu **weiterführenden Forschungen** in diesem Bereich führen. In Kapitel 12.2 sind diesbezüglich einige Vorschläge für künftige Forschungsthemen aufgeführt. Dazu gehören bspw. die **Entwicklung eines Grünflächenfaktors** (analog dem bestehenden Beispiel der Stadt Graz in Österreich) für verschiedene Städte in der Schweiz und eine **Erweiterung der Datengrundlagen für Fassadenbegrünungen**, um deren Potential und Variabilität in Simulationen künftig besser abbilden zu können. Auch **Lösungen und Konzepte für ein nachhaltiges Wassermanagement** von Gebäude- und Arealbegrünungen werden insbesondere angesichts des Klimawandels immer wichtiger werden (optimierte Wasserkreisläufe). Oder auch **Ansätze der Kreislaufwirtschaft, welche bei PV-Anlagen** berücksichtigt werden sollten: Werden PV-Systeme künftig massiv ausgebaut, sollte bereits heute eine spätere Wiederverwendung / Weiterverwertung der Module und Materialien nach Ende der Lebensdauer zum Schutz von Ressourcen in Betracht gezogen werden.

Die Themengebiete im Bereich von PV und Begrünung sind somit vielfältig, die Vorschläge in diesem Bericht sollen dabei zum Anreiz für weiterführende Studien dienen und das Themengebiet künftig weiter vorantreiben.



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Mit dem Klimawandel erwarten uns trockene Sommer und mehr Hitzetage (6). Das **Klima der Zukunft** stellt uns besonders in den Sommermonaten vor grossen Herausforderungen bezüglich der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen. Ohne eine massive Reduktion der Treibhausgasemissionen ist in der Schweiz mit einem Anstieg der jahreszeitlichen mittleren Temperatur von 3.3 – 5.4 °C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu rechnen (Abbildung 11). Der Klimakältebedarf wird in Wohnbauten derart ansteigen, dass er in der Bedeutung dem Heizwärmebedarf gleichziehen wird (3). Die **aktive Kühlung** wird im Gebäudepark Schweiz unweigerlich Einzug halten.

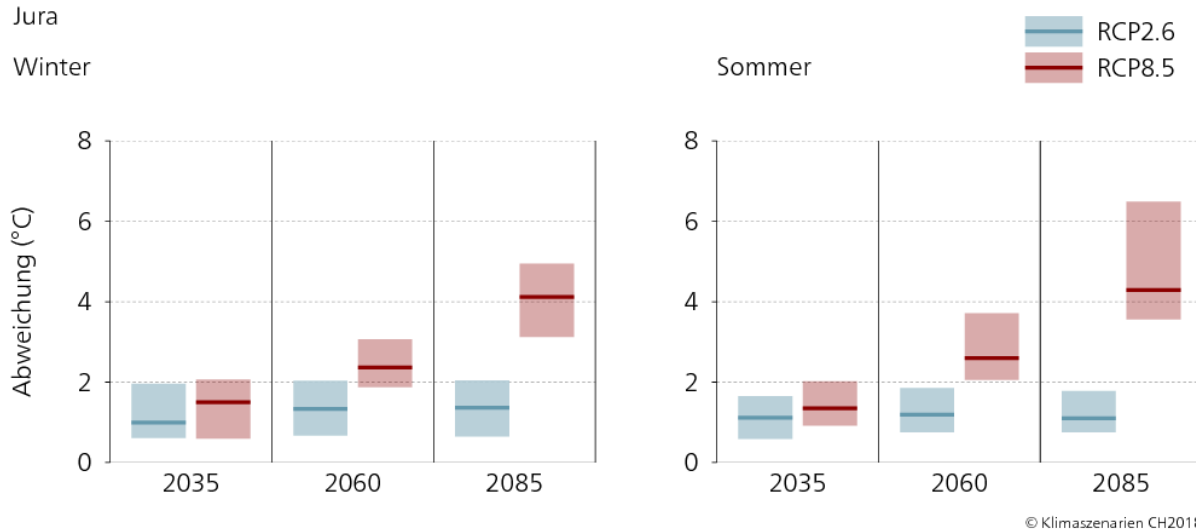
### Temperatur

Abweichung von der Normperiode 1981-2010

Jura

Winter

Sommer



© Klimaszenarien CH2018

Abbildung 11: Änderung der mittleren Temperatur gegenüber der Normperiode 1981 bis 2010 für die Jahreszeiten Winter (Dezember bis Februar) und Sommer (Juni bis August) aufgrund von Klimasimulationen für die Emissionsszenarien RCP8.5 und RCP2.6. Die Änderungen sind Mittelwerte über 30-jährige Perioden um die Jahre 2035 (nahe Zukunft), 2060 (Mitte Jahrhundert) und 2085 (Ende Jahrhundert). Die horizontalen Linien entsprechen dem Medianwert über die Simulationen mit verschiedenen Klimamodellen. Die farbigen Balken zeigen die Bandbreite aller Simulationen und beinhalten natürliche Schwankungen sowie systematische Modellunsicherheiten (6).

Der Kältebedarf wird vorwiegend dann anfallen, wenn die Solarstrahlung am intensivsten sein wird. Diese zeitliche Koinzidenz spricht dafür, dass der **Energiebedarf für die Kühlung** durch Stromerzeugung mit **PV-Anlagen** gedeckt werden kann. Zudem wird der Druck bzw. die Notwendigkeit – zusätzlich zu den Dachflächen – auch Fassaden mit PV-Elementen zu belegen immer grösser. In Anbetracht der Energiestrategie 2050<sup>4</sup> ist ein deutlicher Ausbau der solaren Stromproduktion vorgesehen (von heute 2 TWh auf 34 TWh). PV-Anlagen an Fassaden werden voraussichtlich 10 % bis 20 % dieser Stromproduktion ausmachen.

<sup>4</sup> <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050.html>



Klimageräte produzieren Kälte für die Innenräume, führen dabei aber die entzogene Wärme nach aussen. Dieser Wärmeübertrag auf die Aussenluft ist nicht vernachlässigbar und wird den **städtischen Wärmeinseleffekt** zusätzlich verstärken. **Grünflächen** sind deshalb im urbanen Gebiet äusserst wichtig. Die Vorteile der Begrünungen sind vielfältig, vor allem leisten sie aber einen wesentlichen Beitrag zur Abkühlung der Aussenluft.

Die **Gebäudehülle** bietet Einsatzmöglichkeiten sowohl für PV-Anlagen als auch für Begrünungen. Eine heute gängige Meinung lautet: « Fassaden- und Dachbegrünungen widersprechen dem Ziel, möglichst alle Flächen am Gebäude zur Energiegewinnung zu nutzen... ». Es bestehen jedoch Synergien zwischen den zwei Systemen. Die höhere Effizienz von PV-Modulen aufgrund der Verdunstungskühlung der Pflanzen wurde verschiedentlich untersucht (7), (8), (9) und (10). PV-Dachanlagen, in Kombination mit einer Dachbegrünung, werden heute bereits oft realisiert.

An **Gebäudefassaden** sind Zielkonflikte und Trade-Offs vielfältiger. Aus verschiedenen Gründen haben sowohl Begrünungen als auch PV-Elemente bisher keine breite Anwendung gefunden. Der bewusste Umgang mit Fassadenoberflächen als Potential im Hinblick auf den Klimawandel kommt in der heutigen Architektursprache nicht genügend zum Ausdruck. Hier setzt die Projektidee an.

Im Projekt werden die **Hemmnisse** und die **Akzeptanz** hinsichtlich des Einsatzes von Begrünungen und PV an Gebäudefassaden untersucht. Dabei soll es – u.a. anhand von **vorhandener Literatur, Simulationen, Berechnungen** und **Messungen** – Hinweise zum **Einfluss** von verschiedenen Fassadensystemen auf das **Mikroklima am Gebäude** sowie die **Energiebilanz im Gebäude** geben und diesen dem **Potential** der **Energieerzeugung** gegenübergestellt sowie Synergien aufgezeigt werden. Bei der Abwägung der Systeme bzw. bei der Bestimmung der **optimalen Fassadengestaltung** spielen finanzielle, energetische, gestalterische, soziale und Umweltaspekte eine Rolle. Im **partizipativen Diskurs** mit und zwischen den relevanten Playern und basierend auf bestehenden sowie laufenden Forschungsprojekten und -erkenntnissen sollen deshalb u.a. Antworten auf folgende Fragestellungen erarbeitet werden:

- Welches sind die entscheidenden Faktoren, die bei der gesamtheitlichen Optimierung der Gebäudefassade im Hinblick auf den Klimawandel zu berücksichtigen sind?
- Wie kann die Fassade mit PV und begrünten Flächen gestaltet werden, damit ein maximaler Nutzen für Mensch, Energie und Umwelt entsteht?
- Wie kann die ermittelte, multifunktionale Fassade in das Gebäude integriert und wie kann deren Anwendung im Gebäudepark gefördert werden?

## 1.2 Zielsetzung

Ziel des Projekts ist es, **praxistaugliche Handlungsempfehlungen** für die **Bau- und Immobilienbranche** zu erarbeiten. Dadurch soll den Akteuren der Praxis ein Hilfsmittel im Umgang mit PV und begrünten Flächen im Fassadenbereich zur Verfügung gestellt werden. Neben **Hinweisen zur Planung** werden ebenso die Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme sowie deren Kombination hinsichtlich **ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte** aufgezeigt. Denn nur wenn die Systeme gesamtheitlich betrachtet werden, kann eine **hohe Akzeptanz** sichergestellt und die Anwendung in Zukunft gefördert werden.

Durch den vermehrten Einsatz von Begrünungsmassnahmen und PV-Systemen kann insbesondere unter künftigen Klimabedingungen ein **besseres Stadtklima** und **Raumkomfort** sowie **Energiebilanz** unserer Gebäude über die gesamte Lebensdauer gefördert werden. Mit dem Projekt soll ein positiver Beitrag zur Reduzierung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor der Schweiz sowie zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele der Energiestrategie 2050 geleistet werden.



## 1.3 Motivation

Die Hochschule Luzern hat zu den Themen Klimawandel, Begrünung sowie nachhaltige Gebäudetechnik bereits diverse Projekte durchgeführt. Dieses Wissen soll in dieser Studie zusammengeführt und vertieft werden. Nachfolgend werden vorhergehende sowie parallellaufende Studien benannt, welche wichtige Erkenntnisse und Grundlagen für das vorliegende Projekt liefern.

### 1.3.1 Vorhergehende Studien

In der **Studie «ClimaBau»** (3) wurde untersucht, welche Auswirkungen der Klimawandel auf den Energiebedarf und die thermische Behaglichkeit in Wohngebäuden haben wird. Die Ergebnisse zeigen, dass der Klimakältebedarf in den nächsten fünfzig Jahren aufgrund des klimawandelbedingten Temperaturanstiegs deutlich ansteigen wird. Die Studie bestätigte die Wirksamkeit von Entwurfparametern im Zusammenhang mit der Reduzierung der Wärmegewinne im Sommer (Fensterflächen, Sonnenschutz, natürliche Lüftung etc.) sowie die Rolle, die Bewohnende beim Klimakältebedarf spielen.

Als Folgeprojekt wurde die **Studie «Bereit für den Klimawandel? Handlungsempfehlungen für Bauherrschaften und Planende»** (11) lanciert. Es wurden zwei komplementäre Ziele verfolgt. Zum einen sollen Bauherrschaften im Umgang mit der Thematik «Klimawandel» sensibilisiert und bei Planungsentscheidungen für Neubau- und Sanierungsprojekte unterstützt werden. Zum anderen wurde ein Hilfsmittel für Architekten/innen und Planende bereitgestellt, welches Empfehlungen für den frühen Entwurfsprozess beinhaltet und die Akteure bei der Balancefindung der drei Themenfelder solare Gewinne, Tageslichtversorgung und Überhitzungsschutz unterstützt. Die Erkenntnisse der Studie, insbesondere der Einsatz von opaken und transparenten Bauteilen bei der Entwurfsplanung von Gebäuden, fliessen ebenso in dieses Projekt ein.

Das Projekt **«Klimageräte im Kontext des Klimawandels»** (12) hat umweltfreundlichere Ansätze zur Kühlung von Wohnräumen in der Schweiz untersucht. Verschiedene Konzepte für eine möglichst umweltfreundliche Kühlung von Wohnräumen mit dezentralen Systemen wurden erarbeitet. Dabei wurde insbesondere die Kombination von mobilen Klimageräten mit einer Photovoltaikanlage betrachtet. Zudem wurde untersucht, ob die aktuellen Gesetzgebungen bezüglich der aktiven Kühlung im Wohnbereich unter den Voraussetzungen des Klimawandels noch zeitgemäss sind. Hinweise für mögliche Anpassungen wurden erarbeitet.

Im Projekt **«ResCool – Klimaanpassung von Neu-, Um- und bestehenden Wohngebäuden – effiziente Kühlkonzepte»** (13) wurden konkrete Lösungen aufgezeigt, wie der Komfort für den Menschen in Neu-, Um- und bestehenden Wohnbauten unter dem Einfluss des Klimawandels in einem erträglichen Bereich gehalten werden kann. Dieser Frage wurde sowohl aus epidemiologischer als auch aus technischer Sicht nachgegangen. Aus epidemiologischer Sicht wurde geklärt, ob die in den Normen zulässigen Temperaturen mit den Erkenntnissen aus dem Zusammenhang zwischen Sterblichkeit und Innentemperatur und der nächtlichen Erholung übereinstimmen. Aus technischer Sicht wurde die Leistungsfähigkeit verschiedener Kühllösungen untersucht. Ein spezieller Fokus wurde auf Kühllösungen gelegt, die in der Nähe oder direkt am Körper des Menschen wirken.

Im Rahmen des Projekts **«ROGEK – Robustheitsbewertung von integrierten gebäudetechnischen Kühlkonzepten in Verwaltungsbauten hinsichtlich Klima und Nutzervariabilität»** (14) wurden gebäudetechnische Systeme in Bürogebäuden hinsichtlich deren Robustheit in Zusammenhang mit dem Klimawandel untersucht. Dafür wurden Klimadatenätze bis in das Jahr 2100 aufbereitet.

Der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA) lancierte das Projekt **«Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028»** (15) im Rahmen des BAFU-Programms «Anpassung an den Klimawandel» im Jahr 2020. In diesem Projekt wurde u.a. das auf meteorologischen Messdaten beruhende Merkblatts SIA 2028 «Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik» (16) durch eine praxistaugliche Alternative ergänzt, welche das zukünftige



Klima (auf der Basis der neuen Klimaszenarien CH2018 (6)) berücksichtigt. Ziel war es, durch dieses Projekt Planende zu befähigen, die Auswirkungen der Klimaentwicklung in die Gebäudeplanung mit einzubeziehen und ihren Auftraggeber/innen die Konsequenzen aufzuzeigen. Die erarbeiteten Klimadaten werden in dieser Studie im Rahmen der Simulationen verwendet.

In der Studie «**Begrünung und Stadtklima**» (17) wurden in einem interdisziplinären Team die positiven Effekte von Begrünungen auf Klima, Umwelt, soziale und wirtschaftliche Aspekte untersucht. Dabei wurden Grundlagen zur Charakterisierung und ggf. Quantifizierung der zuvor genannten Aspekte erarbeitet und die Auswirkungen auf Quartier- und Gebäudeebene analysiert.

### 1.3.2 Parallel laufende HSLU-Studien

Neben den bereits durchgeführten Studien laufen derzeit noch weitere Projekte an der Hochschule Luzern, welche sich mit den Themen Begrünung und Klima auseinandersetzen. Die Projekte haben verschiedene thematische Schwerpunkte, Synergien konnten jedoch hergestellt und relevante Erkenntnisse wurden aufgenommen und bei Bedarf erweitert.

Im Projekt «**Quartierklima Modellierung**» (18) wurde ein Modellierungswerkzeug zur Quantifizierung und Optimierung des Quartierklimas in einer sehr frühen Planungsphase entwickelt. Mit dem Instrument wird der Komfort (global, lokal), die Kosten und die graue Energie / Treibhausgase für verschiedene Quartiermassnahmen wie Begrünung, Wasserflächen, Gebäudesetzung, Oberflächenwahl und umgebende Topologie ermittelt. Das Instrument ist interaktiv im Entwurfsprozess integriert (Modifikation und Visualisierung direkt in Revit). Die Auswirkungen von Entwurfsveränderungen auf das Quartierklima sind sofort sichtbar. Mit Hilfe der Modellierungswerkzeuge können u.a. die Auswirkungen von Begrünungen auf den Aussenraum, wie beispielsweise auf die Lufttemperatur, untersucht werden.

Ebenso wird in einer weiteren Studie die «**SE-ORF – Verschattungswirkung bewachsener Doppelhautfassaden**» (19) untersucht. Bewachsene Fassaden verbessern den saisonalen Energiehaushalt von Gebäuden und reduzieren Urban Heat Island Effekte (UHIE). Im Sommer werden der Kühlenergiebedarf und die Gefahr des Überhitzens von Gebäuden verringert. Im Winter reduzieren höhere solare Gewinne nach Abwurf der Belaubung den Heizenergiebedarf. Derzeit ist über die Verschattungswirkung von Pflanzen wenig bekannt. Mit Hilfe eines Messstandes wird derzeit die Verschattungswirkung von 10 Pflanzenarten untersucht. Die resultierenden Energieströme durch eine bewachsene Seilfassade werden für unterschiedliche Ausrichtungen in einem Simulationsmodell modelliert. Das Projekt wird voraussichtlich im Herbst 2023 abgeschlossen. Abbildung 12 (links) zeigt die Messeinrichtung an der Hochschule Luzern in Horw, welche im Rahmen des Projekts errichtet wurde.

Das Forschungsprojekt «**Kräfte in pflanzenbewachsenen Seilfassaden**» (20) hatte zum Ziel, Kräfte in pflanzenbewachsenen Seilfassaden und -strukturen aufgrund von, Wind, Schnee, Pflanzengewicht und Pflanzenwuchs anhand eines speziell errichteten Prüfstands zu analysieren (Abbildung 12, rechts). Daraus wurde anschliessend ein Lastmodell und Bemessungskonzept entwickelt, mit dem die Seile, die Verankerung und die Gebäudestruktur bemessen werden konnten. Die Erkenntnisse wurden weitergeführt in dem Projekt «**Windkräfte in bewachsenen Fassaden: CFD Studie**»<sup>5</sup>, wo die durch eine Fassadenbegrünung entstehenden Windeinwirkungen auf die Rankstruktur und die Tragstruktur eines Gebäudes, welche vom Verhalten der Pflanzen unter Windeinfluss abhängen, untersucht werden. Bei Windlasten richten Pflanzen ihre Blätter entlang der Windrichtung aus, was zu einer Reduktion der angreifenden Last führt. Wie gross dieser Anteil ist und welche Lasten aus Wind an diesem neuen Begrünungssystem am Gebäude ankommen, wird in diesem Projekt erforscht.

---

<sup>5</sup> <https://www.hslu.ch/de-ch/hochschule-luzern/forschung/projekte/detail/?pid=5789>



Abbildung 12: Messinfrastruktur der Hochschule Luzern am Campus Horw: Messstand Projekt SE ODSF (links) und Prüfstand Institut für Bauingenieurwesen (rechts).

### 1.3.3 Parallel laufende Studien in anderen Institutionen

In dem Projekt **«IVECT – Auswirkungen der Begrünung auf die Energiebilanz und den thermischen Komfort von Gebäuden und Quartieren»<sup>6</sup>**, welches vom Forschungsprogramm 2020 des BFEs finanziert und von der HES-SO Valais geleitet wird, wird der Einfluss von Begrünungen auf die Energieeffizienz von Gebäuden und Arealen quantifiziert und zur Berechnung von Energiebilanzen in Simulationstools integriert. Der Fokus der Untersuchung wird auf die Parameter Oberflächentemperaturen und Umgebungstemperaturen der begrünten Gebäudehüllen gelegt, da diese Parameter durch die spezifischen Pflanzenoberflächen, Abstrahlungs- und Absorptionsverhalten sowie die Verdunstungsleistung der Pflanzen stark beeinflusst werden. Zudem sollen Umsetzungshindernisse identifiziert und Begleitmassnahmen zur Umsetzung definiert werden.

Am 1. März fand ein Online-Meeting mit Frau Trachsel-Geissmann statt, in dem sowohl das Projekt «GreenPV» als auch das Projekt «IVECT» vorgestellt wurden. Die Gemeinsamkeiten der beiden Projekte wurden besprochen. Ein zweites persönliches Treffen fand mit Professor Klaus Kreher von der HES-SO Valais-Wallis am 28. April statt. Im Mittelpunkt der Diskussion stand die Integration von Fassadenbegrünungen in dynamische Simulationsprogramme zur Beurteilung des Innenraumklimas und des Energieverbrauchs von Gebäuden. Kapitel 5.2.1 enthält weitere Informationen über das Simulationsverfahren, welches in diesem Projekt entwickelt wird.

## 2 State of the Art

### 2.1 Fassadenbegrünung

#### 2.1.1 Klassifizierung und Eigenschaften von Fassadenbegrünungen, Projektbeispiele



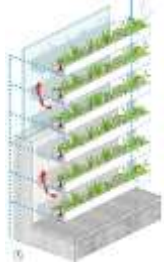
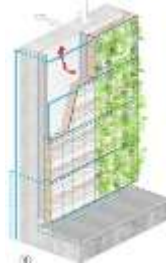
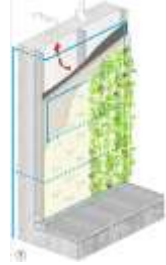
Bei Fassadenbegrünungen wird im Allgemeinen zwischen bodengebundenen und wandgebundenen Systemen unterschieden. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Begrünungsformen, deren wichtigsten Eigenschaften (u.a. geeignete Pflanzen, Anforderungen, Kosten [Erstellung, Unterhalt], etc.) und die Vor- und Nachteile der Systeme.

---

<sup>6</sup> <https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektdetail/projektid/4322/>



Tabelle 4: Arten der Fassadenbegrünung im Überblick (1), (21) und (22). Quelle Bilder: (1).

		bodengebundene Systeme		wandgebundene Systeme		
<b>Begrünungsform</b>		Direktbewuchs der Fassade (ohne Kletterhilfe) 	Leitbarer Bewuchs an separater Wuchskonstruktion (mit Kletterhilfe) 	Horizontale Vegetationsflächen / Pflanzgefässe mit / ohne Kletterhilfen 	Modulare Systeme (vorgefertigte Fassadenelemente als Substratspeicher) 	Flächige Konstruktionen (Trägerplatte mit Textil- oder Filzsystem) 
<b>Geeignete Pflanzen</b>		Selbstklimmer (Wurzelkletterer, Haftscheibenranker)	Gerüstkletterpflanzen (Schlinger, Ranker, Spreizklimmer)	Stauden (u.a. Gräser, Farne, etc.), Kleingehölze, bedingt Gerüstkletterpflanzen	Stauden (u.a. Gräser, Farne, etc.), Kleingehölze, Moose, bedingt Wurzelkletterer, Spreizklimmer	
<b>Anforderungen</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boden(wasser)anschluss, Wasserversorgungsanlage bei Bedarf</li> <li>- ausreichende Tragkraft der Primär- und Sekundärkonstruktion (Eigengewicht, Pflanzen, ggf. Substrat, Fruchtgewicht, Wind-, Schnee-, Eislast)</li> <li>- Wuchsbegrenzung in der Nähe von sensiblen Bauteilen</li> <li>- zusätzlich bei Wuchskonstruktionen: Korrosionsschutz oder nicht rostendes Material, Verankerung in der Primärstruktur durch wärmebrückenreduzierende Halterungen, Distanz zur Fassade beachten (Dickenwachstum)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- ausreichende Tragkraft der Primär- und Sekundärkonstruktion (Eigengewicht, Pflanzen, ggf. Substrat, Fruchtgewicht, Wind-, Schnee-, Eislast)</li> <li>- statischer Nachweis erforderlich</li> <li>- tragende Bauteile: Korrosionsschutz und nicht rostende Materialien</li> <li>- Verankerung in der Primärstruktur durch wärmebrückenreduzierende Halterungen</li> <li>- Wasser- und Nährstoffanlage (Technikbereich erforderlich)</li> </ul>		
<b>Begrünungsform</b>		Direktbewuchs der Fassade (ohne Kletterhilfe)	Leitbarer Bewuchs an separater Wuchskonstruktion (mit Kletterhilfe)	Horizontale Vegetationsflächen / Pflanzgefässe mit / ohne Kletterhilfen	Modulare Systeme (vorgefertigte Fassadenelemente als Substratspeicher)	Flächige Konstruktionen (Trägerplatte mit Textil- oder Filzsystem)
<b>Kosten (Richt- werte)</b>	<b>Erstellung<sup>7</sup></b>	ca. 800 Fr./m <sup>2</sup>		ca. 1200 Fr./m <sup>2</sup>	ca. 1900 – 2800 Fr./m <sup>2</sup>	
	<b>Unterhalt / Pflege</b>	ca. 20-25 Fr./m <sup>2</sup>		ca. 40-45 Fr./m <sup>2</sup>		

<sup>7</sup> <https://nnbs.ch/reference-cases/fassadenbegrueung-stadtgaertnerei-zuerich/>





	<b>bodengebundene Systeme</b>	<b>wandgebundene Systeme</b>
<b>Bewässerung</b>	Bei bodengebunden Systemen kann i.d.R. auf eine automatische Bewässerung verzichtet werden.	Ein automatisches Bewässerungssystem ist vorzusehen. Die benötigte Wassermenge ist dabei von der Pflanzenart, der Substratschicht und der Ausrichtung der Fassade abhängig. Wenn ein automatisches Bewässerungssystem vorhanden ist, kann darüber auch die Versorgung mit Dünger erfolgen.
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- im Normalfall einfach umzusetzen</li><li>- hohe ökologische und stadtklimatische Funktion</li><li>- relativ kostengünstig, je nach System</li><li>- einfach zu pflegen, je nach Wuchshöhe</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- auch an Gebäuden möglich, wo kein Bodenanschluss vorhanden ist</li><li>- Steigerung des Imagewertes des Gebäudes</li><li>- hohe ökologische und stadtklimatische Funktion</li><li>- positiver Effekt der Begrünung sofort gegeben (mikroklimatische Relevanz bereits im ersten Jahr)</li><li>- keine begrenzte Wuchshöhe, auch an sehr hohen Fassaden möglich</li><li>- i.d.R. dauergrün (Sommer / Winter), ganzjähriger positiver Effekt</li></ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Auswahl geeigneter Pflanzen und ihrer Ranksysteme durch Fachexperten</li><li>- regelmässige Wartung und Pflege unerlässlich (je höher die Begrünungen, desto aufwendiger ist die Pflege)</li><li>- Bodenverhältnisse und verfügbarer Platz können im Strassenraum problematisch werden</li><li>- Wuchshöhe begrenzt (nur vereinzelt bis zu 30 m), abhängig von der Pflanzenart und der verfügbaren Substratsmenge</li><li>- positiver Effekt der Begrünung ist abhängig von der Wuchszeit und wird erst nach einer gewissen Zeit im vollen Umfang erreicht (Selbstklimmer: mikroklimatische Relevanz ab 5 Jahren, Gerüstkletterpflanzen: ab 3 Jahren)</li><li>- meist sommergrüne Pflanzen, nur wenige ganzjährig grün, positiver Effekt somit nicht das ganze Jahr nutzbar</li><li>- bei Direktbewuchs steigt das Brandrisiko mit zunehmenden Pflanzvolumen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Planung, Ausführung und Pflege durch einen Fachbetrieb</li><li>- regelmässige Wartung und Pflege unerlässlich</li><li>- Bau und Pflege teurer als bei bodengebundenen Systemen</li><li>- automatische Bewässerung notwendig, Frostschutz muss gewährleistet sein</li><li>- Statik: wenn strukturelle Verstärkungen notwendig sind, kann dies zu einer Erhöhung der Grauen Energie des Gebäudes führen</li><li>- i.d.R. hoher Fassadenaufbau, dadurch tiefe Fensterlaibungen (kann sich negativ auf die Tageslichtversorgung im Innenraum auswirken)</li></ul>



Fassadenbegrünungen werden in der Schweiz derzeit nur vereinzelt umgesetzt. Dabei werden meist bodengebundene Systeme oder Pflanzgefässe auf horizontalen Bauteilen (Terrassen oder Auskragungen) verwendet, da diese im Vergleich zu wandgebundenen Systemen i.d.R. vor allem kostengünstiger und weniger aufwendig im Unterhalt sind. Dies wurde auch im Austausch in Workshops im Rahmen des Projekts bzw. in Gesprächen mit Fachexperten deutlich.

Bekannte Beispiele aus der Schweiz sind u.a. das Gartenhochhaus Aglaya auf dem Suurstoffi-Areal in Rotkreuz, der Garden Tower in Wabern (Kanton Bern) oder das Stücki Einkaufszentrum in Basel. Zudem gibt es auch für den Direktbewuchs von Fassaden zahlreiche Beispiele, hier kann u.a. das Wohngebäude in der Gartenhofstrasse 7 in Zürich genannt werden.



Abbildung 13: Beispiele für wandgebundene Vegetationsflächen in Pflanzgefässen und bodengebundene Fassadenbegrünung: Gartenhochhaus Aglaya in Rotkreuz: 50 Arten von Solitärbäumen, Heckenpflanzen, Sträuchern, Kletterpflanzen und Stauden in Trögen (links oben, Quelle: Christian Herbert Hildebrand), Garden Tower in Wabern bei Bern, Pflanzgefässe mit Kletterhilfe: diverse Pflanztypen wachsen aus den bodenbündigen Trögen in die Höhe mittels eines Edelstahlseilnetzes (rechts oben, Quelle: Beat Mathys), Stücki Einkaufszentrum in Basel: 23 verschiedene Gehölzarten und Kletterpflanzen (Schlinger und Winder, für Seile geeignet) als Unterpflanzung in Trögen auf einer separaten Rankkonstruktion (links unten, Quelle: Beat Breitenfeld) und Gartenhofstrasse 7 in Zürich: traditionell bodengebundener Direktbewuchs ohne Kletterhilfe (rechts unten, Quelle: Thomas Buehler).



Wandgebundene modulare oder flächige Systeme finden sich ebenfalls in diversen Projekten. Als Beispiel kann u.a. das Kundenzentrum Flon an der Metro Station m2 in Lausanne genannt werden. Ein modulares System, welches eine fortlaufende Vegetationsschicht zwischen Fassade und Dach bildet, zeichnet dieses Projekt aus. Weitere Beispiele zu modularen Fassadensystemen, können in der Stadtgärtnerei in Zürich oder an der Zentrumsüberbauung MITTIM in Wallisellen gefunden werden.



Abbildung 14: Beispiele für wandgebundene Fassadenbegrünungen: Kundenzentrum Flon – m2 Metro Station Lausanne: modulares, vorgehängtes, hinterlüftetes, wandgebundenes Begrünungssystem (links oben, Quelle: Nicolas Janberg), Stadtgärtnerei Zürich Fassadenbegrünung W+L: zwei modulare wandgebundene Systeme mit unterschiedlichem Bausystem und Vegetation (oben: mittig – modulares System – und rechts – flächige Konstruktion –, Quelle: raderschallpartner ag) und Zentrumsüberbauung MITTIM in Wallisellen: immergrüne Pflanzen in schrägen Bändern, kombiniert mit Blühpflanzen, gesetzt zwischen den Lamellen, die auf einer Stahlkonstruktion angeordnet sind (unten, Quelle: raderschallpartner ag).

Das Begrünen von Fassaden und Dächern gewinnt aber insbesondere in städtischen Gebieten zunehmend an Bedeutung. Die Verbesserung des Stadtklimas und der Aufenthaltsqualität, die Erhaltung der Biodiversität und die Retention von Regenwasser sind nur einige der positiven Effekte, welche Begrünungssysteme auf Mensch, Gesellschaft und Umwelt nehmen können (17).

Doch woran liegt es, dass Fassadenbegrünungen noch nicht häufiger umgesetzt werden? Eine Umfrage im Projekt «Begrünung und Stadtklima» (17) der Hochschule Luzern hat gezeigt, dass insbesondere der anspruchsvolle Unterhalt (Pflege und Bewässerung) und die damit verbundenen Kosten Hemmnisse sind. Ebenso wurden die hohen Investitionskosten, potenziellen Schäden am Gebäude, die erhöhte Präsenz von Insekten, Pollen und Laub von den Umfrageteilnehmenden genannt. Zudem kann die Thematik Brandschutz eine Herausforderung darstellen. Weitere Informationen zu Brandschutzmassnahmen bei begrünten Fassaden sind in Kapitel 2.1.3 zu finden.



Zur Förderung von Fassadenbegrünungen werden Bauherrschaften und Institutionen vereinzelte Subventions-Möglichkeiten geboten, bspw. das Förderprogramm (inkl. Beratung) Vertikalbegrünung der Stadt Zürich<sup>8</sup>. Denn bei Fassadenbegrünungen sind Kosten und Nutzen nicht gleichmässig verteilt: Erstellung und Unterhalt der Fassadenbegrünung wird über den Gebäudeeigentümer finanziert, die positiven Effekte von Begrünungsmassnahmen betreffen aber ebenso den umgebenden Raum und somit eine Vielzahl von Menschen. Dies gilt es, bei der Schaffung von Anreizen zu beachten.

Insgesamt scheint das Bewusstsein für die positiven Effekte von städtischen Begrünungen in der Öffentlichkeit zu wachsen, nicht nur in der Schweiz, sondern auch international. Insbesondere für nachhaltige Quartiere sind Fassaden- und Dachbegrünungen zentral: Die positiven Effekte der Begrünung könnten vor allem mit Blick auf den Klimawandel (Hitze in Städten) und der Tendenz zum verdichteten Bauen in Zukunft essenziell sein (17).

In dieser Studie werden repräsentativ zwei prinzipielle Arten der Fassadenbegrünung untersucht, ein bodengebundenes und ein wandgebundenes System. Weitere Informationen zu den getroffenen Annahmen sind in Kapitel 4.5 aufbereitet.

### 2.1.2 Wasserbedarf

Angesichts des Klimawandel wird es künftig zu einem Temperaturanstieg kommen. Hitzeperioden in den Sommermonaten können zu längeren trockenen Phasen führen<sup>9</sup>. Ein bewusster Umgang mit der Ressource Wasser ist dahingehend von besonderer Bedeutung. Begrünungen benötigen für ihr Überleben eine stetige Wasserversorgung (23). Sollen Fassadenbegrünungen in Zukunft grossflächig umgesetzt werden, ist sicherzustellen, dass eine ausreichende Wasserversorgung garantiert werden kann.

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten für eine nachhaltige Bewässerung von Fassadenbegrünungen aufgezeigt. Denn durch eine gute Planung und den richtigen Umgang mit Regenwasser kann der Leitungswasserbedarf nahezu substituiert werden (1).

#### **Wasserbedarf von Fassadenbegrünungen**

Die benötigte Wassermenge für Fassadenbegrünungen ist von der jeweiligen Pflanzenart, der **Substratschicht** und den **Standortbedingungen** (Himmelsrichtung, regelmässige Verschattung, etc.) abhängig (23), was eine allgemeine Aussage zum benötigten Wasserbedarf schwierig macht. Für die im Rahmen dieses Projekts installierte Messinfrastruktur (Kapitel 5.3) wurde für die bodengebundene Begrünung von einem jährlichen Wasserbedarf von ca. 624 l pro Jahr je m<sup>2</sup> Grünfläche ausgegangen. Dies entspricht ca. 1.7 l pro Tag je m<sup>2</sup>. Bei den wandgebundenen Begrünungen wurde mit einem jährlichen Wasserbedarf von ca. 2'628 l pro Jahr je m<sup>2</sup> Grünfläche geplant. Dies entspricht ca. 7.2 l pro Tag je m<sup>2</sup>. Je nach Pflanzenart und Grünvolumen können diese Werte jedoch für andere Systeme bedeutend abweichen. Die Studie «Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung» (1) gibt einen Überblick, welche Pflanzenarten einen geringeren und welche einen höheren Wasserbedarf haben.

Die Bewässerung der Begrünung muss dabei jedoch nicht allein über das Trinkwassernetz erfolgen. Hierfür gibt es verschiedene Massnahmen, um diesen Bedarf durch die **Nutzung von Abwasser oder / und Regenwasser** deutlich zu senken oder sogar ganzheitlich zu decken.

---

<sup>8</sup> Förderprogramm Vertikalbegrünung, Stadt Zürich 2023: <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/beratung-und-wissen/wohn-und-arbeitsumfeld/foerderprogramm-vertikalbegruenung.html>

<sup>9</sup> Beobachtete Klimaentwicklung in der Schweiz, National Center for Climate Services NCCS: <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/beobachtete-klimaentwicklung-in-der-schweiz.html>



## Möglichkeiten der Regenwassernutzung

Das anfallende Regenwasser kann in Tanks, Tonnen oder Zisternen gesammelt werden. Anschliessend kann dieses nach und nach zur Bewässerung von Begrünung eingesetzt werden. Abbildung 15 gibt einen Überblick über die mittlere jährliche Niederschlagsmenge in den verschiedenen Regionen der Schweiz. 1 mm Niederschlag entspricht dabei 1 Liter pro Quadratmeter. Im Durchschnitt erhält die Schweiz pro Quadratmeter etwa 1'200 Liter pro Jahr.

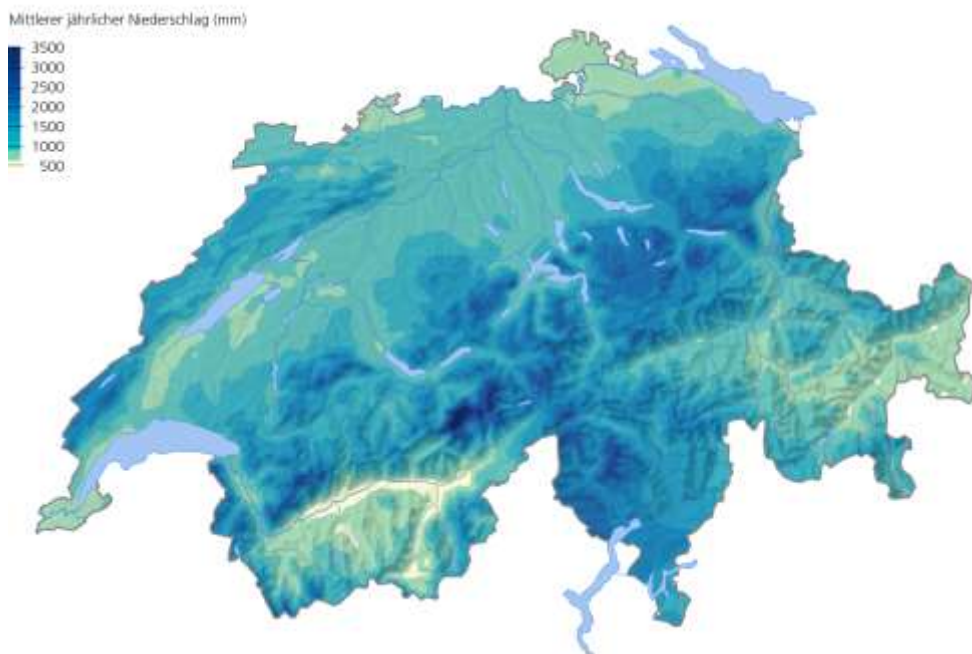


Abbildung 15: Mittlerer jährlicher Niederschlag in der Schweiz für die Jahre 1981–2010 (Quelle: MeteoSchweiz).

## Möglichkeit der Abwasseraufbereitung und -nutzung

Der durchschnittliche Tagesverbrauch an Trinkwasser in einem Schweizer Haushalt liegt bei 142 l pro Person<sup>10</sup>. Abbildung 16 zeigt die typische Aufteilung des Wasserverbrauchs in Prozent.

Bei dem anfallenden Abwasser wird dabei zwischen Grau- und Schwarzwasser unterschieden. Grauwasser fällt bspw. bei Waschtischen, Duschen und Badewannen an (Abbildung 16, blau) und ist i.d.R. nur gering verschmutzt. Werden bei diesen Sanitärelementen nur natürlich abbaubare Produkte (ohne chemische oder giftige Stoffe) verwendet, kann das Grauwasser direkt zum Giessen von Pflanzen verwendet werden<sup>11</sup>. Schwarzwasser wiederum bezeichnet das am stärksten verschmutzte Abwasser und fällt bei Toiletten und Urinalen an (Abbildung 16, dunkelgrün). Dies wird über das Abwassersystem abgeleitet und sollte nicht direkt zur Bewässerung eingesetzt werden.

<sup>10</sup>[https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Beratung/Beratung\\_Wissenstransfer/Publ\\_Praxis/Faktenblaetter/fb\\_grauwasser\\_0221.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Beratung/Beratung_Wissenstransfer/Publ_Praxis/Faktenblaetter/fb_grauwasser_0221.pdf)

<sup>11</sup> [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/merkblatt-sammeln-speichern-giessen.pdf.download.pdf/Wasser\\_DE.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/merkblatt-sammeln-speichern-giessen.pdf.download.pdf/Wasser_DE.pdf)

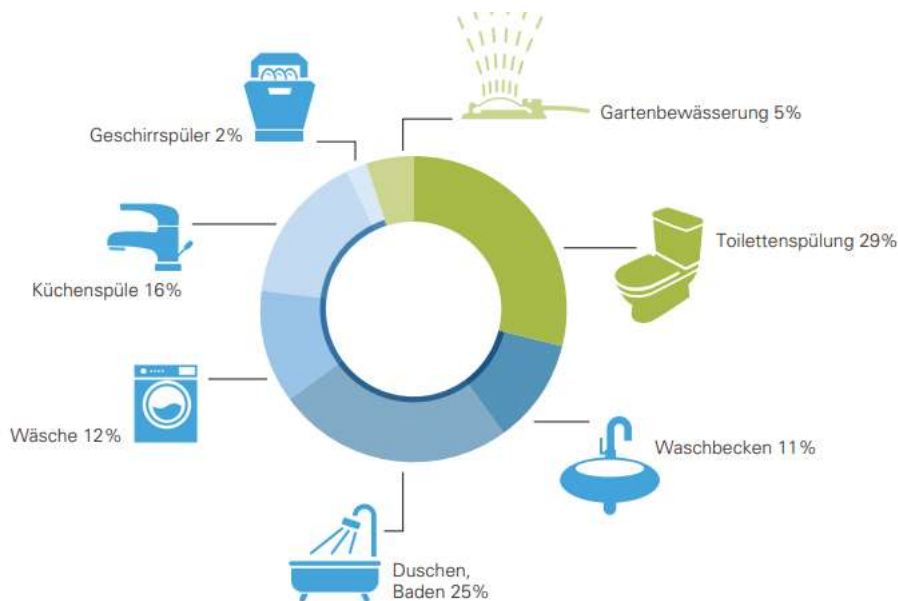


Abbildung 16: Aufteilung des Wasserverbrauchs im Haushalt. Die Grafik zeigt die anteilmässige Aufteilung des daraus anfallenden Abwassers: Grauwasser ist blau und Schwarzwasser (Toiletten und Urinale) ist dunkelgrün markiert (Quelle: Eawag).

Von dem durchschnittlichen Trinkwasserverbrauch von 142 l pro Person pro Tag fallen dabei ca. 66 % Grauwasser an. Bei einem Haushalt mit 4 Personen würde das somit täglich ca. 375 l Grauwasser bedeuten, welches unter anderem für die Bewässerung von Begrünungen genutzt werden könnte. Geht man bei einer bodengebundenen Begrünung von einem Wasserbedarf von ca. 1.7 l pro Tag je m<sup>2</sup> aus, so könnten damit ca. 220 m<sup>2</sup> Grünfläche bewässert werden. Bei einer wandgebundenen Begrünung mit einem Wasserbedarf von ca. 7.2 l pro Tag je m<sup>2</sup> könnten damit ca. 52 m<sup>2</sup> Grünfläche bewässert werden.

In einer Studie der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (24) wurde untersucht, inwieweit sich Grauwasser für die Bewässerung von extensiven Gründächern eignet. Die Untersuchungen zeigten, dass Grauwasser prinzipiell als Giesswasser geeignet ist. 80 % der 43 getesteten Kräuter- und Gräserarten haben das Giessen mit Grauwasser gut vertragen (24).

Betrachtet man die zuvor beschriebenen Kennzahlen, kann davon ausgegangen werden, dass durch ein gutes Wassermanagement der Wasserbedarf für Fassadenbegrünungen ganz oder zumindest ein Grossteil davon durch Regen- und Grauwasser gedeckt werden kann. Bei der Planung von Fassadenbegrünungen ist es im Hinblick auf das künftige Klima sinnvoll entsprechende Systeme zu berücksichtigen, welche den Wasserbedarf über das Trinkwassernetz möglichst gering halten. So können Begrünungssysteme auch in Hitze- oder längeren Trockenperioden ausreichend bewässert werden. Gleichzeitig wird ein Beitrag zur Förderung natürlicher Wasserkreisläufe und zur Entlastung von Kanalisationssystemen geleistet (Kapitel 6.4, Abbildung 62).

### 2.1.3 Brandschutz

Die Schweiz verfügt bezüglich des Brandschutzes über einen der weltweit höchsten Sicherheitsstandards. Die schweizweit gültigen Brandschutzvorschriften der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF), bestehend aus der VKF-Brandschutznorm und den VKF-Brandschutzrichtlinien, bilden die gesetzliche Grundlage für die Ausführung des Brandschutzes in Gebäuden und sind rechtlich verbindlich (25). Für die Umsetzung der VKF-Brandschutzvorschriften gibt die VKF verschiedene Merkblätter heraus, auch für Solaranlagen und Fassadenbegrünungen gibt es je ein Merkblatt. Abbildung 17 gibt einen Überblick über die Hierarchie der Brandschutzregelung in der Schweiz.

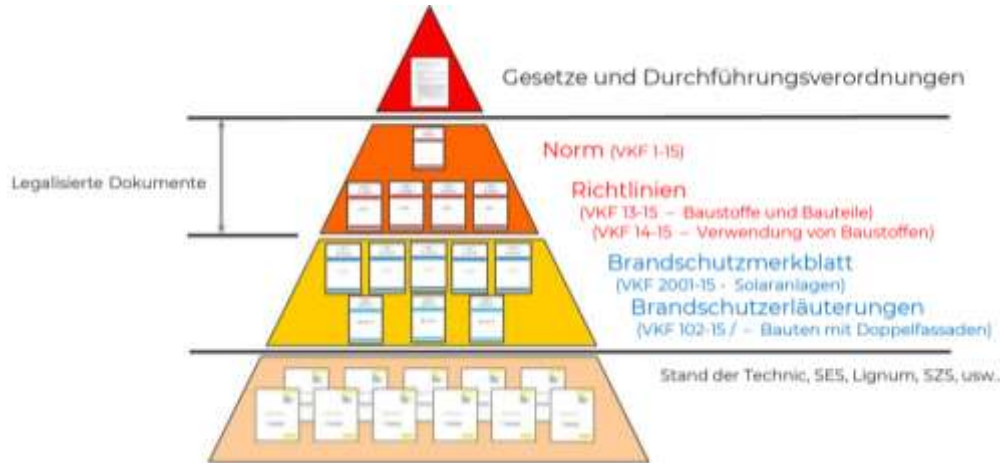


Abbildung 17: Brandschutzorganisation in der Schweiz, Brandschutz-Hierarchie (Quelle: Pierre-Olivier Cuche).

Ergänzend zu diesen Regelwerken gibt es auch Merkblätter und Weisungen der Kantone sowie Stand-der-Technik-Papiere der Branche zu beachten (Abbildung 18).

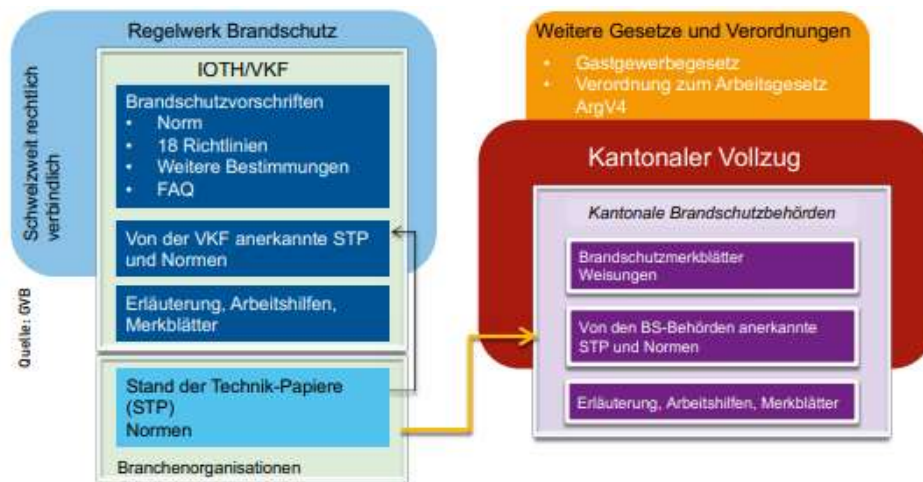


Abbildung 18: Übersicht über die verschiedenen Regelwerke, Gesetze und Verordnungen im Bereich Brandschutz, welche in der Schweiz zur Anwendung kommen (Quelle: GVB Gebäudeversicherung Bern).

In diesem Kapitel wurde das Brandverhalten sowie wichtige Massnahmen für die Gewährleistung des Brandschutzes bei Fassadenbegrünungen betrachtet.

### Brandverhalten von Fassadenbegrünungen

Verschiedene Studien haben sich mit dem Thema Brandschutz bei Fassadenbegrünungen auseinandergesetzt. Beispielsweise hat die Stadt Wien das «Brandverhalten von Grünfassaden in grossmaßstäblichen Versuchen» (26) untersucht (Abbildung 19). Dabei konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- praktisch keine seitliche Brandweiterleitung (auch nicht flammennah unmittelbar neben Brandkammer)



- vertikale Brandweiterleitung durch kurzzeitige (wenige Sekunden) „Durchzündung« prinzipiell möglich
- vertikale Brandweiterleitung über hölzerne Wurzeln nicht beobachtbar
- Sekundärbrandgefahr durch abfallende brennende Teile nicht gegeben



Abbildung 19: Fotodokumentation eines Brandversuchs mit Efeu. Bilder von links nach rechts: Prüfstand vor der Brandprüfung (Bild 1); kurzzeitige vertikale Brandweiterleitung während der Prüfphase (Bild 2); Fassadenbegrünung zum Ende der Brandprüfung (Bild 3); Fassadenbegrünung nach der Brandprüfung – keine seitliche Brandweiterleitung erkennbar (Bild 4) (Quelle: Stadt Wien).

Für das Brandverhalten von Fassadenbegrünungen spielen verschiedene Faktoren eine wichtige Rolle. Neben der **Pflanzenart** (die Brennbarkeit kann sich unterscheiden, u.a. durch den Wassergehalt, Anteil ätherischer Öle, etc.) ist vor allem auch die **Instandhaltung, Pflege und Wartung der Systeme** ein entscheidender Faktor. Hier gilt: Je dicker die Grünschicht, desto mehr abgestorbene Trockenmasse mit einer grossen Oberfläche kann an der Fassade vorliegen und desto stärker ist die Brandausbreitung (27). Ein weiterer Faktor ist die richtige Materialwahl der Systeme. Die Brandlast einer Gebäudebegrünung kann durch die Wahl von Pflanzen mit einer geringen Holzmasse und die Verwendung von nichtbrennbaren Kletterhilfen und Substratträger sowie durch die Wahl mineralischer Substrate verringert werden (28).

#### **Mögliche Beeinträchtigung der Schutzziele**

Neben der Gefahr der Brandausbreitung über mehrere Geschosse und auf benachbarte Bauten und Anlagen können auch Feuerwehrezufahren sowie Flucht- und Rettungswege durch Fassadenbegrünungen beeinträchtigt werden. Weiter besteht durch das Zuwachsen von Abgasanlagen oder Abströmöffnungen von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) das Risiko einer begünstigten Brandentstehung wie auch einer Beeinträchtigung der Rauch- und Wärmeabführung. (28)

#### **Brandschutzmassnahmen bei Fassadenbegrünungen**

Für die Brandschutzmassnahmen wird empfohlen, sich an den Vorschlägen des VKF-Merkblattes für Gebäudebegrünungen zu orientieren. Dieses Merkblatt enthält Vorschläge zur baulichen und organisatorischen Umsetzung von Gebäudebegrünungen, es weist jedoch keinen Vorschriftenstatus auf. (28)

Die Brandschutzmassnahmen des VKF-Merkblatts unterscheiden sich je nach Gebäudehöhe und Art und Umfang der Begrünung. Während für **Gebäude der Qualitätssicherungsstufe 1** (QSS 1, Nebengebäude, Einfamilienhäuser, Gebäude geringer Höhe) bei Fassadenbegrünungen nach dem VKF-Merkblatt neben dem Pflegekonzept keine zusätzlichen Massnahmen erforderlich sind, gelten bei **Gebäuden mittlerer Höhe** (QSS 2) weitere Vorgaben. So ist ein Pflege- und Instandhaltungskonzept über die gesamte Lebensdauer erforderlich. Zudem muss die Zugänglichkeit für die Feuerwehr für

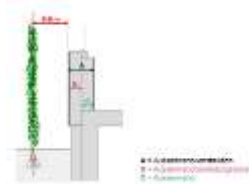




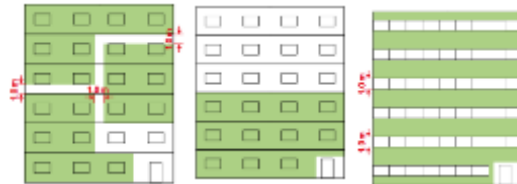
einen Löscheinsatz gewährleistet sein. Weiter sollen Ranksysteme, Pflanzgefässe und Unterkonstruktionen aus Baustoffen der RF1 bestehen. Auch mit der Platzierung der Begrünung kann eine Brandausbreitung verhindert werden. Es soll sich an die Vorgaben aus dem VKF-Merkblatt gehalten werden. Demnach muss eine der Vorgaben aus Tabelle 5 erfüllt sein (28).

Tabelle 5 Vorgaben für Gebäude mittlere Höhe aus dem VKF-Brandschutzmerkblatt Begrünungen (28)

Der Abstand des Ranksystems zur Aussenwandkonstruktion beträgt mindestens 0.6 Meter.



Die Fassadenbegrünung erstreckt sich über maximal 3 Geschosse, wobei Teilflächen einen Abstand von mindestens 1 m zueinander aufweisen.



Die Fassadenbegrünung befindet sich an einer öffnungslosen Fassade oder einem öffnungslosen Fassadenteil, bei dem der Abstand zwischen Fenstern und Fassadenbegrünung mindestens 0.5 m beträgt.



Die Fassadenbegrünung befindet sich an einer feuerwiderstandsfähigen Aussenwand mit feuerwiderstandsfähigen Fenstern, die nur zu Unterhaltszwecken offenbar sind.

Alle Räume, die an die begrünte Aussenwand mit einer Öffnung (z. B. Türen oder Fenster) anschliessen, sind mit einer Sprinkleranlage geschützt.

Für wandgebundene Fassadenbegrünungen als flächiges oder modulares System an Gebäuden mittlerer Höhe sind zusätzlich folgende Vorgaben einzuhalten (28):

- Brennbare Aussenwandbekleidungen und / oder Wärmedämmungen sind konstruktiv so zu unterteilen, dass sich ein Brand an der Aussenwand vor dem Löschangriff durch die Feuerwehr um nicht mehr als zwei Geschosse oberhalb des Brandgeschosses ausbreiten kann.
- Hinterlüftete Fassaden an Gebäuden mittlerer Höhe müssen mit einer von der VKF anerkannten oder gleichwertigen Konstruktion ausgeführt werden, wenn die Aussenwandbekleidungen und / oder im Hinterlüftungsbereich Dämmstoffe bzw. flächige Schichten aus brennbaren Baustoffen bestehen.
- Die massgebenden Baustoffe in VKF-anerkannten oder gleichwertigen Konstruktionen müssen mindestens aus Baustoffen der RF3 (cr) bestehen.



Bei **Hochhäusern** sind Fassadenbegrünungen im Rahmen eines Standardkonzeptes nicht möglich. Die Anwendung von Nachweisverfahren im Brandschutz zur Beurteilung von Brandgefahr, Brandrisiko oder zur Nachweisführung konzeptioneller Ansätze ist bei der Erfüllung der Schutzziele der Brandschutznorm und bei einer ganzheitlichen Betrachtungsweise zulässig und wird von der Brandschutzbehörde geprüft (28).

Die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der deutschen Berufsfeuerwehren und des deutschen Feuerwehrverbandes gibt ebenfalls Schutzmassnahmen als Empfehlung aus (27):

- Mindestabstand der Bepflanzung von 1.0 m vom Anschlussbereich Wand / Dach einhalten
- horizontale Brandriegel, öffnungslos vor der Fassade angebracht (Vermeidung vertikale Brandausbreitung), diese dürfen nicht überwachsen / regelmässige Pflege, Empfehlung für die Dimensionierung der Brandriegel: Stahlblech, mind. 1 mm Dicke, Auskrägung von mind. 20 cm
- fassadengebundene Systeme: durchgängige Brandriegel zwischen den Geschossen (Abbildung 20, Bild a)
- bodengebundene Systeme: Brandriegel können auf die Fensterstürze (+0.5 m auf beiden Seiten) beschränkt werden (Abbildung 20, Bild b)

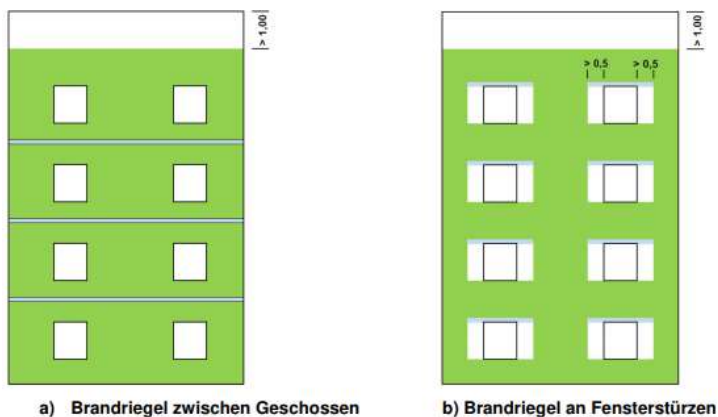


Abbildung 20: Brandriegel bei Fassadenbegrünungen, zwischen den Geschossen (Bild a) und an den Fensterstürzen (Bild b) (Quelle: (27)).

Alternativ zu Brandriegeln können laut den deutschen Quellen folgende Massnahmen angewendet werden (27):

- nicht bepflanzte Fassadenabschnitte (Brandlastfrei): Mindesthöhe 3 m bzw. der Höhe einer Vollgeschosse (Abbildung 21, Bild c)
- nicht bepflanzte Fassadenabschnitte (Brandlastfrei) um Öffnungen in der Fassade: mindestens 0.5 m zu jeder Seite und 1.0 m oberhalb der Öffnung (Abbildung 21, Bild d)
- Streifenartige Bepflanzung der Fassade: mindestens 0.5 m Abstand zu jeder Seite einer Öffnung (Abbildung 21, Bild e)
- Kassettenartige Bepflanzung: mit einer begrünten Fläche von maximal 3.00 m x 3.00 m (Abbildung 21, Bild f)

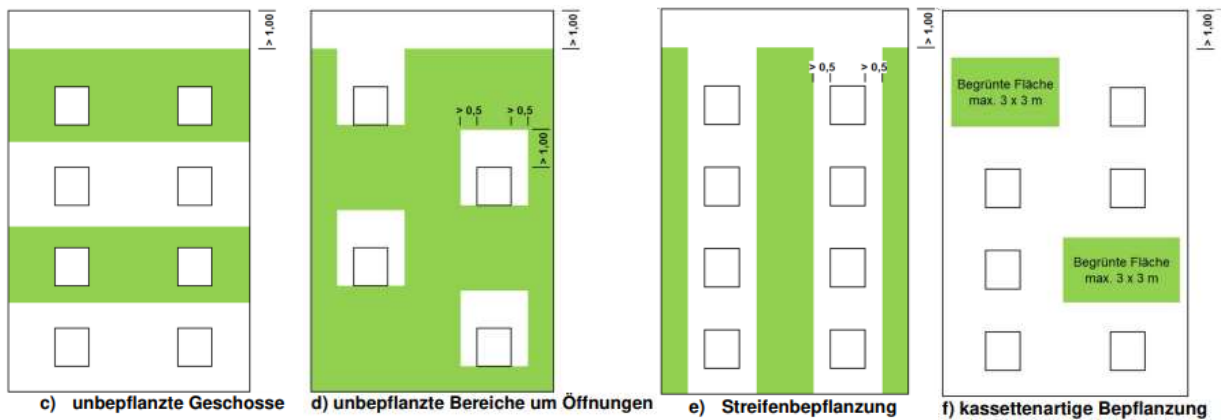


Abbildung 21: Alternativen zu Brandriegeln: nicht bepflanzte Fassadenbereiche (Bilder c und d), streifen- und kassettenartige Bepflanzung (Bilder e und f) (Quelle: (27)).

In der Schweiz muss sich an die VKF-Vorgaben gehalten werden, die zusätzlichen Empfehlungen aus Deutschland können als weitere Optionen angesehen werden, sofern die VKF-Vorgaben nicht verletzt werden.

## 2.2 PV-Anlagen im Fassadenbereich

### 2.2.1 Klassifizierung und Eigenschaften von PV-Fassaden, Projektbeispiele

Eine Photovoltaikanlage oder PV-Anlage ist eine Solarstromanlage, in der ein Teil der Sonnenstrahlung mittels Solarzellen in elektrische Energie umgewandelt wird. Die jährliche Solarstromproduktion betrug im Jahr 2022 in der Schweiz 3'858 GWh, was bedeutet, dass 6.76 % des Endverbrauchs an elektrischer Energie in der Schweiz durch installierte Photovoltaikanlagen gedeckt werden können (29). Die Solarproduktion ist in den letzten Jahren in der Schweiz bereits stark gewachsen: im Jahr 2021 betrug der Anstieg im Vergleich zum Jahr 2020 ca. 48 %, im Jahr 2022 waren es im Vergleich zum Jahr 2021 knapp über 35 %. Die meisten dieser Anlagen befinden sich auf den Dächern von Industrie-, Gewerbe- und Wohngebäuden.

Das Bundesamt für Energie hat das Solarstrompotenzial der mittelmässig bis hervorragend geeigneten Schweizer Hausfassaden im Jahr 2019 auf 17 TWh pro Jahr geschätzt<sup>12</sup>. Das Potential der Schweizer Hausdächer liegt bei 50 TWh pro Jahr. Das Solarstrompotenzial der Gebäudefassaden beträgt somit rund ein Drittel desjenigen der Dachflächen. Das sind bedeutende Werte, denn zusammen könnten sie den **gesamten Stromverbrauch der Schweiz** decken, welcher derzeit bei rund 57 TWh pro Jahr liegt (29). Das Problem der unzureichenden Stromerzeugung im Winter wird jedoch durch die Photovoltaik, die heute hauptsächlich auf Dächern erzeugt wird, nicht gelöst. Ein grosser Vorteil einer PV-Fassade im Vergleich zu einer PV-Dachanlage ist dementsprechend der höhere Energieertrag im Winterhalbjahr aufgrund des jahreszeitlich bedingten tieferen Neigungswinkels der Sonne. Zudem bleiben senkrechte Paneele i.d.R. schneefrei, was der **Solarproduktion im Winter** zugutekommt.

Die **Integration von Photovoltaikanlagen** in die Gebäudehülle (auf English *building integrated photovoltaic* – BIPV) stellt teilweise andere Anforderungen als die von Aufdachanlagen. Der Stromertrag über die BIPV kann innerhalb des Gebäudes stark variieren. Zur Bestimmung der für die

<sup>12</sup> Schweizer Hausdächer und -fassaden könnten jährlich 67 TWh Solarstrom produzieren, Bundesamt für Energie BFE 2019: [https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-74641.html#:~:text=Auf%20Basis%20dieser%20Daten%20sch%C3%A4tzt,Terawattstunden%20\(TWh\)%20pro%20Jahr](https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-74641.html#:~:text=Auf%20Basis%20dieser%20Daten%20sch%C3%A4tzt,Terawattstunden%20(TWh)%20pro%20Jahr)



BIPV besonders geeigneten Oberflächen ist eine Analyse des Standorts, der Ausrichtung und möglicher Verschattungen, die durch umliegende Gebäude oder Vegetation verursacht wird, notwendig. Letztere kann jahreszeitlich verschieden sein. Im Idealfall entspricht die Stromproduktion zeitlich dem Verbrauch der elektrischen Installationen im Gebäude. Durch die gezielte Anordnung von PV-Paneeelen in unterschiedlichen Ausrichtungen können die Leistungsschwankungen im Tagesverlauf weitgehend ausgeglichen werden, was den **Eigenverbrauch** erhöht. Die direkte Eigennutzung des Stroms bringt dabei einige Vorteile für Eigentümerinnen und Mieter, so müssen i.d.R. keine Netzgebühren und Abgaben (kantonal unterschiedliche) auf selbst produzierten Strom geleistet werden (Kostensparnis, Unabhängigkeit von schwankenden Strompreisen).

Eine besondere **Herausforderung** beim Einsatz von BIPV stellen die gültigen Vorschriften (insbesondere im Bereich Elektroinstallationen oder zum Thema Brandschutz) dar sowie der Mehraufwand für Planung, Koordination der am Bau Beteiligten und die Realisierung selbst, z.B. durch die elektrischen Installationen an Gebäudefassaden.

Bei fassadenintegrierten PV-Anlagen spielen die **gestalterischen Möglichkeiten** eine entscheidende Rolle. Dies gilt gleichermaßen für Bauherrschaften und Planende. Nur wenn eine hohe Akzeptanz solcher Systeme vorhanden ist, werden diese auch vermehrt zur Anwendung kommen. Der technologische Fortschritt bei der Herstellung von Zellen und Modulen ermöglicht heutzutage bereits ein hohes Mass an Individualisierung. Der kreative Prozess ist nicht mehr durch die traditionellen schwarzen PV-Module begrenzt, die Auswahl beinhaltet heutzutage eine Vielzahl von Texturen (wie satiniertes Glas oder strukturiertes Ornamentglas), Farben (Farbbeschichtungen oder farbgebende Nanotechnologien), Materialkombinationen und Formaten. Somit stehen bereits heute weitreichende Optionen und Gestaltungsmöglichkeiten durch Solarfassaden zur Verfügung, welche laufend weiterentwickelt werden. PV-Zellen können hinter farbigen Mustern getarnt werden, welche deren ursprüngliche Aussehen verbergen. Dies ist jedoch i.d.R. mit einer Minderung der Strahlungsintensität auf die PV-Zellen und einer entsprechend tieferen Stromproduktion verbunden. Die Herausforderung besteht darin, ein optimales Gleichgewicht zwischen ästhetischer Qualität und Energieeffizienz herzustellen, bei gleichzeitiger Gewährleistung von hoher Zuverlässigkeit, Dauerhaftigkeit und Sicherheit im Betrieb.

Färbung und Texturen können sehr unterschiedlich sein und auf verschiedene Techniken basieren. Zu den gängigen Ausführungen zählen:

- Produkte mit beschichteten, bedruckten, speziell veredelten oder farbigen Frontglasabdeckungen
- Produkte mit farbigen / gemusterten Zwischenschichten und / oder speziellen Sonnenfiltern
- Produkte mit farbigen und / oder halbtransparenten PV-aktiven Schichten (Dünnschicht, Organische Solarzellen – OPV)
- Produkte mit farbigen Polymerfolien (Verkapselungsmaterial, Rückseitenfolie)
- Produkte mit farbigen / gemusterten Zwischenschichten und / oder speziellen Sonnenfiltern



Abbildung 22: Beispiele für verschiedene Produkte für PV-Fassaden: MFH Seewadelstrasse, Affoltern am Albis: Produkte mit bedruckten, farbigen Frontglasabdeckungen und farbigen Zwischenschichten: Glas/Glas mit Mono-/Polykristallinen Zellen 5.13 W, Frontglas TVG strukturiert (Rosa504clear) 4 mm mit Digital-Keramikdruck. Einbettungsfolien EVA. Rückglas TVG 4 mm (links oben, Quelle: Viridén + Partner AG), SwissTech convention centre, EPFL Campus: Produkte mit farbigen und halbdurchsichtigen PV-aktiven Schichten: Farbstoffsolarzelle DSSC (rechts oben, Quelle: RDR / Fernando Guerra), Parkhaus, Vallastaden, Lindköping (Schweden): Fassadenelemente mit farbigen Verkapselungen unter Verwendung einer aktiven Schicht aus Cadmium-Tellurid (CdTe) (links unten, Quelle: Soltech Energy Sweden AB), Kingsgate House, London (Vereinigtes Königreich): Multikristalline c-Si-Solarzellen mit veränderter Dicke der AR-Beschichtung (auf dem Halbleitermaterial) (rechts unten, Quelle: David Langdon).

Der Wirkungsgrad der Solarzellen, d.h. das Verhältnis der erzeugten elektrischen Energie zur einfallenden Sonnenenergie, hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. Der im Labor erreichte maximale Zellwirkungsgrad ist zwar in vielen Fällen wesentlich höher als der in der Serienproduktion erreichte maximale Zellwirkungsgrad, dieser Wert gibt aber einen Hinweis darauf, welche Wirkungsgrade in den nächsten Jahren erreicht werden können. Ein PV-Modul besteht aus einzelnen Solarzellen, die miteinander zusammenschaltet sind. Der Wirkungsgrad eines PV-Moduls nimmt aufgrund der notwendigen Zwischenräume zwischen den Zellen und dem Modulrahmen etwas ab. Der typische Wirkungsgrad eines PV-Moduls liegt deshalb unter dem Wirkungsgrad der Solarzellen. In

Tabelle 6 sind die Wirkungsgrade der verbreitetsten Zelltypen zusammengetragen. Die oben beschriebenen Farbe- und Texturierungstechniken verringern die angegebene Effizienz.

Tabelle 6: Übersicht der maximalen Wirkungsgrade, welche im Labor und in der Serienproduktion erreicht werden können, sowie die typischen Modulwirkungsgrade der verschiedenen Solarzellen und der erwartete Effizienzgrad in den nächsten 10-15 Jahren. Die Werte für den erwarteten Modulwirkungsgrad sind Annahmen, welche gemeinsam mit Fachexperten definiert wurden.

	Maximaler Zellwirkungsgrad im Labor	maximaler Zellwirkungsgrad in der Serienproduktion	Typischer Modulwirkungsgrad	Erwarteter Modulwirkungsgrad in den nächsten 10-15 Jahren
<b>Monokristallines Silizium</b>	26.7 % (30)	24.0 %	19.0 %	24.0* %



<b>Polykristallines Silizium</b>	23.3 % (31)	20.0 %	17.0 %	20.0* %
<b>Amorphes Silizium</b>	14.0 % (31)	8.0 %	6.0 %	10.0* %
<b>Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS)</b>	23.4 % (30)	17.6 %	15.0 %	18.0* %
<b>Cadmiumtellurid (CdTe)</b>	22.1 % (30)	17.0 %	16.0 %	17.0* %

\* Annahmen, die in Gesprächen mit Fachleuten definiert wurden.

Halbtransparente und transparente PV-Module können dabei nie einen so guten Wirkungsgrad wie opake Module erreichen, da etwa 50 % der Sonneneinstrahlung in den sichtbaren Wellenlängenbereich fällt (32). Jeder Prozentsatz der Transparenz bedeutet einen direkten Verlust des Wirkungsgrads. Dasselbe gilt für farbige PV-Module, da diese das Licht im sichtbaren Spektrum entweder absorbieren, reflektieren oder streuen. In diesem Fall hängt die Effizienz des Panels von der Farbe und ihrer Intensität ab.

Die Transparenz des Solarmoduls kann auch durch die Anordnung der Solarzellen innerhalb eines Glas-Glas-Moduls erreicht werden (Abbildung 23, links). Der Abstand zwischen den Zellen bestimmt sowohl den Transparenzgrad als auch den Modulwirkungsgrad. Die Zellen können entweder monokristallin, perforiert oder farblich sein (Abbildung 23, rechts).

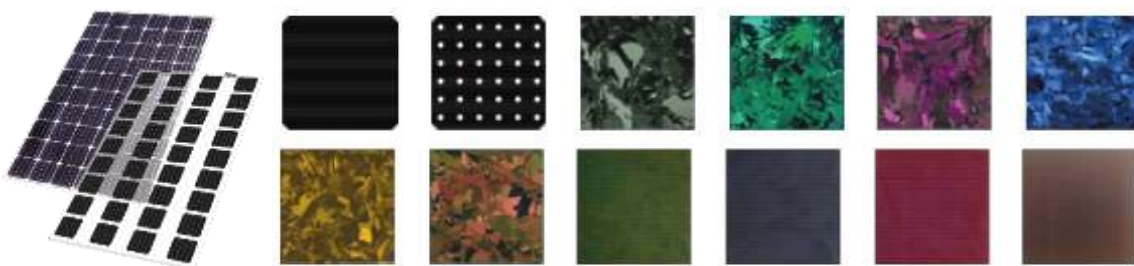


Abbildung 23: Beispiele für halbtransparente Module mit unterschiedlichen Zelltypen und Zellabständen (links, Quelle: friSolar Photovoltaik Systeme) sowie verschiedenen Farben und Mustern (rechts, Quelle: ertex solartechnik GmbH).

Bei PV-Fassaden müssen zusätzliche mechanische Zusatzbefestigungen und Brandabschottung in Betracht gezogen werden, die Mehrkosten zur Folge haben können. Die massgebenden Faktoren, welche die Wirtschaftlichkeit einer PV-Fassaden sicherstellen können, sind «unter anderem die Wahl von Photovoltaikmodulen mit hohem Wirkungsgrad, die Definition von Modulabmessungen für optimale Effizienz und bestem Handling in Produktion und Montage oder die Wahl gerahmter Glas/Glasmodule zur einfachen mechanische Befestigung»<sup>13</sup>.

In dieser Studie wurde die Integration einer Photovoltaikanlage im opaken Teil der Gebäudehülle betrachtet. In Frage kommen dafür sowohl opake als auch halbtransparente PV-Module. Für die Untersuchung wurde je ein Beispiel ausgewählt. Detaillierte Informationen zu deren Eigenschaften bzw. zu den getroffenen Annahmen befinden sich in Kapitel 4.5. In beiden Fällen ersetzen die Solarmodule die Verkleidung einer vorgehängten hinterlüfteten Fassadenkonstruktion (VHF), was zum einen die Investitionskosten senkt und zum anderen die Umweltbelastung der PV-Anlage reduziert (Verbesserung der Ökobilanz).

## 2.2.2 Brandschutz

<sup>13</sup> Entwurf «Photovoltaikanlagen an Hochhausfassaden. Leitfaden Brandschutznachweis» im Rahmen des Projekts «PV Fassaden – Brandpräventionsphilosophie an Hochhäusern (höher als 30 m) – Holenacker 65+85». <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51361>



In Kapitel 2.1.3 wurde eine Übersicht über die Brandschutzregelung in der Schweiz gegeben. Für den Brandschutz bei PV-Anlagen existiert zusätzlich zu der Norm und den Richtlinien das Merkblatt «Brandschutzmerkblatt Solaranlagen» der VKF. Zudem gibt es für PV-Fassaden das Übergangsdokument für Planung und Brandschutznachweis, welches als Übergangslösung dient, bis ein Stand-der-Technik-Papier vorliegt. Gefahrenbereiche von PV-Anlagen sind elektrische Gefahren, Brandgefahren und Naturgefahren. Zudem muss sichergestellt werden, dass bei einem möglichen Feuerwehreinsatz keine Risikoerhöhung durch die Solaranlage ausgeht (33). Brandschutzanforderungen nehmen mit zunehmender Gebäudehöhe zu und werden in der Schweiz kantonal geregelt. Nach der Brandschutznorm VKF 1-15 (34) werden Gebäude in drei verschiedene Höhen eingeteilt und verschiedene Anforderungen gestellt (Abbildung 24).



Abbildung 24: Anforderung je Gebäudehöhe nach VKF 1-15 (Quelle Bilder: iStock).

Bei **Gebäuden geringer Höhe** gibt es nach Brandschutzrichtlinie keine Einschränkungen hinsichtlich der Aussenfassade, deshalb können auch PV-Fassaden ohne Nachweisverfahren genehmigt werden. Laut der Brandschutzrichtlinie VKF 14-15 «Verwendung von Baustoffen» (35) sind bei **Gebäuden mittlerer Höhe** brennbare Wandverkleidungen so zu unterteilen, dass sich ein Brand bis auf max. zwei Stockwerke über dem Brandherd ausbreiten darf, bevor die Feuerwehr eingreift. Bei **Hochhäusern** müssen Aussenwandbekleidungen zudem aus einem RF1 (Abkürzung RF aus dem französischen réaction au feu – Brandverhalten) Baustoff sein und dürfen somit keinen Brandbeitrag leisten (wie z.B. Glas, Beton oder Gips). Grundsätzlich sind Photovoltaikanlagen daher ohne weitere Massnahmen resp. Nachweise an Fassaden von Hochhäusern sowie Gebäuden mittlerer Höhe nicht zulässig. Die Brandschutzbehörden können der Installation einer Photovoltaikanlage an der Fassade für Gebäude mittlerer Höhe und Hochhäuser zustimmen, wenn in einem Nachweisverfahren nach VKF-BSR «27-15 Nachweisverfahren im Brandschutz» gezeigt wird, dass die Schutzziele und Brandschutzanforderungen gewährleistet sind. (36)

In diesem Kapitel wurde das Brandverhalten sowie mögliche Massnahmen für die Gewährleistung des Brandschutzes bei PV-Fassaden betrachtet.

### Brandverhalten von PV-Modulen

PV-Anlagen stellen, wie alle elektrischen Anlagen, ein Brandrisiko dar. Die Komponenten der PV-Anlage bestehen aus brennbaren Baustoffen und die zusätzliche Aktivierungsgefahr durch die



Stromflüsse in der Anlage können ein erhebliches Risiko darstellen. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Brandversuch, wo das Verhalten von PV-Elementen in einem Brandfall untersucht wurde.



Abbildung 25: Brandversuch von PV-Elementen, horizontal angebracht (Quelle: Pierre-Olivier Cuche).

Gemäss dem Versuchsaufbau und der Klassifizierung der SN EN 13501-1:2009 «Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten» (37) werden die PV-Elemente der Brandverhaltensgruppe RF2 (schwer brennbar bzw. geringer Brandbeitrag) zugeordnet.

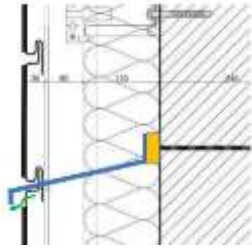
### **Massnahmen zur Gewährleistung des Brandschutzes**

Wie zuvor erwähnt, sind bei **Gebäuden mittlerer Höhe** brennbare Wandverkleidungen so zu unterteilen, dass sich ein Brand bis auf max. zwei Stockwerke über dem Brandherd ausbreiten darf, bevor die Feuerwehr eingreift. Dies ist durch verschiedene konstruktive Mittel möglich, wie bspw. durch den Einsatz von Metallprofilen in der Fassade oder die Verwendung von belüfteten Hohlraumabschottungen (Abbildung 26).





### Einsatz von Metallprofilen



### Verwendung von belüfteten Hohlraumabschottungen

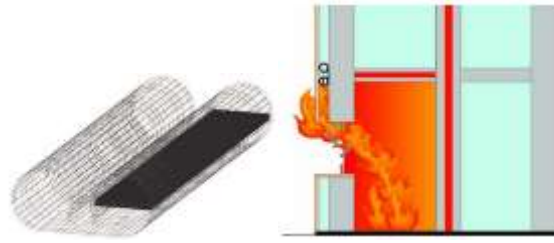


Abbildung 26: Brandschutzmassnahmen bei Gebäuden mittlerer Höhe: durch den Einsatz von Metallprofilen wird die Fassade horizontal unterteilt (links), belüftete Hohlraumabschottungen lassen eine reguläre Hinterlüftung der Fassade zu, schliessen im Brandfall aber und unterbinden somit den Kamineffekt (rechts) (Quelle: Solarwall, Pierre-Olivier Cuche).

Bei **Hochhäusern** müssen Aussenwandbekleidungen gemäss der Brandschutzrichtlinie VKF 14-15 (35) aus einem RF1 Baustoff bestehen, dies ist bei PV-Modulen nicht der Fall (RF2 bzw. bei Glas-Folie-Photovoltaikmodule RF3(cr)). Entsprechend ist zusammen mit einem/-r Fachexperten/-in ein individuelles Brandschutzkonzept auszuarbeiten. Dies sollte bereits in den frühen Planungsphasen erfolgen.

Im Mai 2023 wurde der Brandschutz von PV-Fassaden in Frage gestellt, nachdem in einem Presseartikel publiziert wurde, dass die Zürcher Gebäudeversicherung PV-Anlagen an Fassaden wegen der Brandgefahr vorerst nicht mehr zulässt<sup>14</sup>. Ende Juli 2023 veröffentlichte Swissolar einen Medienbeitrag, in dem das gemeinsame Vorgehen von Swissolar, Brandschutzbehörden, Planungsbüros und Bauherrschaften in Absprache mit der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF) beschrieben wurde. Um schweizweit die Planungssicherheit für PV an Fassaden unter Berücksichtigung des Brand- und Personenschutzes sicherzustellen, wurde folgendes Vorgehen festgelegt:

- «Ende September 2023 wurde von Swissolar in Abstimmung mit der VKF im Sinne einer Übergangslösung bis zum Vorliegen eines Stand-der-Technik-Papiers (STP) ein Leitfaden für die Planung von PV-Anlagen an Fassaden publiziert. Dieser umfasst PV-Anlagen an Gebäuden mittlerer Höhe (11 – 30 m Gesamthöhe) und Hochhäusern (> 30 m Gesamthöhe)».
- «Für die Bewilligung von PV-Fassaden an Gebäuden mittlerer Höhen und Hochhäusern wird gemäss Brandschutzgesetz weiterhin ein Nachweisverfahren notwendig sein. Der Leitfaden zeigt auf, unter welchen Umständen auf Fassaden-Brandtests verzichtet werden kann. Zur Erarbeitung eines einheitlichen und von der VKF anerkannten STP braucht es Brandtests, die in akkreditierten Labors im Ausland gemacht werden müssen».
- «Das STP wird von Swissolar gemeinsam mit PV- und Brandschutz-Experten erarbeitet und soll die Planung von PV-Fassaden weiter vereinfachen. Die Publikation des STP ist für Herbst 2024 geplant. Bis dahin hilft der Leitfaden als gemeinsame Übergangslösung»<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> Tages Anzeiger, 20.05.2023. Solaranlagen an Fassaden werden in Zürich nicht mehr toleriert.

<https://www.tagesanzeiger.ch/solaranlagen-an-fassaden-werden-in-zuerich-nicht-mehr-toleriert-384843863739>

<sup>15</sup> Swissolar, 20.07.2023. Photovoltaik-Fassaden: Swissolar und Brandschutzbehörden sorgen für Planungssicherheit.

<https://www.swissolar.ch/de/news/detail/photovoltaik-fassaden-swissolar-und-brandschutzbehoerden-sorgen-fuer-planungssicherheit-47198>



Zuvor wurde im Rahmen des laufenden **BFE-Projekts «PV Fassaden – Brandpräventionsphilosophie an Hochhäusern (höher als 30 m) – Holenacker 65+85»**<sup>16</sup> bereits mit der Arbeit an einem Leitfaden für den Brandschutznachweis von Photovoltaikanlagen auf Hochhausfassaden begonnen. Das Projekt wurde von der Berner Gebäudeversicherung GVB initiiert. In dem Leitfaden werden Schutzziele und Massnahmen zur Erfüllung der Brandsicherheit definiert.

Der aktuelle Entwurf enthält derzeit folgende **Schutzziele**:

- Die Gefahr einer Brandausbreitung im und am Gebäude darf durch die PV-Anlage nicht erhöht werden.
- Wenn die thermische Einwirkung auf die Fassade (z. B. Wohnungsbrand oder Lichtbogen) unterbunden ist, dürfen keine Bestandteile der Aussenwandkonstruktion und der Photovoltaikanlage selbstständig weiterbrennen.
- Die Gefahr herabfallender Teile darf durch die PV-Anlage nicht erhöht werden.

Die Massnahmen für das Erreichen der Schutzziele unterscheiden sich je nach Systemkategorie der Photovoltaikanlage und müssen dabei detailliert nachgewiesen werden. Im Leitfaden wird zwischen drei **Systemkategorien** unterschieden:

### **Systemkategorie 1**

Die Kategorie 1 umfasst Gebäude mit Löschanlagenkonzept, Fassaden mit Feuerwiderstand sowie Fassaden mit Fensterbändern, die mindestens 1.30 m hoch sind.

Die Fassade muss folgende Bedingungen erfüllen:

- Die PV-Module weisen einen Glas-Glas-Aufbau auf und sind mindestens B-s2,d1
- Die PV-Anlage ist gemäss den definierten technischen Schutzmassnahmen ausgeführt.
- Die restliche Aussenwandkonstruktion besteht aus Baustoffen der Brandverhaltensgruppe RF1.
- Es werden horizontale Brandschutzmassnahmen gegen eine vertikale Brandausbreitung umgesetzt.
- Das Brandschutzkonzept des Hochhauses weist keine relevanten Abweichungen von den aktuellen VKF-Brandschutzvorschriften auf. Ob die Abweichungen relevant sind, entscheidet die Fachstelle Brandschutz.

Ein argumentativer Nachweis ist möglich, wenn im Nachweisbericht die oben erläuterten Schutzziele und die Massnahmen zu deren Einhaltung vollständig, plausibel und nachvollziehbar beschreiben sind.

### **Systemkategorie 2**

Dieser Kategorie werden alle Anlagen zugeordnet, die einzelne Anforderungen der Systemkategorie 1 nicht erfüllen und deren Brandschutzkonzept jedoch keine relevanten Abweichungen von den aktuellen Brandschutzvorschriften aufweist. Ein Nachweis ist nur mit Brandversuch oder rechnerischem Nachweis (Simulation) möglich. Dieser muss bestätigen, dass die Schutzziele erfüllt sind.

### **Systemkategorie 3**

Dazu zählen Anlagen in Beherbergungsbetrieben, Aussenwänden von vertikalen Fluchtwegen mit Fenstern ohne Feuerwiderstand sowie Hochhäusern, deren Brandschutzkonzept relevante

---

<sup>16</sup> Projekt «PV Fassaden – Brandpräventionsphilosophie an Hochhäusern (höher als 30 m) – Holenacker 65+85»

<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51361>



Abweichungen von den aktuellen Brandschutzvorschriften aufweist. Ein Nachweis ist in diesem Fall ausgeschlossen.

**Teilflächen** können unterschiedlichen Systemkategorien zugeordnet werden und müssen in dem Fall separat und in Kombination beurteilt werden.

Um die Schutzziele zu erreichen, sind bauliche Anforderungen bezüglich des Fassadentyps, der Materialverwendung (Gebäudehülle, Unterkonstruktion, PV-Module, Verkabelung und Steckverbindungen), der mechanischen Sicherung, des Glasbruchverhaltens, der horizontalen Brandschutzmassnahmen und der Naturgefahren (Blitz- und Hagelschutz) zu berücksichtigen. Zudem sind technische Schutzmassnahmen bezüglich der Kabelführung, der Platzierung der Komponenten und der Beschattung zu treffen. Ebenso muss die Wartung und der Unterhalt bereits bei der Planung miteingezogen werden, eine kontinuierliche Überwachung mittels Monitoringsystem und eine regelmässige Kontrolle der Anlage mindestens alle zwei Jahre oder nach relevanten Ereignissen (z.B. Sturm, Erdbeben) ist durchzuführen.

#### **Praxisbeispiel Hochhaus Holenackerstrasse 65 in Bern<sup>17</sup>**

Das Beispiel des Hochhauses Holenackerstrasse 65 in Bern zeigt, wie eine Umsetzung einer PV-Fassade bezüglich Brandeszutes in der Praxis aussehen kann. Bei diesem Hochhaus wurde im Rahmen einer umfassenden Sanierung eine PV-Fassade installiert. Es wurde aufgrund der Ästhetik, der Leistungskennwerte, des Windlastnachweises und der Erfahrungswerte sowie der Bewilligungsfähigkeit das rahmenlose Glas-Glas Modul SKALA gewählt.

Bezüglich des Brandeszutes wurden gestützt auf Art. 8 der Brandeszutznorm (34) und in Abstimmung mit der Brandeszutzbehörde folgende Schutzziele definiert:

- Ein Brand der PV-Anlage darf sich max. über zwei Etagen an der Fassade ausdehnen
- Ein Feuer darf sich nicht horizontal ausbreiten
- Nach dem Stromlosschalten der PV-Anlage muss ein Brand selbstständig löschen
- Feuer ausserhalb des Gebäudes darf die Fassaden nicht in Brand setzen
- Es dürfen keine Bauteile herunterfallen
- Ein Brand an der Fassade darf die Einsatzkräfte nicht behindern
- Sicherstellen der Schutzziele im Betrieb (Wartung und Unterhalt)
- Eine Brandausbreitung innerhalb der bestehenden Fassadenkonstruktion darf nicht stattfinden bzw. darf nicht in eine Zwischenebene gelangen.

Nachfolgende Beispiele geben eine Orientierung, wie spezifische Brandeszutzmassnahmen zur Erreichung der Schutzziele und Verhinderung einer Brandausbreitung in der Praxis aussehen können.

---

<sup>17</sup> Projekt «PV Fassaden – Brandpräventionsphilosophie an Hochhäusern (höher als 30 m) – Holenacker 65+85»  
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51361>

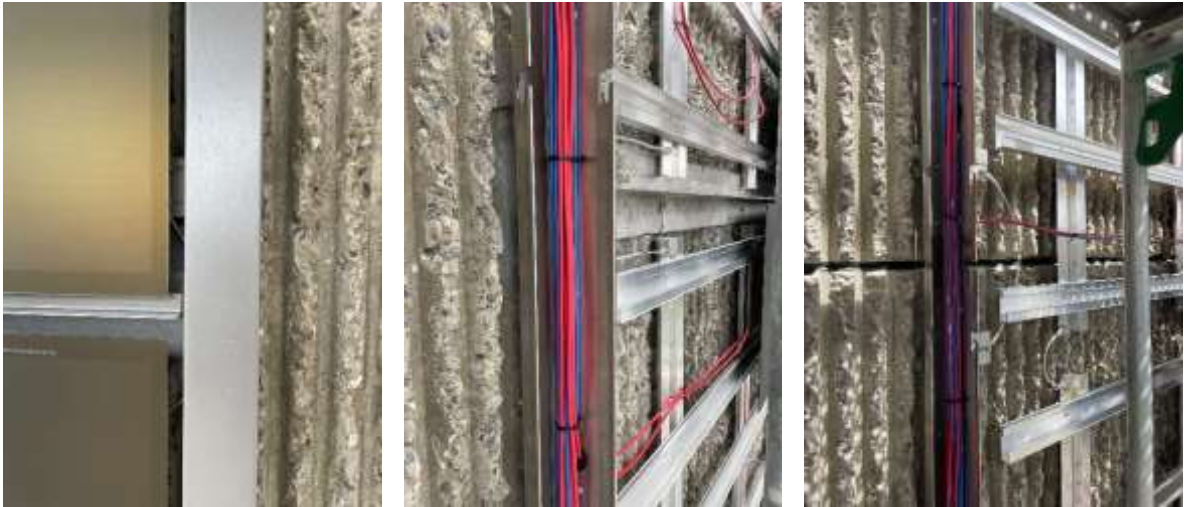


Abbildung 27: Als Brandabschottung ein vertikal montiertes und mit Mineralwolle befülltes Chromnickelstahlelement, welches bis zur Kante des Modulfelds ragt (links); Kabelkanäle aus feuerfestem Metall (Stahl verzinkt oder CNS) und vertikale Schienen der Unterkonstruktion auf welchen die Module befestigt werden (Mitte); horizontale, mit einem brandabschliessendem Dichtstoff ausgebildete Elementfuge zwischen den vorgehängten Betonelementen der Fassade zur Verhinderung eines Vordringens eines allfälligen Brandes in die Zwischenschicht der bestehenden Fassade (rechts).

## 2.3 Kombination von PV und Begrünungen

Die Fassaden eines Gebäudes sind je nach ihrer Ausrichtung, den umgebenden Elementen und der Gestaltung des Gebäudes selbst unterschiedlich stark der Sonne und der Witterung ausgesetzt. Dadurch können bestimmte Teile der Fassade effizienter für die Solarproduktion genutzt werden, während andere Teile von den positiven Effekten durch Begrünungen profitieren können. Durch eine gezielte Anordnung der Flächen (z.B. Begrünung in den ersten Geschossen des Gebäudes und PV-Module in den Bereichen mit der höchsten Sonneneinstrahlung) können die Vorteile beider Systeme vereint werden. Dies kann von grösserem Interesse sein als die Anwendung nur eines Systems.

Die Kombination von Solar- und Gründach wird bereits vermehrt umgesetzt. Die gleichzeitige Bereitstellung von Grünflächen und Energieerzeugung bietet einige Vorteile. Die Komponenten des Gründachs, vor allem das Substrat bei intensiv begrünten Dächern, können zur Fixierung der Solarpaneele beitragen, so dass keine zusätzlichen Lasten oder Dachdurchdringungen zur Trägerbefestigung erforderlich sind. Gleichzeitig bieten Solarpaneele einen kühlenden, schattigen Lebensraum für die Vegetation. Der kühlende Effekt der Begrünung (Verdunstungskühlung) kann die Betriebstemperatur der PV-Paneele senken und dadurch zu einer höheren Effizienz bei der Stromerzeugung führen. Wie gross dieser Effekt ist, hängt dabei von verschiedenen Einflussfaktoren ab, dazu gehören u.a. die Klimabedingungen, der Versuchsaufbau, die jährliche Stromproduktion sowie die Oberflächentemperaturen. Köhler et al. (9) fanden heraus, dass die Kombination von PV-Anlagen mit Gründächern die Stromerzeugung über einen Zeitraum von fünf Jahren in Berlin um durchschnittlich 6 % erhöhte. Perez et al. (38) stellte in New York City eine Leistungssteigerung von etwa 2.4 % fest. Chemisana und Lamnatou (39) berichteten in Spanien über eine maximale Steigerung der Stromerzeugung von etwa 1.3 bis 3.3 % für PV-begrünte Dächer. Andere Studien ergaben nur einen sehr geringen positiven Effekt. Die von Schindler et al. (40) durchgeführte Studie betrachtete ein nicht bewässertes Gründach unter mediterranen Klimabedingungen in Haifa, Israel. Dabei konnte keine Verbesserung der Energieproduktion verzeichnet werden.

Auch in der Schweiz wurden diesbezüglich Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse eines Simulationsmodells für eine Flachdach-PV-Anlage in der Nähe von Zürich zeigten einen 1.8 % höheren Energieertrag bei einem begrünten Dach im Vergleich zu einem konventionellen Dach.



Dächer mit hoher Albedo (kühle Dächer) haben in der Untersuchung jedoch sogar zu einer Effizienzsteigerung von 3.4 % geführt und schneiden somit besser ab als ein begrüntes Dach (41). In der Studie von Baumann et al. (42) wurde der Einfluss einer Begrünung auf die Temperatur von PV-Modulen untersucht. Insgesamt wurden 13 Testfelder betrachtet, wobei sich ein Temperaturunterschied von  $\pm 1.8$  °C feststellen liess. Dieser Temperaturunterschied führt bei den verwendeten kristallinen Siliziummodulen zu einem berechneten Ertragsunterschied von ca.  $\pm 0.7$  %. Dieser Wert liegt im Bereich der Messunsicherheit der Leistungsmessung ( $\pm 1.2$  %), das Gründach hat unter den getroffenen Annahmen somit einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Temperaturabsenkung der PV-Module. Die Autoren der Studie würden eine Kombination von PV und Gründach jedoch trotzdem empfehlen, sofern das Montagesystem für Gründächer entsprechend optimiert ist.

Um den positiven Einfluss einer Begrünung zu steigern, können helle, feinmaschige Gitter über die Pflanzen angebracht werden. Diese ermöglichen das Wachstum der Vegetation und erhöhen gleichzeitig die Reflexion der Sonnenstrahlung, was zu höheren Solarerträgen führt.

Die Kombination von PV und Begrünungen an Fassaden ist hingegen noch nicht weit verbreitet. Es wird dennoch davon ausgegangen, dass das Kühlpotenzial der Vegetation zur Senkung der Temperatur der Solarzellen und somit zu einer höheren Stromerzeugung beitragen kann (der Leistungstemperaturkoeffizient beträgt typischerweise 0.4 – 0.5 % pro Grad Temperatur (43), obwohl heutzutage auch Module mit niedrigeren Werten – etwa 0.3 % pro Grad Temperatur<sup>18</sup> – zu finden sind.

Wird eine Begrünung hinter Solarpaneelen angeordnet, kommen bevorzugt schattenverträgliche Pflanzen zum Einsatz. Bei wandgebundenen begrünter Fassaden vor allem niedrig wachsende Arten, bei bodengebundenen begrünter Fassaden vertikal wachsende Pflanzen. Die Abstände zu den Solarpaneelen müssen richtig bemessen werden, damit die Luftzirkulation hinter den PV-Modulen nicht behindert wird. Ebenso muss die Zugänglichkeit der Begrünung gewährleistet sein, um eine ordnungsgemässe Pflege der Vegetation zu ermöglichen. Hierfür können die PV-Paneele zum Beispiel mit einem Kippmechanismus ausgestattet sein, damit die PV-Module zu Wartungszwecken bewegt werden können. Weitere Aspekte, die berücksichtigt werden sollten, sind die benötigte Wandstärke (Platzbedarf), die Investitions- und Wartungskosten sowie die Vermeidung einer Verschattung der Solarmodule durch den Pflanzenwuchs. Die überlagerte Kombination der beiden Systeme im Fassadenbereich ist derzeit noch wenig erforscht.

In dieser Studie liegt der Fokus auf der Aufteilung der Gebäudefassade in begrünzte und PV-Flächen. Eine Kombination von Begrünung und PV «übereinander» wird nicht detailliert betrachtet.

Abbildung 28 zeigt zwei Beispiele einer möglichen Kombination von Begrünung und PV an der Fassade. Beim GrünAktivHaus in Großschönau sind die Systeme nebeneinander an der Fassade angeordnet (links), beim Öko-Prüfstand der TU Wien werden übereinander liegende Systeme untersucht (rechts). In diesem Versuchsaufbau konnte eine Reduktion der Betriebstemperatur der PV-Module durch die dahinterliegende Begrünung um ca. 1 °C bis 4 °C festgestellt werden (Durchschnittswerte: 1 °C bis 2 °C, Höchstwerte: 2 °C bis 4 °C). Der Temperaturunterschied nimmt dabei bei Aussentemperaturen über 20 °C zu. D.h. je höher die Aussentemperatur desto grösser die Vorteile der Grünfassade. Der Einfluss auf die PV-Leistung im Betrieb der Anlage wurde im Rahmen der Untersuchungen jedoch nicht betrachtet (44).

---

<sup>18</sup> Wie bspw. bei Megasol Swiss Premium M340-60-b GG3 oder Panasonic SunPower MAXEON 3.



Abbildung 28: GrünAktivHaus in Großschönau, Österreich: Fassade mit horizontaler Kombination von wandgebundenen Begrünungsmodulen und PV-Modulen (links, Quelle: Uli Pitha) und "Öko-Prüfstand", TU Wien, Österreich: Kombination von Begrünung und PV «übereinander» (rechts, Quelle: María Soledad Penaranda Moren).

### 3 Vorgehensweise

Das Projekt teilt sich in folgende Arbeitspakete (AP) auf:

#### **AP 1: Projektinitialisierung**

Die erste Projektphase beinhaltete das Konsolidieren von bestehendem Knowhow und die Aktivierung von Kontakten innerhalb und ausserhalb der Hochschule Luzern. Die HSLU verfügt über vertieftes Wissen zum Einfluss des Klimawandels auf den Gebäudepark Schweiz (3), (11), zur Entwicklung von PV-Elementen<sup>19</sup> und zur adaptiven Fassadengestaltung. In verschiedenen interdisziplinären Projekten wurde der Effekt von Begrünungen auf das Stadtklima untersucht (aufgeführt in Kapitel 1.3). Das interne Wissen wurde durch den Einbezug von externen Partnern aus Forschung und Praxis sowie durch eine Literaturrecherche zum aktuellen inländischen und europäischen Forschungsstand ergänzt. Die Projektinitialisierung (AP 1) diente dazu den Entwicklungsstand (State of the Art) zu definieren. Dies diente als Basis für das Arbeitspaket 2, welches sich in drei parallel laufende Teile gliedert.

#### **AP 2a: Analyse- / Simulationsteil**

Definition von Bewertungskriterien für den Analyse- und Simulationsteil, welche mit den Begleitgruppenmitgliedern gemeinsam diskutiert und bestimmt wurden. Anschliessend wurde der Einfluss verschiedener begrünter und PV-Fassaden auf die zuvor definierten Bewertungskriterien untersucht. Bei der Bewertung der Photovoltaik wurden auch absehbare Entwicklungsschritte berücksichtigt.

#### **AP 2b: Wissensaustausch und -aufbau**

Im Rahmen von drei Workshops wurden mit einem breit aufgestellten Team aus den ermittelten themenrelevanten Prozessbeteiligten die wesentlichen Elemente, Systemgrenzen, Zielkonflikte und Synergien der optimierten Fassadengestaltung definiert und diskutiert. An den Meetings nahmen Landschaftsarchitekten und Architektinnen, Städteplaner und Städtevertreterinnen, Fassadenplaner, Vertretungen aus der PV-Branche, Fachleute zur Fassadenbegrünung, Experten im Bereich

---

<sup>19</sup> Gebäudeintegrierte Photovoltaik Farbige Photovoltaikmodule. Hochschule Luzern, 2023: <https://www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/ueber-uns/organisation/kompetenzzentren-und-forschungsgruppen/bau/kompetenzzentrum-gebaeudehuelle-und-ingenieurbau/gebaeudehuelle/gebaeudeintegrierte-photovoltaik/>



Brandschutz, Investoren u.v.m. teil. Der Fokus lag dabei auf dem Zusammenführen der gegensätzlichen Interessen, dem Erfahrungsaustausch sowie dem Lernen aus bisherigen Fehlern.

### **AP 2c: Messstand mit Fassadenprototypen am Campus Horw**

Ergänzt wurden die Betrachtung durch Messungen an realen Fassadenprototypen. Dazu wurden unterschiedliche Fassadensysteme (bodengebundene und wandgebundene Begrünung sowie opake und transparente PV-Module) installiert und ihr Einfluss auf die Temperaturen an der Fassade untersucht. Der Messstand wurde am Campus der Hochschule Luzern in Horw errichtet (Kapitel 5.3).

### **AP 3a: Konsolidierung**

In der Konsolidierungsphase wurden die Erkenntnisse aus den Simulationen, den Messungen und den Workshops im interdisziplinären Team aufgearbeitet und von den Projektpartnern/innen validiert.

### **AP 3b: Dokumentation und Projektabschluss / Dissemination**

Die konsolidierten Ergebnisse münden im Schlussbericht. Dabei konnten konkrete Handlungsempfehlungen für mögliche Ansätze zur Fassadengestaltung abgeleitet und Anreize für die vermehrte Anwendung von PV und Begrünungen im Fassadenbereich geschaffen werden. Zudem wurde eine Broschüre mit den wichtigsten Erkenntnissen der Studie erstellt. Mit Publikationen und Vorträgen an Fachveranstaltungen wurde das aufbereitete Wissen in die Bau- und Immobilienbranche transferiert. Das Projekt «GreenPV» wurde u.a. beim EnergieTreff in St. Gallen, an der Fachtagung Hitzeminderung in Zürich, dem vom Energie-Cluster organisierten Kurs zu PV-Fassaden an der HSLU T&A sowie am Fortbildungskurs von Swiss Wood Innovation Network S-WIN zum Thema «Die Leistungen der Gebäudehülle für Stadt und Raum» in Weinfelden vorgestellt. Dadurch wurde bereits während der Bearbeitungsphase des Projekts zur frühen Sensibilisierung zum Thema beigetragen, welches immer auf grosses Interesse gestossen ist. Auch nach Projektabschluss werden die Ergebnisse noch weiterverbreitet.

## **4 Systemgrenzen und Annahmen**

Die Quantifizierung der Auswirkungen der Begrünung auf das Aussen- und Innenklima sowie der Stromerzeugung von Photovoltaikanlagen hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, wie z. B. dem Standort, der Geometrie des Gebäudes und der Umgebung sowie der Bauweise des Gebäudes und den Eigenschaften der analysierten Systeme.

Nachfolgend wurden die Systemgrenzen definiert, welche die Grundlage für die Quantifizierung der in diesem Projekt zu analysierenden Indikatoren bilden.

### **4.1 Klimadaten, Szenarien und relevante Jahre**

Im Rahmen des Projekts «Klimadaten der Zukunft für Planende: Klimawandel und Merkblatt SIA 2028» (15) wurden Klimadatensätze für künftige Szenarien von 40 Umlandstandorten und 4 Städten (Berücksichtigung des städtischen Wärmeinseleffekts) erarbeitet. Diese werden auch in dieser Studie verwendet. Die Betrachtungen wurden mit Blick auf ein künftiges Klimaszenario durchgeführt. Der Einfluss des Klimawandels auf den Gebäudepark Schweiz (Vergleich von heutigen und künftigen Szenarien) wurden bereits in anderen Studien umfangreich untersucht (3) und (11). Als Referenz in dieser Studie wurden die **Periode 2060** und das **Szenario RCP 8.5** verwendet, was einem extremen Treibhausgasszenario entspricht (Abbildung 29). Dadurch kann die Bedeutung und das Potential von Begrünungsmassnahmen und PV-Systemen verdeutlicht werden. Weitere Informationen zu den Klimaszenarien sind in den «Anwendungsempfehlung zu den stündlichen Klimadatensätzen für die Zukunft in Ergänzung zu SIA 2028» (45) zu finden.

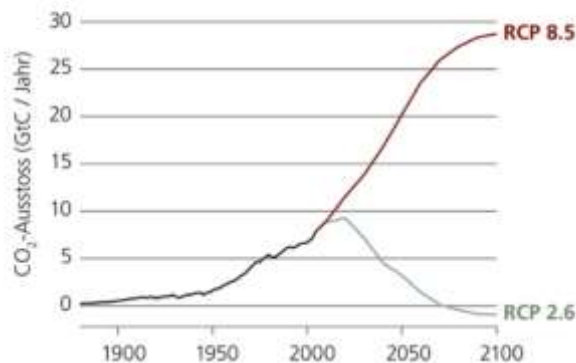


### Emissionsszenarien

Weltweiter netto CO<sub>2</sub>-Ausstoss aus fossilen und industriellen Quellen

(Quelle: Angepasst von IPCC 2013/WGI/Box 1.1/Figure 3b)

- Kein Klimaschutz
- Konsequenter Klimaschutz



**Kein Klimaschutz (RCP8.5):** Klimaschutzmassnahmen werden nicht ergriffen. Trotz des technischen Fortschritts nehmen daher die klimawirksamen Emissionen stetig zu – und mit ihnen die Erwärmung.

**Konsequenter Klimaschutz (RCP2.6):** Mit einer umgehend eingeleiteten Senkung der Emissionen auf praktisch Null wird der Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre bis etwa in 20 Jahren gestoppt. Damit lassen sich die Ziele des Pariser Klimaabkommens von 2015 wahrscheinlich erreichen und die globale Erwärmung auf zwei Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Zustand begrenzen.

Abbildung 29: Berücksichtigung der möglichen Entwicklungen der zukünftigen Treibhausgasemissionen, dargestellt sind die Emissionsszenarien PCP 8.5 und RCP 2.6 (Quelle: (6)).

## 4.2 Standort

Für die Betrachtung wurde ein städtischer Raum gewählt, da dieser Kontext vom Klimawandel künftig besonders stark betroffen sein wird (3). Als Referenzstandort dient die **Stadt Zürich** (Station Zürich Kaserne). Der Standort ist für das Schweizer Mittelland repräsentativ. Die in den Simulationen verwendeten Klimadaten berücksichtigen den **städtischen Wärmeinseleffekt**.

## 4.3 Quartier

Es wurde ein fiktives Quartier in einem städtischen Kontext betrachtet (Abbildung 30, links), wobei die Nachbargebäude mit der gleichen Grösse wie die beiden Altbauten (Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau») angenommen wurden (Abbildung 30, oben rechts). Der Abstand zwischen den Gebäuden beträgt ca. 11.6 m und entspricht der Gebäudehöhe der Altbauten (Lichteinfallswinkel zu gegenüberliegenden Baulinien von 45 °). Zudem wurde ein zweites Referenzgebäude «Neubau» untersucht. Die Umgebungssituation wurde dabei beibehalten, d.h. der Abstand und die Höhe der Nachbarbebauungen bleibt gleich. Die Höhe des Referenzgebäudes «Neubau» beträgt ca. 23.2 m und ist somit doppelt so hoch wie die umliegenden Gebäude (Abbildung 30, unten rechts). Abbildung 31 zeigt die Simulationsmodell der drei Referenzgebäude, wobei dieses für den «Altbau» und den «sanieren Altbau» gleich ist (gleiche Geometrie, gleicher Kontext).



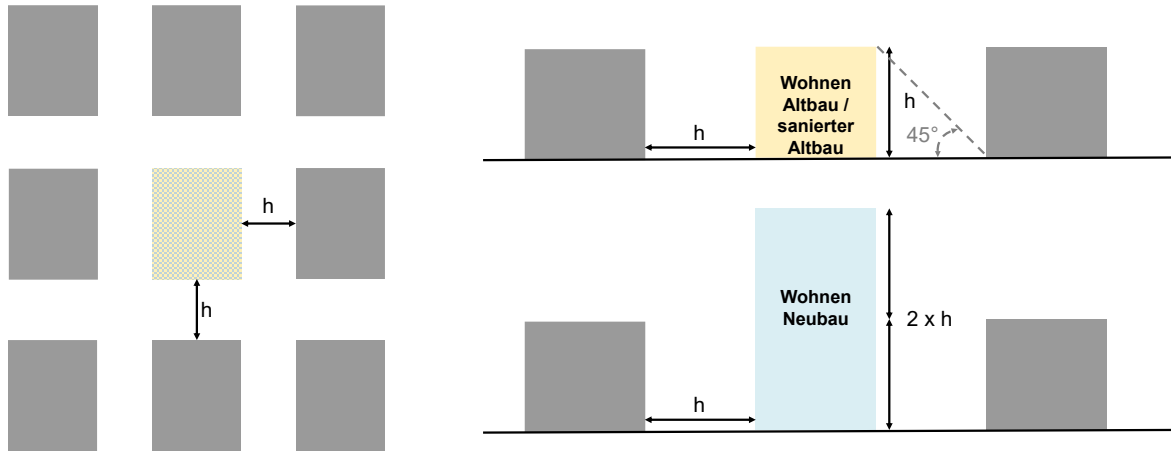


Abbildung 30: Grundrissplan mit den umliegenden Gebäuden (links), Umgebungssituation Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau» (oben rechts) sowie «Neubau» (unten rechts). Die grau gestrichelte Linie markiert den Lichteinfallswinkel von 45° in der Umgebungssituation der Altbauten.

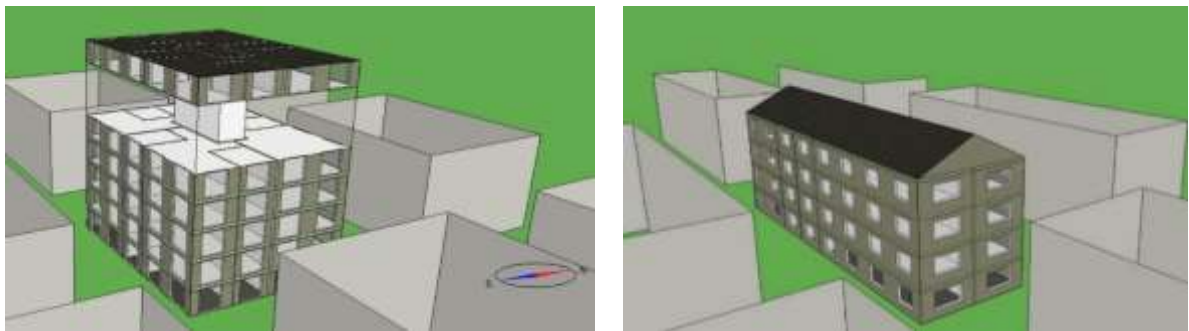


Abbildung 31: Simulationsmodelle der Referenzgebäude im städtischen Kontext, links: Referenzgebäude «Neubau», rechts: Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau» (gleiche Geometrie, gleicher Kontext).

Abbildung 32 zeigt mögliche Parameter, welche bei den Überlegungen zum Standort und der Umgebung in Betracht gezogen wurden. Die für die vorliegende Studie getroffenen Annahmen wurden farbig markiert: «grau» gilt für alle Referenzgebäude, «blau» nur für den «Neubau» und «gelb» für die Altbauten.

Standort		
<b>Kontext</b> Stadt Agglomeration Land	<b>Klima</b> Zürich (inkl. Hitzeinseleffekt) Basel Bern Lausanne Lugano	<b>Umgebung</b> Mit Nachbarbebauungen (Breite Strasse = 1/2 Gebäudehöhe, Höhe der Nachbargebäude = 1/2 Gebäudehöhe) Mit Nachbarbebauungen (Breite Strasse = 1/2 Gebäudehöhe) Mit Nachbarbebauungen (45° Regel) Ohne Nachbarbebauungen

Abbildung 32: Übersicht verschiedener Standort- und Umgebungsparameter. Die Parameter des Referenzgebäudes «Neubau» sind «blau» markiert, die für die beiden Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau» sind «gelb» markiert. «Grau» markierte Angaben wurden bei allen Referenzgebäuden berücksichtigt.



## 4.4 Gebäude

In dieser Studie wurden drei fiktive Wohngebäude betrachtet, ein «Neubau», ein «Altbau» und ein «sanierter Altbau». Der Kontext wurde bei allen Referenzgebäuden als gleich angenommen (Kapitel 4.3). Für die Referenzgebäude wurden typische Kennwerte für die thermischen Eigenschaften, den Fensteranteil sowie die Volumetrie gewählt, die charakteristisch für einen Neubau, einen Altbau bzw. einen sanierten Altbau sind. Bei den Referenzgebäuden wurde angenommen, dass die verglaste Fläche an allen Fassaden gleich ist, um in allen Orientierungen die gleiche Ausgangslage zu schaffen. Die getroffenen Annahmen für die opaken und transparenten Bauteile (U-Werte), des Fensteranteils, der Geschossigkeit und der Grundfläche sind für die drei Referenzgebäude in Abbildung 33 zusammengefasst und farblich gekennzeichnet. Weitere Informationen zu den getroffenen Annahmen befinden sich im Anhang 14.1.

Baukörper		
<b>Gebäudestandard</b>	<b>Fenster</b>	<b>Geschossigkeit</b>
<b>Dämmwerte Opake Bauteile (SIA 180/1)</b>	$U_g$ -Wert: 0.7 W/m <sup>2</sup> K $U_f$ -Wert: 1.3 W/m <sup>2</sup> K $U_w$ -Wert: 0.85 W/m <sup>2</sup> K g-Wert: 0.51	$\leq 4$ (4) $\leq 8$ (8)
0.17 W/m <sup>2</sup> K (Neubau) 0.25 W/m <sup>2</sup> K (sanierter Altbau) 1.40 W/m <sup>2</sup> K (Altbau)	$U_g$ -Wert: 1.0 W/m <sup>2</sup> K $U_f$ -Wert: 1.6 W/m <sup>2</sup> K $U_w$ -Wert: 1.15 W/m <sup>2</sup> K g-Wert: 0.57	
<b>Fensteranteil</b>		<b>Grundfläche</b>
25 % (18.75 % Glasanteil) 50 % (43.75 % Glasanteil)		10 x 34 m 18 x 23 m
<b>Neubau</b>	<b>Altbau / sanierter Altbau</b>	<b>sanierter Altbau</b>

Abbildung 33: Übersicht verschiedener Gebäudeparameter. Die Parameter des Referenzgebäudes «Neubau» sind «blau» markiert, die für die beiden Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau» sind «hellgelb» markiert. «Dunkelgelb» markiert ist der Dämmwert der opaken Bauteile des Referenzgebäudes «sanierter Altbau» (dies ist der einzige Parameter, der sich von dem des «Altbaus» unterscheidet).

Um die Interpretation der Ergebnisse zu vereinfachen, wurde die Volumetrie der Gebäude als Parallelepipid (Abbildung 34) angelegt. Dabei wurde eine Eigenverschattung vermieden, die durch die Balkonplatten oder eine komplexe Gebäudevolumetrie entstehen könnten.

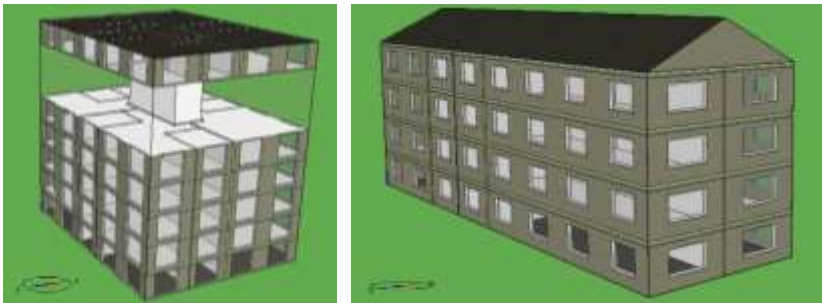


Abbildung 34: Darstellung der Simulationsmodelle der Referenzgebäude «Neubau» (links) sowie «Altbau» und «sanierter Altbau» (rechts). Im Gebäudemodell des Referenzgebäudes «Neubau» wurden das 5. und 6. OG weggelassen, da sie aufgrund der geringeren Höhe der umliegenden Gebäude die gleiche Sonneneinstrahlung erhalten wie das 4. OG und deshalb das thermische Verhalten ähnlich sein wird. Das Dachgeschoss (7. OG) wurde jedoch separat betrachtet, da dieses Geschoss eine grössere Gebäudehüllfläche hat und somit ein anderes thermisches Verhalten aufweist.



Abbildung 35 zeigt die Grundrisse für die Referenzgebäude «Neubau» (links), «Altbau» und «sanierter Altbau» (rechts). Die Grundrisse der Wohnungen sind in allen Geschossen gleich. Um den Einfluss der Orientierung auf die begrünte Fassade bzw. den Stromertrag der PV-Fassade zu untersuchen, wurde in einem ersten Schritt die in der Abbildung markierten Innenräume analysiert. Bei dem Referenzgebäude «Neubau» ermöglicht der Grundriss die Analyse aller Orientierungen in einer einzigen Simulation. Bei den Referenzgebäuden «Altbau» und «sanierter Altbau» sind zwei Simulationen erforderlich. Um alle vier Orientierungen zu betrachten, wurde die Hauptfassade des Gebäudes in Nord-Süd und in Ost-West-Ausrichtung betrachtet.

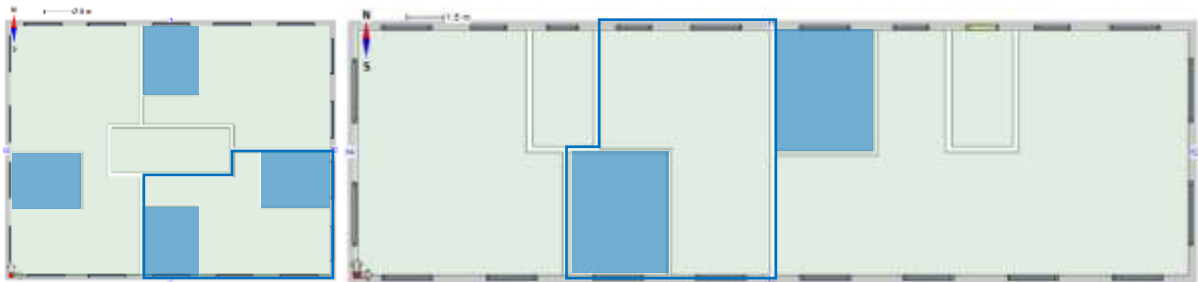


Abbildung 35: Grundrisse der Referenzgebäude «Neubau» (links) sowie «Altbau» und «sanierter Altbau» (rechts). Die blaue Kontur markiert die Wohnung und die blaue Fläche die Innenräume (in den verschiedenen Ausrichtungen), welche im Rahmen der Simulationen betrachtet wurden.

Die konstruktiven Eigenschaften der Referenzgebäude sind im Anhang 14.1.1 und 14.1.2 im Detail beschrieben. Relevante Aspekte in Bezug auf Lüftung, Nachauskühlung, interne Lasten sowie Heiz- und Kühlsystem sind im Anhang 14.1.3 bis 14.1.7 dokumentiert.

## 4.5 Fassadenbegrünungen und PV-Systeme

Die Recherchen zum *State of the Art* im Bereich Fassadenbegrünung und PV-Systeme haben gezeigt, dass eine Vielzahl an verschiedenen Systemen existieren (Kapitel 2). Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden im Diskurs mit der Begleitgruppe, den Workshopteilnehmenden sowie externen Fachexperten/innen möglichst repräsentative Systeme für die Untersuchungen im Rahmen dieser Studie bestimmt.

Betrachtet wurden jeweils zwei Fassadensysteme im Bereich Begrünung und PV sowie eine PV-Dachanlage. Bei der Betrachtung wurden unterschiedliche Orientierungen sowie Geschossigkeiten analysiert.

### a) Fassadenbegrünungen

Bei der Fassadenbegrünung wurde **ein bodengebundenes** und **ein wandgebundenes** System betrachtet.

#### **Bodengebundene Fassadenbegrünung**

Bei bodengebundenen Systemen und hohen Gebäuden ist darauf zu achten, dass die gewählten Pflanzen die entsprechende Wuchshöhe erreichen können. Während bei einer 12 m hohen Fassade - wie es bei den Referenzgebäuden «Altbau» und «sanierter Altbau» der Fall ist (Abbildung 31) - verschiedene Pflanzenarten geeignet sind, stehen beim Referenzgebäude «Neubau» mit einer Fassadenhöhe von ca. 24 m (Abbildung 31) nur noch wenige Arten zur Auswahl.



Da die meisten Pflanzenarten, die für eine bodengebundene Begrünung zur Auswahl stehen, eine Wuchshöhe zwischen 10 m und 15 m aufweisen, wurde beim «Neubau» angenommen, dass nur die Hälfte der Fassade begrünt ist.

Bei der Wahl der Pflanzen und der gewünschten Wuchshöhe sollte im Allgemeinen berücksichtigt werden, dass mit zunehmender Höhe der Begrünung auch der finanzielle und zeitliche Aufwand für die Umsetzung, Pflege- und Instandhaltung ansteigt.

Für die bodengebundene Begrünung wurde folgendes System gewählt:

Vegetationsstruktur:	mit Kletterhilfe, verzinktes Stahlgitter, Maschenweite: 20 x 20 cm, Abstand zur Fassade: 15 cm
Pflanzenart:	Efeu ( <i>Hedera helix</i> ) – immergrün
Wuchshöhe:	bis max. 20 m, in dieser Studie wurde eine Wuchshöhe von 12 m festgelegt
Dicke der Vegetationsschicht:	ca. 25 cm
Substrat:	nährstoffreiches Substrat, Substratvolumen: ca. 1 m <sup>3</sup> Boden für 10-12 m <sup>2</sup> begrünte Wand, Substrattiefe: ca. 1 m
Bewässerung:	ohne automatische Bewässerung
Unterhalt / Pflege:	Entwicklungspflege im 1. und 2. Jahr (zurückschneiden, bei Bedarf Ersatz und Nachpflanzen)  Unterhaltungspflege ab dem 3. Jahr (zurückschneiden, ev. Nachpflanzungen, Entfernung von invasiven Pflanzenarten u.a.)  Wartung Rankhilfen einmal alle 20 Jahre

Hinweis: In dieser Studie wurde als Referenz eine hinterlüftete Fassade angenommen. Die Kombination von bodengebundenen Systemen mit diesem Fassadensystem ist möglich. Beim Verlegen der Platten ist jedoch auf einen genügenden Schutz der Fugen vor dem Pflanzenwuchs zu achten (z.B. mit Kunststoffdichtungsprofilen oder Fugenversatz).

### **Wandgebundene Fassadenbegrünung**

Für die wandgebundene Begrünung wurde folgendes System gewählt:

Vegetationsstruktur:	flächige Konstruktionen (Vliessystem) vorgehängt-hinterlüftet, vollflächig
Unterkonstruktion:	Alu-Profile, abgestimmt aufs Wandbild, Dämmung etc.
Träger:	Alu-Verbundplatten
Vegetationsträger:	Vliese genäht, mit Substrat und integrierten Tropfrohren
Gewicht:	max. 30 kg/m <sup>2</sup> in voll bewachsenem und wassergesättigtem Zustand
Pflanzenart:	Mischpflanzung aus heimischen Stauden je nach Orientierung
Laubtragende Periode:	immergrün
Wuchshöhe:	unterschiedlich, von 20 cm bis 80 cm
Substrat:	mineralisch, automatische Nährstoffversorgung



Substrattiefe:	ca. 2 cm (Vliestaschen)
Bewässerung:	automatische Bewässerung mit Zeitschaltuhr, ca. 4.5 - 5 l/m <sup>2</sup> im Sommer, im Winter erfolgt die Bewässerung nur an Tagen, an denen keine Frostgefahr besteht (Entleerung der Leitungen bei Frostgefahr)
Unterhalt / Pflege:	Entwicklungspflege im 1. und 2. Jahr (zurückschneiden, bei Bedarf Ersatz und Nachpflanzen) Unterhaltungspflege ab dem 3. Jahr (zurückschneiden, ev. Nachpflanzungen, Entfernung von invasiven Pflanzenarten u.a.)

Bei der Wahl dieses Systems diente die Stadtgärtnerei Zürich als Orientierung (Abbildung 36).



Abbildung 36: Stadtgärtnerei Zürich: flächig konstruiertes Textilsystem als leichte, vorgehängte Fassade mit substratgefüllten Vliestaschen, Nährstoff- und Bewässerungssystem sind integriert, gestaltetes Vegetationsbild mit Stauden in flächiger, linearer sowie punktueller Anordnung. Textil-System und Bepflanzung von Vertiko GmbH, Kosten: 1'900 Fr./m<sup>2</sup> (Quelle: NNBS.ch, Stadtgärtnerei Zürich).

#### b) PV-Systeme im Fassadenbereich

Bei den PV-Systemen wurde ein **opakes Modul** sowie ein **transparentes Modul** betrachtet. Dabei wurden typische Systeme gewählt, die heutzutage im Fassadenbereich zur Anwendung kommen -- Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen ein paar aktuelle Praxisbeispiele. Bei der Definition der Systeme, wurde der mögliche technologische Fortschritt mitberücksichtigt.



Abbildung 37: Wohngebäudebeispiel mit opaker PV-Fassade: Wohnsiedlung in Allschwil (links) und Mehrfamilienhaus Segantinistrasse Zürich (rechts) (Quelle: Megasol Energie AG).



Abbildung 38: Parkhaus, Vallastaden, Lindköping (Schweden): Fassadenelemente mit farbigen Verkapselungen unter Verwendung einer aktiven aus Cadmium-Tellurid (CdTe)-Schicht (Quelle: Soltech Energy Sweden AB).

### **PV-Fassade mit opaken Modulen**

Ein farbiges Glas-Glas-Modul mit monokristallinen Zellen wurde untersucht. Der Wirkungsgrad der Module hängt von der eingesetzten Technologie, von der Farbe sowie der Oberflächenbeschaffenheit der Zellen ab. In dieser Studie wurde unter Berücksichtigung des zu erwartenden technologischen Fortschritts ein Wirkungsgrad von 20 % angenommen (heutzutage sind Wirkungsgrade von 16 - 17 % typisch). Diese Effizienz ist bereits heute mit schwarzen PV-Fassadenmodulen erreichbar.

Die angenommene Nennleistung ( $P_{mpp}$ ) beträgt  $200 \text{ W}_p/\text{m}^2$  unter Standardtestbedingungen (STC - englisch «*Standard Test Conditions*») bei einer Einstrahlung von  $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$  unter einer konstanten Test-Temperatur von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der Temperaturkoeffizient für  $P_{mpp}$  beträgt  $-0.370 \text{ } \%/ \text{ }^\circ\text{C}$  bei einer Nennbetriebstemperatur der Zelle (NOCT – Englisch «*Normal Operating Cell Temperature*») bei einer Einstrahlung von  $800 \text{ W}/\text{m}^2$  unter einer Temperatur von  $45 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Es wurde eine jährliche Degradation (Wirkungsgradabnahme aufgrund der Modulalterung) von 0.34 % angenommen (46). Das bedeutet, dass der Ertrag nach 30 Jahren ca. 10 % tiefer als im ersten Jahr liegt.

### **PV-Fassade mit transparenten Modulen**

Des Weiteren wurde ein transparentes Dünnschicht-Glas-Glas-Modul aus Cadmium-Tellurid (CdTe) betrachtet. Der typische Wirkungsgrad bei opaken Modulen aus CdTe beträgt heute 16 %. Wie in Kapitel 2.2.1 erklärt, kann bei transparenten PV-Modulen davon ausgegangen werden, dass der Wirkungsgrad tiefer liegt als bei opaken Modulen (abhängig von Farbe und Transparenzgrad). Für einen Transparenzgrad von 30 % sind Module mit einem Wirkungsgrad von etwa 9 % auf dem Markt zu finden. Unter Berücksichtigung der technologischen Entwicklung, sollte in Zukunft ein Wirkungsgrad von 11 % erreicht werden können.

Die angenommene Nennleistung ( $P_{mpp}$ ) beträgt  $110 \text{ W}_p/\text{m}^2$  und der Temperaturkoeffizient für  $P_{mpp}$  beträgt  $-0.220 \text{ } \%/ \text{ }^\circ\text{C}$   $\text{m}^2$  unter Standardtestbedingungen. Die Transparenz (Lichtdurchlässigkeit) der Module liegt bei 30 %. Die jährliche Degradation entspricht derjenigen der opaken Module (0.34 %).

#### c) PV-Systeme im Dachbereich

Aus Vergleichszwecken wurde bei einigen Bewertungskriterien eine PV-Dachanlage in die Betrachtung miteinbezogen. Dadurch konnte die Effizienz, insbesondere im Hinblick auf die Stromerzeugung, die Wirtschaftlichkeit und die Ökobilanz einer Dachanlage mit einer PV-Fassade



verglichen werden. Bei der Betrachtung der PV-Dachanlage wurde dabei immer auch die Referenzfassade miteinbezogen.

Bei den PV-Modulen der Dachanlage wurde ein Wirkungsgrad von 24 % – sofern nicht anders angegeben – angenommen. Die angenommene Nennleistung ( $P_{mpp}$ ) beträgt  $240 \text{ W}_p/\text{m}^2$  und der Temperaturkoeffizient für  $P_{mpp}$  beträgt  $-0.220 \text{ \%}/^\circ\text{C m}^2$  unter Standardtestbedingungen. Die jährliche Degradation entspricht 0.34 %.

Es wurde davon ausgegangen, dass das Verhältnis der gesamten Dachfläche zu der für die PV-Module ausnutzbaren Fläche 40 % bei Flachdächern (Referenzgebäude «Neubau») und 55 % bei Schrägdächern<sup>20</sup> (Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau») beträgt. Beim Schrägdach der Altbauten wurde diese Fläche gleichmässig auf den nach Süden und Norden ausgerichteten Teil des Daches verteilt.

## 4.6 Übersicht Bewertungskriterien

Begrünte und PV-Flächen an der Fassade haben Einfluss auf ganz unterschiedliche Faktoren. Diese betreffen sowohl **ökologische**, **ökonomische** als auch **soziale** Aspekte. Abbildung 39 gibt einen Überblick, welche Kriterien zur Bewertung von Fassadensystemen herangezogen werden können. Sie sind drei Kategorien zugeordnet (Mensch, Gebäude, Stadt und Umwelt) und zeigen so den entsprechenden Einflussbereich der Fassadensysteme auf. Die Zusammenstellung beinhaltet dabei sowohl **qualitative** als auch **quantitative** Faktoren.






Abbildung 39: Übersicht möglicher Bewertungskriterien. Diese wurden eingeteilt in die drei Kategorien: Mensch («gelb»), Gebäude («schwarz»), Stadt und Umwelt («grün»).

In einem ersten Workshop wurden diese Kriterien zusammen mit dem begleitenden Fachgremium besprochen. Anschliessend wurden diese gemeinsam priorisiert, um den Fokus der Studie zu definieren. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Priorisierung der Bewertungskriterien, die Relevanz für die Fassadensysteme sowie die Methodik, welche für die Beurteilung verwendet werden soll.

<sup>20</sup> In Anlehnung an die folgende Empfehlung: «Bei der Betrachtung von ausschliesslich ökonomisch geeigneten Dachflächen empfehlen wir Reduktions-Faktoren von 39 % für Flachdächer und 56 % für Schrägdächer anzuwenden» (130).



Tabelle 7: Übersicht Bewertungskriterien, Priorisierung, Zuordnung, Methodik und Verweise.

			qualitativ	quantitativ	Fassadensystem		Methodik / Verweis
					Begrünung	PV	
<b>Mensch</b> 	Wohlbefinden & Gesundheit	Thermisches Wohlbefinden im Innenraum: Temperatur und Überhitzungsstunden		X	X		Simulationen
		Tageslichtversorgung	X	X	X	X	Studie «Bereit für den Klimawandel?» (11)
		Visuelles Wohlbefinden (Biophilic Design, Bezug zur Natur...)	X		X	X	Studie "Bracing Biophilia" (47)
		Wohlbefinden olfaktorisch (Gerüche durch Pflanzen, Allergien...)	X		X		
		Psychologische Erholung	X		X		
		Steigerung der Produktivität	X		X		
<b>Gebäude</b> 	Betrieb	Wärme (Bedarf / Primärenergie)		X	X		Simulationen
		Kälte (Bedarf / Primärenergie)		X	X		Simulationen
		Strom (allg. Verbrauch, Bewässerungssysteme)		X	X		Simulationen, Literaturrecherche, Experteninterviews
		Stromerzeugungspotential (jährlich, saisonal und im Verlauf des Tages)		X		X	Simulationen
		Wasserbedarf (Bewässerung)		X	X		Literaturrecherche, Experteninterviews
	Ressourcen	Erstellung (Graue Energie, THGE, UBP)		X	X	X	Berechnung gemäss SIA Merkblatt 2032 (48)
		Unterhalt (Graue Energie, THGE, UBP)		X	X	X	
		Lebensdauer der Bauteile		X	X	X	
		Rückbaubarkeit / Zirkularität / Entsorgung		X	X	X	
	Kosten	Investitionskosten		X	X	X	Literaturrecherche, Experteninterviews
		Betriebskosten (Energie inkl. Stromerzeugung, Instandsetzung und Unterhalt)		X	X	X	Literaturrecherche, Experteninterviews, Berechnungen gemäss Norm SIA 480 (49)
		Restwerte		X	X	X	Berechnungen gemäss Norm SIA 480 (49)
		Subventionen / Förderung		X	X	X	Experteninterviews
		Steigerung des Immobilienwerts		X	X	X	Literaturrecherche (50)
	<b>Stadt &amp; Umwelt</b> 	Klima	Städtischer Wärmeineffekt		X	X	X
Mikroklima (Lufttemperatur am Gebäude...)				X	X	X	Simulationen
Gesundheit		Luftqualität (CO <sub>2</sub> -Reduktion, NO <sub>x</sub> -Reduktion, Feinstaubbindung...)	X	X	X		Literaturrecherche
		Lärminderung	X	X	X		Literaturrecherche
Umwelt		Biodiversität	X		X		Studie «Der Biotopflächenfaktor 2020» (51)
		Regenwasserrückhaltung		X	X		Studie «Der Biotopflächenfaktor 2020» (51)
		Versauerungspotential von Boden und Wasser		X		X	
Stadtbild		Attraktivität der Aussenräume	X		X	X	

**Legende**

Prio. 1: Detaillierte Betrachtung / Analyse erfolgt im Projekt

Prio. 2: Aussagen werden im Rahmen des Projekts gemacht

Prio. 3: Verweise auf andere wissenschaftliche Studien werden im Rahmen des Projekts geliefert





## 5 Methodik

### 5.1 Qualitative Analyse

Für die qualitative Analyse wurde eine umfangreiche Literaturrecherche anhand bestehender Grundlagen aus Studien und Berichten durchgeführt. Dabei wurden nachfolgende Aspekte vertieft untersucht:

- Lärm in Städten
- Luftqualität
- Biodiversität
- Regenwasserrückhalt
- Attraktivität der Aussenräume

Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche wurde anschliessend der Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme bewertet.

### 5.2 Quantitative Analyse

Für die quantitative Analyse wurden Gebäudesimulationen und verschiedene Berechnungen durchgeführt.

#### 5.2.1 Gebäudesimulationen

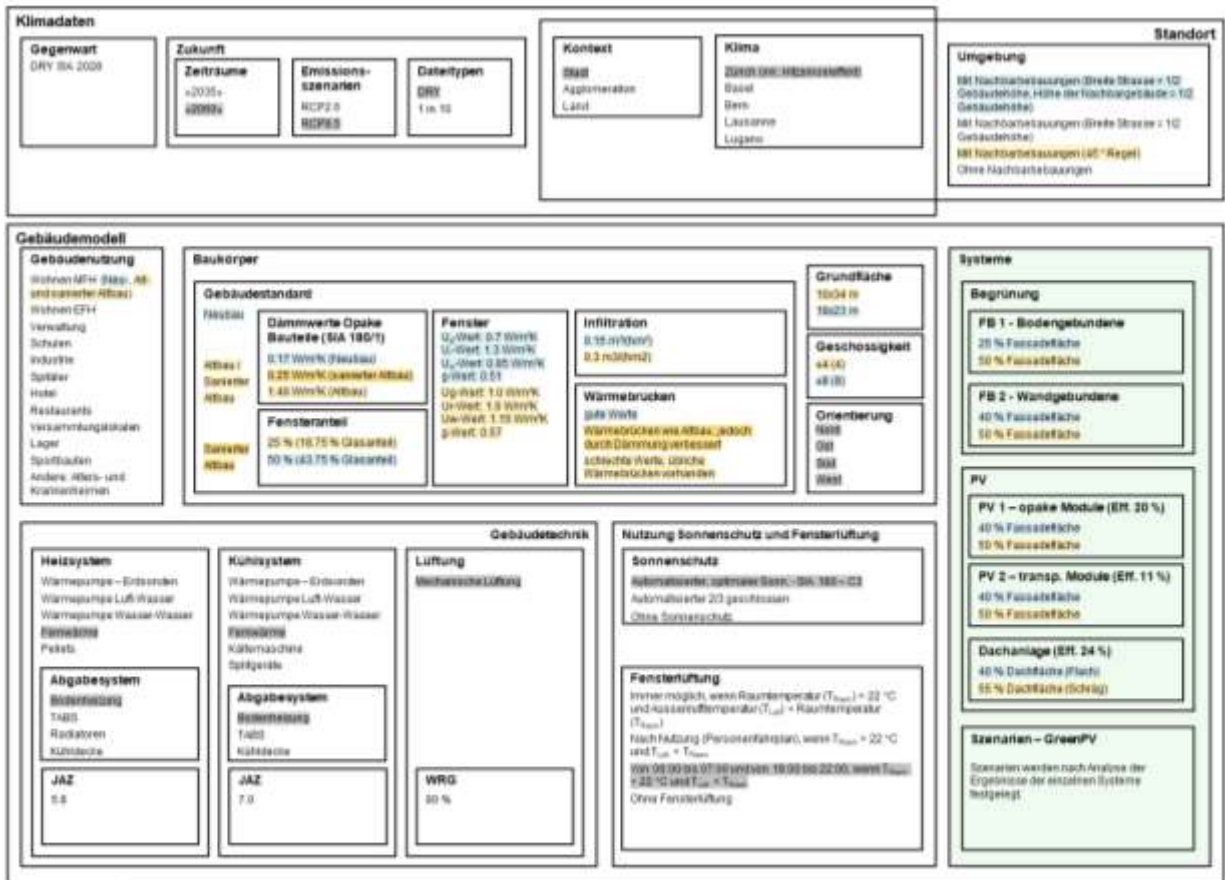
Die Evaluierung des energetischen und thermischen Potentials von Begrünungs- und PV-Systemen erfolgte primär anhand der Software **IDA ICE 4.8**<sup>21</sup>. Dieses Programm erlaubt die Quantifizierung von wesentlichen Kenngrössen der Betriebsenergie von Gebäuden auf Stufe Nutz- und Endenergie sowie der thermischen Behaglichkeit der verschiedenen Modellzonen. Zudem konnten damit Aussagen zur Stromproduktion durch die Installation von PV-Modulen an der Fassade gemacht werden. Die Stromerzeugung der PV-Fassade wurde in zwei Schritten berechnet, zunächst wurde die einfallende Sonnenstrahlung mit IDA ICE berechnet. Dies wurde sowohl unter Berücksichtigung der Beschattung durch die umliegenden Gebäude als auch ohne Beschattung durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurde mit Modelica<sup>22</sup> die Stromerzeugung pro Geschoss und Orientierung berechnet.

Abbildung 40 zeigt die verschiedenen Parameter, die das ausgewählte Gebäudemodell sowie die jeweils angewendeten Standort- und Klimadaten beschreiben. Die getroffenen Annahmen sowie die Datengrundlagen für die Simulationen sind im Anhang 14.1 im Detail erläutert.

---

<sup>21</sup> <https://www.equa.se/en/ida-ice>

<sup>22</sup> <https://modelica.org/>



Standortbedingungen  
Referenzgebäude  
Wohnen Neubau  
Wohnen Altbau / saniertes Altbau  
Wohnen saniertes Altbau

Abbildung 40: Übersicht der Simulationsparameter. Die Parameter des Referenzgebäudes «Neubau» sind «blau» markiert, die der Referenzgebäude «Altbau» und «saniertes Altbau» sind «gelb» markiert («dunkelgelb» markiert sind spezifische Annahmen für den «sanierten Altbau»). «Grau» markiert sind die Parameter, die für alle Referenzgebäude berücksichtigt werden.

Die folgenden Bewertungskriterien wurden mit Hilfe der Simulationen berechnet:

- thermisches Wohlbefinden im Innenraum: Temperatur und Überheizungsstunden
- Betrieb des Gebäudes: Wärme-, Kälte- und Stromverbrauch
- Stromproduktion der PV-Fassade, Solarpotential und saisonale Betrachtung

Bei den verschiedenen Kriterien wurden immer nur die jeweils relevanten Fassadensysteme (PV oder Begrünung) betrachtet.



## Thermisches Wohlbefinden im Innenraum: Temperatur und Überhitzungsstunden

Der Einfluss der Fassadenbegrünungen auf das thermische Wohlbefinden im Innenraum (Temperatur und Überhitzungsstunden) wurde anhand eines einzelnen Raums (Kapitel 4.4, Abbildung 35) betrachtet. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Rahmenbedingungen (Lage des Raums im Gebäude, Eigenschaften des Raums [Grundriss, Volumen, etc.] sowie das Verhältnis zu den umliegenden Gebäuden, etc.) gleichbleiben und lediglich die Wirkung der Fassadensysteme in den verschiedenen Orientierungen analysiert werden konnte.

Die **Überhitzungsstunden** sind in diesem Bericht definiert als die Stunden, an denen die Temperatur höher als die zulässige Temperatur nach **SIA 180:2014** «Wärmschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden» (52) liegt. Die Norm SIA 180 «Wärmschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden» (52) verfolgt den Zweck, ein behagliches Wohnraumklima sicherzustellen sowie Bauschäden zu vermeiden. Für die thermische Behaglichkeit des Menschen wird die empfundene Temperatur (auch als operative Temperatur bezeichnet) betrachtet. Unter diesem Begriff wird die Lufttemperatur am betrachteten Ort im Raum und die Strahlungstemperatur der Umgebungflächen berücksichtigt. «In geschlossenen Räumen mit kleiner Luftgeschwindigkeit ( $\leq 0,2$  m/s) wird die empfundene Temperatur dem arithmetischen Mittel zwischen der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur gleichgesetzt» (52). Die empfundene Temperatur in den Räumen sollte innerhalb des in Abbildung 41 definierten Bereichs liegen, um als «behaglich» empfunden zu werden. Die Norm legt unterschiedliche Anforderungen an Räume fest, je nachdem ob die technischen Installationen in Betrieb sind (Anforderungen an Räume, während diese beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet sind) oder wenn keine Installationen vorhanden sind bzw. diese ausgeschaltet sind (Anforderungen an Räume mit natürlicher Lüftung, während diese weder beheizt noch gekühlt sind).



Abbildung 41: Zulässiger Bereich der empfundenen Temperatur in Räumen mit natürlicher oder mechanischer Lüftung, während diese beheizt oder maschinell gekühlt sind (Bereich zwischen der blauen und der violetten Linie) oder in Räumen ohne maschinelle Kühlanlage (Bereich zwischen der blauen und rot gestrichelten Linie), in Abhängigkeit des Mittelwerts der Aussentemperatur (angelehnt an die SIA 180:2014 (52)).

Dabei wird angenommen, dass höhere Raumtemperaturen in natürlich belüfteten Räumen (passive Kühlung, rot gestrichelte Linie in Abbildung 41) von den Nutzenden eher akzeptiert werden. Daher liegt der Grenzwert höher als bei klimatisierten Räumen (violette Linie in Abbildung 41), wo der obere Schwellenwert 26,5 °C beträgt, wenn der gleitende Mittelwert der Aussentemperatur während 48 Stunden höher als 17,5 °C liegt. Im Rahmen dieses Projekts wird die Überschreitung beider Linien



ermittelt. Ist im Bericht nichts Spezifisches vermerkt, wurde – der Einfachheit halber und um einen besseren Vergleich ermöglichen zu können – jeweils der untere Grenzwert zur Bewertung herangezogen<sup>23</sup>.

### **Betrieb des Gebäudes: Wärme, Kälte und Stromverbrauch**

Unter **Heizwärmebedarf** versteht man die Wärme, die dem beheizten Raum während der Berechnungsperiode zugeführt werden muss, um den unteren Sollwert der Raumtemperatur einzuhalten (53). Unter **Klimakältebedarf** versteht man die Wärme, die dem gekühlten Raum während der Berechnungsperiode entzogen werden muss, um den oberen Sollwert der Raumtemperatur einzuhalten (ohne Entfeuchtung) (53).

Bei der Analyse des Einflusses der **Fassadenbegrünungen** auf den Energiebedarf der Referenzgebäude (**Betriebsphase: Wärme- und Kältebedarf**) wurden die Simulationen auf **Gebäudeebene** durchgeführt. Die **Berechnungen** des jährlichen Heizwärme- und Klimakältebedarfs basieren auf den in der Norm SIA 382/2:2011 «Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf» (53) festgelegten Anforderungen. Die Auslegung des Heizwärme- und Klimakälteleistungsbedarfs erfolgt dynamisch mit stündlichen Zeitschritten, wobei der absolut höchste Leistungswert betrachtet wurde. Diese Berechnung weicht von der Norm SIA 382/2:2011 «Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf» (53) insofern ab, dass die Klimadaten der Norm für die Auslegungsperiode im Winter bzw. im Sommer nicht verwendet werden, sondern die im Rahmen dieses Projekts verwendeten jährlichen Klimadaten. Darüber hinaus werden bei der Berechnung des Heizwärmeleistungsbedarfs sowohl interne als auch solare Wärmeerträge mitberücksichtigt. Die Eigenschaften der simulierten Heiz- und Kühlsysteme werden in Kapitel 14.1.7 definiert.

### **Stromproduktion der PV-Fassade, Solarpotential und saisonale Betrachtung**

Das **Stromerzeugungspotential über die PV-Fassaden** wurde **pro Geschoss** analysiert. Die Fassade wurde dazu in kleinere rechteckige Bereiche unterteilt, die durch die Geschosshöhe und die Fenster begrenzt sind (Abbildung 42). Die Ergebnisse wurden anschliessend vereinfacht mit Durchschnittswerten pro Geschoss und Ausrichtung der Fassade angegeben. Die Gesamtstromerzeugung der PV-Anlagen wird unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads der Anlagen gemäss dem Kapitel 5.2.1 analysiert. Mit Hilfe dieser Ergebnisse wird anschliessend festgelegt, welche Fassadenteile beider Referenzgebäude sich am besten für die Stromerzeugung eignen, wobei zwischen Winter- und Sommerproduktion unterschieden wurde.

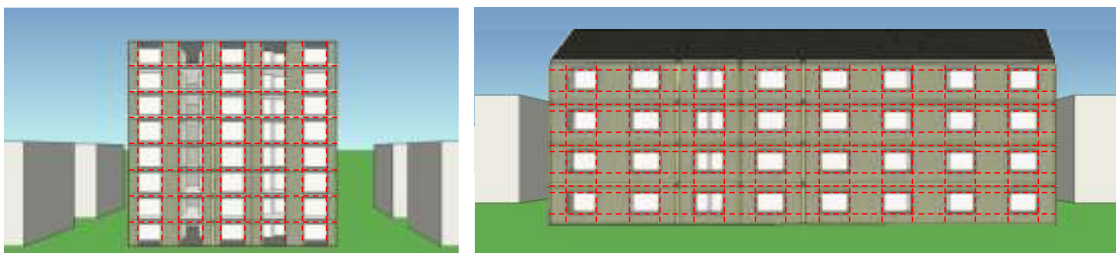


Abbildung 42: Unterteilung der Südfassade in kleineren Zonen (rote Linien) in denen das Stromerzeugungspotenzial der Fassade analysiert wurde, links: Referenzgebäude «Neubau», rechts: Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau».

Das im Kapitel 1.3.3 erwähnte und parallel zu «GreenPV» laufende Projekt «IVECT – Auswirkungen der Begrünung auf die Energiebilanz und den thermischen Komfort von Gebäuden und Quartieren»

---

<sup>23</sup> Die Anzahl der angegebenen Überhitzungsstunden im Bericht ist nicht direkt vergleichbar mit den kalkulierten Werten nach SIA 180:2014 (52), da die Bedingungen für die Lüftung- und Verschattungssysteme teilweise nicht der Norm entsprechen.



(54), welches ebenfalls im Rahmen des BFE-Forschungsprogramms «Gebäude und Städte» gefördert wurde, analysiert das **Energieeinsparungspotential begrünter Gebäudehüllen** in Gebäuden mit Hilfe der Gebäudesimulationssoftware «bsol».

Das Projektteam von IVECT hat den Fokus auf die Quantifizierung der Verdunstungsleistung von Begrünungen gelegt und diese in Simulationen mittels Penman-Monteith berechnet. Die Verdunstungsleistung berücksichtigt dabei die Temperaturminderung im Bereich der Blätter sowie über das Substrat. Dieser Einfluss auf die Aussentemperatur wird in «bsol» berücksichtigt, indem es die begrünte Fläche nicht mit der vorgegebenen Aussentemperatur in Kontakt bringt, sondern mit dem neuen Temperaturprofil. Der Verschattungsfaktor der Fenster wird zudem saisonal (mit Berücksichtigung des Blätterverlusts usw.) und in Abhängigkeit der Pflanzenart verändert. So wird das Verschattungspotential möglichst realitätsnah abgebildet. Bei fassadengebundenen Begrünungen werden dabei gegebenenfalls auch der Oberflächenwiderstand, die Speicherkapazität und die U-Werte der Fassade angepasst.

Die «IVECT» Methode berücksichtigt die Auswirkungen der Vegetation bei der Energiesimulation von Gebäuden genauer als in der vorliegenden «GreenPV» Studie. Die «IVECT» Ergebnisse können ergänzend zur Verfeinerung der in dieser Studie erzielten Simulationsergebnisse verwendet werden.

Darüber hinaus wurde im «IVECT» Projekt ebenso das Simulationstool «CitySim» verwendet, um die Integration der Aspekte der Begrünung auch auf Arealebene zu betrachten. Dabei wurden die folgenden Änderungen vorgenommen:

- Anpassung des Bestrahlungsmodells, um die Änderung der Albedo der Vegetationsoberfläche zu berücksichtigen
- Anpassung der thermischen Trägheit des Gebäudes
- Integration der Verdunstungsleistung in das Modell, um die Auswirkungen auf eine Wärmeinsel besser abschätzen zu können

Damit war es möglich dem Einfluss von Begrünungsmassnahmen auf die Jahresenergiebilanz eines Areals, das Energieeinsparungspotential sowie den Wärmeinseleffekt zu quantifizieren.

### 5.2.2 Berechnung Ökobilanz (LCA)

Die Ökobilanzierung erfolgte gemäss Merkblatt SIA 2032 «Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden» (48). Die Berechnungen wurden anhand der KBOB-Liste «Ökobilanzdaten im Baubereich» (55) durchgeführt und beinhalten die nicht erneuerbare Primärenergie (PEne), die Treibhausgasemissionen (THGE) und Umweltbelastungspunkte (UBP). Gegebenenfalls sind die KBOB-Daten mit solchen aus Umweltproduktdeklarationen (56) sowie andere Quellen (57) und (58) zu ergänzen. Diese haben den Nachteil, dass sie keine Informationen über die Umweltbelastungspunkte enthalten.

Das Merkblatt SIA 2032 (48) setzt auf die Indikatoren «nicht erneuerbare Primärenergie» und «Treibhausgasemissionen» unter Hinweis darauf, dass letztere wegen des Klimawandels eine zentrale umweltrelevante Grösse spielen.

In einem ersten Schritt wurde die Ökobilanzierung für alle Fassadensysteme sowie der PV-Dachanlage durchgeführt. Die Systeme haben unterschiedliche Lebensdauern, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erhalten, wurden die Umweltauswirkungen pro Jahr berücksichtigt. D.h. die Umweltauswirkungen der Bauteile wurden durch die jeweilige Lebensdauer dividiert. Ebenso wurden die mit dem Unterhalt der Fassade verbundenen Umweltauswirkungen (Reinigung / Bewässerung der Systeme) in der Berechnung berücksichtigt.

Bei der Betrachtung wurden die Umweltauswirkungen der Tragschicht, der Unterkonstruktion und der Dämmung der Fassade nicht berücksichtigt, da diese für alle Systeme gleich sind. Eine Ausnahme stellt hier die wandgebundene Begrünung dar, da eine etwas stärkere Unterkonstruktion als die der



Referenzfassade für dieses System notwendig ist. Diese zusätzliche Umweltauswirkung wurde in die Berechnungen miteinbezogen.

In einem zweiten Schritt wurde die Betriebsphase der Referenzgebäude – dies umfasst den Energieverbrauch für Heizung, Kühlung, Warmwasserbereitung, mechanische Lüftung, Geräte und Beleuchtung – mitberücksichtigt. In dieser Betrachtung ist vor allem die Stromproduktion über die PV-Anlagen von Bedeutung. Durch den Stromertrag reduziert sich einerseits der Verbrauch von Netzstrom, andererseits wirkt sich der ins Netz eingespeiste Strom positiv auf die Bilanz aus (die Umweltbelastung wird von der Gesamtbelastung des Gebäudes abgezogen).

In den Berechnungen werden die Ökobilanzdaten des CH-Verbrauchermix für Strom gemäss KBOB-Liste (55) berücksichtigt.

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse der Ökobilanzierung für die Referenzfassade, die Fassadensysteme sowie die PV-Dachanlage inkl. Referenzfassade für den «Neubau». Tabelle 9 die Ergebnisse für den «Altbau» / «sanierten Altbau».

Tabelle 8: Ökobilanzierung für die Referenzfassade, die verschiedenen Fassadensysteme sowie für die PV-Dachanlage (Flachdach). Die Werte zeigen die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau» und sind pro Quadratmeter (begrünte / PV-) Fassade bzw. PV-Dachfläche angegeben.

		Treibhausgas-emissionen (THGE)		Primärenergie nicht erneuerbar (PEne)		Gesamt-umweltbelastung (UBP)	
		kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> Jahr)	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> Jahr)	UBP/m <sup>2</sup>	UBP/(m <sup>2</sup> Jahr)
Referenzfassade – Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten	Erstellung (inkl. Entsorgung)	15.7	0.4	44.7	1.1	23'599	590
	Unterhalt	0.0	0.0	0.7	0.1	167	17
	<b>Total</b>	<b>15.7</b>	<b>0.4</b>	<b>45.4</b>	<b>1.2</b>	<b>23'766</b>	<b>607</b>
Bodengebundene Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hederia helix)	Erstellung (inkl. Entsorgung)	27	0.6	85	1.8	26'988	646
	Unterhalt	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
	<b>Total</b>	<b>27.2</b>	<b>0.6</b>	<b>84.7</b>	<b>1.8</b>	<b>26'988</b>	<b>646</b>
Wandgebundene Begrünung (Living Wall – Vliessystem)	Erstellung (inkl. Entsorgung)	61.0	1.9	270.4	8.3	95'356	2'700
	Erstellung Bewässerung (inkl. Entsorgung)	0.5	0.0	2.1	0.1	804	27
	Total Erstellung	61.5	1.9	272.6	8.4	96'160	2'727
	Unterhalt	0.5	0.5	3.5	3.5	112	0
	<b>Total</b>	<b>62.0</b>	<b>2.4</b>	<b>276.1</b>	<b>11.9</b>	<b>96'272</b>	<b>2'727</b>
PV-Fassade (opake Module)	Erstellung (inkl. Entsorgung)	223	7.5	808	27.1	529'325	17'742
	Unterhalt	0.0	0.0	0.2	0.2	46	46
	<b>Total</b>	<b>223.2</b>	<b>7.5</b>	<b>808.7</b>	<b>27.4</b>	<b>529'371</b>	<b>17'788</b>
PV-Fassade (transparente Module)	Erstellung (inkl. Entsorgung)	177	5.9	733	24.6	516'583	17'317
	Unterhalt	0.0	0.0	0	0.2	46	46
	<b>Total</b>	<b>176.7</b>	<b>5.9</b>	<b>733.1</b>	<b>24.8</b>	<b>516'629</b>	<b>17'363</b>
PV-Dachanlage Flachdach (inkl. Referenzfassade)	Erstellung (inkl. Entsorgung)	227	7.4	797	26.2	462'488	15'220
	Unterhalt	0.0	0.0	0.3	0.3	63	63
	<b>Total</b>	<b>226.8</b>	<b>7.4</b>	<b>796.8</b>	<b>26.5</b>	<b>462'551</b>	<b>15'282</b>



Tabelle 9: Ökobilanzierung für die Referenzfassade, die verschiedenen Fassadensysteme sowie für die PV-Dachanlage (Schrägdach). Die Werte zeigen die Ergebnisse für die Referenzgebäude «Altbau» / «sanierter Altbau» und sind pro Quadratmeter (begrünte / PV-) Fassade bzw. PV-Dachfläche angegeben.

		Treibhausgas-emissionen (THGE)		Primärenergie nicht erneuerbar (PEne)		Gesamt-umweltbelastung (UBP)	
		kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> Jahr)	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> Jahr)	UBP/m <sup>2</sup>	UBP/(m <sup>2</sup> Jahr)
Referenzfassade – Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten	Erstellung (inkl. Entsorgung)	15.7	0.4	44.7	1.1	23'599	590
	Unterhalt	0.0	0.0	0.7	0.1	167	17
	<b>Total</b>	<b>15.7</b>	<b>0.4</b>	<b>45.4</b>	<b>1.2</b>	<b>23'766</b>	<b>607</b>
Bodengebundene Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hederia helix)	Erstellung (inkl. Entsorgung)	38.6	0.8	124.7	2.5	30'377	703
	Unterhalt	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
	<b>Total</b>	<b>38.6</b>	<b>0.8</b>	<b>124.7</b>	<b>2.5</b>	<b>30'377</b>	<b>703</b>
Wandgebundene Begrünung (Living Wall – Vliessystem)	Erstellung (inkl. Entsorgung)	60.6	1.9	274.6	8.5	95'356	2'700
	Erstellung Bewässerung (inkl. Entsorgung)	0.8	0.0	3.3	0.1	1'255	43
	Total Erstellung	61.5	1.9	278.0	8.6	96'611	2'743
	Unterhalt	0.5	0.5	3.5	3.5	0	0
	<b>Total</b>	<b>62.0</b>	<b>2.4</b>	<b>281.5</b>	<b>12.2</b>	<b>96'611</b>	<b>2'743</b>
PV-Fassade (opake Module)	Erstellung (inkl. Entsorgung)	223	7.5	808	27.1	529'325	17'742
	Unterhalt	0.0	0.0	0.2	0.2	46	46
	<b>Total</b>	<b>223.2</b>	<b>7.5</b>	<b>808.7</b>	<b>27.4</b>	<b>529'371</b>	<b>17'788</b>
PV-Fassade (transparente Module)	Erstellung (inkl. Entsorgung)	177	5.9	733	24.6	516'583	17'317
	Unterhalt	0.0	0.0	0	0.2	46	46
	<b>Total</b>	<b>176.7</b>	<b>5.9</b>	<b>733.1</b>	<b>24.8</b>	<b>516'629</b>	<b>17'363</b>
PV-Dachanlage Schrägdach (inkl. Referenzfassade)	Erstellung (inkl. Entsorgung)	199	6.5	699	22.9	407'511	13'387
	Unterhalt	0.0	0.0	0.3	0.0	63	6
	<b>Total</b>	<b>198.5</b>	<b>6.5</b>	<b>699.5</b>	<b>23.0</b>	<b>407'574</b>	<b>13'393</b>

Zwischen dem «Neubau» und dem «Altbau» / «sanierter Altbau» gibt es dabei ein paar Unterschiede. Bei der bodengebundenen Begrünung ist die Wuchshöhe auf die ersten 4 Geschosse begrenzt, wodurch beim «Neubau» nur die Hälfte der Fassade begrünt ist und die Umweltauswirkungen pro Quadratmeter Fassade geringer sind. Bei der wandgebundenen Begrünung gibt es Unterschiede bei den Umweltauswirkungen des Bewässerungssystems, da dies von der zu bewässernde Grünfläche abhängt. Bei der PV-Dachanlage liegt der Unterschied in der Art des Daches, der «Neubau» verfügt über ein Flachdach, der «Altbau» / «sanierter Altbau» über ein Schrägdach. Im Anhang 14.2 sind detaillierte Details zu den Berechnungen dokumentiert (Tabelle mit den einzelnen Komponenten / Bauteilen, den Materialien und Mengen, den technischen Lebensdauern etc.).

### 5.2.3 Berechnung Lebenszykluskosten (LCC)

Ziel der Wirtschaftlichkeitsrechnung war es, Kosten und Rentabilität der analysierten Fassadensysteme zu vergleichen. Die Analyse wurde anhand der dynamischen Methode der Norm SIA 480 «Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau» (49) durchgeführt. Diese Methode berücksichtigt, dass die jährlichen Ausgaben und die Einnahmen während der Betrachtungsperiode variieren können. Der Zeitwert des Geldes wurde dazu miteinbezogen (durch den Barwert, der den Wert von zukünftigen Zahlungen abzinst und auf den heutigen Wert umwandelt). Diese Methode ermöglicht Zahlungsströme mit unterschiedlichen Laufzeiten und Zinssätzen vergleichbar zu machen.

Bei der dynamischen Methode werden durch die Diskontierung (Abzinsung) mit dem Kalkulationszinssatz alle Zahlungsgrößen auf den Zeitpunkt der Investition bezogen. Das bedeutet, dass eine Rendite, die in den ersten Jahren anfällt, für einen Anleger mehr wert ist als eine Rendite, die erst später bzw. in der Zukunft erzielt wird. Der Kapitalwert bezeichnet die Summe der Barwerte aller Ausgaben und Einnahmen des Projektes über die Betrachtungsperiode.



Die Wirtschaftlichkeit der untersuchten Fassadensysteme wurde durch die Berechnung der Lebenszykluskosten über eine Betrachtungsperiode von 30 Jahren ermittelt. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt nicht nur die Investitionskosten, sondern auch die mit dem Investitionsprojekt zusammenhängenden quantifizierbaren Ausgaben und Einnahmen. Monetär nicht erfassbare Werte, wie bspw. Komfort, Ästhetik, Sicherheit oder weitere qualitative Aspekte, werden hier nicht behandelt und müssen ausserhalb der Wirtschaftlichkeitsrechnung in den Investitionsentscheid einbezogen werden.

In der Dokumentation SIA D 0199 «Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau – Leitfaden zur Anwendung der Norm SIA 480» (59) heisst es, dass die «Brauchbarkeit des Ergebnisses der Wirtschaftlichkeitsrechnung nicht in erster Linie von der Wahl der Rechenmethode abhängt, sondern oft entscheidender von der richtigen Erfassung und zweckmässigen Festlegung der für die Rechnung erforderlichen Eingabedaten und wirtschaftlichen Rechengrössen. Dies betrifft im Wesentlichen die Investitionskosten, die jährlichen Ausgaben und Einnahmen, die angenommene Nutzungsdauer von Bauten und Bauteilen sowie Zinssatz und erwartete Teuerung» (59).

Die Ausgaben und Einnahmen umfassen:

- die Investitionskosten
- die Instandsetzungskosten / die Unterhaltskosten
- den Restwert
- die Energiekosten
- die Förderung für PV und Begrünungen (kantonale Förderung und Bundesgelder<sup>24</sup>)

Die Lebenszykluskosten wurden im Vergleich zur Referenzfassade, einer hinterlüfteten Fassade mit Faserzementplatten, durchgeführt. Bei der PV-Fassade und der wandgebundenen Begrünung wurden die Kosten (Investition und Unterhalt) der Faserzementplatten abgezogen, so dass nur die zusätzlichen Kosten für diese Fassadensysteme berücksichtigt wurden. Die Faserzementplatten sind jedoch weiterhin für die bodengebundenen Begrünung erforderlich.

Die Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnung wurden annualisiert dargestellt, was die durchschnittliche jährliche Nettorendite zeigt. Die wirtschaftlichste Variante ist jene mit dem kleinsten Barwert.

#### 5.2.3.1. Eingabegrössen

Es wurde eine Betrachtungsperiode von 30 Jahren angenommen. Dieser Zeitraum wurde als guter Kompromiss zwischen dem Durchschnittswert der Nutzungsdauer der Hauptgruppe E «Äussere Wandbekleidung Gebäude» der eBKP-H (60) und den kürzeren Betrachtungszeiträumen der Investoren/innen angesehen. Dies entspricht der Lebensdauer von elektrischen Anlagen (inkl. Solarzellen) gemäss dem Merkblatt SIA 2032 «Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden» (48).

Für die Wirtschaftlichkeitsrechnungen sind Annahmen über die folgenden Eingabegrössen notwendig:

- Kalkulationszinssatz
- Preise, Preisentwicklung und Inflation

Da diese Rechnungen lange Zeiträume umfassen, sollten diese Annahmen den zu erwartenden Durchschnittswerten über die Betrachtungsperiode entsprechen. Damit handelt es sich um langfristige Durchschnittswerte, die eher unabhängig von den aktuellen, konjunkturell bedingten Werten sind.

---

<sup>24</sup> Kommunale Fördergelder wurden nicht berücksichtigt, da diese sehr unterschiedlich sein können und noch wenig verbreitet sind.





Für die Berechnungen wurde ein realer Kalkulationszinssatz von 2.5 %<sup>25</sup> sowie eine Inflation der Baukosten von 2 % und der Stromkosten von 1 % angenommen.

### 5.2.3.2. Investitions-, Instandsetzungs- und Unterhaltskosten

Die Kosten für Investitionen, Instandhaltung und Erneuerung von Fassadensystemen wurden aus Offerten, durch Gespräche mit Fachleuten sowie aus verschiedenen Quellen (61), (62), (63), (64), (65) und (66) ermittelt.

Die Instandsetzungskosten entsprechen den Investitionskosten unter Berücksichtigung der inflationsbedingten Preiserhöhung zum Zeitpunkt des Austauschs des betreffenden Bauteils. Diese Ersatzinvestitionen, die zu einem späteren Zeitpunkt anfallen, müssen ebenso auf den Bezugszeitpunkt (das Investitionsjahr oder Jahr 1) abgezinst werden. Bei den Unterhaltskosten wird die Inflation mitberücksichtigt.

Die Kosten für die Referenzfassade und die vier untersuchten Fassadentypen sind in Tabelle 10 bis Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 10: Übersicht der Investitions- und Unterhaltskosten der Referenzfassade (Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten). Kein Bauteil-Ersatz erforderlich. In blau markiert sind die Kosten für Tragschicht, Unterkonstruktion und Dämmung. Da diese für alle Fassadensysteme gleich sind, wurden diese Kosten bei den nachfolgenden Berechnungen nicht nochmal berücksichtigt. Eine Ausnahme stellt hier die wandgebundene Begrünung dar. Da die Kosten für die Unterkonstruktion etwas höher als die der Referenzfassade liegen, wurden bei diesem Fassadensystem die zusätzlichen Mehrkosten in die Berechnung einbezogen.

#### Referenzfassade – Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten

	Häufigkeit	Technische Lebensdauer	Kosten		Bemerkungen
<b>Investitionskosten</b>					
Tragschicht, Unterkonstruktion und Dämmung	einmalig	Dämmung: 20 Jahre, Tragschicht und Unterkonst.: 60 Jahre	280	CHF/m <sup>2</sup>	Die Kosten für diese Komponenten wurden nicht berücksichtigt, da sie für alle Systeme gleich sind. Obwohl die technische Lebensdauer der Dämmung 20 Jahre beträgt, ist kein Ersatz vorgesehen, da dies die Demontage der Fassadensysteme (PV-Module, Pflanzen und Faserzementplatten oder des gesamten Living Wall Systems) erfordern würde.
Faserzement-Plattenverkleidung	einmalig	40 Jahre	140	CHF/m <sup>2</sup>	Der Restwert wurde berücksichtigt.
<b>Gesamtkosten Investition</b>			<b>140</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	
<b>Instandhaltung, Wartung und Pflege</b>					
Reinigung	einmal alle 10 Jahre		0.2%	der Investitionskosten pro Jahr	
<b>Gesamtkosten Instandhaltung</b>			<b>0.28</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup> jährlich</b>	
<b>Total Gesamtkosten über 30 Jahre</b>			<b>148.4</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	

<sup>25</sup> In Übereinstimmung mit den Werten, zwischen 2.5-3 %, der Studie «Wirtschaftlichkeit von Neubau- und Erneuerungsinvestitionen» (69) sowie der angenommenen Wert (2.25 %) bei den Werkzeug «Variantenvergleich Energiesysteme» der Stadt Zürich, Amt für Hochbauten. <https://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/beratung/energie-gebauedetechnik/planungshilfen-werkzeuge.html> (129)



Tabelle 11: Übersicht der Investitions- und Unterhaltskosten der bodengebundenen Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hедера helix). Kein Bauteil-Ersatz erforderlich.

Bodengebundene Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hедера helix)					
	Häufigkeit	Technische Lebensdauer	Kosten		Bemerkungen
<b>Investitionskosten</b>					
Kletterpflanzen (2 m hohe Pflanzen)	einmalig	> 60 Jahre	200	CHF/m	Zur Umrechnung auf CHF/m <sup>2</sup> wurde eine Gebäudehöhe von 12 m angenommen: 16.7 CHF/m <sup>2</sup> . Der Restwert wurde berücksichtigt.
Montage inkl. Gitter und Befestigungselemente	einmalig	> 60 Jahre	190	CHF/m <sup>2</sup>	Der Restwert wurde berücksichtigt.
<i>Basis: Faserzementplatten</i>	<i>einmalig</i>	<i>40 Jahre</i>	<i>140</i>	<i>CHF/m<sup>2</sup></i>	<i>Die Faserzementplatten sind bei diesem Fassadensystem erforderlich. Der Restwert wurde berücksichtigt.</i>
<b>Gesamtkosten Investition</b>			<b>346.7 CHF/m<sup>2</sup></b>		
<b>Instandhaltung, Wartung und Pflege</b>					
Entwicklungspflege im 1. und 2. Jahr (zurückschneiden, Ersatz von Pflanzen)	2 x jährlich		17	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	
Unterhaltungspflege ab dem 3. Jahr (zurückschneiden, ev. Ersatz von Pflanzen, Entfernen von invasiven Pflanzenarten u.a.)	2 x jährlich, ab Jahr 3		12	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	Der Aufwand kann sich mit zunehmendem Alter erhöhen.
Wartung Rankhilfen im 21. Jahr	einmal alle 20 Jahre		5	CHF/m <sup>2</sup>	
Hebebühne	2 x jährlich		4'800	CHF jährlich	Zur Umrechnung auf CHF/m <sup>2</sup> wurde eine begrünte Fläche von 500 m <sup>2</sup> angenommen: 9.6 CHF/m <sup>2</sup> .
<b>Gesamtkosten Instandhaltung</b>			<b>22.1 CHF/m<sup>2</sup> jährlich</b>		Mittelwert unter Berücksichtigung von 2 Jahren Entwicklungspflege, 28 Jahren Unterhaltungspflege inkl. Hebebühne und einmaliger Wartung der Rankhilfen.
<b>Total Gesamtkosten über 30 Jahre</b>			<b>1'009.7 CHF/m<sup>2</sup></b>		



Tabelle 12: Übersicht der Investitions- und Unterhaltskosten der wandgebundenen Begrünung (Living Wall – Vliessystem). Das ganze Vliessystem (inkl. Pflanzen) sowie die integrierten Tropfrohre müssen nach 20 Jahren ersetzt werden. In blau markiert sind die Kosten für die Unterkonstruktion, da diese etwas höher sind als bei der Referenzfassade, werden die zusätzlichen Kosten mit einbezogen.

Wandgebundene Begrünung (Living Wall – Vliessystem)					
	Häufigkeit	Technische Lebensdauer	Kosten		Bemerkungen
<b>Investitionskosten</b>					
Unterkonstruktion	einmalig	60	150	CHF/m <sup>2</sup>	Es wurden nur die Mehrkosten im Vergleich zur Unterkonstruktion der Referenzfassade (30 CHF/m <sup>2</sup> ) berücksichtigt. Der Restwert wurde berücksichtigt.
System (ohne Unterkonstruktion und Aluminiumverbundplatte) inkl. Montage	zweimalig	20	1'000	CHF/m <sup>2</sup>	Kosten für Vlies und Pflanzen inkl. Substrat und Montage. Der Restwert wurde berücksichtigt.
Integrierte Tropfrohre für das Living-Wall-System	zweimalig	20	5.8	CHF/m <sup>2</sup>	Der Restwert wurde berücksichtigt.
Aluminiumverbundplatte	einmalig	40	100	CHF/m <sup>2</sup>	Der Restwert wurde berücksichtigt.
Bewässerungssystem	einmalig	30	12'500	CHF	Zur Umrechnung auf CHF/m <sup>2</sup> wurde eine begrünte Fläche von 500 m <sup>2</sup> angenommen: 25 CHF/m <sup>2</sup> .
<b>Gesamtkosten Investition im 1. Jahr</b>			<b>1'160.8</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	
<b>Gesamtkosten Investition im 21. Jahr</b>			<b>1'005.8</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	
<b>Instandhaltung, Wartung und Pflege</b>					
Entwicklungspflege im 1. Und 2. Jahr sowie im 21. Und 22. Jahr (zurückschneiden, Ersatz von Pflanzen)	2 x jährlich		45	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	
Unterhaltspflege im 3. Bis 20. Jahr sowie im 23. Bis 30. Jahr (zurückschneiden, ev. Ersatz von Pflanzen, Entfernen von invasiven Pflanzenarten u.a.)	2 x jährlich		30	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	Der Aufwand kann sich mit zunehmendem Alter erhöhen.
Hebebühne	2 x jährlich		4'800	CHF jährlich	Zur Umrechnung auf CHF/m <sup>2</sup> wurde eine begrünte Fläche von 500 m <sup>2</sup> angenommen: 9.6 CHF/m <sup>2</sup> .
Wasserverbrauch	jährlich		2.1	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	
Stromverbrauch	jährlich		0.07	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	
<b>Gesamtkosten Instandhaltung</b>			<b>41.60</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup> jährlich</b>	Mittelwert unter Berücksichtigung von 2 x 2 Jahren Entwicklungspflege sowie 26 Jahren Unterhaltspflege inkl. Hebebühne.
<b>Gesamtkosten Betrieb</b>			<b>2.17</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup> jährlich</b>	Wasser- und Stromkosten für das Bewässerungssystem.
<b>Total Gesamtkosten über 30 Jahre</b>			<b>3'414.6</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	



Tabelle 13: Übersicht der Investitions- und Unterhaltskosten der PV-Fassade mit opaken Modulen. In blau markiert sind die Kosten für die Unterkonstruktion. Da diese gleich hoch sind wie die der Referenzfassade, wurden keine zusätzlichen Kosten berücksichtigt.

PV-Fassade (opake Module)					
	Häufigkeit	Technische Lebensdauer	Kosten		Bemerkungen
<b>Investitionskosten</b>					
PV-Anlage (ohne Unterkonstruktion)	einmalig	30	560	CHF/m <sup>2</sup>	Kosten pro Quadratmeter für eine 100 kWp-Anlage.
Unterkonstruktion	einmalig	60	120	CHF/m <sup>2</sup>	Diese Kosten wurden nicht berücksichtigt.
<b>Gesamtkosten Investition</b>			<b>560</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	
<b>Instandhaltung, Wartung und Pflege</b>					
Reinigung	jährlich		1.0%	der Investitionskosten pro Jahr	
<b>Gesamtkosten Instandhaltung</b>			<b>5.6</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup> jährlich</b>	
<b>Total Gesamtkosten über 30 Jahre</b>			<b>728.0</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	

Tabelle 14: Übersicht der Investitions- und Unterhaltskosten der PV-Fassade mit transparenten Modulen. In blau markiert sind die Kosten für die Unterkonstruktion. Da diese gleich hoch sind wie die der Referenzfassade, wurden keine zusätzlichen Kosten berücksichtigt.

PV-Fassade (transparente Module)					
	Häufigkeit	Technische Lebensdauer	Kosten		Bemerkungen
<b>Investitionskosten</b>					
PV-Anlage (ohne Unterkonstruktion)	einmalig	30	680	CHF/m <sup>2</sup>	Kosten pro Quadratmeter für eine 100 kWp-Anlage.
Unterkonstruktion	einmalig	60	120	CHF/m <sup>2</sup>	Diese Kosten wurden nicht berücksichtigt.
<b>Gesamtkosten Investition</b>			<b>560</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	
<b>Instandhaltung, Wartung und Pflege</b>					
Reinigung	jährlich		1.0%	der Investitionskosten pro Jahr	
<b>Gesamtkosten Instandhaltung</b>			<b>6.8</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup> jährlich</b>	
<b>Total Gesamtkosten über 30 Jahre</b>			<b>884.0</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	

Aus Vergleichszwecken wurde ebenso die PV-Dachanlage bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einbezogen. Dabei wurden die Investitions- und Unterhaltskosten einer PV-Dachanlage (Tabelle 15) sowie die Investitions- und Unterhaltskosten der Referenzfassade (Tabelle 10) einbezogen. Beim Referenzgebäude «Neubau» wurde die PV-Dachanlage als «Referenzfassade + PV-Anlage Flachdach» und bei den Referenzgebäuden «Altbau» / «sanierter Altbau» als «Referenzfassade + PV-Anlage Schrägdach» bezeichnet.



Tabelle 15: Übersicht der Investitions- und Unterhaltskosten für die PV-Dachanlage.

PV-Dachanlage					
	Häufigkeit	Technische Lebensdauer	Kosten		Bemerkungen
<b>Investitionskosten</b>					
PV-Dachanlage	einmalig	30	370	CHF/m <sup>2</sup>	Kosten pro Quadratmeter für eine 35 kWp-Anlage.
<b>Gesamtkosten Investition</b>			<b>370</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	
<b>Instandhaltung, Wartung und Pflege</b>					
Reinigung	jährlich		1.0%	der Investitionskosten pro Jahr	
<b>Gesamtkosten Instandhaltung</b>			<b>3.7</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup> jährlich</b>	
<b>Total Gesamtkosten über 30 Jahre</b>			<b>481.0</b>	<b>CHF/m<sup>2</sup></b>	

Die Investitionskosten einer PV-Anlage hängen insbesondere von der Grösse der Anlage (installierte Leistung) ab. Da in dieser Studie verschiedene Szenarien analysiert wurden, in denen die Grösse der PV-Anlage variiert, wurden die Investitionskosten in Tabelle 16 in Abhängigkeit der installierten Leistung dargestellt.

Tabelle 16: Investitionskosten pro Quadratmeter PV-Fassade (opake und transparente Module) sowie der PV-Dachanlage in CHF/m<sup>2</sup> in Abhängigkeit zur installierten Leistung der Anlage.

Installierte Leistung (kW <sub>p</sub> )	Investitionskosten (CHF/m <sup>2</sup> )		
	PV-Fassade		PV-Dachanlage
	opake Module	transparente Module	
< 3	1'440	1'560	840
3-5	1'270	1'390	750
5-10	1'100	1'220	650
10-15	900	1'020	520
15-20	810	930	460
20-30	750	870	420
30-50	680	800	370
50-75	620	740	330
75-100	580	700	290
100-125	560	680	280
125-150	550	670	270
> 150	540	660	260

Die Investitions-, Instandsetzung- und Unterhaltskosten für die verschiedenen Systeme sind in den Tabelle 17 bis Tabelle 19 zusammengefasst.



Tabelle 17: Investitionskosten für die Referenzfassade, die verschiedenen Fassadensysteme sowie für die PV-Dachanlage. In blau markiert sind die Kosten für Tragschicht, Unterkonstruktion und Dämmung der Fassade. Da diese für alle Fassadensysteme gleich sind, wurden diese Kosten bei den nachfolgenden Berechnungen nicht berücksichtigt. Eine Ausnahme stellt hier die wandgebundene Begrünung dar. Da die Kosten für die Unterkonstruktion etwas höher als die der Referenzfassade liegen, wurden bei diesem Fassadensystem die zusätzlichen Mehrkosten in die Berechnung einbezogen. Bei der PV-Dachanlage wurden auch die Kosten für die Referenzfassade mitberücksichtigt, um die verschiedenen Varianten vergleichbar zu machen.

	Komponenten	Kosten		Technische Lebensdauer
Referenzfassade – Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten	Tragschicht, Unterkonstruktion und Dämmung	280.0	CHF/m <sup>2</sup>	Dämmung: 20 Jahre, Tragschicht und Unterkonstruktion: 60 Jahre
	Faserzementplatten	140.0	CHF/m <sup>2</sup>	40 Jahre
Bodengebundene Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hедера helix)	Kletterpflanzen (2 m hohe Pflanzen)	200.0	CHF/m	> 60 Jahre
	Montage inkl. Rankhilfen (Gitter) und Befestigungselementen	190.0	CHF/m <sup>2</sup>	> 60 Jahre
	Basis: Faserzementplatten	140.0	CHF/m <sup>2</sup>	40 Jahre
Wandgebundene Begrünung (Living Wall – Vliesssystem)	Zusatzkosten Unterkonstruktion	30.0	CHF/m <sup>2</sup>	60 Jahre
	System (ohne Unterkonstruktion und Aluminiumverbundplatte) inkl. Montage	1'000.0	CHF/m <sup>2</sup>	20 Jahre
	Integrierte Tropfrohre in Living Wall	5.8	CHF/m <sup>2</sup>	20 Jahre
	Aluminiumverbundplatte	100.0	CHF/m <sup>2</sup>	40 Jahre
	Bewässerungssystem	12'500.0	CHF	30 Jahre
PV-Fassade (opake Module)	PV-Anlage (ohne Unterkonstruktion)	560.0	CHF/m <sup>2</sup>	30 Jahre
PV-Fassade (transparente Module)	PV-Anlage (ohne Unterkonstruktion)	680.0	CHF/m <sup>2</sup>	30 Jahre
PV-Dachanlage	PV-Anlage	370.0	CHF/m <sup>2</sup>	30 Jahre

Tabelle 18: Instandsetzungskosten für die Referenzfassade, die verschiedenen Fassadensysteme sowie für die PV-Dachanlage inkl. der technischen Lebensdauern der Komponenten. Die grau hinterlegten Bauteile werden nach der angegebenen Lebensdauer ersetzt. Bauteile in grauer Schriftfarbe haben eine längere technische Lebensdauer als die Betrachtungsperiode. Der Restwert dieser Komponenten nach 30 Jahren wurde mitberücksichtigt.

	Komponenten	Kosten		Technische Lebensdauer
Referenzfassade – Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten	Tragschicht, Unterkonstruktion und Dämmung	280.0	CHF/m <sup>2</sup>	Dämmung: 20 Jahre, Tragschicht und Unterkonstruktion: 60 Jahre
	Faserzementplatten	140.0	CHF/m <sup>2</sup>	40 Jahre
Bodengebundene Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hедера helix)	Kletterpflanzen (2 m hohe Pflanzen)	200.0	CHF/m	> 60 Jahre
	Montage inkl. Rankhilfen (Gitter) und Befestigungselementen	190.0	CHF/m <sup>2</sup>	> 60 Jahre
	Basis: Faserzementplatten	140.0	CHF/m <sup>2</sup>	40 Jahre
Wandgebundene Begrünung (Living Wall – Vliesssystem)	Zusatzkosten Unterkonstruktion	30.0	CHF/m <sup>2</sup>	60 Jahre
	System (ohne Unterkonstruktion und Aluminiumverbundplatte) inkl. Montage	1'000.0	CHF/m <sup>2</sup>	20 Jahre
	Integrierte Tropfrohre in Living Wall	5.8	CHF/m <sup>2</sup>	20 Jahre
	Aluminiumverbundplatte	100.0	CHF/m <sup>2</sup>	40 Jahre
	Bewässerungssystem	12'500.0	CHF	30 Jahre
PV-Fassade (opake Module)	PV-Anlage (ohne Unterkonstruktion)	560.0	CHF/m <sup>2</sup>	30 Jahre
PV-Fassade (transparente Module)	PV-Anlage (ohne Unterkonstruktion)	680.0	CHF/m <sup>2</sup>	30 Jahre
PV-Dachanlage	PV-Anlage	370.0	CHF/m <sup>2</sup>	30 Jahre



Tabelle 19: Unterhaltskosten für die Referenzfassade, die verschiedenen Fassadensysteme sowie für die PV-Dachanlage.

	Komponenten	Kosten		Häufigkeit
<b>Referenzfassade – Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten</b>	Reinigung	0.2%	der Investitionskosten pro Jahr	einmal alle 10 Jahre
<b>Bodengebundene Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hederia helix)</b>	Entwicklungspflege (zurückschneiden, Ersatz von Pflanzen)	17.0	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	2 x jährlich, von Jahr 1 bis 2
	Unterhaltungspflege (zurückschneiden, ev. Ersatz von Pflanzen, Entfernen von invasiven Pflanzenarten u.a.)	12.0	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	2 x jährlich, ab Jahr 3
	Wartung Rankhilfen	5.0	CHF/m <sup>2</sup> Jahr 20	einmal alle 20 Jahre
	Hebebühne	4'800.0	CHF jährlich	2 x jährlich
	Gesamtkosten Unterhalt	22.1	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	
<b>Wandgebundene Begrünung (Living Wall – Vliessystem)</b>	Entwicklungspflege (zurückschneiden, Ersatz von Pflanzen)	45.0	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	2 x jährlich, von Jahr 1 bis 2
	Unterhaltungspflege (zurückschneiden, ev. Ersatz von Pflanzen, Entfernen von invasiven Pflanzenarten u.a.)	30.0	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	2 x jährlich, ab Jahr 3
	Hebebühne	4'800.0	CHF jährlich	2 x jährlich
	Wasserverbrauch	2.1	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	jährlich
	Stromverbrauch	0.1	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	jährlich
	Gesamtkosten Unterhalt	41.6	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	jährlich
	Gesamtkosten Betrieb	2.2	CHF/m <sup>2</sup> jährlich	jährlich
<b>PV-Fassade (opake Module)</b>	Reinigung	1.0%	der Investitionskosten pro Jahr	jährlich
<b>PV-Fassade (transparente Module)</b>	Reinigung	1.0%	der Investitionskosten pro Jahr	jährlich
<b>PV-Dachanlage</b>	Reinigung	1.0%	der Investitionskosten pro Jahr	jährlich

Ein allfälliger Steuerabzug der PV-Anlage wurde bei den Investitionskosten nicht berücksichtigt, da das steuerbare Einkommen stark variieren kann und somit auch die abzugsfähige Summe variiert. Es gibt keine Vereinheitlichung, die Besteuerung von PV-Anlagen ist nicht bundesweit einheitlich. Aktuell sind die Erstellungskosten nur bei bestehenden Gebäuden zum Abzug zugelassen (ausser im Kanton Luzern, wo es auch in diesem Fall keinen Abzug gibt).

#### 5.2.3.3. Restwert

Für die Komponenten, die nach der Betrachtungsperiode von 30 Jahren noch nicht das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, ergibt sich am Ende ein Restwert (Tabelle 20). Der Restwert wurde anhand der Restnutzungsdauer der Komponenten ermittelt, wobei eine lineare Wertminderung über die Lebensdauer angenommen wurde.



Tabelle 20: Restwert für die Referenzfassade, die verschiedenen Fassadensysteme sowie für die PV-Dachanlage. In blau markiert sind die Kosten für Tragschicht, Unterkonstruktion und Dämmung der Fassade, die nicht berücksichtigt wurden. Bauteile in grauer Schriftfarbe haben die gleiche technische Lebensdauer wie die Betrachtungsperiode von 30 Jahren, daher gibt es am Ende der Betrachtungsperiode keinen Restwert.

	Komponente	Kosten		Restnutzungsdauer nach der Betrachtungsperiode von 30 Jahre
Referenzfassade – Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten	Tragschicht, Unterkonstruktion und Dämmung	140.0	CHF/m <sup>2</sup>	30 Jahre
	Faserzementplatten	35.0	CHF/m <sup>2</sup>	10 Jahre
Bodengebundene Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu <i>hedera helix</i> )	Kletterpflanzen (2 m hoch)	100.0	CHF/m	30 Jahre
	Montage inkl. Rankhilfen (Gitter) und Befestigungselemente	95.0	CHF/m <sup>2</sup>	30 Jahre
	<i>Basis: Faserzement-Plattenverkleidung</i>	35.0	CHF/m <sup>2</sup>	10 Jahre
Wandgebundene Begrünung (Living Wall – Vliessystem)	Zusatzkosten Unterkonstruktion	15.0	CHF/m <sup>2</sup>	30 Jahre
	System (ohne Unterkonstruktion und Aluminiumverbundplatte) inkl. Montage	500.0	CHF/m <sup>2</sup>	10 Jahre
	Integrierte Tropfrohre in Living Wall	2.9	CHF/m <sup>2</sup>	10 Jahre
	Aluminiumverbundplatte	25.0	CHF/m <sup>2</sup>	10 Jahre
	Bewässerungssystem	0.0	CHF	Keine Restnutzungsdauer
PV-Fassade (opake Module)	PV-Anlage (ohne Unterkonstruktion)	0.0	CHF/m <sup>2</sup>	Keine Restnutzungsdauer
PV-Fassade (transparente Module)	PV-Anlage (ohne Unterkonstruktion)	0.0	CHF/m <sup>2</sup>	Keine Restnutzungsdauer
PV-Dachanlage	PV-Anlage	0.0	CHF/m <sup>2</sup>	Keine Restnutzungsdauer

#### 5.2.3.4. Energiekosten

Die Energiekosten des Gebäudes umfassen die Aufwände für:

- Heizung (Fernwärme oder zukünftige Wärmepumpe, JAZ: 5.8)
- Kühlung (Fernwärme oder zukünftige Wärmepumpe, JAZ: 7)
- Warmwasseraufbereitung (Fernwärme oder zukünftige Wärmepumpe, JAZ: 4.2)
- Mechanische Lüftung
- Beleuchtung
- Haushaltsgeräte
- Stromerzeugung

Bei der Berechnung wurden die Tarife des Elektrizitätswerks der Stadt Zürich (ewz) im Jahr 2023 berücksichtigt:

- Netzstrom Hochtarif (Mo.-Sa., 06–22 Uhr): 25.55 Rappen pro Kilowattstunde (Rp./kWh)<sup>26</sup>
- Netzstrom Niedertarif (übrige Zeit): 14.80 Rp./kWh<sup>26</sup>

<sup>26</sup> Stromtarife für Privatkund\*innen für das Jahr 2023. Energietarif ewz.econatur: <https://www.ewz.ch/de/private/strom/tarife/tarifuebersicht.html>





- Einspeisevergütung Hochtarif: 13.50 Rp./kWh<sup>27</sup>
- Einspeisevergütung Niedertarif: 9.45 Rp./kWh<sup>27</sup>

Die Rentabilität einer Photovoltaikanlage hängt in hohem Masse vom Strompreis ab. Insbesondere die Abnahmevergütung variiert stark und ist abhängig vom lokalen Elektrizitätswerk (EW). Bspw. beträgt die Abnahmevergütung der Energieversorgung Schams/Avers ca. 4 Rp./kWh, die der Elektrizitätsversorgung Murgenthal hingegen über 30 Rp./kWh im Jahr 2023<sup>28</sup>.

Die Einspeisevergütung stellt das steuerbare Einkommen dar. Die Höhe der Besteuerung ist dabei kantonale unterschiedlich. Aktuell wird in der Praxis insbesondere die Nettomethode verwendet. In einigen Kantonen stellt lediglich die ausbezahlte Einspeisevergütung (nach Verrechnung mit dem Strombezug) das steuerbare Einkommen dar, d.h. besteuert wird ausschliesslich die Gutschrift des EWs aus der Netzeinspeisung (d.h. aus dem Verkauf des selbstproduzierten Stroms). Andere Kantone besteuern den gesamten produzierten Strom, also auch den selbst verbrauchten Strom. Dies ist jedoch schwierig, da es keine von Dritten verwalteten Stromzähler für diesen Zweck gibt. Ebenso gibt es Kantone, welche die ersten 10'000 kWh (pro Jahr und Haushalt) als Eigenverbrauch kategorisieren und diese nicht besteuern, sowie noch weitere kantonale Verfahren.

In dieser Studie wurde die Besteuerung der Einspeisevergütungen nicht berücksichtigt, da diese vom steuerbaren Einkommen abhängt und stark variieren kann.

Ein zentraler Faktor bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung ist der Energiepreis und dessen künftige Entwicklung. Im Jahr 2023 stiegen die Strompreise für die Grundversorgung von Haushalten in der Schweiz zum Teil stark an. Berechnungen der Eidgenössischen Elektrizitätskommission ElCom vom September 2022 zeigten, dass ein typischer Haushalt im Jahr 2023 mit Kosten von 26.95 Rp./kWh (Medianwert) zu rechnen hat. Dies entspricht einer Erhöhung von 5.77 Rp./kWh (27 %) im Vergleich zum Jahr 2022<sup>29</sup>.

Die Entwicklung der Energiepreise ist abhängig von den Rohstoff- und CO<sub>2</sub>-Preisen und wird durch den Ausbau erneuerbarer Energien beeinflusst. Gemäss der Studie «Wege in die neue Stromzukunft» (67) werden die Strompreise (preisbereinigt, unter Berücksichtigung der Kosten für Energie, Netz und Förderabgaben für erneuerbare Energien) in den analysierten Szenarien bis 2050 um rund 30 %, 45 % oder 75 % gegenüber 2011 ansteigen. Der durchschnittliche Strompreis für Haushalte in der Schweiz lag im Jahr 2011 bei 20.2 Rp./kWh. Im Jahr 2023 betrug der Preisanstieg somit bereits mehr als 30 % – das niedrigste Szenario wurde somit bereits überschritten. Damit 2050 das höchste Szenario (+ 75 % gegenüber 2011) eintritt, bedarf es bei den aktuellen Strompreisen eine lineare Preissteigerung von etwa 1.2 %. Die Preisentwicklungen des IEA-Szenarios *Sustainable Development (SDS)* des World Energy Outlook 2018 (68) für Strom bis 2040 geht von einer Preiserhöhung von etwa 0.5 % pro Jahr aus. In anderen Studien, z.B. im Planungshilf-Tool «Variantenvergleich Energiesysteme»<sup>30</sup> des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, wird dagegen eine Energiepreissteigerung für Strom von 1.4 % pro Jahr angenommen oder in der Studie «Wirtschaftlichkeit von Neubau- und Erneuerungsinvestitionen in der 2000-Watt-Gesellschaft» (69) liegt die konstante jährliche durchschnittliche Preissteigerung bei 1.1 % pro Jahr. In dieser Studie

---

<sup>27</sup> Vergütung von Stromrücklieferungen aus Solarstromanlagen inkl. Vergütung ökologischer Mehrwert (Herkunftsnachweis) für Solaranlagen der Stadt Zürich für das Jahr 2023:

<sup>28</sup> Interaktive Karte der Vergütungen, VESE: <https://www.vese.ch/pvtarif/>

<sup>29</sup> Stark steigende Strompreise 2023, der Bundesrat: <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-90237.html>

<sup>30</sup> Erhältlich auf folgender Website: <https://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/beratung/energie-gebaeudetechnik/planungshilfen-werkzeuge.html>



wurde eine jährliche Strompreissteigerung von 1 % angenommen. Dieser Wert entspricht einer linearen realen Preissteigerung für den Netzstrom als auch für die Einspeisevergütung.

### 5.2.3.5. Förderung für PV und Begrünungen

Photovoltaik wird vom Bund subventioniert, zusätzlich gibt es unterschiedlich kantonale Förderprogramme. Förderprogramme für Fassadenbegrünungen gibt es hingegen nur wenige. Derzeit bieten bspw. die Stadt Zürich, die Stadt Luzern sowie die Municipalité d'Yverdon-les-Bains finanzielle Unterstützung für Begrünungen im Fassadenbereich an.

In dieser Studie wurden für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Förderprogramme der Stadt Zürich sowohl für PV als auch für die Begrünungen herangezogen. Die Förderbeiträge wurden für das Jahr 2023 angenommen. Bei der Photovoltaikanlage wurde die zusätzliche Förderung durch Bundesbeiträge berücksichtigt.

Der Bund fördert die Stromproduktion aus PV-Anlagen mit einer Leistung von mindestens 2 kW<sub>p</sub> mit einer Einmalvergütung (EIV). Die Betreiber erhalten dabei einen einmaligen Investitionsbeitrag. Die Höhe des Beitrags berechnet sich anhand der Leistung und des Anlagentyps. Derzeit gibt es insgesamt drei unterschiedliche Programme: Einmalvergütungen für kleine PV-Anlagen (KLEIV) mit einer Leistung von weniger als 100 kW<sub>p</sub> (von 2 kW<sub>p</sub> bis 99.99 kW<sub>p</sub>), für grosse PV-Anlagen (GREIV) mit einer Leistung ab 100 kW<sub>p</sub> und die hohe Einmalvergütung (HEIV) für PV-Anlagen ohne Eigenverbrauch (2 kW<sub>p</sub> bis 149.99 kW<sub>p</sub>). Ab einer Anlagenleistung von 150 kW<sub>p</sub> wird die HEIV per Auktion vergeben.

Abbildung 43 gibt eine Übersicht über die zuvor genannten Subventionen des Bundes.

EINMALVERGÜTUNG				BONI	
2 kW	30 kW	100 kW	150 kW	Winkel ≥ 75°	Höhe ≥ 1500m P ≥ 150 kW
Leistung <100 kW		Leistung ≥100 kW		Neigung	Höhe ü.M.
Mit/ohne Eigenverbrauch	Freist.	KLEIV angebaut max. 30%*	GREIV angebaut max. 30%*	Neigungs- winkelbonus angebaut / freistehend	Höhenbonus (ausserhalb von Bauzonen und von Gebäuden)
	Integriert	KLEIV integriert max. 30%* = KLEIV angebaut +10%		Neigungs- winkelbonus integriert	
Leistung <150 kW		Leistung ≥150 kW		Neigung	Höhe ü.M.
Ohne Eigenverbrauch	Freist.	Hohe EIV max. 60%*	Hohe EIV max. 60%* Auktionen	Neigungs- winkelbonus angebaut / freistehend	Höhenbonus (ausserhalb von Bauzonen und von Gebäuden)
	Integriert			Neigungs- winkelbonus integriert	
Alpine EIV max. 60%**					

\* der Investitionskosten von Referenzanlagen  
\*\* der individuellen Investitionskosten

Abbildung 43: Übersicht der verschiedenen Subventionen des Bundes für Photovoltaikanlagen. Die Darstellung enthält detaillierte Erläuterungen zu den einzelnen Kategorien. Quelle: Bundesamt für Energie<sup>31</sup>.

<sup>31</sup> Förderung von Photovoltaikanlagen. Einmalvergütung und Boni. Bundesamt für Energie: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/7238>



Die Einmalvergütung setzt sich aus einem Leistungsbeitrag und, für Anlagen mit einer Leistung von 2 bis 5 kW<sub>p</sub>, aus einem Grundbeitrag (200 CHF) zusammen. Der Leistungsbeitrag ist abhängig von der Art der Anlage. Bei Anlagen grösser als 30 kW<sub>p</sub> wird der Leistungsanteil anteilmässig nach den Leistungsklassen berechnet.

Für eine angebaute oder freistehende PV-Anlage liegt der Leistungsbeitrag bis 30 kW<sub>p</sub> bei 400 CHF/kW<sub>p</sub>, bei grösseren Anlagen nimmt der Leistungsbeitrag pro kW<sub>p</sub> ab. D.h. bei einer Anlage von 30 kW<sub>p</sub> bis 100 kW<sub>p</sub>, werden die ersten 30 kW<sub>p</sub> mit 400 CHF/kW<sub>p</sub>, und jedes weitere kW<sub>p</sub> mit 300 CHF/kW<sub>p</sub> vergütet. Bei Anlagen über 100 kW<sub>p</sub> gelten die zuvor genannten Leistungsbeiträge, hinzu kommen 270 CHF/kW<sub>p</sub> für jedes weitere kW<sub>p</sub> ab 100 kW<sub>p</sub>. Für eine integrierte PV-Anlage liegt der Leistungsbetrag etwas höher.

Tabelle 21 gibt eine Übersicht über die Höhe der Einmalvergütungen in Abhängigkeit von der Art und Leistung der PV-Anlage. Ebenso ist der Neigungswinkel- und Höhenbonus aufgeführt.

Tabelle 21: Förderbeiträge und Boni des Bundes für PV-Anlagen in Abhängigkeit vom Anlagentyp sowie der installierten Leistung. Der Höhenbonus gilt für freistehende, angebaute und integrierte PV-Anlagen an Infrastrukturen ausserhalb der Bauzone (d.h. nicht angebaut oder integriert bei einem Gebäude).

Art der PV-Anlage	Einmalvergütung					Bonus (CHF/kW <sub>p</sub> )	
	Grundbetrag pro Anlage (CHF)		Leistungsbetrag (CHF/kW <sub>p</sub> )			Neigungswinkel ≥ 75°	Höhenbonus ≥ 1'500 m ≥ 150 kW <sub>p</sub>
	2-5 kW <sub>p</sub>	> 5 kW <sub>p</sub>	< 30 kW <sub>p</sub>	> 30 kW <sub>p</sub>	> 100 kW <sub>p</sub>		
Angebaute oder freistehende Anlage	200	-	400	300	270	100	250
Integrierte Anlage	200	-	440	330	270	250	250

Die Einmalvergütung für kleine PV-Anlagen (KLEIV) und die Einmalvergütung für grosse PV-Anlagen (GREIV) beträgt maximal 30 % der Investitionskosten von Referenzanlagen. Die KLEIV für integrierte PV-Anlagen entspricht dem Tarif für angebaute/freistehende PV-Anlagen zuzüglich etwa 10 %. Die hohe HEIV für PV-Anlagen ohne Eigenverbrauch kann bis zu 60 % der Investitionskosten von Referenzanlagen betragen (

Abbildung 43).

Zusätzlich zur Einmalvergütung haben Neuanlagen und Erweiterungen mit einer Leistung von mind. 2 kW<sub>p</sub> und Anlagenteile, welche eine Neigung von mind. 75 ° aufweisen, ein Anrecht auf den Neigungswinkelbonus (

Abbildung 43). Für integrierte PV-Anlagen mit einem Inbetriebnahme-Datum ab 1.1.2022 wird ein Bonus in Höhe von 250 CHF pro kW<sub>p</sub> gewährt. Dies gilt auch für integrierte PV-Anlagen ab 100 kW<sub>p</sub>, auch wenn diese Anlagen eigentlich nur den Anspruch auf den EIV-Ansatz für angebaute und freistehende Anlagen haben (Tabelle 21).

Freistehende oder an Infrastrukturen integrierte oder angebaute PV-Anlagen, welche sich ausserhalb von Bauzonen befinden, eine Leistung von mindestens 150 kW<sub>p</sub> haben und sich in einer Höhe von mind. 1'500 m über dem Meer befinden, haben zusätzlich zur EIV Anrecht auf den Höhenbonus.

Die Förderbeiträge für Solaranlagen der Stadt Zürich ergänzen die zuvor genannten Beiträge des Bundes. Die Stadt Zürich entrichtet für Anlagen ab 2 kW<sub>p</sub> einen Pauschalbetrag von 4'400 Franken (Grundbeitrag). In Abhängigkeit der Leistung der PV-Anlage werden zusätzliche Beiträge gewährt. Der Leistungsbeitrag liegt bis 30 kW<sub>p</sub> bei 420 CHF/kW<sub>p</sub>, von 30 bis 100 kW<sub>p</sub> bei 330 CHF/kW<sub>p</sub> und für jedes weitere kW<sub>p</sub> ab 100 kW<sub>p</sub> bei 300 CHF/kW<sub>p</sub> (Tabelle 22). Bei Neubauten werden jedoch nur für denjenigen Teil der PV-Anlage Beiträge ausgerichtet, der über die gesetzliche Anforderung hinausgeht.



Tabelle 22: Förderbeiträge der Stadt Zürich für Solaranlagen in Abhängigkeit von der installierten Leistung. Bei Neubauten wird nur der Teil der PV-Anlage gefördert, welcher über die gesetzlichen Anforderungen hinausgeht.

	Förderbeiträge für Solaranlagen				zusätzliche Förderbeiträge für Fassadenanlagen (Ausrichtung PV-Module zur Winterstromproduktion) (CHF/kW <sub>p</sub> )
	Grundbetrag pro Anlage (CHF)	Leistungsbetrag (CHF/kW <sub>p</sub> )			
		> 2 kW <sub>p</sub>	< 30 kW <sub>p</sub>	> 30 kW <sub>p</sub>	
PV-Anlage	4'400	420	330	300	300 (insgesamt jedoch max. 60'000 CHF)

Die Stadt Zürich hat zudem auch zusätzliche Förderbeiträge für PV-Anlagen an der Fassade, welche durch ihre Ausrichtung einen Beitrag zur Winterstromproduktion leisten. Dies gilt für Modulflächen die nach Osten, Westen oder Süden ausgerichtet sind und einen Neigungswinkel zwischen 60 ° und 90 ° aufweisen. Für diese Anlagen wird ein zusätzlicher Beitrag von 300 CHF/kW<sub>p</sub> vergeben, jedoch ein maximaler Betrag von 60'000 CHF.

Fassadenbegrünungen werden in der Stadt Zürich durch die Anlauf- und Beratungsstelle «Grün Stadt Zürich» finanziell unterstützt. Das Förderprogramm «Vertikalbegrünung» unterstützt private Grundeigentümerschaften mit einem einmaligen Beitrag von bis zu 50 % der Investitionskosten, jedoch einem Maximalbetrag von 30'000 CHF.

Förderbeiträge stellen grundsätzlich steuerpflichtiges Einkommen dar. Wird der Förderbeitrag in derselben Steuerperiode gewährt, in dem die Investition erfolgte, kann der Beitrag vom Investitionsbetrag abgezogen werden. Fällt der Zuschuss jedoch in einer späteren Steuerperiode an, muss dieser zum Zeitpunkt des Rechtserwerbs oder als steuerpflichtiges Einkommen deklariert werden. Unklar ist, wie Einmalvergütungen für PV-Anlagen bei Neubauten oder in Kantonen, die keinen Abzug zulassen, steuerlich behandelt werden. In dieser Studie wurde eine Besteuerung der Förderbeiträge nicht berücksichtigt.

### 5.3 Messinfrastruktur

Im Rahmen des Projekts wurden neben Literaturrecherchen und Simulationen ebenso Messungen an realen Fassadenprototypen durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss der verschiedenen Systeme auf die Umgebungstemperatur überprüft und die Berechnungsannahmen verifiziert.

Betrachtet wurden die Messreferenzfassade sowie die nachfolgenden vier Fassadensysteme.

#### Messreferenzfassade

Hinterlüftete Fassade mit einer Aussenwandverkleidung aus Aluminiumblechen. Die Aussenwand ist gut isoliert (Dämmstärke: ca. 40 cm). An der Fassade sind flexible PV-Paneele befestigt (dunkelblaue vertikale Streifen in Abbildung 45), die Messungen wurden jedoch an den hellen Aluminiumblechen durchgeführt.

#### Bodengebundene Fassadenbegrünung

Pflanzenart: Efeu (Hedera Helix)

Rankkonstruktion: Rankgitter

Bewässerung: Bewässerungscomputer inkl. Durchflusssensor und automatischer Düngung



### **Wandgebundene Fassadenbegrünung**

Pflanzenart:	Kombination aus verschiedenen Pflanzenarten für sonnige Standorte, Geranium x cantabrigiense 'Berggarten', Heucherella x alba 'Bridget Bloom', Aubrieta x cultorum 'Hamburger Stadtpark', Bergenia cordifoila 'Oeschberg', Hemerocallis x cultorum 'Stella d'Oro', Geranium macrorrhizum 'Spessart'  Insgesamt wurden ca. 135 Pflanzen (20 - 25 Pflanzen/m <sup>2</sup> ) verwendet.
Konstruktion / System:	Hinterlüftete Fassadenkonstruktion, Living Wall aus Vliessschichten
Bewässerung:	Bewässerungscomputer inkl. Durchflusssensor und automatischer Düngung

### **Opakes PV-Modul (bedruckt)**

Konstruktion:	Hinterlüftete Fassadenkonstruktion, 4 PV-Paneele, GES Gebäude – Energiesysteme GmbH, Typ: ZRE 174G4C4-49awM6 + E64 <i>black</i> , 174 Wp
Wirkungsgrad der Module:	12.1 %

### **Transparentes PV-Modul**

Konstruktion:	Hinterlüftete Fassadenkonstruktion, 9 PV-Paneele, Ertex Solartechnik GmbH. Typ: VSG-L (polykristallines Solarmodul) 70.1 Wp
Transparenzgrad:	80 %
Wirkungsgrad der Module:	12.5 %

Zusätzlich zu den zuvor genannten Systemen wurde zu Vergleichszwecken ein Schwamm Mock-Up installiert. Der Aufbau und die Abmessungen des Teststands sind in Abbildung 44 dargestellt.

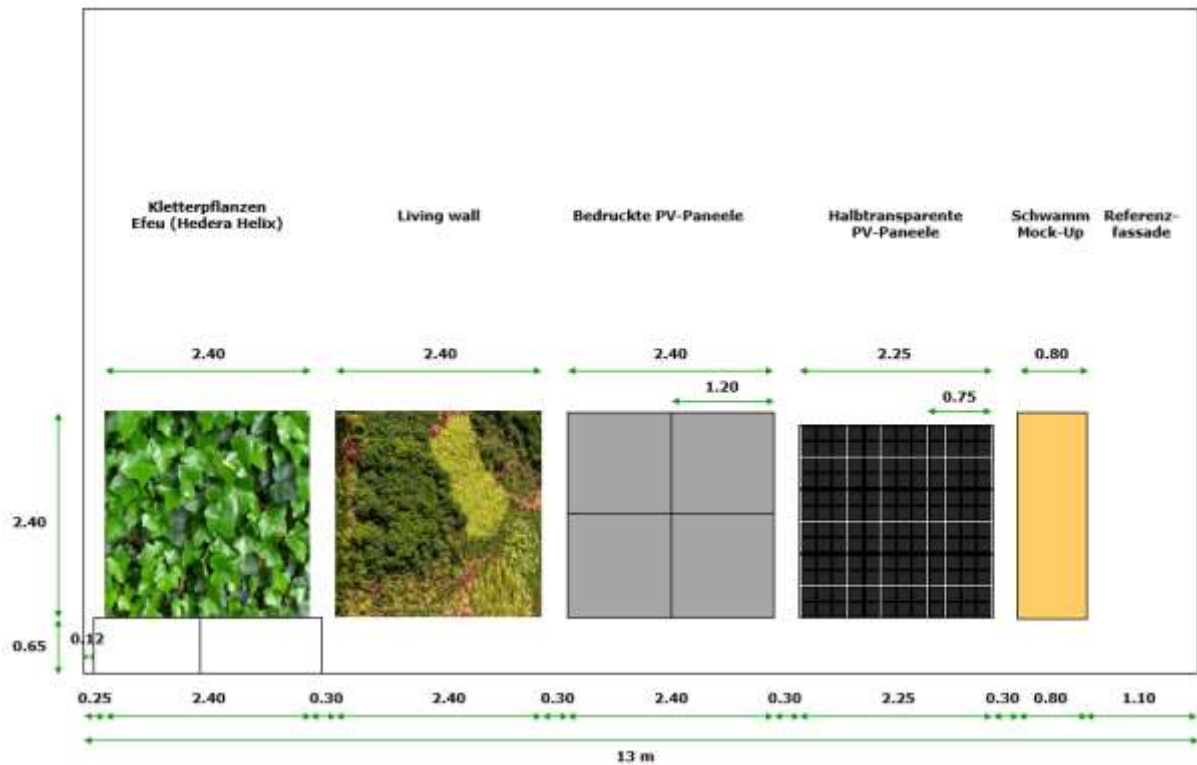


Abbildung 44: Aufbau der Messinfrastruktur.

Die Installation der Messinfrastruktur (begrünte Fassaden) erfolgte am 14. Juli 2022 auf dem Campus der Hochschule Luzern Technik & Architektur in Horw. Die Südfassade der Vegasin-Halle wird nicht durch Bäume, Sträucher oder umliegende Nachbarbebauungen verschattet und eignet sich somit optimal für den Versuchsaufbau (Abbildung 45).



Abbildung 45: Messinfrastruktur an der Südfassade der Vegasin-Halle an der Hochschule Luzern Technik & Architektur.



Im Rahmen des Projekts wurden die Oberflächentemperaturen, die Lufttemperatur und -feuchtigkeit, die Sonneneinstrahlung sowie der benötigte Wasserbedarf überwacht. Dazu wurden verschiedene Sensoren installiert (Abbildung 46).

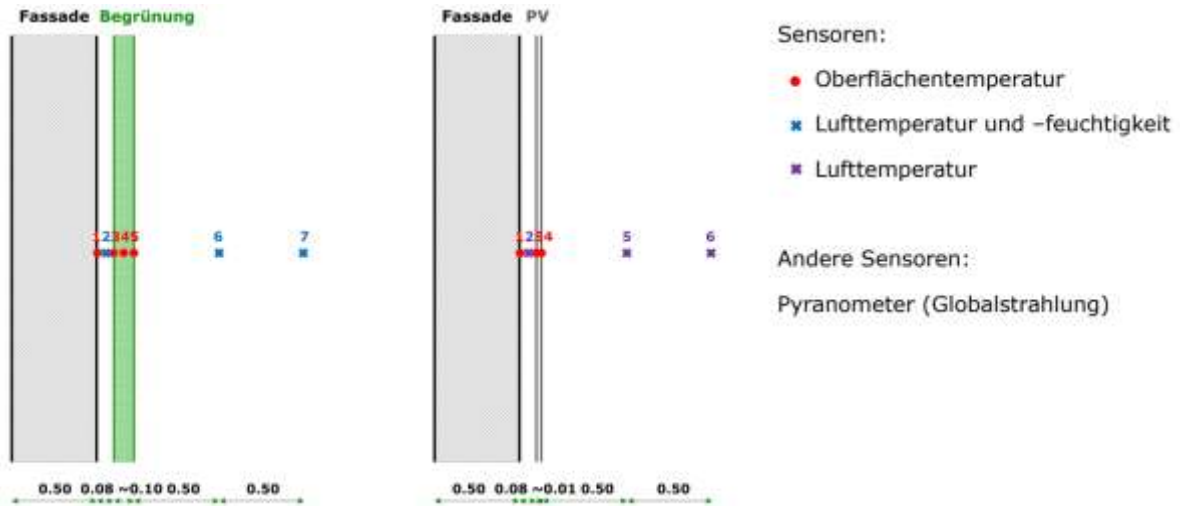


Abbildung 46: Installation der Sensoren zur Messung von Oberflächen- und Lufttemperatur, Luftfeuchte sowie Sonneneinstrahlung.

Die Messungen wurden am 30. August 2022 gestartet. Die Ergebnisse sind in Kapitel 8 dokumentiert.

## 5.4 Quartierklimamodellierung (QKM)

Um die Auswirkungen der verschiedenen Fassadensysteme auf das Stadtklima zu untersuchen, wurde die Software Quartierklimamodellierung (QKM) eingesetzt. QKM wurde im Rahmen des Projekts «**Quartierklima Modellierung**» (18) vom Institut für Gebäudetechnik und Energie (IGE) der Hochschule Luzern (HSLU) entwickelt. Im Projekt wurde ein Modellierungswerkzeug für die Quantifizierung und Optimierung des Quartierklimas für die Anwendung in der frühen Projektphase entwickelt. Mit dem Instrument kann u.a. der Komfort (global, lokal) für verschiedene Quartiermassnahmen wie Begrünung, Wasserflächen, Gebäudesetzung, Oberflächenwahl und umgebende Topologie ermittelt werden. Das Instrument ist interaktiv im Entwurfsprozess integriert (Modifikation und Visualisierung direkt in Revit). Die Auswirkungen von Entwurfsveränderungen auf das Quartierklima sind sofort sichtbar, Planende werden so bei Entscheidungen unterstützt.

Mit Hilfe der Software konnten verschiedene Parameter im Tagesverlauf berechnet werden, dazu gehörten u.a. die Oberflächentemperatur, Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, physiologisch äquivalente Temperatur (abgekürzt PET des englischen Begriffs *physiological equivalent temperature*) und die einfallende Sonnenstrahlung.

Das thermische Empfinden des Menschen im Aussenraum hängt von vielen Parametern ab, welche komplexen Wechselwirkungen unterliegen. Dazu gehören vor allem die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und die direkte Sonneneinstrahlung. All diese Einflüsse werden bei der Bewertungsgrösse PET – Physiologisch Äquivalente Temperatur – berücksichtigt. «Die PET ist eine Bewertungsgrösse zur Behaglichkeit im Aussenraum, wobei der Einfluss der direkten und diffusen Sonnenstrahlung auf den Menschen mitberücksichtigt wird. Sie beschreibt eine Lufttemperatur in einem Innenraum ohne Sonnenstrahlung und Wind, welche für einen menschlichen Körper physiologisch äquivalent zu einer komplexen Klimasituation im Aussenbereich mit Sonnenstrahlung und Wind ist. Einfacher formuliert, charakterisiert die PET, wie warm die Raumtemperatur einer Wohnung sein müsste, dass es sich gleich wie im Aussenraum anfühlt.



Zur Berechnung der PET wird eine Standardperson benutzt, welche als männlich mit einem Gewicht von 75 kg, einer Bekleidung von 0.9 clo (beschreibt, wie stark die Kleidung isoliert), einer Wärmeabgabe von 80 W, einer Körpergrösse von 1.75 m und einem Alter von 35 Jahren beschrieben wird» (70).

Die PET verbildlicht die Wärmebelastung für den Menschen während des Tages, weshalb sie häufig in Klimaanalysekarten zur Bewertung der Aufenthaltsqualität verwendet wird. Dabei wird i.d.R. die modellierte Wärmebelastung im Freiraum um 14 Uhr in einer Höhe von 2 m über dem Boden (was mit der Höhe der Wetterstationen übereinstimmt) dargestellt.

In Abbildung 47 ist die Ermittlung der PET visuell vereinfacht dargestellt.

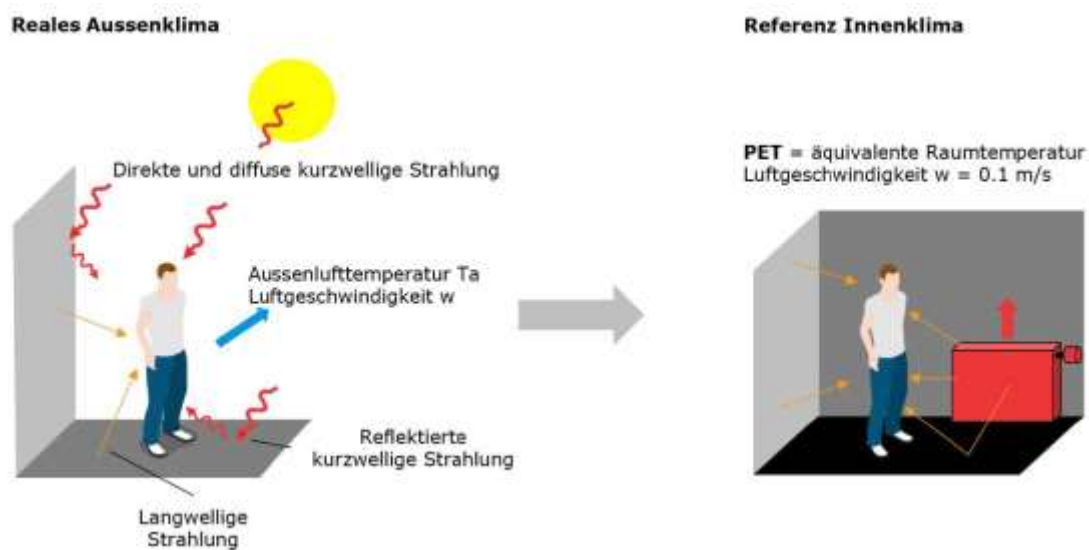


Abbildung 47: Darstellung der Wärmewahrnehmung in einem Aussenraum zu den äquivalenten Temperaturen in einem Innenraum (Quelle: (70)).

Die wichtigsten Einflussfaktoren der PET stellen die direkte und diffuse Sonnenstrahlung sowie die von Oberflächen (z. B. Gebäude, Strasse) reflektierte Strahlung dar. An heissen Sommertagen mit direkter Sonneneinstrahlung kann der PET-Wert beispielsweise mehr als 20 K höher als die Lufttemperatur sein, an einem windigen Wintertag bis zu 15 K niedriger.

Das Wärmeempfinden und das physiologische Stresslevel des Menschen können anhand der PET klassifiziert werden, wie die PET-Skala in Abbildung 48 zeigt. Ab einem PET-Wert von über 29 °C spricht man von einer mässigen Wärmebelastung, ab einem PET-Wert von über 35 °C von einer starken Wärmebelastung und ab einem PET-Wert von über 41 °C von einer extremen Wärmebelastung für den Menschen.



Abbildung 48: Bewertungsskala des Wärmeempfindens und der physiologischen Belastung in Abhängigkeit von der PET (Quelle: (70)).





Die Simulationen wurden mit den Klimadaten von Zürich Fluntern des Jahres 2020 an einem Hitzetag durchgeführt. Für die Simulationen wurde das Referenzgebäude «Neubau» (Kapitel 4.4) im zuvor definierten städtischen Kontext (Kapitel 4.3) betrachtet. Die angenommene Umgebungssituation wurde durch weitere Gebäudereihen erweitert, um die Auswirkungen auf einem grösseren Areal zu untersuchen (Abbildung 49). Die Höhe des Referenzgebäudes «Neubau» beträgt 23.2 m, während die Höhe der umliegenden Gebäude und der Gebäudeabstand (Breite der Strasse) 11.6 m betragen.

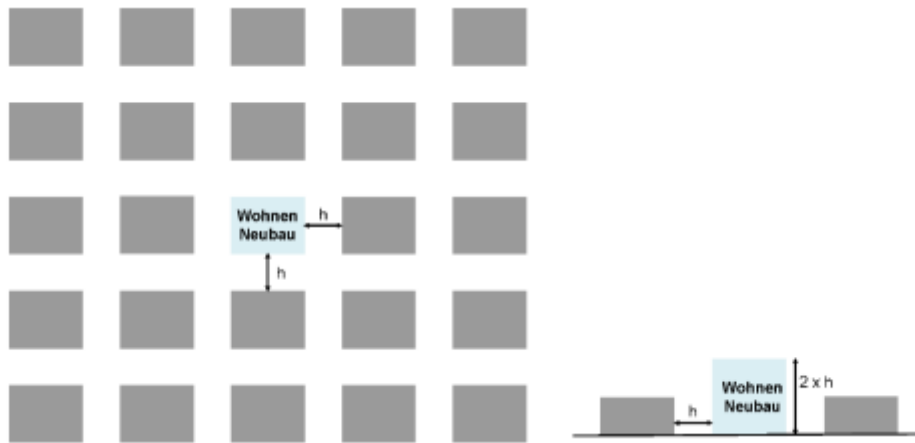


Abbildung 49: Grundrissplan des betrachteten Quartiers mit den umliegenden Gebäuden (links), Umgebungssituation Referenzgebäude «Neubau» (rechts).

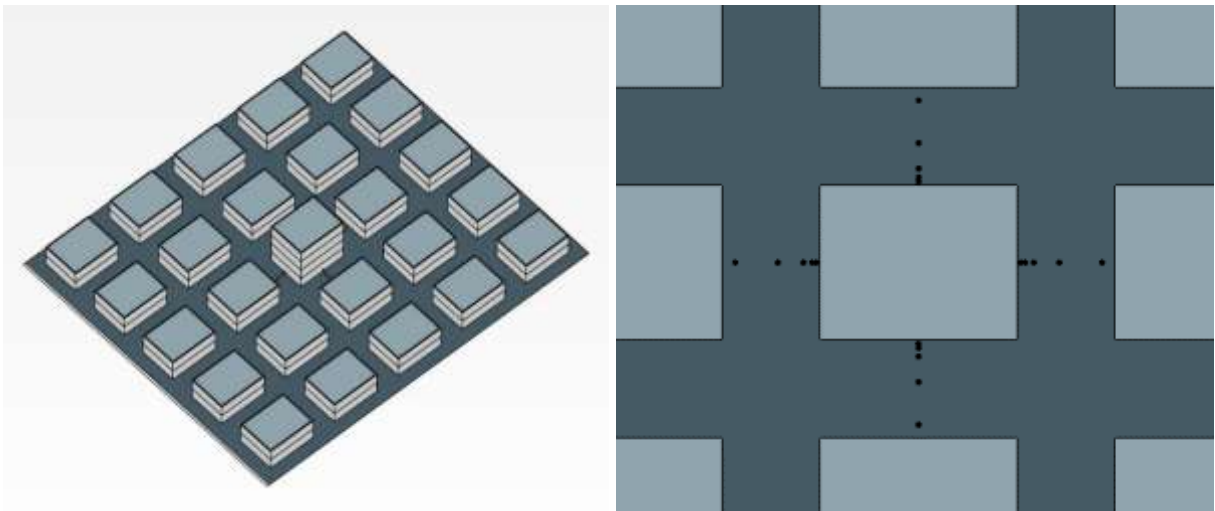


Abbildung 50: 3D-Modell des Quartiers für die Simulationen in QKM (links), Grundriss des Referenzgebäudes mit der Positionierung der Messpunkte in den verschiedenen Ausrichtungen (rechts).

Der Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf den thermischen Komfort im Aussenraum variiert mit dem Abstand zur Fassade. Ebenso nehmen andere Parameter, wie die einfallende und reflektierte Sonnenstrahlung oder der Wind, einen Einfluss auf das thermische Empfinden einer Person. Daher wurden verschiedene Messpunkte in einer Standardhöhe von 2.0 m in den verschiedenen Ausrichtungen betrachtet. Die Messpunkte befinden sich in einem Abstand von 0.5 m, 1.0 m, 2.0 m, 5.0 m und 10.0 m zur Fassade (Abbildung 50, rechts).



Für alle Gebäude wurde das gleiche Bausystem für die Fassaden und Dächer angenommen. Für alle Strassen wurde das gleiche Asphaltmaterial (Schwarzbelag) definiert. Jedes Bausystem (oder Material wie in QKM bezeichnet) besteht aus 3 Schichten. Für die Fassade wurde eine verglaste Fläche von 50 % angenommen (Eigenschaften: U-Wert von 0.7 W/m<sup>2</sup>K, g-Wert von 0.51). Tabelle 23 gibt eine Übersicht der getroffenen Annahmen für die Fassaden, Dächer und Strassen.

Tabelle 23: Übersicht zu den getroffenen Annahmen für die Fassaden- und Dachsysteme sowie der Umgebungsflächen.

	Schichten	Dicke (m)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Volumengemittelte Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	spezifische Wärmekapazität (J/kgK)
<b>Fassade – Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten</b>	Äussere Fasserzem.	0.008	0.48	1800	1000
	Mittlere Luft + Dämmung	0.22	0.09	28	1010
	Innere Backstein	0.15	0.44	1100	1000
<b>Dach – Kies Dach</b>	Äussere Kies	0.10	2.0	2000	1050
	Mittlere Polyuret.	0.12	0.022	30	1440
	Innere Arm. Beton	0.26	2.5	2400	1000
<b>Strassen – Schwarzbelag Asphalt</b>	Äussere Asphalt	0.12	0.487	2200	899
	Mittlere Kies	0.40	0.7	1800	710
	Innere Erde	4.48	0.7	1700	1420

Es wurden vier Fassadensysteme anhand des Referenzgebäudes «Neubau» untersucht:

- Referenzfassade: hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten
- bodengebundene Begrünung, wobei aufgrund der begrenzten Wuchshöhe nur die ersten vier Geschosse als begrünt angenommen wurden
- wandgebundene Begrünung mit einem Substrat von 12 cm
- PV-Fassade mit opaken Modulen

Bei der PV-Fassade wurde auf eine differenzierte Betrachtung zwischen opaken und transparenten Modulen verzichtet, da der grösste Unterschied in der Albedo der Oberfläche und im Wirkungsgrad der Module liegt – je höher der Wirkungsgrad, desto mehr der einfallenden Sonnenstrahlung wird in Strom und nicht in Wärme umgewandelt. Die Wirkung der Begrünungssysteme hängt von vielen Faktoren ab, u. a. von der zugeführten Wassermenge, dem Blattflächenindex sowie der Dicke der Substratschicht und dessen Eigenschaften. Diese Faktoren können dabei stark variieren, wobei in der Literatur bisher nur wenige wissenschaftliche Angaben zu finden sind. Die Ergebnisse der Simulationen sollten deshalb nur als Orientierung dienen.

Für die wandgebundene Begrünung wurde anstelle eines Vlies-Systems (Referenz) eine 12 cm dicke Substratschicht betrachtet. Grund dafür ist, dass das modulare System bei der Bewässerung einen Teil der Wassermenge in der Substratschicht zurückhält und somit die kühlende Wirkung (Verdunstung dieser Wassermenge) effektiver ist als bei einem Vlies-System, da hier die Substratmenge viel geringer ist. Dadurch lässt sich die positive Wirkung auf das Stadtklima besser



aufzeigen. Die wichtigsten Eigenschaften der untersuchten Fassadensysteme sind in Tabelle 24 aufgeführt.

Tabelle 24: Übersicht zu den Eigenschaften der untersuchten Fassadensysteme.

	Eigenschaften der Oberfläche		Blattflächenindex (BFI, auf Englisch Leaf area index, LAI)	Wasserspeicherkapazität äussere Schicht (kg/m <sup>3</sup> )	Andere Merkmale
	Emissionsgrad	Albedo			
<b>Referenzfassade</b> – hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten	0.95	0.45	-	-	
<b>Bodengebundene Begrünung</b> (nur die erste vier Geschosse sind begrünt)	0.9	0.3	0.8	-	
<b>Wandgebundene Begrünung</b> mit einer Substratschicht von 12 cm	0.9	0.3	2.5	Anfangswert: 300 Höchstwert: 420	äussere Schicht durch Substrat ersetzt: Dicke: 12 cm Wärmeleitf.: 0.56 W/mK Dichte: 1320 kg/m <sup>3</sup> spezif. Wärmek. 1200 J/kgK
<b>PV-Fassade (opak)</b>	0.9	0.16	-	-	16 % der einfallenden Sonnenstrahlung wird in Strom umgewandelt Dicke: 0.64 cm Wärmeleitf.: 0.96 W/mK Dichte: 2500 kg/m <sup>3</sup> spezif. Wärmek. 840 J/kgK

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Kapitel 9 dargestellt.



## 6 Ergebnisse der qualitativen Analyse

In diesem Kapitel wurde der Einfluss der Fassadensysteme auf verschiedene qualitative Aspekte aufgezeigt. Der Effekt von Begrünung und PV ist dabei nicht immer eindeutig definierbar, da dieser stark vom vorhandenen Kontext und den aktuellen Rahmenbedingungen (bspw. der Verkehrssituation) abhängig ist. Um jedoch einen Eindruck zu erhalten, welche Auswirkungen die Wahl der Fassadensysteme auf Gesellschaft, Stadt und Umwelt haben kann, wurden verschiedene Erkenntnisse, Kennwerte und Hinweise aus bestehenden Studien zusammengetragen.

### 6.1 Lärm in Städten

#### Begriffsdefinition

Als Lärm werden Geräusche bezeichnet, die vom Menschen als unerwünscht oder störend empfunden werden. Wir nehmen diese Geräusche als Schall wahr. Je nach Schalldruck und Frequenz können Geräusche als laut bzw. leise und als hoch bzw. tief empfunden werden. Die Lautstärke wird als Schalldruckpegel in Dezibel (dB) gemessen. Je höher der Schalldruckpegel desto höher ist die Lautstärke. Tabelle 25 gibt eine Übersicht über typische Lärmemissionsquellen und deren Schallpegel.<sup>32</sup>

Tabelle 25: Beispiele für verschiedene Lärmemissionen und deren Schallpegel in dB<sup>33</sup>

Emissionsquelle	Schallpegel	Einstufung
Uhr ticken	20 dB	kaum hörbar
normales Gespräch	50 dB	eher leise
Büro	60 dB	mässig laut
starker Straßenverkehr	80 dB	sehr laut
Bauarbeiten, Presslufthammer	100 dB	sehr laut bis unerträglich
Verkehrsflugzeug in 50 m Entfernung	120 dB	unerträglich

#### Fokus der Studie

Lärmbelastungen können somit verschiedene Ursachen haben und sowohl im Gebäudeinneren (Transmission, stark abhängig von der Baukonstruktion) als auch im Aussenraum auftreten. In diesem Bericht wird auf die **Lärmbelastung im Aussenraum von Städten** fokussiert und untersucht, welchen Einfluss PV und begrünte Fassaden auf die Schallausbreitung bzw. -dämpfung in Strassenräumen haben können.

#### Situation in der Schweiz

Laut dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) sind in der Schweiz **ca. 1'000'000 Menschen von lästigem und schädlichem Lärm betroffen**, 90 % davon leben in Städten oder Agglomerationen. Neben Eisenbahn und Fluglärm ist insbesondere der Strassenverkehr die Hauptursache für die Lärmbelastung. Bereits kleine diesbezügliche Veränderungen könnten einen grossen Einfluss nehmen: Bei einer **flächenhaften Reduktion des Strassenlärms um 3 dB** könnten ca. 50 % der Personen vor einer zu hohen Lärmbelastung geschützt werden.<sup>34</sup>

32 <https://www.gesundheit.gv.at/leben/umwelt/laerm/was-ist-das.html>

33 <https://www.akustikform.ch/raumakustik/dezibel-skala>

34 <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/fachinformationen/laermbelastung/stand-der-laermbelastung-in-der-schweiz.html#accordion1647344947893>



## Schallausbreitung in Strassenräumen

Wie zuvor beschrieben, stellt insbesondere Strassenverkehr eine der Hauptursachen für unerwünschten und störenden Lärm dar. Abbildung 51 zeigt die Schallausbreitung am Beispiel einer Strasse in einer Häuserschlucht. Je näher an der Emissionsquelle, desto höher ist der Schallpegel (dB). Deshalb ist die Lärmbelastung insbesondere in **engen Strassenschluchten** besonders hoch.

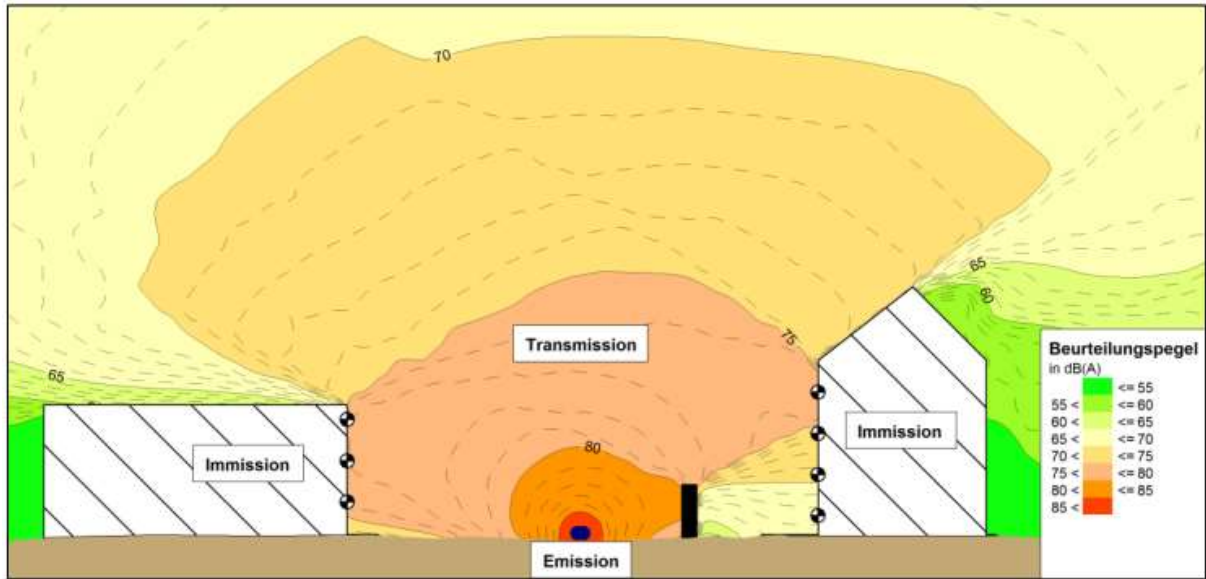


Abbildung 51: Schallausbreitung am Beispiel einer Strasse in einer Häuserschlucht (farbig markierte Pegelklassen in 5 dB-Stufen). Die Schallausbreitung von der Schallquelle zum Ort der Einwirkung (Immissionsort) lässt sich durch die Begriffe Emission, Transmission und Immission charakterisieren (Quelle: (71)).

## Massnahmen zur Schallreduktion in Aussenräumen

Das Dokument «Akustisch gute Architektur für Strassenräume» (72) des Kantons Zürich stellt einen Leitfaden für die architektonische und städtebauliche Gestaltung von Aussenräumen dar. Dadurch soll Verkehrslärm reduziert und somit mehr Aufenthaltsqualität in Städten geschaffen werden. Neben der Formgebung des Baukörpers sowie der Ausbildung von Teil- und Unterräumen, spielen auch **Texturen und Materialien der Oberflächen** eine entscheidende Rolle.

Oberflächen können die eintreffenden Schallwellen absorbieren bzw. dämpfen und/oder reflektieren. Sie leisten somit einen entscheidenden Beitrag zur Schallausbreitung im Aussenraum. Im Allgemeinen kann unterschieden werden zwischen **akustisch harten, glatten** und **akustisch weichen, unebenen/porösen** Oberflächen (Abbildung 52) (51).

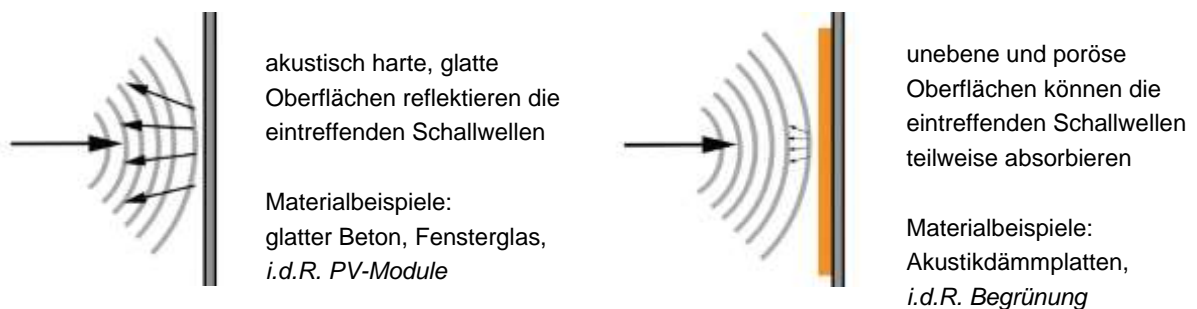


Abbildung 52: Schallreflexion (links) und Schallabsorption (rechts) (Quelle: incatro room acoustics).



## Schallabsorptionsgrad verschiedener Oberflächen

Der Absorptionsgrad  $\alpha$  gibt an, welcher Anteil des einfallenden Schalls von verschiedenen Materialien und Oberflächen absorbiert wird. Die Schallabsorption funktioniert dabei wie folgt: Schall ist bewegte Luft, trifft diese auf Oberflächen, wie bspw. Steinwolle, kann der Schall eindringen und bewegt die Fasern im Material, dabei entsteht Energie (Wärmeenergie, diese ist jedoch sehr gering und vernachlässigbar). Abbildung 53 stellt verschiedene Baustoffe sowie Fassadenbegrünungen gegenüber. Bei einem Absorptionsgrad von 0 wird kein Schall absorbiert (100 % Schallreflexion). Bei einem Absorptionsgrad von 1 wird der gesamte Schall absorbiert (keine Schallreflexion). Bei einem Absorptionsgrad von 0.4 wird 40 % des Schalls absorbiert und 60 % reflektiert. Das Potential zur Schallabsorption hängt dabei nicht nur von der Fassadenoberfläche ab, sondern der gesamte Fassadenaufbau spielt eine wichtige Rolle. Beim Vergleich bzw. bei Messungen von verschiedenen Oberflächenmaterialien hinsichtlich ihres Schallabsorptionsgrades wird dabei immer von einem Nullwert ausgegangen, d.h. der Fassadenaufbau wird als gleich angenommen.

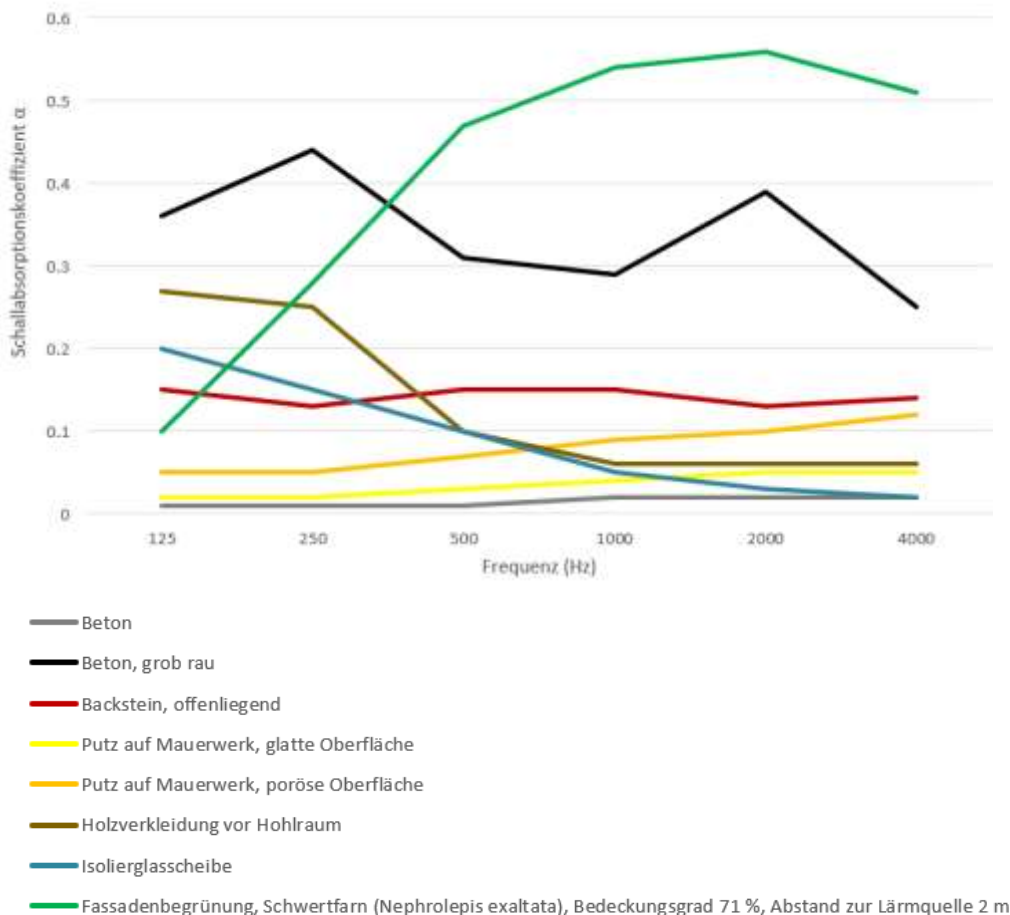


Abbildung 53: Schallabsorptionsgrad verschiedener Baumaterialien im Vergleich zu einer Fassadenbegrünung (73) und (74). Die Fassadenbegrünung hat vor allem in den oberen Frequenzbereich ein hohes Potential. Strassenlärm liegt i.d.R. in einem Frequenzbereich von 500 bis 1000 Hz<sup>35</sup>, Begrünungen können somit einen deutlichen Mehrwert zur Lärmreduktion in Strassenräumen leisten.

<sup>35</sup> <http://www.laerm.ch/de/laermsorgen/laermquellen-und-beurteilung/verkehr/strassenverkehr/strassenverkehr.html>



Deutlich erkennbar ist, dass **Fassadenbegrünungen** im Vergleich zu anderen typischen Baumaterialien, wie bspw. Beton oder Glas, einen deutlich höheren Schallabsorptionsgrad aufweisen. Fassadenbegrünungen können somit dazu beitragen, die Schallausbreitung in Strassenräumen zu mindern. Die Absorption von Schall durch Fassadenbegrünungen wird dabei im Wesentlichen durch die Vegetationsart bestimmt (17). Dabei kann eine **hohe Pflanzendichte**, ein **hohes Grünvolumen**, **kleine Blattstrukturen** und **locker gelagerte Substrate** die **positive Wirkung** von Begrünungen noch verstärken (31). Neben dem Potential zur Schallabsorption können Begrünungen noch einen **weiteren Mehrwert** leisten: bspw. haben Blätterrauschen und Vogelgesänge eine **positive Klangwirkung** auf den Menschen und können das psychische Wohlbefinden und die Gesundheit verbessern (75).

Für **PV-Module** konnten in der Literatur keine spezifischen Angaben zum Absorptionsgrad gefunden werden. Aufgrund der **harten, glatten Oberfläche** kann aber davon ausgegangen werden, dass ein Grossteil des einfallenden Schalls reflektiert wird. Je nachdem mit welcher Fassadenoberfläche eine PV-Fassade verglichen wird, kann sich dies **ähnlich oder leicht negativ** auf die Lärmemissionen im Strassenraum auswirken.

#### Bewertung der Referenzgebäude (Darstellungen)

Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche wurden nachfolgend die 4 Fassadensysteme (bodengebundene und wandgebundene Begrünung, transparentes und opakes PV-Modul) anhand des Referenzgebäudes «Neubau» bewertet (Abbildung 54). Die Bewertung beruht auf der Einschätzung der Autorenschaft. Die Wirkung der Fassadensysteme mit Blick auf Lärmemissionen hängt dabei stark vom **umgebenden Kontext** sowie dem **Schallpegel** (Art und Entfernung zur Emissionsquelle) ab. Es wird davon ausgegangen, dass die Orientierung der Fassade auf diesen Aspekt keinen direkten Einfluss hat.

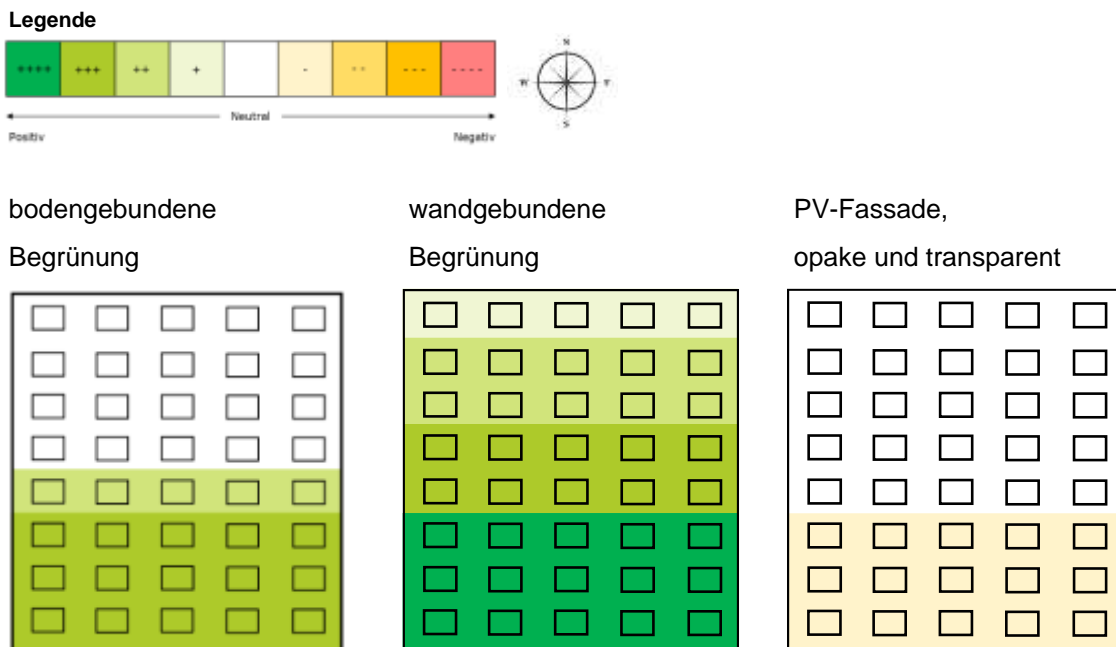


Abbildung 54: Einfluss von Fassadenbegrünungen und PV-Fassaden auf den Aspekt Lärm in Städten. Bewertet wurde ein bodengebundenes, ein wandgebundenes System sowie eine PV-Fassade mit opaken und transparenten Modulen (von links nach rechts). Die Bewertung erfolgt anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).



Die **Bewertung der Begrünungssysteme** (Abbildung 54) erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen.

- Pflanzenarten, welche typischerweise für bodengebundene System eingesetzt werden, verlieren im Winter i.d.R. ihre Blätter. Wandgebundene Systeme hingegen sind meist immergrün und können somit über das ganze Jahr zur Lärminderung in Städten beitragen. Entsprechend wurde die Wirkung von bodengebundenen Begrünungen etwas geringer bewertet als die von wandgebundenen Systemen.
- Der Schallpegel ist abhängig von der Entfernung zur Emissionsquelle. Entsprechend wird die Wirkung einer Fassadenbegrünung in den unteren Geschossen höher als in den oberen Geschossen eingeschätzt (Annahme: Strassenschlucht, Abbildung 51).
- Bei bodengebundenen Systemen ist immer auch die Wuchszeit der Pflanzen in die Betrachtung einzubeziehen – die volle Wirkung stellt sich erst nach einer gewissen Zeit ein (in Abbildung 54 wird von einer ausgewachsenen Begrünung ausgegangen).
- Des Weiteren ist bei bodengebundenen Systemen zu beachten, dass die Pflanzen, abhängig von der Art, nur eine gewisse Wuchshöhe erreichen können (in Abbildung 54 wurde eine max. Wuchshöhe bis zum 3.OG<sup>36</sup> angenommen).
- Wandgebundene Systeme können auch in den oberen Geschossen angewendet werden, wenn die entsprechenden statischen und konstruktiven Vorkehrungen getroffen werden. Auch die Wuchszeit ist bei wandgebundenen Systemen weniger relevant (i.d.R. bereits zu Beginn ein hoher Bedeckungsgrad).
- Generell gilt: Fassadenbegrünungen können einen positiven Beitrag zur Reduktion von Lärm in Städten leisten. Der Schallabsorptionsgrad liegt im Vergleich zu typischen Baumaterialien, wie Beton, verputztes Mauerwerk oder Glas, deutlich höher (Abbildung 53).

Die **Bewertung der PV-Systeme** erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen.

- PV-Fassaden zeichnen sich i.d.R. durch eine glatte, harte Oberfläche aus. Dies führt dazu, dass ein Grossteil des einfallenden Schalls reflektiert wird. Da die meisten Fassaden ebenfalls akustisch harte Oberflächen aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass die Lärmsituation ähnlich bleibt oder sich geringfügig verschlechtert (in Abbildung 52 wurde ein leicht negativer Einfluss dargestellt).
- Auch hier ist die Nähe zur Emissionsquelle entscheidend, in den oberen Geschossen nimmt der Schallpegel i.d.R. ab (Annahme: Strassenschlucht, Abbildung 51). Die Schallabsorption der Fassade wird somit weniger relevant.
- Mit Blick auf den Aspekt «Lärm in Städten» ist davon auszugehen, dass der Einfluss der opaken sowie der transparenten PV-Paneele ähnlich ist.

### **Vergleich zu Dachsystemen (5. Fassade)**

Im Vergleich zu Dachsystemen kann eine **Begrünung an der Fassade** eine höhere Effizienz zur Lärminderung in Städten erzielen (Annahme: Strassenraum, Nähe zur Emissionsquelle, höherer Schallpegel). Bei anderen Emissionsquellen, wie bspw. durch Flugzeuge, können Dachbegrünungen hingegen vorteilhaft sein. **PV-Systeme** würden sich analog verhalten: auf dem Dach würden sich der niedrige Schallabsorptionsgrad der Module wahrscheinlich nicht bemerkbar machen (aber auch hier ist die Lage der Emissionsquelle entscheidend).

---

<sup>36</sup> Ab einer gewissen Wuchshöhe (bspw. 15 m) kann es passieren, dass die Pflanzen im unteren Bereich verkahlt. Dies ist abhängig von der Pflanzenart und wird in der Bewertung der qualitativen Aspekte nicht explizit berücksichtigt.





## 6.2 Luftqualität

### Begriffsdefinition

Durch verschiedene natürliche und anthropogene Prozesse entstehen Schadstoffe, welche sich in der Luft ausbreiten. Diese können die Gesundheit von Mensch und Tier belasten und sich negativ auf unser Ökosystem auswirken. Zu diesen Schadstoffen gehören u.a. **Ozon** ( $O_3$ ), **Feinstaub** (PM10 und PM2.5<sup>37</sup>), **Stickstoffdioxid** ( $NO_2$ ) sowie **Schwefeldioxid** ( $SO_2$ ); (Abbildung 55).

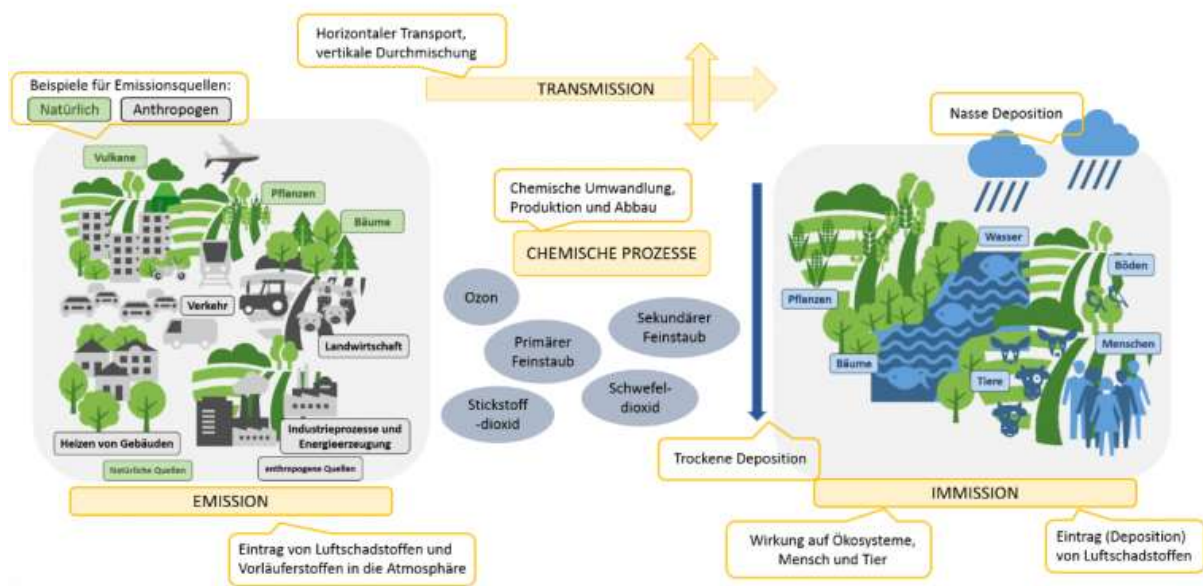


Abbildung 55: Schematische Darstellung der für Luftschadstoffe relevanten Prozesse in der Atmosphäre (Quelle: Umweltbundesamt.de).

### Fokus der Studie

In diesem Kapitel wird betrachtet, welchen Einfluss die Fassadensysteme auf die Luftqualität bezogen auf die zuvor genannten Schadstoffen (Ozon, Feinstaub, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid) nehmen können (Konzentration von Schadstoffen). Ebenso werden Aussagen zu dem Potential zur **CO<sub>2</sub>-Bindung** und **O<sub>2</sub>-Produktion** von Pflanzen getroffen.

### Situation in der Schweiz

Laut dem Bundesamt für Umwelt, hat sich die Luftqualität in der Schweiz seit Mitte der 1980er-Jahre stetig verbessert.<sup>38</sup> Im Bericht «Karten von Jahreswerten der Luftbelastung in der Schweiz - Datengrundlagen, Berechnungsverfahren und Resultate bis zum Jahr 2020» (76) ist die Entwicklung der letzten Jahre veranschaulicht.

In Abbildung 56 sind die Jahresmittelwerte für die oben genannten Faktoren mit Stand 2020 zusammengetragen. Die Grafiken verdeutlichen, dass die Grenzwerte für Feinstaub ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), für

<sup>37</sup> Mit PM10 resp. PM2.5 werden Partikel bezeichnet, welche einen Durchmesser von weniger als 10 resp. 2.5 Tausendstel-Millimeter aufweisen. Diese Partikel können tief in die feinsten Verästelungen der Lunge eindringen und von dort zum Teil in die Lymph- und Blutbahnen gelangen. Definition gemäss Bundesamt für Umwelt (BAFU).

<sup>38</sup> [https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/luftqualitaet-in-der-schweiz.html#:~:text=Die%20Luftqualit%C3%A4t%20der%20Schweiz%20wird,\(NO2\)%20an%20einzelnen%20verkehrsnahe%20Standorten.](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/luftqualitaet-in-der-schweiz.html#:~:text=Die%20Luftqualit%C3%A4t%20der%20Schweiz%20wird,(NO2)%20an%20einzelnen%20verkehrsnahe%20Standorten.)



Stickstoffdioxid ( $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sowie für Schwefeldioxid ( $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) nicht oder nur an vereinzelt Orten überschritten wurden. Die Konzentration an Ozon überschritt den Immissionsgrenzwert ( $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) hingegen grossflächig. Besonders ausgeprägt war dies im Tessin. Ozon wird dabei auch als Sommersmog bezeichnet, da eine erhöhte  $\text{O}_3$ -Belastung der bodennahen Luft insbesondere an sonnigen, windstillen Perioden im Sommer auftritt. Diese erhöhte Konzentration kann sich negativ auf die menschliche Gesundheit, die Vegetation sowie das Klima auswirken. Hauptverursacher sind vor allem der motorisierte Verkehr sowie Industrie und Gewerbe.<sup>39</sup>

### Potential von Fassadenbegrünungen zur Schadstoff-Reduktion

Begrünungsmassnahmen können einen direkten Einfluss auf die Luftqualität nehmen. Das Potential von Begrünungsmassnahmen wurde dabei bereits in verschiedenen Studien untersucht (1), (51), (77) und (78). Eine Sammlung der wichtigsten Erkenntnisse daraus ist in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Einfluss von Fassadenbegrünungen auf die Luftqualität.

	Potential von Fassadenbegrünungen (Werte aus der Literatur)	
Ozon-Bindung ( $\text{O}_3$ )	$\varnothing 2.0 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$ (Bereich: $0.5 - 4.4 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$ )	(78)
Feinstaub-Reduktion (PM10)	$\varnothing 1.5 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$ (Bereich: $0.3 - 2.7 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$ )	(78)
Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ )	$\varnothing 1.0 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$ (Bereich: $0.25 - 2.25 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$ )	(78)
Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ )	$0.45 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$	(78)
$\text{CO}_2$ -Bindung	$2.3 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2\text{a}$	(79)
$\text{O}_2$ -Produktion	$1.7 \text{ kg O}_2/\text{m}^2\text{a}$	(79)

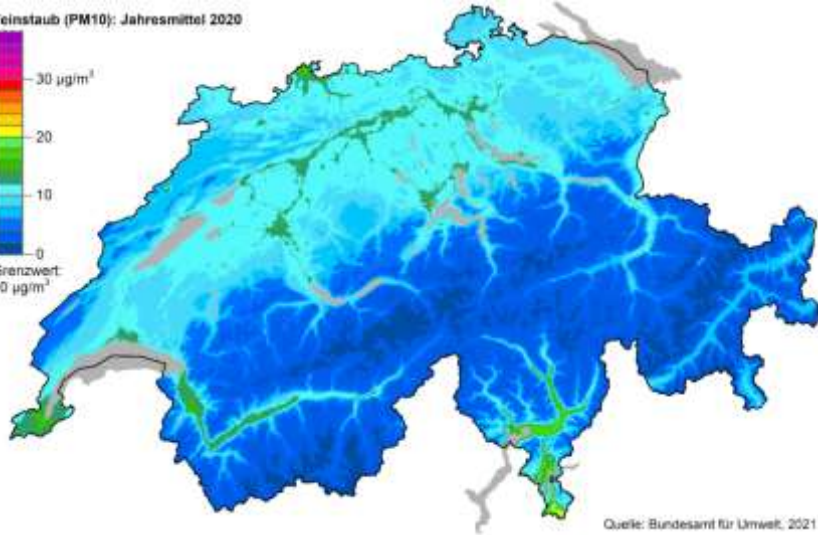
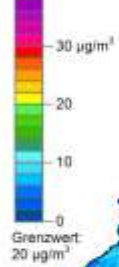
Die Tabelle zeigt in der Literatur zusammengetragene Werte. Das Potential von Fassadenbegrünungen kann dabei, bedingt durch die getroffenen Annahmen und Rahmenbedingungen (Pflanzenart, Schadstoffbelastung, Nähe zur Emissionsquelle etc.), variieren. Die Wirkung von Vegetationsflächen hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab: Ein **hohes Grünvolumen** mit einer **hohen Blattdichte** kann den positiven Effekt der Schadstoffaufnahme verstärken (80). Ebenso kann ein **hoher Bedeckungsgrad** der Bepflanzung und eine **ausreichende Wasserversorgung** die Wirkung begünstigen (81).

Die Filterleistung von Fassadenbegrünungen steigt in Abhängigkeit von der **Schadstoffkonzentration** sowie der **Nähe zur Emissionsquelle** (82). Im städtischen Raum ist insbesondere der Verkehr für einen Grossteil der Schadstoffbelastung verantwortlich. Da die Distanz zur Schadstoffquelle entscheidend ist, sind Grünflächen mit Blick auf die Luftqualität vor allem im unteren Gebäudeteil am effektivsten. Studien haben gezeigt, dass die grösste Schadstoffbelastung in Strassenschluchten im Bereich vom Boden **bis zu einer Höhe von 4.5 m** stattfindet. Beim Einsatz von Begrünungen ist zudem darauf zu achten, dass die **Luftzirkulation** in diesem Bereich nicht eingeschränkt wird. Dies kann bspw. durch dichte Baumstrukturen in engen Strassenquerschnitt passieren, wodurch es zu einem Stau von Luftschadstoffen unterhalb der Baumkrone kommen kann, da der strömungsabhängige Abtransport der Schadstoffe eingeschränkt werden kann. In diesem Fall könnten Begrünungen sogar kontraproduktiv wirken (83) Fassadenbegrünungen schränken die Luftzirkulation i.d.R. jedoch weniger ein und können in einem solchen Kontext zielführender sein.

<sup>39</sup> <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/luftqualitaet-in-der-schweiz/ozon---sommersmog.html>

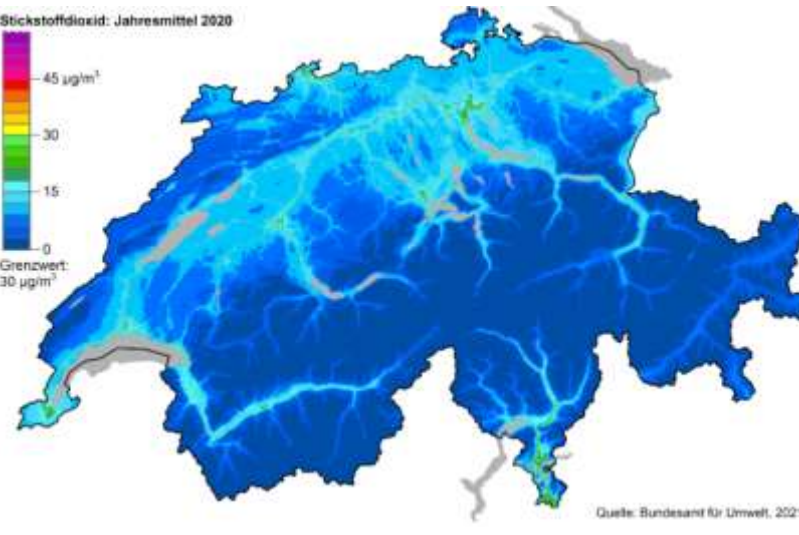
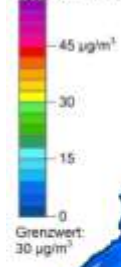


Feinstaub (PM10): Jahresmittel 2020



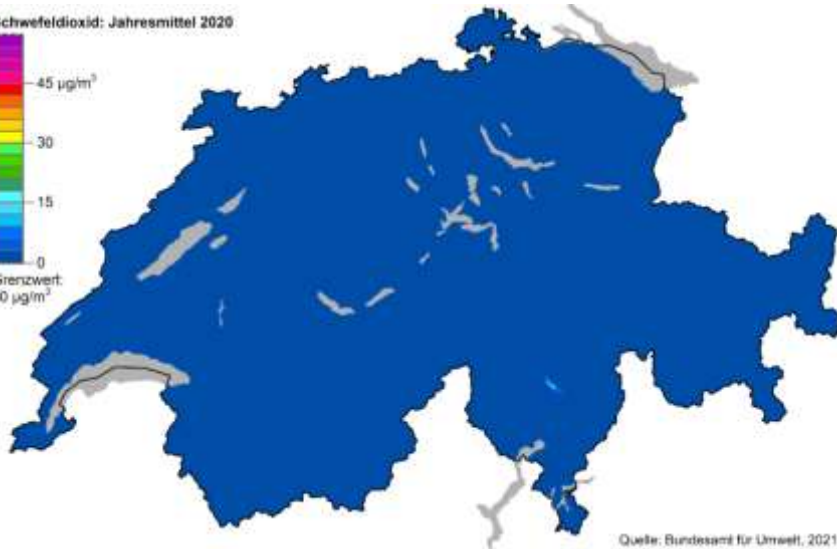
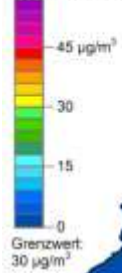
Quelle: Bundesamt für Umwelt, 2021

Stickstoffdioxid: Jahresmittel 2020



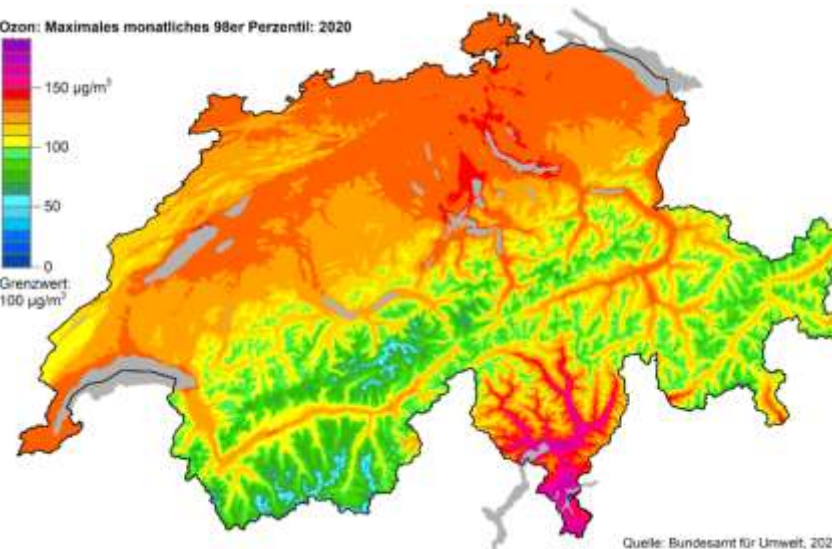
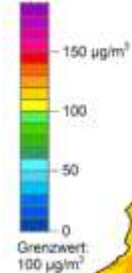
Quelle: Bundesamt für Umwelt, 2021

Schwefeldioxid: Jahresmittel 2020



Quelle: Bundesamt für Umwelt, 2021

Ozon: Maximales monatliches 98er Perzentil: 2020



Quelle: Bundesamt für Umwelt, 2021

Abbildung 56: Karten Feinstaub (PM10), Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid (76) und Ozon in der Schweiz, Jahresmittel für das Jahr 2020.



## Potential von PV-Fassaden

Der Einsatz von **PV-Systemen** kann nicht direkt zum Abtransport von Schadstoffen aus der Luft beitragen, aber indirekt einen grossen Beitrag zur Deckung des Strombedarfs durch erneuerbare Energie und somit zur **Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen** sowie zur **Verbesserung der Luftqualität** leisten. Die Nutzung der Solarenergie reduziert die CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Klimatisierung von Gebäuden (Betriebsphase) und leistet ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung der Energieziele des Bundes.

Bei der Betrachtung sollte, neben der Einsparung im Betrieb, aber auch immer die Graue Energie solcher System berücksichtigt werden. In Kapitel 4.5 wurden die beiden Referenzsysteme für die PV-Fassade (opakes und transparentes Modul) über den gesamten Lebenszyklus (LCA) bewertet.

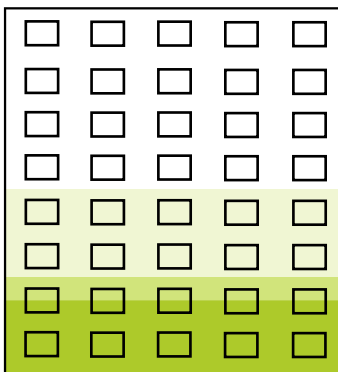
### Bewertung der Referenzgebäude (Darstellungen)

PV-Fassaden nehmen keinen direkten Einfluss auf die Bindung von Luftschadstoffen, weshalb dieses Fassadensystem im Vergleich zur Faserzementplatte (Referenz) als neutral bewertet wurde. Abbildung 57 zeigt die Bewertung für die bodengebundene und wandgebundene Begrünung anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Basierend auf den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche wurden die Systeme hinsichtlich ihres Einflusses auf die Luftqualität bewertet. Die Bewertung beruht auf der Einschätzung der Autorenschaft. Sie kann stark vom umgebenden Kontext, der Schadstoffbelastung und der Entfernung zur Emissionsquelle abhängen. Es wird davon ausgegangen, dass die Orientierung der begrünten Fassade bezüglich des Einflusses auf die Luftqualität keine Rolle spielt.

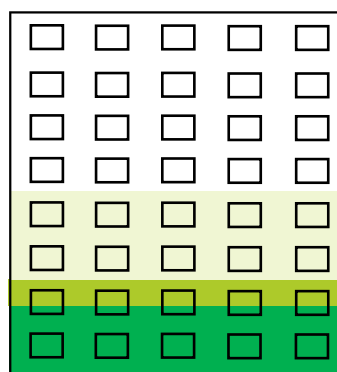
#### Legende



bodengebundene  
Begrünung



wandgebundene  
Begrünung



PV-Fassade,  
opak und transparent

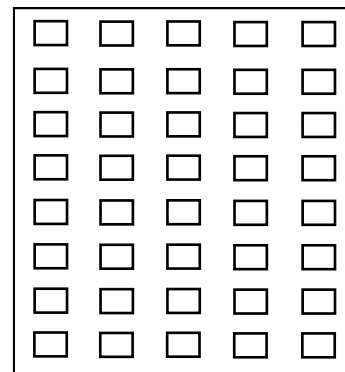


Abbildung 57: Einfluss von Fassadenbegrünungen und PV-Fassaden auf die Luftqualität. Bewertet wurde ein bodengebundenes und ein wandgebundenes System sowie eine PV-Fassade mit opaken und transparenten Modulen (von links nach rechts). Die Bewertung erfolgte anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).



Die **Bewertung der Begrünungssysteme** (Abbildung 57) erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen.

- Pflanzenarten, welche typischerweise für bodengebundene System eingesetzt werden, verlieren im Winter i.d.R. ihre Blätter. Wandgebundene Systeme hingegen sind meist immergrün und können somit über das ganze Jahr einen Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität leisten. Entsprechend wurde die Wirkung von bodengebundenen Begrünungen etwas geringer bewertet als die von wandgebundenen Systemen.
- Da die grösste Schadstoffbelastung in Strassenschluchten bis zu einer Höhe von 4.5 m entsteht (83), können Fassadenbegrünungen in diesem Bereich ihr grösstes Potential ausschöpfen.
- Bei bodengebundenen Systemen ist immer auch die Wuchszeit der Pflanzen in die Betrachtung einzubeziehen – die volle Wirkung stellt sich erst nach einer gewissen Zeit ein (in Abbildung 57 wird von einer ausgewachsenen Begrünung ausgegangen).
- Generell gilt: Fassadenbegrünungen können einen positiven Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität leisten (Abbildung 57).

Der Einsatz von **PV-Systemen** kann nicht direkt zum Abtransport von Schadstoffen aus der Luft beitragen, weshalb die Fassadensysteme hier neutral bewertet wurden. Indirekt kann aber ein grosser Beitrag geleistet werden durch die Deckung des Strombedarfs mittels erneuerbarer Energie, wodurch **CO<sub>2</sub>-Emissionen** reduziert und auch die **Luftqualität** verbessert werden kann.

#### **Vergleich zu Dachsystemen (5. Fassade)**

Da die Filterleistung von Begrünungen von der Schadstoffkonzentration sowie der Distanz zur Emissionsquelle abhängt, kann das Potential von Fassadenbegrünungen (Annahme: Strassenschlucht) vermutlich sogar höher als dasjenige von Dachflächen eingeschätzt werden.

## 6.3 Biodiversität

### **Begriffsdefinition**

Als Biodiversität wird die gesamte Vielfalt des auf der Erde existierenden Lebens bezeichnet. Sie ist damit Grundlage und Potenzial sämtlicher Lebensprozesse und Ökosystemleistungen auf unserem Planeten. Biodiversität ist somit die Voraussetzung für eine gesunde und natürliche Entwicklung aller Lebewesen und Ökosysteme. (84)

Gemäss BAFU erfolgt die Betrachtung der Biodiversität i.d.R. auf drei Ebenen: Lebensräume, Arten und genetische Vielfalt (Abbildung 58).

#### **Lebensräume**



#### **Arten**



#### **Genetische Vielfalt**



Abbildung 58: Die drei Ebenen der Biodiversität (Quelle: AdobeStock).

### **Fokus der Studie**

In diesem Kapitel wurde dargelegt, welchen Beitrag Fassadenbegrünungen und PV-Systeme zur Steigerung der Biodiversität leisten können.



## Situation in der Schweiz

Die Schweiz beherbergt eine grosse biologische Vielfalt, welche u.a. auf die abwechslungsreiche Topografie, die grossen Höhenunterschiede mit entsprechenden klimatischen Gegensätzen oder auch die extensive Nutzung des Kulturlands bis Mitte des letzten Jahrhunderts zurückzuführen ist. Trotzdem wird der aktuelle Zustand vom Bundesamt für Umwelt als unbefriedigend eingeschätzt: «Die Hälfte der Lebensräume und ein Drittel der Arten sind bedroht. Mit dem Rückgang der Artenvielfalt ist auch genetische Vielfalt verloren gegangen. Die Verluste halten auf allen drei Ebenen der Biodiversität an»<sup>40</sup>.

Dabei ist die Biodiversität insbesondere in den Städten eingeschränkt. Der hohe Bebauungsgrad sowie die umfangreiche Infrastruktur führen zu einem hohen Anteil versiegelter Flächen. Der Anteil an Vegetationsflächen ist im Vergleich dazu meist gering. Hinzu kommt, dass diese Grünflächen oftmals nicht miteinander verbunden sind, sodass die Biodiversität zusätzlich eingeschränkt wird (85).

Im Dokument «Strategie Biodiversität Schweiz» (86) des Bundesamts für Umwelt werden 10 strategische Ziele definiert, um die Biodiversität zu fördern. Dazu gehören u.a. die Schaffung einer ökologischen Infrastruktur, den Erhalt und die Förderung der genetischen Vielfalt, die Begünstigung der Biodiversität in Siedlungsräumen oder auch die Verbesserung des Erhaltungszustands von National Prioritären Arten.

## Potential von Fassadenbegrünungen zur Förderung der Biodiversität

Durch die Begrünung von Gebäudefassaden können **zusätzliche Lebensräume** geschaffen werden und ein positiver Beitrag zur **lokalen Artenvielfalt** geleistet werden (77). Um die Wirkung der Vertikalbegrünungen auf die Biodiversität zu fördern, sollten **verschiedene Pflanzenarten** kombiniert werden (87).

Da viele Grünräume in Städten voneinander getrennt sind, können Fassadenbegrünungen dazu beitragen, diese **Lebensräume zu verbinden** oder die **Grünflächen zu erweitern** (Abbildung 59).



Abbildung 59: Durch den gezielten Einsatz von Fassadenbegrünungen können Grünflächen in Städten miteinander verbunden oder erweitert werden (Quelle: AdobeStock).

---

<sup>40</sup> <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/zustand-der-biodiversitaet-in-der-schweiz.html>



Fassadenbegrünungen können dabei unterschiedliche Funktionen übernehmen, die für verschiedene Tierarten lebensnotwendig sind. Sie können bspw. als Fress-, Nist- oder Fangplatz dienen (Abbildung 60).



Abbildung 60: Verschiedene Funktionen einer Fassadenbegrünung für die Tierwelt (links, Quelle: (1)), Fassadenbegrünung als Brutplatz (rechts, Quelle: Reinhard-Tierfoto, Hans Reinhard).

Eine hohe Biodiversität kann ebenso einen **positiven Einfluss auf den Menschen** haben. Der Bezug zur Natur, bspw. das Zuhören oder Beobachten von Vögeln kann Stress mindern und das psychische Wohlbefinden steigern.

### Zusätzliches Potential durch die Kombination mit PV-Systemen

Auch **Solaranlagen** können in der Kombination mit Begrünungen einen Mehrwert zur Biodiversität leisten. Wird die Begrünung durch die Paneele teilweise verschattet, können Lebensräume mit unterschiedlichem Mikroklima entstehen. Dies fördert die Artenvielfalt (88). Für die Kombination mit einer Begrünung eignen sich vor allem transparente Module. Opake Module können Grünflächen gegebenenfalls zu stark verschatten und möglicherweise zu einem Sterben der Pflanzen führen.

### Bewertung der Referenzgebäude (Darstellungen)

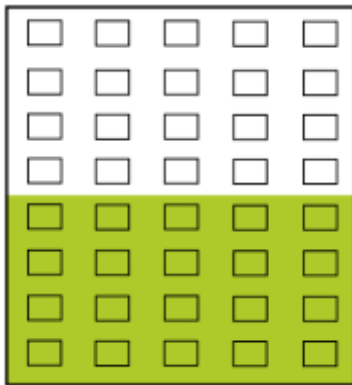
Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche wurden die Fassadensysteme (bodengebundene und wandgebundene Begrünung, transparente und opake PV-Fassade) anhand des Referenzgebäudes «Neubau» hinsichtlich ihres Einflusses auf die Biodiversität analysiert und bewertet (Abbildung 61). Die Bewertung beruht auf der Einschätzung der Autorenschaft. Die Orientierung und die damit verbundene Pflanzenwahl haben dabei einen Einfluss auf das Mikroklima (direkte Sonneneinstrahlung, schattige Plätze). Durch die Unterschiede entstehen verschiedene Lebensräume. Es darf jedoch davon ausgegangen werden, dass vertikale Begrünungen an allen Fassadenseiten einen Mehrwert für die Biodiversität generieren können.



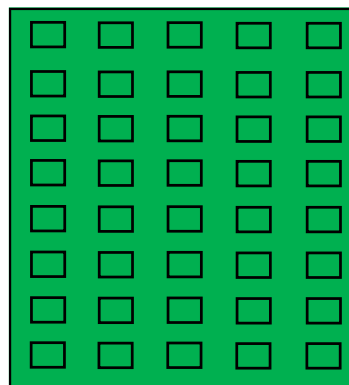
### Legende



bodengebundene  
Begrünung



wandgebundene  
Begrünung



PV-Fassade,  
opak und transparent

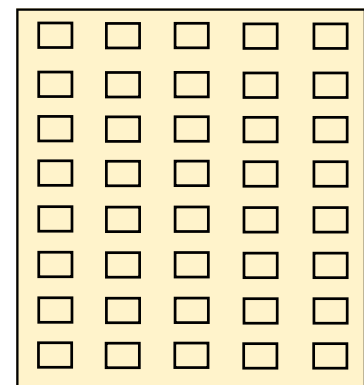


Abbildung 61: Einfluss von Fassadenbegrünungen und PV-Fassaden auf die Biodiversität. Bewertet wurde ein bodengebundenes und ein wandgebundenes System sowie PV-Fassaden mit opaken und transparenten Modulen (von links nach rechts). Die Bewertung erfolgte anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).

Die **Bewertung der Fassadenbegrünungen** in Abbildung 61 erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen.

- Pflanzenarten, welche typischerweise für bodengebundene System eingesetzt werden, verlieren im Winter i.d.R. ihre Blätter. Wandgebundene Systeme hingegen sind meist immergrün und können somit über das ganze Jahr zusätzliche Lebensräume bieten. Entsprechend wurde die Wirkung von bodengebundenen Begrünungen etwas geringer bewertet als die von wandgebundenen Systemen.
- Bei den bodengebundenen Systemen ist zudem die begrenzte Wuchshöhe der eingesetzten Pflanzenarten zu beachten (es wurde eine max. Wuchshöhe bis zum 3.OG angenommen).
- Bei bodengebundenen Systemen ist immer auch die Wuchszeit der Pflanzen in die Betrachtung einzubeziehen – die volle Wirkung stellt sich erst nach einer gewissen Zeit ein (bei der Bewertung wurde von einer ausgewachsenen Begrünung ausgegangen).
- Wandgebundene Systeme können auch in den oberen Geschossen angewendet werden, wenn die entsprechenden statischen und konstruktiven Vorkehrungen getroffen werden. Auch die Wuchszeit ist bei wandgebundenen Systemen weniger relevant (i.d.R. bereits zu Beginn ein hoher Bedeckungsgrad). Werden hingegen wandgebundene Systeme nur im oberen Fassadenteil angewendet, können diese nur bedingt zur Verbindung von Grünräumen beitragen.
- Generell gilt: Fassadenbegrünungen können wichtige Elemente zur Steigerung der Biodiversität in städtischen Räumen darstellen. Durch die Begrünung von Fassaden können neue Lebensräume geschaffen werden. Gleichzeitig können Fassadenbegrünungen dazu beitragen, verschiedene Grünflächen miteinander zu verbinden («Grüngürtel»).





Die **Bewertung der PV-Systeme** (Abbildung 61) erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen.

- PV-Fassaden allein können keinen Beitrag zur Steigerung der Biodiversität leisten, in Kombination mit einer Begrünung kann jedoch ein Mehrwert entstehen (die Verschattung durch PV-Paneele schafft ein anders Mikroklima).
- Für die Kombination von Begrünung und PV eignen sich jedoch insbesondere transparente PV-Module (opake Elemente sind weniger geeignet).
- Durch PV-Fassaden kann die Gefahr der Blendung für Vögel etc. entstehen, weshalb PV-Elemente im Vergleich zur Faserzementplatte leicht negativ bewertet wurden.

#### Vergleich zu Dachsystemen (5. Fassade)

Das Potential von horizontalen Grünflächen, bspw. Wiesen oder begrünten Dächern wird aufgrund der hohen Substratschicht als grösser eingeschätzt als bei einer Fassadenbegrünung. Dies gilt vor allem für alle Tierarten, die im Erdreich leben, wie Würmer, Ameisen etc. Für Vögel und Insekten kann das Potential zwischen grünen Fassaden, Dächern und Bodenflächen (abhängig vom Grünvolumen, Pflanzenarten etc.) als ähnlich eingestuft werden. Im Gegensatz zu Dachbegrünungen, können begrünte Fassaden – je nach Gestaltung und Standort - dazu beitragen, die Verbindung zwischen verschiedenen Grünflächen im städtischen Raum herzustellen und verschiedene horizontale Grünflächen verbinden (bspw. Gründach und Wiese). Die Kombination von PV und Begrünung kann sowohl auf der Dachfläche als auch an der Fassade eine ähnliche Wirkung erzielt werden (Schaffung eines zusätzlichen Mikroklimas).

## 6.4 Regenwasserrückhalt

### Begriffsdefinition

Durch die **Versiegelung von Bodenflächen**, was insbesondere in Städten ein ausgeprägtes Phänomen darstellt, nimmt die Durchlässigkeit und Porosität der Oberflächen ab. Das anfallende Regenwasser kann nicht mehr versickern, der oberflächliche Abfluss steigt und wird in die Kanalisation geleitet. Dies kann zum einen zu einer **hohen Belastung der Kanalisation** führen, andererseits werden die Niederschläge dem lokalen Wasserkreislauf entzogen, wodurch die **Verdunstungs- und Grundwasserneubildungsrate** sinkt (Abbildung 62) (51).

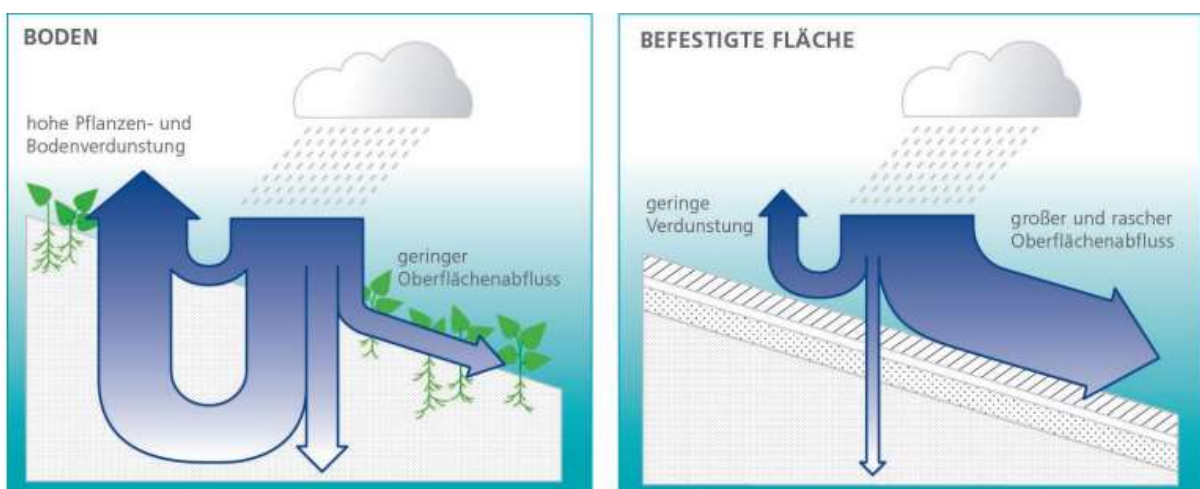


Abbildung 62: Oberflächenabfluss, Versickerung und Verdunstungsrate bei natürlichen Böden (links) und versiegelten Flächen (rechts) (Quelle: DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen).



## Fokus der Studie

In diesem Kapitel wurde dargelegt, welchen Einfluss Fassadenbegrünungen und PV-Systeme auf die Regenwasserrückhaltung bzw. den Wasserkreislauf in Städten haben.

## Situation in der Schweiz

Seit der ersten Arealstatistikerhebung 1985 hat der Anteil der gesamten **versiegelten Fläche** in der Schweiz um 39.9 % zugenommen. Dies liegt an der Zunahme von Wohnflächen und Verkehrswegen sowie am Strukturwandel in der Landwirtschaft.<sup>41</sup> Besonders in Städten nehmen die versiegelten Flächen einen Grossteil der Bodenfläche ein. So sind in der **Stadt Zürich rund 37 %** der Fläche versiegelt (ohne Gewässer, Abbildung 63) (89).

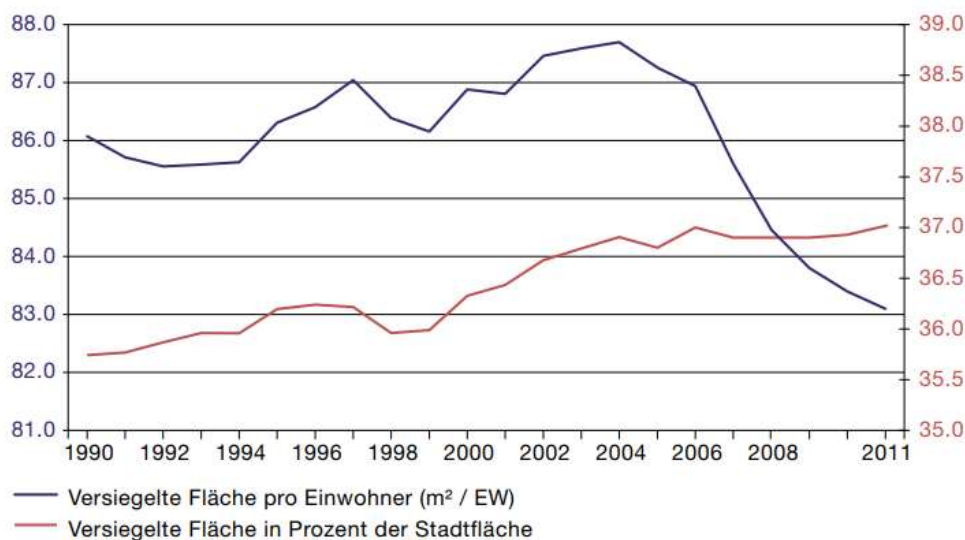


Abbildung 63: Versiegelte Flächen der Stadt Zürich – Zunahme der versiegelten Stadtfläche, aber relative Abnahme versiegelter Flächen pro Person (Stand: 2012) (Quelle: (89)).

## Massnahmen zum Regenwassermanagement

Es gibt verschiedene Massnahmen, für einen guten Umgang mit anfallendem Regenwasser in Städten. Dazu gehört u.a. das Entsiegeln von Bodenflächen, die Nutzung von wasserdurchlässigen Belägen<sup>42</sup> oder der Einsatz von Begrünung (Bäume und Sträucher, Grünflächen, Fassaden- und Dachbegrünungen).

## Potential von Fassadenbegrünungen

Pflanzen und Grünflächen können dazu beitragen, anfallendes Regenwasser aufzunehmen. Dieses wird anschliessend nach und nach mittels Verdunstung wieder an die Atmosphäre abgegeben. Dies hat nicht nur einen kühlenden Effekt (Verdunstungskühlung) auf die Umgebung, sondern trägt auch dazu bei, dass das Kanalisationsnetz weniger belastet wird (51) (Abbildung 64).

<sup>41</sup> <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/bodennutzung-bedeckung/siedlungsflaechen/versiegelungsgrad.html#:~:text=Versiegelte%20Fl%C3%A4chen&text=Die%20gesamte%20versiegelte%20Fl%C3%A4che%20in,versiegelte%20Fl%C3%A4che%202081%20km2>.

<sup>42</sup> <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/wasser-und-geologie/regenwasser/regenwasserbewirtschaftung/>



Abbildung 64: Aufnahme und Verdunstung von Regenwasser über Bäume, Fassaden- und Dachbegrünungen (Quelle: Milosovicova 2010).

Die Regenwasseraufnahme von Begrünungssystemen kann dabei durch folgende Faktoren beeinflusst werden (51):

- Über die Substratschicht kann das anfallende Regenwasser aufgenommen und gespeichert werden (Infiltration). Eine **hohe Substratschicht** kann somit positiv auf die Aufnahmefähigkeit wirken.
- Der Regenwasserrückhalt sowie die anschliessende Verdunstung ist abhängig vom Blattflächenindex sowie der Blattdichte. Je höher das **Grünvolumen**, desto besser.

#### **Einfluss von PV-Fassaden**

PV-Systeme zeichnen sich durch eine glatte, harte Oberfläche aus. Das anfallende Regenwasser kann durch die Module nicht aufgenommen werden. Niederschlag fliesst an den Elementen herunter bis zum Boden. Ist die Bodenfläche nicht versiegelt, kann das anfallende Regenwasser infiltrieren. Bei versiegelten Oberflächen sammelt sich das Wasser und wird i.d.R. in die Kanalisation geleitet. Es ist davon auszugehen, dass andere Materialien, wie bspw. Beton-, Glas- oder Faserzementplatten, eine ähnliche Wirkung haben.

Wichtig ist, dass die PV-Paneele an Fassaden sachgerecht gereinigt werden, um Boden- und Gewässerverschmutzungen zu vermeiden.

#### **Bewertung der Referenzgebäude (Darstellungen)**

Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche wurden nachfolgend die 4 Fassadensysteme anhand des Referenzgebäudes «Neubau» bewertet (Abbildung 65) Die Bewertung beruht auf der Einschätzung der Autorenschaft. Bei der PV-Fassade wird davon ausgegangen, dass sich diese ähnlich wie die Faserzementplatte (Referenz) verhält.

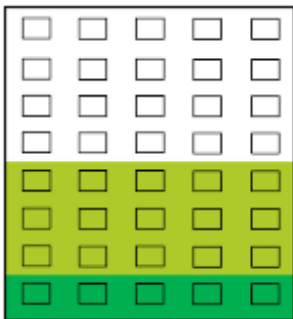


## Legende



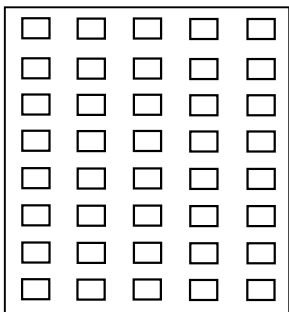
bodengebundene Begrünung

*Nord / West*

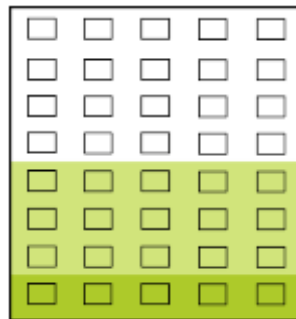


PV-Fassade, opak

*alle Orientierungen*

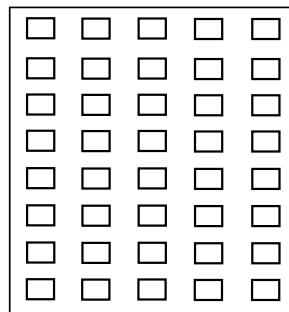


*Süd / Ost*



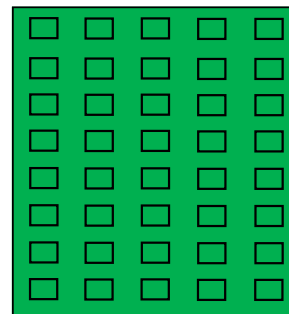
PV-Fassade, transparent

*alle Orientierungen*



wandgebundene Begrünung

*Nord / West*



*Süd / Ost*

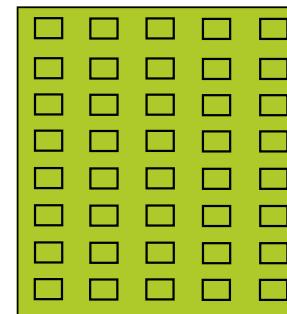


Abbildung 65: Einfluss von Fassadenbegrünungen und PV-Fassaden auf den Aspekt Regenwasserrückhalt. Bewertet wurde ein bodengebundenes und ein wandgebundenes System sowie PV-Fassaden mit opaken Modulen und transparenten Modulen (von oben links nach unten rechts). Die Bewertung erfolgt anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (Faserzementplatte).



Die **Bewertung der Begrünungssysteme** (Abbildung 65) erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen.

- Die Systeme wurden in Abhängigkeit der Orientierung bewertet, da der Mehrwert von Begrünungen an den Wetterseiten (Schweiz: Nord/Nord-West/West (90)) als besonders hoch eingestuft wird.
- Pflanzenarten, welche typischerweise für bodengebundene Systeme eingesetzt werden, verlieren im Winter i.d.R. ihre Blätter. Da die meisten Starkregenereignisse jedoch im Sommer auftreten, wurde dies bei der Bewertung nicht explizit bewertet.
- Bei den bodengebundenen Systemen wird die grösste Wirkung der Systeme aufgrund der Substratschicht (Potential zur Infiltration) im unteren Fassadenbereich eingestuft.
- Bei den bodengebundenen Systemen ist zudem die begrenzte Wuchshöhe der eingesetzten Pflanzenarten zu beachten (es wurde eine max. Wuchshöhe bis zum 3.OG angenommen).
- Bei bodengebundenen Systemen ist immer auch die Wuchszeit der Pflanzen in die Betrachtung einzubeziehen – die volle Wirkung stellt sich erst nach einer gewissen Zeit ein (in Abbildung 65 wird von einer ausgewachsenen Begrünung ausgegangen).
- Die Wirkung der wandgebundenen Systeme wurde aufgrund der Substratschicht, welche sich über die gesamte Fassade erstreckt, als höher eingestuft als die der bodengebundenen Systeme.
- Wandgebundene Systeme können auch in den oberen Geschossen angewendet werden, wenn die entsprechenden statischen und konstruktiven Vorkehrungen getroffen werden. Auch die Wuchszeit ist bei wandgebundenen Systemen weniger relevant (i.d.R. bereits zu Beginn ein hoher Bedeckungsgrad).
- Generell gilt: Fassadenbegrünungen können durch ihr Potential zur Aufnahme und anschliessenden Verdunstung von Regenwasser dazu beitragen, die natürlichen Wasserkreisläufe zu fördern (Abbildung 62).

Der Einsatz von **PV-Systemen** kann nicht zur Regenwasserrückhaltung beitragen, weshalb die Fassadensysteme hier neutral bewertet wurden.

#### **Vergleich zu Dachsystemen (5.Fassade)**

Das Potential von Gründächern zur Regenwasserrückhaltung wird aufgrund des i.d.R. hohen Substratvolumens im Allgemeinen als höher eingestuft als der Einfluss von Fassadenbegrünungen. Wandgebundene Systeme können jedoch ebenso ein hohes Substratvolumen aufweisen, zudem stellt die Fassade meist eine hohe potenzielle Fläche zur Begrünung zur Verfügung. Der Vergleich der Systeme ist somit von vielen Rahmenbedingungen abhängig, weshalb keine konkrete Aussage getroffen werden kann. Beide Varianten, sowohl Dach- als auch Fassadenbegrünungen, sind empfehlenswert (Abbildung 64). Mit Blick auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis kann der Wasserrückhalt mit unversiegelten Flächen in der Umgebung und auf Dachflächen jedoch einfacher erzielt werden.

PV-Elemente auf Dach und Fassade können kein Regenwasser aufnehmen, weshalb beide Systeme diesbezüglich keinen direkten Mehrwert leisten können.

## **6.5 Attraktivität der Aussenräume**

### **Begriffsdefinition**

Gebäude und Aussenräume gestalten Städte und sind essenzielle Bestandteile für deren Aufenthalts- und Wohnqualität. Die Publikation «Bauen an der Stadt – Architektur im Amt für Städtebau» (91) der Stadt Zürich zeigt verschiedene Aspekte zur Beurteilung des städtebaulichen und architektonischen



Entwurfs. Dazu gehören, der **städtebauliche Kontext**, der **Baukörper**, die **Topografie**, die **Erschliessung**, der **architektonische Ausdruck** sowie **Farbe / Material**.

Diese Kriterien sollen eine übergeordnete Betrachtung ermöglichen, um die Qualität baulicher Veränderungen zu bewerten. Dabei nehmen vor allem **gesellschaftliche und baukulturelle Aspekte** einen hohen Stellenwert ein, aber auch die **wirtschaftliche Leistungsfähigkeit** der Stadt muss sichergestellt werden. Hinzu kommen ebenso **ökologische Aspekte**, wie bspw. der Umgang mit Ressourcen (91).

### Fokus der Studie

In diesem Kapitel wird untersucht, welchen Einfluss Begrünungen und PV auf die **Gestaltung von Fassaden** – und somit auf den architektonischen Ausdruck des Baukörpers – sowie die **Aufenthaltsqualität in Städten** haben kann.

### Situation in der Schweiz

Aufgrund des hohen Angebots von Städten, welche Arbeitsplatz, Kultur, Freizeit und vieles mehr vereinen, zieht es immer mehr Menschen in urbane Gebiete. Beispielsweise lebten in der Stadt Zürich im Jahr 2021 436'332 Menschen, gemäss neusten Szenarien könnten es im Jahr 2040 bereits 510'000 Menschen sein (Abbildung 66, mittleres Szenario) (92).

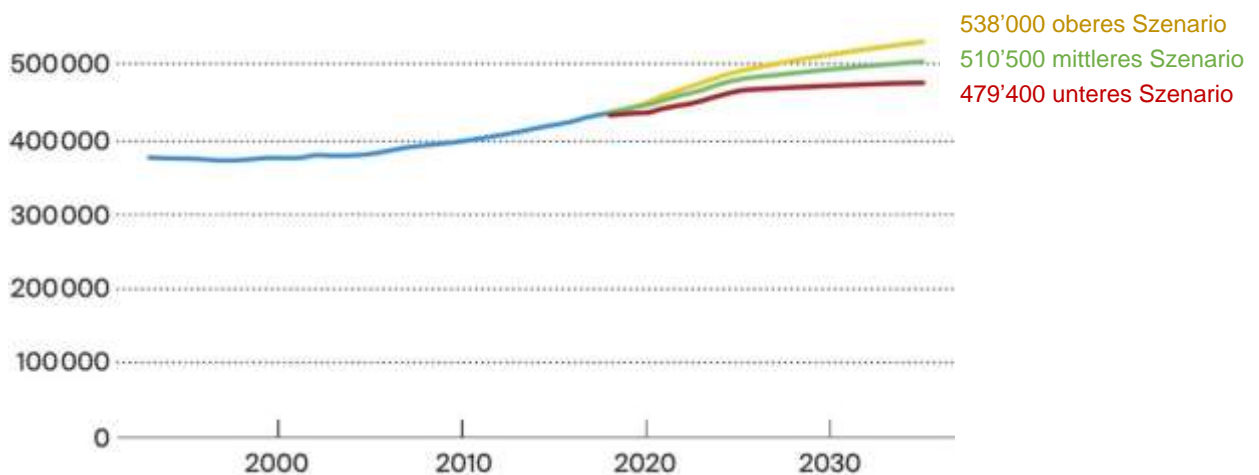


Abbildung 66: Bevölkerungsszenarien der Stadt Zürich (Quelle: (92)).

Mit der zunehmenden Verdichtung von Städten gilt es umso mehr eine hohe Aufenthaltsqualität sicherzustellen, um mögliche soziale Spannungen zu vermeiden, bspw. durch die Schaffung von Grünräumen, die Reduktion von Lärm, Reduzierung von schädlichen Emissionen in der Luft etc. (93). Die Studie «Einfluss von Naturräumen auf die Gesundheit - Evidenzlage und Konsequenzen für Wissenschaft und Praxis» (75) zeigt auf, wie sich Grünräume auf das physische und psychische Wohlbefinden von Menschen auswirken kann.

### Potential von Fassadenbegrünungen zur Gestaltung von Aussenräumen

Für die Aufenthaltsqualität in Städten sind Grünflächen unabdingbar. Die **positiven Wirkungen** können dabei sowohl physisch als auch psychologisch sein. Grünflächen **reduzieren Stress**, fördern die **Gesundheit, Produktivität** und **Kreativität**, dienen als **soziale Treffpunkte**, fördern **sportliche Aktivitäten** und **Bewegung** sowie vieles mehr (Abbildung 67) (75).



Abbildung 67: Grünflächen in städtischen Gebieten (Quelle: AdobeStock).

Fassadenbegrünungen können, trotz begrenztem Platzangebot und ohne bedeutende Beanspruchung der Bodenfläche, dazu beitragen, den Grünanteil in Städten zu erhöhen sowie Strassenräume zu gestalten. Dabei können sie als **architektonisches Element** eingesetzt werden. Die Gestaltung der Fassade kann dabei vielfältig sein und **Wirkungen auf verschiedenen Ebenen** erzielen: **Stadtraum** (u.a. Raumbildung, Lenkung), **Gebäude** (u.a. Proportion, Rhythmus, Modularität, Kontrastbildung) und **Pflanze** (u.a. Struktur/Textur, Flächenbild, Laubfarbe, Wuchsverhalten) (Abbildung 68) (1).

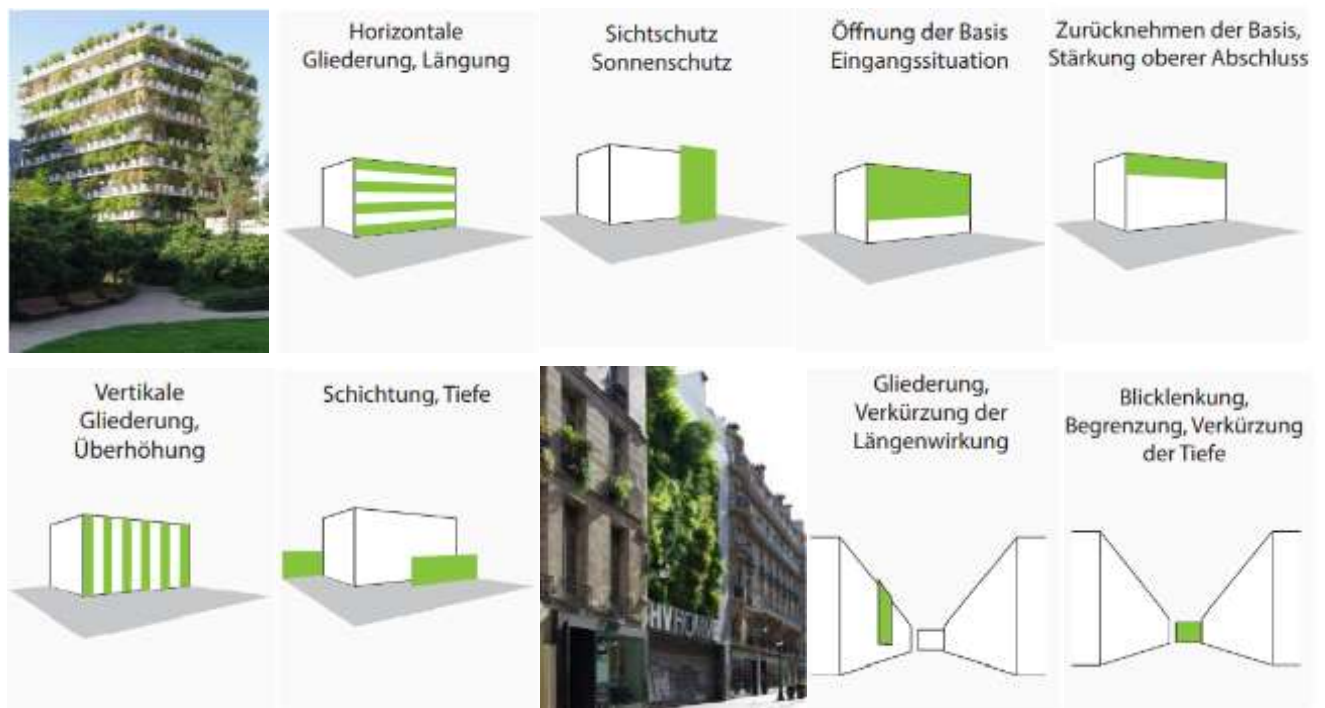


Abbildung 68: Fassadenbegrünungen als Gestaltungselement von Gebäuden und Stadträumen, Beispiele (Quelle: (77)).

Im Gegensatz zu anderen Fassadenoberflächen bleiben Begrünungen zudem im **ständigen Wandel**, u.a. durch Blühzeiten, Wachstum der Pflanzen etc. Das Fassadenbild verändert sich in den Jahreszeiten und erhöht das Naturerlebnis in der Stadt.



### PV-Elemente als architektonisches Gestaltungselement

Nicht nur durch Begrünungen, sondern auch durch **PV-Elemente** können Fassaden gestaltet werden. PV-Module gibt es mittlerweile in **verschiedenen Ausführungen**. Architekten und Planende können hier zwischen **verschiedenen Farben, Mustern** sowie **Transparenzgraden** entscheiden. Dadurch können bewusst Akzente in der Gestaltung von Gebäude gesetzt und Einfluss auf das Stadtbild genommen werden. Einige Beispiele wurden bereits in Kapitel 2.2.1 (Abbildung 22) beschrieben, Abbildung 69 zeigt noch weitere Gestaltungsmöglichkeiten mit PV-Modulen.



Abbildung 69: Gestaltungsmöglichkeiten von PV-Fassaden: verschiedene Farben und Muster von gebäudeintegrierten PV-Modulen (oben, Quelle: Solarnova), Paul-Horn-Arena in Tübingen (unten links, Quelle: Sunways/Ferit Kuyas), Wohnhaus Solaris, Zürich/CH – Architekten Huggenbergerfries (rechts unten, Quelle: Beat-Bühler).

### Bewertung der Referenzgebäude (Darstellungen)

Basierend auf den Erkenntnissen der Literaturrecherche wurden die 4 Fassadensysteme (bodengebundene und wandgebundene Begrünung, transparentes und opakes PV-Modul) anhand des Referenzgebäudes «Neubau» bewertet (Abbildung 70). Die Bewertung beruht auf der Einschätzung der Autorenschaft. Die Orientierung hat dabei keinen direkten Einfluss auf die architektonische Gestaltung der Fassade mit begrüneten und PV-Elementen, die Wirkung kann in allen Ausrichtungen erreicht werden.

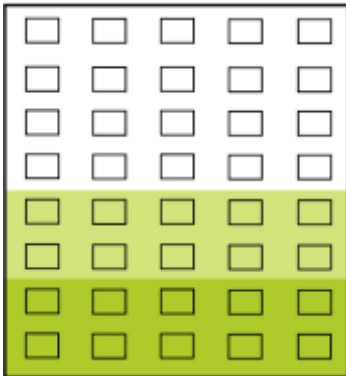




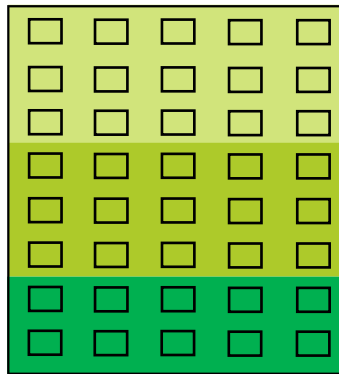
### Legende



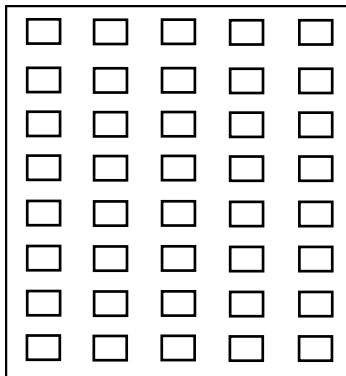
### bodengebundenen Begrünung



### wandgebundene Begrünung



### PV-Fassade, opak



### PV-Fassade, transparent

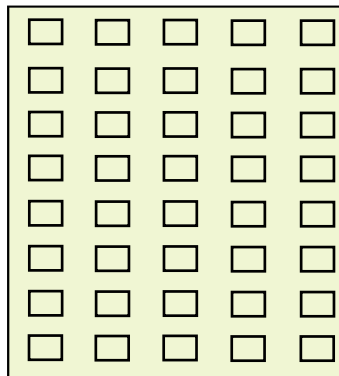


Abbildung 70: Einfluss von Fassadenbegrünungen und PV-Fassaden auf die Attraktivität der Aussenräume. Bewertet wurde ein bodengebundenes und ein wandgebundenes System sowie PV-Fassaden mit opaken und transparenten Modulen (von oben links nach unten rechts). Die Bewertung erfolgte anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).

Die **Bewertung der Begrünungssysteme** (Abbildung 70) erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen:

- Pflanzenarten, welche typischerweise für bodengebundene System eingesetzt werden, verlieren im Winter i.d.R. ihre Blätter. Wandgebundene Systeme hingegen sind meist immergrün und können somit über das ganze Jahr zusätzliche Lebensräume bieten und auch das Fassadenbild in den Wintermonaten gestalten (Attraktivität). Entsprechend wurde die Wirkung von bodengebundenen Begrünungen etwas geringer bewertet als die von wandgebundenen Systemen.
- In den unteren Geschossen wird der Effekt von Begrünungen höher eingestuft als in den oberen Geschossen, da diese präsenter im Blickfeld des Menschen sind und sogar haptisch



wahrgenommen werden können. Aber auch im oberen Bereich kann eine Wirkung erzielt werden («Blickfang»).

- Bei den bodengebundenen Systemen ist zudem die begrenzte Wuchshöhe der eingesetzten Pflanzenarten zu beachten (es wurde eine max. Wuchshöhe bis zum 3.OG angenommen).
- Bei bodengebundenen Systemen ist immer auch die Wuchszeit der Pflanzen in die Betrachtung einzubeziehen – die volle Wirkung stellt sich erst nach einer gewissen Zeit ein (in Abbildung 70 wurde von einer ausgewachsenen Begrünung ausgegangen).
- Wandgebundene Systeme können auch in den oberen Geschossen angewendet werden, wenn die entsprechenden statischen und konstruktiven Vorkehrungen getroffen werden. Auch die Wuchszeit ist bei wandgebundenen Systemen weniger relevant (i.d.R. bereits zu Beginn ein hoher Bedeckungsgrad).
- Generell gilt: Fassadenbegrünungen können als architektonisches Element zur Gestaltung von Stadträumen eingesetzt werden und die Aufenthaltsqualität in urbanen Gebieten erhöhen.

Die **Bewertung der PV-Systeme** erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen:

- Tendenziell wird das Potential von Begrünungen zur Steigerung der Aufenthaltsqualität in Städten als höher eingeschätzt (Erholung, Stressreduktion etc.). PV-Fassaden können aber ebenso als architektonisches Element eingesetzt werden und bieten verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten.
- Im Vergleich zur Referenzfassade (Faserzementplatte) sind die Gestaltungsmöglichkeiten bei opaken PV-Modulen ähnlich (Muster, Farben etc.), bei transparenten Modulen gibt es noch etwas mehr Möglichkeiten durch die verschiedenen Transparenzgrade. Der gestalterische Mehrwert wird deshalb etwas höher eingeschätzt als derjenige von opaken Modulen oder der Referenzfassade.

### **Vergleich zu Dachsystemen (5. Fassade)**

Werden Dachflächen als Aufenthalts-/Gemeinschaftsbereiche genutzt, wird das Potential von Begrünungen als sehr hoch angesehen. Auch PV-Systeme können, je nach Anwendung, die Aufenthaltsqualität erhöhen, bspw. als Pergola (Stromproduktion und Sonnenschutz). Auf die architektonische Gestaltung von Strassenräumen, können diese Systeme jedoch einen geringeren Einfluss nehmen als Fassadenflächen.

## **6.6 Zusammenfassung**

Nachfolgend sind die Erkenntnisse aus der Analyse der qualitativen Aspekte nochmals zusammengefasst. Die verschiedenen Fassadensysteme wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Aspekte Lärm in Städten, Luftqualität, Biodiversität, Regenwasserrückhalt sowie Attraktivität der Aussenräume im Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) beurteilt. In Tabelle 27 werden die verschiedenen Aspekte in Abhängigkeit von der Geschossigkeit bewertet (analog den Darstellungen in Kapitel 6.1 bis Kapitel 6.5).

Die Recherche zeigte, dass insbesondere Begrünungen einen positiven Mehrwert hinsichtlich der untersuchten qualitativen Aspekte leisten können. Die grösste Wirkung können Begrünungen dabei vor allem in den unteren Geschossen, da wo die Nähe zu Emissionsquellen (Lärm oder Schadstoffe) und zum Menschen (Attraktivität der Aussenräume) gegeben ist, erzielen. PV-Fassaden unterscheiden sich nur geringfügig im Vergleich zur Referenzfassade (Faserzementplatten). Bei PV-Paneeelen besteht die Gefahr der Spiegelung, was für einige Tierarten, wie bspw. Vögel, einen negativen Einfluss haben kann. Aufgrund der glatten, harten Oberfläche können sich PV-Paneeelen in den unteren Fassadenbereichen zudem leicht negativ auf die Lärmausbreitung in Strassenräumen auswirken. Auf die Aspekte Luftqualität und Regenwasserrückhalt wurde der Einfluss im Vergleich zur Referenzfassade als neutral bewertet.



Tabelle 27: Übersicht der Ergebnisse der qualitativen Analyse. Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).

Qualitative Aspekte <i>Bewertung im Vergleich zur Referenzfassade (Faserzementplatte hinterlüftet)</i>	Fassadenbegrünung		PV-Fassade	
	bodengebunden <i>(sommergrün, Wuchshöhe ca. 15 m)</i>	wandgebunden <i>(immergrün, modulares System)</i>	opak	transparent
<b>Lärm in Städten – Potenzial in einer engen Strassenschlucht mit starkem Strassenverkehr (~ 80 dB, sehr laut)</b>				
EG	+++	++++	-	-
1.OG	+++	++++	-	-
2.OG	+++	++++	-	-
3.OG	++	+++	neutral	neutral
≥ 4.OG	neutral	++	neutral	neutral
<b>Luftqualität – Potenzial in einer engen Strassenschlucht mit starkem Strassenverkehr</b>				
EG	+++	++++	neutral	neutral
1.OG	++	+++	neutral	neutral
2.OG	+	+	neutral	neutral
3.OG	+	+	neutral	neutral
≥ 4.OG	neutral	neutral	neutral	neutral
<b>Biodiversität – Potenzial zur Förderung von neuen Lebensräumen und der Artenvielfalt, Gefahr durch Spiegelungen, etc.</b>				
EG	+++	++++	-	-
1.OG	+++	++++	-	-
2.OG	+++	++++	-	-
3.OG	+++	++++	-	-
≥ 4.OG	neutral	++++	-	-
<b>Regenwasserrückhalt – Potenzial an den Wetterseiten Nord/Nord-West/West</b>				
EG	++++	++++	neutral	neutral
1.OG	+++	++++	neutral	neutral
2.OG	+++	++++	neutral	neutral
3.OG	+++	++++	neutral	neutral
≥ 4.OG	neutral	++++	neutral	neutral
<b>Attraktivität der Aussenräume – Gestaltungspotenzial durch Farbe, Muster, Transparenzgrade, Blühzeiten, etc.</b>				
EG	+++	++++	neutral	+
1.OG	+++	++++	neutral	+
2.OG	++	+++	neutral	+
3.OG	++	+++	neutral	+
≥ 4.OG	neutral	++	neutral	+

**Legende:**

+ geringer Einfluss    ++ mittlerer Einfluss    +++ hoher Einfluss    ++++ sehr hoher Einfluss

++++ positiver Einfluss    - - - - negativer Einfluss



## 7 Ergebnisse der quantitativen Analyse

In diesem Kapitel wurde der Einfluss der Fassadensysteme auf die folgenden quantitativen Aspekte untersucht:

- Thermisches Wohlbefinden im Innenraum: Temperaturen und Überhitzungsstunden (Sommerhalbjahr)
- Betrieb des Gebäudes: Wärme, Kälte und Stromverbrauch
- Stromproduktion der PV-Fassade, Solarpotential und saisonale Betrachtung
- Betrieb und Erstellung: gesamtheitliche Ökobilanz (LCA)
- Ökonomische Betrachtung: Initial- und Lebenszykluskosten (LCC)

Die Betrachtungen wurden mittels Simulationen und Berechnungen (Kapitel 5.2) durchgeführt. Die quantitative Analyse erfolgte grundsätzlich anhand der drei Referenzgebäude «Neubau», «Altbau» und «sanierter Altbau» (Kapitel 4.4).

Bei der Analyse wurde zwischen der Referenzfassade und den verschiedenen Fassadensystemen unterschieden. Bei den Fassadensystemen wurde die wandgebundene Begrünung sowie die opaken und transparenten PV-Module über die gesamte Fassadenfläche angenommen. Bei der bodengebundenen Begrünung wurde die begrünte Fläche nur in den ersten vier Geschossen (EG bis 3. OG) berücksichtigt, da die Pflanzen eine begrenzte Wuchshöhe haben. D.h. dass die Fassade bei dem «Altbau» / «sanierter Altbau» komplett begrünt ist. Beim «Neubau» hingegen ist nur die untere Hälfte der Fassade begrünt (Abbildung 71). Die Fassadensysteme bilden die Grundlage dieser Studie und wurden qualitativ sowie quantitativ im Detail analysiert.

Bei den Aspekten «Stromproduktion der PV-Fassade, Solarpotential und saisonale Betrachtung», «Betrieb und Erstellung: gesamtheitliche Ökobilanz (LCA)» und «Ökonomische Betrachtung: Initial- und Lebenszykluskosten (LCC)» wurde zudem eine PV-Dachanlage aus Vergleichszwecken in die Betrachtung miteinbezogen. Beim Referenzgebäude «Neubau» wurde die Anlage auf dem Flachdach mit einer Südausrichtung und einem Winkel von 5° positioniert. Beim «Altbau» / «sanierter Altbau» wurde die Anlage am vorhandenen Schrägdach mit einer Süd- und Nord-Ausrichtung<sup>43</sup> sowie mit einem Winkel von 30° positioniert (Abbildung 72). Detailliertere Informationen zu den getroffenen Annahmen in der quantitativen Betrachtung befinden sich in Kapitel 5.2.

---

<sup>43</sup> Gemäss der Studie «Das Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern. Eine Analyse anhand von Sonnendach.ch» (130) ist 56 % die durchschnittliche Fläche eines Schrägdachs, die aufgrund verschiedener Faktoren (Cheminée, Verschattung durch andere Gebäude, Ausrichtung etc.) für eine PV-Anlage genutzt werden kann. Dieser Referenzwert wurde verwendet und die Fläche der PV-Module wurde gleichmässig auf die Dachflächen in Süd- und Nordausrichtung verteilt. Die Dachkombination Süd-Nord würde dabei den gleichen Stromertrag erreichen wie ein Ost-West-Dach. Mit der Süd-Nord-Ausrichtung wurde somit ein Mittelwert und kein Optimum betrachtet. Die Resultate für die PV-Dachanlage könnten bei einer reinen Süd-Ausrichtung somit noch besser sein als in diesem Beispiel angenommen. I.d.R. liegt der Ertrag einer PV-Anlage mit einem Winkel von 30° und einer Nord-Ausrichtung bei 60 % des Stromertrags einer nach Süden ausgerichteten Anlage (maximale Stromproduktion). Bei einer Ost- oder West-Ausrichtung der PV-Anlage können 80 % des Stromertrags einer nach Süden ausgerichteten Anlage erreicht werden.

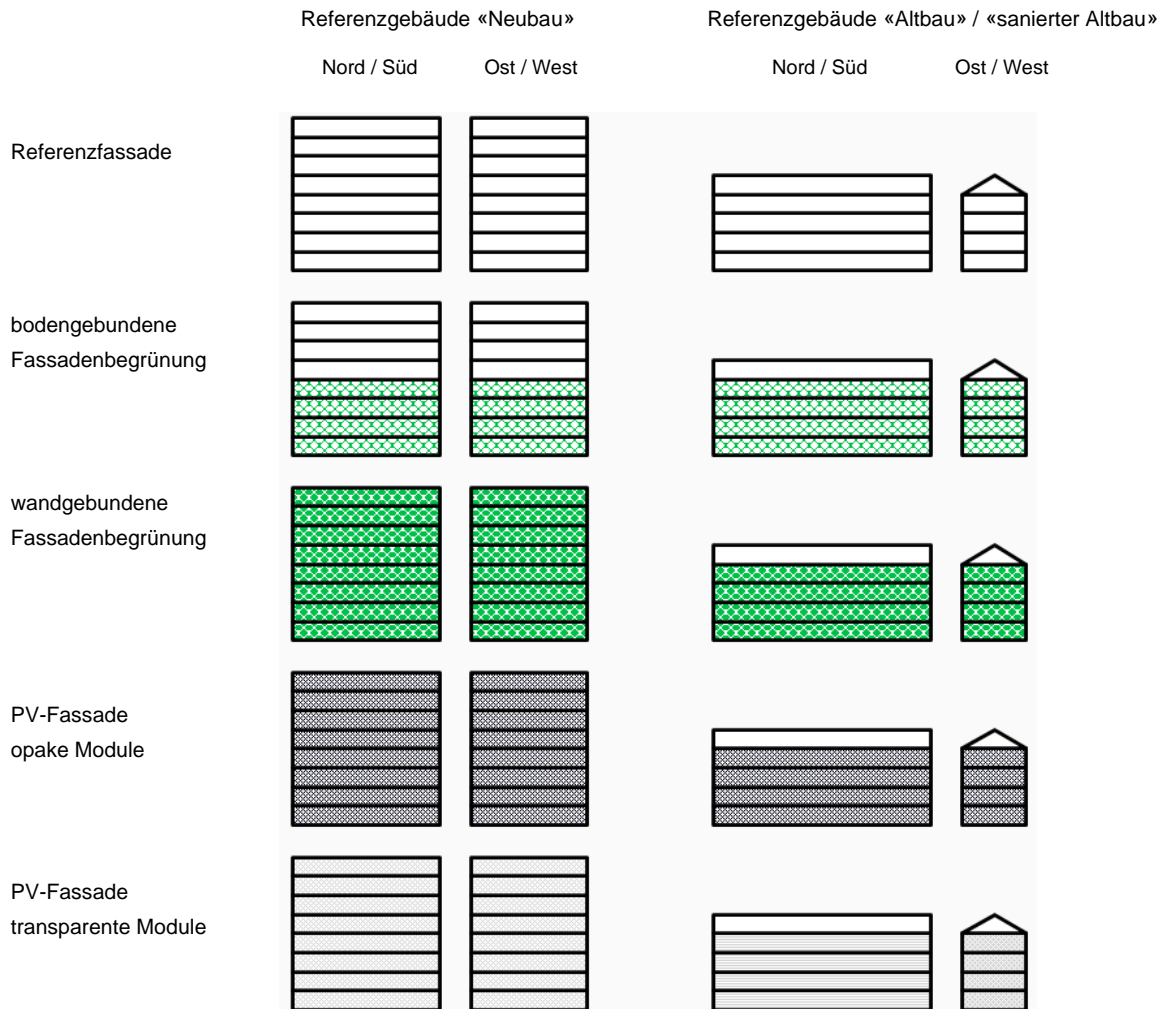


Abbildung 71: Die Referenzgebäude mit der Referenzfassade sowie den untersuchten Fassadensystemen im Überblick. Die bodengebundene Begrünung ist «hellgrün», die wandgebundene Begrünung «dunkelgrün», die PV-Fassade mit opaken Modulen «dunkelgrau» und mit transparenten Modulen «hellgrau» dargestellt. Die Fassadensysteme werden über die gesamte Fassade angenommen, einzig die bodengebundene Begrünung beim «Neubau» ist aufgrund ihrer Wuchshöhe auf 4 Geschosse beschränkt.



Abbildung 72: Die Referenzgebäude mit den untersuchten PV-Dachanlagen im Überblick.



## 7.1 Thermisches Wohlbefinden im Innenraum: Temperaturen und Überheizungsstunden (Sommerhalbjahr)

In diesem Kapitel wurde der Einfluss der Fassadenbegrünungen (bodengebunden und wandgebunden) auf das Innenraumklima anhand der drei Referenzgebäude («Neubau», «Altbau» und «sanierter Altbau») analysiert und im Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) dargestellt. Auf eine detaillierte Analyse der PV-Fassaden wurde verzichtet. Obwohl die Temperatur an den Moduloberflächen höher sein kann, hat dies kaum Auswirkungen auf den Innenraumkomfort, insbesondere bei einer gut gedämmten Gebäudehülle. Bei der Betrachtung wurden die in Kapitel 4.4, Abbildung 35 markierten Zonen untersucht.

### 7.1.1 Referenzgebäude «Neubau»

Abbildung 73 und Tabelle 28 zeigen die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau». Dargestellt sind die maximal empfundenen Temperaturen sowie die Anzahl Überheizungsstunden in den verschiedenen Geschossen und Orientierungen. In Tabelle 28 ist in «kursiv» der Unterschied im Vergleich zur Referenzfassade dargestellt.

Die **nach Osten ausgerichteten Zonen** des Gebäudes sind i.d.R. jeweils am **wärmsten**, gefolgt von jenen nach Norden und danach nach Westen ausgerichteten Zonen. In den **nach Süden ausgerichteten Zonen** bleibt es **kühler**, was an den getroffenen Annahmen für den Sonnenschutz liegt. Eine nach Süden ausgerichtete Zone erhält über den Tag gesehen die höchste Sonneneinstrahlung – Eine Ostfassade erhält lediglich 85 %, eine Westfassade 70 % und eine Nordfassade nur 40 % der Sonneneinstrahlung der Südfassade. Da die Steuerung des Sonnenschutzes diese ab einer Globalstrahlung von mehr als 200 W/m<sup>2</sup> aktiviert, ist dieser an der Südfassade am effektivsten. Diese Annahme führt dazu, dass eine nach Norden orientierte Zone höhere Temperaturen als eine nach Westen oder Süden orientierte Zone aufweist. Der grösste Teil der Sonneneinstrahlung an der Nordfassade ist diffus und die Globalstrahlung überschreitet nur an wenigen Tagen im Jahr den Wert von 200 W/m<sup>2</sup>. Der Sonnenschutz der Nordfassade ist somit nur in seltenen Fällen geschlossen. Bei den grossen Fensterflächen der betrachteten Zonen (2/3 der Fassadenfläche) führt dies zu vergleichsweise hohen Wärmegewinnen.

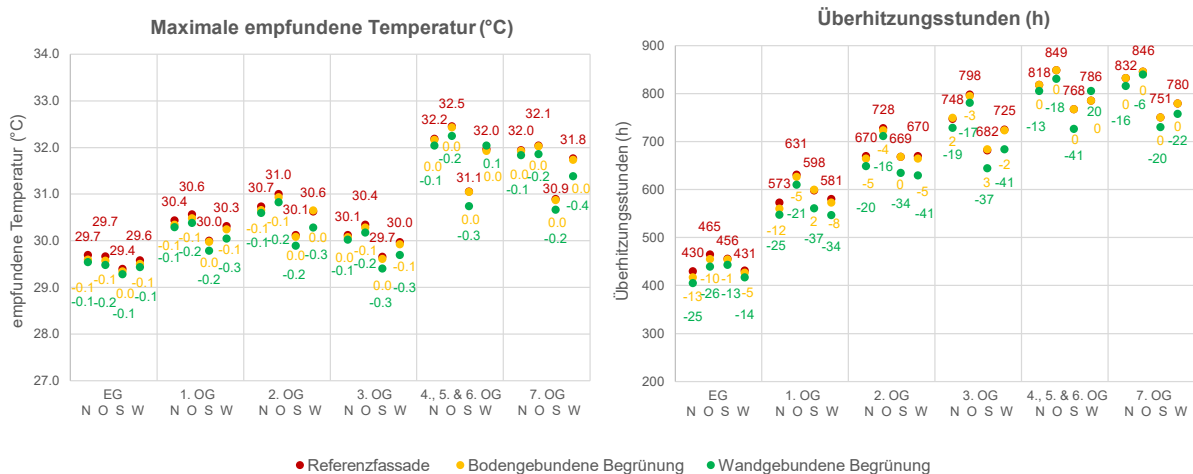


Abbildung 73: Maximal empfundene Temperatur (links) und Überheizungsstunden (rechts) in den betrachteten Zonen in unterschiedlichen Orientierungen sowie Geschossen. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau». Die absoluten Werte für die Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) sind «rot» markiert. Die «gelben» Werte zeigen den Einfluss der bodengebundenen Begrünung (Differenz zur Referenzfassade), die «grünen» Werte zeigen den Einfluss der wandgebundenen Begrünung (Differenz zur Referenzfassade).



Tabelle 28: Maximal empfundene Temperatur und Anzahl Überhitzungsstunden in den betrachteten Zonen in den unterschiedlichen Orientierungen sowie Geschossen. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau». «Kursiv» geschriebene Werte zeigen den Unterschied zur Referenzfassade, eine positive Abweichung (tieferer maximal empfundene Temperaturen und eine geringere Anzahl an Überhitzungsstunden) ist «grün» markiert, eine negative Abweichung (höhere maximal empfundene Temperaturen und eine höhere Anzahl an Überhitzungsstunden) ist «rot» markiert. «Fett» geschriebene Werte zeigen die Zone in jedem Geschoss, in der der positive Einfluss der Fassadenbegrünungen am grössten ist (grösste Reduktion). Die bodengebundene Begrünung hat eine maximale Wuchshöhe von vier Geschossen, in den übrigen Geschossen hat dieses System somit keine Wirkung mehr («grau» markierte Werte).

	Maximal empfundene Temperatur (°C) Abweichung zur Referenzfassade (°C)				Anzahl Überhitzungsstunden (h) Abweichung zur Referenzfassade (h)			
	EG							
	N	O	S	W	N	O	S	W
Referenzfassade	29.7	29.7	29.4	29.6	430.1	465.1	456.1	431.4
<b>bodengebundene Begrünung</b>	<b>29.6</b>	29.6	29.4	29.5	<b>417.3</b>	454.9	454.7	426.7
	<i>-0.10</i>	<i>-0.09</i>	<i>-0.05</i>	<i>-0.08</i>	<i>-12.8</i>	<i>-10.2</i>	<i>-1.4</i>	<i>-4.7</i>
wandgebundene Begrünung	29.6	<b>29.5</b>	29.3	29.4	405.5	<b>439.4</b>	443.0	417.3
	<i>-0.15</i>	<i>-0.18</i>	<i>-0.11</i>	<i>-0.15</i>	<i>-24.6</i>	<i>-25.7</i>	<i>-13.1</i>	<i>-14.1</i>
1. OG								
N	O	S	W	N	O	S	W	
Referenzfassade	30.4	30.6	30.0	30.3	572.7	631.4	598.1	580.7
<b>bodengebundene Begrünung</b>	<b>30.4</b>	30.5	30.0	30.3	<b>560.6</b>	626.5	599.9	572.9
	<i>-0.09</i>	<i>-0.08</i>	<i>-0.03</i>	<i>-0.07</i>	<i>-12.1</i>	<i>-4.9</i>	1.8	<i>-7.8</i>
wandgebundene Begrünung	30.3	30.4	29.8	<b>30.1</b>	547.7	610.5	<b>561.1</b>	547.0
	<i>-0.14</i>	<i>-0.18</i>	<i>-0.22</i>	<i>-0.27</i>	<i>-25.0</i>	<i>-20.9</i>	<i>-37.0</i>	<i>-33.7</i>
2. OG								
N	O	S	W	N	O	S	W	
Referenzfassade	30.7	31.0	30.1	30.6	669.7	727.9	668.5	670.2
<b>bodengebundene Begrünung</b>	<b>30.7</b>	30.9	30.1	30.7	664.5	723.6	668.7	<b>664.9</b>
	<i>-0.08</i>	<i>-0.07</i>	<i>-0.04</i>	<i>0.03</i>	<i>-5.2</i>	<i>-4.3</i>	<i>0.2</i>	<i>-5.3</i>
wandgebundene Begrünung	30.6	30.8	29.9	<b>30.3</b>	649.4	711.6	634.8	<b>629.6</b>
	<i>-0.14</i>	<i>-0.18</i>	<i>-0.23</i>	<i>-0.34</i>	<i>-20.3</i>	<i>-16.3</i>	<i>-33.7</i>	<i>-40.6</i>
3. OG								
N	O	S	W	N	O	S	W	
Referenzfassade	30.1	30.4	29.7	30.0	747.7	798.3	681.8	725.4
<b>bodengebundene Begrünung</b>	30.1	<b>30.3</b>	29.6	29.9	749.8	<b>794.9</b>	684.3	723.7
	<i>-0.05</i>	<i>-0.06</i>	<i>-0.04</i>	<i>-0.05</i>	<i>2.1</i>	<i>-3.4</i>	<i>2.5</i>	<i>-1.7</i>
wandgebundene Begrünung	30.0	30.2	29.4	<b>29.7</b>	728.8	781.2	644.9	<b>684.0</b>
	<i>-0.10</i>	<i>-0.17</i>	<i>-0.25</i>	<i>-0.28</i>	<i>-18.9</i>	<i>-17.1</i>	<i>-36.9</i>	<i>-41.4</i>
4. / 5. / 6. OG								
N	O	S	W	N	O	S	W	
Referenzfassade	32.2	32.5	31.1	32.0	818.3	848.9	767.6	785.7
<b>bodengebundene Begrünung</b>	32.2	32.5	31.1	32.0	818.3	848.9	767.6	785.7
	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
wandgebundene Begrünung	32.1	32.3	<b>30.8</b>	32.1	805.5	831.1	<b>726.3</b>	805.5
	<i>-0.14</i>	<i>-0.21</i>	<i>-0.31</i>	<i>0.08</i>	<i>-12.8</i>	<i>-17.8</i>	<i>-41.3</i>	<i>19.8</i>
7. OG								
N	O	S	W	N	O	S	W	
Referenzfassade	32.0	32.1	30.9	31.8	832.3	845.7	750.5	779.9
<b>bodengebundene Begrünung</b>	32.0	32.1	30.9	31.8	832.3	845.7	750.5	779.9
	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
wandgebundene Begrünung	31.8	31.9	30.7	<b>31.4</b>	816.4	839.8	730.3	<b>758.1</b>
	<i>-0.11</i>	<i>-0.19</i>	<i>-0.23</i>	<i>-0.38</i>	<i>-15.9</i>	<i>-5.9</i>	<i>-20.2</i>	<i>-21.8</i>

Die nach **Osten orientierte Zone im 4. / 5. / 6. OG** ist mit einer maximal empfundenen Temperatur von 32.5 °C und fast 850 Überhitzungsstunden die **wärmste Zone**. Die nach **Süden orientierte Zone im Erdgeschoss** ist mit einer maximal empfundenen Temperatur von 29.4 °C und ca. 450 Überhitzungsstunden die **kühlste Zone**.



Die **bodengebundene Begrünung** ist in einer nach **Norden ausgerichteten Zone** am wirksamsten. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Sonneneinstrahlung auf das Fenster durch die Begrünung reduziert wird (Verschattung). Die maximal empfundene Temperatur kann jedoch nur um 0.1 °C gesenkt und die Anzahl Überhitzungsstunden lediglich um 12.8 h (ca. 3 %) reduziert werden. Der Kühleffekt der bodengebundenen Begrünung ist im **Erdgeschoss** am grössten, da über die Substratschicht mehr Wasser verdunstet.

Eine **wandgebundene Begrünung** kann einen grösseren Effekt erreichen als eine bodengebundene Begrünung. Die Wirkung ist in einer nach **Westen ausgerichteten Zone** am grössten, gefolgt von einer nach Süden orientierten Zone. Die maximal empfundene Temperatur kann bis zu 0.38 °C (7.OG) gesenkt und die Anzahl Überhitzungsstunden um bis zu 41.4 h (ca. 6 %, 3.OG) reduziert werden. Im Durchschnitt kann eine wandgebundene Begrünung die maximal empfundene Temperatur um ca. 0.2 °C und die Anzahl Überhitzungsstunden um 20 h senken.

### 7.1.2 Referenzgebäude «Altbau»

Abbildung 74 und Tabelle 29 zeigen die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Altbau».

Die **nach Osten ausgerichteten Zonen** des Gebäudes sind wieder am **wärmsten**, gefolgt von jenen nach Westen und danach nach Süden ausgerichteten Zonen. In den **nach Norden ausgerichteten Zonen** bleibt es im Gegensatz zum «Neubau» **kühler**. Trotz der analog getroffenen Annahmen für die Steuerung des Sonnenschutzes gelangen beim «Altbau» weniger Wärmeeinträge in den Innenraum, da der Fensterflächenanteil deutlich geringer ist als beim «Neubau».

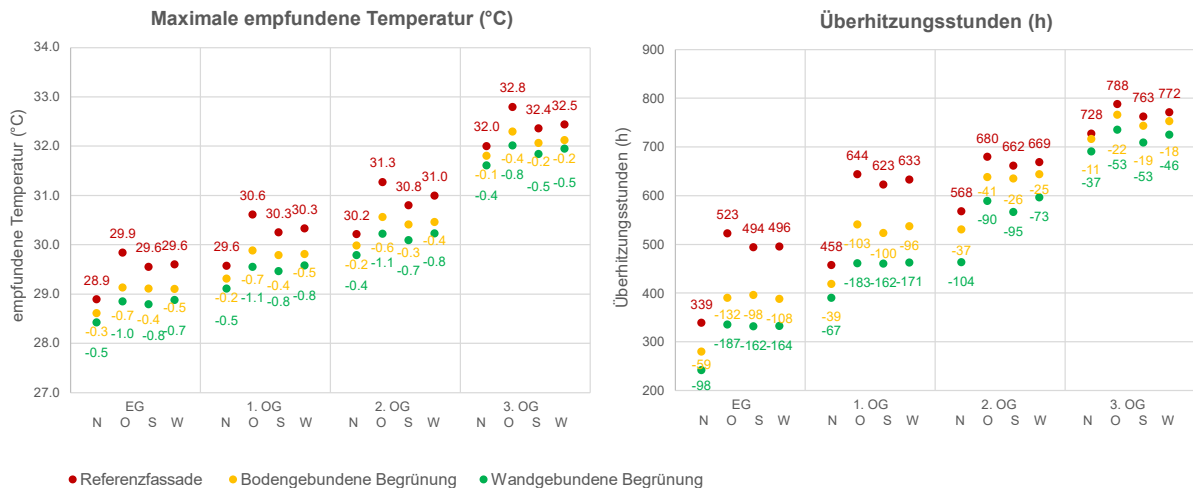


Abbildung 74: Maximal empfundene Temperatur (links) und Überhitzungsstunden (rechts) in den betrachteten Zonen in unterschiedlichen Orientierungen sowie Geschosse. Dargestellt sind die Ergebnisse des Referenzgebäudes «Altbau». Die absoluten Werte für die Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) sind «rot» markiert. Die «gelben» Werte zeigen den Einfluss der bodengebundenen Begrünung (Differenz zur Referenzfassade), die «grünen» Werte zeigen den Einfluss der wandgebundenen Begrünung (Differenz zur Referenzfassade).





Tabelle 29: Maximal empfundene Temperatur und Anzahl Überheizungsstunden in der betrachteten Zone in unterschiedlichen Orientierungen sowie Geschossen. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Altbau». «Kursiv» geschriebene Werte zeigen den Unterschied zur Referenzfassade, eine positive Abweichung (tieferer maximal empfundene Temperaturen und eine geringere Anzahl an Überheizungsstunden) ist «grün» markiert. «Fett» geschriebene Werte zeigen die Zone, wo der Einfluss der Fassadenbegrünungen am grössten ist (grösste Reduktion).

	Maximal empfundene Temperatur (°C) Abweichung zur Referenzfassade (°C)				Anzahl Überheizungsstunden (h) Abweichung zur Referenzfassade (h)			
	EG							
	N	O	S	W	N	O	S	W
Referenzfassade	28.9	29.9	29.6	29.6	339.4	522.8	494.1	496.2
<b>bodengebundene Begrünung</b>	28.6	<b>29.1</b>	29.1	29.1	280.2	<b>390.8</b>	396.6	388.5
	<i>-0.28</i>	<i>-0.71</i>	<i>-0.44</i>	<i>-0.50</i>	<i>-59.2</i>	<i>-132.0</i>	<i>-97.5</i>	<i>-107.7</i>
wandgebundene Begrünung	28.4	<b>28.9</b>	28.8	28.9	241.9	<b>335.7</b>	332.1	332.6
	<i>-0.47</i>	<i>-0.99</i>	<i>-0.76</i>	<i>-0.72</i>	<i>-97.5</i>	<i>-187.1</i>	<i>-162.0</i>	<i>-163.6</i>
1. OG								
	N	O	S	W	N	O	S	W
Referenzfassade	29.6	30.6	30.3	30.3	457.5	644.0	623.3	633.4
<b>bodengebundene Begrünung</b>	29.4	<b>30.0</b>	29.8	29.9	418.9	<b>541.5</b>	523.7	537.7
	<i>-0.22</i>	<i>-0.67</i>	<i>-0.42</i>	<i>-0.46</i>	<i>-38.6</i>	<i>-102.5</i>	<i>-99.6</i>	<i>-95.7</i>
wandgebundene Begrünung	29.1	<b>29.6</b>	29.5	29.6	390.8	<b>461.4</b>	461.1	462.7
	<i>-0.46</i>	<i>-1.06</i>	<i>-0.79</i>	<i>-0.75</i>	<i>-66.7</i>	<i>-182.6</i>	<i>-162.2</i>	<i>-170.7</i>
2. OG								
	N	O	S	W	N	O	S	W
Referenzfassade	30.2	31.3	30.8	31.0	567.9	679.8	661.8	669.3
<b>bodengebundene Begrünung</b>	30.1	<b>30.7</b>	30.5	30.6	531.0	<b>638.7</b>	635.5	644.4
	<i>-0.16</i>	<i>-0.59</i>	<i>-0.31</i>	<i>-0.42</i>	<i>-36.9</i>	<i>-41.1</i>	<i>-26.3</i>	<i>-24.9</i>
wandgebundene Begrünung	29.8	<b>30.2</b>	30.1	30.2	<b>464.0</b>	589.5	566.6	596.5
	<i>-0.42</i>	<i>-1.05</i>	<i>-0.71</i>	<i>-0.76</i>	<i>-103.9</i>	<i>-90.3</i>	<i>-95.2</i>	<i>-72.8</i>
3. OG								
	N	O	S	W	N	O	S	W
Referenzfassade	32.0	32.8	32.4	32.5	727.9	788.3	762.9	771.7
<b>bodengebundene Begrünung</b>	31.9	<b>32.4</b>	32.2	32.2	716.6	<b>766.2</b>	743.5	753.4
	<i>-0.10</i>	<i>-0.36</i>	<i>-0.21</i>	<i>-0.21</i>	<i>-11.3</i>	<i>-22.1</i>	<i>-19.4</i>	<i>-18.3</i>
wandgebundene Begrünung	31.6	<b>32.0</b>	31.9	32.0	690.8	735.5	<b>709.7</b>	725.3
	<i>-0.39</i>	<i>-0.78</i>	<i>-0.52</i>	<i>-0.49</i>	<i>-37.1</i>	<i>-52.8</i>	<i>-53.2</i>	<i>-46.4</i>

Die nach **Osten orientierte Zone im 3. OG** mit einer maximal empfundenen Temperatur von 32.8 °C und fast 800 Überheizungsstunden ist die **wärmste Zone**. Die nach **Norden orientierte Zone im Erdgeschoss** mit einer maximal empfundenen Temperatur von 28.9 °C und ca. 340 Überheizungsstunden ist die **kühlste Zone**.

Die **bodengebundene Begrünung** ist jeweils in den nach **Osten ausgerichteten Zonen** am wirksamsten, gefolgt von den nach Westen und Süden ausgerichteten Zonen, wobei der Kühleffekt ähnlich ist. Die maximal empfundene Temperatur kann bis ca. 0.7 °C reduziert und die Anzahl Überheizungsstunden um bis zu 132 h (ca. 25 %) gesenkt werden.

Die **wandgebundene Begrünung** ist ebenso in der nach **Osten ausgerichteten Zonen** am effektivsten, gefolgt von der nach Süden und Westen ausgerichteten Zonen, wobei der Kühleffekt wiederum ähnlich ist. Die maximal empfundene Temperatur kann um bis zu 1.1 °C und die Anzahl Überheizungsstunden um bis zu 187 h (ca. 36 %) gesenkt werden. Die maximal empfundene Temperatur kann im Durchschnitt um 0.7 °C (Süd und West) sowie 0.4 °C (Nord) reduziert werden. In den unteren Geschossen kann die Anzahl Überheizungsstunden stärker reduziert werden als in den obersten Geschossen. Grund dafür ist, dass es bei höheren Werten der maximal empfundenen Temperatur schwieriger ist, die Anzahl Überheizungsstunden zu reduzieren.



### 7.1.3 Referenzgebäude «sanierter Altbau»

Abbildung 75 und Tabelle 30 zeigen die Ergebnisse für das Referenzgebäude «sanierter Altbau».

Die nach **Westen orientierten Zonen** sind jeweils die **wärmsten**, gefolgt von jenen nach Osten und danach nach Süden orientierten Zonen, die etwas geringere Temperaturen aufweisen. In den nach **Norden ausgerichteten Zone** bleibt es i.d.R. **deutlich kühler**.

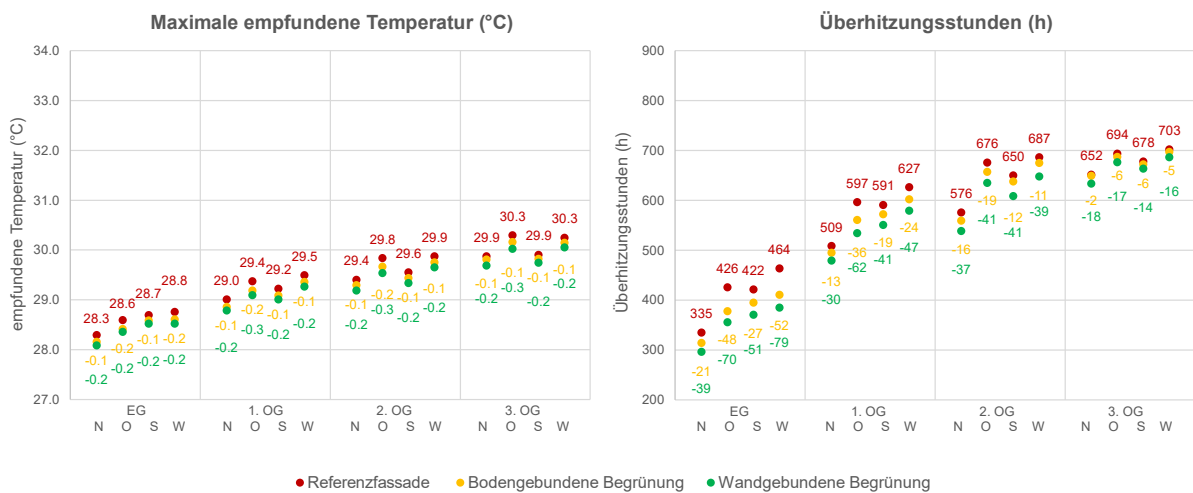


Abbildung 75: Maximal empfundene Temperatur (links) und Überheizungsstunden (rechts) in den betrachteten Zonen in unterschiedlichen Orientierungen sowie Geschosse. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «sanierter Altbau». Die absoluten Werte für die Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) sind «rot» markiert. Die «gelben» Werte zeigen den Einfluss der bodengebundenen Begrünung (Differenz zur Referenzfassade), die «grünen» Werte zeigen den Einfluss der wandgebundenen Begrünung (Differenz zur Referenzfassade).

Die nach **Westen orientierte Zone im 3. OG** ist mit einer maximal empfundenen Temperatur von 30.3 °C und fast 700 Überheizungsstunden die **wärmste Zone**. Die nach **Norden orientierte Zone im Erdgeschoss** ist mit einer maximal empfundenen Temperatur von 28.3 °C und ca. 340 Überheizungsstunden die **kühlste Zone**.

Die **bodengebundene Begrünung** hat allgemein die grösste Wirkung in den **nach Osten ausgerichteten Zonen**, gefolgt von den Orientierungen Süd und West, wobei der Kühleffekt ähnlich ist. Die maximal empfundene Temperatur kann im Erdgeschoss um fast 0.2 °C und die Anzahl Überheizungsstunden um ca. 52 h (ca. 11 %) gesenkt werden.

Die **wandgebundene Begrünung** hat – wie die bodengebundene Begrünung – den grössten Effekt in den **nach Osten orientierten Zonen**, gefolgt von den Orientierungen Süd und West (ähnlicher Effekt). In den nach Norden ausgerichteten Zonen ist die Reduktion der maximal empfundenen Temperatur ebenfalls ähnlich, jedoch ist die Reduktion der Anzahl Überheizungsstunden geringer. Die wandgebundene Begrünung kann die maximal empfundene Temperatur um bis zu 0.3 °C reduzieren und fast 80 Überheizungsstunden (ca. 17 %) einsparen. Ähnlich wie beim Referenzgebäude «Altbau» kann auch beim «sanierten Altbau» die Fassadenbegrünung die Anzahl Überheizungsstunden insbesondere in den unteren Geschossen reduzieren.



Tabelle 30: Maximal empfundene Temperatur und Anzahl Überhitzungsstunden in der betrachteten Zone in unterschiedlichen Orientierungen sowie Geschossen. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «sanierter Altbau». «Kursiv» geschriebene Werte zeigen den Unterschied zur Referenzfassade, eine positive Abweichung (tiefere maximal empfundene Temperaturen und eine geringere Anzahl an Überhitzungsstunden) ist «grün» markiert. «Fett» geschriebene Werte zeigen die Zone, wo der Einfluss der Fassadenbegrünungen am grössten ist (grösste Reduktion).

	Maximal empfundene Temperatur (°C) Abweichung zur Referenzfassade (°C)				Anzahl Überhitzungsstunden (h) Abweichung zur Referenzfassade (h)			
	N	O	S	W	N	O	S	W
	<b>EG</b>							
Referenzfassade	28.3	28.6	28.7	28.8	335.4	426.0	421.6	463.5
bodengebundene Begrünung	28.2	<b>28.4</b>	28.6	28.6	314.4	378.1	395.0	<b>411.2</b>
wandgebundene Begrünung	28.1	<b>28.4</b>	28.5	28.5	296.6	355.6	371.1	<b>385.0</b>
	<b>1. OG</b>							
Referenzfassade	29.0	29.4	29.2	29.5	509.0	596.5	591.3	626.8
bodengebundene Begrünung	28.9	<b>29.2</b>	29.1	29.4	495.5	<b>560.7</b>	572.6	602.7
wandgebundene Begrünung	28.8	<b>29.1</b>	29.0	29.3	479.2	<b>534.6</b>	550.8	579.4
	<b>2. OG</b>							
Referenzfassade	29.4	29.8	29.6	29.9	575.8	676.1	650.4	686.7
bodengebundene Begrünung	29.3	<b>29.7</b>	29.4	29.8	559.9	<b>657.5</b>	638.5	675.4
wandgebundene Begrünung	29.2	<b>29.5</b>	29.3	29.7	539.1	635.2	<b>609.1</b>	647.9
	<b>3. OG</b>							
Referenzfassade	29.9	30.3	29.9	30.3	651.8	693.7	678.2	702.7
bodengebundene Begrünung	29.8	<b>30.2</b>	29.8	30.2	649.5	<b>687.3</b>	672.2	697.5
wandgebundene Begrünung	29.7	<b>30.0</b>	29.8	30.1	<b>633.7</b>	676.6	663.9	687.0

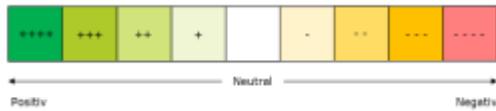
#### 7.1.4 Kapitelzusammenfassung

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sowohl die bodengebundene als auch die wandgebundene Begrünung sich im Sommerhalbjahr **positiv auf die Innenraumtemperatur und die Anzahl Überhitzungsstunden** auswirken können. Die **wandgebundene Fassadenbegrünung ist dabei generell effektiver** als das bodengebundene System. Der **positive Effekt der Begrünungen ist im Altbau klar am grössten**, die maximal empfundene Temperatur wie auch die Anzahl Überhitzungsstunden können hier am deutlichsten reduziert werden. Das liegt daran, dass die Fassade deutlich **weniger gut gedämmt** ist als bei den anderen Referenzgebäuden und die Fassadenbegrünungen somit einen merkbaren Mehrwert hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit im Innenraum leisten kann. Sollen die thermischen Eigenschaften des Gebäudes verbessert werden, ist jedoch zu bedenken, dass eine (zusätzliche) **Dämmung der Aussenhülle effektiver** ist als eine Fassadenbegrünung und entsprechend bevorzugt werden sollte.

Der positive Effekt der Fassadenbegrünung ist beim «**Neubau**» aufgrund der gut gedämmten Fassade hingegen **vergleichsweise gering**. In Abbildung 76 wurde der Einfluss der Fassadenbegrünungen auf den Aspekt «Thermisches Wohlbefinden im Innenraum: Temperaturen und Überhitzungsstunden» anhand des Referenzgebäudes «Neubau» bewertet.

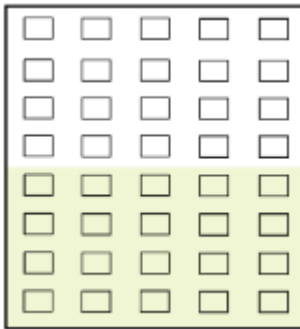


## Legende

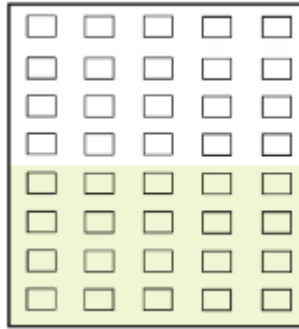


## bodengebundene Begrünung

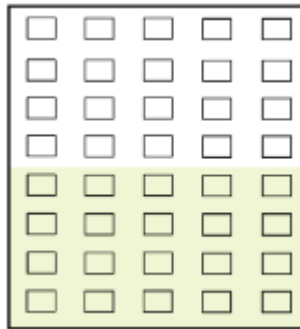
Nord



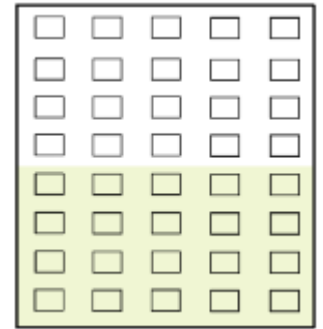
Ost



Süd

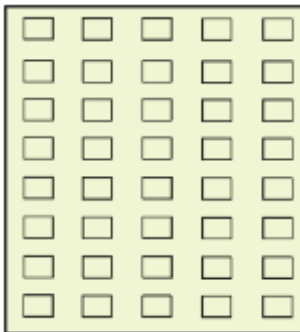


West

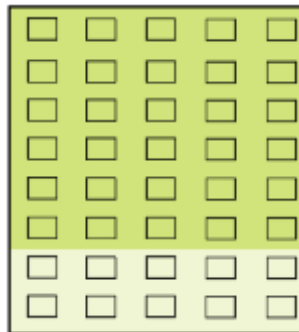


## wandgebundene Begrünung

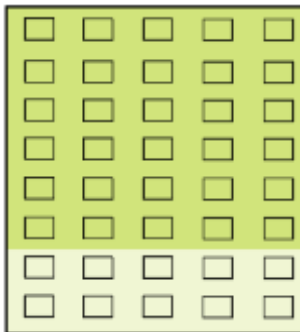
Nord



Ost



Süd



West

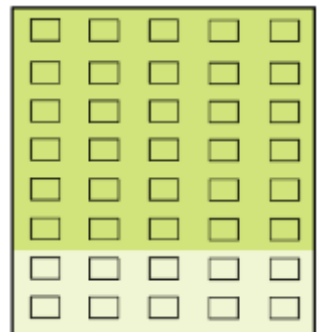


Abbildung 76: Einfluss der Fassadenbegrünungen auf das thermische Wohlbefinden im Innenraum (Temperatur und Überheizungsstunden). Bewertet wurde das bodengebundene und das wandgebundene System in den verschiedenen Orientierungen. Die Bewertung erfolgte anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).

Die Bewertung der **bodengebundenen Begrünung** erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen.

- Aufgrund der gut gedämmten Hülle des «Neubaus» ist der Einfluss der Begrünung sehr gering: Die maximal empfundene Temperatur kann nur um bis zu 0.1 °C gesenkt und die Anzahl der Überheizungsstunden um max. 12.8 h (ca. 3 %) reduziert werden. Der Einfluss der bodengebundenen Begrünung ist somit gering, führt aber trotzdem zu einer leichten Verbesserung im Vergleich zur Referenzfassade.
- In der Abbildung wurden keine farblichen Unterschiede zwischen Geschossen und Orientierungen dargestellt. Da der Einfluss generell sehr gering ist, könnte dies sonst einen falschen Eindruck erwecken.
- Generell kann aber festgehalten werden, dass der Kühleffekt der bodengebundenen Begrünung im Erdgeschoss am grössten ist, da über die Substratschicht mehr Wasser verdunstet.



Die Bewertung der **wandgebundenen Begrünung** erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen.

- Generell ist der **Effekt** der wandgebundenen Begrünung **etwas höher** als der der bodengebundenen Begrünung. Das liegt insbesondere an der Substratschicht, welche bei diesem System nicht nur im unteren Bereich, sondern über die gesamte Fassade verteilt ist und somit mehr Wasser verdunsten kann. Wichtig für den Effekt ist jedoch eine gute und regelmässige Bewässerung.
- Aufgrund der gut gedämmten Hülle des «Neubaus» ist der Einfluss der Begrünung insgesamt aber auch eher gering. Die maximal empfundene Temperatur kann um bis zu 0.38 °C gesenkt und die Anzahl Überhitzungsstunden um max. 41.4 h (ca. 6 %) reduziert werden.
- Die Wirkung der wandgebundenen Begrünung ist insbesondere in einer Westausrichtung am grössten, gefolgt von einer Süd- und Ostausrichtung (in dieser Reihenfolge). Ein Effekt ist in allen Geschossen gegeben, nimmt aber ab dem 2. OG zu, da die Verschattung durch die Nachbargebäude geringer ist und somit mehr Solarstrahlung auf die Fassaden trifft.

Der **Einfluss der PV-Fassaden** kann im Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) als **neutral** bewertet werden, auf eine Darstellung wurde verzichtet.

## 7.2 Betrieb des Gebäudes: Wärme, Kälte und Stromverbrauch

In diesem Kapitel wurden der Einfluss von **Fassadenbegrünungen** auf den **Heizwärme- und Klimakältebedarf** sowie den **Heizwärme- und Klimakälteleistungsbedarf** anhand der drei Referenzgebäude untersucht. Alle getroffenen Annahmen für die Simulationen sind in Kapitel 5.2.1 beschrieben.

Bei den Ergebnissen des Kühlbedarfs wurden verschiedene Faktoren wie die Verschattung, der Windschutz und der Kühleffekt auf die opaken Teile der Gebäudehülle durch die Verdunstung der Fassadenbegrünungen, berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wurde der Aspekt, dass durch eine Fassadenbegrünung die Lufttemperatur in der näheren Umgebung des Gebäudes gesenkt werden kann, was ebenso einen positiven Einfluss auf das Innenraumklima sowie auf den Kältebedarf des Gebäudes haben kann. Dieser Effekt kann mit der Software IDA ICE nicht zuverlässig abgebildet werden, weshalb darauf verzichtet wurde. Des Weiteren wurden auch die Wärmedurchgangskoeffizienten und die Speicherkapazität der Fassade beibehalten. Da bei hinterlüfteten Fassaden der Widerstandskoeffizient der Aussenwandverkleidung gleich Null angenommen wird, wird der allfällige Einfluss der (zusätzlichen) Begrünungssysteme auf die thermische Leistung der Fassade nicht mitberücksichtigt.

Bei den Simulationsergebnissen ist zu berücksichtigen, dass die Fassadenbegrünungen aufgrund der Tiefe der Grünschicht den verglasten Anteil des Fensters verschatten und somit die solaren Gewinne mindern können. Dies führt zu einer leichten Erhöhung des Heizwärmebedarfs im Winter.

Die Simulationen wurden in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wurde nur der Einfluss der Fassadenbegrünung betrachtet, welcher durch die Verschattung sowie den Windschutz entsteht. Anschliessend wurde die Analyse ausgeweitet und zusätzlich der Einfluss der Begrünung aufgrund der Verdunstung auf die opake Gebäudehülle mitberücksichtigt. Die Ergebnisse wurden gesondert aufgeführt und sind als «Verschattung» und «Verschattung + Verdunstung» beschrieben.

Der Einfluss der PV-Fassaden auf den Heizwärme- und Klimakältebedarf sowie den Heizwärme- und Klimakälteleistungsbedarf wurde nicht analysiert, da diese Systeme kaum einen Einfluss nehmen.



### 7.2.1 Referenzgebäudes «Neubau»

Abbildung 77 und Tabelle 31 zeigen die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau».

Beim «Neubau» kann der Klimakältebedarf bzw. der Klimakälteleistungsbedarf den Heizwärmebedarf bzw. der Heizwärmeleistungsbedarf in Zukunft in städtischen Gebieten übersteigen, da das Referenzgebäude ein kompaktes Volumen, einen guten Dämmstandard und einen hohen Fensteranteil aufweist. Die Fassadenbegrünungen können einen positiven Beitrag zur Senkung des Energiebedarfs in den Sommermonaten leisten. In den Wintermonaten steigt der Heizwärmebedarf sowie der Heizwärmeleistungsbedarf durch die Fassadenbegrünungen jedoch aus den zuvor genannten Gründen an.

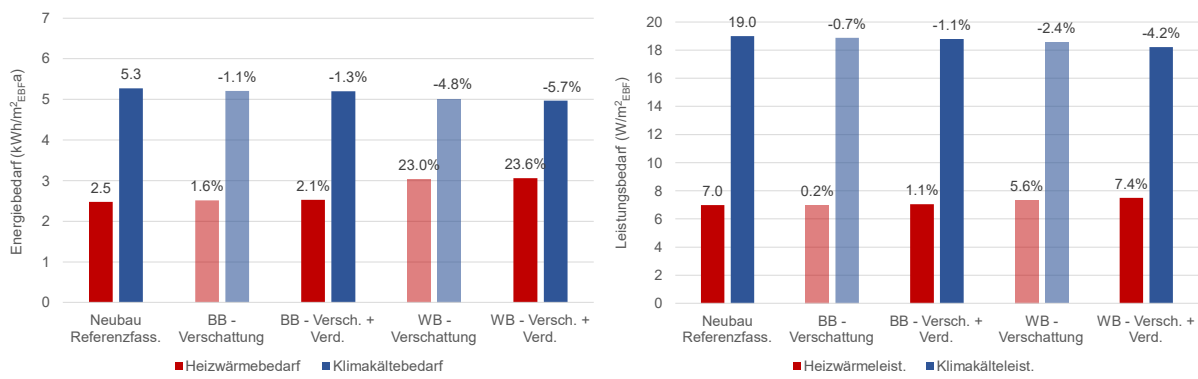


Abbildung 77: Heizwärme- und Klimakältebedarf (links) und Heizwärme- und Klimakälteleistungsbedarf (rechts) des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt sind die Ergebnisse für die Referenzfassade sowie für die bodengebundene Begrünung (BB) sowie die wandgebundene Begrünung (WB).

Tabelle 31: Heizwärme- und Klimakältebedarf sowie Leistungsbedarf des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt sind die Ergebnisse für die Referenzfassade, die bodengebundene und die wandgebundene Begrünung. Der kursive Text zeigt die Differenz zur Referenzfassade, eine positive Abweichung (niedrigerer Energie- und Leistungsbedarf) ist grün markiert, eine negative Abweichung (höherer Energie- und Leistungsbedarf) ist rot markiert.

	Referenz-fassade	bodengebundene Begrünung		wandgebundene Begrünung	
		Verschattung	Verschattung + Verdunstung	Verschattung	Verschattung + Verdunstung
<b>Heizwärmebedarf (kWh/m²_EBFa)</b>	<b>2.5</b>	2.5 <i>1.6%</i>	2.5 <i>2.1%</i>	3.0 <i>23.0%</i>	3.1 <i>23.6%</i>
<b>Klimakältebedarf (kWh/m²_EBFa)</b>	<b>5.3</b>	5.2 <i>-1.1%</i>	5.2 <i>-1.3%</i>	5.0 <i>-4.8%</i>	5.0 <i>-5.7%</i>
<b>Heizwärmeleistung (W/m²_EBF)</b>	<b>7.0</b>	7.0 <i>0.2%</i>	7.1 <i>1.1%</i>	7.4 <i>5.6%</i>	7.5 <i>7.4%</i>
<b>Klimakälteleistung (W/m²_EBF)</b>	<b>19.0</b>	18.9 <i>-0.7%</i>	18.8 <i>-1.1%</i>	18.5 <i>-2.4%</i>	18.2 <i>-4.2%</i>

Die **bodengebundene Begrünung** führt zu einer Reduktion des Klimakältebedarfs um bis zu 1.3 % (Verschattung + Verdunstung), der Heizwärmebedarf steigt um bis zu 2.1 % an. Die Fassadenbegrünung kann den Leistungsbedarf im Sommer um bis zu 1.1 % (Klimakälte) senken, im Winter wird dieser jedoch um 1.1 % (Heizwärme) erhöht. Der Einfluss der Verschattung auf den Heizwärme- und Klimakältebedarf ist dabei deutlich höher als der Einfluss der Verdunstung (Tabelle 31).



Die **wandgebundene Begrünung** hat einen grösseren Einfluss als das bodengebundene System. Der Klimakältebedarf kann um bis zu 5.7 % (Verschattung + Verdunstung) gesenkt werden, jedoch steigt durch dieses Fassadensystem der Heizwärmebedarf um bis zu 23.6 % an. Des Weiteren führt die wandgebundene Begrünung zu einer Reduktion der Klimakälteleistung im Sommer um bis zu 4.2 % und zu einem Anstieg der Heizwärmeleistung von 7.4 %. Der Einfluss der Verdunstung ist auch bei diesem Begrünungssystem gering. Die Ergebnisse könnten jedoch insgesamt etwas besser ausfallen, wenn der Einfluss der Begrünungen in den Simulationen genauer abgebildet werden könnte.

Der Heizwärme- und Klimakälteverbrauch in einem Neubau ist im Vergleich zu den anderen Verbrauchern (technischen Systeme / Anlagen) im Gebäude jedoch gering, insbesondere wenn diese Systeme eine hohe Effizienz haben. Das untersuchte Gebäude zeichnet sich insbesondere durch eine gute Wärmedämmung und Luftdichtheit, eine hohe Kompaktheit (ca.  $0.8 \text{ m}^2_{\text{GEBÄUDEHÜLLE}}/\text{m}^2_{\text{EBF}}$ ) und eine sehr gute Nutzung der solaren Gewinne aus (die umliegenden Gebäude sind halb so hoch wie das Gebäude). Zu berücksichtigen ist auch, dass das simulierte Klima dem Klima im Zeitraum 2060 entspricht, unter Berücksichtigung einer ungünstigeren Emissionsentwicklung, RCP 8.5 – kein Klimaschutz –, und in einem städtischen Umfeld unter dem Einfluss des Wärmeinseleffekts. Tabelle 32 gibt einen Überblick über den Endenergieverbrauch (Strom) der verschiedenen Verbraucher. Heizung und Kühlung sind für weniger als 5 % des Gesamtverbrauchs des Gebäudes verantwortlich (u.a. auch wegen der Kompaktheit des Gebäudes). Der Einfluss der Fassadenbegrünungen auf den Gesamtenergieverbrauch ist somit gering.

Tabelle 32: Endenergieverbrauch (Strom) des Referenzgebäudes «Neubau». Der kursive Text zeigt den prozentualen Anteil des Endenergieverbrauches einer Anlage an dem gesamten Endenergieverbrauch des Gebäudes.

	<b>Endenergieverbrauch (Strom) (kWh/m<sup>2</sup><sub>EBFa</sub>)</b>
<b>Heizung (Wärmepumpe, JAZ: 5.8)</b>	0.4* <i>1%</i>
<b>Kühlung (Wärmepumpe, JAZ: 7)</b>	0.8 <i>3%</i>
<b>Warmwasser (Wärmepumpe, JAZ: 4.2)</b>	3.4 <i>12%</i>
<b>Mechanische Lüftung</b>	2.7 <i>9%</i>
<b>Beleuchtung</b>	3.6 <i>12%</i>
<b>Geräte</b>	18.0 <i>63%</i>
<b>Total</b>	28.8

\* Der Endenergieverbrauch für Heizung und Kühlung ist bei diesem Gebäude aufgrund der hohen Kompaktheit, der hohen solaren Gewinne im Winter, der hohen Luftdichtheit, der hohen Effizienz der Systeme usw. besonders niedrig.



### 7.2.2 Referenzgebäude «Altbau»

Abbildung 78 und Tabelle 33 zeigen die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Altbau».

Beim «Altbau» bleibt der Heizwärmebedarf auch in Zukunft deutlich höher als der Klimakältebedarf, beim Leistungsbedarf ist dies ähnlich. Die Fassadenbegrünungen können im Falle des «Altbaus» sowohl den Energiebedarf als auch den Leistungsbedarf im Sommer und im Winter senken.

Die **bodengebundene Begrünung** kann durch Verschattung und Verdunstung den Klimakältebedarf um bis zu 14.4 % und den Heizwärmebedarf um 1.1 % senken. Die Heizwärmeleistung kann um bis zu 1.8 % und die Klimakälteleistung um bis zu 5.9 % reduziert werden. Der Einfluss der Verschattung ist auch in diesem Fall deutlich höher als der Einfluss der Verdunstung. Die Verdunstung wirkt sich zudem nur auf den Klimakältebedarf und die Klimakälteleistung positiv aus, beim Heizwärmebedarf und bei der Heizwärmeleistung ist der Einfluss geringfügig negativ.

Die **wandgebundene Begrünung** verhält sich analog, nur ist der Effekt etwas deutlicher spürbar. Durch Verschattung und Verdunstung kann der Klimakältebedarf um bis zu 24.9 % und der Heizwärmebedarf um bis zu 2.5 % gesenkt werden. Die Klimakälteleistung kann um 14.4 % und die Heizwärmeleistung um bis zu 3.6 % reduziert werden.

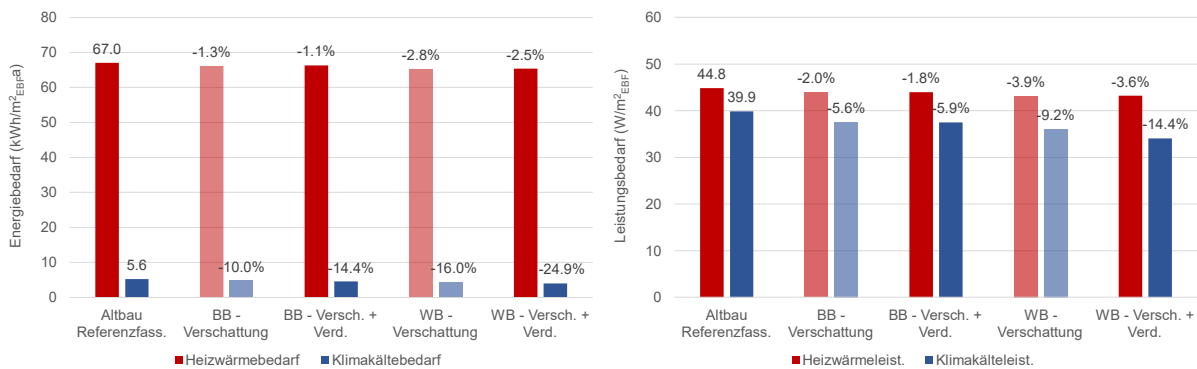


Abbildung 78: Heizwärme- und Klimakältebedarf (links) und Heizwärme- und Klimakälteleistungsbedarf (rechts) des Referenzgebäudes «Altbau». Dargestellt sind die Ergebnisse für die Referenzfassade sowie für die bodengebundene Begrünung (BB) sowie die wandgebundene Begrünung (WB).

Tabelle 33: Heizwärme- und Klimakältebedarf sowie Leistungsbedarf des Referenzgebäudes «Altbau». Dargestellt sind die Ergebnisse für die Referenzfassade, die bodengebundene und die wandgebundene Begrünung. Der kursive Text zeigt die Differenz zur Referenzfassade, eine positive Abweichung (niedriger Energie- und Leistungsbedarf) ist grün markiert.

	Referenz- fassade	bodengebundene Begrünung		wandgebundene Begrünung	
		Verschattung	Verschattung + Verdunstung	Verschattung	Verschattung + Verdunstung
<b>Heizwärmebedarf (kWh/m²_EBFA)</b>	<b>67.0</b>	66.1 <i>-1.3%</i>	66.3 <i>-1.1%</i>	65.1 <i>-2.8%</i>	65.4 <i>-2.5%</i>
<b>Klimakältebedarf (kWh/m²_EBFA)</b>	<b>5.6</b>	5.0 <i>-10.0%</i>	4.8 <i>-14.4%</i>	4.7 <i>-16.0%</i>	4.2 <i>-24.9%</i>
<b>Heizwärmeleistung (W/m²_EBF)</b>	<b>44.8</b>	43.9 <i>-2.0%</i>	44.0 <i>-1.8%</i>	43.1 <i>-3.9%</i>	43.2 <i>-3.6%</i>
<b>Klimakälteleistung (W/m²_EBF)</b>	<b>39.9</b>	37.6 <i>-5.6%</i>	37.5 <i>-5.9%</i>	36.1 <i>-9.2%</i>	34.1 <i>-14.4%</i>





Bei dem «Altbau» kann der Heizwärmeverbrauch einen relevanten Anteil am Gesamtverbrauch des Gebäudes haben. Der Klimakälteverbrauch ist im Gegenteil jedoch klein, wie in den Abbildung 78 und Tabelle 33 gezeigt wurde. Tabelle 34 zeigt den Endenergieverbrauch der verschiedenen Verbraucher (Strom).

Heizung und Kühlung machen ca. 30 % des Gesamtverbrauchs des Gebäudes aus. Da die Kühlung jedoch nur einen sehr geringen Anteil ausmacht, ist die Reduzierung des Gesamtverbrauchs des Gebäudes durch die Fassadenbegrünungen sehr gering.

Tabelle 34: Endenergieverbrauch (Strom) des Referenzgebäudes «Altbau». Der kursive Text zeigt den prozentualen Anteil des Endenergieverbrauches einer Anlage an dem gesamten Endenergieverbrauch des Gebäudes an.

	<b>Endenergieverbrauch (Strom) (kWh/m<sup>2</sup><sub>EBFA</sub>)</b>
<b>Heizung (Wärmepumpe, JAZ: 5.8)</b>	11.4 <i>29%</i>
<b>Kühlung (Wärmepumpe, JAZ: 7)</b>	0.4 <i>1%</i>
<b>Warmwasser (Wärmepumpe, JAZ: 4.2)</b>	3.4 <i>9%</i>
<b>Mechanische Lüftung</b>	0.7 <i>2%</i>
<b>Beleuchtung</b>	5.5 <i>14%</i>
<b>Geräte</b>	18.2 <i>46%</i>
<b>Total</b>	39.6

### 7.2.3 Referenzgebäude «sanierter Altbau»

Abbildung 79 und Tabelle 35 zeigen die Ergebnisse für das Referenzgebäude «sanierter Altbau».

Beim «sanierteren Altbau» bleibt der Heizwärmebedarf künftig ebenso höher als der Klimakältebedarf, beim Leistungsbedarf kehrt sich diese Aussage um. Die Klimakälteleistung wird im Vergleich zur Heizwärmeleistung an Bedeutung gewinnen (bezogen auf den absolut höchsten Leistungswert). Die Fassadenbegrünungen können in diesem Fall den Klimakältebedarf, die Klimakälteleistung und die Heizwärmeleistung positiv beeinflussen, wirken aber leicht negativ auf den Heizwärmebedarf.

Die **bodengebundene Begrünung** kann durch Verschattung und Verdunstung den Klimakältebedarf um 5.7 % senken, führt aber zu einem geringfügigen Anstieg des Heizwärmebedarfs um 1.3 %. Die Klimakälteleistung kann um 2.3 % und die Heizwärmeleistung um 0.2 % reduziert werden. Der Einfluss der Verdunstung ist wiederum sehr gering und wirkt sich im Sommer leicht positiv, im Winter jedoch leicht negativ auf den Energiebedarf aus.

Die **wandgebundene Begrünung** verhält sich analog, nur mit einer leicht höheren Wirkung. Durch Verschattung und Verdunstung kann der Klimakältebedarf um bis zu 11.4 % reduziert werden, der Heizwärmebedarf steigt jedoch geringfügig um 2.7 %. Die Klimakälteleistung kann um 5.6 % und die Heizwärmeleistung um 0.1 % gesenkt werden.

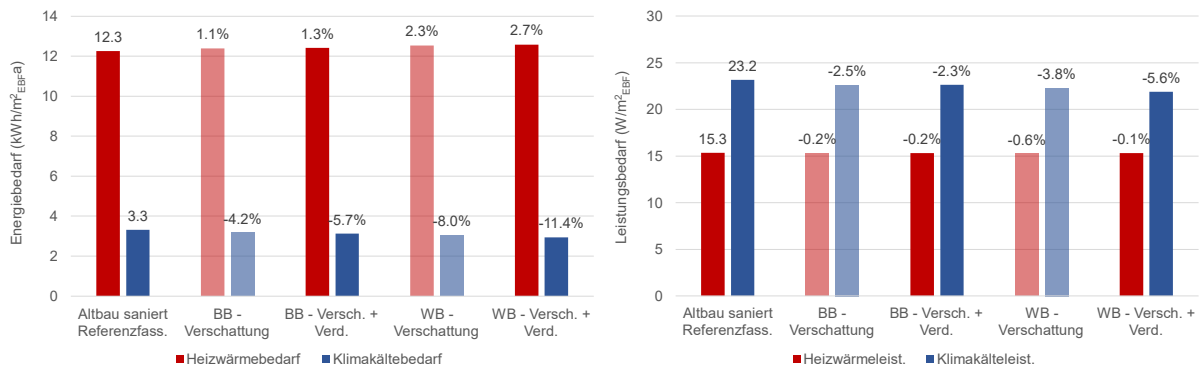


Abbildung 79: Heizwärme- und Klimakältebedarf (links) und Heizwärme- und Klimakälteleistungsbedarf (rechts) des Referenzgebäudes «sanierter Altbau». Dargestellt sind die Ergebnisse für die Referenzfassade sowie für die bodengebundene Begrünung (BB) sowie die wandgebundene Begrünung (WB).

Tabelle 35: Heizwärme- und Klimakältebedarf sowie Leistungsbedarf des Referenzgebäudes «sanierter Altbau». Dargestellt sind die Ergebnisse für die Referenzfassade, die bodengebundene und die wandgebundene Begrünung. Der kursive Text zeigt die Differenz zur Referenzfassade, eine positive Abweichung (niedrigerer Energie- und Leistungsbedarf) ist grün markiert, eine negative Abweichung (höherer Energie- und Leistungsbedarf) ist rot markiert.

	Referenz- fassade	bodengebundene Begrünung		wandgebundene Begrünung	
		Verschattung	Verschattung + Verdunstung	Verschattung	Verschattung + Verdunstung
<b>Heizwärmebedarf</b> (kWh/m²_EBFa)	12.3	12.4 <i>1.1%</i>	12.4 <i>1.3%</i>	12.5 <i>2.3%</i>	12.6 <i>2.7%</i>
<b>Klimakältebedarf</b> (kWh/m²_EBFa)	3.3	3.2 <i>-4.2%</i>	3.1 <i>-5.7%</i>	3.0 <i>-8.0%</i>	2.9 <i>-11.4%</i>
<b>Heizwärmeleistung</b> (W/m²_EBF)	15.3	15.3 <i>-0.2%</i>	15.3 <i>-0.2%</i>	15.3 <i>-0.6%</i>	15.3 <i>-0.1%</i>
<b>Klimakälteleistung</b> (W/m²_EBF)	23.2	22.6 <i>-2.5%</i>	22.6 <i>-2.3%</i>	22.3 <i>-3.8%</i>	21.9 <i>-5.6%</i>

Beim «sanieren Altbau» ist der Heizwärme- und Klimakälteverbrauch im Vergleich zu den anderen Verbrauchern eher gering, insbesondere wenn diese Systeme eine hohe Effizienz haben. Tabelle 36 zeigt den Endenergieverbrauch der verschiedenen technischen Systeme / Anlagen.

Heizung und Kühlung machen ca. 8 % des Gesamtverbrauchs des Gebäudes aus, wobei die Kühlung einen geringen Anteil davon ausmacht. Daher bleibt das Energieeinsparpotenzial durch die Fassadenbegrünungen sehr gering.



Tabelle 36: Endenergieverbrauch (Strom) des Referenzgebäudes «sanierten Altbau». Der kursive Text zeigt den prozentualen Anteil des Endenergieverbrauches einer Anlage an dem gesamten Endenergieverbrauch des Gebäudes an.

	<b>Endenergieverbrauch (Strom) (kWh/m<sup>2</sup><sub>EBFA</sub>)</b>
<b>Heizung (Wärmepumpe, JAZ: 5.8)</b>	2.1 <i>7%</i>
<b>Kühlung (Wärmepumpe, JAZ: 7)</b>	0.2 <i>1%</i>
<b>Warmwasser (Wärmepumpe, JAZ: 4.2)</b>	3.4 <i>11%</i>
<b>Mechanische Lüftung</b>	0.7 <i>2%</i>
<b>Beleuchtung</b>	5.5 <i>18%</i>
<b>Geräte</b>	18.1 <i>60%</i>
<b>Total</b>	30.0

#### 7.2.4 Kapitelzusammenfassung

Fassadenbegrünungen können einen Einfluss auf den Energiebedarf und den Leistungsbedarf von Gebäuden im Sommer und Winter nehmen. Im Sommer ist dieser Effekt, bezogen auf den Klimakälte- bzw. den Klimakälteleistungsbedarf, immer positiv. In den Wintermonaten ist der Einfluss der Fassadenbegrünung, bezogen auf den Heizwärme- bzw. dem Heizwärmeleistungsbedarf, abhängig vom Gebäudestandard. Beim «Altbau», mit einer schlecht gedämmten Hülle und einem geringeren Fensterflächenanteil, wird der Energie- und Leistungsbedarf durch die Begrünung gesenkt. Beim «Neubau», mit einer gut gedämmten Hülle und einem höheren Fensterflächenanteil, führt die Begrünung aufgrund der Beschattung und der dadurch verminderten solaren Einstrahlung zu einem Anstieg des Heizwärme- bzw. des Heizwärmeleistungsbedarf. Mit Blick auf den Stromverbrauch kann gesagt werden, dass der Heizwärme- und Klimakälteverbrauch in einem Neubau im Vergleich zu den anderen Verbrauchern (technischen Systeme / Anlagen) im Gebäude jedoch gering ist, insbesondere wenn diese Systeme eine hohe Effizienz haben.

Insgesamt ist der direkte und in thermodynamischen Simulationen nachweisbare Effekt der Fassadenbegrünungen auf den Energiehaushalt der dahinterliegenden Gebäude jedoch sehr gering und insbesondere auf die Verschattung durch die Begrünung zurückzuführen. Die Verdunstung hat einen kleinen Einfluss. Dabei ist aber zu bedenken, dass die Wärmedurchgangskoeffizienten und die Speicherkapazität der Fassade in den Simulationen beibehalten und der allfällige Einfluss der zusätzlichen Fassadensysteme (Fassadenbegrünung) auf den U-Wert der Fassadekonstruktion nicht berücksichtigt wurde, da bei hinterlüfteten Fassaden der Widerstandskoeffizient der Aussenwandverkleidung i.d.R. als gleich Null angenommen wird.

Der Effekt der Fassadenbegrünungen kann höher sein, wenn die Fassadenbegrünungen an einer Fassade ohne Hinterlüftung angebracht werden. Insbesondere die wandgebundene Begrünung kann aufgrund der Substratschicht den U-Wert der Fassade verbessern und dadurch den Wärmeübergang reduzieren. Insbesondere bei Gebäuden mit einem schlechten Dämmstandard lässt sich so einen merkbaren Effekt erzielen. In den Wintermonaten kann dadurch der Heizwärmeverbrauch gesenkt



werden. Generell ist bei solchen Gebäuden jedoch zunächst über eine (zusätzliche) Dämmung der thermischen Hülle zur Senkung des Heizwärmeverbrauchs nachzudenken, da diese Massnahme in dieser Hinsicht deutlich effektiver als eine Fassadenbegrünung ist.

In Abbildung 80 wurde der Einfluss der Fassadenbegrünungen auf den Aspekt «Betrieb des Gebäudes: Wärme, Kälte und Stromverbrauch» anhand des Referenzgebäudes «Neubau» bewertet.

### Legende



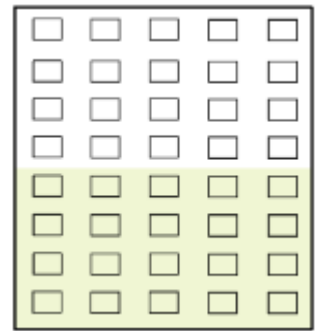
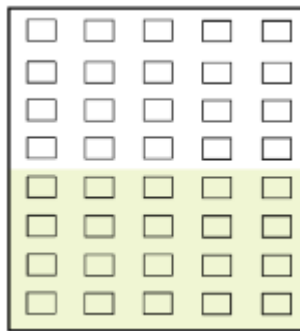
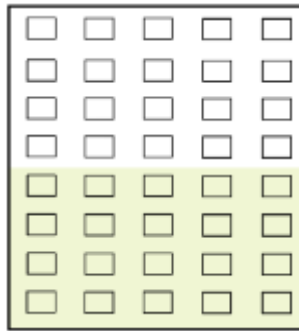
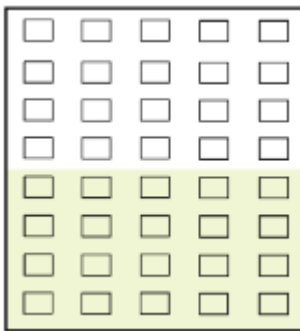
### bodengebundene Begrünung

Nord

Ost

Süd

West



### wandgebundene Begrünung

Nord

Ost

Süd

West

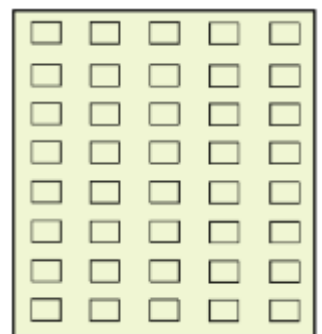
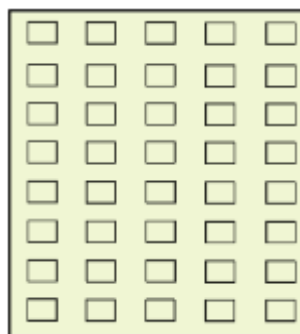
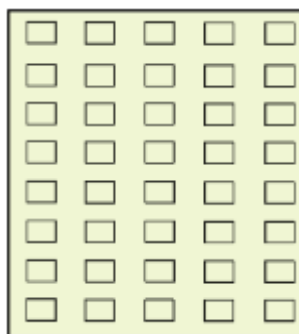
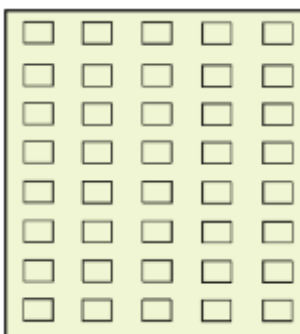


Abbildung 80: Einfluss der Fassadenbegrünungen auf den Aspekt «Betrieb des Gebäudes: Wärme, Kälte und Stromverbrauch». Bewertet wurde das bodengebundene und das wandgebundene System in den verschiedenen Orientierungen. Die Bewertung erfolgte anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).



Die Bewertung der **bodengebundenen Begrünung** erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen:

- Der Einfluss der Fassadenbegrünungen ist insgesamt sehr gering, insbesondere bei der bodengebundenen Begrünung.
- Beim «Neubau» führt die Fassadenbegrünung zu einer Reduktion des Energiebedarfs und des Leistungsbedarfs im Sommer, jedoch zu einer Erhöhung im Winter. Insgesamt ist der Effekt aber **leicht positiv**, da aufgrund der gut gedämmten Hülle und dem hohen Fensterflächenanteil des Neubaus der Energiebedarf für Kühlung in Zukunft mehr Gewicht haben wird.
- Aufgrund des geringen Effekts der bodengebundenen Begrünung wurde keine zusätzliche farbliche Abstufung in den Geschossen und Ausrichtungen vorgenommen. Der Effekt der Verschattung durch die Begrünung wird aber insbesondere an Fassadenflächen mit direkter Sonneneinstrahlung (ohne Verschattung durch Nachbargebäude) am grössten sein. Der Effekt durch die Verdunstung wird insbesondere in den unteren Geschossen auftreten, da hier die Substratschicht der bodengebundenen Begrünung nahe ist.

Die Bewertung der **wandgebundenen Begrünung** erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen:

- Die zuvor getroffenen Aussagen für die bodengebundene Begrünung treffen auch bei der wandgebundenen Begrünung zu.
- Der **Effekt** der wandgebundenen Begrünung ist **etwas höher** als der der bodengebundenen Begrünung. Insgesamt ist dieser aber auch als gering einzustufen.
- Die Betrachtung des Energiebedarfs und des Leistungsbedarfs erfolgte für das gesamte Gebäude, sodass keine farbliche Unterscheidung zwischen den Geschossen und Orientierungen vorgenommen wurde.

Der **Einfluss der PV-Fassaden** kann im Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) als **neutral** bewertet werden, auf eine Darstellung wurde verzichtet.

### 7.3 Stromproduktion der PV-Fassade, Solarpotential und saisonale Betrachtung

In diesem Kapitel wurde das Stromerzeugungspotential der **PV-Fassade (opake Module)** dargestellt. Analysiert wurde das Potential der Fassade zur Stromerzeugung in verschiedenen Ausrichtungen und in verschiedenen Geschossen. Der umgebende Kontext und eine Verschattung durch Nachbargebäude wurde in die Analyse miteinbezogen. Neben der jährlichen wurde auch die saisonale Stromerzeugung betrachtet. Ebenso wurde das Stromerzeugungspotential der PV-Fassade im Tagesverlauf untersucht.

Bei allen Analysen wurden zu Vergleichszwecken immer auch eine PV-Dachanlage betrachtet. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, wurde für die PV-Module an Fassade und Dach der gleiche Wirkungsgrad von 20 % angenommen. Der Wirkungsgrad der PV-Dachanlage liegt jedoch eigentlich bei 24 % und somit etwas höher (Kapitel 4.5). Dies wurde in den Kapiteln 7.5 «Erstellung und Betrieb: gesamtheitliche Ökobilanz (LCA)» und 10.1.3 «Ökonomische Betrachtung: Initial- und Lebenszykluskosten (LCC)» berücksichtigt.



### 7.3.1 Jährliche Stromerzeugung

Abbildung 81 zeigt das **Stromerzeugungspotential** der PV-Fassaden **über das gesamte Jahr**.

Das grösste Potential hat grundsätzlich die Südfassade, gefolgt von den Orientierungen Ost, West und Nord (in dieser Reihenfolge). Deutlich zu erkennen ist der Einfluss durch die umliegenden Gebäude (Verschattung). Im Erdgeschoss sind wesentlich geringere Erträge über die PV-Fassade zu erwarten als im obersten Geschoss. Optimal ist es, wenn die Fassade keine Beschattung (grün-gestrichelte Linie) erhält – Dies würde auf den «Neubau» ab dem 4. OG zutreffen. Die Fassade im obersten Geschoss des «Altbaus» und des «sanierten Altbaus» (3. OG) ist durch die umliegenden Gebäude teilweise verschattet.

Wird das Stromerzeugungspotential an einer Südfassade im 3. OG (ca. 140 kWh/m<sup>2</sup>) mit demjenigen der Nordfassade (ca. 60 kWh/m<sup>2</sup>) verglichen, so ist der Ertrag an der Südfassade fast 2.5-Mal so hoch wie der an der Nordfassade. Ohne Beschattung wäre das Potential an der Südfassade sogar noch höher (ca. 155 kWh/m<sup>2</sup>). Eine PV-Dachanlage hat über das Jahr gesehen grundsätzlich ein höheres Stromerzeugungspotential als eine PV-Fassade, selbst wenn die Fassade nicht verschattet ist und eine Südausrichtung aufweist.

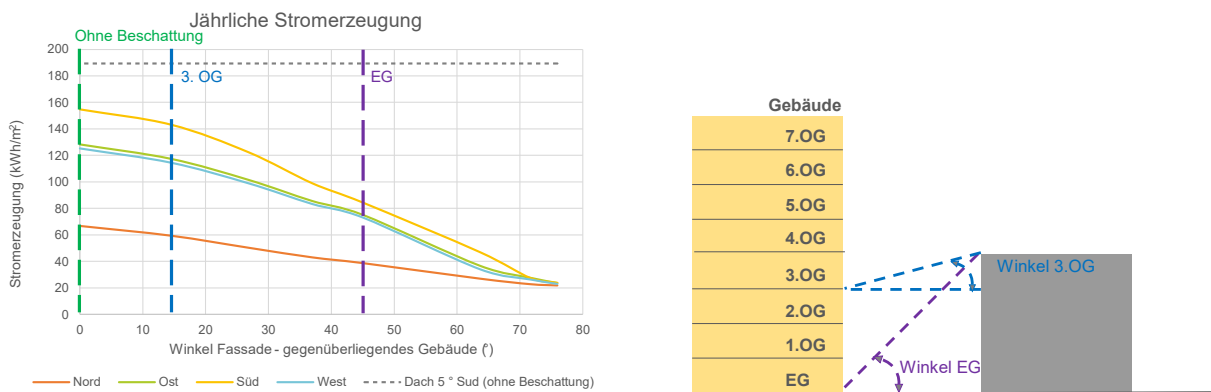
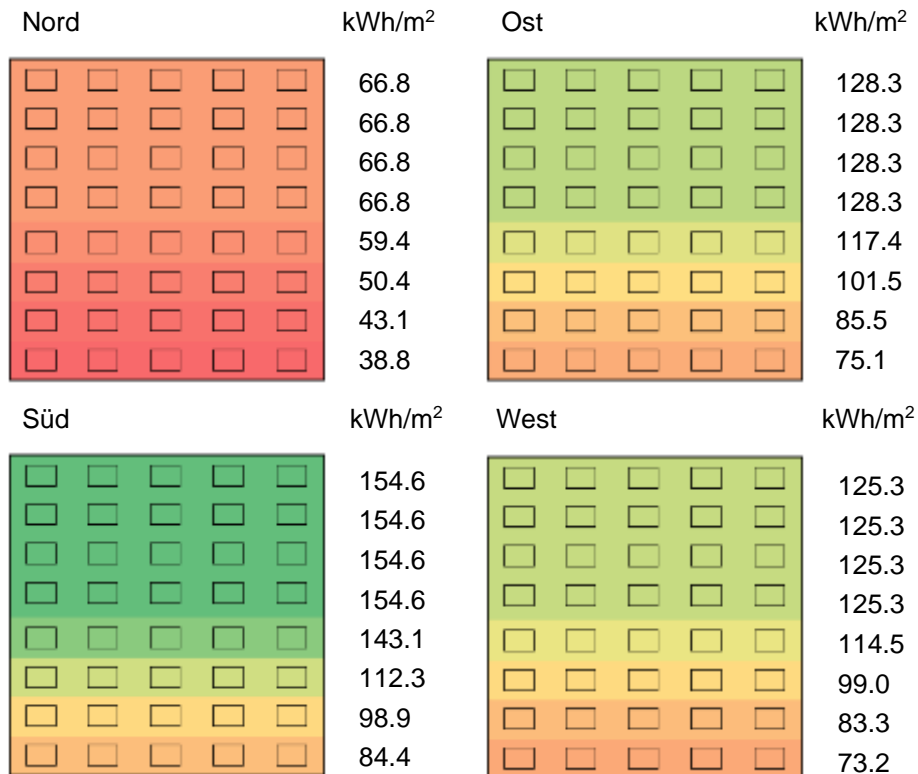
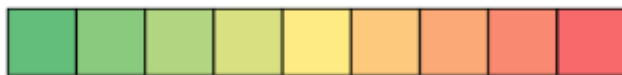


Abbildung 81: Jährliche Stromerzeugung in kWh/m<sup>2</sup> an einer Fassade (vertikale Fläche, 90 °) in den vier Ausrichtungen Nord, Ost, Süd und West. Eine Verschattung durch Nachbargebäude wurde mitberücksichtigt und wurde durch den Winkel zwischen den beiden Gebäudefassaden dargestellt (die blau-gestrichelte Linie stellt die saisonale Stromerzeugung im 3. OG und die lila-gestrichelte Linie die im EG dar, Annahme: beide Fassaden sind parallel zueinander). Zum Vergleich wurde ebenso die jährliche Stromerzeugung über ein Flachdach mit nach Süden ausgerichteten Modulen mit einem Winkel von 5° dargestellt (grau-gestrichelte Linie).

Abbildung 82 zeigt das jährliche Stromerzeugungspotential der PV-Fassaden in den vier Ausrichtungen und in jedem Geschoss des Gebäudes. Das Stromerzeugungspotential an einer unverschatteten Nordfassade (66.8 kWh/m<sup>2</sup>) ist geringer als das Stromerzeugungspotential an einer Ost- und Westfassade im EG (75.1 bzw. 73.2 kWh/m<sup>2</sup>). Das Stromerzeugungspotential an einer verschatteten Südfassade ist ähnlich wie das Stromerzeugungspotential an einer Ost- und Westfassade eines höheren Geschosses (z.B. der Ertrag von 98.9 kWh/m<sup>2</sup> der Südfassade im 1. OG ist ähnlich wie der Ertrag von 101.5 kWh/m<sup>2</sup> der Ostfassade im 2. OG oder 99.0 kWh/m<sup>2</sup> der Westfassade im 2. OG).



### Legende



154.6

96.7

38.8 kWh/m<sup>2</sup>

Abbildung 82: Jährliche Stromerzeugung in kWh/m<sup>2</sup> an einer Fassade (vertikale Fläche, 90°) in den vier Ausrichtungen Nord, Ost, Süd und West. Eine Verschattung durch Nachbargebäude wurde mitberücksichtigt (Annahme: 4-stöckiges Nachbargebäude, beide Fassaden sind parallel zueinander).

### 7.3.2 Saisonale Betrachtung

Neben einer jährlichen wurde auch eine **saisonale Betrachtung** durchgeführt, um das Potential einer PV-Fassade in den verschiedenen Jahreszeiten zu analysieren. Abbildung 83 und



Tabelle 37 zeigen die Ergebnisse für die monatliche Stromerzeugung über die PV-Fassade in den verschiedenen Ausrichtungen und für die PV-Dachanlage (Südausrichtung, Winkel 5 °). **Eine Verschattung durch die umliegenden Nachbargebäude wurde hier zunächst nicht berücksichtigt.**

In den Monaten März bis September ist der Stromertrag über eine PV-Dachanlage höher als bei einer PV-Fassade. In den Monaten Oktober bis Februar kann sich dies umkehren: An einer Südfassade ohne Verschattung kann mehr Strom erzeugt werden als über das Dach. Der grosse Vorteil einer nach Süden ausgerichteten PV-Fassade liegt somit in den Wintermonaten, wenn der Strombedarf am grössten ist. Dabei ist jedoch die Orientierung entscheidend: Eine PV-Fassade mit Ost-, West- oder Nordausrichtung hat immer ein geringeres Potential zur Stromerzeugung als die Dachanlage<sup>44</sup>.

Über das Jahr gesehen kann eine PV-Fassade ohne Verschattung mit einer Orientierung nach Süden ca. 80 %, nach Osten 70 %, nach Westen 65 % und nach Norden 35 % des Stromerzeugungspotentials der PV-Dachanlage erreichen (

---

<sup>44</sup> Allfällige Leistungsverluste der Dachanlage bspw. durch Schnee (Verluste liegen hier i.d.R. zwischen 0 - 5 % und sind stark abhängig vom Standort) oder durch Verschmutzungen (Verluste liegen hier i.d.R. zwischen 1 - 5 %), wurden nicht berücksichtigt.





Tabelle 37).

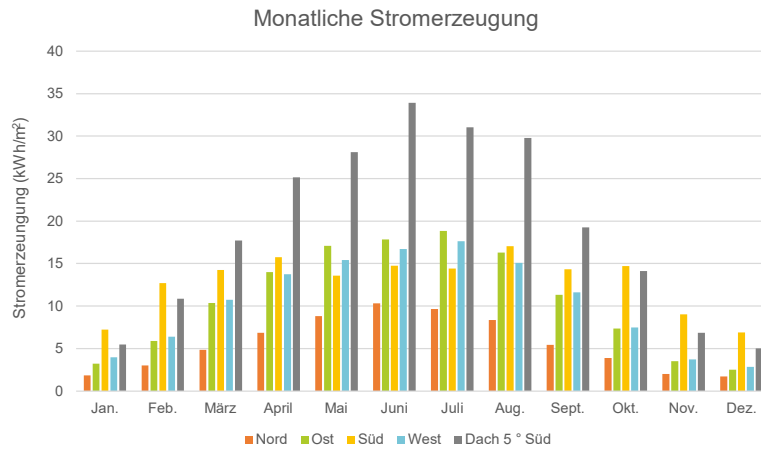


Abbildung 83: Monatliche Stromerzeugung in kWh/m<sup>2</sup> an einer Fassade (vertikale Fläche, 90 °) in den vier Ausrichtungen Nord, Ost, Süd und West ohne Verschattung (Kontext / Nachbargebäude wurden nicht mitberücksichtigt). Zum Vergleich wurde ebenso die monatliche Stromerzeugung über ein Flachdach mit nach Süden ausgerichteten Modulen mit einem Winkel von 5 ° dargestellt.



Tabelle 37: Monatliche Stromerzeugung in kWh/m<sup>2</sup> einer Fassade (vertikale Fläche, 90 °) in den vier Ausrichtungen Nord, Ost, Süd und West ohne Verschattung (Kontext / Nachbargebäude wurden nicht mitberücksichtigt). Ebenso sind die Ergebnisse der PV-Dachanlage dargestellt. Der kursive Text zeigt die prozentuale Abweichung im Vergleich zur PV-Dachanlage (Südausrichtung, Winkel von 5 °), grün markierte Werte zeigen eine positive Abweichung (höhere Stromerzeugung) und rot markierte Werte eine negative Abweichung (geringere Stromerzeugung).

	Monatliche Stromerzeugung (kWh/m <sup>2</sup> )				
	Nord	Ost	Süd	West	Dach 5 °
<b>Januar</b>	1.8 <i>40%</i>	3.2 <i>71%</i>	7.2 <i>158%</i>	4.0 <i>87%</i>	4.6
<b>Februar</b>	3.0 <i>33%</i>	5.9 <i>65%</i>	12.7 <i>140%</i>	6.4 <i>71%</i>	9.0
<b>März</b>	4.8 <i>33%</i>	10.4 <i>70%</i>	14.3 <i>96%</i>	10.7 <i>73%</i>	14.8
<b>April</b>	6.9 <i>33%</i>	14.0 <i>67%</i>	15.7 <i>75%</i>	13.7 <i>66%</i>	20.9
<b>Mai</b>	8.8 <i>38%</i>	17.1 <i>73%</i>	13.6 <i>58%</i>	15.4 <i>66%</i>	23.4
<b>Juni</b>	10.3 <i>37%</i>	17.9 <i>63%</i>	14.7 <i>52%</i>	16.7 <i>59%</i>	28.3
<b>Juli</b>	9.7 <i>37%</i>	18.9 <i>73%</i>	14.4 <i>56%</i>	17.6 <i>68%</i>	25.9
<b>August</b>	8.4 <i>34%</i>	16.3 <i>66%</i>	17.0 <i>69%</i>	15.1 <i>61%</i>	24.8
<b>September</b>	5.4 <i>34%</i>	11.3 <i>71%</i>	14.3 <i>89%</i>	11.6 <i>72%</i>	16.0
<b>Oktober</b>	3.9 <i>33%</i>	7.4 <i>63%</i>	14.7 <i>125%</i>	7.5 <i>64%</i>	11.8
<b>November</b>	2.0 <i>35%</i>	3.5 <i>62%</i>	9.0 <i>159%</i>	3.7 <i>65%</i>	5.7
<b>Dezember</b>	1.7 <i>41%</i>	2.5 <i>60%</i>	6.9 <i>165%</i>	2.8 <i>68%</i>	4.2
<b>Jahr</b>	<b>66.8</b> <i>35%</i>	<b>128.3</b> <i>68%</i>	<b>154.6</b> <i>82%</i>	<b>125.2</b> <i>66%</i>	<b>189.4</b>

In einem zweiten Schritt wurde die **saisonale Betrachtung unter Berücksichtigung des umliegenden Kontexts** (inkl. Verschattung durch Nachbargebäude) durchgeführt. Abbildung 84 zeigt die Ergebnisse der Analyse für die vier Jahreszeiten Winter, Frühling, Sommer und Herbst.

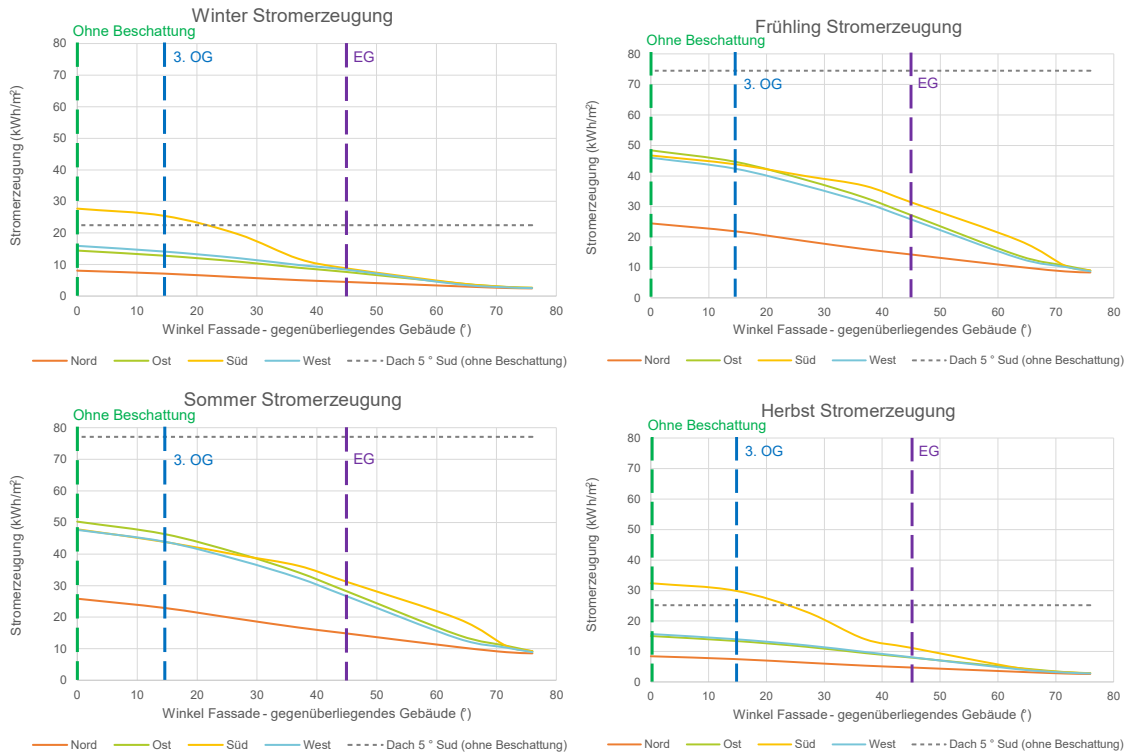


Abbildung 84: Saisonale Stromerzeugung in kWh/m<sup>2</sup> an einer Fassade (vertikale Fläche, 90 °) in den vier Ausrichtungen Nord, Ost, Süd und West. Eine Verschattung durch Nachbargebäude wurde mitberücksichtigt und wurde durch den Winkel zwischen den beiden Gebäudefassaden dargestellt (die blau-gestrichelte Linie stellt die saisonale Stromerzeugung im 3. OG und die lila-gestrichelte Linie die im EG dar, Annahme: beide Fassaden sind parallel zueinander). Zum Vergleich wurde ebenso die jährliche Stromerzeugung über ein Flachdach mit nach Süden ausgerichteten Modulen mit einem Winkel von 5 ° dargestellt (grau-gestrichelte Linie).

Tabelle 38: Saisonale Stromerzeugung in kWh/m<sup>2</sup> einer Fassade (vertikale Fläche, 90 °) in den vier Ausrichtungen Nord, Ost, Süd und West ohne Verschattung (Kontext / Nachbargebäude wurden nicht mitberücksichtigt). Ebenso sind die Ergebnisse der PV-Dachanlage dargestellt. Der schwarze kursive Text zeigt den prozentualen Anteil im Vergleich zur jährlichen Stromerzeugung, der grüne und rote kursive Text zeigt die prozentuale Abweichung im Vergleich zur PV-Dachanlage (Südausrichtung, Winkel von 5 °), grün markierte Werte zeigen eine positive Abweichung (höhere Stromerzeugung) und rot markierte Werte eine negative Abweichung (geringere Stromerzeugung).

	Nord		Ost		Süd		West		Dach 5 °
Winter	8.1		14.4		27.7		15.9		21.3
	12 %	38 %	11 %	68 %	18 %	130 %	13 %	74 %	11 %
Frühling	24.5		48.4		46.7		45.9		70.8
	37 %	35 %	38 %	68 %	30 %	66 %	37 %	65 %	37 %
Sommer	25.8		50.3		47.8		47.7		73.3
	39 %	35 %	37 %	69 %	31 %	65 %	38 %	65 %	39 %
Herbst	8.4		15.1		32.4		15.7		23.9
	13 %	35 %	14 %	63 %	21 %	135 %	13 %	66 %	13 %
Jahr	66.8		128.3		154.6		125.3		189.4
		35 %		68 %		82 %		66 %	



Die Winter- und Herbstmonate sind die Zeiten im Jahr, wo die nördliche Hemisphäre die geringste Sonneneinstrahlung erhält. Die Wintersonnenwende kann vom 21. bis 23. Dezember eines Jahres eintreten, weshalb die Ergebnisse für diese beiden Jahreszeiten sehr ähnlich sind. Analog verhält es sich mit den Frühlings- und Sommermonaten, wo die nördliche Hemisphäre die höchste Sonneneinstrahlung erhält. Die Sommersonnenwende kann vom 19. bis 22. Juni eines Jahres eintreten.

Im Winter und Herbst kann eine Südfassade ab dem 3. OG einen höheren Stromertrag als die PV-Dachanlage erreichen. Wird die Südfassade jedoch durch umliegende Gebäude verschattet, wie bspw. im EG, ist das Potential geringer als bei einer Dachanlage. Im Sommer und Frühling ist das Stromerzeugungspotential über das Dach deutlich höher als an der Fassade. Die Ostfassade kann im Sommer und im Frühling im 3. OG bzw. ohne Beschattung einen leicht höheren Ertrag erzielen als die Südfassade.

An einer Südfassade können ca. 40 % des jährlichen Stromertrags im Herbst und Winter produziert werden (Tabelle 38). In den anderen Ausrichtungen sowie über das Dach sind es zu diesem Zeitraum nur 25 % des Gesamtstromertrags.

### 7.3.3 Betrachtung im Tagesverlauf

Durch eine gezielte Anordnung der PV-Module an der Gebäudefassade kann ein höherer und gleichmässiger Ertrag über den Tag erreicht werden. Eine Ostfassade erhält die grösste Sonneneinstrahlung am Morgen, eine Westfassade am Nachmittag. Eine Nordfassade erhält über den Tag i.d.R. nur eine diffuse Strahlung, ausgenommen ist der Zeitraum um die Sommersonnenwende, wo am frühen Morgen und am späten Nachmittag direkte Sonneneinstrahlung auf die Fassade treffen kann. Eine Südfassade kann – ebenso wie eine Dachfläche – den ganzen Tag über eine direkte Sonneneinstrahlung erhalten, insbesondere zur Mittagszeit ist diese am intensivsten.

Abbildung 85 zeigt das Stromerzeugungspotential im Tagesverlauf zu vier ausgewählten Zeiten des Jahres. Dazu gehört der Zeitraum um die Wintersonnenwende, die Frühlings-Tagundnachtgleiche, die Sommersonnenwende sowie die Herbst-Tagundnachtgleiche. Tabelle 39 zeigt die Erträge für den gesamten Tag.

Das Stromerzeugungspotential an der Südfassade ist im Zeitraum der Wintersonnenwende ca. dreimal so hoch wie auf dem Dach.

Zum Zeitpunkt der Tagundnachtgleiche im Frühling und Herbst ist das Stromerzeugungspotential im Tagesverlauf sehr ähnlich, mit einer etwas höheren Stromerzeugung an der Nordfassade im Frühling und an der Südfassade im Herbst. Zum Zeitpunkt der Tagundnachtgleiche im Frühling und Herbst ist der Ertrag über die Südfassade etwas höher als über das Dach.

Zum Zeitpunkt der Sommersonnenwende ist die Stromproduktion über die Dachfläche am höchsten und liegt mehr als doppelt so hoch wie der Ertrag an der Südfassade. An der Ost- und Westfassade kann ca. 65 % und an der Nordfassade ca. 30 % des Stromertrags des Dachs erzeugt werden.

Durch eine gezielte Anordnung der PV-Module an der Fassade kann die Stromerzeugung im Winter (Südfassade) und der Eigenverbrauch über den Tag (Ost- und Westfassade) erhöht werden.

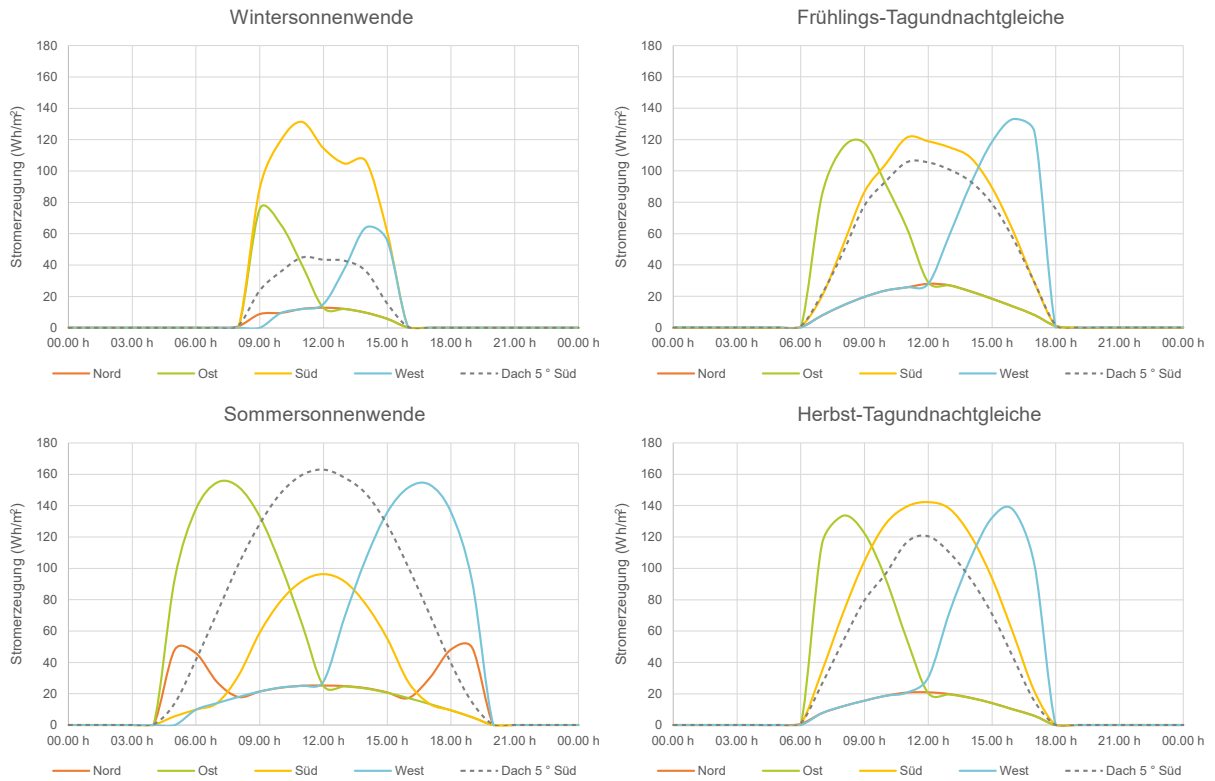


Abbildung 85: Stromerzeugungspotential im Tagesverlauf in Wh/m<sup>2</sup> an einer Fassade (vertikale Fläche, 90 °) in den vier Ausrichtungen Nord, Ost, Süd und West ohne Verschattung (Kontext / Nachbargebäude wurden nicht mitberücksichtigt). Dargestellt sind vier Zeiten des Jahres, dazu gehört der Zeitraum um die Wintersonnenwende, die Frühlings-Tagundnachtgleiche, die Sommersonnenwende und die Herbst-Tagundnachtgleiche. Zum Vergleich wurde ebenso ein Flachdach mit nach Süden ausgerichteten PV-Modulen mit einem Winkel von 5 ° dargestellt.

Tabelle 39: Stromerzeugungspotential über den Tag in Wh/m<sup>2</sup> an einer Fassade (vertikale Fläche, 90 °) in den vier Ausrichtungen Nord, Ost, Süd und West ohne Verschattung (Kontext / Nachbargebäude wurden nicht mitberücksichtigt). Dargestellt sind vier Zeiten des Jahres, dazu gehört der Zeitraum um die Wintersonnenwende, die Frühlings-Tagundnachtgleiche, die Sommersonnenwende und die Herbst-Tagundnachtgleiche. Die kursiven Werte zeigen die Abweichung im Vergleich zur Dachanlage, grün markiert ist eine positive Abweichung (höhere Stromerzeugung), rot markiert eine negative Abweichung (geringere Stromerzeugung).

	Stromerzeugungspotential Tag (Wh/m <sup>2</sup> )				
	Nord	Ost	Süd	West	Dach 5 ° Süd
<b>Wintersonnenwende</b>	71.3 <i>29%</i>	221.9 <i>91%</i>	727.1 <i>298%</i>	194.6 <i>80%</i>	244.3
<b>Frühlings-Tagundnachtgleiche</b>	210.7 <i>26%</i>	592.6 <i>73%</i>	909.5 <i>112%</i>	645.8 <i>79%</i>	814.4
<b>Sommersonnenwende</b>	448.9 <i>30%</i>	975.9 <i>66%</i>	665.7 <i>45%</i>	982.7 <i>66%</i>	1487.3
<b>Herbst-Tagundnachtgleiche</b>	163.1 <i>20%</i>	606.5 <i>73%</i>	1053.9 <i>127%</i>	655.1 <i>79%</i>	827.1



#### 7.3.4 Kapitelzusammenfassung

Die Höhe des Stromertrags über PV-Module an der Fassade hängt von verschiedenen Faktoren ab. Neben dem **Wirkungsgrad** der Module spielt insbesondere die **Orientierung** sowie eine mögliche **Verschattung von Fassadenflächen** durch Nachbargebäude, natürliche Elemente (Bäume etc.) oder topografische Gegebenheiten eine entscheidende Rolle für die Effizienz. PV-Module können somit vor allem an Flächen ohne Verschattung und in den Orientierungen Süd, Ost und West (in dieser Reihenfolge) den höchsten Stromertrag erzielen. Aber auch an der Nordfassade besteht ein Stromerzeugungspotential, dieses beträgt im EG ca. 40 kWh/m<sup>2</sup>, im 3. OG ca. 60 kWh/m<sup>2</sup> und ohne Verschattung ca. 67 kWh/m<sup>2</sup>. Im Vergleich zu einer Südfassade ohne Verschattung (ca. 155 kWh/m<sup>2</sup>) ist das Stromerzeugungspotential der **Nordfassade jedoch fast 2.5-Mal** geringer.

Die Südfassade (ohne Verschattung) hat über das Jahr gesehen somit das grösste Potential. Im **Vergleich zu einer Dachanlage** ist dieses jedoch tiefer (fast 190 kWh/m<sup>2</sup>, Südausrichtung, Winkel 5°). Im **Winterhalbjahr (Oktober bis Februar)** liefert eine PV-Anlage im 3. OG und ohne Verschattung an der Südfassade jedoch **mehr Strom** als auf dem Dach.

Wird der **Stromertrag im Tagesverlauf** betrachtet, liefert eine PV-Fassade ostexponiert am Morgen und westexponiert am Nachmittag am meisten Strom, eine Südfassade dagegen über den ganzen Tag hinweg, mit dem Peak am Mittag. Um im Verlauf des Tages einen gleichmässigen Ertrag zu erreichen, kann es empfehlenswert sein, die **PV-Modulen in verschiedenen Ausrichtungen** zu positionieren. Für einen hohen Ertrag sollten dabei auch hier mögliche Verschattungen vermieden werden.

Eine Kombination von PV-Modulen auf dem Dach sowie an der Fassade in verschiedenen Orientierungen (abgestimmt mit den Nutzungszeiten, Eigenverbrauch) kann somit über das ganze Jahr betrachtet sehr attraktiv sein und zu einem hohen Stromertrag (hohes Flächenpotential durch die Kombination Dach und Fassade) führen.

In Abbildung 86 wurde das Stromerzeugungspotential der PV-Fassade (opake Module, Wirkungsgrad von 20 %) in den verschiedenen Orientierungen und Geschossen anhand des Referenzgebäudes «Neubau» bewertet. Bei den Darstellungen wurde sowohl die jährliche Stromproduktion als auch der Aspekt der Winterstromproduktion bewertet.

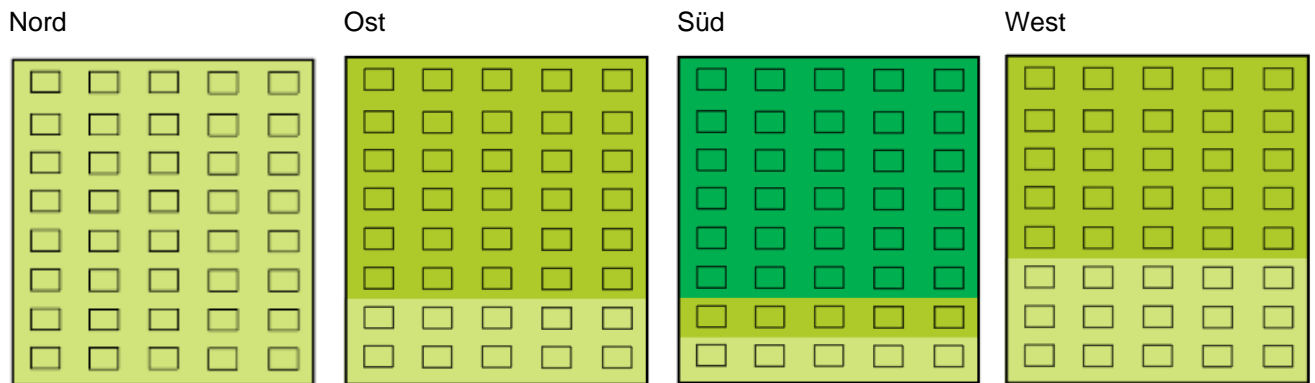
Auf die Darstellungen zur transparenten PV-Fassade wurde hier verzichtet, da das Stromerzeugungspotential in den verschiedenen Orientierungen und Geschossen gleich zu bewerten jedoch aufgrund des geringeren Wirkungsgrads der PV-Module der Stromertrag etwas geringer ist.



### Legende



### opake PV-Module, jährliches Stromerzeugungspotential



### opake PV-Module, Winterstrom

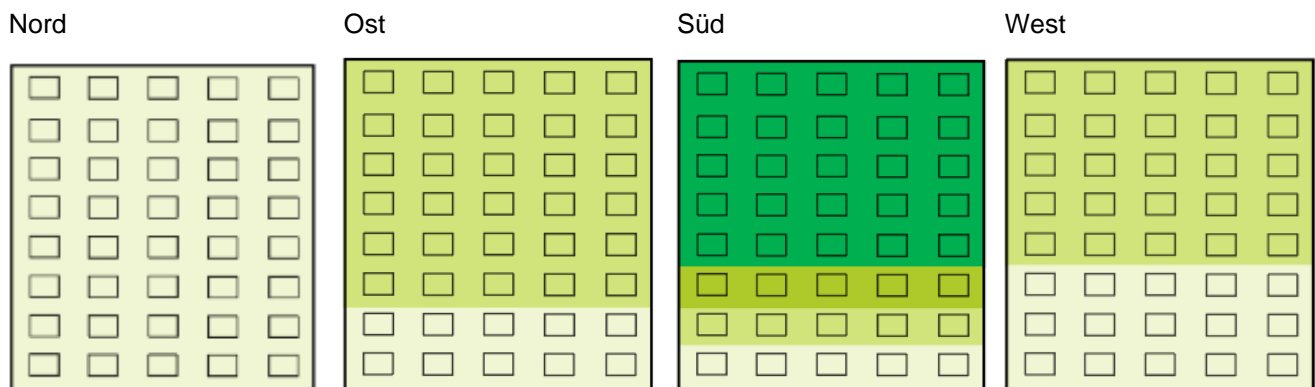


Abbildung 86: Stromerzeugungspotential der PV-Fassade (opake Module, Wirkungsgrad von 20 %) in den verschiedenen Orientierungen und Geschossen. Die Bewertung erfolgte anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Eine Verschattung durch Nachbargebäude wurde mitberücksichtigt (Annahme: 4-stöckiges Nachbargebäude, beide Fassaden sind parallel zueinander). Dargestellt ist sowohl die jährliche Stromproduktion als auch der Aspekt der Winterstromproduktion im Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).

Die **Bewertungen** erfolgten anhand der Berechnungsergebnissen für die jährliche Stromproduktion (Abbildung 81 und



Tabelle 37) sowie für den Winterstrom (Abbildung 84 und Tabelle 38).





## 7.4 Betrieb und Erstellung: gesamtheitliche Ökobilanz (LCA)

In diesem Kapitel wurden die Umweltauswirkungen der verschiedenen Fassadensysteme, der PV-Dachanlage und der Szenarien über den Lebenszyklus betrachtet. Informationen zu den getroffenen Annahmen in den Berechnungen sind in Kapitel 5.2.2 zu finden.

In einem ersten Schritt wurden die Umweltauswirkungen ermittelt, welche bei der Erstellung und beim Unterhalt der verschiedenen **Fassadensysteme** anfallen. Im zweiten Schritt wurde die Betrachtung erweitert und die Betriebsphase miteinbezogen. Neben den Fassadensystemen wurde zu Vergleichszwecken ebenso die PV-Dachanlage in die Analyse miteinbezogen. Die Berechnungen umfassten jeweils die Treibhausgasemissionen (THGE), graue Energie (nicht erneuerbare Primärenergie, PEne) und die Umweltbelastungspunkte (Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit, UBP'21).

### 7.4.1 Erstellung und Unterhalt

Nachfolgend sind die Umweltauswirkungen für die Erstellung (inkl. Entsorgung gemäss Definition in MB SIA 2032) und den Unterhalt der Referenzfassade, der verschiedenen Fassadensysteme sowie der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade) anhand der drei Referenzgebäude «Neubau», «Altbau» und «Altbau saniert» dargestellt.

#### Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau»

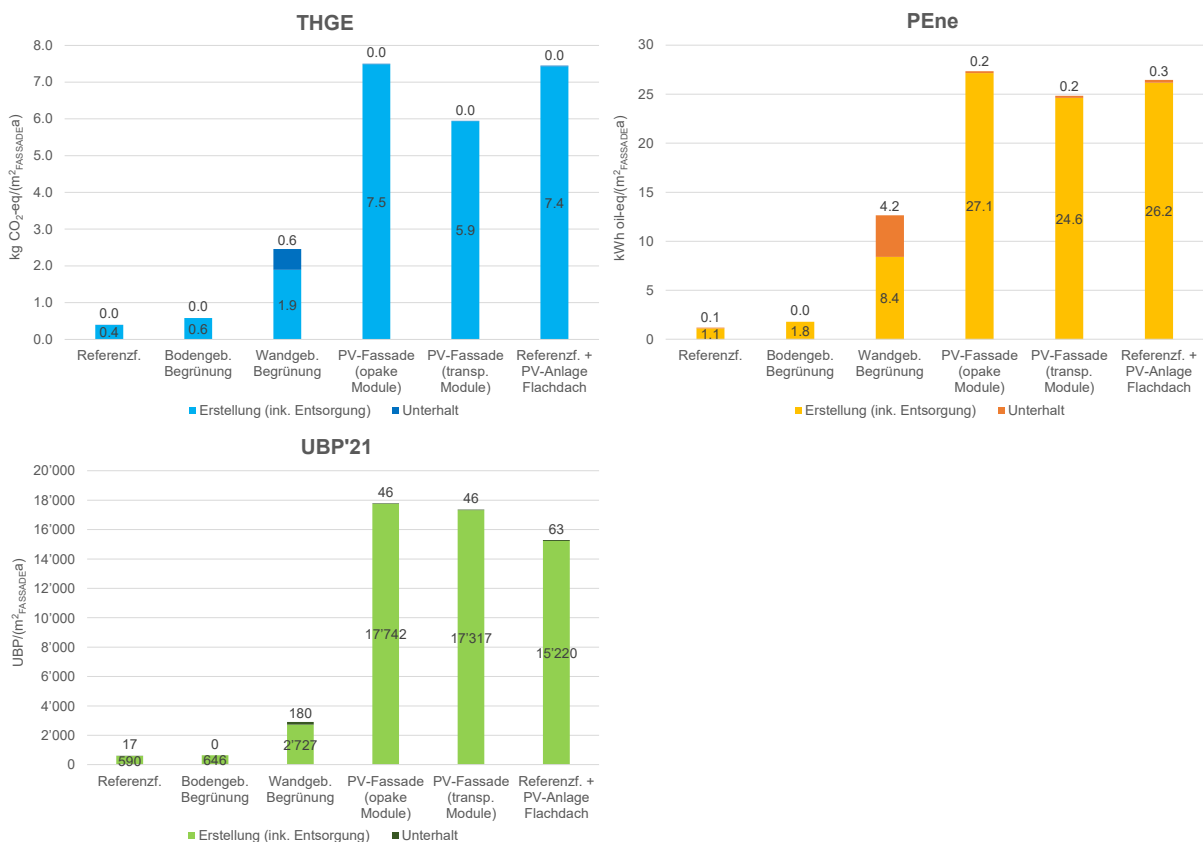


Abbildung 87: Treibhausgasemissionen (oben links), nicht erneuerbare Primärenergie (oben rechts) und Umweltbelastungspunkte (unten) für die analysierten Systeme beim Referenzgebäude «Neubau». Die Werte der PV-Dachanlage beziehen sich auf die auf dem Dach installierten Quadratmeter Modulfläche.



Die **Referenzfassade** weist die geringste Umweltbelastung auf (THGE, PEne und UBP'21). Die **bodengebundene Begrünung** erhöht die Umweltbelastung im Vergleich zur Referenz nur geringfügig. Berücksichtigt wurde dabei ein Rankgitter, der Aushub und das Substrat für die Begrünung (die Pflanzen selbst wurden bei der Berechnung nicht berücksichtigt). Bei der **wandgebundenen Begrünung** tragen insbesondere die verwendeten Aluminiumverbundplatten zu einem Grossteil der THGE, PEne und UBP'21 in der Ökobilanz bei.

Die untersuchten **PV-Systeme (Fassade und Dach)** führen bei der Erstellung zu einer deutlich höheren Umweltbelastung im Vergleich zu den übrigen Systemen. Die höchsten Werte für THGE und PEne weist die opake PV-Fassade auf, es folgt die PV-Dachanlage in Kombination mit der Referenzfassade und danach die transparente PV-Fassade. Bei den UBP'21 schneidet die PV-Dachanlage etwas besser ab, die höchsten Werte erreicht die opake PV-Fassade, gefolgt von der PV-Fassade mit transparenten Modulen.

Bei den Ergebnissen der PV-Fassaden ist zu beachten, dass die Faserzementplatte bei den Berechnungen abgezogen wurde. Die **PV-Dachanlage** wurde als Ergänzung zur Referenzfassade eingerechnet. Die dargestellten Angaben beziehen sich dabei auf die Quadratmeter Modulfläche, welche auf dem Dach installiert werden können. Beim «Neubau» ergibt sich ein Flächenverhältnis zwischen PV-Dach und PV-Fassade von  $0.21 \text{ m}^2_{\text{DACH}}/\text{m}^2_{\text{FASSADE}}$ . Werden die Angaben in Abbildung 87 für die PV-Dachanlage auf den Quadratmeter Fassade oder auf den Quadratmeter Energiebezugsfläche umgerechnet, wären die Umweltauswirkungen (THGE, PEne und UBP'21) der Dachanlage kleiner als diejenige der PV-Fassaden. Das liegt daran, dass die zur Verfügung stehende Fläche auf dem Dach ( $0.05 \text{ m}^2_{\text{MODULFLÄCHE DACH}}/\text{m}^2_{\text{EBF}}$ ) kleiner ist als die Fassadenfläche ( $0.23 \text{ m}^2_{\text{MODULFLÄCHE FASSADE}}/\text{m}^2_{\text{EBF}}$ ) und somit auch weniger Modulfläche verbaut werden kann.

Die **transparente PV-Fassade** weist geringere Erstellungswerte auf als die opake PV-Fassade. Das liegt daran, dass die Produktion von CdTE-Zellen (transparente Module) geringere THGE, PEne und UBP'21 verursacht, als die Herstellung von monokristallinen Zellen (opake Module).

Generell ist erkennbar, dass die Umweltbelastung bei der **Erstellung** der Systeme deutlich höher liegt als der Anteil für den **Unterhalt**. Einzig der Unterhalt der **wandgebundenen Begrünung** führt aufgrund des hohen Bewässerungsbedarfs zu einer etwas höheren Umweltbelastung. Dabei ist zu beachten, dass bei den UBP'21 der Trinkwasserverbrauch nicht berücksichtigt wurde, da hierfür momentan keine zuverlässigen Daten zur Verfügung stehen.

### **Ergebnisse für die Referenzgebäude «Altbau» / «sanierter Altbau»**

Abbildung 88 zeigt die Ergebnisse für die Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau». Die Umweltbelastung für die Erstellung und den Unterhalt sind bei den Referenzgebäuden gleich.

Bei «Altbau» und «saniertem Altbau» können ähnliche Aussagen gemacht werden, wie für den «Neubau». Die Werte unterscheiden sich teilweise leicht, insbesondere bei der bodengebundenen Begrünung und der PV-Dachanlage.

Bei der **bodengebundenen Begrünung** sind die Umweltbelastungen bezogen auf den Quadratmeter Fassade beim «Neubau» geringer als beim «Altbau» / «saniertem Altbau». Das liegt daran, dass die bodengebundene Begrünung eine begrenzte Wuchshöhe hat und nur 4 Geschosse bedeckt. D.h. beim «Neubau» ist somit nur die Hälfte der Fassade begrünt, während beim «Altbau» / «saniertem Altbau» die gesamte Fassade begrünt ist.

Bei der **PV-Dachanlage** liegt der Unterschied zum einen darin, dass der «Neubau» über einem Flachdach während der «Altbau» bzw. der «sanierter Altbau» über einem Schrägdach verfügen. Dementsprechend unterscheidet sich die Bilanz der Dachanlagen: Wie in der KBOB-Liste (73) angegeben, hat eine PV-Anlage auf einem Schrägdach eine bessere Ökobilanz als eine PV-Anlage auf einem Flachdach. Die dargestellten Angaben beziehen sich auf den Quadratmeter Modulfläche, welche auf dem Dach installiert werden kann. Beim «Altbau» bzw. beim «saniertem Altbau» ergibt sich



ein Flächenverhältnis zwischen PV-Dach und PV-Fassade von  $0.42 \text{ m}^2_{\text{DACH}}/\text{m}^2_{\text{FASSADE}}$ . Die zur Verfügung stehende Fläche auf dem Dach ( $0.15 \text{ m}^2_{\text{MODULFLÄCHE DACH}}/\text{m}^2_{\text{EBF}}$ ) ist kleiner als die Fassadenfläche ( $0.35 \text{ m}^2_{\text{MODULFLÄCHE FASSADE}}/\text{m}^2_{\text{EBF}}$ ), somit kann weniger PV-Fläche verbaut werden. In beiden Fällen steht jedoch aufgrund des geringeren Fensterflächenanteils der Fassade und der geringeren Gebäudehöhe mehr Platz für die PV-Module an der Fassade bzw. auf dem Dach zur Verfügung (in Bezug auf die Energiebezugsfläche) als im «Neubau».

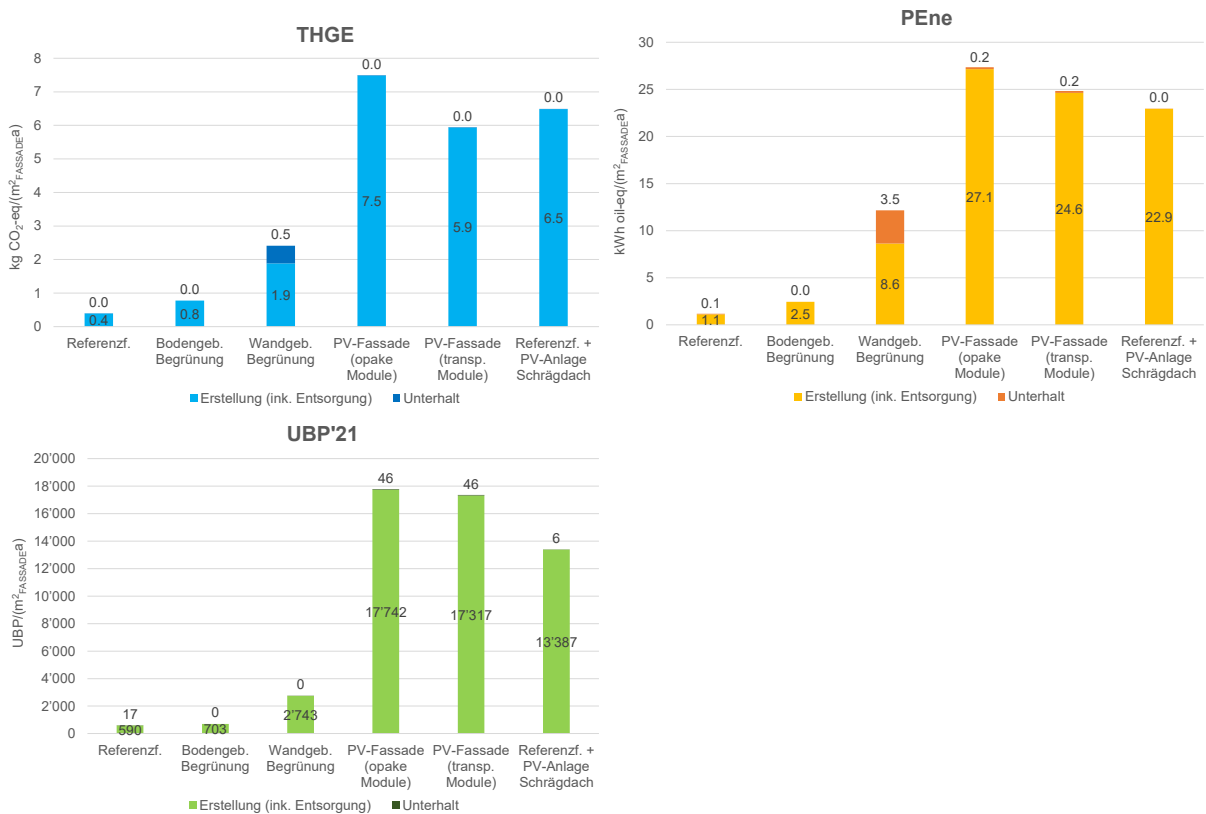


Abbildung 88: Treibhausgasemissionen (oben links), nicht erneuerbare Primärenergie (oben rechts) und Umweltbelastungspunkte (unten) der Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau». Die Werte der PV-Dachanlage beziehen sich auf die auf dem Dach installierten Quadratmeter Modulfläche.

#### 7.4.2 Erstellung und Betrieb (inkl. Unterhalt)

Die Werte aus dem vorherigen Abschnitt (Kapitel 7.4.1) wurden in einem nächsten Schritt mit denen der **Betriebsphase** erweitert. Der Betrieb umfasst zusätzlich zum zuvor betrachteten Unterhalt den **Energieverbrauch des Gebäudes**.

#### Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau»

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Ergebnisse für die THGE, PEnE sowie UBP'21 für den «Neubau». Dargestellt sind die Referenzfassade, die verschiedenen Fassadensysteme und die PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade).

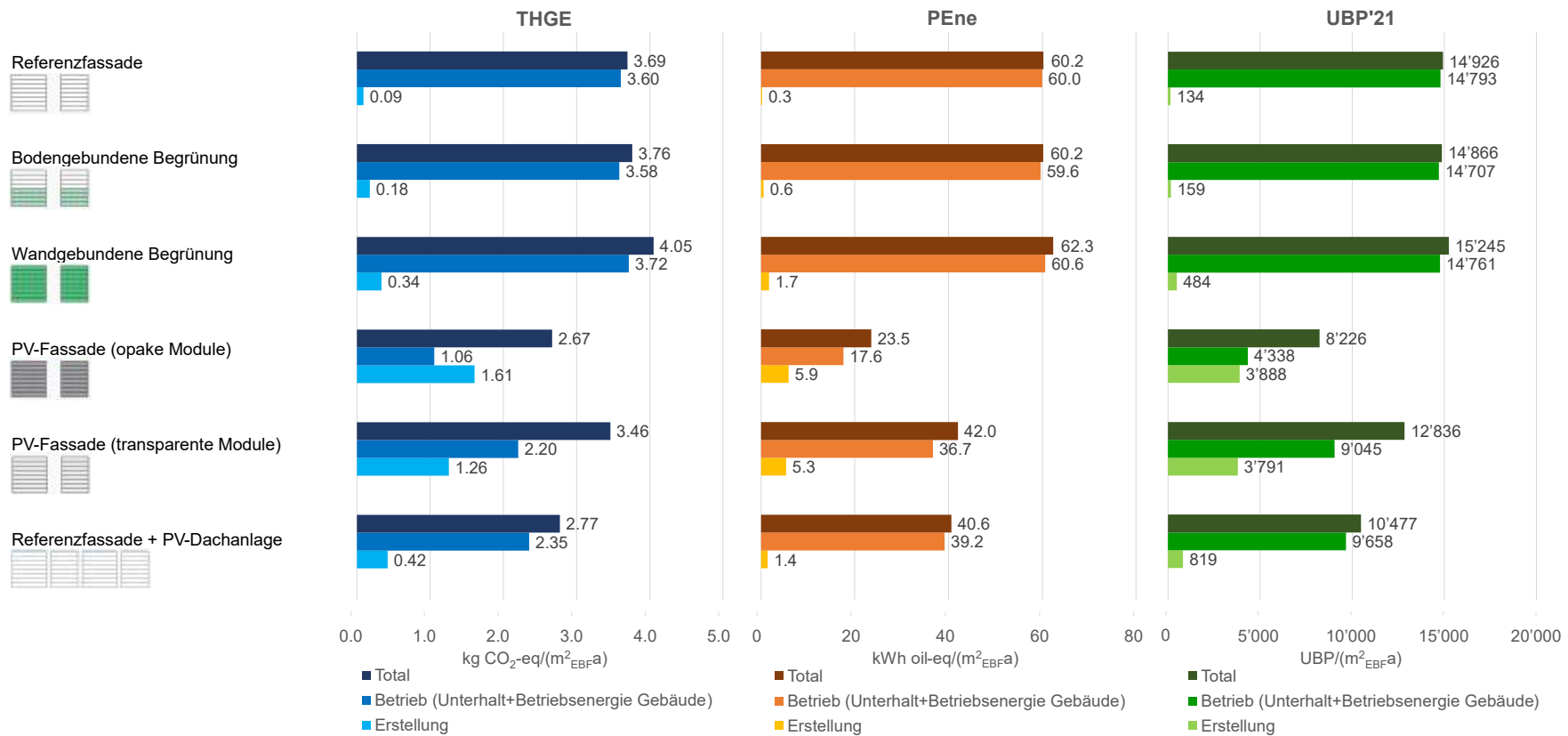


Abbildung 89: Treibhausgasemissionen (links), nicht erneuerbare Primärenergie (Mitte) und Umweltbelastungspunkte (rechts) der Referenzfassade, der verschiedenen Fassadensysteme sowie der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade). Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau».



Die **PV-Fassade mit opaken Modulen** weist über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren die geringsten Umweltbelastungen (THGE, PEne und UBP) auf, gefolgt von der **PV-Dachanlage**. Aufgrund des Verhältnisses zwischen Dach- und Fassadenfläche beim «Neubau», steht deutlich mehr Fassadenfläche für PV-Module zur Verfügung als auf dem Dach. Die Einsparungen im Betrieb sind somit bei der PV-Dachanlage geringer als bei der PV-Fassade (opake Module), sodass das Fassadensystem insgesamt besser abschneidet.

Die **transparenten PV-Module** weisen über den Lebenszyklus insgesamt höhere THGE, PEne und UBP auf. Da die Einsparungen im Betrieb aufgrund des geringeren Wirkungsgrads der Paneele geringer sind als bei einer PV-Fassade mit opaken Modulen oder der PV-Dachanlage. Die transparenten PV-Module führen insgesamt aber zu geringeren Umweltbelastungen als die Referenzfassade sowie die Fassadenbegrünungen.

Die **bodengebundene Begrünung** liegt mit Blick auf die PEne gleich auf wie die Referenzfassade, hinsichtlich der UBP liegt die Begrünung sogar etwas tiefer. Bei den THGE sind die Werte für das Begrünungssystem etwas höher als die der Referenzfassade.

Die **wandgebundene Begrünung** weist im Vergleich zu allen anderen Systemen die höchsten Umweltbelastungen (THGE, PEne und UBP) auf. Im Vergleich zur Referenzfassade sind die Werte jedoch nur geringfügig höher.

#### **Ergebnisse für das Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau»**

Abbildung 90 zeigt die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Altbau», Abbildung 91 die Ergebnisse für das Referenzgebäude «sanierter Altbau».

Für die Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau» können ähnliche Aussagen getroffen werden. Der grösste Unterschied liegt hier bei der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade) und der PV-Fassade mit opaken Modulen. Aufgrund des neuen Verhältnisses zwischen Dach- und Fassadenfläche bei diesen Gebäuden, erreicht die **PV-Dachanlage** die niedrigsten THGE, PEne und UBP. Die positiven Umweltauswirkungen der PV-Module im Betrieb sind relevanter als die Umweltauswirkungen, welche bei deren Erstellung anfallen.

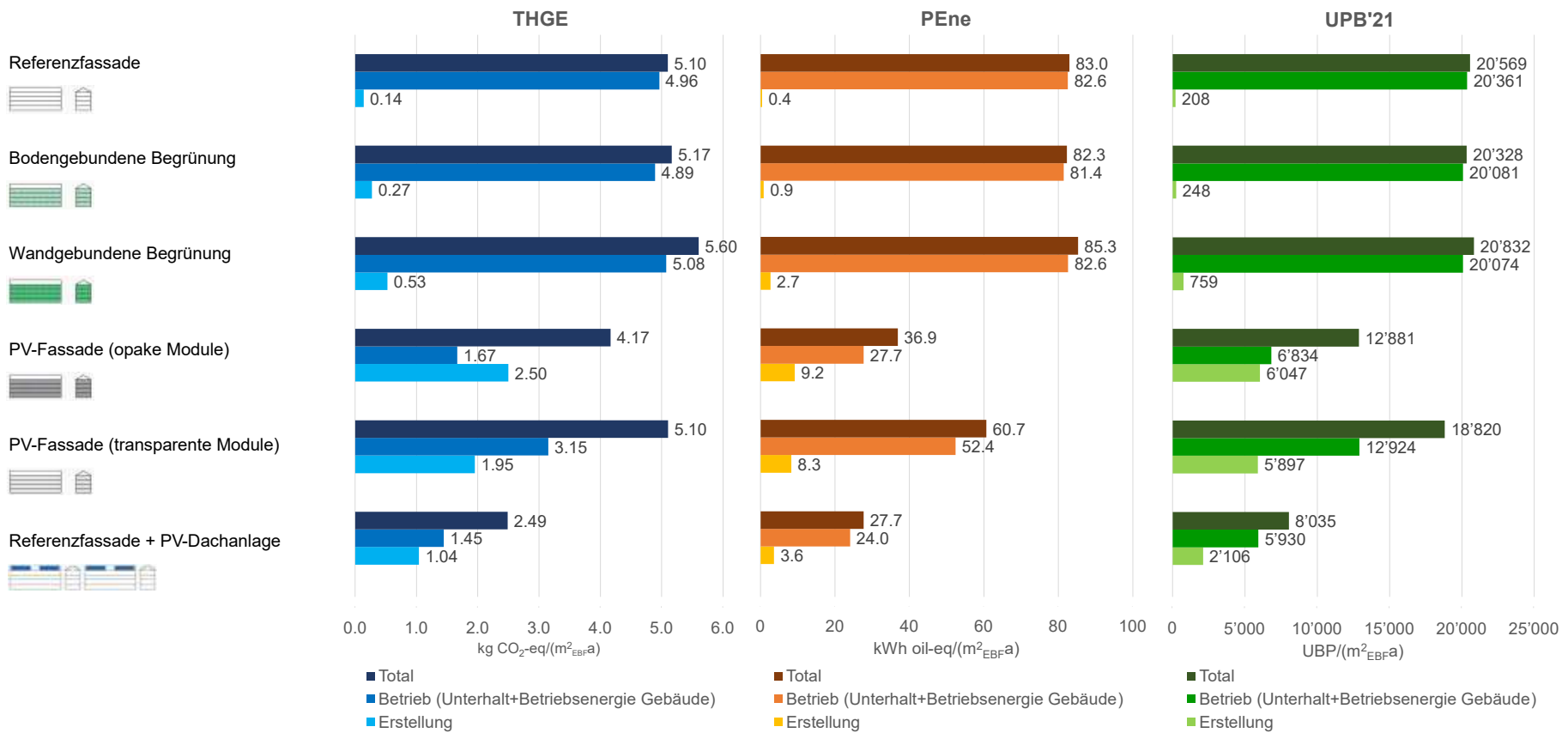


Abbildung 90: Treibhausgasemissionen (links), nicht erneuerbare Primärenergie (Mitte) und Umweltbelastungspunkte (rechts) der Referenzfassade, der verschiedenen Fassadensysteme sowie der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade). Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Altbau».

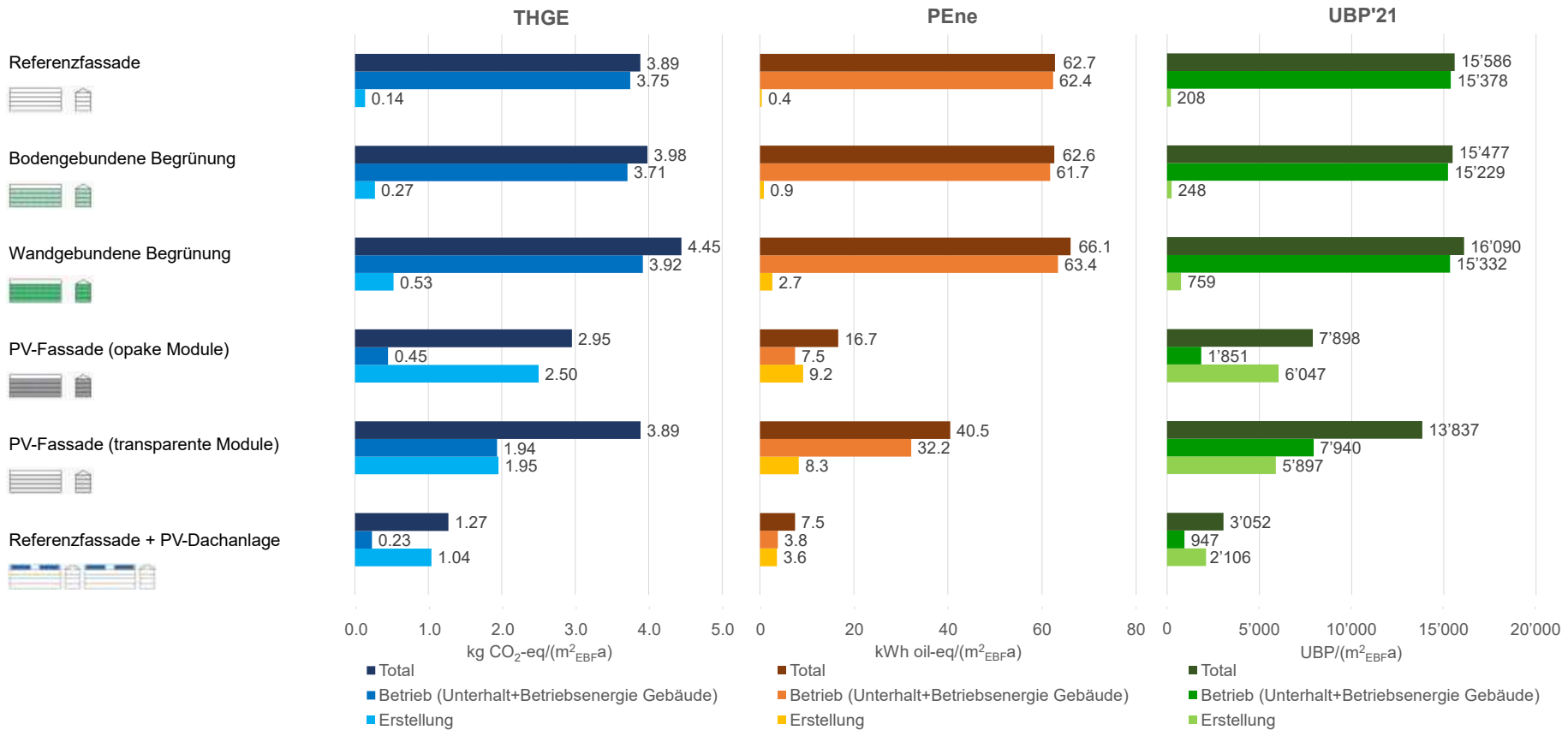


Abbildung 91: Treibhausgasemissionen (links), nicht erneuerbare Primärenergie (Mitte) und Umweltbelastungspunkte (rechts) der Referenzfassade, der verschiedenen Fassadensysteme sowie der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade). Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «sanierter Altbau».



### 7.4.3 Kapitelzusammenfassung

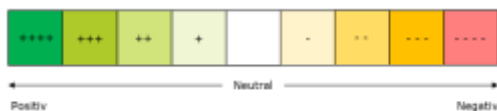
Wird die **Umweltbelastung (THGE, PEne und UBP'21)** betrachtet, welche bei der **Erstellung und dem Unterhalt** der Fassadensystem anfallen, weist die Referenzfassade die geringsten Werte auf. Die bodengebundene Begrünung erhöht die Umweltbelastung im Vergleich zur Referenz nur geringfügig, die wandgebundene Begrünung führt zu etwas höheren Werten. Im Vergleich zu den PV-Systemen liegen die Umweltbelastungen für die Erstellung und den Unterhalt der Fassadenbegrünungen jedoch deutlich tiefer.

Wird die **Umweltauswirkung im Betrieb** miteinbezogen, schneiden die PV-Systeme - aufgrund der hohen Gewinne im Betrieb - deutlich besser ab als die übrigen Systeme. **Mit Blick auf die THGE führt eine gezielte Anordnung der PV-Module an der Fassade zu einer besseren Bilanz.** In Bezug auf **PEne und UBP'21** ist es jedoch vorteilhafter, sämtliche Fassaden mit opaken PV-Modulen zu belegen, auch wenn der Ertrag bei einer nach Nord ausgerichteten Fassade deutlich geringer ist als in den anderen Orientierungen. In jeden Fall sollte jedoch eine **hohe Effizienz / ein hoher Wirkungsgrad der PV-Module** angestrebt werden, um die Umweltbelastungen über den Lebenszyklus möglichst gering zu halten. Die **Fassadenbegrünungen** (bodengebunden und wandgebunden) weisen über den Lebenszyklus gesehen **nur geringfügig höhere Umweltbelastungen** auf als die Referenzfassade.

Nachfolgend wurden die THGE der verschiedenen begrüneten und PV-Fassadensysteme anhand des Referenzgebäudes «Neubau» in den verschiedenen Orientierungen und Geschossen bewertet. Bei den Darstellungen wurden zunächst nur die Erstellung und der Unterhalt bewertet (Abbildung 92), in einem zweiten Schritt wurde ebenso der Betrieb im Sinne einer Gesamtbilanz miteinbezogen (LCA, Abbildung 93).

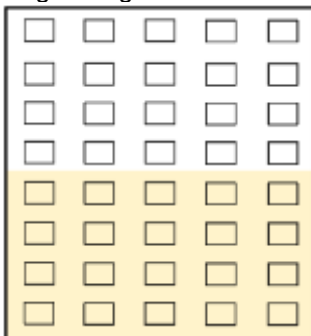
Die **Bewertung** der Systeme erfolgte anhand der Berechnungsergebnissen in Abbildung 87 (Erstellung und Unterhalt) und Abbildung 89 (Erstellung und Betrieb (inkl. Unterhalt), LCA).

#### Legende

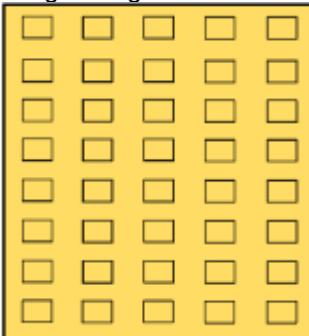


#### Erstellung und Unterhalt (Bewertung gilt für alle Orientierungen)

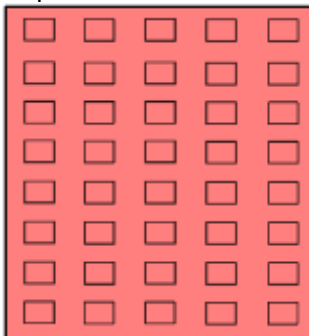
bodengebundene Begrünung



wandgebundene Begrünung



PV-Fassade, opake Module



PV-Fassade, transp. Module

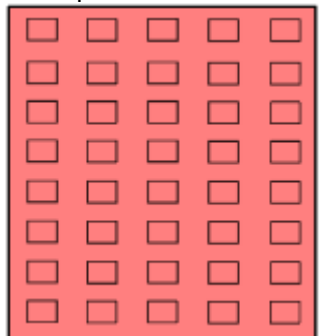


Abbildung 92: THGE für die Erstellung und den Unterhalt der vier Fassadensysteme in den verschiedenen Geschossen. Die Bewertung erfolgte anhand des Referenzgebäudes «Neubau» und ist für alle Orientierungen gleich. Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).





Die Bewertung der **THGE bei der Erstellung und dem Unterhalt der vier Fassadensysteme** erfolgte auf Basis der nachfolgenden Überlegungen.

- Die Umweltbelastung (THGE) bei der Erstellung und dem Unterhalt sind in allen Orientierungen gleich. Auch in den unterschiedlichen Geschossen wurde hier keine Unterscheidung gemacht.
- Die bodengebundene Begrünung bedeckt aufgrund ihrer begrenzten Wuchshöhe nur die Hälfte der Fassade des «Neubaus», dies wurde auch in der Darstellung berücksichtigt.
- Die transparente PV-Fassade weist geringere Erstellungswerte auf als die opake PV-Fassade. Das liegt daran, dass die Produktion von CdTE-Zellen (transparente Module) geringere THGE verursacht als die Herstellung von monokristallinen Zellen (opake Module). Da PV-Module jedoch generell zu einer hohen Umweltbelastung bei der Erstellung, im Vergleich zur Referenzfassade, führen, wurde hier keine farbliche Unterscheidung dargestellt.

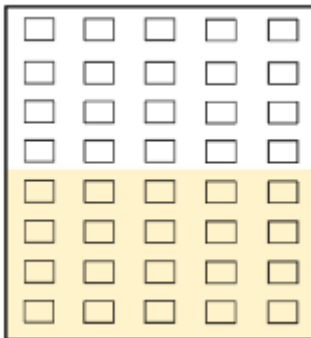
#### Legende



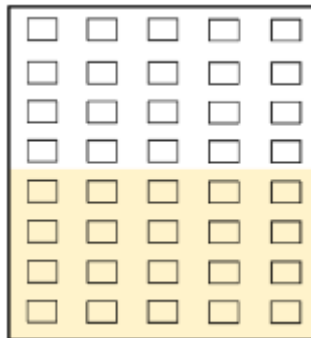
#### Erstellung, Unterhalt und Betrieb (LCA)

bodengebundene Begrünung

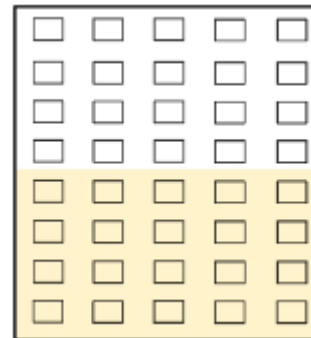
Nord



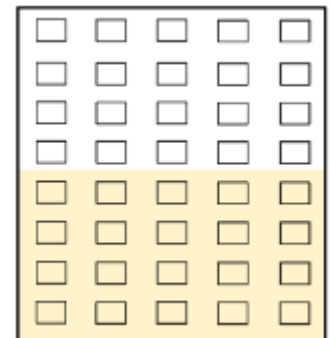
Ost



Süd

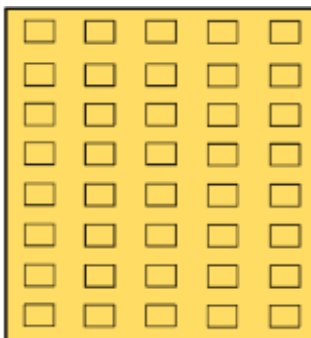


West

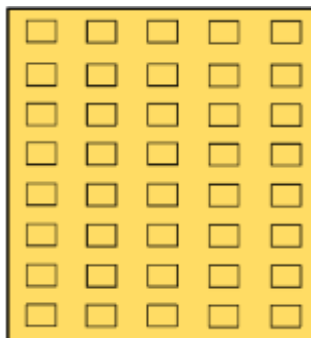


wandgebundene Begrünung

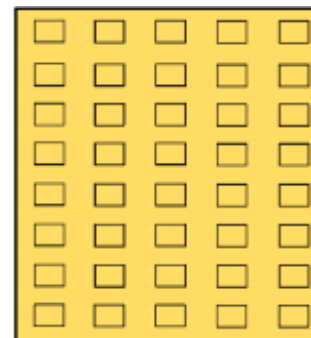
Nord



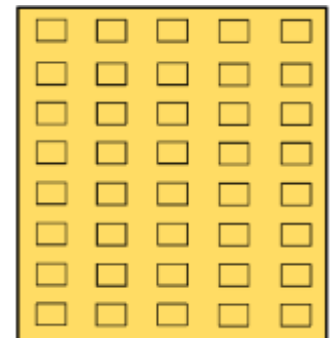
Ost



Süd



West



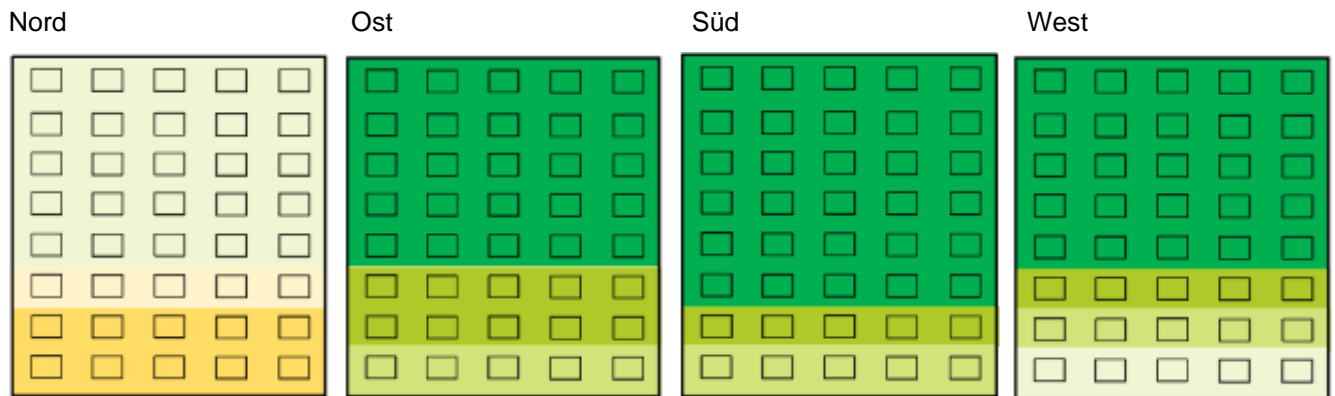


### Legende



### Erstellung, Unterhalt und Betrieb (LCA)

PV-Fassade, opake Module



PV-Fassade, transparente Module

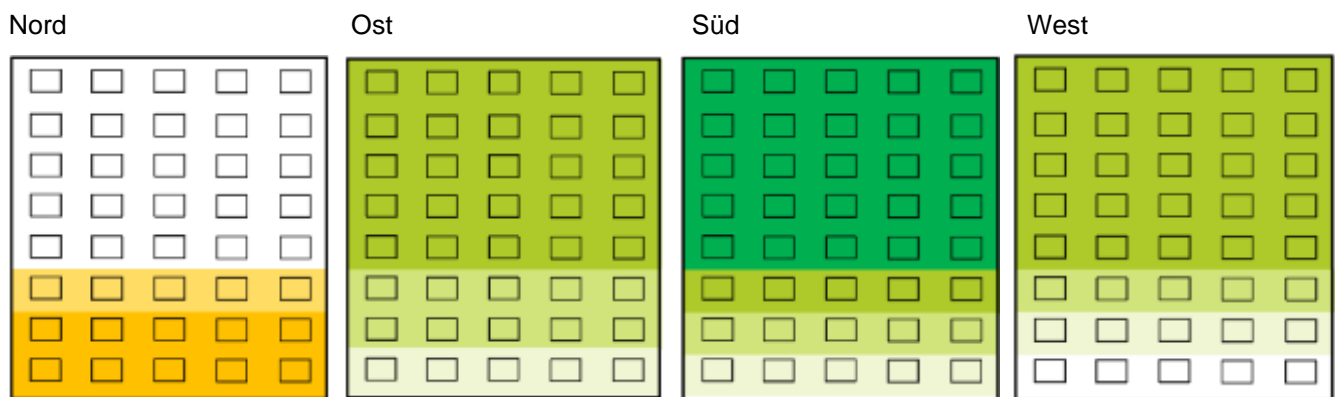


Abbildung 93: THGE für die Erstellung und den Betrieb (inkl. Unterhalt) / LCA der vier Fassadensysteme in den verschiedenen Orientierungen und Geschossen. Die Bewertung erfolgte anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Eine Verschattung durch Nachbargebäude wurde mitberücksichtigt (Annahme: 4-stöckiges Nachbargebäude, beide Fassaden sind parallel zueinander). Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).

Die Bewertung der **Fassadenbegrünungen** erfolgte dabei anhand der Berechnungen in Abbildung 89. Da bei der Bewertung der Einsparung im Betrieb des Gebäudes in Kapitel 7.2.4 nicht zwischen Geschossen und Orientierungen unterschieden wurde, erfolgte hier ebenfalls keine farbliche Unterscheidung.

Für die Bewertung der **PV-Fassaden** wurde zunächst eine weitere Berechnung durchgeführt. Dabei wurden die Amortisationszeiten der Umweltauswirkung (THGE) einer **PV-Anlage mit opaken Modulen** in Abhängigkeit von der Orientierung und Geschossigkeit unter Berücksichtigung der umliegenden Gebäude berechnet. Die Ergebnisse der Betrachtung sind in Tabelle 40 dargestellt.



Tabelle 40: Amortisationszeit der Umweltauswirkung (THGE) einer PV-Anlage in Abhängigkeit von ihrer Ausrichtung und Position in Bezug auf die umliegenden Gebäude. Eine Verschattung durch Nachbargebäude wurde mitberücksichtigt (Annahme: 4-stöckiges Nachbargebäude, beide Fassaden sind parallel zueinander). Bei «rot» markierten Werten können die THGE über die Betrachtungsperiode von 30 Jahren nicht amortisiert werden.

Geschoss / Orientierung		Amortisationszeit der Umweltauswirkung bezogen auf die THGE in Jahren
Ohne Beschattung (ab 4. OG)	Nord	25.2
	Ost	13.0
	Süd	10.8
	West	13.3
3. OG	Nord	28.3
	Ost	14.2
	Süd	11.7
	West	14.6
2. OG	Nord	33.5
	Ost	16.5
	Süd	13.7
	West	16.9
1. OG	Nord	39.2
	Ost	19.7
	Süd	16.9
	West	23.0
EG	Nord	44.3
	Ost	23.8
	Süd	20.1
	West	27.3

In den meisten Orientierungen und Geschossen können die THGE über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren amortisiert werden, einzig an der Nordfassade im EG, 1.OG und 2. OG ist dies nicht der Fall («rot» markierte Werte). Die farbige Bewertung der opaken PV-Module erfolgte auf Basis von Tabelle 40.

Die **transparenten Module** führen aufgrund des geringeren Wirkungsgrads zu geringeren Gewinnen in der Betriebsphase als die opaken Module. Die THGE, welche bei der Erstellung anfallen, werden somit im Betrieb weniger schnell bzw. in einigen Lagen (unterschiedlich je nach Geschoss und Orientierung) nicht kompensiert. Dies wurde bei der Bewertung der transparenten PV-Fassade berücksichtigt und jeweils eine Farbstufe abgezogen. Ausser an der Südfassade ab dem 3. OG wurde davon ausgegangen, dass auch die transparenten Module die Umweltauswirkungen im Vergleich zur Ost- und Westfassade schneller amortisieren, da hier die höchsten Gewinne im Betrieb zu erwarten sind.



## 7.5 Ökonomische Betrachtung: Initial- und Lebenszykluskosten (LCC)

In diesem Kapitel wurden die Initial- und Lebenszykluskosten (LCC) der Referenzfassade, der verschiedenen Fassadensysteme sowie der PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade) betrachtet. Dargestellt sind die Ergebnisse der Berechnungen, weitere Infos zu den getroffenen Annahmen sind in Kapitel 5.2.3 zu finden. Für die Betrachtung wurde ein Zeitraum von 30 Jahren angenommen.

In einem ersten Schritt wurden die Investitions- und Instandsetzungskosten, die durchschnittlichen jährlichen Unterhalts- und Energiekosten sowie die Restwerte berechnet. In einem zweiten Schritt wurden die annualisierten Kosten sowie die Gesamtkosten (Kapitalwert) als Barwert betrachtet. Analysiert wurden die Referenzgebäude «Neubau», «Altbau» und «sanierter Altbau».

### 7.5.1 Investitions-, Instandsetzungs-, Unterhalts- und Energiekosten sowie Restwerte

Zunächst wurden die Investitions- und Instandsetzungskosten (für Bauteile mit einer Nutzungsdauer, die kleiner als die Betrachtungsperiode ist), die durchschnittlichen jährlichen Unterhalts- und Energiekosten sowie die Restwerte am Ende der Betrachtungsperiode berechnet. Die Kosten berücksichtigen dabei sowohl die Preisinflation als auch die jährliche reale Preissteigerung der Energie (Strom).

#### Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau»

Abbildung 94 zeigt die Ergebnisse für den «Neubau». Die Investitions- und die Instandsetzungskosten sowie der Restwert sind in CHF/m<sup>2</sup><sub>FASSADE</sub> angegeben, die jährlichen Unterhaltskosten in CHF/m<sup>2</sup><sub>FASSADEa</sub> und die jährliche Energiekosten in CHF/m<sup>2</sup><sub>EBfa</sub>.

Die **Referenzfassade** hat die niedrigsten Investitions- und Unterhaltskosten. Es fallen keine Instandsetzungskosten an. Dieses System hat am Ende des 30-jährigen Betrachtungszeitraums einen Restwert, da die Lebensdauer der Faserzementplatten 40 Jahre beträgt.

Bei der **bodengebundenen Begrünung** sind die Investitionskosten nicht sehr hoch, allerdings fallen höhere Unterhaltskosten an. Am Ende des 30-jährigen Betrachtungszeitraums hat die Fassadenbegrünung erst die Hälfte ihrer Lebensdauer erreicht, dies wurde als Restwert berücksichtigt.

Bei der **wandgebundenen Begrünung** sind die Investitions-, Instandsetzungs- und Unterhaltskosten am höchsten. Die Instandsetzungskosten für die wandgebundene Begrünung sind höher als die Investitionskosten, da eine Inflation von 2 % berücksichtigt wurde. Ohne Inflation wären die Instandsetzungskosten etwas tiefer als die Investitionskosten, da die Nutzungsdauer der Aluminiumverbundplatte länger ist und die der Bewässerung dem 30-jährigen Betrachtungsperiode entspricht. Förderbeiträge sind in den Instandsetzungskosten nicht berücksichtigt, da nicht bekannt ist, ob und in welcher Höhe es diese in Zukunft noch gibt. Am Ende des 30-jährigen Betrachtungszeitraums hat die Fassadenbegrünung – alle Komponenten des Living Walls mit Ausnahme der Aluminiumverbundplatte (Tabelle 68) – noch eine Restlebensdauer von 10 Jahren, dies wurde mit dem Restwert berücksichtigt.

Die Investitionskosten und die jährlichen Unterhaltskosten für die **PV-Dachanlage** sind geringer als die der PV-Fassaden. Aufgrund der begrenzten Dachfläche sind die jährlichen Energiekosten des Gebäudes jedoch höher.

In Bezug auf die Investitionskosten und Unterhaltskosten ist eine **opake PV-Fassade** einer Fassade **mit transparenten PV-Modulen** vorzuziehen. Auch hinsichtlich der jährlichen Energiekosten sind opake Module aufgrund des besseren Wirkungsgrads sinnvoller.



Abbildung 94: Investitionskosten, Instandsetzungskosten, jährliche Energie- und Unterhaltskosten sowie der Restwert (von oben links nach unten rechts) während der 30-jährigen Betrachtungsperiode für das Referenzgebäude «Neubau». Die Investition- und der Unterhaltskosten der PV-Dachanlage sind auf den Quadratmeter Dach bezogen.

### Ergebnisse für die Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau»

Abbildung 95 zeigt die Ergebnisse für den «Altbau» und den «sanierter Altbau». Die Investitions- und die Instandsetzungskosten sowie der Restwert wurden wieder in CHF/m<sup>2</sup><sub>FASSADE</sub> angegeben, die jährlichen Unterhaltskosten in CHF/m<sup>2</sup><sub>FASSADEa</sub> und die jährliche Energiekosten in CHF/m<sup>2</sup><sub>EBFa</sub>.

Die Kosten für den «Altbau» und den «sanierter Altbau» sind fast immer gleich, da jeweils dieselben Fassadensysteme angenommen wurden. Lediglich bei den jährlichen Energiekosten gibt es Unterschiede aufgrund des Gebäudestandards. Beim «Altbau» fallen höhere Energiekosten an als beim «sanierter Altbau».

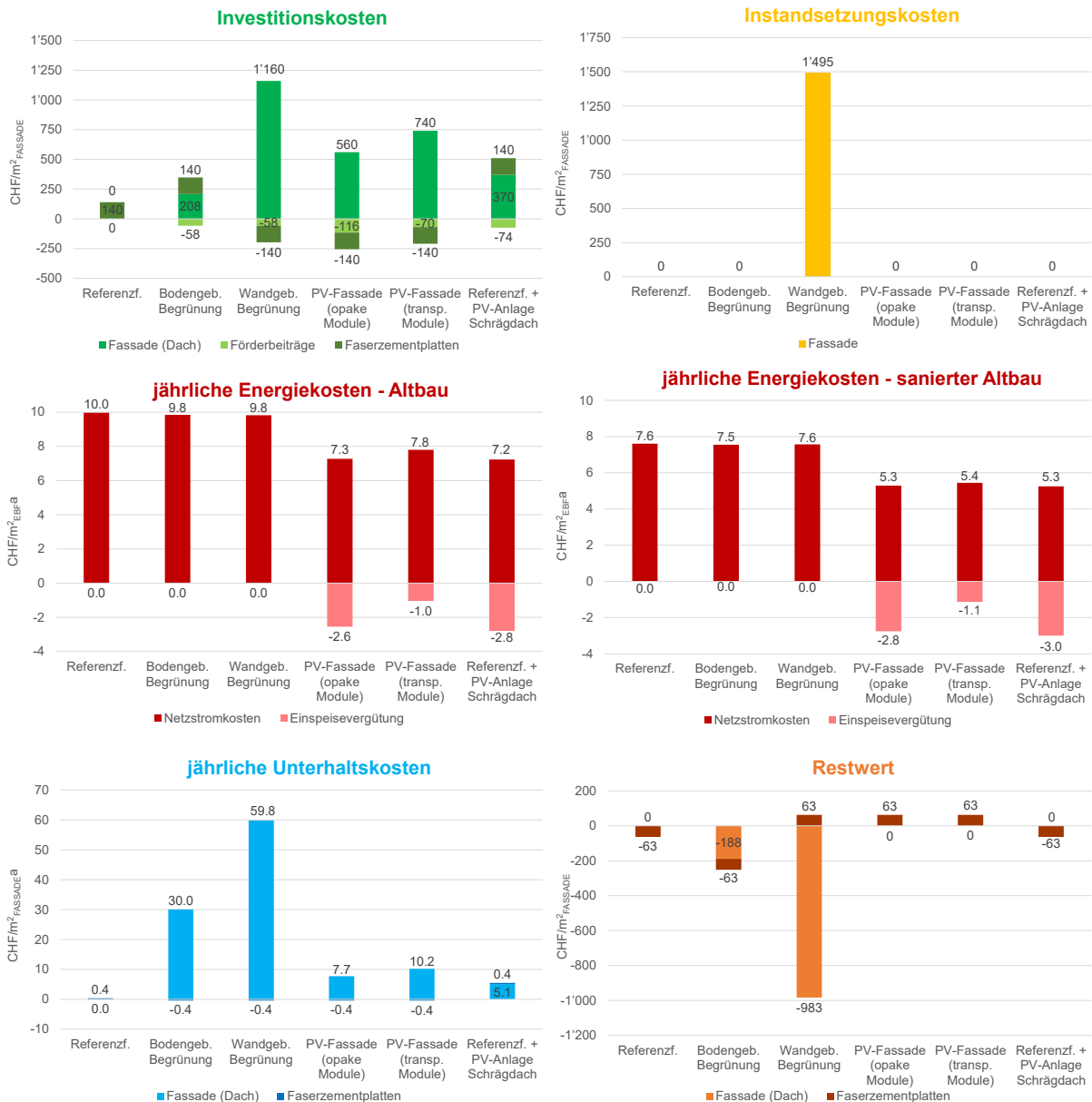


Abbildung 95: Investitionskosten, Instandsetzungskosten, jährliche Energiekosten, die Unterhaltskosten sowie der Restwert (von oben links nach unten rechts) während der 30-jährigen Betrachtungsperiode für die Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau». Die Investition- und der Unterhaltskosten der PV-Dachanlage sind auf den Quadratmeter Dach bezogen.

Die zuvor beim «Neubau» getroffenen Aussagen können weitestgehend auch auf den «Altbau» / «sanierter Altbau» angewendet werden. Unterschiede zum «Neubau» gibt es insbesondere die nachfolgenden:

- Die Investitionskosten und die jährlichen Unterhaltskosten pro Quadratmeter Fassade für die **bodengebundene Begrünung** sind beim «Altbau» / «sanierter Altbau» höher als beim Neubau. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Fassade bei den 4-geschossigen Altbauten komplett und die des 8-geschossigen Neubaus nur zur Hälfte begrünt ist. Die Investitionskosten pro Quadratmeter Fassade sind somit beim «Neubau» tiefer als beim «Altbau» / «sanierter Altbau».



- Die Investitionskosten für die **wandgebundene Begrünung** sind beim «Altbau» / «sanierten Altbau» bezogen auf den Quadratmeter Fassade geringfügig höher, da die Kosten für das Bewässerungssystem etwas höher ausfallen. Die Kosten für die Fassadenbegrünung verhalten sich somit nicht proportional zur Fläche.
- Die **Förderbeiträge für Vertikalbegrünungen** sind beim «Altbau» / «sanierten Altbau» bezogen auf den Quadratmeter Fassade höher als beim «Neubau». Die Förderbeiträge der Stadt Zürich sind auf CHF 30'000 begrenzt, diese Grenze wird bei allen Referenzgebäuden erreicht.
- Die Investitionskosten für die **PV-Fassaden (opak und transparent)** sind beim «Altbau» / «sanierten Altbau» etwas höher als beim «Neubau». Die Kosten pro Quadratmeter PV-Fassade hängen von der installierten Leistung ab, d.h. je grösser die Modulfläche ist, desto geringer sind die Kosten pro Quadratmeter.
- Die **Förderbeiträge für die PV-Fassaden** sind beim «Altbau» / «sanierten Altbau» bezogen auf den Quadratmeter Fassade höher als beim «Neubau». Die Stadt Zürich leistet subsidiär zum Kanton einen finanziellen Beitrag, bei Neubauten wird jedoch nur der Teil der PV-Anlage gefördert, der über die gesetzlichen Anforderungen hinausgeht. Für den «Neubau» gibt es somit keine zusätzlichen Förderbeiträge.
- Die **Instandsetzungskosten** sind für alle drei Referenzgebäude gleich. Lediglich der Restwert ist bei der bodengebundenen Begrünung beim «Altbau» / «sanierten Altbau» höher als beim «Neubau» (Verhältnis begrünte Fläche: «Neubau» < «Altbau» / «sanierter Altbau»).
- Die **jährlichen Unterhaltskosten** für die Fassadenbegrünungen und die PV-Fassaden sind beim «Altbau» / «sanierten Altbau» etwas höher als beim «Neubau» – insbesondere die der bodengebundenen Begrünung. Die Gründe dafür wurden bereits bei den Investitionskosten erläutert.
- Während die **Fassadenbegrünungen** beim «Neubau» die jährlichen Energiekosten nicht senken konnten, gibt es beim «Altbau» und «sanierten Altbau» jedoch eine geringe Einsparung. Die Referenzfassade hat in diesem Fall die höchsten Energiekosten.
- Der **Energieverbrauch eines Gebäudes** hängt von mehreren Faktoren ab, vor allem aber vom Baustandard des Gebäudes und von der Effizienz der Systeme. In dieser Studie wurde angenommen, dass die Systeme (Wärmepumpe für Heizung, Warmwasser und Kühlung) bei allen Referenzgebäuden die gleiche Effizienz aufweisen. Ebenso wurden keine Unterschiede beim Verbrauch der Geräte pro Quadratmeter Nettogeschossfläche gemacht. Die Unterschiede beim Energieverbrauch der drei Referenzgebäude sind somit hauptsächlich auf den Bedarf für Raumheizung und -kühlung zurückzuführen.
- Beim «Altbau» machen Heizung und Kühlung etwa ein Drittel des Gesamtenergieverbrauchs aus. Beim «sanierten Altbau» und beim «Neubau» ist hingegen der Stromverbrauch der Geräte, gefolgt vom Stromverbrauch für Warmwasser, für den wesentlichen Teil des Gesamtverbrauchs verantwortlich. Dadurch sind bspw. die **Einsparungen beim Heiz- und Kühlbedarf** durch eine begrünte Fassade sehr gering.
- In Bezug auf die Energiekosten kann die **PV-Dachanlage** beim «Altbau» / «sanierten Altbau» höhere Einsparungen erzielen als eine PV-Fassade mit transparenten Modulen. Das liegt an dem günstigeren Verhältnis zwischen Dach- und Fassadenfläche.
- Die **PV-Fassade mit opaken Modulen** ermöglicht beim «Altbau» eine Reduktion der jährlichen Energiekosten um mehr als 50 % (unter Berücksichtigung der Einspeisevergütungen). Beim «sanierten Altbau» sind es ca. zwei Drittel. Beim «Neubau» sogar mehr als 50 %.



Die Unterschiede zwischen dem «Neubau» und dem «Altbau» / «sanierteren Altbau» sind insbesondere auf die unterschiedlichen Fassaden- und Energiebezugsflächen zurückzuführen. Dies wirkt sich auf die Ergebnisse – Kosten pro Quadratmeter – aus.

Tabelle 41 zeigt die für die drei Referenzgebäude berücksichtigten Flächen für die verschiedenen Fassadensysteme und die Dachanlage. Die Flächenangaben für den «Altbau» und den «sanierteren Altbau» sind identisch. Diese Referenzgebäude unterscheiden sich nur in den thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle, was einen Einfluss auf die jährlichen Energiekosten hat (Abbildung 95).

Tabelle 41: Zusammenfassende Tabelle der Energiebezugs-, Fassaden- sowie Dachflächen der Referenzgebäude «Neubau», «Altbau» und «sanierter Altbau».

		Neubau					Altbau / sanierter Altbau				
		Nord	Ost	Süd	West	Total	Nord	Ost	Süd	West	Total
<b>Energiebezugsfläche (EBF)</b>		-	-	-	-	<b>3'535.4</b>					<b>1'456.2</b>
<b>Fassadefläche</b>	<b>opake Fläche</b>	272.1	217.9	272.1	217.9	<b>980.0</b>	285.6	82.3	295.7	82.3	<b>745.9</b>
	<b>transparente Fläche</b>	265.2	202.6	265.2	202.6	<b>935.5</b>	93.8	29.3	83.7	29.3	<b>236.2</b>
	<b>Total</b>	537.3	420.5	537.3	420.5	<b>1'915.5</b>	379.4	111.6	379.4	111.6	<b>982.1</b>
<b>Begrünte Fassade</b>	<b>bodengebunden</b>	112.3	88.0	112.3	88.0	<b>400.7</b>	200.9	55.8	200.9	55.8	<b>513.4</b>
	<b>wandgebunden</b>	224.6	176.0	224.6	176.0	<b>801.3</b>	200.9	55.8	200.9	55.8	<b>513.4</b>
<b>Fläche PV-Fassade</b>	<b>opake / transparente Module</b>	224.6	176.0	224.6	176.0	<b>801.3</b>	200.9	55.8	200.9	55.8	<b>513.4</b>
<b>Dachfläche (insgesamt)</b>		-	-	-	-	<b>414.0</b>	196.3	-	196.3	-	<b>392.6</b>
<b>Fläche PV-Dachanlage</b>		-	-	-	-	<b>165.6</b>	108.0	-	108.0	-	<b>215.9</b>

### 7.5.2 Annualisierte Kosten als Barwert

Um die Wirtschaftlichkeit der Referenzfassade, der untersuchten Fassadensysteme sowie der PV-Dachanlage zu vergleichen, wurden die annualisierten Kosten sowie die Gesamtkosten (Kapitalwert) der Varianten als Barwert über 30 Jahre, in CHF/m<sup>2</sup><sub>FASSEDEA</sub>, berechnet. Beim Barwert wurden sowohl die zu einem späteren Zeitpunkt anfallenden Ersatzinvestitionen als auch der Restwert (am Ende des Betrachtungszeitraums) auf den Referenzzeitpunkt (Jahr der Investition) diskontiert (Kapitel 5.2.3). Dadurch ist der Barwert anteilig geringer als bei einer statischen Berechnung.





## Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau»

Abbildung 96 zeigt die annualisierten Kosten (Barwert) pro Quadratmeter Fassade für den «Neubau».

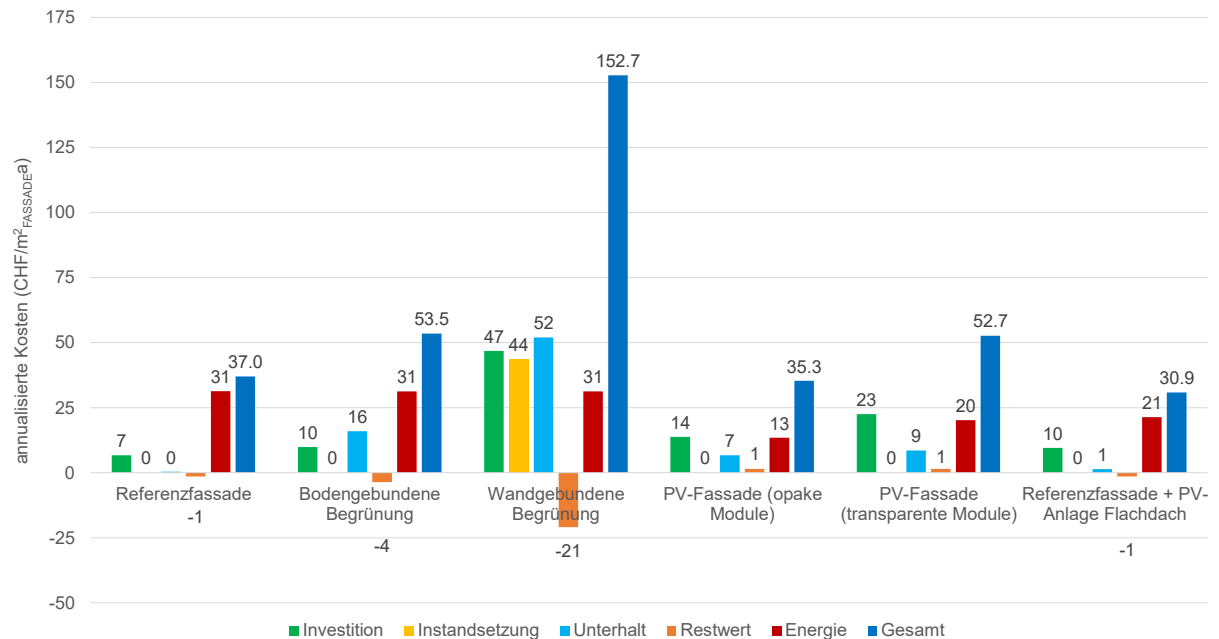


Abbildung 96: Annualisierte Kosten (Barwert) der fünf untersuchten Fassadensysteme und der PV-Dachanlage über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren, dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau».

Die **PV-Dachanlage** (inkl. Referenzfassade) weist die niedrigsten annualisierten Gesamtkosten auf. Die **PV-Fassade mit opaken Modulen** weist die niedrigsten annualisierten Gesamtkosten bei den untersuchten Fassadensystemen auf. Dies ist auf die hohe Einsparung der Energiekosten im Betrieb zurückzuführen. Die Gesamtkosten über den Betrachtungszeitraum liegen sogar tiefer als die der Referenzfassade.

Die annualisierten Gesamtkosten der **PV-Fassade mit transparenten Modulen** sind deutlich höher als die der opaken PV-Fassade. Grund dafür ist der geringere Wirkungsgrad der transparenten Module. Auf die Rentabilität der PV-Fassade nehmen vor allem folgende Faktoren einen wesentlichen Einfluss: der Wirkungsgrad der PV-Module, die Strompreise, die Einspeisevergütungstarife sowie der gezielte Einsatz der PV-Module an den Fassadenflächen mit dem höchsten Sonnenpotenzial.

Die annualisierten Gesamtkosten der **bodengebundenen Fassade** sind etwas höher als die der PV-Fassade mit transparenten Modulen. Das bedeutet, dass die Rentabilität einer bodengebundenen Fassadenbegrünung ähnlich hoch sein kann wie bei einer PV-Fassade mit Modulen mit niedrigem Wirkungsgrad (und ohne eine optimierte Anordnung der Module an der Fassadenfläche für einen hohen Ertrag). Die Rentabilität einer begrüneten Fassade ist dabei stark abhängig von den Wartungskosten (geringe Wartungskosten führen zu einer besseren Rentabilität).

Die annualisierten Gesamtkosten sind bei der **wandgebundenen Begrünung** mit Abstand am höchsten. Dies liegt an den hohen Investitions-, Instandsetzungs- und Unterhaltskosten sowie der sehr geringen Einsparung an Energiekosten.



### Ergebnisse für die Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau»

Abbildung 97 zeigt die annualisierten Kosten (Barwert) pro Quadratmeter Fassade für den «Altbau», Abbildung 98 die Ergebnisse für den «sanierter Altbau».

Bei den Kosten können die gleichen Trends, wie im Kapitel zuvor beschrieben, beobachtet werden. Die Energiekosten beim «Altbau» / «sanierter Altbau» sind tiefer als beim «Neubau», da die Kosten pro Quadratmeter Fassade angegeben sind. Das Verhältnis Quadratmeter Energiebezugsfläche pro Quadratmeter Fassade ist beim «Neubau» viel kleiner als beim «Altbau» / «sanierter Altbau» – Beim «Altbau» / «sanierter Altbau» sind 50 % der Fassadenfläche begrünt – im Falle der bodengebundenen Fassade sogar die Hälfte dieser Fläche aufgrund der Höhenbegrenzung dieses Systems – oder mit PV belegt. Beim «Neubau» sind es nur ca. 25 % der Fassadenfläche, welche begrünt oder mit PV belegt werden können, Grund dafür ist der höhere Anteil an verglasten Flächen.

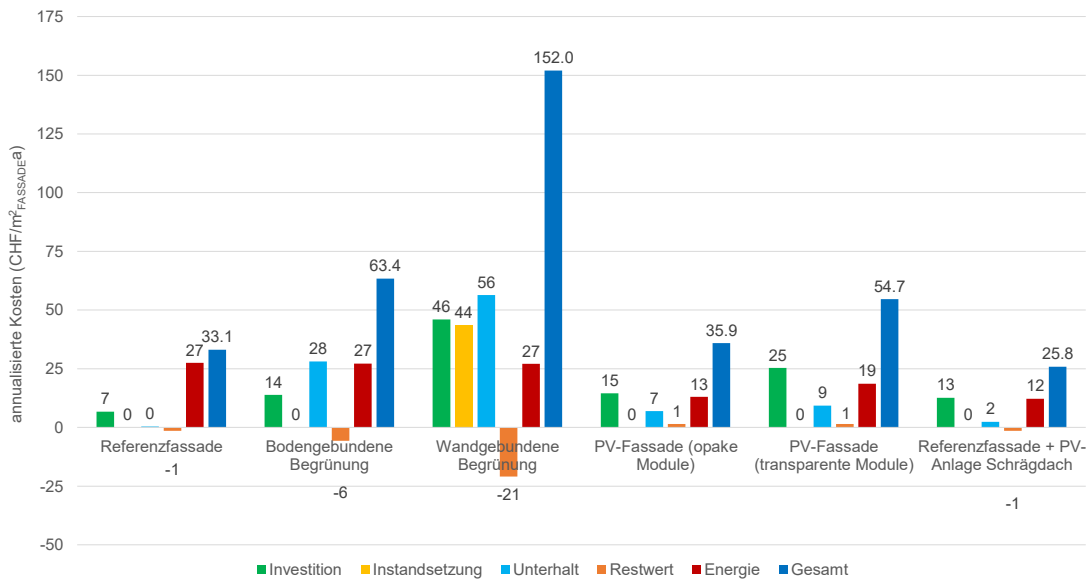


Abbildung 97: Annualisierte Kosten (Barwert) der fünf untersuchten Fassadensysteme und der PV-Dachanlage über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren, dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Altbau»

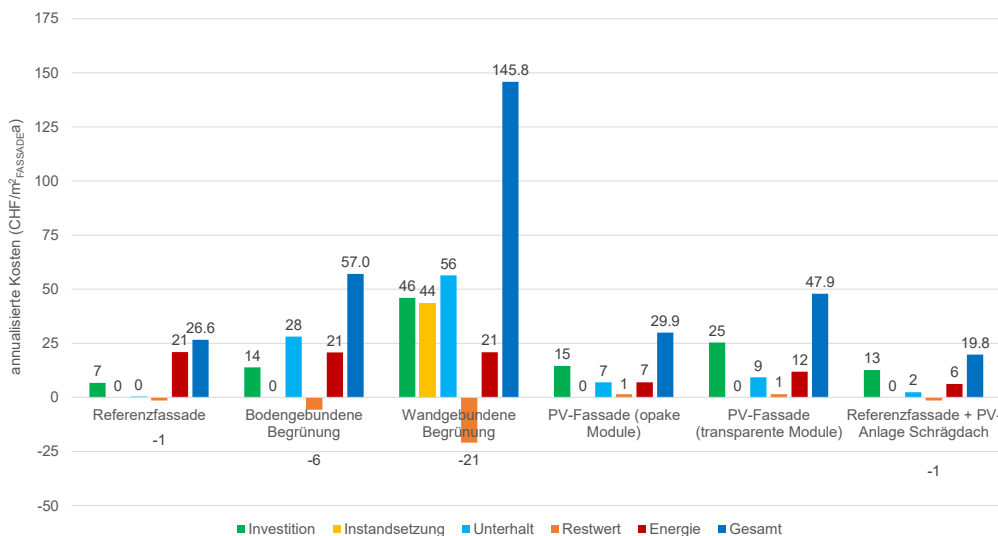


Abbildung 98: Annualisierte Kosten (Barwert) der fünf untersuchten Fassadensysteme und der PV-Dachanlage über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren, dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «sanierter Altbau».



Die zuvor beim «Neubau» getroffenen Aussagen, treffen überwiegend auch auf den «Altbau» / «sanierten Altbau» zu. Es gibt keine relevanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Altbauten, in Bezug auf den «Neubau» können jedoch folgende Aussagen getroffen werden:

- Bei den Fassadensystemen weist die **Referenzfassade** die niedrigsten annualisierten Gesamtkosten auf. Dies ist auf die geringeren Energiekosten zurückzuführen.
- Die annualisierten Gesamtkosten der **PV-Fassade mit opaken Modulen** liegen beim «Altbau» ca. 8 % und beim «sanierten Altbau» ca. 12 % höher als die Gesamtkosten der Referenzfassade. Eine optimierte Anordnung der PV-Module an der Fassade kann den Ertrag erhöhen und somit die Rentabilität der PV-Fassade verbessern.
- Die annualisierten Gesamtkosten der **bodengebundenen Fassadenbegrünung** sind beim «Altbau» / «sanierten Altbau» etwas höher als beim «Neubau», da die gesamte Fassade begrünt ist.

### 7.5.3 Kapitelzusammenfassung

Die Referenzfassade hat generell die niedrigsten **Investitions- und Unterhaltskosten**. Bei der bodengebundenen Begrünung sind die Investitionskosten nur geringfügig höher, allerdings fallen höhere Unterhaltskosten an. Bei der wandgebundenen Begrünung sind die Investitions-, Instandsetzungs- und Unterhaltskosten am höchsten. Die Investitionskosten einer PV-Fassade (transparent und opak) sind i.d.R. geringer als die der wandgebundenen Begrünung, jedoch deutlich höher als die Referenzfassade oder die der bodengebundenen Begrünung.

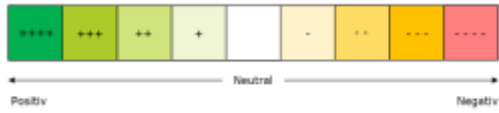
Die **annualisierten Kosten** sind bei der wandgebundenen Begrünung mit Abstand am höchsten, danach kommt die bodengebundene Begrünung sowie die transparente PV-Fassade. Die PV-Fassade mit opaken Modulen kann über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren die anfänglichen Kosten durch die Einsparungen im Betrieb amortisieren. Über den Lebenszyklus gesehen schneidet dieses System somit besser ab als die Referenzfassade. Aus wirtschaftlicher Sicht sind somit PV-Module mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad selbstverständlich zu bevorzugen.

Nachfolgend wurden die anfänglichen Investitionskosten (Abbildung 99) sowie die Lebenszykluskosten (Abbildung 100) der verschiedenen Begrünungs- und PV-Fassadensysteme im Vergleich zur Referenzfassade anhand des Referenzgebäudes «Neubau» bewertet.

Die Bewertung in Abbildung 99 erfolgte auf Basis der in Abbildung 94 dargestellten **Investitionskosten** für die einzelnen Systeme. Die Kosten für die transparenten PV-Module liegen dabei etwas höher als die für die opaken PV-Module, dies wurde in der Grafik jedoch nicht farblich unterschieden. Generell hängen die Initialkosten bei den PV-Systemen zudem von deren Gesamtfläche ab. D.h. je mehr PV-Fläche verbaut wird, desto günstiger sind die Investitionskosten pro m<sup>2</sup> für das System. Dies konnte in den Darstellungen jedoch nicht abgebildet werden.



### Legende



### Investitionskosten (Bewertung gilt für alle Orientierungen)

bodengebundene Begrünung

wandgebundene Begrünung

PV-Fassade, opake Module

PV-Fassade, transp. Module

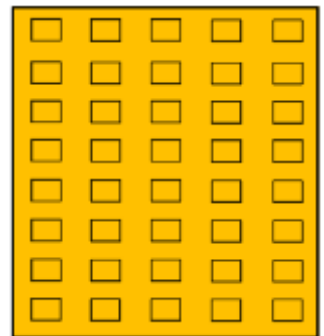
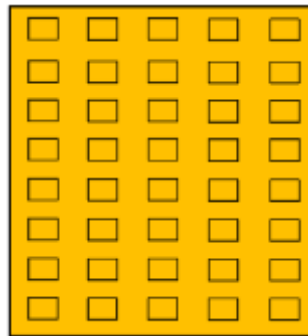
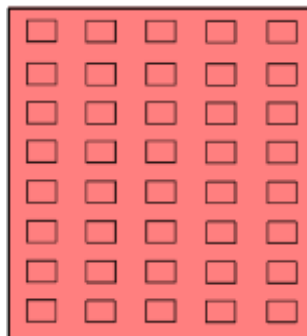
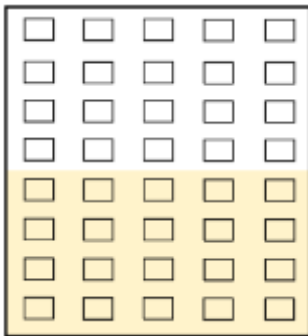


Abbildung 99: Bewertung der Initialkosten der vier Fassadensysteme anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).

### Legende



### Lebenszykluskosten (LCC)

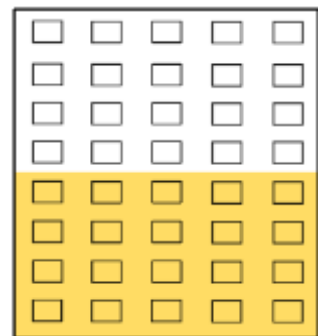
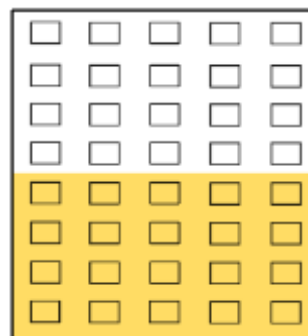
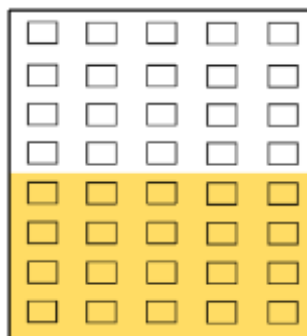
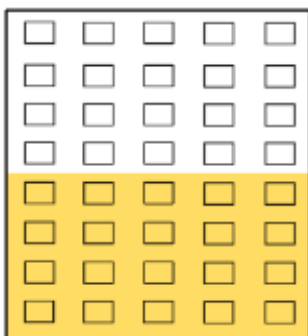
bodengebundene Begrünung

Nord

Ost

Süd

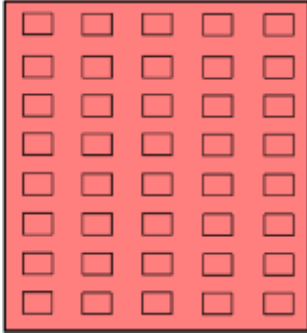
West



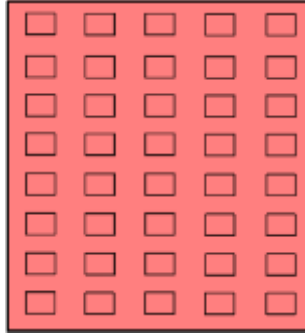


wandgebundene Begrünung

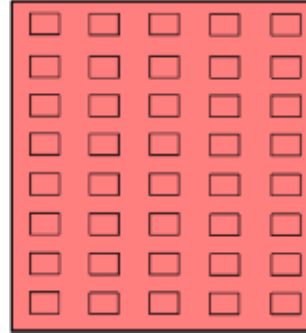
Nord



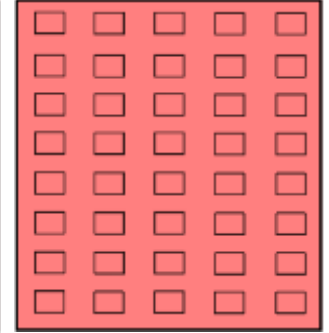
Ost



Süd

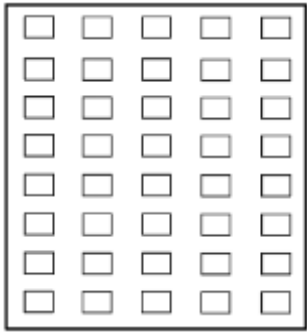


West

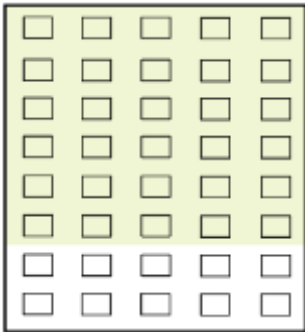


PV-Fassade, opake Module

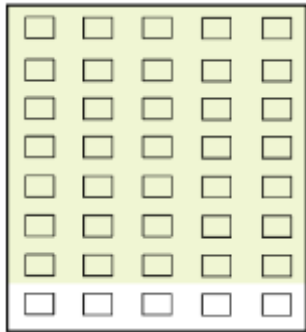
Nord



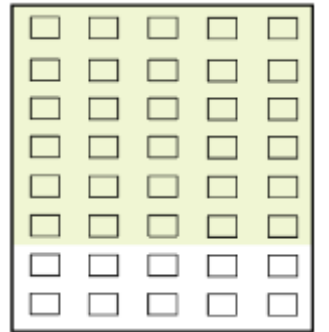
Ost



Süd

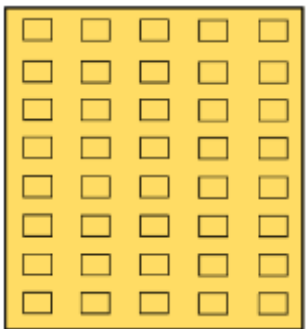


West

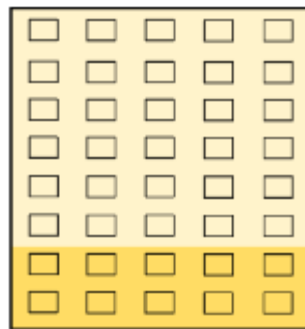


PV-Fassade, transparente Module

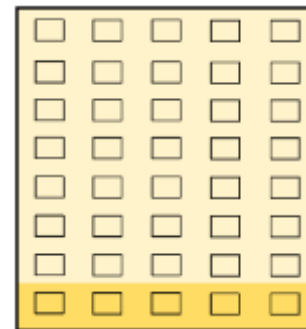
Nord



Ost



Süd



West

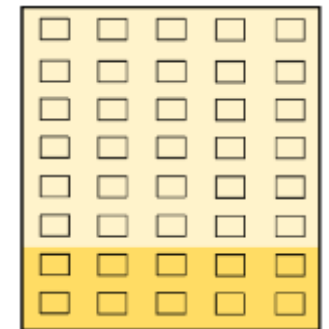


Abbildung 100: Bewertung der Lebenszykluskosten (LCC) der vier Fassadensysteme anhand des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).



Die Bewertung in Abbildung 100 erfolgte auf Basis der in Abbildung 96 dargestellten **annualisierten Kosten** für die einzelnen Systeme sowie der nachfolgenden Überlegungen.

- **bodengebundene Begrünung:** Zusätzlich zu den etwas höheren Investitionskosten fallen in der Betriebsphase ebenso laufende Kosten für die Pflege und Instandhaltung der Begrünung an. Diese sind jedoch deutlich geringer als die der wandgebundenen Begrünung. Da die Einsparungen im Betrieb (Kapitel 7.2) sehr gering sind, wurde hier keine Unterscheidung zwischen Orientierungen und Geschossen vorgenommen.
- **wandgebundene Begrünung:** Die wandgebundene Begrünung führt zu hohen Investitionskosten, zusätzlich kommen die Kosten für die Pflege und Instandhaltung des Systems in der Betriebsphase hinzu. Die Einsparung im Betrieb (Kapitel 7.2) sind ebenfalls gering, weshalb diesbezüglich auch hier keine Unterscheidung zwischen den Orientierungen und Geschossen vorgenommen wurde. Die Kosten dieses Fassadensystems liegen insgesamt deutlich höher als die übrigen Varianten, dies wurde auch farblich dargestellt. Bei der Pflege- und Instandhaltung ist zu berücksichtigen, dass die Kosten sich in den unteren und in den oberen Geschossen unterscheiden können. Aufgrund des höheren Aufwands / schwereren Zugänglichkeit in den oberen Geschossen liegen die Kosten hier im Allgemeinen höher als in den unteren Geschossen. Da dieser Kostenunterschied aufgrund der hohen Gesamtkosten (annualisierten Kosten) weniger ins Gewicht fallen, wurde auf eine farbliche Unterscheidung verzichtet.
- **opake PV-Fassade:** Dieses System ist das einzige der vier Fassadensysteme, welches die anfänglichen Kosten über den Lebenszyklus amortisiert. Über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren sind die Einsparungen mit Blick auf die annualisierten Kosten im Vergleich zur Referenzfassade jedoch nicht hoch. Bei der Bewertung wurde zudem eine farbliche Unterscheidung analog dem Stromerzeugungspotential der Fassade (Kapitel 7.3) vorgenommen. Da wo mehr Erträge und somit mehr Gewinne im Betrieb anfallen, können sich die anfänglichen Kosten schneller amortisieren. Unter den getroffenen Annahmen (Kosten, Energiepreise, Förderbeiträge, Inflation usw.) reicht die Stromproduktion an der Nordfassade aus – die grösstenteils selbst verbraucht wird –, um die Mehrkosten zu amortisieren.
- **transparente PV-Fassade:** Die annualisierten Kosten der transparenten PV-Fassade sind ähnlich hoch wie die der bodengebundenen Begrünung, weshalb die gleiche Farbstufe gewählt wurden. Jedoch wurde auch hier bei der Bewertung eine farbliche Unterscheidung analog dem Stromerzeugungspotential der Fassade (Kapitel 7.3) vorgenommen (analog der opaken PV-Fassade). Die Erträge und somit die Einsparungen im Betrieb reichen bei der transparenten PV-Fassade jedoch nicht aus, um die anfänglichen zusätzlichen Kosten im Vergleich zur Referenzfassade über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren zu amortisieren.

## 7.6 Zusammenfassung der quantitativen Analyse

Nachfolgend sind die Erkenntnisse aus der Analyse der quantitativen Aspekte nochmals zusammengefasst. Die verschiedenen Fassadensysteme wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf das Wohlbefinden in Innräumen (Temperatur und Überhitzungsstunden), auf den Betrieb des Gebäudes (Wärme, Kälte und Stromverbrauch), auf die Stromproduktion über die PV-Fassade, auf die Ökobilanz (Erstellung, Unterhalt und Betrieb, LCA) und die Initial- und Lebenszykluskosten (LCC) im Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) beurteilt. In Tabelle 42 werden die verschiedenen Aspekte in Abhängigkeit von der Orientierung bewertet. Ebenso wurde bei der Bewertung zwischen «verschattet» und «nicht verschattet» unterschieden.



Tabelle 42: Übersicht der Ergebnisse der quantitativen Analyse. Dargestellt ist der Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).

Quantitative Aspekte <i>Bewertung im Vergleich zur Referenzfassade (Faserzementplatte hinterlüftet)</i>	Fassadenbegrünung				PV-Fassade			
	bodengebunden		wandgebunden		opake Module		transparente Module	
	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet
<b>Thermisches Wohlbefinden im Innenraum: Temperaturen und Überhitzungsstunden</b> – die Bewertung wurde basierend auf den Neubau bezogen, bei Altbauten mit einer schlecht gedämmten Gebäudehülle kann der Einfluss grösser sein.								
Nord	+	+	+	+	neutral	neutral	neutral	neutral
Ost	+	+	+	++	neutral	neutral	neutral	neutral
Süd	+	+	+	++	neutral	neutral	neutral	neutral
West	+	+	+	++	neutral	neutral	neutral	neutral
<b>Betrieb des Gebäudes (Heiz- und Kühlbedarf)</b> – maximales Potenzial an der Ost- > Süd- > West- > Nordfassade.								
Nord	+	+	+	+	neutral	neutral	neutral	neutral
Ost	+	+	+	+	neutral	neutral	neutral	neutral
Süd	+	+	+	+	neutral	neutral	neutral	neutral
West	+	+	+	+	neutral	neutral	neutral	neutral
<b>Stromerzeugung ganzjährig</b> – Stromerzeugungspotenzial (maximales Potenzial auf dem Dach > an der Süd- > Ost- > West- > Nordfassade).								
Nord	neutral	neutral	neutral	neutral	++	++	+	+
Ost	neutral	neutral	neutral	neutral	++	+++	+	++
Süd	neutral	neutral	neutral	neutral	++	++++	+	+++
West	neutral	neutral	neutral	neutral	++	+++	+	++
<b>Stromerzeugung Winter</b> – Stromerzeugungspotenzial (maximales Potenzial an der Südfassade > auf dem Dach > an der Ost- / West- > Nordfassade).								
Nord	neutral	neutral	neutral	neutral	+	+	-	-
Ost	neutral	neutral	neutral	neutral	+	++	-	+-
Süd	neutral	neutral	neutral	neutral	+	++++	-	+++
West	neutral	neutral	neutral	neutral	+	++	-	+-
<b>Erstellung – Graue Treibhausgasemissionen (THGE)</b> – im Vergleich zur Referenzfassade wird bei einer bodengebunden Fassadenbegrünung zusätzliches Material benötigt und die anderen Systeme sind emissionsintensiver als eine Faserzementplatte.								
Nord	-	-	--	--	-----	-----	-----	-----
Ost	-	-	--	--	-----	-----	-----	-----
Süd	-	-	--	--	-----	-----	-----	-----
West	-	-	--	--	-----	-----	-----	-----



Quantitative Aspekte <i>Bewertung im Vergleich zur Referenzfassade (Faserzementplatte hinterlüftet)</i>	Fassadenbegrünung				PV-Fassade			
	bodengebunden		wandgebunden		opake Module		transparente Module	
	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet	verschattet	nicht verschattet
<b>Erstellung und Betrieb – kumulierter Aufwand (inkl. Stromproduktion) – in Bezug auf THG mit einer 30-jährigen Amortisationszeit.</b>								
Nord	-	-	--	--	--	+	---	neutral
Ost	-	-	--	--	++	++++	+	+++
Süd	-	-	--	--	+++	++++	++	++++
West	-	-	--	--	+	++++	+	+++
<b>Investitionskosten – der verschiedenen Systeme im Vergleich, alle Fassadensysteme führen zu höheren Investitionskosten als die Referenzfassade</b>								
Nord	-	-	----	----	---	---	---	---
Ost	-	-	----	----	---	---	---	---
Süd	-	-	----	----	---	---	---	---
West	-	-	----	----	---	---	---	---
<b>Lebenszykluskosten (LCC) – Investitions-, Instandhaltungs- Unterhalts- und Betriebskosten inkl. Restwert mit einer 30-jährigen Betrachtungsdauer...</b>								
Nord	--	--	----	----	neutral	neutral	--	--
Ost	--	--	----	----	neutral	+	--	-
Süd	--	--	----	----	neutral	+	--	-
West	--	--	----	----	neutral	+	--	-

<b>Legende:</b>	+	geringer Einfluss	++++	positiver Einfluss
	++	mittlerer Einfluss	----	negativer Einfluss
	+++	hoher Einfluss		
	++++	sehr hoher Einfluss		

**Fassadenbegrünungen** können auf das thermische Wohlbefinden im Innenraum sowie auf den Energiebedarf des Gebäudes einen positiven Einfluss nehmen. Dieser Einfluss ist jedoch beim «Neubau» als gering bis sehr gering zu bewerten. Bei Gebäuden mit einer schlecht gedämmten Hülle kann dieser Effekt etwas grösser sein. Mit Blick auf die Ökobilanz (LCA) führen die bodengebundene und vor allem die wandgebundene Begrünung zu etwas höheren Umweltauswirkungen als die Referenzfassade. Hinsichtlich der Lebenszykluskosten führt eine bodengebundene Begrünung zu höheren Kosten als die Referenzfassade (Investitionskosten sind geringfügig höher, hinzu kommen jedoch laufende Kosten für die Pflege der Begrünung während der Betriebsphase). Die wandgebundene Begrünung ist von den betrachteten Fassadensystemen das mit Abstand kostenintensivste System.

**PV-Systeme** können einen positiven Beitrag zur Stromproduktion über die Fassade leisten, wobei der Effekt stark von der Orientierung, dem Wirkungsgrad und einer möglichen Beschattung der Module abhängt. Dies spiegelt sich auch bei der Ökobilanz wieder: Je höher die Gewinne im Betrieb, desto schneller können die anfänglich hohen Umweltauswirkungen amortisiert werden. PV-Module mit einer schlechten Positionierung an der Fassade können z.T. die anfänglichen THGE über den





Betrachtungszeitraum von 30 Jahren gar nicht kompensieren. Auch hinsichtlich der Lebenszykluskosten ist ein hoher Wirkungsgrad und eine Anordnung der Module an Flächen mit einem hohen Stromerzeugungspotential essenziell. Transparente Module können die anfänglichen Kosten auch durch die Gewinne im Betrieb über die Betrachtungsperiode nicht amortisieren. Opake Module können bei einer gezielten Anordnung über den Lebenszyklus ökonomische Vorteile erzielen, der Unterschied zur betrachteten Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) ist jedoch nicht sehr gross.

## 8 Ergebnisse der Messungen

Der Aufbau der Messinfrastruktur sowie weitere Details zu den einzelnen Fassadenprototypen und Messeinrichtungen sind in Kapitel 5.3 beschrieben.

Ziel der Messungen war es, die Auswirkungen der verschiedenen Fassadenprototypen (bodengebundene und wandgebundene Begrünung, opake und transparente PV-Module) auf die Oberflächen- und Umgebungstemperaturen zu untersuchen. Die Messungen, welche als Grundlage für diesen Bericht dienen, fanden täglich im Zeitraum von Ende August 2022 bis Ende Januar 2023 statt. In diesen 5 Monaten konnten verschiedene Messdaten an insgesamt 147 Tagen gesammelt werden. Die Messdaten wurden anschliessend Tages- und Wettertypen zugeordnet und kategorisiert.

Es wurden 4 Tagestypen in Abhängigkeit von der Temperatur (abhängig von der täglichen Maximaltemperatur – Stundenwert) festgelegt:

- Sommertag:  $T_{max} \geq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Milder Tag:  $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \geq T_{max} \geq 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Kalter Tag:  $15 \text{ }^{\circ}\text{C} \geq T_{max} \geq 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Wintertag:  $T_{max} \leq 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Des Weiteren wurden 3 Wettertypen definiert:

- Sonniger Tag: die Globalstrahlung beträgt  $\geq 80 \%$  der Globalstrahlung bei klarem Himmel
- Regentag: die Tagesniederschlagsmenge ist  $\geq 1 \text{ mm}$
- Bewölkter Tag: wenn der Tag nicht den oben genannten Kriterien zugeordnet werden kann

Tabelle 43 gibt einen Überblick, wie viel Messdaten zu den definierten Tages- und Wettertypen gesammelt wurden.

Tabelle 43: Übersicht der Messergebnisse unterteilt in Tages- und Wettertypen. Insgesamt wurden die Messdaten von 147 Tagen gesammelt.

	Total	sonniger Tag	bewölkter Tag	regnerischer Tag
<b>Sommertag</b>	3	0	2	1
<b>Milder Tag</b>	54	17	21	16
<b>Kalter Tag</b>	64	3	28	33
<b>Wintertag</b>	26	2	18	6

Da die Messungen im Spätsommer starteten und die gesamten Herbstmonate umfassten, wurden vor allem Messwerte von milden und kalten Tagen aufgenommen (Temperaturbereich zwischen  $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \geq T_{max} \geq 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Im Dezember und Januar konnten ebenso Messwerte zu Wintertagen ( $T_{max} \leq 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dokumentiert werden. Es ist geplant, die Messungen auch nach dem Projektende weiterzuführen, um weitere Messwerte zu generieren und ebenso die Sommerperiode genauer zu betrachten.



## 8.1 Einfluss der Fassadensysteme im Sommer

Mit Blick auf den Klimawandel und dem damit verbundenen Temperaturanstieg wird es künftig vermehrt zu Hitzetagen kommen. Dies wird insbesondere in städtischen Gebieten deutlich zu spüren sein. Fassadensysteme können hier einen Einfluss nehmen. Wie gross dieser Einfluss sein kann, wurde anhand der nachfolgenden Messergebnisse aufgezeigt. Diese basieren auf den Messdaten für **milde, sonnige Tage**<sup>45</sup>.

### 8.1.1 Oberflächentemperaturen der Fassadenprototypen

In Abbildung 101 und Tabelle 44 sind die Messwerte in einem milden, sonnigen Tag für die Oberflächentemperaturen der verschiedenen Fassadenprototypen im Vergleich zur Messreferenzfassade im Tagesverlauf dargestellt.

Die Oberflächentemperaturen verändern sich in Abhängigkeit zur Globalstrahlung. Im Zeitfenster von 12:00 Uhr bis 15:00 Uhr erreichen die Temperaturen ihre Höchstwerte. Deutlich erkennbar ist, dass die Temperaturen der PV-Systeme, die der Messreferenzfassade übersteigen. Insbesondere die opaken PV-Module erreichen Oberflächentemperaturen von bis zu 47.4 °C und liegen somit 27.2 °C höher als der Maximalwert der Lufttemperatur (20.5 °C) und 5 °C über der max. Oberflächentemperatur der Messreferenzfassade (42.4 °C) (Tabelle 44).

Bei den Fassadenbegrünungen ist erkennbar, dass die Oberflächentemperaturen deutlich tiefer als die der Messreferenzfassade liegen (Abbildung 101 und Tabelle 44). Das Aufheizen der Fassadenoberfläche durch die Sonneneinstrahlung wird durch die Begrünung gemindert. Bei der bodengebundenen Begrünung (BB) wird eine maximale Temperatur von 28.4 °C erreicht, was 13.9 °C unter der max. Oberflächentemperatur der Messreferenzfassade liegt. Die wandgebundene Begrünung erreicht eine maximale Temperatur von 27.5 °C und liegt somit sogar 14.9 °C unter der max. Oberflächentemperatur der Messreferenzfassade. Vergleicht man die Fassadenbegrünungen mit dem nassen Schwamm (NS), verhalten sich diese Systeme ähnlich im Tagesverlauf (Abbildung 101). Generell kann also gesagt werden, dass Begrünungen die Temperatur an der Fassadenoberfläche deutlich senken können und somit das Mikroklima durchaus positiv beeinflusst werden kann. Ebenso sind die Temperaturen im Tagesverlauf ausgeglichener, d.h. es sind weniger Schwankungen zwischen der maximalen und der minimalen Oberflächentemperatur am Fassadenprototyp messbar. PV-Fassaden hingegen führen zu einem leichten Anstieg der Oberflächentemperaturen am Fassadenprototyp und verzeichnen grössere Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht.

Werden die in Tabelle 44 dargestellten Mittelwerte der Oberflächentemperatur an den Fassadenprototypen miteinander verglichen, so liegt der Wert der bodengebundenen Begrünung durchschnittlich 2.4 °C, derjenige der wandgebundenen Begrünung 2.5 °C und derjenige des nassen Schwamms 2.9 °C tiefer als der Referenzwert ( $\emptyset$  19.0 °C). Bei den Mittelwerten der PV-Fassaden liegen die Oberflächentemperaturen am Fassadenprototyp um 1.9 °C (opakes Modul) und um 1.1 °C (transparentes Modul) höher im Vergleich zur Messreferenzfassade.

Die Grafiken zeigen die Messwerte für einen milden, sonnigen Tag. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich der Einfluss der Systeme an einem heissen Sommertag noch weiter verstärkt.

---

<sup>45</sup> In diesem Kapitel wurden die Daten für milde, sonnige Tage dargestellt, da für diesen Tages- und Wittertyp eine hohe Anzahl Messdaten vorliegen.

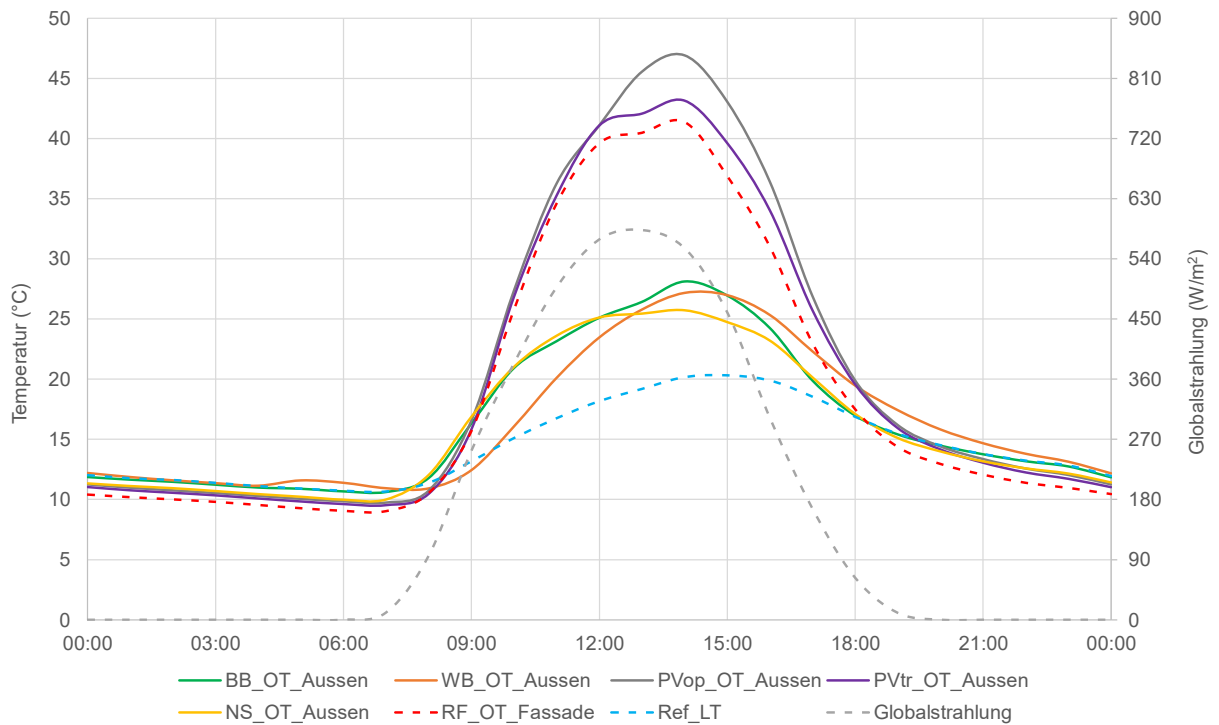


Abbildung 101: Oberflächentemperaturen an der Messreferenzfassade und den Fassadenprototypen im Tagesverlauf. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «milder, sonniger Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 44: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Minimalwerte der Oberflächentemperaturen an der Messreferenzfassade sowie den Fassadenprototypen. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperaturen					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	14.6	19.0	16.6	16.5	20.9	20.1	16.1
	$\Delta T$ zur RF			-2.4	-2.5	+1.9	+1.1	-2.9
<b>Max.</b>	°C	20.5	42.4	28.4	27.5	47.4	43.4	26.3
	$\Delta T$ zur RF			-13.9	-14.9	+5.0	+1.0	-16.1
<b>Min.</b>	°C	10.6	9.0	10.5	10.8	9.7	9.5	9.9
	$\Delta T$ zur RF			+1.6	+1.8	+0.7	+0.5	+0.9

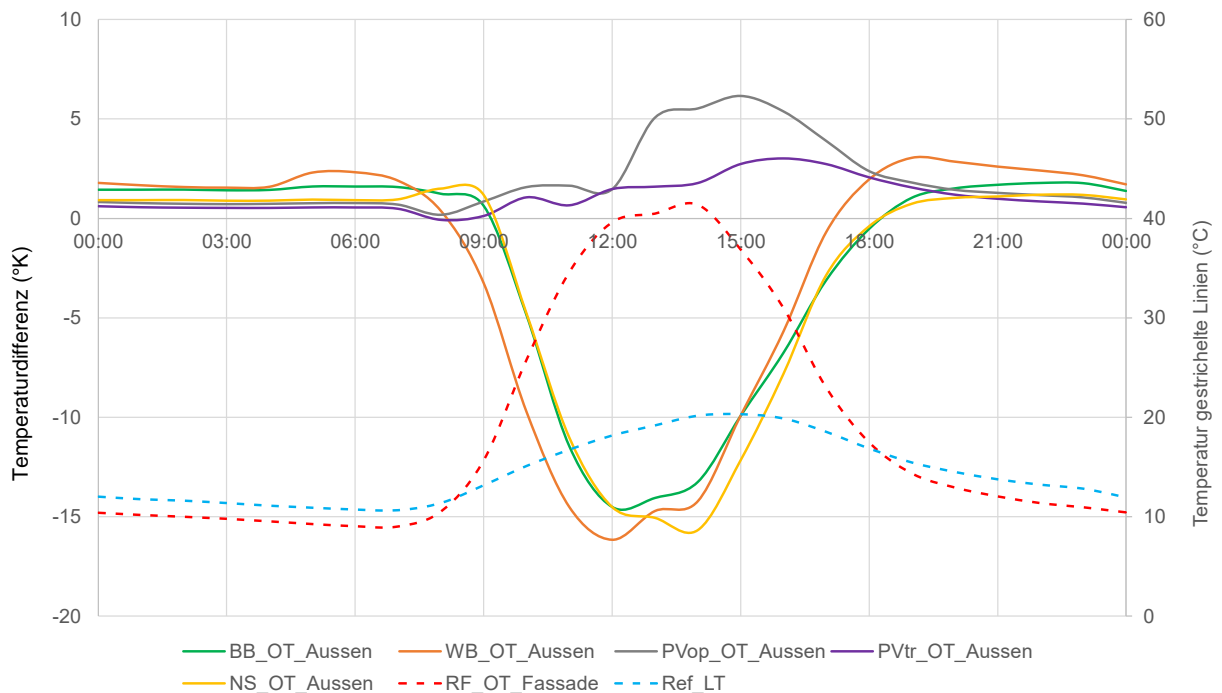


Abbildung 102: Oberflächentemperaturen an den Fassadenprototypen, dargestellt ist die Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «milder, sonniger Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violett»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).

In Abbildung 102 sind die Temperaturdifferenzen an der Aussenseitenoberfläche zwischen den untersuchten Fassadensystemen und der Messreferenzfassade im Tagesverlauf ersichtlich. In dieser Darstellung ist erkennbar, dass es bei den Fassadensystemen in der Nacht einen geringfügigen Anstieg der Oberflächentemperaturen gegenüber der Referenz gibt. Das Abkühlen der Fassade wird somit leicht gemindert. Die Temperaturen der PV-Systeme liegen dabei etwas tiefer als die begrünten Systeme, wobei das wandgebundene System aufgrund der höheren Masse mehr Wärme als das bodengebundene System speichert. Die Temperaturunterschiede in der Nacht sind im Allgemeinen jedoch gering. Werden die minimalen Oberflächentemperaturen der verschiedenen Fassadensysteme in Tabelle 44 mit der Referenzfassade verglichen, so liegen die Unterschiede zwischen + 0.5 °C bis + 0.7 °C für die transparente und opake PV-Fassade und bei + 1.6 °C bis + 1.8 °C für die bodengebundene und wandgebundene Begrünung.

#### 8.1.2 Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen)

Die verschiedenen Fassadenprototypen haben nicht nur Auswirkungen auf die Oberflächentemperaturen, sondern auch auf die Temperatur der dahinterliegenden Gebäudefassade. Abbildung 103 und Tabelle 45: zeigen die Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen) für einen milden, sonnigen Tag.

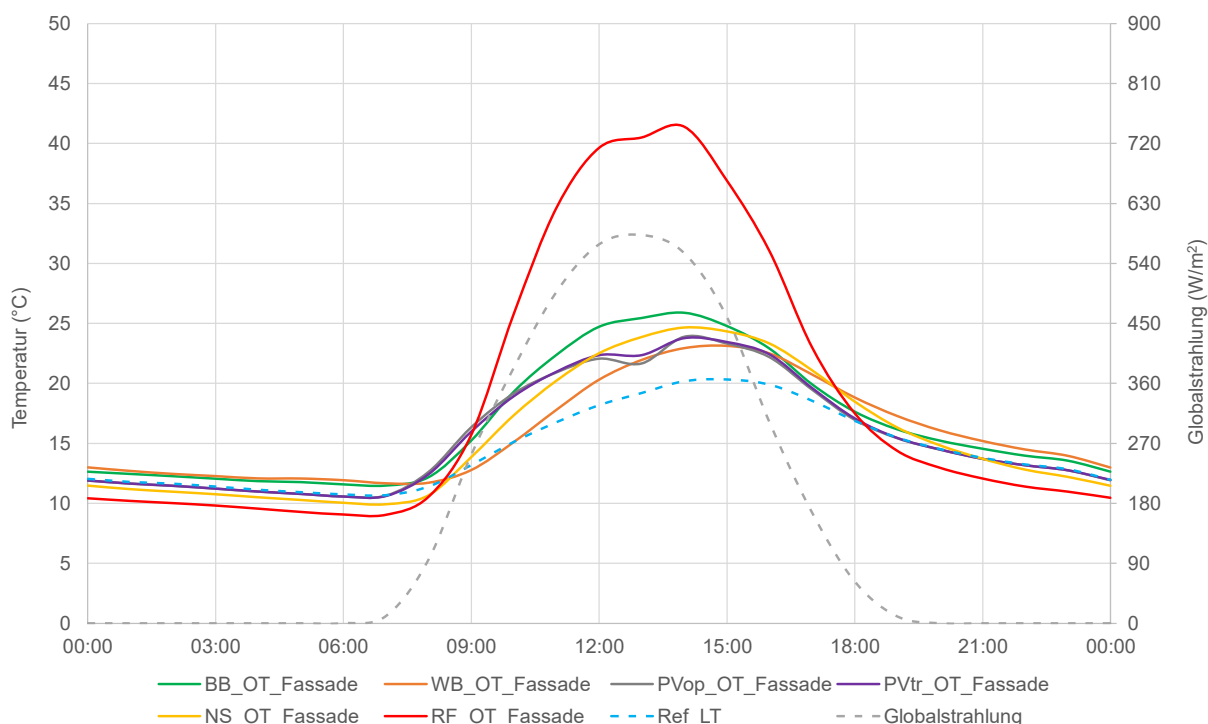


Abbildung 103: Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «milder, sonniger Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violett»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 45: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Minimalwerte der Temperaturen an der bestehenden Gebäudefassade der Messinfrastruktur. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Temperaturen an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	14.6	19.0	16.7	16.0	15.7	15.8	15.6
	$\Delta T$ zur RF			-2.3	-3.0	-3.3	-3.2	-3.4
<b>Max.</b>	°C	20.5	42.4	26.1	23.3	24.4	24.6	24.9
	$\Delta T$ zur RF			-16.3	-19.1	-17.9	-17.8	-17.5
<b>Min.</b>	°C	10.6	9.0	11.4	11.6	10.5	10.5	9.9
	$\Delta T$ zur RF			+2.5	+2.6	+1.5	+1.5	+0.9

Die Temperatur an der Gebäudefassade steigt in Abhängigkeit von der Globalstrahlung an (Abbildung 103). Während bei der Messreferenzfassade eine maximale Temperatur von 42.4 °C erreicht wird, liegen die Temperaturen hinter den Fassadenprototypen aufgrund der Verschattung deutlich tiefer: Die bodengebundene Begrünung weist bei den Maximaltemperaturen die geringste Differenz zur Messreferenzfassade auf im Vergleich zu den anderen Systemen (max. Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade 26.1 °C), da durch die Blattstruktur immer noch Solarstrahlung auf die Gebäudefassade trifft. Trotzdem kann bereits hier die Temperatur um bis zu 16.3 °C im Vergleich zur Messreferenzfassade gesenkt werden. Die grösste Temperaturdifferenz kann durch die wandgebundene Begrünung erreicht werden (-19.1 °C), da diese eine 100%ige Verschattung bietet und gleichzeitig der kühlende Effekt der Begrünung einen positiven Einfluss hat. Die PV-Systeme



schützen die Gebäudefassade ebenso vor der Solarstrahlung. Hinter dem opaken PV-Modul werden maximale Temperaturen von 24.4 °C ( $\Delta T$  zur RF von -17.9 °C) und hinter dem transparenten Modul werden solche von 24.6 °C ( $\Delta T$  zur RF von -17.8 °C) erreicht. Diese beiden Systeme verhalten sich diesbezüglich somit ähnlich. Die maximale Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade liegt bei allen Systemen etwas höher als die Lufttemperatur ( $\Delta T$  zur LT zwischen + 2.8 °C bis + 5.6 °C, Tabelle 45: , Abbildung 103). Allgemein kann gesagt werden, dass alle Fassadensysteme die Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade tagsüber positiv beeinflussen und die Temperatur im Durchschnitt um - 2.3 °C (bodengebundene Begrünung), - 3.0 °C (wandgebundene Begrünung), - 3.3 °C (opakes PV-Modul), - 3.2 °C (transparentes PV-Modul) und - 3.4 °C (nasser Schwamm) senken (Tabelle 45).

Abbildung 104 zeigt die Temperaturdifferenzen der Gebäudefassade hinter den Fassadenprototypen im Vergleich zur unbedeckten Messreferenzfassade. Der positive, temperaturmindernde Effekt der verschiedenen Fassadensysteme während des Tages ist auch hier gut erkennbar. In der Nacht führen die verschiedenen Fassadensysteme hingegen dazu, dass die Temperatur an der dahinterliegenden, bestehenden Gebäudefassade etwas höher liegt als ohne ein zusätzliches Fassadensystem (Referenz). Während sich die opaken und transparenten PV-Module ähnlich verhalten, sind hinter dem wandgebunden und dem bodengebundenen Begrünungssystemen nochmals leicht höhere Temperaturen erkennbar.

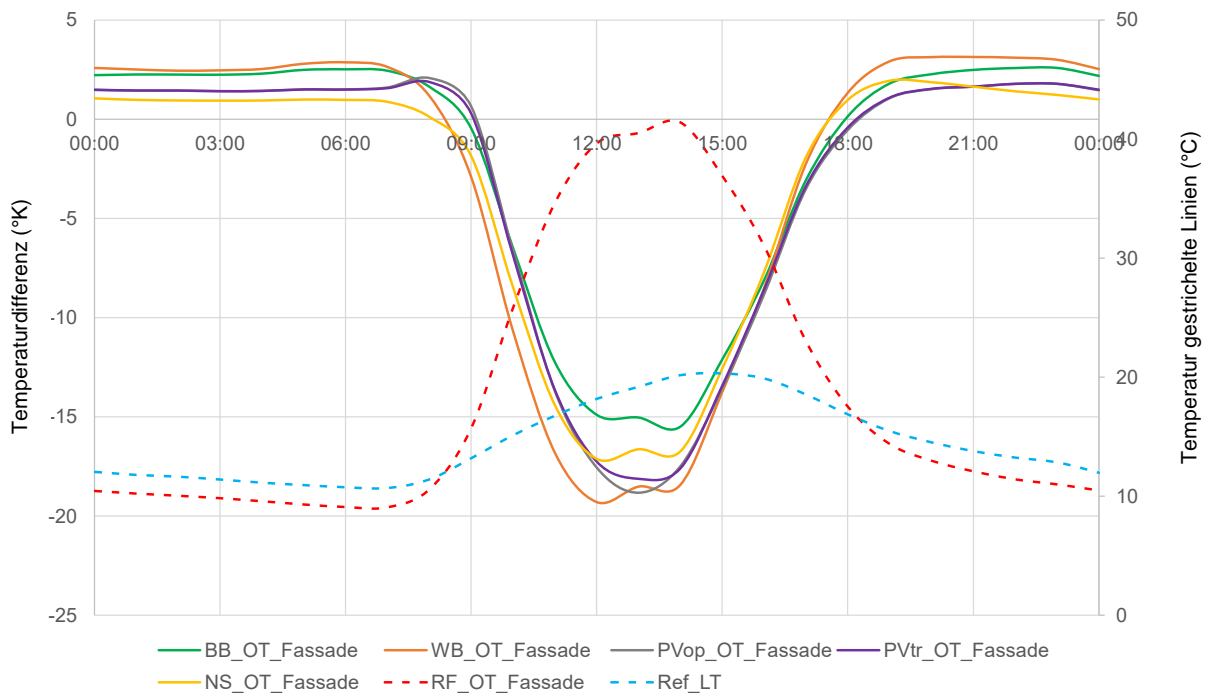


Abbildung 104: Temperatur an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen), dargestellt als Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «milder, sonniger Tag» kategorisiert wurden. Die Grafik zeigt die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violett»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



## 8.2 Einfluss der Fassadensysteme im Winter

Nicht nur in den Sommermonaten, auch im Winter können die verschiedenen Systeme einen Einfluss auf die Oberflächentemperaturen haben. Abbildung 105, rechts zeigt die bodengebundene Begrünung und Abbildung 105, links die wandgebundene Begrünung im Winter. Durch die Wahl von immergrünen Pflanzen sind auch in dieser Jahreszeit noch Blätter vorhanden.



Abbildung 105: links, der Fassadenprototyp mit der bodengebundenen Begrünung im Winter; rechts: die wandgebundene Begrünung mit der Messinfrastruktur, ebenfalls im Winter.

### 8.2.1 Oberflächentemperaturen der Fassadenprototypen

In Abbildung 106 und Tabelle 46 sind die Messwerte für die Oberflächentemperaturen der Fassadenprototypen im Tagesverlauf dargestellt. Diese zeigen die durchschnittlichen Werte für einen **bewölkten Wintertag**.

Der Temperaturverlauf an der Messreferenzfassade ist durch die «rot gestrichelte» Linie dargestellt. Mit zunehmender Globalstrahlung steigt auch die Oberflächentemperatur der Messreferenzfassade tagsüber an (max. Temperatur von 7.3 °C). Die PV-Fassaden verhalten sich ähnlich, wobei die Temperatur am opaken Modul etwas über der Messreferenzfassade (max. Temperatur von 8.2 °C) und die am transparenten Modul leicht unter der Messreferenzfassade (max. Temperatur von 7.0 °C) liegt. Die drei übrigen Fassadenprototypen, d.h. die bodengebundene Begrünung, die wandgebundene Begrünung und der nasse Schwamm weisen geringere Oberflächentemperaturen auf (max. Temperatur von 3.9 °C, 2.8 °C und 3.0 °C).

In der Nacht kühlt insbesondere die wandgebundene Begrünung weniger schnell ab, wobei eine minimale Oberflächentemperatur von -0.4 °C erreicht wird ( $\Delta T$  zur RF von +1.5 °C). Die anderen Fassadenprototypen kühlen in der Nacht, verglichen mit der Messreferenzfassade, ebenfalls weniger schnell ab: die Temperaturdifferenz der minimalen Oberflächentemperaturen der Fassadenprototypen zur Messreferenzfassade liegen zwischen + 0.3 °C und + 0.8 °C, wobei das transparente PV-Modul am meisten abkühlt. Bei den Mittelwerten der Oberflächentemperaturen der Fassadenprototypen liegt die bodengebundene Begrünung durchschnittlich 0.1 °C und der nasse Schwamm 0.4 °C tiefer als die Messreferenzfassade. Die wandgebundene Begrünung liegt 0.3 °C, die opake PV-Fassade 0.4 °C und die transparente PV-Fassade 0.2 °C über der Referenz (Tabelle 46).

Abbildung 107 zeigt die Temperaturdifferenz der Fassadenprototypen im Vergleich zur Messreferenzfassade. Es ist erkennbar, dass der Temperaturverlauf der PV-Fassaden sich demjenigen der Messreferenzfassade ähnlich verhält: die PV-Systeme wärmen sich tagsüber etwas langsamer auf, kühlen dafür in der Nacht langsamer ab und führen zu leicht höheren Temperaturen als bei der Messreferenzfassade. Die Fassadenbegrünungen sowie der nasse Schwamm heizen sich tagsüber langsamer auf und kühlen sich in der Nacht langsamer ab, wodurch geringere Temperaturschwankungen entstehen (Abbildung 106, Abbildung 107). Dieses Verhalten zeigte sich ebenfalls bei den Messergebnissen zu den Sommermonaten (Abbildung 101).

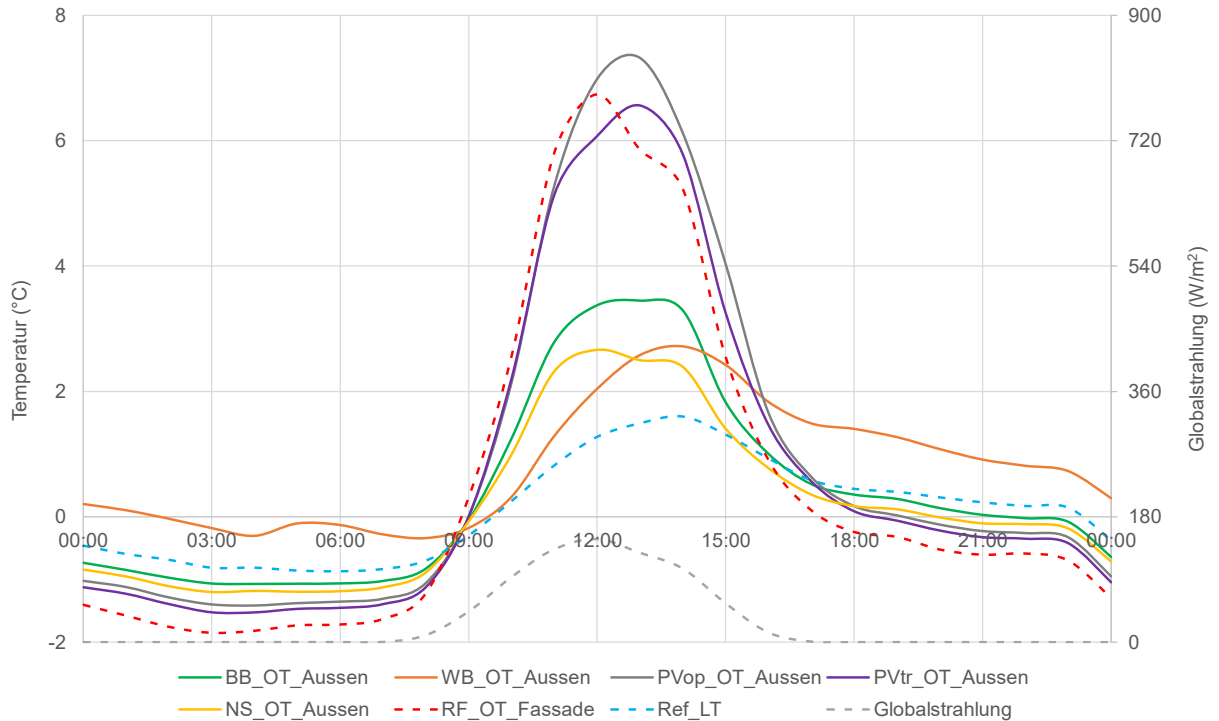


Abbildung 106: Oberflächentemperaturen an der Messreferenzfassade sowie den Fassadenprototypen im Tagesverlauf. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violett»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 46: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Minimalwerte der Oberflächentemperaturen an den Fassadenprototypen. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperaturen					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	0.1	0.5	0.4	0.8	0.9	0.7	0.1
	$\Delta T$ zur RF			-0.1	+0.3	+0.4	+0.2	-0.4
<b>Max</b>	°C	1.6	7.3	3.9	2.8	8.2	7.0	3.0
	$\Delta T$ zur RF			-3.4	-4.4	+0.9	-0.3	-4.2
<b>Min</b>	°C	-1.0	-1.9	-1.1	-0.4	-1.4	-1.5	-1.3
	$\Delta T$ zur RF			+0.8	+1.5	+0.5	+0.3	+0.6



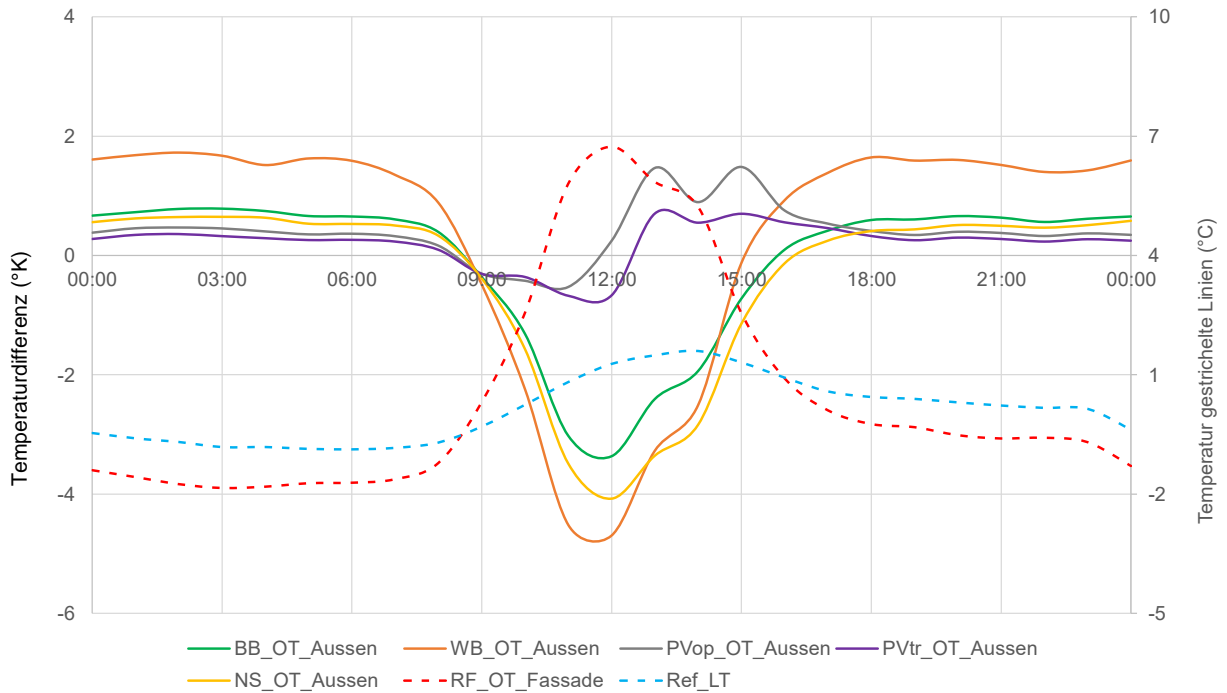


Abbildung 107: Oberflächentemperatur der Fassadenprototypen, dargestellt ist die Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violett»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).

### 8.2.2 Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen)

Abbildung 108 und Tabelle 47 zeigen die Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen). Die grössten Temperaturschwankungen im Tagesverlauf sind an der unbedeckten Messreferenzfassade erkennbar (max. Temperatur von 7.3 °C und min. Temperatur von - 1.9 °C). Die Fassadenprototypen führen dazu, dass die Temperaturen an der Gebäudefassade tagsüber weniger stark ansteigen und in der Nacht weniger stark absinken. Die Temperaturen hinter den opaken und der transparenten PV-Systemen verhalten sich ähnlich und liegen nah am Temperaturverlauf der Lufttemperatur. Einzig während des Tages, wenn die Globalstrahlung am stärksten ist, steigen die Temperaturen an der Gebäudefassade etwas mehr an (max. Temperatur von 2.3 °C und 2.4 °C, Lufttemperatur 1.7 C, Tabelle 47). Die geringsten Temperaturschwankungen und im Durchschnitt die höchsten Temperaturen weist die wandgebundene Fassadenbegrünung auf: der Mittelwert der Temperatur an der Gebäudefassade liegt um 1.3 °C über der Temperatur an der Messreferenzfassade (Mittelwert von 0.5 °C). Auch die bodengebundene Begrünung führt im Mittel zu leicht höheren Temperaturen an der Gebäudefassade und liegt im Vergleich zur Referenz um 0.8 °C höher. Im Vergleich zur wandgebundenen Begrünung lässt dieses System etwas mehr Temperaturschwankungen zu, d.h. die Temperatur an der Gebäudefassade liegt während des Tages etwas höher und in der Nacht etwas tiefer (Abbildung 108).

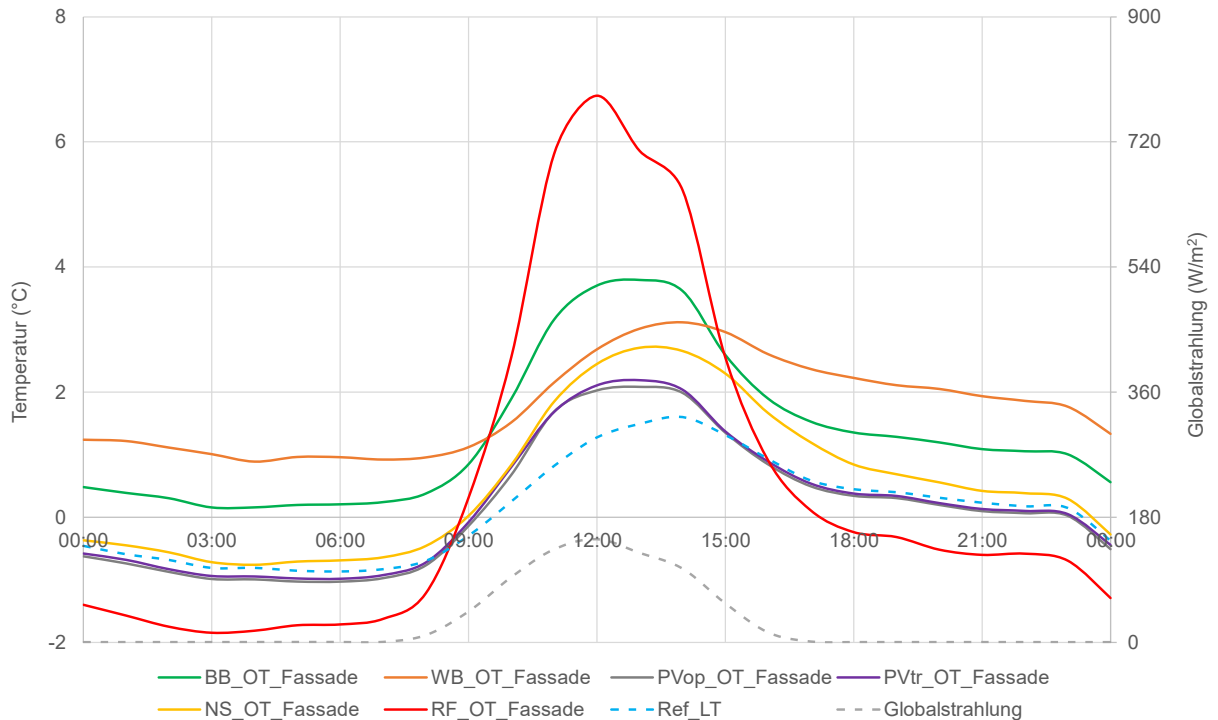


Abbildung 108: Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violett»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 47: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Minimalwerte der Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen). Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Temperatur an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	0.1	0.5	1.4	1.8	0.2	0.2	0.6
	$\Delta T$ zur RF			+0.8	+1.3	-0.4	-0.3	0.0
<b>Max</b>	°C	1.6	7.3	4.1	3.2	2.3	2.4	2.8
	$\Delta T$ zur RF			-3.1	-4.1	-5.0	-4.9	-4.4
<b>Min</b>	°C	-1.0	-1.9	0.1	0.8	-1.1	-1.0	-0.8
	$\Delta T$ zur RF			+2.0	+2.7	+0.8	+0.8	+1.1

Die Mittelwerte der Temperaturen an der Gebäudefassade unter den PV-Systemen liegen durchschnittlich um 0.4 °C (opakes Modul) und 0.3 °C (transparentes Modul) unter dem Mittelwert der Messreferenzfassade (0.5 °C, Tabelle 47).

Des Weiteren ist erkennbar, dass die Temperaturen an der Gebäudefassade hinter den PV-Systemen in der Nacht unter 0 °C sinken, während die Temperaturen hinter den Fassadenbegrünungen immer im positiven Bereich bleiben (Abbildung 108).

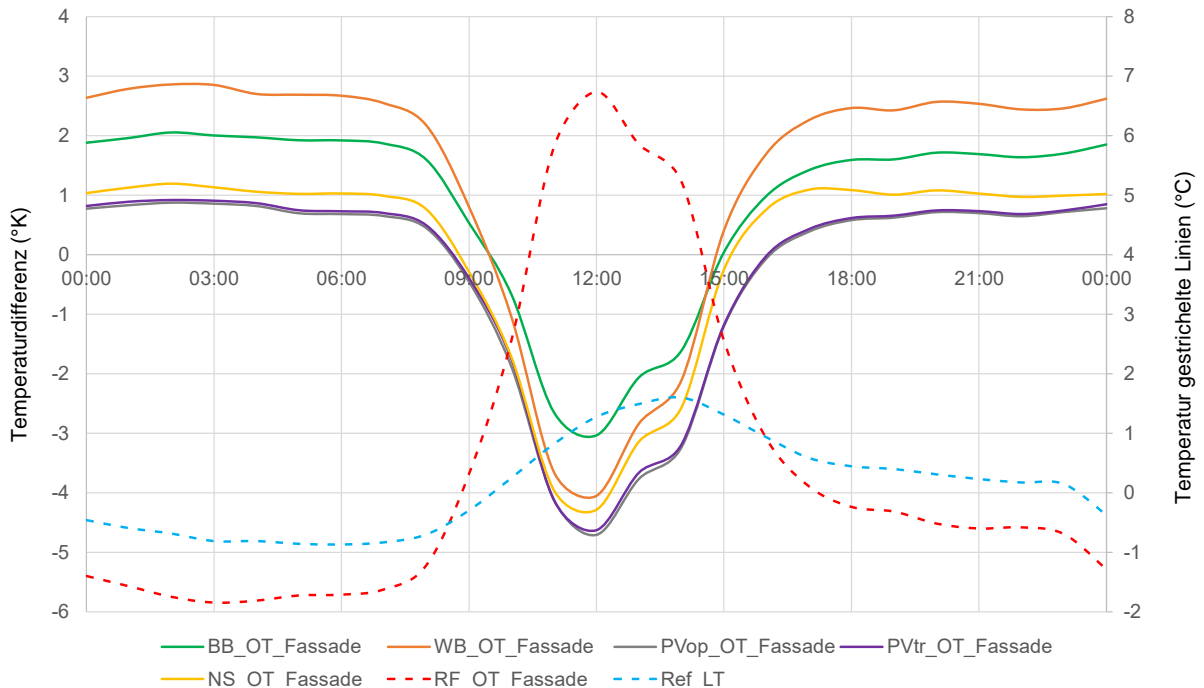


Abbildung 109: Temperatur an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen), dargestellt ist die Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violett»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).

Abbildung 109 zeigt die Differenz zwischen der Temperatur an der Gebäudefassade hinter den Fassadenprototypen im Vergleich zur unbedeckten Messreferenzfassade. Auch hier ist erkennbar, dass die Temperaturen hinter den PV-Elementen während des Tages und in der Nacht im Vergleich zu den übrigen Fassadensystemen (ausgenommen die Messreferenzfassade) tiefer liegen. Die Fassadenbegrünungen weisen somit einen leicht positiven («wärmenden») Effekt in der Nacht auf.

### 8.3 Zusammenfassung

Basierend auf den durchgeführten Messungen können folgende Aussagen getroffen werden:

#### Sommerfall

- Der Anstieg der Oberflächentemperaturen erfolgt analog zur Globalstrahlung, Höchstwerte werden jeweils zwischen 12:00 und 15:00 Uhr an allen Fassadensystemen erreicht.
- Die maximale Oberflächentemperatur an der opaken und transparenten PV-Fassade übersteigt diejenige an der Messreferenzfassade - Die Temperatur der opaken Module liegt dabei höher als die der transparenten Module.
- Die Temperaturen an der Gebäudefassade hinter den PV-Elementen werden durch deren Verschattung jedoch positiv beeinflusst (tiefere Werte als die Messreferenzfassade). Die Wirkung von opaken und transparenten Modulen ist dabei ähnlich temperaturmindernd.



- Deutlich erkennbar ist der positive Effekt der Begrünungen auf die Oberflächentemperatur der Fassadenprototypen: Im Vergleich zur Messreferenzfassade können hier Temperaturdifferenzen ( $\Delta T_{\max}$ ) von - 13.9 °C bei der bodengebundenen Begrünung und - 14.9 °C bei der wandgebundenen Begrünung verzeichnet werden. Diese Angaben beziehen sich auf Messwerte für milde, sonnige Tage. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich dieser positive Effekt der Hitzeminderung an heissen, sonnigen Tagen weiter verstärkt.
- Auch auf die Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen) haben die Begrünungssysteme einen positiven Einfluss. Die Temperaturen steigen im Tagesverlauf aufgrund der Verschattung der Systeme weniger stark an, insbesondere das wandgebundene System hat hier einen grossen Einfluss (100 % Verschattung). Das bodengebundene System lässt die Solarstrahlung teilweise durch (Durchlassgrad abhängig von der Blattdichte der verwendeten Pflanzen).
- In der Nacht führen alle Fassadensysteme im Vergleich zur Messreferenzfassade zu geringfügig höheren Oberflächentemperaturen an den Fassadenprototypen als auch an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen).
- Im Tagesverlauf der Oberflächentemperaturen an den Fassadenprototypen ist erkennbar, dass die PV-Systeme die grössten Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht aufweisen, die Fassadenbegrünungen die geringsten - insbesondere das wandgebundene System.
- Hinsichtlich des Temperaturverlaufs an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen) verhalten sich alle Fassadenprototypen ähnlich und reduzieren die Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht (geringere Temperaturen aufgrund der Verschattung durch die Fassadenprototypen am Tag und geringfügig höhere Temperaturen aufgrund der leicht dämmenden Wirkung in der Nacht).

#### Winterfall

- Beim Temperaturverlauf der Oberflächentemperaturen an den Fassadenprototypen verhalten sich die opaken und transparenten PV-Fassaden ähnlich wie die Messreferenzfassade. Die PV-Systeme wärmen sich tagsüber etwas langsamer auf, kühlen dafür in der Nacht langsamer ab und führen so nachtsüber zu leicht höheren Oberflächentemperaturen.
- Die Fassadenbegrünungen (bodengebunden und wandgebunden) heizen sich tagsüber langsamer auf und kühlen sich in der Nacht langsamer ab, wodurch geringere Temperaturschwankungen im Tagesverlauf entstehen.
- Werden die Temperaturen an der Gebäudefassade miteinander verglichen, treten die grössten Temperaturschwankungen im Tagesverlauf an der Messreferenzfassade (kein zusätzliches System) auf. Alle Fassadenprototypen führen dazu, dass die Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen) tagsüber weniger stark ansteigen (Verschattung) und in der Nacht weniger stark absinken (zusätzliche Schicht).
- Die geringsten Temperaturschwankungen im Tagesverlauf und im Mittel die höchsten Temperaturen werden bei den Fassadenbegrünungen verzeichnet, insbesondere beim wandgebundenen System. Die Temperaturen an der Gebäudefassade (hinter den Fassadenprototypen) sinken auch in der Nacht nie unter 0°C. Die Fassadenbegrünungen haben somit einen leicht positiven («wärmenden») Effekt in der Nacht.

Die Messergebnisse zu den übrigen Tages- und Wettertypen sind im Anhang 14.4 zu finden.



## 9 Ergebnisse der Quartierklimamodellierung (QKM)

Um den Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf das Umgebungsklima zu untersuchen, wurden Simulationen mit der an der HSLU am Institut für Gebäudetechnik und Energie entwickelten Software **Quartierklimamodellierung (QKM)** durchgeführt. Weitere Informationen zur Software sowie zu den in den Simulationen getroffenen Annahmen sind in Kapitel 5.4 aufbereitet. Die nachfolgenden Grafiken zeigen die PET, d.h. die physiologische äquivalente Temperatur, welche das thermische Empfinden einer «Standardperson» im Aussenraum repräsentiert.

In diesem Kapitel wurden folgende Fragestellungen untersucht:

- Welchen Einfluss können die verschiedenen Fassadensysteme auf den thermischen Komfort im Aussenraum haben? Welches System hat das grösste Potential zur Hitzeminderung?
- Wie wirken die Fassadensysteme im Tagesverlauf mit unterschiedlichen Anordnungen am Gebäude? Welche Orientierungen sollten jeweils bevorzugt werden?
- Wie wirken die Fassadensysteme auf Arealebene und wie wird das Potential durch äussere Faktoren, wie Windstärke und Windrichtung, beeinflusst?
- Wie hoch ist der Effekt einer Fassadenbegrünung im Vergleich zu anderen Grünelementen (Rasenflächen und Bäumen)?

### 9.1 Ausgangslage: PET im Strassenraum (ohne Begrünung oder PV)

Abbildung 110 zeigt den PET-Wert an einem Hitzetag ohne Wind im Tagesverlauf in 1 m und 5 m Abstand zur Referenzfassade (Ausgangslage, hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten). Der PET-Wert an der Nordfassade ist deutlich tiefer als in den übrigen Ausrichtungen. Am frühen Morgen und am späten Nachmittag kann in den Sommermonaten direkte Sonneneinstrahlung auf die Nordfassade treffen, was kurzfristig zu einem Anstieg der PET führt. Die PET an der Südfassade ist über den ganzen Tag gesehen am höchsten. In den Ausrichtungen Ost, West und Süd werden sehr hohe PET-Werte erreicht. In einem Abstand von 5 Metern zur Fassade sind die PET-Werte etwas tiefer, da der Einfluss der Rückstrahlung durch die Fassade kleiner ist. Eine Ausnahme bildet hier die Nordfassade. Bei dieser ist der 5 Meter entfernte Messpunkt etwas wärmer, was mit der kürzeren Beschattungsdauer erklärbar ist.

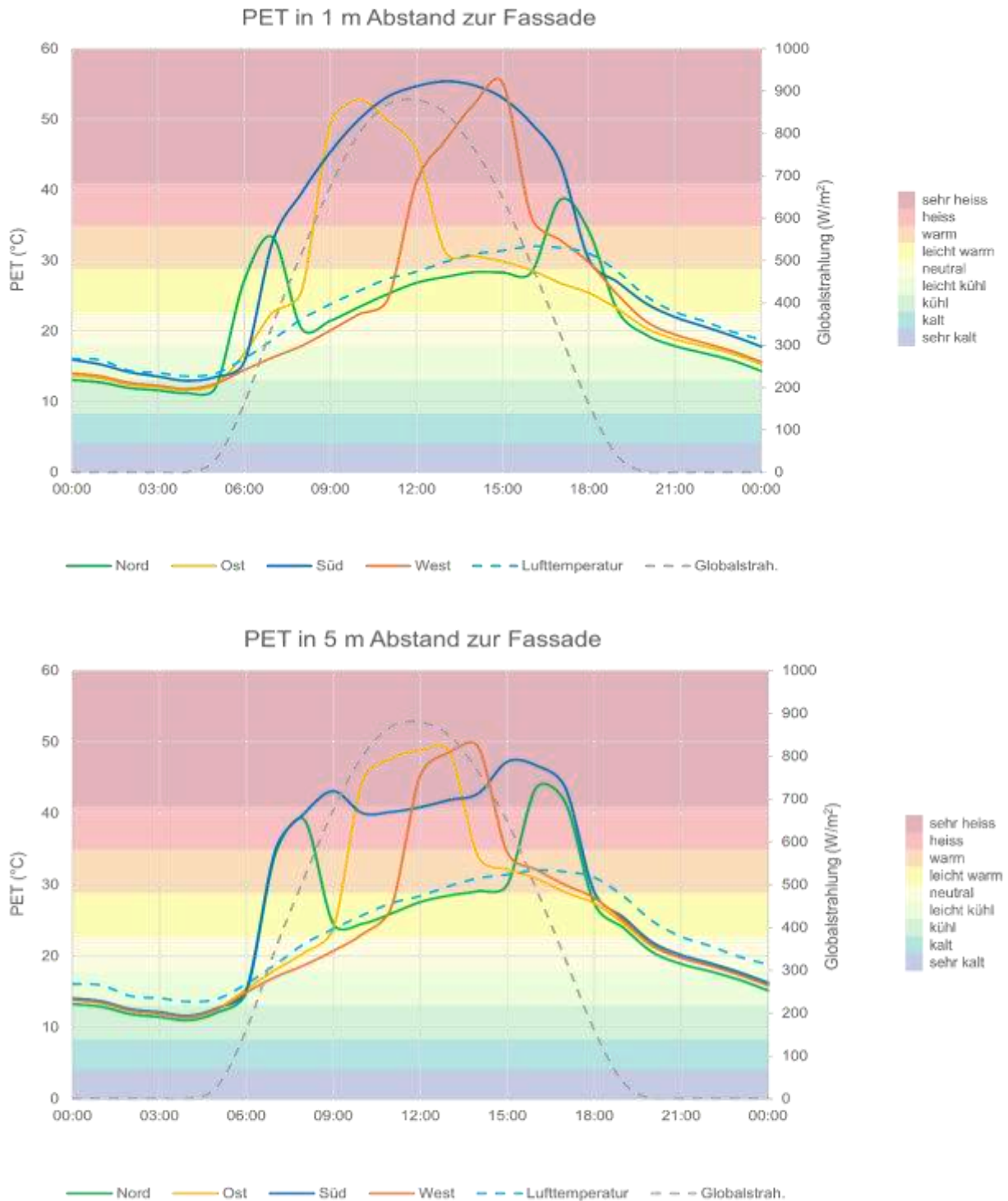


Abbildung 110: Der PET-Wert im Tagesverlauf an einem Hitzetag ohne Wind in einer Distanz von 1 m (oben) und von 5 m (unten) zur Referenzfassade.



Abbildung 111 zeigt dieselbe Simulation in einer Darstellung auf Arealebene. Dies ermöglicht eine gute Übersicht, wie sich der Wert im Aussenbereich lokal unterschiedlich verhält. Am Morgen um 9 Uhr ist die PET direkt an der Ostfassade aufgrund der direkten Sonneneinstrahlung am höchsten, ebenfalls bereits eine PET im sehr heissen Bereich weist die Südfassade auf. Etwas weiter entfernt von der Fassade Ostfassade werden aufgrund der Beschattung durch die Nachbarsgebäude wieder deutlich tiefere Werte erreicht. Am Mittag sind die PET-Werte im gesamten Areal, bis auf die beschatteten Bereiche nördlich der Gebäude, als sehr heiss einzustufen. Um 15 Uhr ist die beschattete Fläche deutlich grösser und umfasst die Zonen nördlich und östlich der Gebäude, an der West- und Südfassade ist die PET nach wie vor in dem sehr heissen Bereich. Im weiteren Verlauf des Tages sinken die Temperaturen, einzig die Nordfassade weist die höchsten Werte zwischen 15:00 und 18:00 Uhr auf.

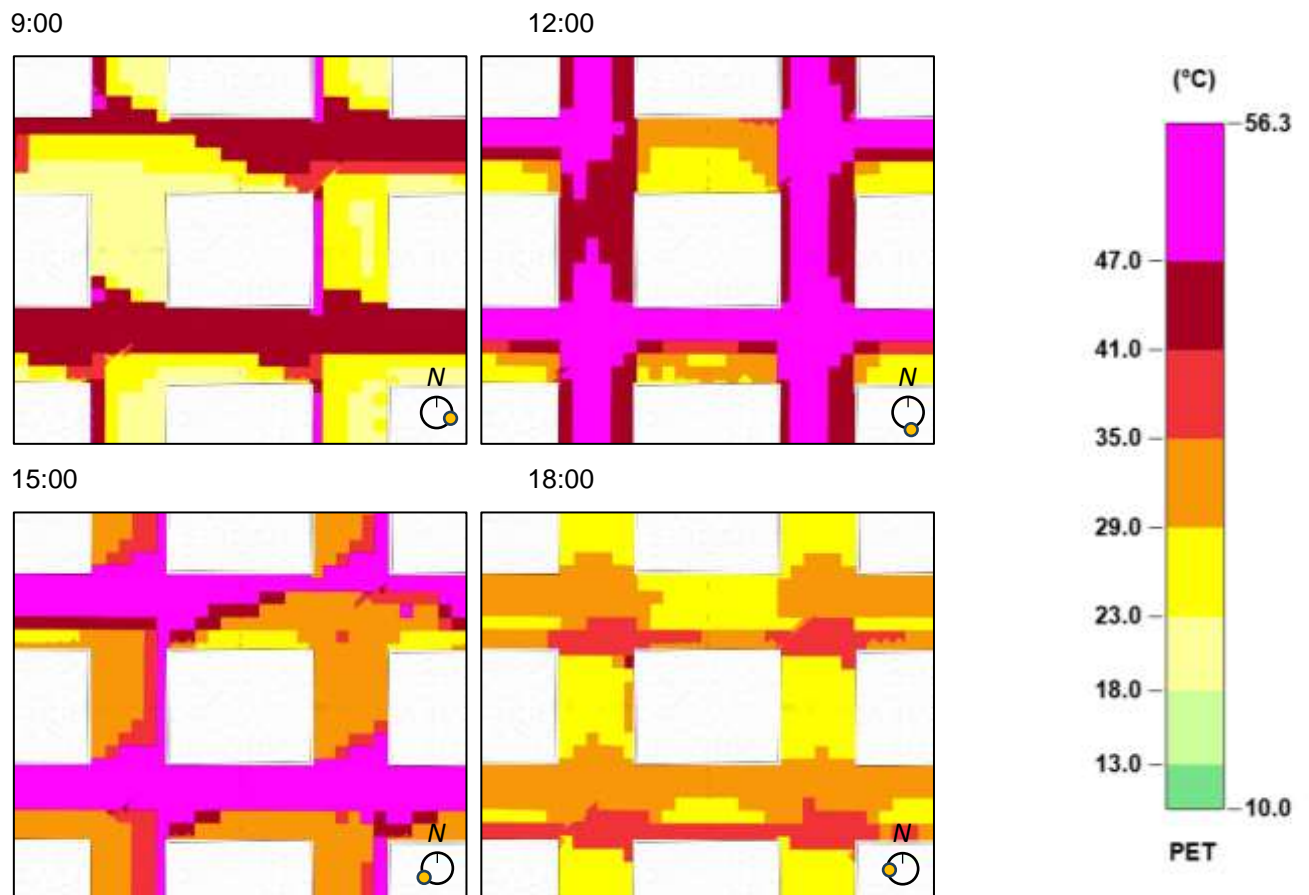


Abbildung 111: Die PET im Areal zu verschiedenen Tageszeiten (09:00 Uhr, 12:00 Uhr, 15:00 Uhr und 18:00 Uhr) an einem Hitzetag ohne Wind. Es ist ersichtlich, dass sich das Areal am Mittag und frühen Nachmittag mit der Referenzfassade sehr stark erhitzt.



## 9.2 Einfluss der Fassadensysteme auf den thermischen Komfort im Aussenraum

Um herauszufinden, welchen Einfluss die verschiedenen Fassadensysteme auf das thermische Empfinden im Aussenraum haben können, wurde die PET an zwei Distanzpunkten zur Fassade betrachtet, jeweils im Abstand von 1 m und 5 m zur Fassade.

Abbildung 112 zeigt den Einfluss der bodengebunden und wandgebundenen Begrünung sowie der opaken PV-Fassade auf die **PET an einem Messpunkt in 1 m Abstand zur Fassade**. Dargestellt ist die **PET-Differenz während des Tages (von 08:00 bis 20:00 Uhr)** im Vergleich zur Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten) an einem sonnigen Sommertag (Hitzetag, Lufttemperatur (LT) > 30 °C) in den verschiedenen Orientierungen. In den Simulationen wurden eine konstante Windgeschwindigkeit von 1 m/s sowie vier Windrichtungen (Nord-Süd, Ost-West, Süd-Nord und West-Ost) berücksichtigt.

Die schwarze Linie zeigt die Mindest- und Maximalwerte der PET-Differenz an, welche über den Tag erreicht werden. Der Minimalwert wird in der Regel am frühen Morgen (ca. 08:00 Uhr) oder am frühen Abend (ca. 19:00 Uhr) erreicht. Dies sind die Tageszeiten, an denen keine direkte Sonneneinstrahlung auf den Messpunkt trifft und die Aussentemperaturen nicht so hoch sind. In diesem Fall ist der Einfluss der Fassadensysteme auf das thermische Empfinden des Menschen entsprechend geringer als zu anderen Tageszeiten. Die Mindestwerte entstehen zudem durch eine «ungünstige» Windrichtung, d.h. der Wind verläuft parallel zur Fassade und mindert dadurch die Wirkung der Fassadensysteme. An einer Südfassade bedeutet eine «ungünstige» Windrichtung somit einen Wind von Ost nach West oder von West nach Ost.

Der Maximalwert wird erreicht, wenn eine direkte Sonneneinstrahlung auf den Messpunkt trifft und die Aussentemperaturen hoch sind. Hierbei wurde eine «günstige» Windrichtung angenommen, d.h. der Wind kommt entgegengesetzt zur Fassadenausrichtung und nimmt somit kaum Einfluss auf die Wirkung der Fassadensysteme. An einer Südfassade bedeutet eine «günstige» Windrichtung somit einen Wind von Nord nach Süd.

Die Balken bilden die Tages-Mittelwerte ab und zeigen den durchschnittlichen Einfluss der Fassadensysteme in den verschiedenen Orientierungen während des Tages. Die Mindest- und Maximalwerte berücksichtigen dabei eine «ungünstige» bzw. «günstige» Windrichtung.



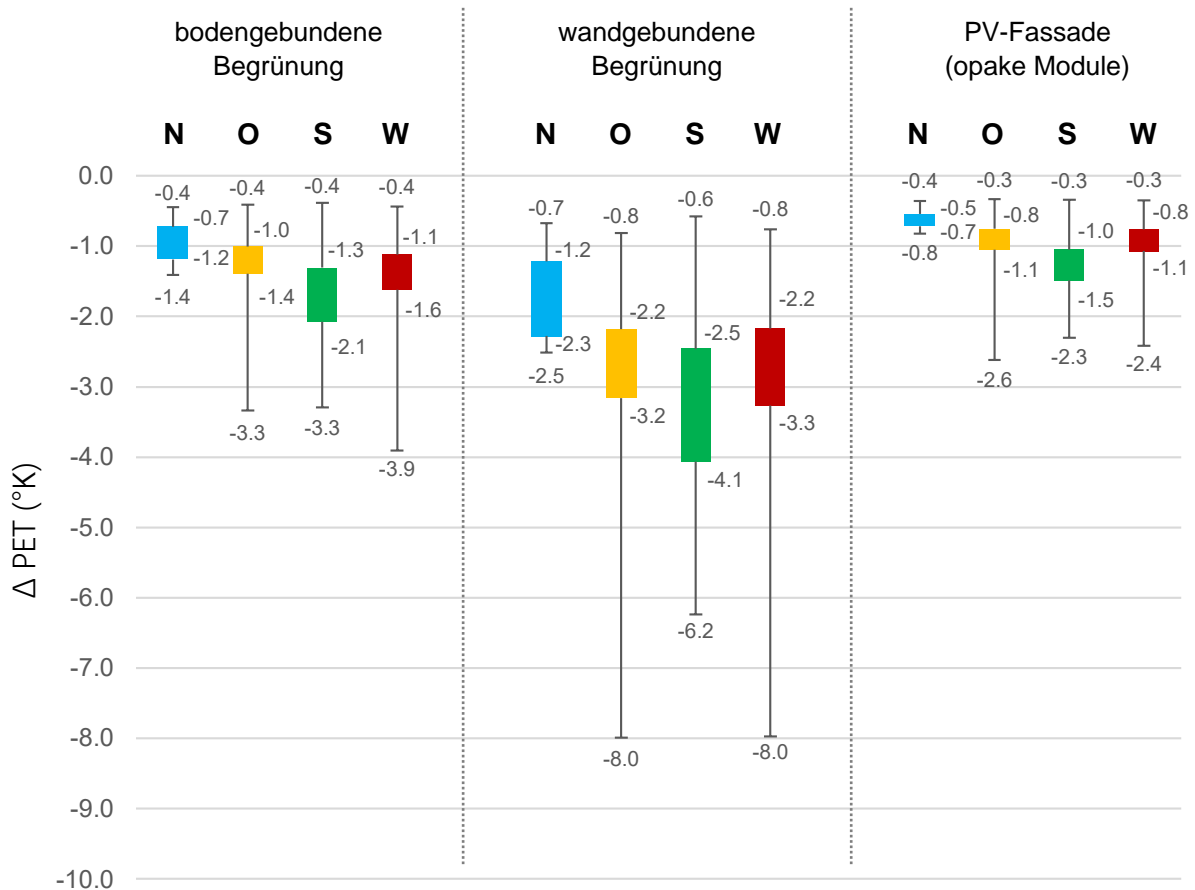


Abbildung 112: Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf die PET an einem Messpunkt in 1 m Abstand zur Fassade. Dargestellt ist die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade an einem sonnigen Sommertag in den verschiedenen Orientierungen. Die schwarze Linie zeigt die Minimal- und Maximalwerte, welche im Tagesverlauf erreicht werden. Die Balken zeigen den Tages-Mittelwert. Annahme Wind: 1 m/s in «günstiger» und «ungünstiger» Windrichtung.

Alle betrachteten Fassadensysteme nehmen einen positiven Einfluss auf die PET im Vergleich zur Referenzfassade. Die Wirkung der Fassadensysteme ist dabei abhängig von der Orientierung. Im Süden kann jeweils der grösste Effekt und im Norden der kleinste Effekt erzielt werden.

Bei der wandgebundenen Begrünung ist die positive Wirkung (kühlender Effekt) in allen Orientierungen am grössten, sie erreicht aufgrund der Substratschicht deutlich höhere PET-Differenzen. Durch das Substrat kann mittels Verdunstung eine höhere Kühlleistung als nur durch die Transpiration der Blätter erreicht werden. Eine bodengebundene Begrünung kann die PET deutlich weniger stark senken, jedoch immer noch etwas mehr als die PV-Fassade. Tendenziell ist das Potential von wandgebundenen Begrünungen an der Fassade somit höher einzustufen als das der bodengebundenen Systeme.

Bei den Mindestwerten der PET-Differenz, welche im Verlauf des Tages erreicht werden (schwarze Linie), sind bei den einzelnen Fassadensystemen zwar Unterschiede feststellbar, die Orientierung hat jedoch einen geringen Einfluss. Bei den Maximalwerten der PET-Differenz hat die Orientierung hingegen eine grössere Relevanz. An der Ost-, Süd- und Westfassade haben die Fassadensysteme einen deutlich höheren Einfluss auf die PET als an der Nordfassade. Insbesondere durch die wandgebundene Begrünung wird eine grosse Wirkung erzielt.



Neben den Fassadenbegrünungen kann auch die PV-Fassade einen positiven Einfluss auf die PET nehmen. An einer Südfassade kann die PET leicht gesenkt werden. Zwar heizen sich die PV-Module über den Tag mehr auf als die Referenzfassade, d.h. die Oberflächentemperaturen an der PV-Fassade sind höher, auf das thermische Empfinden im Aussenraum hat dies jedoch keinen negativen Einfluss. Das liegt zum einen daran, dass ein Teil der einfallenden Wärmestrahlung in Strom umgewandelt wird. Zum anderen weisen die PV-Paneele aufgrund ihrer dunklen Oberfläche eine geringere Albedo auf als die Referenzfassade (hellere Oberfläche). Die einfallende Strahlung wird somit weniger reflektiert, was sich positiv auf das thermische Empfinden auswirkt.

Abbildung 113 zeigt den Einfluss der bodengebundenen und wandgebundenen Begrünung sowie der PV-Fassade auf die **PET-Differenz an einem Messpunkt in 5 m Abstand** zur Fassade. Alle zuvor getroffenen Annahmen für die Untersuchungen in 1 m Abstand bleiben gleich.

Werden die Werte aus Abbildung 112 mit denjenigen aus Abbildung 113 verglichen, ist erkennbar, dass der Einfluss der Fassadensysteme auf die PET mit zunehmendem Abstand zur Fassade deutlich abnimmt. Während die PET bei der wandgebundenen Begrünung an der Südfassade in 1 m Abstand zur Fassade im Mittel um bis zu gut 4 °C gesenkt werden kann, beträgt die PET-Differenz in 5 m Abstand nur noch knapp die Hälfte. In den anderen Orientierungen verhält es sich ähnlich, ebenso bei den anderen Fassadensystemen.

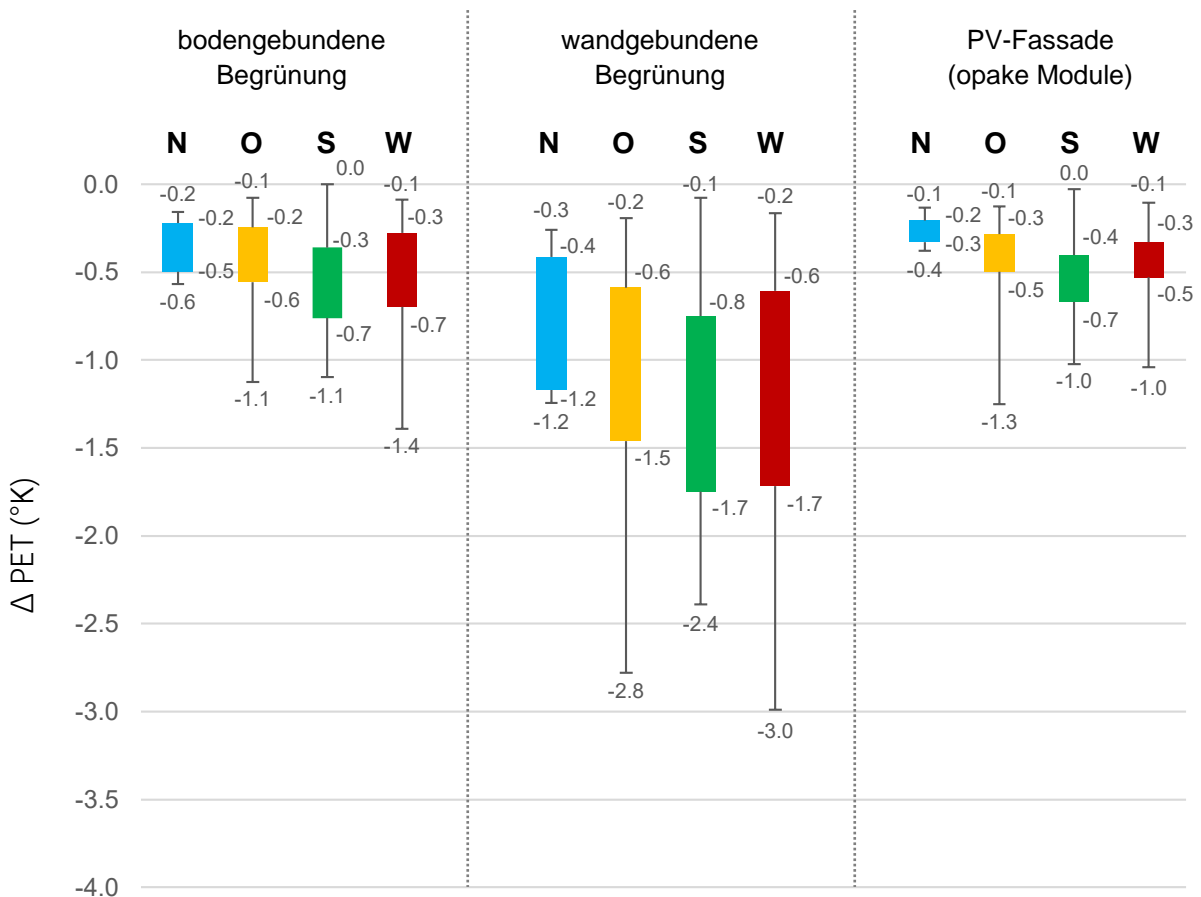


Abbildung 113: Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf die PET an einem Messpunkt in 5 m Abstand zur Fassade. Dargestellt ist die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade an einem sonnigen Sommertag in den verschiedenen Orientierungen. Die schwarze Linie zeigt die Mindest- und Maximalwerte, welche im Tagesverlauf erreicht werden. Die Balken zeigen den Tages-Mittelwert. Annahme Wind: 1 m/s in «günstiger» und «ungünstiger» Windrichtung.



Der **Einfluss der untersuchten Fassadensysteme auf das thermische Empfinden während der Nacht** ist wesentlich geringer. Abbildung 114 zeigt die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade in der Nacht (von 20:00 bis 08:00 Uhr). Der Messpunkt der PET liegt in **1 m Abstand zur Fassade**.

Die bodengebundene Begrünung und die PV-Fassade verhalten sich in der Nacht ähnlich, beide können die PET im Vergleich zur Referenzfassade leicht senken. Die Differenzen bleiben jedoch unter 1 °C. Die wandgebundene Begrünung erreicht auch in der Nacht etwas höhere PET-Differenzen. Die Wirkung der Fassadensysteme verhält sich in unterschiedlichen Orientierungen ähnlich, wobei die Ostfassade etwas höhere PET-Differenzen (da am Morgen bereits die erste Sonnstrahlung auf die Fassade trifft) und die Westfassade etwas geringere Werte aufweist.

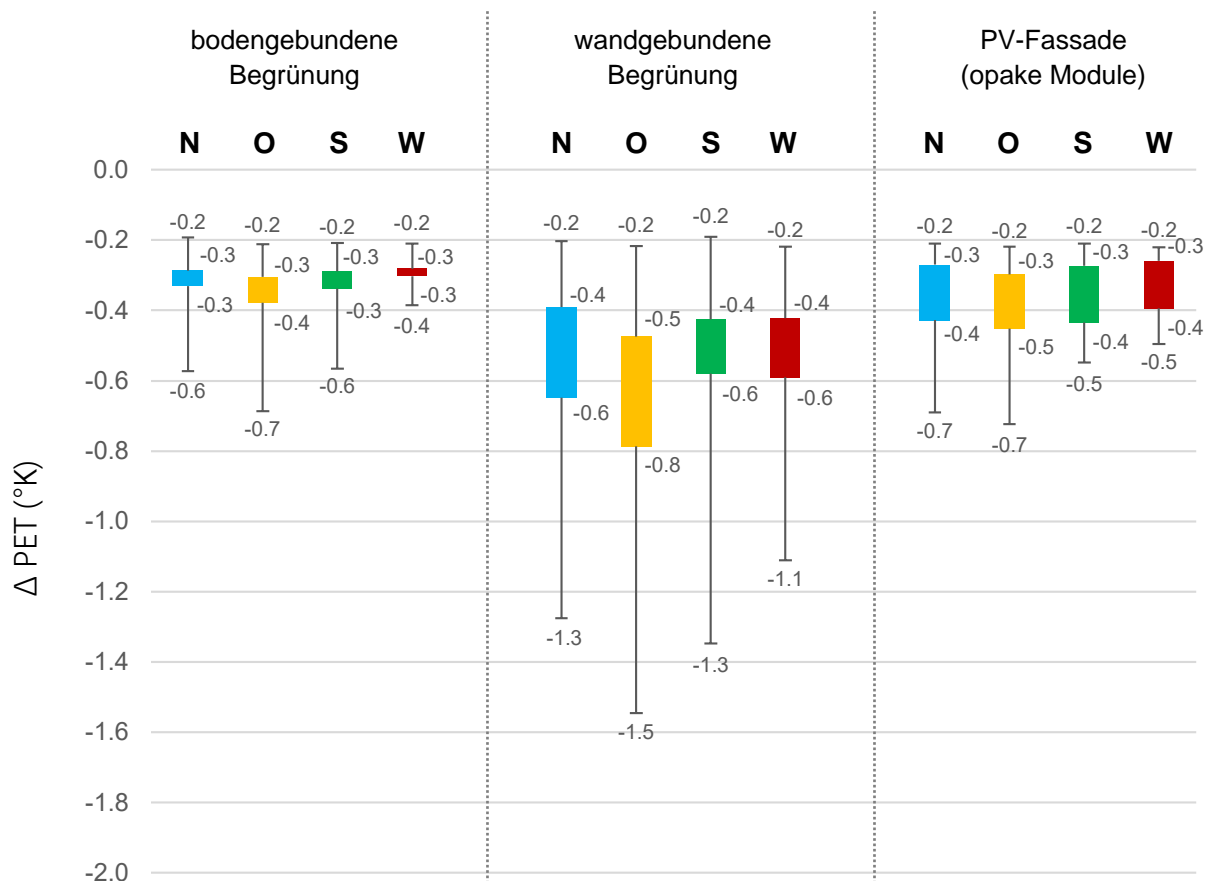


Abbildung 114: Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf die PET an einem Messpunkt in 1 m Abstand zur Fassade. Dargestellt ist die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade in der Nacht in den verschiedenen Orientierungen. Die schwarze Linie zeigt die Mindest- und Maximalwerte, welche im Verlauf der Nacht erreicht werden. Die Balken zeigen den Tages-Mittelwert. Annahme Wind: 1 m/s in «günstiger» und «ungünstiger» Windrichtung.



### 9.3 Wirkung der Fassadensysteme im Tagesverlauf

Um herauszufinden, wann und wie effektiv eine Fassadenbegrünung auf das thermische Empfinden im Tagesverlauf wirken kann, wurde als Beispiel die wandgebundene Begrünung genauer betrachtet. Abbildung 115 zeigt den Einfluss der Fassadenbegrünung auf die **PET im Tagesverlauf in 1 m Abstand** zur Fassade an einem sonnigen Sommertag (Hitzetag). Dargestellt ist die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade. Es wurde ein schwacher Wind mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s und einer Windrichtung von Nord nach Süd angenommen.

Der kühlende Effekt der Fassadenbegrünung tritt insbesondere bei direkter Sonneneinstrahlung auf. Das bedeutet, dass die positive Wirkung der Begrünung je nach Orientierung und Tageszeit stark variieren kann.

An einer Ostfassade (gelbe Linie) hat die wandgebundene Begrünung am Vormittag die grösste Wirkung, danach nimmt die Wirkung schnell und stark wieder ab.

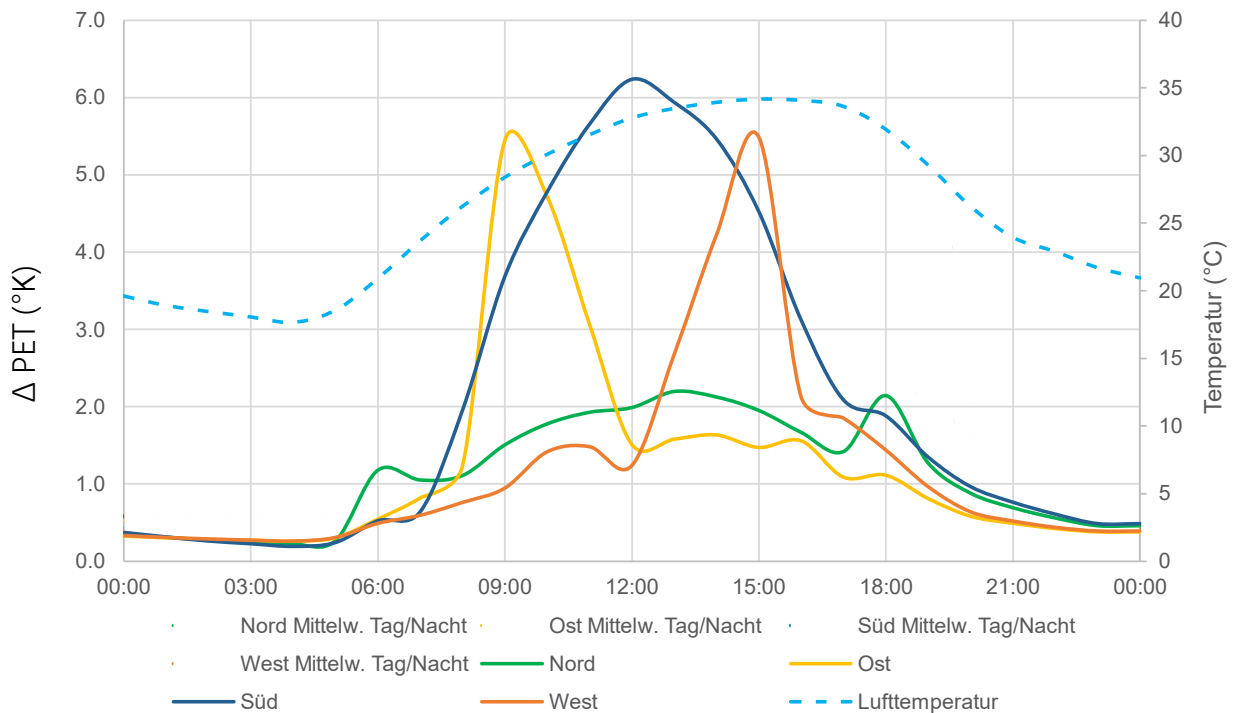


Abbildung 115: PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade in 1 m Abstand zur Fassade. Dargestellt ist der Einfluss der wandgebundenen Begrünung in verschiedenen Orientierungen an einem sonnigen Sommertag, Annahme Wind: 1 m/s, Windrichtung: Nord → Süd<sup>46</sup>.

An der Südfassade (dunkelblaue Linie) kann die wandgebundene Begrünung insbesondere am Mittag um 12:00 Uhr einen grossen Effekt erzielen. Da die Südfassade über einen längeren Zeitraum am Tag

<sup>46</sup> Die Maximalwerte der PET-Differenz weichen hier etwas von den Angaben in Abbildung 112 ab. Das liegt daran, dass in dieser Grafik die Windrichtung konstant von Nord nach Süd angenommen wird, statt alle vier Ausrichtungen differenziert zu betrachten. Die Windrichtung von Nord nach Süd beeinflusst somit insbesondere die Ost- und Westfassade, wodurch die Wirkung der Begrünung in diesen Orientierungen gemindert wird. Auf die Südfassade hat die angenommene Windrichtung weniger Einfluss («günstige» Windrichtung), die Maximalwerte der PET-Differenz sind somit die gleichen wie in Abbildung 112.



direkt besonnt wird, kann im Süden über den Tag gesehen die grösste Wirkung durch die Begrünung erreicht werden (vgl. Tages-Mittelwert bzw. den Balken in Abbildung 112).

Die Westfassade (orange Linie) verhält sich ähnlich wie die Ostfassade, wobei der positive Effekt der Begrünung im Westen zu einer späteren Tageszeit auftritt und somit im Vergleich zur Ostfassade als wichtiger eingestuft werden kann. Wird die Lufttemperatur (hellblau gestrichelte Linie) betrachtet, so ist diese am Vormittag noch unter 30 °C, sie erreicht am Mittag die 30 °C und steigt am Nachmittag noch weiter an (bis zu 34.2 °C um 15:00 Uhr). Die Lufttemperatur sowie die PET ist somit zu einer späteren Tageszeit höher und eine Verbesserung des thermischen Komforts (Hitzeminderung) wichtiger.

Auch an der Nordfassade (grüne Linie) kann die wandgebundene Begrünung einen kühlenden Effekt erzielen. Dieser ist jedoch deutlich geringer als in den übrigen Orientierungen, dafür treten weniger Schwankungen auf. Das liegt vor allem daran, dass diese Fassadenseite kaum direkte Sonnenstrahlung erhält.

In der Nacht ist der kühlende Effekt durch die wandgebundene Begrünung am geringsten und ist weniger abhängig von der Orientierung der Fassade.

Für die bodengebundene Begrünung und die PV-Fassade können ähnliche Aussagen gemacht werden, wobei diese Systeme geringeren Einfluss auf die PET-Differenz nehmen – insbesondere die PV-Fassade. Abbildung 116 zeigt die PET-Differenz für die bodengebundene Begrünung im Tagesverlauf an einem sonnigen Sommertag, Abbildung 117 die Simulationsergebnisse für die PV-Fassade.

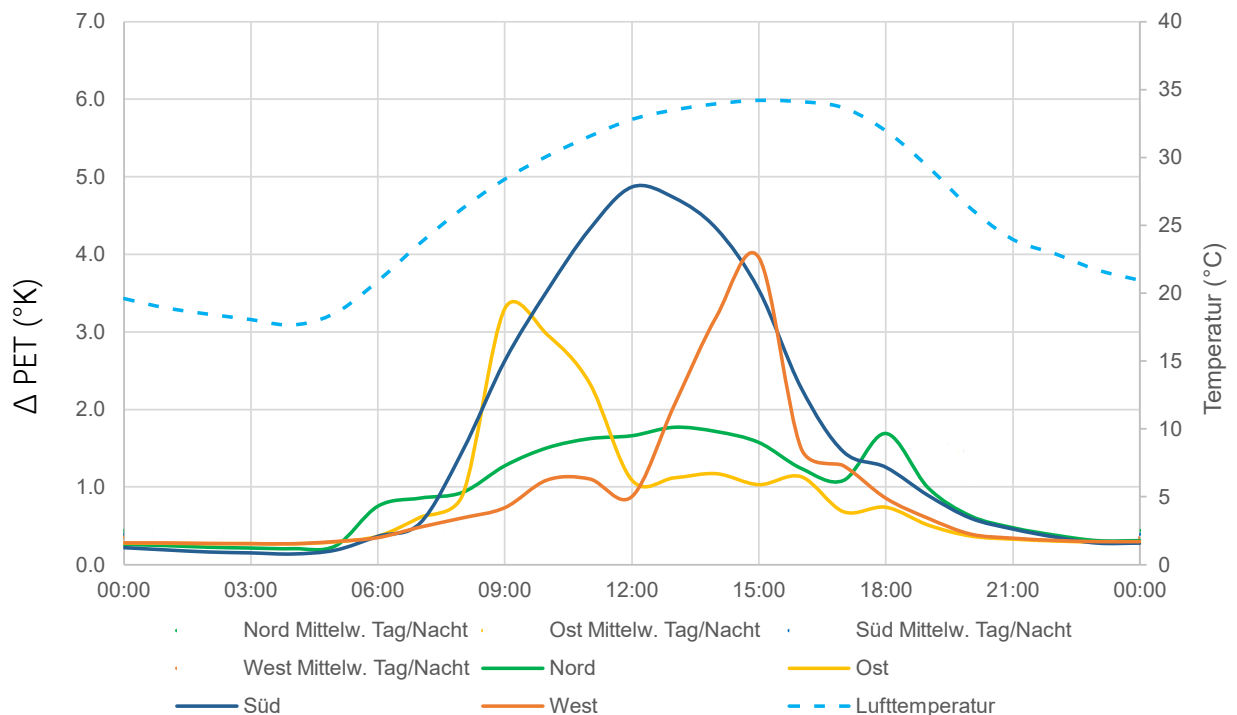


Abbildung 116: PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade in 1 m Abstand zur Fassade. Dargestellt ist der Einfluss der bodengebundene Begrünung in verschiedenen Orientierungen an einem sonnigen Sommertag, Annahme Wind: 1 m/s, Windrichtung: Nord → Süd.

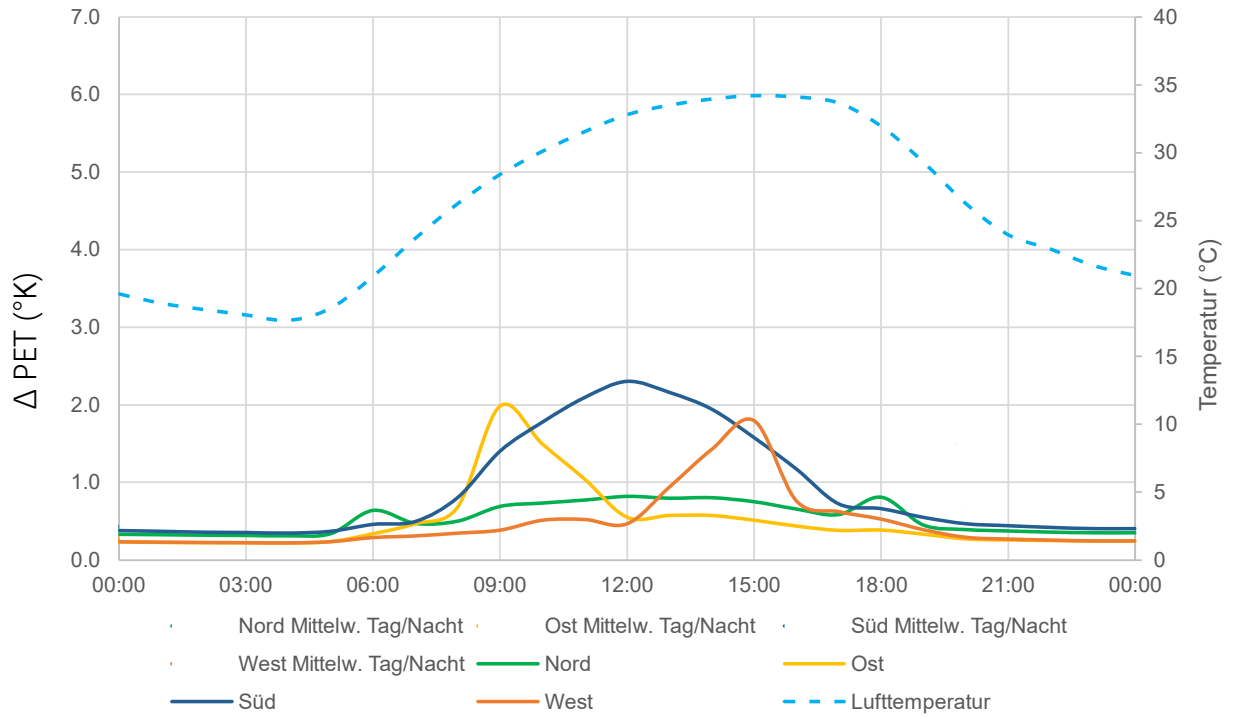


Abbildung 117: PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade in 1 m Abstand zur Fassade. Dargestellt ist der Einfluss der PV-Fassade in verschiedenen Orientierungen an einem sonnigen Sommertag, Annahme Wind: 1 m/s, Windrichtung: Nord → Süd.



## 9.4 Wirkung der Fassadensysteme auf Arealebene

In Kapitel 9.2 wurde der Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf die PET an einem Messpunkt in einem Abstand von 1 m und 5 m zur Fassade untersucht. Diese Betrachtung wird nun erweitert und der Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf Arealebene zu bestimmten Tageszeiten aufgezeigt.

Abbildung 118 zeigt den Einfluss der wandgebundenen Begrünung auf die PET im Vergleich zur Referenzfassade im angenommenen Areal an einem sonnigen Sommertag (Hitzetag). Dargestellt sind vier verschiedene Tageszeiten (9:00 Uhr, 12:00 Uhr, 15:00 Uhr und 18:00 Uhr). In dieser Simulation wurde eine Situation ohne Wind angenommen, um die Wirkung der Fassadenbegrünung nicht zu beeinflussen.

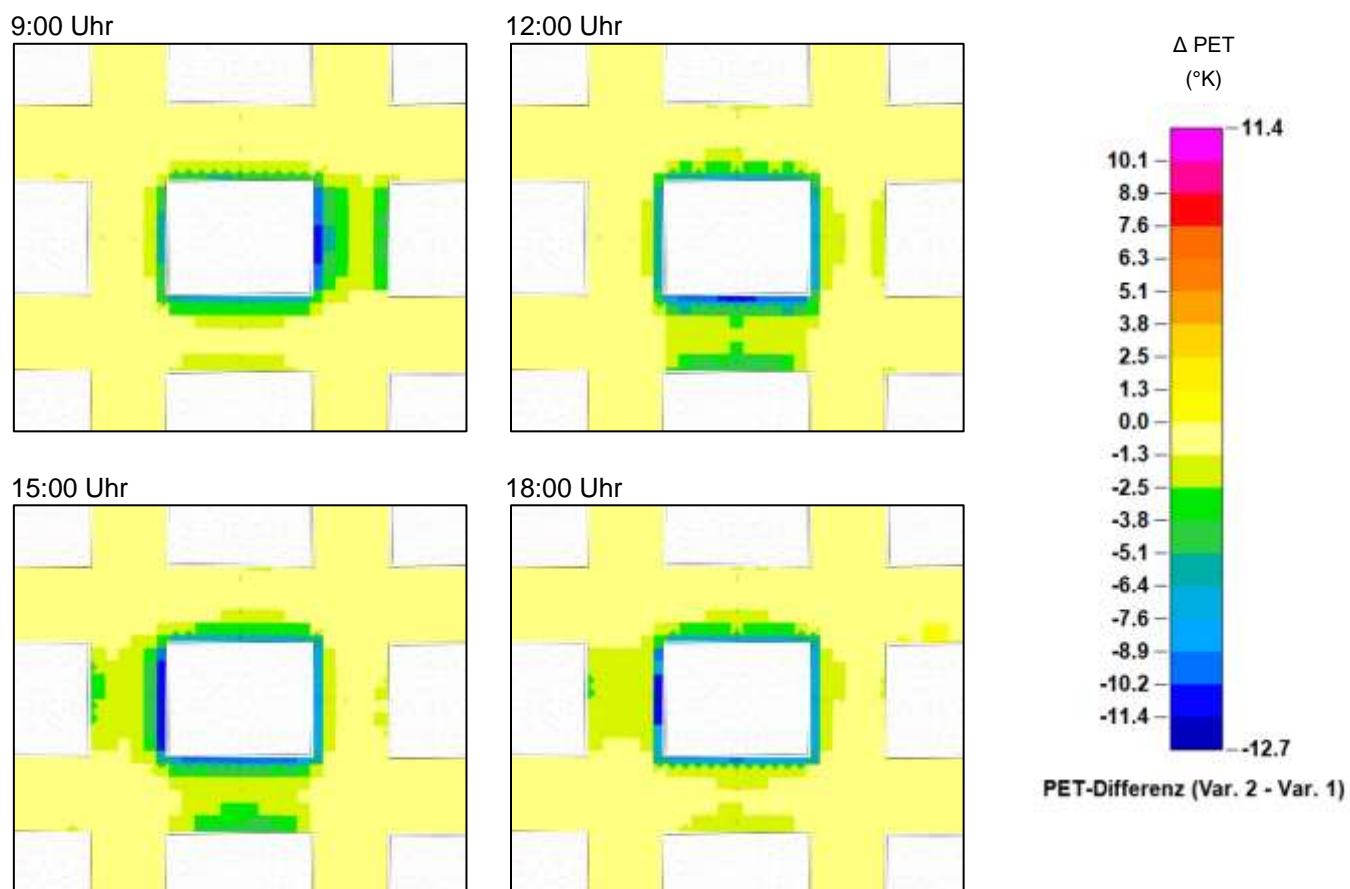


Abbildung 118: Einfluss der wandgebundenen Begrünung auf die PET im Areal. Dargestellt ist die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade zu verschiedenen Tageszeiten an einem sonnigen Sommertag (Hitzetag). Annahme: kein Wind, Abstand zwischen den Gebäuden: 11.60 m.

Die in den Kapiteln zuvor gewonnenen Erkenntnisse können hier bestätigt werden: Es ist deutlich erkennbar, wie die Wirkung der Fassadenbegrünung von der Orientierung und der Tageszeit beeinflusst wird. Um 9:00 Uhr ist insbesondere an der Ostfassade der grösste Einfluss auf die PET spürbar, ab 15:00 Uhr an der Westfassade. Die Begrünung an der Südfassade hat sowohl am Vormittag (9:00 Uhr) als auch am Nachmittag (15:00 Uhr) einen positiven Effekt auf die PET. Um die Mittagszeit (12:00 Uhr) ist der kühlende Effekt am grössten. Dies ist der Grund dafür, dass der Mittelwert der PET-Differenz über den Tag an der Südfassade grösser ist als an der Ost- und Westfassade. Dies ist auch in Abbildung 115 anhand der Balken deutlich erkennbar.



Abbildung 119 zeigt die Wirkung der bodengebundenen Begrünung im Areal, Abbildung 120 die der PV-Fassade. Die Rahmenbedingungen für die Simulationen wurden beibehalten (u.a. sonniger Sommertag, kein Wind). Beachtet werden muss, dass bei der bodengebundenen Begrünung und der PV-Fassade eine andere Skala verwendet werden musste als bei der wandgebundenen Begrünung, da die Temperatursenkung durch die wandgebundene Begrünung deutlich grösser ist als durch die anderen Systeme und der Effekt der anderen Systeme dadurch auf der Skala der wandgebundenen Begrünung nicht gut sichtbar wären.

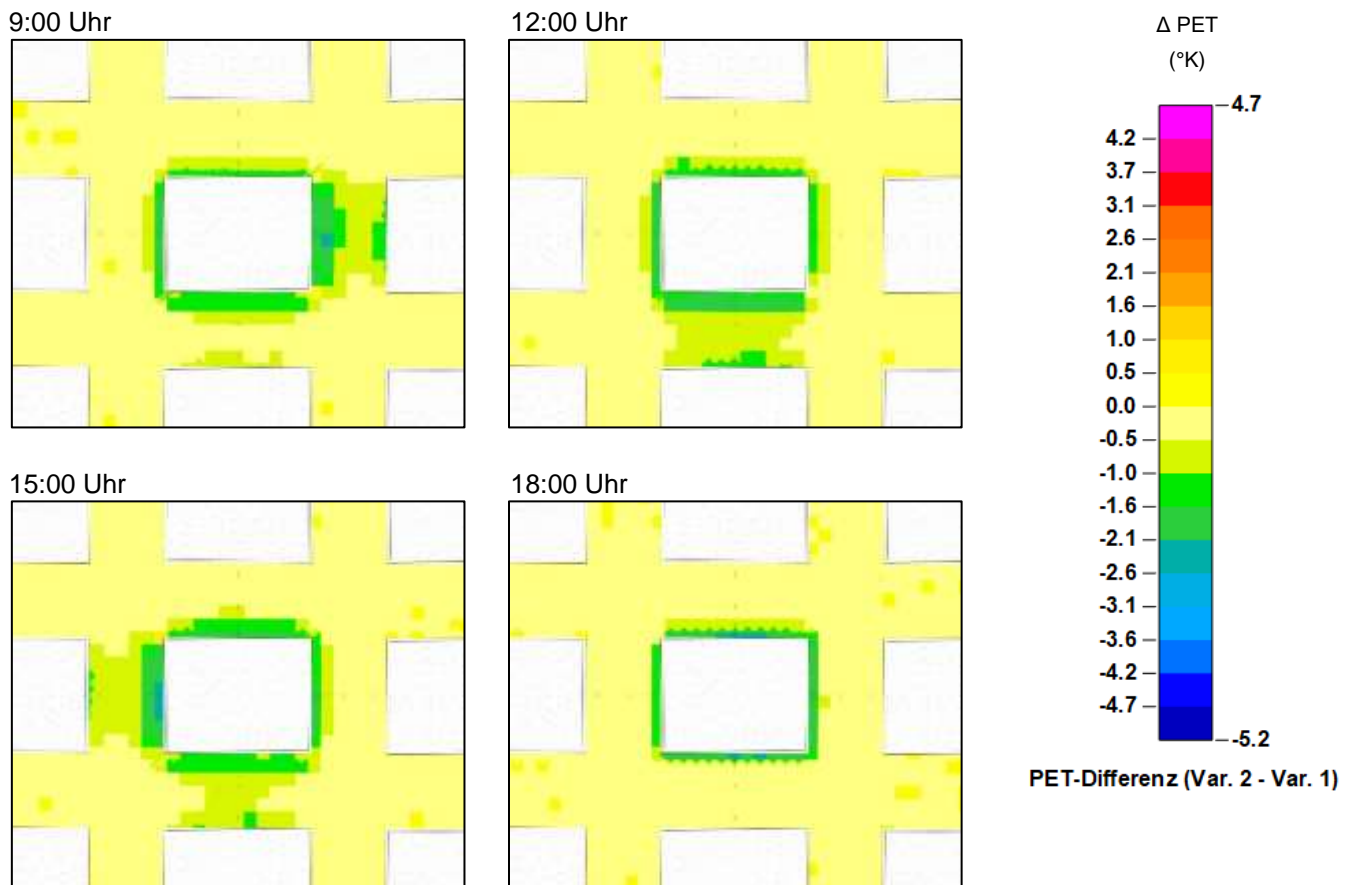


Abbildung 119: Einfluss der bodengebundenen Begrünung auf die PET im Areal. Dargestellt ist die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade zu verschiedenen Tageszeiten an einem sonnigen Sommertag (Hitzetag). Annahme: kein Wind, Abstand zwischen den Gebäuden: 11.60 m.

Die Wirkung der bodengebundenen Begrünung ist wie die wandgebundenen Fassadenbegrünung von der Orientierung und der Tageszeit abhängig. Generell ist die Wirkung an der Fassade am stärksten und nimmt mit zunehmender Entfernung ab.

Wird der Effekt der beiden Fassadenbegrünungen verglichen, ist erkennbar, dass die bodengebundene Begrünung die PET deutlich weniger stark senkt als die wandgebundene Begrünung, zudem ist der Einflussbereich der bodengebundenen Begrünung etwas kleiner. Dies kann mit dem höheren Leaf Area Index (LAI) des wandgebundenen Systems wie auch mit dem Substrat an der Wand selbst begründet werden. Trotzdem kann die bodengebundene Begrünung die PET in der Nähe der Fassade deutlich senken im Vergleich mit der Referenzfassade.



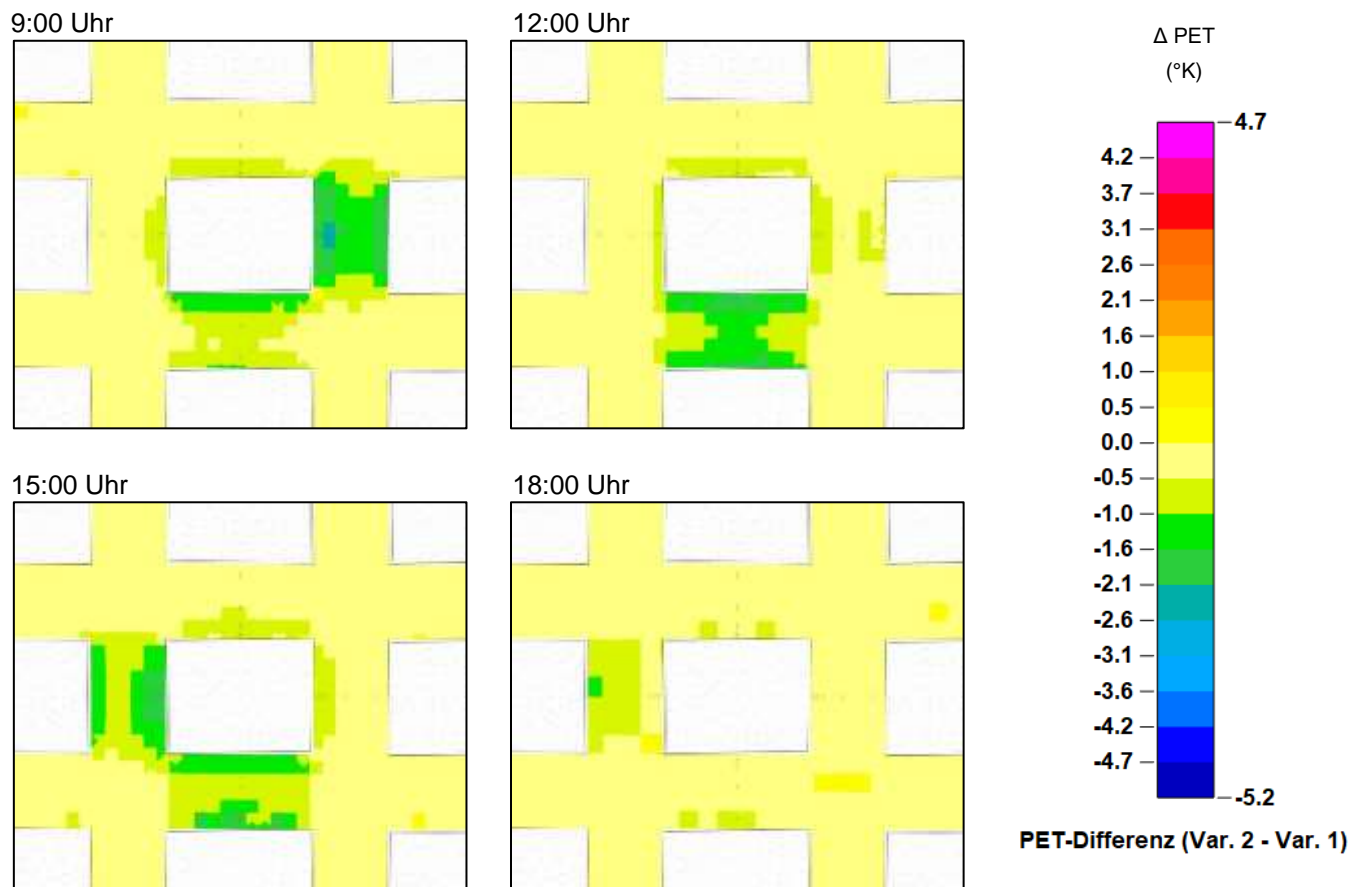


Abbildung 120: Einfluss der PV-Fassade auf die PET im Areal. Dargestellt ist die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade zu verschiedenen Tageszeiten an einem sonnigen Sommertag (Hitzetag). Annahme: kein Wind, Abstand zwischen den Gebäuden: 11.6 m.

In der Abbildung 120 wird deutlich, dass die PV-Fassade die PET vor allem an den durch die Sonne direkt beschienenen Fassaden zu senken vermag. An den sonnenexponierten Seiten ist der Effekt der PV-Fassade vergleichbar mit dem Effekt der bodengebundenen Fassadenbegrünung. An den beschatteten Seiten hat die PV-Fassade jedoch nur einen sehr geringen Effekt, welcher einiges kleiner als derjenige der bodengebundenen Fassadenbegrünung ist. Im Vergleich zu der wandgebundenen Begrünung ist der Effekt der PV-Fassade deutlich geringer, die unterschiedlichen Skalen müssen dabei berücksichtigt werden.



## 9.5 Einfluss des Windes auf die Wirkung der Fassadensysteme

Windstärke und Windrichtung können die Wirkung der Fassadensysteme beeinflussen. Abbildung 121 zeigt den Einfluss der wandgebundenen Begrünung auf die PET um 15:00 Uhr im Vergleich zur Referenzfassade an einem sonnigen Sommertag (Hitzetag). Die Darstellung links zeigt die Simulationsergebnisse ohne Wind, in der Darstellung rechts wurde ein schwacher Wind mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s und einer Windrichtung von Nord nach Süd berücksichtigt (schwarzer Pfeil). Der Wind beeinflusst in diesem Fall insbesondere die Ost- und Westfassade des Referenzgebäudes.

15:00 Uhr, ohne Wind

15:00 Uhr, mit schwachem Nordwind

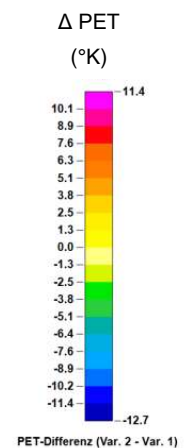
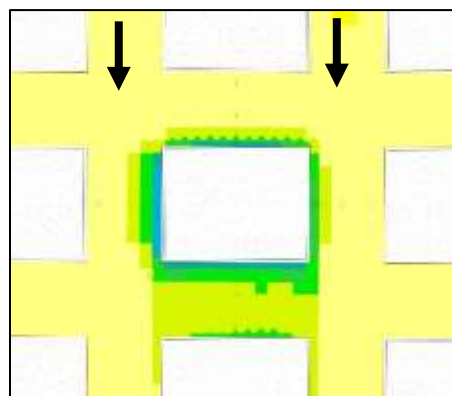
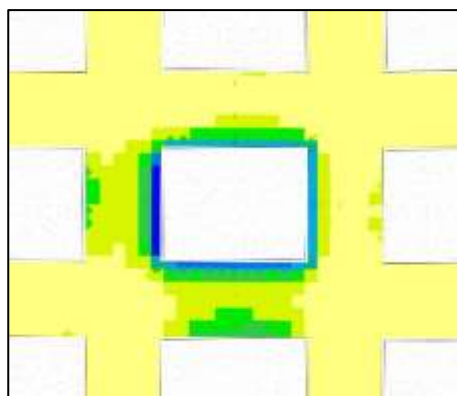


Abbildung 121: Einfluss des Windes auf die Wirkung der wandgebundenen Begrünung an einem sonnigen Sommertag (Hitzetag). Dargestellt ist die PET-Differenz im Vergleich zur Referenzfassade um 15:00 Uhr ohne Wind (links) und mit schwachem Wind (Geschwindigkeit: 1 m/s, Windrichtung: Nord → Süd) (rechts).

Der **Wind mindert den kühlenden Effekt der Fassadenbegrünung** deutlich, während die Begrünung ohne Wind (links) deutlich höhere PET-Differenzen erreicht, ist nicht nur der Effekt, sondern auch der Wirkungsbereich mit Wind (rechts) deutlich geringer.



## 9.6 Einfluss von Rasenflächen und Bäumen auf das Umgebungsklima

In diesem Kapitel wurde der Effekt der Fassadenbegrünung mit denen von anderen Grünelementen verglichen. Mittels QKM wurde zunächst eine Rasenfläche (Variante 1) eingefügt und mit der Asphaltfläche (Referenzsituation) verglichen. In einem zweiten Schritt wurden Bäume im Strassenraum platziert (Variante 2) und dies wiederum der Referenzsituation (Asphaltfläche) gegenübergestellt.

### Einfluss von Rasenflächen (Variante 1)

In Abbildung 122 wurde der Aussenraum als Rasenfläche (Variante 1) mit dem Aussenraum als Asphaltfläche (Referenzsituation) verglichen und über den gesamten Tagesverlauf eines Hitzetages betrachtet. Es zeigt sich, dass Variante 1 mit einer Rasenfläche klar kühler ist als die Referenzsituation mit dem Asphalt, am Tag ist in den beschatteten Bereichen der Effekt grösser als in den Bereichen mit direkter Sonneneinstrahlung. Der grösste Unterschied besteht am Abend, wenn sich der Asphalt am meisten aufgewärmt hat und nach wie vor Wärme abgibt, während der Rasen kühlt. An der Südfassade sind zu dieser Tageszeit die deutlichsten Temperaturunterschiede möglich.

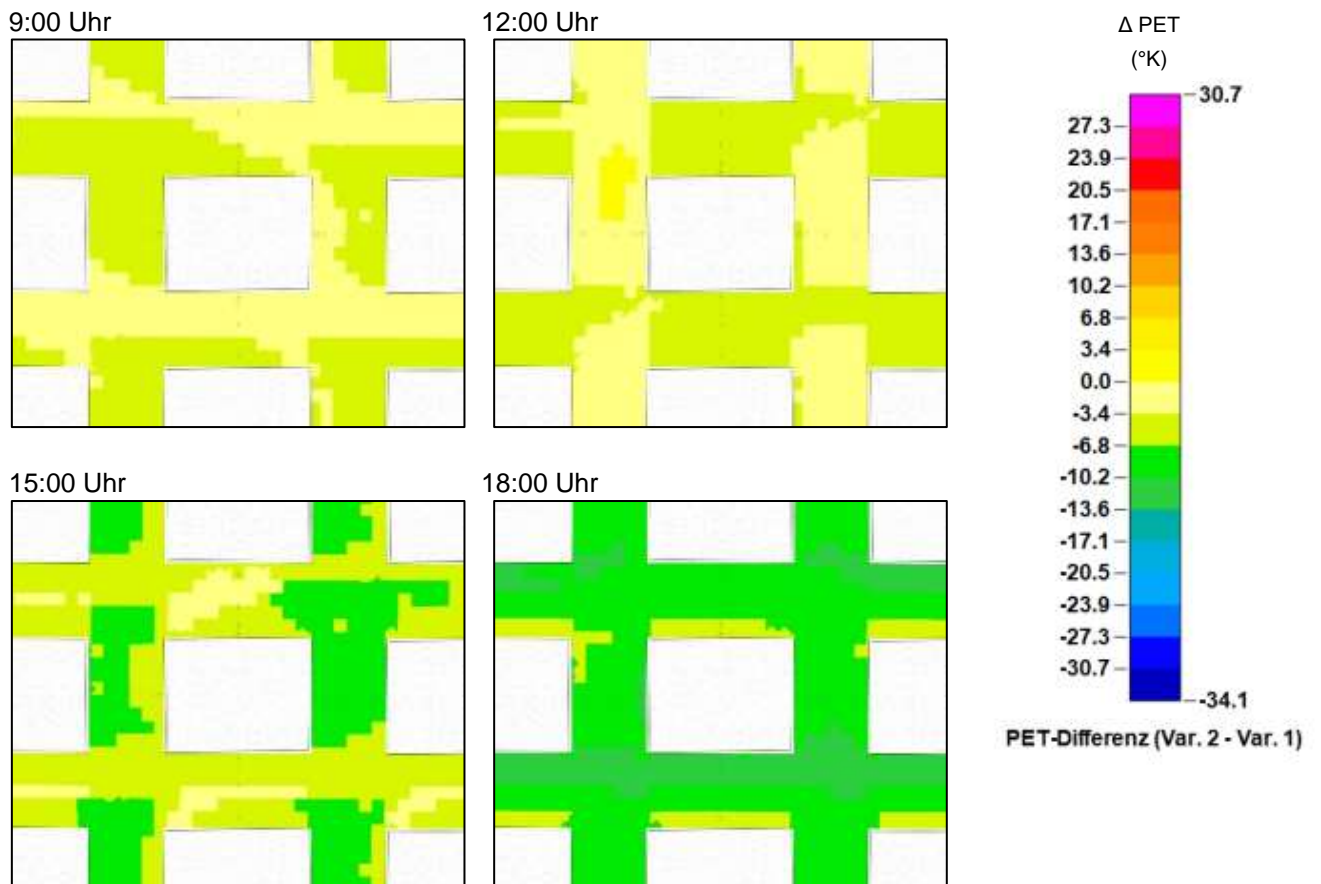


Abbildung 122: Die Differenz der PET von der Variante 1 (Umgebung als Rasenfläche; Gras feucht) zur Referenzsituation (Asphaltumgebung; Schwarzbelag Asphalt) im Tagesverlauf an einem Hitzetag in Zürich ohne Wind.



## Einfluss von Bäumen (Variante 2)

Um den Effekt von Bäumen auf die PET der Umgebung zu untersuchen, wurden weitere Simulation durchgeführt und wieder der Vergleich zur Referenzsituation (vollständig asphaltierter Aussenraum) hergestellt. Bei Variante 2 wurden auf der Asphaltoberfläche entlang der Fassade des Referenzgebäudes Bäume angeordnet. Als Gehölze wurden Bäume der Art Feldahorn (*Acer campestre*) mit einer Höhe von 6 Metern verwendet. Entlang der langen Fassade (Süd und Nord) wurden 4, entlang der kurzen Fassade (Ost und West) 3 Bäume angeordnet. Der Effekt durch die Bäume (Variante 2) wird in Abbildung 123 anhand der PET-Differenz im Vergleich zur Referenzsituation dargestellt. Die Abbildung zeigt die Wirkung zu verschiedenen Tageszeiten an einem Hitzetag ohne Wind.

Dieser Vergleich zeigt die grosse Kühlleistung der Bäume. Im Tagesverlauf sind die Unterschiede in den wärmsten Stunden am grössten, so kann unter den Bäumen durch die Verschattung und die Verdunstungsleistung eine Senkung der PET von über 30° K erreicht werden, was neben der Verdunstungskühlung insbesondere auch auf die Verschattung durch die Baumkronen zurückzuführen ist. Zu beachten gilt, dass in der Simulation mit mittelgrossen Bäumen gerechnet wurde. Bei einer Pflanzung von jungen Bäumen ist die Kühlleistung in den ersten Jahren noch geringer. Für die Simulation wurde als Untergrund eine Asphaltfläche angenommen, in der Praxis benötigen Bäume eine offene Baumscheibe, über welche Wasser in das Wurzelwerk gelangen kann. Eine solche Baumscheibe, von Vorteil mit Unterpflanzung, kann die Kühleffekte noch weiter verstärken.

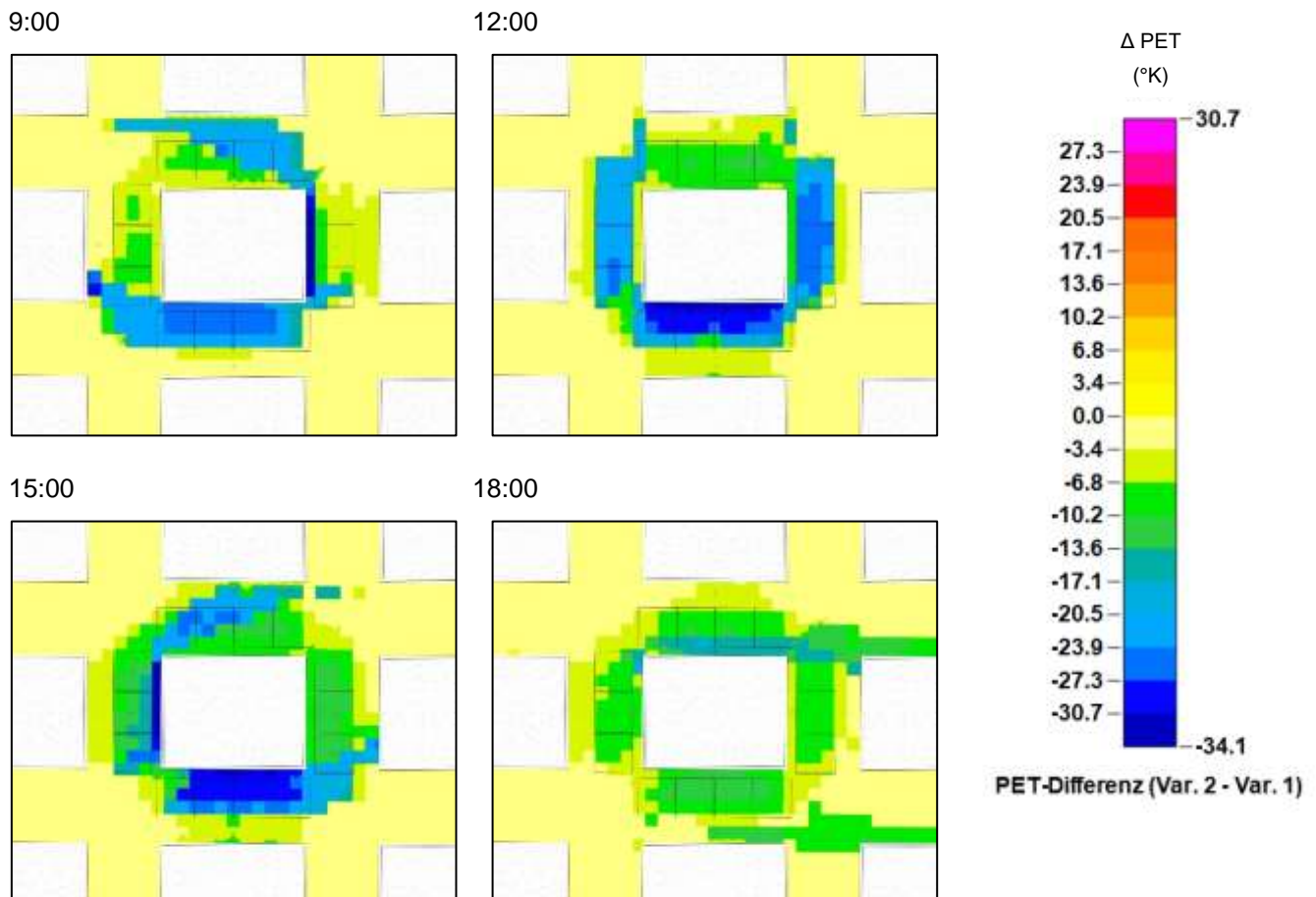


Abbildung 123: Die Differenz der PET von Variante 2 (Bäume) zur Referenzsituation (Asphaltumgebung) im Tagesverlauf an einem Hitzetag in Zürich ohne Wind.

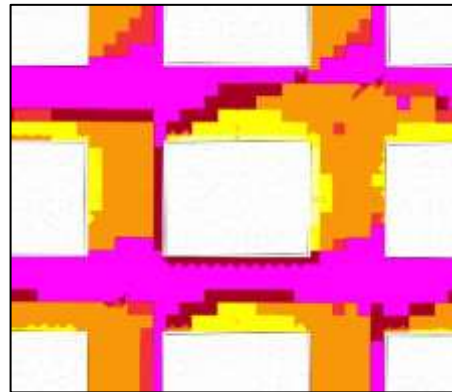
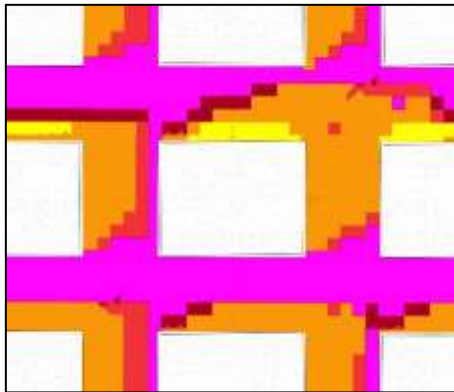


### Vergleich der unterschiedlichen Grünelementen/-räumen

Um die unterschiedlichen Aussenräume untereinander sowie mit der Fassadenbegrünung zu vergleichen, wurden nachfolgend die Referenzsituation, die wandgebundene Fassadenbegrünung wie auch die Variante 1 mit Gras und die Variante 2 mit Bäumen um 15 Uhr an einem Hitzetag simuliert.

Referenz

wandgebundene Fassadenbegrünung



Variante 1 Gras

Variante 2 Bäume

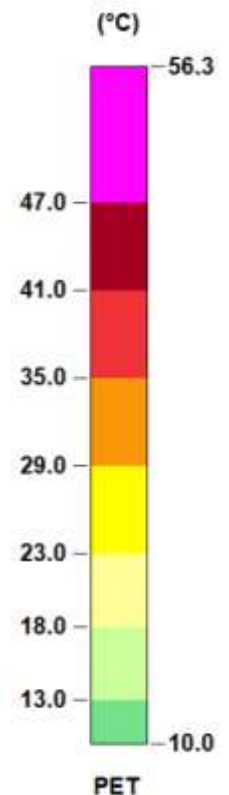
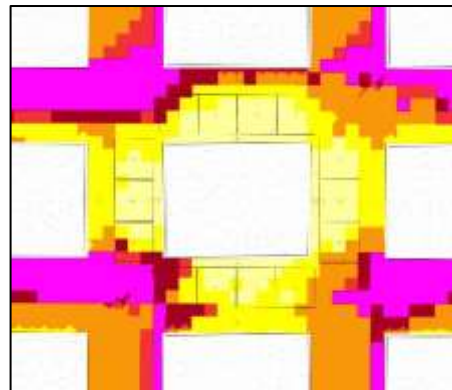
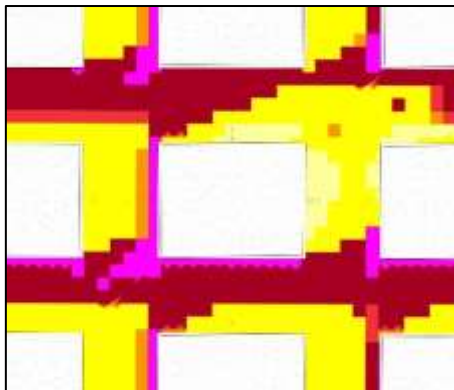


Abbildung 124: Vergleich von verschiedenen Aussenräumen (Referenzsituation, wandgebundene Fassadenbegrünung, Rasenfläche sowie Bäume) um 15 Uhr an einem Hitzetag ohne Wind.

Der Vergleich in Abbildung 124 zeigt, dass die Variante 1 mit einer Grasoberfläche die PET grossflächig und deutlich zu senken vermag. Der grösste Effekt ist bei den Bäumen zu beobachten. Diese senken die PET in den beschatteten Bereichen um über 30° K. Werden die Resultate der Rasenfläche und der Bäume mit den Ergebnissen der Fassadenbegrünungen verglichen, zeigt sich, dass eine Fassadenbegrünung weniger stark und weniger grossflächig die Temperatur zu senken vermag. Dies lässt sich zu einem Grossteil mit der kleineren absoluten Fläche der Fassadenbegrünung begründen. In Variante 1 wurde der gesamte Aussenraum als Grünfläche gestaltet. Zudem weist eine Grünfläche auch mehr Boden auf, welcher ein grösseres Potenzial zur Regenwasseraufnahme und zur Verdunstung hat als ein kleiner Substratraum einer Fassadenbegrünung. Bei den Bäumen hingegen kommt der zusätzliche Effekt der Verschattung hinzu, welcher ebenso einen deutlichen Beitrag zur Senkung der PET leistet. Im Gegensatz zu Rasenflächen und Bäumen sind Fassadenbegrünungen jedoch viel platzsparender, wodurch sie auch bei knappen Bodenverfügbarkeiten eingesetzt werden können. Zudem bietet sich die Möglichkeit, Fassadenbegrünungen und Grünflächen am Boden in Arealen zu kombinieren, um noch grössere Effekte zu erreichen.



## 9.7 Zusammenfassung

Basierend auf den Simulationen mit QKM konnten insbesondere folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Alle betrachteten Fassadensysteme (bodengebundene und wandgebundene Begrünung, PV-Fassade) haben in 1 m Abstand zur Fassade einen positiven Einfluss auf die PET, verglichen mit der Referenzfassade (Faserzementplatte).
- Zwar heizen sich die PV-Paneele stärker auf als die Referenzfassade, da die einfallende Solarstrahlung jedoch teilweise in Strom umgewandelt wird und die dunklen Paneele weniger Strahlung in die Umgebung reflektieren (aufgrund der geringeren Albedo), hat die PV-Fassade keinen negativen Einfluss auf die PET in der näheren Umgebung.
- Die wandgebundene Begrünung hat im Vergleich zu den anderen untersuchten Fassadensystemen den grössten Effekt auf die PET und den grössten Einflussbereich auf Arealebene. Die bodengebundene Begrünung wie auch die PV-Fassade weisen eine kleinere Wirkung auf.
- Bei den Tages-Mittelwerten weisen sämtliche Fassadensysteme den grössten Einfluss an der Südfassade auf. Es folgen in der Effektabstufung Ost- und Westfassade. Den geringsten Effekt wird an der Nordfassade erzielt. Jedoch gibt es an der Nordfassade über den Tag gesehen weniger Schwankungen bei der PET.
- Den grössten Effekt auf die PET haben die Fassadensysteme bei direkter Sonnenstrahlung. Die Wirkung ist somit abhängig von der Orientierung und Tageszeit. Die Fassadensysteme wirken somit an der Ostfassade insbesondere am Morgen (grösster Effekt um 9:00 Uhr) und an der Westfassade insbesondere am Nachmittag (grösster Effekt um 15:00 Uhr). Die Südfassade erhält über einen längeren Zeitraum direkte Sonnenstrahlung, d.h. diese Fassade beginnt bereits am Vormittag zu wirken, hat den grössten Effekt um die Mittagszeit (ca. 12:00 Uhr) und kann auch am Nachmittag noch einen positiven Einfluss auf die PET nehmen. Dadurch ist der Einfluss der Fassadensysteme auf die PET im Tages-Mittel an der Südfassade auch am grössten.
- Der Einfluss der Fassadensysteme auf die PET ist unmittelbar an der Fassade am grössten und nimmt mit zunehmendem Abstand deutlich ab.
- Windstärke und Windrichtung können die Wirkung der Fassadensysteme auf die PET deutlich beeinflussen. Bei einer Windrichtung parallel zur Fassade, d.h. bei einer Ostfassade und einer Windrichtung von Nord nach Süd bzw. Süd nach Nord, wird der Effekt der Fassadensysteme gemindert. Typische Windrichtungen sollten diesbezüglich bei der Planung berücksichtigt werden, wenn Begrünungen insbesondere zur Hitzeminderung eingesetzt werden. Des Weiteren können windgeschützte Bereiche, wie bspw. Innenhöfe, einen guten Einsatzbereich für Fassadenbegrünungen darstellen.
- Vergleicht man die wandgebundene Fassadenbegrünung mit der Rasenfläche und den Bäumen im Aussenraum, fällt auf, dass die Rasenfläche wie auch die Bäume eine deutlich grössere Reichweite haben als die Fassadenbegrünung. Dies lässt sich jedoch auch mit der absoluten Fläche der jeweiligen Begrünungsart begründen. Bezogen auf die Wirkung ist ersichtlich, dass die Bäume klar die grösste Temperatursenkung erreichen. Der Hauptgrund dafür ist die Verschattung durch die Bäume. Dies zeigt, dass Fassadenbegrünungen sonstige Begrünungen im Aussenraum bezüglich der Wirkung auf das Umgebungsklima nicht ersetzen können, jedoch bei knappen Platzverhältnissen eine sinnvolle Alternative darstellen. Auch eine Kombination von Fassadenbegrünungen mit anderen Aussenraumbegrünungen bietet sich an.



## 10 Diskussion

In den Kapiteln 6 bis 9 wurde der Einfluss der vier Fassadensysteme (bodengebundene und wandgebundene Begrünung, opake und transparente PV-Fassade) auf verschiedene qualitative und quantitative Aspekte untersucht. Dabei konnten insbesondere folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

**Qualitative Analyse (Kapitel 6):** Die verschiedenen Fassadensysteme wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die **Aspekte Lärm in Städten, Luftqualität, Biodiversität, Regenwasserrückhalt sowie Attraktivität der Aussenräume** im Vergleich zur Referenzfassade (Faserzementplatte) analysiert und bewertet. Die Recherche zeigte, dass insbesondere Begrünungen einen positiven Mehrwert hinsichtlich der untersuchten qualitativen Aspekte leisten können. Die **grösste Wirkung** erzielen Begrünungen vor allem **in der Nähe zu Emissionsquellen** (Lärm oder Schadstoffe) **und zum Menschen** (Attraktivität der Aussenräume, Funktion als «Grüngürtel», Biodiversität etc.).

**Quantitative Analyse (Kapitel 7):** Bei der quantitativen Analyse wurde der Einfluss der Fassadensysteme auf das **Wohlbefinden in Innenräumen (Temperatur und Überhitzungsstunden)**, auf den **Betrieb des Gebäudes (Wärme und Kälte)**, auf die **Stromproduktion über die PV-Fassade**, auf die **Ökobilanz (Erstellung, Unterhalt und Betrieb, LCA)** sowie die **Initial- und Lebenszykluskosten (LCC)** betrachtet.

Dabei konnte festgestellt werden, dass **Fassadenbegrünungen** einen Einfluss auf den Innenraum (thermisch und energetisch) nehmen können, der direkte Effekt bei gut gedämmten Gebäuden (Referenzgebäude «Neubau») jedoch sehr gering ist. Bei einer schlecht gedämmten Gebäudehülle (Referenz «Altbau») ist dieser Effekt grösser, jedoch ist der Effekt einer nachträglichen Dämmung hier i.d.R. effektiver als eine Fassadenbegrünung. Mit Blick auf die Ökobilanz (LCA) führen die bodengebundene und vor allem die wandgebundene Begrünung zu etwas höheren Umweltauswirkungen als die Referenzfassade. Dies liegt u.a. an dem Mehraufwand bei der Erstellung (mehr Material und allfällige technische Einrichtungen) und an den, vergleichsweise geringen, Einsparungen im Betrieb des Gebäudes. Hinsichtlich der Lebenszykluskosten führt eine bodengebundene Begrünung zu höheren Kosten als die Referenzfassade (Investitionskosten sind geringfügig höher, hinzu kommen jedoch laufende Kosten für die Pflege der Begrünung während der Betriebsphase). Die wandgebundene Begrünung ist von den betrachteten Fassadensystemen über den Lebenszyklus das mit Abstand kostenintensivste System.

Bei den **PV-Systemen** wurde die Stromproduktion über die Fassade jährlich, saisonal und im Tagesverlauf betrachtet. Dabei konnte gezeigt werden, dass optimal angeordnete PV-Module (Süd-, Ost- und Westfassade ohne Verschattung) mehr als doppelt so viel Strom erzeugen können wie PV-Module in einer ungünstigen Lage (Nordfassade, verschattete Flächen). Der Vergleich mit einer PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade, Südausrichtung, Neigungswinkel von 5°) zeigte zudem, dass eine PV-Dachanlage über das Jahr gesehen höhere Erträge liefern kann, in den Wintermonaten die Erträge an der Südfassade jedoch über denen einer PV-Dachanlage liegen. Die Betrachtung der Ökobilanz zeigte, dass PV-Fassaden zwar bei der Erstellung zu hohen Umweltbelastungen führen, diese im Betrieb jedoch i.d.R. amortisieren können. Um eine schnelle Amortisation der PV-Module zu erreichen, ist auf einen hohen Wirkungsgrad sowie eine effiziente Ausrichtung der Module (hohes Stromerzeugungspotential) zu achten. Diese Aussage gilt auch in Bezug auf die Lebenszykluskosten. Da eine PV-Fassade zu hohen Investitionskosten führt, ist ein hohes Stromerzeugungspotential der PV-Elemente anzustreben. Nur so amortisieren sich die anfänglichen Kosten über den Lebenszyklus.

**Messungen (Kapitel 8) und Quartierklimamodellierung (QKM, Kapitel 9):** In diesen Kapiteln wurde der Einfluss der Fassadensysteme auf die Temperaturen an der Fassade sowie auf die nähere Umgebung (anhand der PET) untersucht. Die **Messergebnisse** zeigten, dass durch die Fassadenbegrünungen die Temperatur an der Fassade an einem milden, sonnigen Tag im Vergleich zur Messreferenzfassade deutlich gesenkt werden konnten: Die Oberflächentemperaturen der bodengebundenen Begrünung lagen bis zu 13.9 °C und die der wandgebundenen Begrünung bis zu



14.9 °C tiefer als die Referenz. Die PV-Fassaden heizten sich hingegen mehr auf und erreichten bis zu 5 °C (opake Module) höhere Oberflächentemperaturen als die Messreferenzfassade. An heissen Sommertagen könnte sich dieser Effekt weiter verstärken. Mittels «**Quartierklimamodellierung**» wurde der Einfluss der verschiedenen Fassadensysteme auf die nähere Umgebung untersucht. Anhand der PET wurde analysiert, wie die empfundene Temperatur im Aussenraum in verschiedenen Abständen zur Fassade durch die Systeme beeinflusst wird. Dabei konnte festgestellt werden, dass PV-Module zwar an der Fassade zu höheren Oberflächentemperaturen führen, die Umgebung jedoch nicht negativ beeinflussen. Das liegt einerseits daran, dass die einfallende Strahlung in Strom umgewandelt wird, andererseits haben die Paneele eine geringe Albedo (geringe Reflexion der einfallenden Strahlung in die Umgebung). Hinsichtlich der Fassadenbegrünungen konnte aufgezeigt werden, dass der kühlende Effekt am stärksten direkt an der Fassade spürbar ist und mit zunehmendem Abstand zur Fassade abnimmt. Die Wirkung der Begrünungen kann zudem durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden: Bei direkter Sonneneinstrahlung ist der positive Effekt auf die PET am grössten, durch Wind kann der unmittelbare Effekt der Begrünung gemindert werden. Im Vergleich zu anderen Begrünungselementen, wie bspw. Bäumen, ist der Effekt einer Fassadenbegrünung geringer. Dies liegt insbesondere daran, dass ein Baum neben dem kühlenden Effekt (Verdunstungskühlung) ebenso Schatten spendet, wodurch die PET zusätzlich positiv beeinflusst wird. Ebenso wurde der Vergleich zu einer Rasenfläche (der asphaltierte Strassenraum wurde durch eine begrünte Fläche ersetzt) hergestellt. Auch hier konnte ein grösserer Effekt im Vergleich zur Fassadenbegrünung erreicht werden, dies ist insbesondere auf die höhere Substratschicht (Boden) und der deutlich grösseren Grünfläche (m<sup>2</sup>) zurückzuführen. Allgemein kann gesagt werden, dass Bäume von den drei betrachteten Grünelementen am effektivsten sind. In städtischen Gebieten ist jedoch häufig das Platzangebot begrenzt, weshalb Fassadenbegrünungen eine gute Option darstellen.

In diesem Kapitel wurden die bisherigen Erkenntnisse nun zusammengeführt und hinsichtlich folgender Themen diskutiert:

- **Fassadengestaltung mit Begrünungen und PV**, Bewertung von Systemkombinationen hinsichtlich LCA und LCC
- **Einflussfaktoren auf die Ökobilanz (LCA) von PV-Fassaden** (Sensitivitätsanalyse)
- **Einfluss des statischen Mehraufwands verschiedener Begrünungssysteme auf die Ökobilanz (LCA)**
- **Einflussfaktoren auf die Lebenszykluskosten (LCC)** (Sensitivitätsanalyse)
- **Bedeutung von Begrünungen und PV** im städtischen und ländlichen Kontext
- Erweiterung der Systemgrenze: **gesamtheitliche Gestaltung mit Begrünungen und PV**
- **Hemmnisse und Massnahmen zur Steigerung der Akzeptanz** von Begrünungen und PV im Fassadenbereich

## 10.1 Fassadengestaltung mit PV und Begrünungen, Bewertung von Systemkombinationen hinsichtlich LCA und LCC

Die bisherigen Betrachtungen haben gezeigt, dass PV und Begrünungen an der Fassade unterschiedliche Vorteile bieten. **Begrünungen** können insbesondere einen **qualitativen Mehrwert im Aussenraum** leisten, dazu gehören u.a. eine bessere Aufenthaltsqualität (Lärminderung - Kapitel 6.1, Verbesserung der Luftqualität Kapitel - 6.2 und höhere Attraktivität der Aussenraume - Kapitel 6.5), eine höhere Biodiversität (Kapitel 6.3) und ein besseres Regenwassermanagement (Kapitel 6.4). Hinzu kommt das Potential zur Hitzeminderung (Kapitel 8 und 9), welches insbesondere in Städten mit Blick auf den Klimawandel immer mehr an Bedeutung gewinnen wird (Adaption). Aber auch die Stromerzeugung über PV-Fassaden wird in Zukunft immer wichtiger werden und eine wichtige





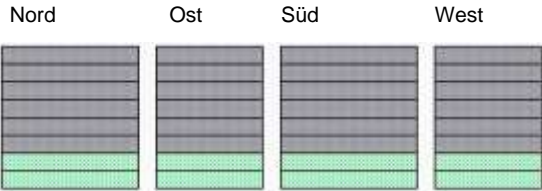
Massnahme zur nachhaltigen Energieversorgung der Schweiz darstellen (Mitigation). Durch eine Kombination von PV und Begrünung an der Fassade könnten die Vorteile beider Systeme miteinander vereint werden. Die bisherigen Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Analyse haben gezeigt, dass sich die Systeme dabei i.d.R. nicht konkurrenzieren: **Fassadenbegrünungen** erzielen nahe am Menschen angeordnet den grössten Effekt, d.h. in den meisten Fällen sind das die **unteren Bereiche/ Geschoße** des Gebäudes. **PV-Module** sollten hingegen an Fassadenflächen mit hohem Stromerzeugungspotential angeordnet werden, d.h. also an Süd-, Ost- und Westfassaden ohne Verschattung. Dies betrifft i.d.R. vor allen die **oberen Geschoße** des Gebäudes, da insbesondere in städtischen Gebieten meist die unteren Geschoße durch Nachbargebäude verschattet werden (Referenzsituation, Kapitel 4.3).

Die Betrachtung wurde dementsprechend erweitert. Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen wurde die **Kombination der verschiedenen Systeme** am Gebäude untersucht (in der Folge **Szenarien** genannt). Dabei wurde dargelegt, inwieweit eine kombinierte Verteilung von Begrünung und PV an der Fassade (Szenario 1 bis 3) oder eine optimierte Anordnung von PV-Modulen an der Fassade (Szenario 4) einen Einfluss auf die Ökobilanz (LCA) sowie die Lebenszykluskosten (LCC) haben kann. Bei der Fassadenbegrünung wurde dabei jeweils ein **bodengebundenes System** angenommen, da dieses geringere Umweltbelastungen (Kapitel 7.4) aufweist und kostengünstiger (Kapitel 7.5) ist als ein wandgebundenes System. Bei der PV-Fassade wurden die **opaken Module** gewählt, da diese aufgrund des höheren Wirkungsgrads ebenso ökologische und ökonomische Vorteile bieten. Die Szenarien 1 bis 4 sind in Abbildung 125 dargestellt und beschrieben.



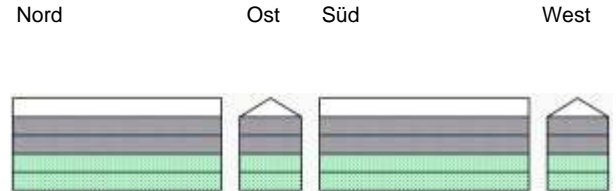
### Szenario 1: oben PV / unten Grün, alle Fassaden

Referenzgebäude «Neubau»



bodengebundene Begrünung: EG und 1.OG, alle Fassaden;  
PV-Module (opak): übrige Geschosse, alle Fassaden

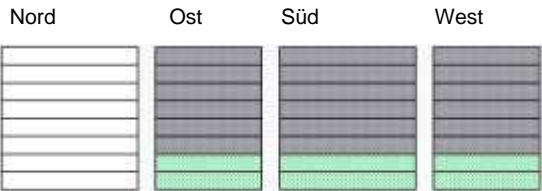
Referenzgebäude «Altbau» / «Altbau saniert»



bodengebundene Begrünung: EG und 1.OG, alle Fassaden;  
PV-Module (opak): übrige Geschosse, alle Fassaden

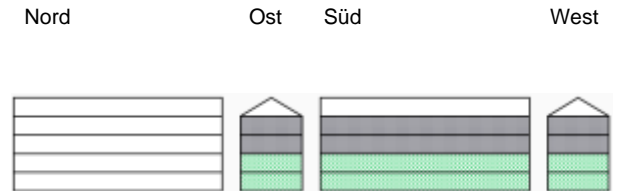
### Szenario 2: oben PV / unten Grün, ohne Nordfassade

Referenzgebäude «Neubau»



bodengebundene Begrünung: EG und 1.OG, O / S / W;  
PV-Module (opak): übrige Geschosse, O / S / W;  
Nordfassade ohne zusätzliches System (Referenzfassade)

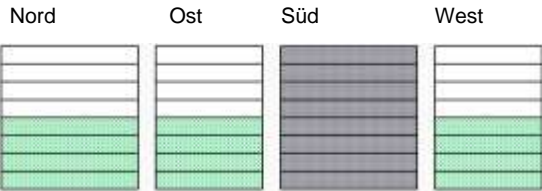
Referenzgebäude «Altbau» / «Altbau saniert»



bodengebundene Begrünung: EG und 1.OG, O / S / W;  
PV-Module (opak): übrige Geschosse, O / S / W;  
Nordfassade ohne zusätzliches System (Referenzfassade)

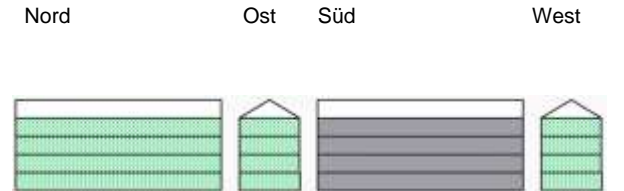
### Szenario 3: Süd PV / andere Grün, alle Fassaden

Referenzgebäude «Neubau»



bodengebundene Begrünung: EG bis 3.OG, N / O / W;  
PV-Module (opak): Südfassade, alle Geschosse

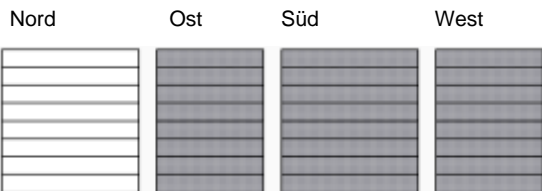
Referenzgebäude «Altbau» / «Altbau saniert»



bodengebundene Begrünung: alle Geschosse, N / O / W;  
PV-Module (opak): Südfassade, alle Geschosse

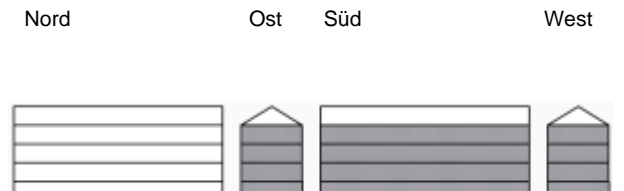
### Szenario 4: Fokus Energieproduktion

Referenzgebäude «Neubau»



keine Begrünung;  
PV-Module (opak): Ost-, Süd- & Westfassade, alle

Referenzgebäude «Altbau» / «Altbau saniert»



keine Begrünung;  
PV-Module(opak): Ost-, Süd- & Westfassade, alle

Abbildung 125: Die vier Szenarien im Überblick. Szenario 1 bis 3 zeigen Kombinationen von einer bodengebundenen Begrünung mit einer PV-Fassade (opake Module). Szenario 4 zeigt eine optimierte Anordnung der PV-Module an der Fassade.



### 10.1.1 Ökobilanz (LCA) der Szenarien

Zunächst wurden die **vier Szenarien** hinsichtlich der **Umweltauswirkungen (THGE, PEne und UBP)**, welche bei der Erstellung, dem Unterhalt und im Betrieb anfallen. Die Ergebnisse der Berechnungen für das Referenzgebäude «Neubau» sind in Abbildung 126 zusammengetragen. Vergleichshalber wurden darin die Ergebnisse für die Referenzfassade, die reinen Fassadensysteme sowie die PV-Dachanlage aus Kapitel 7.4.2 ebenfalls aufgeführt.

Erkennbar ist, dass das **Szenario 4** «Fokus Energieproduktion» über den Lebenszyklus die geringsten THGE aufweist. In Bezug auf PEne und UBP'21 ist es vorteilhafter, **sämtliche Fassaden mit opaken PV-Modulen** zu belegen, auch wenn der Ertrag bei einer nach Nord ausgerichteten Fassade deutlich geringer ist als in den anderen Orientierungen. Aufgrund der hohen Einsparungen im Betrieb, basierend auf der hohen Stromproduktion (mittlerer Balken), schneidet dieses System trotzdem am besten ab.

**Alle kombinierten Szenarien weisen insgesamt eine niedrigere Umweltbelastung auf als die Referenzfassade.** Neben Szenario 4 und der **Fassade mit opaken PV-Modulen** sind insbesondere die **Szenarien 1 und 2** hervorzuheben, wo eine bodengebundene Begrünung mit opaken PV-Modulen kombiniert wurde. Szenario 1 und 2 weisen hinsichtlich der PEne und den UBP'21 eine geringere Umweltbelastung auf als die PV-Dachanlage in Kombination mit der Referenzfassade. Hinsichtlich den THGE ist der Unterschied jedoch gering, sodass kleine Anpassungen an den getroffenen Annahmen, wie bspw. die Verbesserung des Wirkungsgrads der PV-Module oder eine bessere Ausnutzung der Dachfläche für die Stromproduktion, dieses Ergebnis ändern könnte.

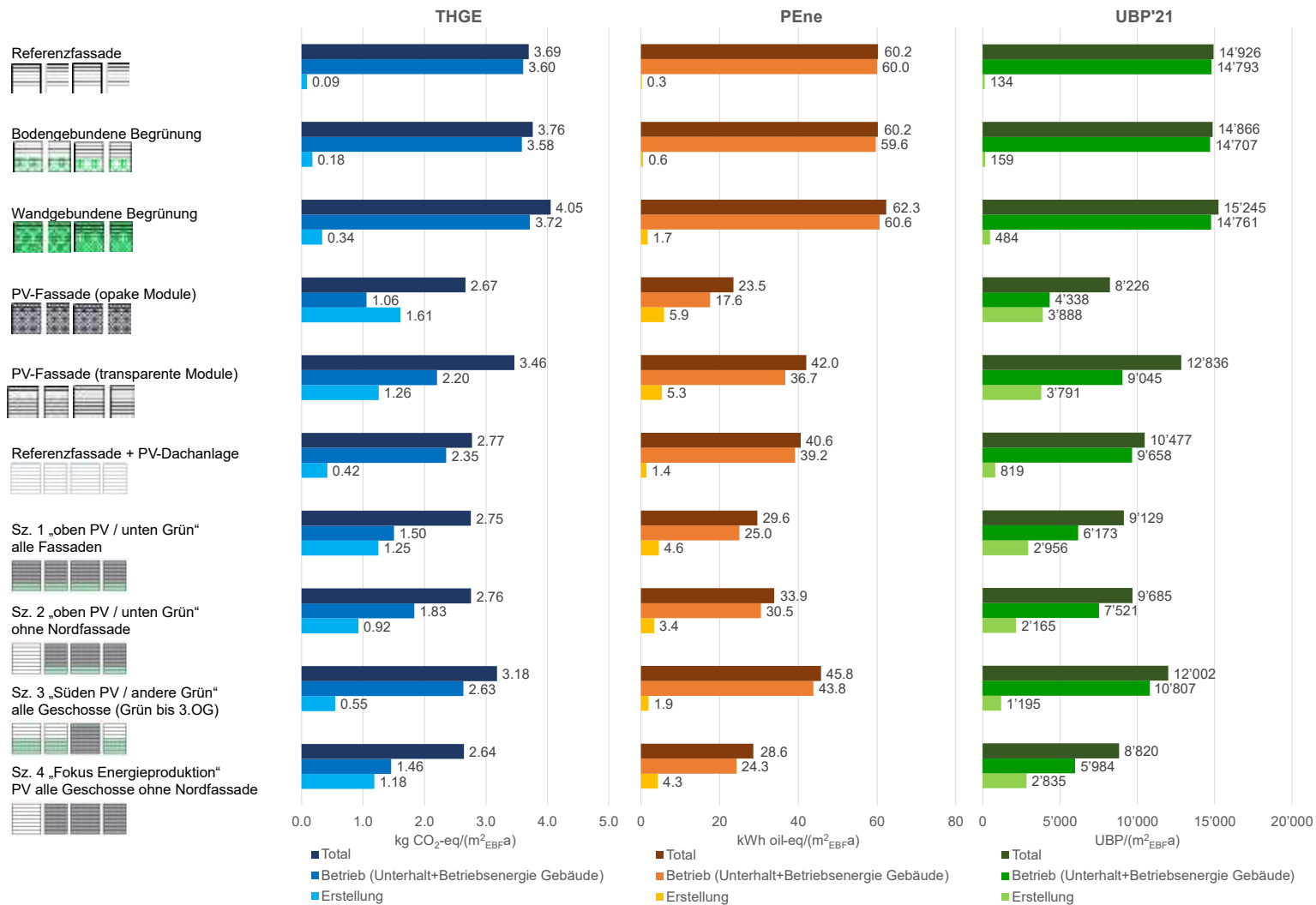


Abbildung 126: Treibhausgasemissionen (links), nicht erneuerbare Primärenergie (Mitte) und Umweltbelastungspunkten (rechts) der Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten), der verschiedenen Fassadensysteme, der PV-Dachanlage inkl. Referenzfassade sowie die vier Szenarien. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau».



### 10.1.2 Lebenszykluskosten (LCC) der Szenarien

Des Weiteren wurden die **annualisierten Kosten (Barwert)** der **vier Szenarien** über einen Zeitraum von 30 Jahren betrachtet. Die Ergebnisse der Berechnungen für das Referenzgebäude «Neubau» sind in Abbildung 127 zusammengetragen. Vergleichshalber wurden darin die Ergebnisse für die Referenzfassade, die Fassadensysteme sowie die PV-Dachanlage aus Kapitel 7.4.2 nochmals aufgeführt.

Werden alle aufgeführten Optionen miteinander verglichen, weist die **PV-Dachanlage** in Kombination mit der Referenzfassade die niedrigsten annualisierten Gesamtkosten auf.

Beim Vergleich der PV-Fassaden (opake Module) ist erkennbar, dass **Szenario 4** (PV alle Geschosse ohne Nordfassade) zu niedrigeren annualisierten Gesamtkosten führt, als wenn die gesamte Fassade mit PV-Modulen ausgestattet wird: Beim «Neubau» können die annualisierten Kosten pro Quadratmeter Fassade um 36 % gesenkt werden, wenn nur die Ost-, Süd- und Westfassade PV-Module erhalten. Wird die Anordnung der PV-Module an der Fassade weiter optimiert, d.h. nur an den Teilen der Fassade mit der höchsten Sonneneinstrahlung eingesetzt, so wäre das betrachtete Szenario noch wirtschaftlicher.

Die genannten Varianten (PV-Dachanlage, PV-Fassade mit opaken Modulen und Szenario 4) weisen über den Betrachtungszeitraum geringere annualisierte Gesamtkosten auf als die **Referenzfassade**.

Bei den betrachteten Szenarien ist - wie zuvor erwähnt - Szenario 4 am wirtschaftlichsten, gefolgt von **Szenario 2**. Aber auch **Szenario 1 und Szenario 3** führen zu geringeren annualisierten Gesamtkosten, als wenn die Fassade nur mit einer bodengebundenen oder wandgebundenen Begrünung oder mit transparenten PV-Modulen gestaltet wird.

Die annualisierten Gesamtkosten im **Szenario 2 (Kombination von PV und Begrünung)** sind höher, als wenn an der gesamten Fassade opake PV-Module eingesetzt werden. Der Unterschied beträgt beim «Neubau» ca. 14 %. Im Vergleich zu einer PV-Fassade mit transparenten Modulen ist Szenario 2 jedoch rentabler.

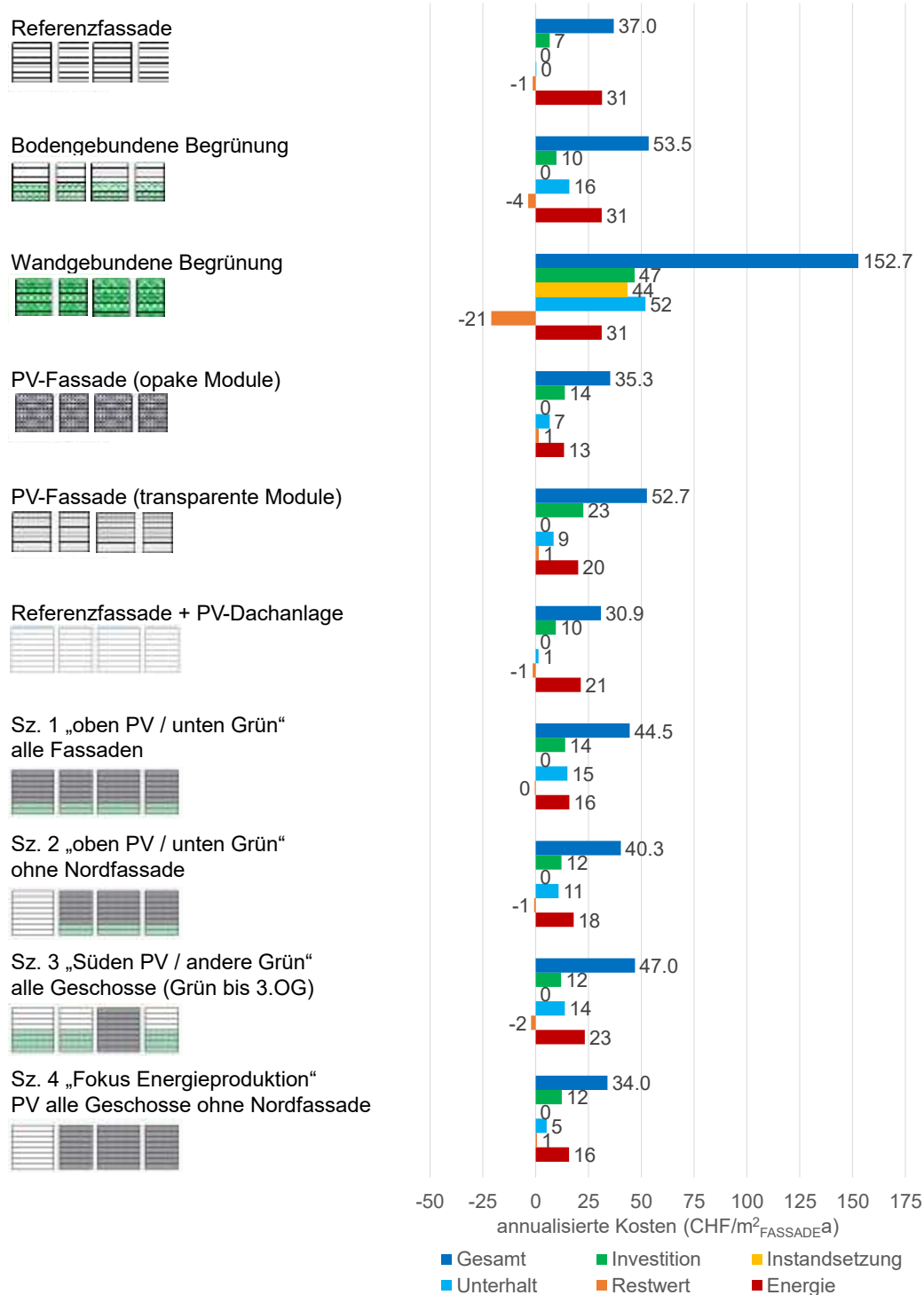


Abbildung 127: Annualisierte Kosten (Barwert) der Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten), der verschiedenen Fassadensysteme, der PV-Dachanlage inkl. Referenzfassade sowie die vier Szenarien. Dargestellt sind die Ergebnisse für einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren für das Referenzgebäude «Neubau».



### 10.1.3 Kapitelzusammenfassung, Ökobilanz vs. Lebenszykluskosten

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem nächsten Schritt nochmals zusammengeführt. Abbildung 128 zeigt die THGE und die annualisierten Kosten (LCC) der Referenzfassade (hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten), der Fassadensysteme, der PV-Dachanlage inkl. Referenzfassade sowie der vier untersuchten Szenarien. Die Grösse des Kreises zeigt zudem die Investitionskosten der Varianten. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau».

Die wandgebundene Begrünung führt zu deutlich höheren Investitions- und Lebenszykluskosten als die übrigen Varianten (Abbildung 128, links). Deshalb wurden die übrigen Varianten rechts in der Abbildung nochmals vergrössert dargestellt.

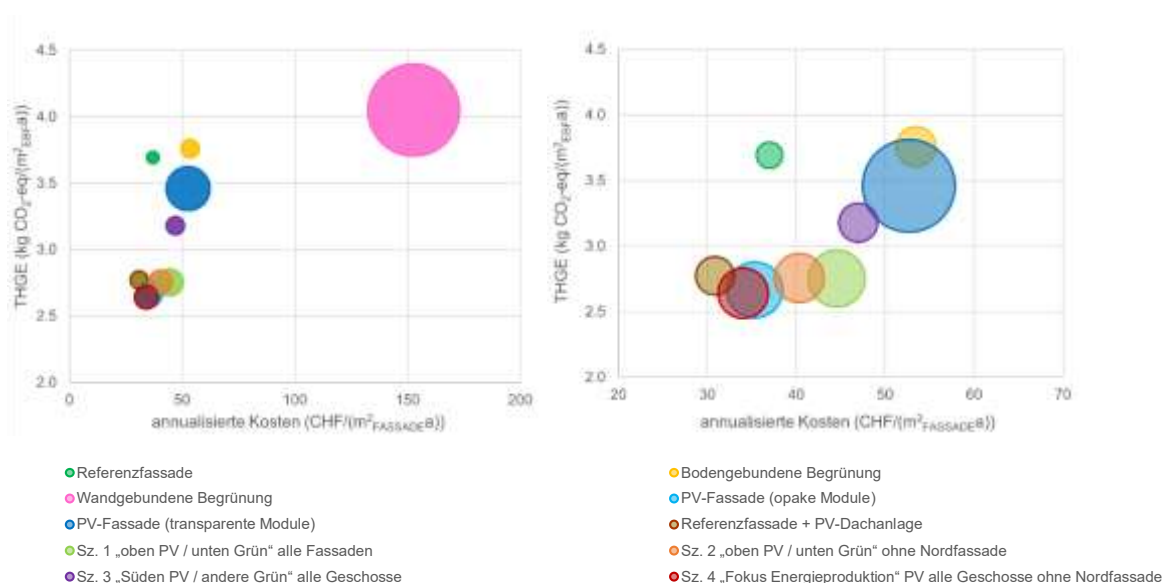


Abbildung 128: THGE und annualisierte Kosten während der 30-jährigen Betrachtungsperiode (links: alle Varianten; rechts: vergrösserte Darstellung ohne die wandgebundene Begrünung). Die Grösse des Kreises zeigt die Investitionskosten. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau».

Die **niedrigsten Investitionskosten** fallen bei der Referenzfassade (hinterlüftete Faserzementplatten) an, gefolgt von der PV-Dachanlage inkl. Referenzfassade, dem Szenario 3 und der bodengebundenen Begrünung.

Über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren liegen die **annualisierten Kosten (Barwert)** der PV-Dachanlage inkl. Referenzfassade, des Szenario 4 und der PV-Fassade (opake Module) unter denen der Referenzfassade. Szenario 2 weist geringfügig höhere annualisierte Kosten auf, bei Szenario 1 und 3 ist die Differenz zur Referenzfassade etwas höher.

Bei den **THGE** liegt die Referenzfassade höher als die meisten Systeme sowie Kombinationen, einzig die Fassadenbegrünungen führen zu etwas höheren Werten (bodengebunden sehr gering, wandgebunden etwas höher). Die niedrigsten Umweltbelastungen fallen bei Szenario 4 und der PV-Fassade (opake Module) gefolgt von Szenario 1, Szenario 2 und der PV-Dachanlage inkl. Referenzfassade an. Szenario 3 liegt im Vergleich etwas höher, ebenso die transparente PV-Fassade (über den Betrachtungszeitraum jedoch immer noch tiefer als die Referenzfassade).

Allgemein kann gesagt werden, dass durch eine **gezielte Anordnung von PV** bzw. durch die **Kombination von PV und Begrünung** an der Fassade die THGE über den Lebenszyklus im Vergleich zur Referenzfassade gesenkt werden können (**ökologische Vorteile**). Gleichzeitig führt eine Kombination von PV und Begrünung über den Lebenszyklus **nur zu geringen Mehrkosten** (im Vergleich zur Referenzfassade).



## 10.2 Einflussfaktoren auf die Ökobilanz (LCA) von PV-Fassaden (Sensitivitätsanalyse)

Die Bewertung der Ökobilanz der verschiedenen Systeme und Szenarien (Kapitel 7.4 und Kapitel 10.1.1) erfolgte anhand der getroffenen Annahmen basierend auf der aktuellen Datengrundlage zur Ökobilanzierung. Genaue Informationen dazu wurden im Kapitel 5.2.2 beschrieben. Ändert sich die Datengrundlage, bspw. durch eine Aktualisierung der KBOB-Liste, oder werden andere Annahmen für die Berechnungen, bspw. durch eine dynamische Bewertung der Umweltauswirkungen von Strom, herangezogen, so können sich die Ergebnisse der Berechnungen ändern.

### 10.2.1 Anpassungen der KBOB-Liste: Version 2016 vs. 2022 sowie künftige Entwicklungen

In dieser Studie erfolgten die Berechnungen der Umweltauswirkungen auf Basis der aktuellen Version der KBOB-Liste «Ökobilanzdaten im Baubereich» (55), d.h. anhand der Version 2022. Die Umweltauswirkungen von PV-Dachanlagen (pro kWp) wurden in der Version 2022 im Vergleich zur Version 2016 deutlich reduziert. Die THGE und die PEne wurden für die PV-Dachanlage (pro kWp) um ca. 50 % gesenkt. Bei den PV-Fassaden beträgt die Reduktion ca. 40 %. In Bezug auf die UBP beträgt die Reduktion bei PV-Dachanlagen ca. 35 % bei Schrägdächern und ca. 25 % bei Flachdächern. Für PV-Fassaden wurden die UBP um ca. 10 % herabgesetzt. Die deutliche Reduktion der Umweltauswirkungen der Photovoltaiksysteme in der aktuellen Version der KBOB-Liste lässt sich mit der erhöhten Material- und Energieeffizienz in der Herstellung begründen (94).

Gleichzeitig wurden die Umweltauswirkungen von Netzstrom in der Aktualisierung (Version 2022) angepasst. Für den Netzstrom wurden die Werte für die THGE um ca. 25 % erhöht, für die PEne um mehr als 15 % reduziert und für die UBP um ca. 50 % erhöht. Diese Erhöhung basiert auf deutlich höheren Umweltkennwerten als bisher aufgrund eines grösseren Anteils an Strom aus nicht erneuerbaren Quellen (94).

Die Reduktion der Umweltauswirkungen der Photovoltaiksysteme in der aktuellen Version der KBOB-Liste sinkt deutlich aufgrund der erhöhten Material- und Energieeffizienz in der Herstellung (94).

Diese Anpassungen sind zum Teil massiv und haben einen deutlichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Die Änderungen in der Version 2022 führen dazu, dass sich die Umweltauswirkungen für PV-Anlagen sowohl im Dach- als auch im Fassadenbereich schneller amortisieren als mit den Werten der KBOB-Liste 2016. Die Berechnungen sind somit stark abhängig von den aktuellen Ökobilanzdatengrundlagen. Werden die Werte aufgrund künftiger Gegebenheiten angepasst, können die Ergebnisse entsprechend variieren.

Im Hinblick auf die Netto-Null-Ziele des Bundes wird der Anteil an erneuerbaren Energien in der Schweiz stark steigen. Dadurch werden sich auch die Umweltauswirkungen von beziehbarem Netzstrom künftig verändern und geringer werden. Auch diese Entwicklung wird direkte Auswirkungen auf die Ökobilanz von PV-Anlagen nehmen: Strom mit einem höheren Anteil erneuerbarer Energien wird dazu führen, dass sich die anfänglichen Emissionen weniger schnell amortisieren. Unbestritten ist jedoch, dass PV-Anlagen in Netto-Null-Absenkpfad von entscheidender Bedeutung sind.





## 10.2.2 Auswirkungen der dynamischen Bewertung der Umweltauswirkungen von Strom

Im Rahmen dieser Studie wurden zur Berechnung der Umweltauswirkungen von Strom die Werte der aktuellen KBOB-Liste «Ökobilanzdaten im Baubereich» (55) verwendet (Kapitel 5.2.2, statische Werte). Alternativ besteht die Möglichkeit einer dynamischen Bewertung der Umweltauswirkungen des Stroms. Welchen Einfluss dies auf die Ergebnisse hat, wurde in diesem Kapitel untersucht.

Zur dynamischen Bewertung wurde das Umweltprofil des Stroms aus dem Schweizer Netz berücksichtigt (Monatswerte). Die Betrachtung basiert auf die in der Studie «EcoDynBat – *Dynamic Life Cycle Assessment of Buildings*» (95) veröffentlichten Werte für die Jahre 2017 und 2018. In Abbildung 129 wurden die auf verschiedenen Datengrundlagen basierenden Umweltbelastungswerte von Strom gegenübergestellt (THGE, PEne sowie UBP, abgestützt auf «EcoDynBat» (95) und den KBOB-Listen (55) und (96)). Bei den dynamischen Werten gibt es starke Variationen zwischen den einzelnen Monaten, insbesondere bei den THGE. Je nach Herkunftsland des Stroms und der für seine Erzeugung verwendeten Technologien treten starke Schwankungen auf.

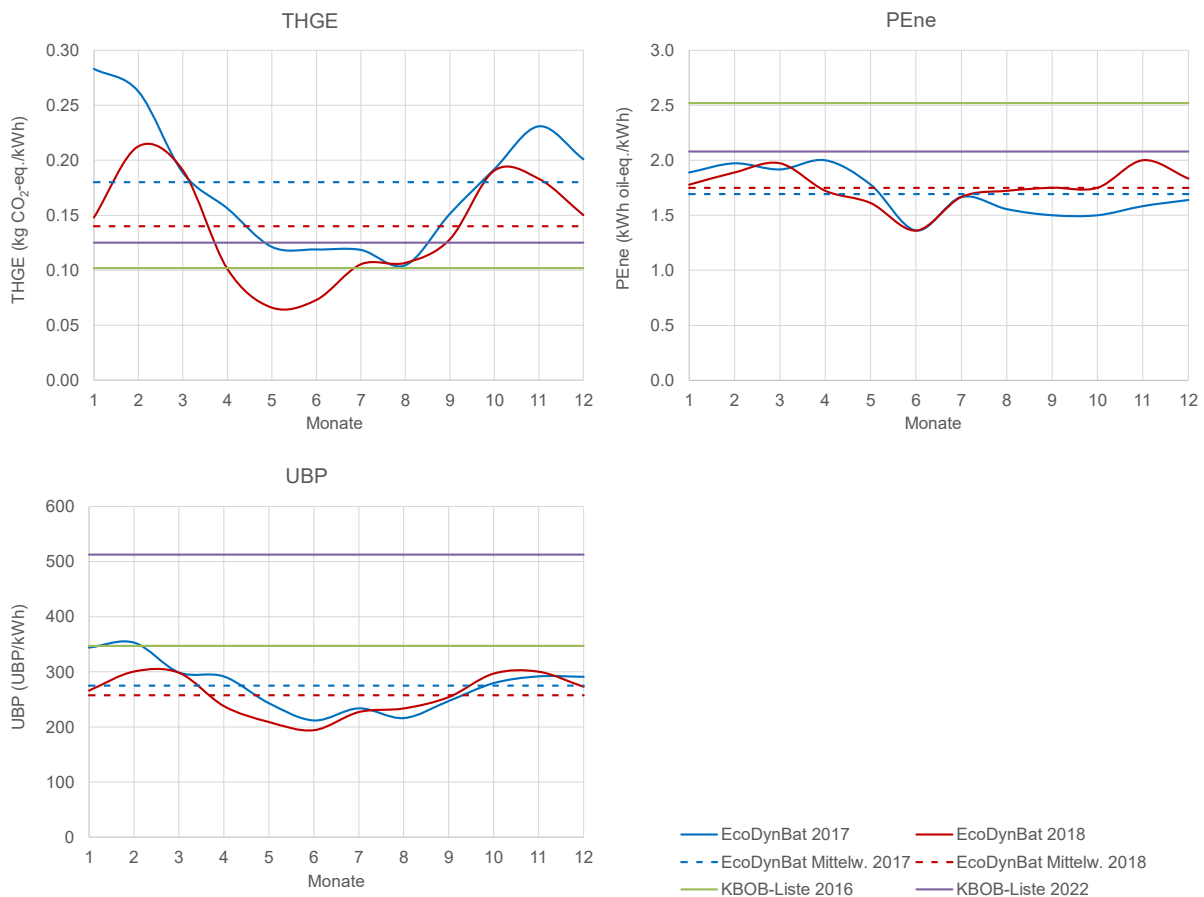


Abbildung 129: THGE (links oben), PEne (rechts oben) und UBP (unten) der verschiedenen Datenquellen im Vergleich. Dargestellt ist der Verlauf / die Entwicklung über ein Jahr. Die Bewertung der UBP der KBOB-Liste 2022 wurde nach der Methodik von 2021<sup>47</sup> berechnet, was den erheblichen Unterschied teilweise erklärt.

<sup>47</sup> [https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten\\_baubereich.html](https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html)



Bei saisonalen Verbräuchen (z. B. für Heizung oder PV-Erzeugung) führt die Verwendung dynamischer Werte zu erheblichen Abweichungen bei den Ergebnissen. In Abbildung 130 sind der tägliche Stromverbrauch (rote Linie) sowie die tägliche Stromerzeugung der PV-Fassade (opake Module, gesamte Fassade, blaue Linie) für das Referenzgebäude «Neubau» über ein gesamtes Jahr dargestellt.

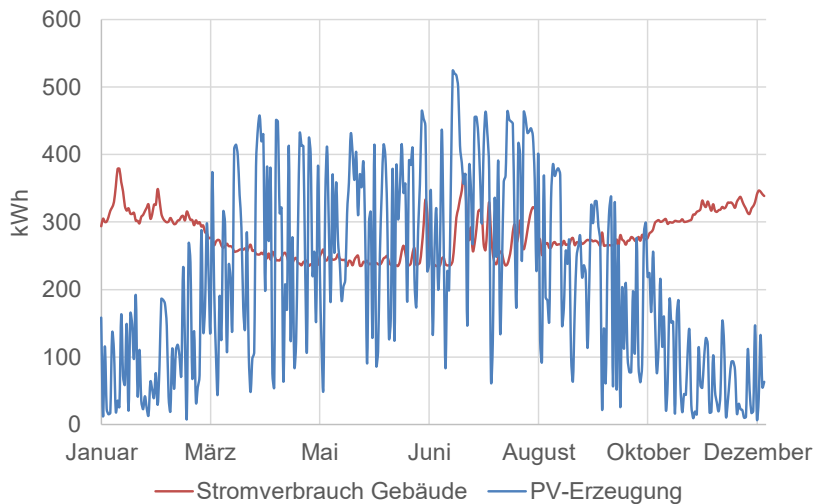


Abbildung 130: Täglicher Stromverbrauch und -erzeugung des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt ist die PV-Stromerzeugung mit opaken Modulen über alle Fassaden.

Tabelle 48 zeigt die Variation der Umweltbelastungen (THGE, PEne und UBP) für das Referenzgebäude «Neubau» mit Hilfe der verschiedenen Methoden und Datengrundlagen. Dargestellt sind die Ergebnisse, welche anhand der dynamischen und der Mittelwerte aus der Studie «EcoDynBat» (95) für die Jahre 2017 und 2018 sowie der Werte aus der KBOB-Liste 2016 (96) und 2022 (55) ermittelt wurden.

Tabelle 48. Umweltbelastungen von Strom am Beispiel des Referenzgebäudes «Neubau». Dargestellt sind die Ergebnisse, welche nach der dynamischen Methode und anhand der Mittelwerte aus dem Projekt «EcoDynBat» sowie anhand der Werte der KBOB-Liste aus den Jahren 2016 und 2022 berechnet wurden.

	THGE (g CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> )	PEne (kWh/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> )	UBP (UBP/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> )
<b>EcoDynBat 2017</b>	4.5	29.2	5'604
<b>EcoDynBat 2018</b>	3.2	32.1	5'040
<b>Mittelwert EcoDynBat 2017</b>	1.5	14.3	2'320
<b>Mittelwert EcoDynBat 2018</b>	1.2	14.8	2'172
<b>KBOB-Liste 2016</b>	0.9	21.3	2'930
<b>KBOB-Liste 2022</b>	1.1	17.6	4'331

Die Berechnung mit der dynamischen Methode führt zu deutlich höheren Werten (THGE, PEne und UBP) als eine Betrachtung anhand der Jahresmittelwerte aus der Studie «EcoDynBat» (95). Werden die Werte der KBOB-Listen verwendet, sind die Ergebnisse für THGE, PEne und UBP im Vergleich



zur dynamischen Methode geringer. Im Vergleich zu den Jahresmittelwerten sind jedoch nur die THGE geringer, die Ergebnisse für PEne und UBP sind höher.

Die Betrachtung zeigt, dass sowohl die verwendete Methodik als auch die Datengrundlage einen deutlichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben kann. Eine höhere Umweltbelastung durch Netzstrom würden dazu führen, dass sich die anfänglichen Umweltbelastungen durch die Erstellung der PV-Modulen durch die Einsparungen im Betrieb schneller amortisieren würden.

Die dynamische Methodik bietet im Allgemeinen den Vorteil, dass die Umweltauswirkungen genauer betrachtet werden könnten. So würde bspw. die höhere Stromerzeugung im Winter über eine Südfassade den Strombezug aus dem Netz reduzieren, wodurch auch die damit verbundenen Umweltauswirkungen sinken würden. Da die Umweltauswirkungen von Strom in den Wintermonaten höher sind als in den Sommermonaten (höhere Verfügbarkeit erneuerbarer Energien), würde dies die Ergebnisse entsprechend beeinflussen. Die dynamische Methode unterliegt jedoch starken jährlichen Schwankungen. In der Studie «EcoDynBat» (95) werden lediglich die Werte von zwei bestimmten Jahren (2017 und 2018) ausgewiesen. Um repräsentative Werte zu erhalten, wäre ein Durchschnitt der letzten 5 - 10 Jahre erforderlich. Deshalb wurde in dieser Studie auf die weiter gehende Verwendung dynamischer Werte verzichtet.

#### 10.2.3 Auswirkungen der methodischen Bilanzierung der Einspeisung von Strom und zeitliche Auflösung bei der Bestimmung des Eigenstromanteils

Im Rahmen des Forschungsprojekts «Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich»<sup>48</sup> wurden die methodische Bilanzierung der Einspeisung von Strom (F0.4.C) und die zeitliche Auflösung bei der Bestimmung des Eigenstromanteils (F04.D) diskutiert (2). Für die Bilanzierung der Einspeisung von Strom werden drei methodische Ansätze vorgeschlagen:

- M1 «Investieren und verkaufen»: Umweltbelastung Herstellung/Entsorgung gesamtes PV-System wird bei der Errichtung verbucht. Umweltbelastung des verkauften bzw. eingespeisten Stroms wird in der Phase Betrieb abgezogen
- M2 «Investment aufteilen»: Aufteilung zwischen Gebäude und Bezüglern, Eigenverbrauchsanteil (oder Deckungsgrad) bestimmen
- M3 «Amortisation aufteilen»: Abschreibung des Erstellungsaufwands der PV-Anlage auf die Betriebsphase und Aufteilung zwischen Eigenverbrauch des Gebäudes, auf dem die Anlage steht, und dem Netz bzw. Käufer des PV-Stroms. Eigenverbrauchsanteil (oder Deckungsgrad) bestimmen

In dieser Studie wurde die methodische Variante M1 angewandt, bei der die Umweltbelastung der Herstellung und Entsorgung des gesamten PV-System bei der Errichtung verbucht wird. Die Umweltbelastung des verkauften bzw. eingespeisten Stroms wird in der Phase Betrieb abgezogen. Zu diesem Zweck wird die Jahresbilanz berechnet, indem der Stromverbrauch des Gebäudes abzüglich der Stromerzeugung der PV-Anlage berechnet wird.

Der methodische Ansatz M2 deckt Emissionswahrheit gut ab, bietet aber geringerer Anreiz zum Einsatz von PV-Modulen mit niedriger THG-Belastung und für möglichst grosse Anlagen über die Eigenverbrauchsdeckung hinaus. In diesem Fall spielt die zeitliche Auflösung der entsprechenden Bilanzierung (jährlich, monatlich, täglich, stündlich oder gar viertelstündlich) eine sehr wichtige Rolle.

---

<sup>48</sup> Forschungsprojekt «NN-THGG – Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich – Fragestellungen F0\_F1\_F3\_F4 und Gesamtkoordination KO» <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=52363>



Der Eigenverbrauchsanteil des Referenzgebäudes «Wohnen Neubau» (Tabelle 49) und des Referenzgebäudes «Wohnen Altbau» (Tabelle 50) wurde für unterschiedliche Zeitaufösungen analysiert.

Tabelle 49. Eigenverbrauchsanteil des Referenzgebäudes «Wohnen Neubau» (EBF: 3'535.4 m<sup>2</sup>) in Abhängigkeit von der zeitlichen Auflösung, Fläche sowie Stromertrag pro Quadratmeter.

zeitlichen Auflösung	PV-Fassade (Opake Module)	PV-Dachanlage (Flachdach)	Sz.1 "oben PV / unten Grün" alle Fassaden	Sz.2 "oben PV / unten Grün" ohne Nordfassade	Sz.3 "Süd PV / andere Grün" alle Fassaden	Sz.4 "Fokus Energieproduktion" PV alle Geschosse ohne Nordfassade
Stündliche	41 %	63 %	48 %	52 %	70 %	45 %
Tägliche	81 %	100 %	90 %	96 %	100 %	87 %
Monatliche	90 %	100 %	100 %	100 %	100 %	99 %
Jährliche	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
PV-Fläche (m <sup>2</sup> )	801.3	165.6	601.0	432.5	224.6	576.7
Ertrag (kWh/m <sup>2</sup> )	97.4	231.5	106.6	124.8	131.1	114.0

Tabelle 50. Eigenverbrauchsanteil des Referenzgebäudes «Wohnen Altbau» (EBF: 1'434.6 m<sup>2</sup>) in Abhängigkeit von der zeitlichen Auflösung, Fläche sowie Stromertrag pro Quadratmeter.

zeitlichen Auflösung	PV-Fassade (Opake Module)	PV-Dachanlage (Flachdach)	Sz.1 "oben PV / unten Grün" alle Fassaden	Sz.2 "oben PV / unten Grün" ohne Nordfassade	Sz.3 "Süd PV / andere Grün" alle Fassaden	Sz.4 "Fokus Energieproduktion" PV alle Geschosse ohne Nordfassade
Stündliche	36 %	34 %	56 %	62 %	53 %	40 %
Tägliche	54 %	51 %	100 %	100 %	100 %	100 %
Monatliche	77 %	70 %	100 %	100 %	100 %	92 %
Jährliche	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
PV-Fläche (m <sup>2</sup> )	513.4	215.9	256.7	156.2	200.9	312.5
Ertrag (kWh/m <sup>2</sup> )	81.0	205.7	94.2	120.7	111.7	103.4

Aus diesen Ergebnissen lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten:

- Je kleiner die Zeitauflösung ist, desto geringer ist der Eigenverbrauchsanteil. Bei einer jährlichen Auflösung wird in beiden Fällen die gesamte Stromerzeugung als Eigenverbrauch berücksichtigt. Ab einer monatlichen Zeiteinteilung nimmt der Eigenverbrauchsanteil ab, insbesondere bei Anlagen mit höherer Produktion. Je grösser die PV-Anlage an einem neuen Gebäude ist, desto geringer ist der Anteil des Eigenverbrauchs, wenn eine kleine Zeitspanne (z. B. eine Stunde) betrachtet wird.
- Bei kleinen Anlagen (geringe Erzeugung) spielt die jährliche oder monatliche Auflösung kaum eine Rolle.



- Bei einer Anlage gleicher Grösse ist der Eigenverbrauchsanteil umso geringer, je höher der Wirkungsgrad / Effizienz der Anlage ist, wenn eine kleine Zeitauflösung betrachtet wird. Dies ist besonders nachteilig für PV-Fassaden, die weniger Strom als Dachanlagen produzieren. Insbesondere die nach Süden ausgerichtete Fassade, die im Winter mehr Strom als eine PV-Dachanlage erzeugt, wird durch diesen methodischen Ansatz benachteiligt. Die Anwendung von saisonalen Korrekturfaktoren könnte Anlagen mit höherer Produktion während der Winterstromlücke begünstigen.

### 10.3 Einfluss des statischen Mehraufwands verschiedener Begrünungssysteme auf die Ökobilanz (LCA)

Fassadenbegrünungen stellen statische Anforderungen an ein Gebäude, welche von den Eigenschaften der Begrünung abhängen. Je nach Begrünungsart sind grosse statische Mehraufwände nötig, welche graue Energie verursachen und somit die Ökobilanz negativ beeinflussen.

So zeigte eine Untersuchung der Umweltbelastung des «Tour des Cèdres» in Lausanne, dass die Installation von Bäumen auf den Balkonen bei diesem Gebäude einen zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoss von 6'055 Tonnen verursachte. Verglichen mit einer Variante ohne Bäume hatte dies eine Erhöhung der grauen Energie um 65.7 % (97) zur Folge. In einer durch die Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) erstellten Ökobilanz für die Fassadenbegrünung des Triemli-Turms verursachte die Fassadenbegrünung, unter Annahme einer Betriebszeit von 15 Jahren, eine Gesamtumweltbelastung von 230 Millionen Umweltbelastungspunkten (UBP). Die THG-Emissionen belaufen sich für den Betrachtungszeitraum dabei auf 80 t CO<sub>2</sub>-eq (58). Auch wenn sich die Treibhausgasemissionen aufgrund der unterschiedlichen Fassadenfläche und des abweichenden Betrachtungszeitraums nicht direkt vergleichen lassen, zeigen die Dimensionen welchen Einfluss Fassadenbegrünungen (je nach System) auf deren Umweltauswirkung haben können. Während die Fassade des «Tour des Cèdres» mit Bäumen bepflanzt wurde, wurden beim Triemli-Turm kleinere Pflanztröge platziert und mit Kletterpflanzen wie auch kleineren Sträuchern bepflanzt. Letzteres verursacht klar kleinere Umweltauswirkungen. Die Umweltbelastungen des «Tour des Cèdres» aufgrund des konstruktiven Mehraufwands für die Bäume an der Fassade (hohe statische Anforderungen) sind riesig.

In Bezug auf die Ökobilanz ist es somit empfehlenswert Schwerlasten durch Pflanzgefässe, Substrat und grosse Pflanzen zu vermeiden. Bodengebundene Begrünungen benötigen i.d.R. keine konstruktiven Verstärkungen und führen somit lediglich zu einem geringen Mehraufwand an Material, wie bspw. durch ein zusätzliches Rankgitter. Wandgebundene Begrünungen hingegen können – wie oben in den Beispielen aufgezeigt – zu einer hohen Umweltbelastung führen. Somit sind wandgebundene Begrünung rationell und sparsam zu gestalten (97). Eine Reduktion der Umweltbelastung ist zudem mit einer Verlängerung der Betriebszeit, mit einer sinnvollen Materialwahl bei den Pflanztrögen (z.B. Recycling-CNS, mögliche Reduktion Umweltbelastung beim Triemli-Turm um 30 %) und durch eine Reduktion der Anzahl der benötigten Pflanzgefässe durch stockwerkübergreifende Begrünungen oder bodengebundene Kletterpflanzen möglich (58). Die beiden analysierten Beispiele zeigen die Relevanz der Wahl einer sinnvollen Begrünungsart. Nicht jede Fassadenbegrünung ist auch nachhaltig, es ergeben sich grosse Unterschiede zwischen verschiedenen Systemen. Wie aus dem Kapitel 7.4 zu entnehmen ist, weisen bodengebundene Fassadenbegrünungen eine bessere Ökobilanz auf und sollten somit als alternative zu wandgebundenen Begrünungen in Betracht gezogen werden.



## 10.4 Einflussfaktoren auf die Lebenszykluskosten (LCC) (Sensitivitätsanalyse)

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse in Kapitel 7.5 hängt stark mit den getroffenen Annahmen (z.B. Kalkulationszinssatz oder Inflation) und den verwendeten Eingabegrößen (z.B. Investitionskosten, Energieverbrauch oder Stromertrag) zusammen. Insbesondere Annahmen zur zukünftigen Entwicklung sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Um aufzuzeigen, welchen Einfluss die einzelnen Parameter auf die Wirtschaftlichkeit der untersuchten Systeme hat, wurde eine **Sensitivitätsanalyse** durchgeführt.

Folgende Parametervariationen bzw. Eingabegrößen wurden untersucht:

- Kalkulationszinssatz, real (Basis 2.5 %): 1 % und 4 %
- Inflation (Basis 2 %): 0 % und 4 %
- Strompreisentwicklung (Basis 1 %): 0 % und 2 %
- Netzstromtarif (Basistarif ewz.econatur Jahr 2023): - 50 %, - 25 %, + 25 % und + 50 %
- Einspeisevergütung (Basistarif ewz Jahr 2023): - 100 %, - 50 %, + 50 % und + 100 %
- Stromproduktion (Basisfall): - 20 %, - 10 %, + 10 % und + 20 %

In den Berechnungen wurden die Investitionskosten für die verschiedenen Fassadensysteme immer inkl. Förderbeiträge betrachtet. Ohne Förderbeiträge wären die Systeme (begrünte Fassaden sowie insbesondere für die PV-Fassaden) weniger rentabel.

Tabelle 51 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für das Referenzgebäude «Neubau»<sup>49</sup>. Bei der Sensitivitätsanalyse wurden die annualisierten Kosten nicht in absoluten Zahlen (CHF/m<sup>2</sup><sub>FASSADE</sub>), sondern in Prozent angegeben. Die prozentuale Angabe bezieht sich dabei immer auf den Basisfall. Als Basisfall wurde die kostengünstigste Option der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gewählt, d.h. bei allen Referenzgebäuden die PV-Dachanlage in Kombination mit der Referenzfassade. Dies ermöglicht den Vergleich der relativen Kosten und lässt schnell erkennen, welche Eingabewerte einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

---

<sup>49</sup> Die Referenzgebäude «Altbau» und «sanierter Altbau» wurden ebenso analysiert. Da sich die Aussagen jedoch kaum unterscheiden. Hinzu kommt, dass aufgrund der abweichenden Kubatur und dem Verhältnis zwischen Dach- und Fassadenflächen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert wird (da bei der Sensitivitätsanalyse immer die PV-Dachanlage als Basis genommen wurde).



Tabelle 51: Annualisierte Kosten (Barwert) in Prozent bezogen auf den Basisfall. Als Basisfall dient die PV-Dachanlage inkl. Referenzfassade (kostengünstigste Option der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung). Der Betrachtungszeitraum beträgt 30 Jahre. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenzgebäude «Neubau». Die Symbole zeigen die Auswirkung eines Parameters auf die annualisierten Kosten eines Szenarios («grüner Kreis» bedeutet tiefere annualisierte Kosten als im Basisfall, «gelbes Dreieck» bedeutet gleiche annualisierten Kosten als im Basisfall und «rote Raute» bedeutet höhere annualisierte Kosten als im Basisfall), während die Farbe der Zellen auf einer Farbskala (von grün bis rot, wobei grün am kosteneffizientesten ist) die Kombination von Parametern und Szenarien anzeigt. Das Szenario mit den niedrigsten annualisierten Kosten für jeden Parameter ist fett hervorgehoben.

Parameter		Referenzfassade	Bodengebundene Begrünung	Wandgebundene Begrünung	PV-Fassade (opake Module)	PV-Fassade (transpar. Module)	Referenzfassade + PV-Anlage Flachdach	Sz. 1 „oben Grün“ alle Fassaden	Sz. 2 „oben PV / unten Grün“ ohne Nordfass.	Sz. 3 „Süden PV / andere Grün“ alle Geschosse	Sz. 4 „Fokus Energiepr.“ PV alle Geschosse ohne Nordfass.
<b>Basisfall</b>		120%	173%	495%	114%	171%	<b>100%</b>	144%	131%	152%	110%
Kalkulationszinssatz (Basis 2.5 %)	1 %	116%	166%	466%	108%	159%	<b>94%</b>	137%	124%	145%	104%
	4 %	124%	180%	524%	122%	184%	<b>107%</b>	153%	138%	160%	117%
Inflation (Basis 2 %)	0 %	122%	166%	440%	107%	162%	<b>95%</b>	133%	123%	141%	104%
	4 %	117%	181%	565%	125%	184%	<b>98%</b>	160%	141%	162%	118%
Strompreisentwicklung (Basis 1 %)	0 %	107%	161%	483%	109%	163%	<b>92%</b>	138%	124%	143%	104%
	2 %	135%	188%	510%	121%	180%	<b>110%</b>	152%	139%	163%	118%
Netzstromtarif (Basistarif)	- 50 %	69%	123%	444%	80%	134%	<b>62%</b>	109%	94%	112%	75%
	- 25 %	94%	148%	470%	97%	152%	<b>81%</b>	127%	113%	132%	93%
	+ 25 %	145%	199%	520%	132%	189%	<b>119%</b>	162%	149%	172%	128%
	+ 50 %	171%	224%	546%	149%	208%	<b>138%</b>	179%	167%	192%	146%
Einspeisevergütung (Basistarif)	- 100 %	120%	173%	495%	140%	180%	<b>108%</b>	163%	145%	157%	130%
	- 50 %	120%	173%	495%	127%	175%	<b>104%</b>	154%	138%	155%	120%
	+ 50 %	120%	173%	495%	102%	166%	<b>96%</b>	135%	124%	150%	100%
	+ 100 %	120%	173%	495%	89%	162%	<b>89%</b>	126%	116%	147%	90%
Stromproduktion (Basisfall)	- 20 %	120%	173%	495%	123%	176%	<b>105%</b>	153%	141%	161%	120%
	- 10 %	120%	173%	495%	119%	173%	<b>103%</b>	148%	134%	154%	114%
	+ 10 %	120%	173%	495%	110%	168%	<b>97%</b>	140%	127%	150%	106%
	+ 20 %	120%	173%	495%	105%	165%	<b>95%</b>	137%	124%	148%	102%

Die Analyse zeigt, dass die **PV-Dachanlage** (inkl. Referenzfassade) auch bei einer Variation der Eingabegrößen die kostengünstigste Lösung darstellt. Das Ergebnis bleibt somit eindeutig.

Einzig bei einer **Verdopplung der Einspeisevergütung** würde diese Aussage abweichen. In diesem Fall wäre die **PV-Fassade mit opaken Modulen** rentabler, da der hohe Stromertrag über die Fassade zu hohen Einspeisevergütungen führen würde und die höheren Investitionskosten kompensiert. Der jährliche Stromertrag über die PV-Fassade ist beim «Neubau» fast doppelt so hoch wie der Ertrag über die PV-Dachanlage.

Eine **Verdopplung der Einspeisevergütung** würde zudem dazu führen, dass es kostengünstiger ist die gesamte Fassade mit opaken PV-Modulen auszustatten, anstelle eines gezielten Einsatzes der PV-Module an der Fassade (**Szenario 4**).

Durch die **Sensitivitätsanalyse** konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- **Kalkulationszinssatz:** Ein tieferer Kalkulationszinssatz senkt den Barwert aller Szenarien, während ein höherer Kalkulationszinssatz den Barwert erhöht.
- **Inflation:** Die Inflation nimmt Einfluss auf künftige Ausgaben, d.h. auf die Instandsetzung, den Unterhalt und den Restwert. Bei der „Referenzfassade“ und der „Referenzfassade + PV-Dachanlage“ führt eine geringere Inflation zu einem niedrigeren Restwert und damit zu höheren annualisierten Kosten. Der Restwert wäre in diesen beiden Fällen entscheidender als der Unterhalt, eine Instandsetzung ist bei beiden Szenarien nicht erforderlich. Bei allen übrigen Szenarien führt eine geringere Inflation zu geringeren annualisierten Kosten, da die Kosten für den Unterhalt und die Instandhaltung entscheidender sind als der Restwert.
- **Strompreisentwicklung:** Geringere Strompreise führen in allen Fällen zu niedrigeren annualisierten Kosten. Die grösste Reduktion findet bei der Referenzfassade statt, da der



Energieverbrauch in diesem Fall am höchsten ist. Eine Erhöhung der Strompreise würde die Rentabilität von PV-Anlagen verbessern.

- **Netzstromtarif:** Eine Veränderung des Netzstromtarifs hat die gleiche Wirkung wie eine Veränderung der Strompreisentwicklung. Ein tieferer Netzstromtarif bedeutet geringere annualisierte Kosten.
- **Einspeisevergütung:** Die Einspeisevergütung hat insbesondere bei einer hohen Stromproduktionen einen bedeutenden Einfluss, d.h. beim «Neubau» auf die PV-Fassade mit opaken Modulen. Eine Verdopplung der Einspeisevergütung würde dazu führen, dass die PV-Fassade kostengünstiger als die PV-Dachanlage (inkl. Referenzfassade) wird.
- **Stromproduktion:** Die Stromproduktion hat auf alle Szenarien mit PV einen Einfluss, insbesondere bei einer hohen PV-Fläche (hoher Stromertrag). Beim «Neubau» variieren die annualisierten Kosten am stärksten beim Szenario 4. Bei einer 20 % höheren Stromproduktion, wäre dieses Szenario rentabler als die gesamte Fassade mit opaken Modulen auszustatten. Die PV-Dachanlage in Kombination mit der Referenzfassade bleibt aber auch hier am rentabelsten.

## 10.5 Bedeutung von Begrünungen und PV im städtischen und ländlichen Kontext

Die **Bedeutung von Begrünungen und PV kann je nach Standort und Kontext ganz unterschiedlich sein**. Abbildung 131 zeigt die Temperaturentwicklung und den Einfluss des Wärminseleffekts an einem Hitzetag am Beispiel der Stadt Zürich sowie des Umlands. Dargestellt ist die Temperatur am Tag (oben, 14:00 Uhr) und in der Nacht (unten, 4:00 Uhr). Deutlich erkennbar sind die hohen Temperaturunterschiede zwischen der Stadt und den ländlichen Gebieten: Am Tag kann es in der Stadt Zürich an einem Hitzetag um bis zu 10 °C und in der Nacht um bis zu 8 °C höheren Temperaturen kommen als in den umliegenden Gebieten. Der **Bedarf nach Kühlung** und Kühlmassnahmen wird angesichts des Klimawandels somit in den **Städten** bedeutender werden. In **ländlichen Gebieten ist dieser Bedarf i.d.R. geringer**, da es bereits viele begrünte und deutlich weniger versiegelte Flächen gibt.



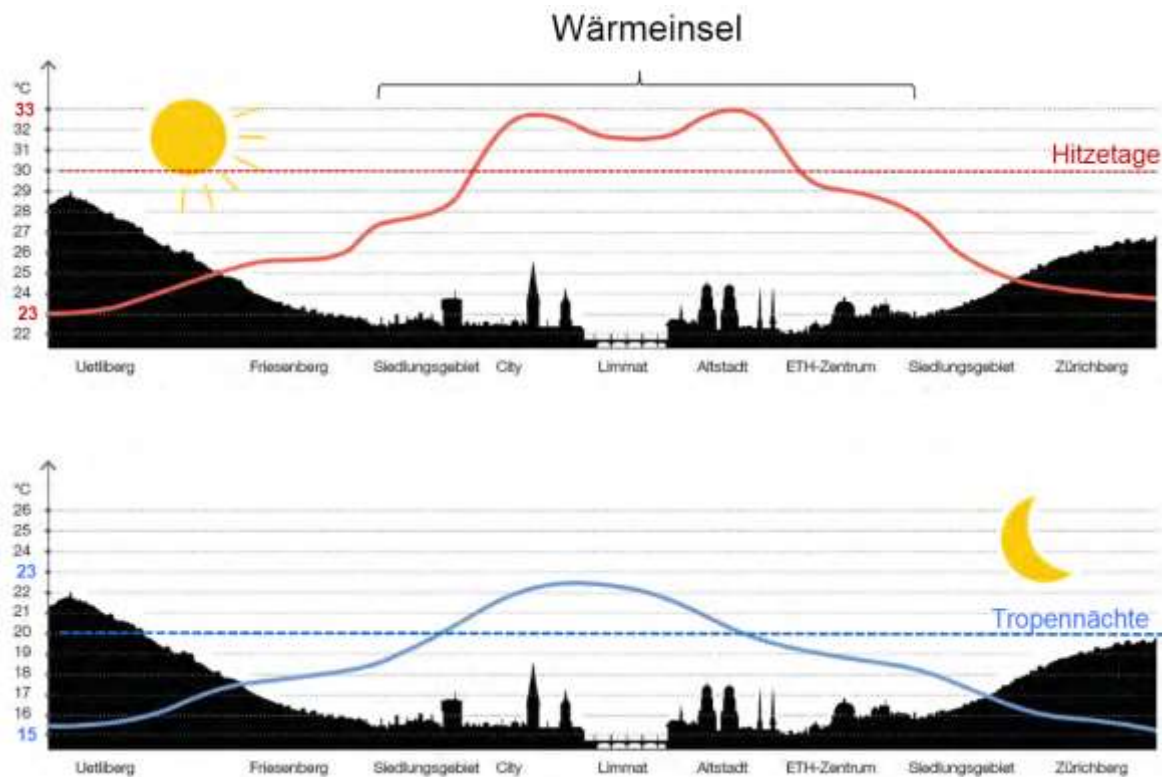


Abbildung 131: Tag- und Nachsituation (Zeitpunkte: 14:00 Uhr und 4:00 Uhr), Temperaturentwicklung und Einfluss des Wärmeiseleffekts am Beispiel der Stadt Zürich im Vergleich zum Umland (Quelle: (98)).

Welchen **Einfluss die verschiedenen Fassadensysteme auf den städtischen Wärmeiseleffekt** haben können, wurde in Kapitel 8 und Kapitel 9 mittels Messungen und Simulationen (Quartierklimamodellierung QKM) aufgezeigt. Der positive Einfluss von **Fassadenbegrünungen** zur Hitzeminderung konnte dabei bestätigt werden. Direkt an der Fassade konnten die **Oberflächentemperaturen** im Vergleich zur Referenzfassade deutlich gesenkt werden. In den Messungen im Kapitel 8 reduzierte die bodengebundene Begrünung die Temperaturen an der Fassade an einem **milden, sonnigen Tag um bis zu 13.9 °C** und die **wandgebundene Begrünung um bis zu 14.9 °C** im Vergleich zur Messreferenzfassade.

In Kapitel 9 wurde der Einfluss dieses Effekts durch die Begrünungen auf die nähere Umgebung (Strassenraum) untersucht und anhand der PET (*Physiologisch Äquivalente Temperatur*) quantifiziert. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass die Fassadenbegrünung die PET in verschiedenen Abständen zur Fassade positiv beeinflussen können. Je nach System (bodengebunden oder wandgebunden) und Abstand zur Fassade kann der Effekt jedoch schwanken. In den Simulationen konnte eine **bodengebundene Begrünung** die PET an einem heißen Sommertag (Hitzetag) im Mittel um bis zu 2.1 °C in 1 m Abstand zur Fassade und um bis zu 0.7 °C in 5 m Abstand zur Fassade senken. Hinsichtlich der **Maximalwerte** konnte die **PET bis zu 3.9 °C in 1 m Abstand zur Fassade** und bis zu 1.4 °C in 5 m Abstand zur Fassade im Vergleich zur Referenzfassade reduziert werden. Durch die **wandgebundene Begrünung** konnte die PET im Mittel um bis zu 4.1 °C in 1 m Abstand zur Fassade und um bis zu 1.7 °C in 5 m Abstand zur Fassade gesenkt werden. **Maximal konnte die PET um 8.0 °C in 1 m Abstand zur Fassade** und bis zu 3.0 °C in 5 m Abstand zur Fassade im Vergleich zur Referenzfassade reduziert werden (Abbildung 112 und Abbildung 113).

Generell kann also gesagt werden, dass mit einer **wandgebundenen Begrünung ein höherer Effekt erzielt werden kann als mit einem bodengebundenen System**. Zudem **nimmt die positive Wirkung der Begrünung mit zunehmendem Abstand zur Fassade ab**. Ebenso ist zu



berücksichtigen, dass **Wind die Wirkung mindern kann** (Kapitel 9.5) – In windgeschützten Bereichen, wie bspw. Innenhöfe, oder an Fassadenflächen, die i.d.R. windabgewandt sind, ist das kühlende Potential von Begrünungen am grössten.

**PV-Fassaden** heizen sich über den Tag mehr auf und führen zu höheren Oberflächentemperaturen an den Paneelen (Kapitel 8). Auf die PET im Aussenraum wirken die Systeme jedoch **nicht negativ** und können sogar geringfügig positiv wirken (Kapitel 9, Abbildung 112 und Abbildung 113). Das **Potential von Begrünungen zur Hitzeminderung ist jedoch deutlich höher**. Um einen Beitrag zur Hitzeminderung zu erzielen, sollten somit **vermehrt Grünflächen und Grünräume** geschaffen werden. Dies kann – wie in Abbildung 131 – deutlich erkennbar, **insbesondere in städtischen Gebieten** zunehmend ein Bedürfnis werden.

Wird das Potential der Minderung des Wärmeinseleffekts durch die Begrünung demjenigen der Stromerzeugung durch PV gegenübergestellt, dann sollte aus ökologischen und ökonomischen Gründen PV an der Fassade da eingesetzt werden, wo das grösste Stromerzeugungspotential besteht (Kapitel 7.4 und 7.5). Das heisst an **Süd-, Ost- und Westfassaden ohne Verschattung**. Je nach Kontext (Nachbargebäude oder topografische Elemente) können somit ganz unterschiedliche Flächen am Gebäude für eine effiziente Stromerzeugung über PV zur Verfügung stehen.

Neben dem Kontext spielt ebenso auch der Standort (Mittelland, alpine Lage etc.) eine wichtige Rolle bei der Entscheidung für ein Fassadensystem. Insbesondere in **alpinen Lagen** besteht ein hohes Potential zur Stromproduktion über Fassadenflächen. Gemäss BFE wird davon ausgegangen, dass die Jahresproduktion rund 50 % und der spezifische Winterertrag 2- bis 3-mal höher ausfallen kann als bei Anlagen im Mittelland. Grund dafür ist zum einen das bessere Einstrahlungsverhältnis (dünnere Atmosphäre, weniger Nebel) und weil das Sonnenlicht im Schnee reflektiert wird (aufgrund der Albedo von Schnee)<sup>50</sup>. Abbildung 132 vergleicht die mögliche Jahresproduktion verschiedener PV-Anlagen und Standorte miteinander.

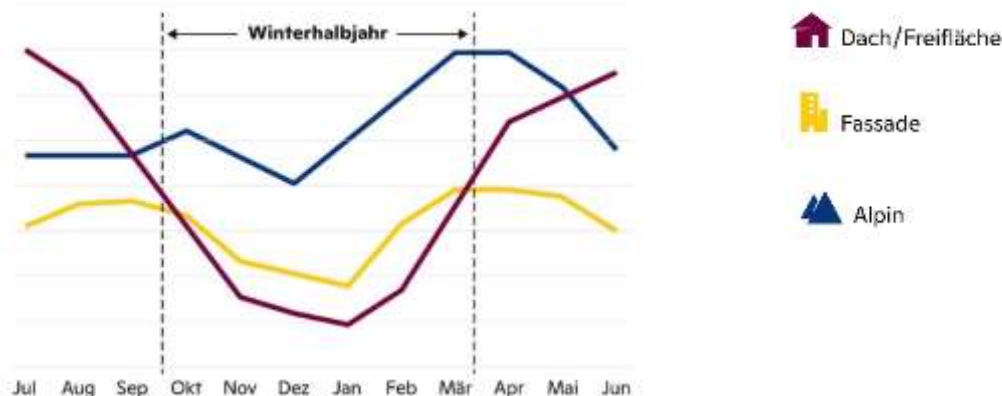


Abbildung 132: Jahresproduktion von verschiedenen PV-Anlagen und Standorten. Die dunkelrote Linie zeigt die Stromproduktion über Dach / Freiflächen und die gelbe Linie über PV-Fassaden im Mittelland. Die dunkelblaue Linie zeigt das Stromerzeugungspotential von alpinen PV-Anlagen (Quelle: BKW)<sup>51</sup>.

In **städtischen Gebieten** wird der **Bedarf nach Kühlung** und **grünen Aufenthaltsräumen** stetig anwachsen. Das liegt einerseits an den steigenden Temperaturen in den Sommermonaten (Klimawandel, städtischer Wärmeinseleffekt), andererseits an der zunehmenden Verdichtung unserer Städte (weniger Platz für Grünräume). Diese wird zudem vermehrt zu Verschattungen führen,

<sup>50</sup> <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/solarenergie/photovoltaik-grossanlagen.html>

<sup>51</sup> <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/solares-bauen-speicher>



wodurch sich zunehmend Fassadenflächen weniger zur Stromproduktion eignen werden. In städtischen Gebieten betrifft dies häufig die unteren Geschosse eines Gebäudes. Dies geht mit dem Potential von Begrünungen einher – Da Begrünungen insbesondere in Bereichen nahe am Menschen einen hohen Mehrwert leisten können, sind diese i.d.R. besonders in den unteren (ohnehin verschatteten) Geschossen gut platziert. **Grün und PV** müssen sich an der Fassade somit nicht konkurrenzieren und können i.d.R. **gut kombiniert** werden. Dadurch lassen sich auch die Vorteile beider Systeme vereinen und sowohl ein Beitrag zur Steigerung der Aufenthaltsqualität in Städten als auch zur nachhaltigen Stromproduktion geleistet werden.

In **ländlichen Gebieten** ist der Bedarf nach Begrünungen meist weniger ausgeprägt als in urbanen Gebieten. Das Platzangebot für Grünflächen sowie Bepflanzungen (Bäume, Sträucher etc.) in der Umgebung ist i.d.R. deutlich höher. Da Bebauungen meist in grösseren Abständen und mit geringerer Höhe vorzufinden sind, steht am Gebäude selbst eine **hohe Fassadenfläche ohne Verschattungen** zur Verfügung, welche zur Stromproduktion genutzt werden kann. Eine mögliche Verschattung durch topografische Elemente sollte dennoch geprüft und bei der Anordnung von PV-Modulen berücksichtigt werden.

Es kann also gesagt werden, dass in ländlichen Gebieten und insbesondere in alpinen Lagen Fassadenflächen ein hohes Potential zur effizienten Stromerzeugung aufweisen. Aufgrund der geringeren Bebauungsdichte und Gebäudehöhen steht da jedoch auch deutlich weniger Fassadenfläche zur Verfügung als in städtischen Gebieten. In städtischen Gebieten sollten, wo aufgrund vom Denkmalschutz und Schutz des Ortsbildes möglich, Fassadenflächen mit hohem Stromerzeugungspotential bevorzugt für PV genutzt werden, während weniger effiziente Flächen mit Begrünungen belegt werden könnten. So kann ein Mehrwert für Mensch, Natur und Umwelt geschaffen werden und sowohl ein Beitrag zur Hitzeminderung als auch zur nachhaltigen Stromproduktion geleistet werden.

## 10.6 Erweiterung der Systemgrenze: gesamtheitliche Gestaltung mit Begrünungen und PV

In dieser Studie wurde der Fokus insbesondere auf die Gestaltung der Fassade mit Begrünungen und PV gelegt. Im Rahmen einer gesamtheitlichen Planung von Gebäuden und Aussenräume sollten jedoch auch Dächer und Umgebung in die Flächenbetrachtung miteinbezogen werden.

### **PV-Anlagen an Fassade und Dach**

Bei einigen Aspekten der quantitativen Analyse wurde neben den Fassadensystemen auch der Vergleich zu einer PV-Dachanlage angestellt. In Kapitel 7.3 wurde das Stromerzeugungspotential der verschiedenen PV-Systeme miteinander verglichen. Die jährliche Stromproduktion ist über eine PV-Dachanlage generell höher als über eine Fassade (Abbildung 81). Bei der saisonalen Betrachtung konnte hingegen der Vorteil einer vertikalen Anlage insbesondere in der Winterstromproduktion dargelegt werden. Über eine nach Süden ausgerichtete PV-Fassade ohne Verschattung kann in den Wintermonaten mehr Strom produziert werden als über die Dachanlage (Abbildung 83 und Abbildung 84). In der Betrachtung der Stromproduktion im Tagesverlauf zeigte sich, dass es durchaus sinnvoll sein kann, PV-Module in verschiedene Orientierungen an der Fassade zu platzieren, um so eine Stromproduktion über den gesamten Tag sicherzustellen und den Eigenverbrauch zu erhöhen (Abbildung 85).

In Kapitel 7.4 und Kapitel 7.5 wurden die Ökobilanz (LCA) und die Lebenszykluskosten (LCC) betrachtet. Zu Vergleichszwecken wurde auch hier eine PV-Dachanlage in die Betrachtung miteinbezogen. Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen erreichte die PV-Fassade mit opaken Modulen über den Lebenszyklus (Betrachtungszeitraum 30 Jahre) bessere Werte als die PV-Dachanlage, was jedoch insbesondere auf die grössere PV-Fassadenfläche und die damit verbundene, bessere Bilanz im Betrieb zurückzuführen ist (Abbildung 89). Beide Systeme, sowohl die PV-Fassade als auch die PV-Dachanlage, können die anfängliche Umweltbelastung durch die



Erstellung jedoch amortisieren und führen über den Lebenszyklus zu geringeren Umweltbelastungen als die reine Referenzfassade. Mit Blick auf die Lebenszykluskosten ist eine PV-Dachanlage wirtschaftlicher als eine PV-Fassade mit opaken Modulen (Abbildung 96). Die Wirtschaftlichkeit und die Ökobilanz einer PV-Fassade können jedoch verbessert werden, wenn die PV-Module gezielt, d.h. an Flächen mit hohem Stromerzeugungspotential, angeordnet werden. Dies konnte in Kapitel 10.1 verdeutlicht werden, wo verschiedene Szenarien untersucht wurden (Szenario 4 «Fokus Energieproduktion», Abbildung 126 und Abbildung 127).

### **Begrünungen an Fassade, Dach und im Aussenraum**

Bei der Planung von Grünflächen sollten je nach Situation die passendsten Begrünungsoptionen ermittelt und gegebenenfalls miteinander kombiniert werden. Bei der Wahl der Begrünungsarten sind die mit der Begrünung verfolgten Ziele entscheidend. Eine Analyse der Platzverhältnisse und der Zugänglichkeit oder der damit verbundenen Bewässerungs- und Pflegeoptionen sind unabdingbar zur Bestimmung der Unterhaltskosten. Verschiedene Städte haben in den letzten Jahren Instrumente entwickelt, welche zur langfristigen Verbesserung des Stadtklimas beitragen sollen und bei der Planung von Begrünungen herangezogen werden können. Als Beispiele können Basels "Stadtklimakonzept zur klimaangepassten Siedlungsentwicklung im Kanton Basel-Stadt", Zürichs Leitfaden "Massnahmen gegen Hitze" oder das Planungstool Hitze im Siedlungsraum im kantonalen GIS genannt werden.

**Grünflächen im Aussenraum** bilden sinnvolle Massnahmen zur Hitzeminderung, da sich diese Flächen oft im direkten Aufenthaltsbereich von Menschen befinden. Sie steigern zudem die Attraktivität der Aussenräume selbst (Kapitel 6.5), und tragen so auch zu einer guten Lebensqualität bei. Hinzu kommt, dass horizontale Grünflächen aufgrund des Bodenanschlusses hohe Mengen Regenwasser aufnehmen, speichern und verdunsten können. Das Potenzial zur Wasseraufnahme, und somit der Kühlung, hängt von der Grösse der Grünfläche sowie der Bepflanzungsart ab.

Wie die Grünflächen tragen auch **Bäume** im Aussenraum zur Hitzeminderung und zur Attraktivitätssteigerung bei. Neben der Verdunstung sorgt zusätzlich die Beschattung durch Bäume für angenehme und attraktive Aufenthaltsräume (Kapitel 9.6).

Horizontale Grünflächen und Bäume weisen gegenüber **Fassadenbegrünungen** bedeutende Vorteile auf, sie benötigen jedoch viel Platz, der nicht immer vorhanden ist. Bei knapper Bodenverfügbarkeit sind Fassadenbegrünungen einfacher anwendbar. Bäume benötigen genügend Wurzelraum. Dies ist im Zusammenhang mit Unterbauungen (z.B. Tiefgaragen) häufig problematisch.

**Dachbegrünungen** weisen hinsichtlich der Regenwasseraufnahme und -retention Vorteile auf, stellen einen Ausgleich zum verbauten Naturraum dar und tragen zur Förderung der Biodiversität bei. Sie können die energetische Isolation der Gebäudehülle verbessern und dadurch das Innenraumklima positiv beeinflussen. Ebenso leisten Dachbegrünungen einen Beitrag zur Hitzeminderung. Jedoch ist hier zu beachten, dass Dachbegrünungen normalerweise eine grosse Distanz zum Strassenraum haben und dadurch – im Gegensatz zu Fassadenbegrünungen an den unteren Geschossen – die Aufenthaltsqualität dort nur beschränkt verbessern.

Generell ist es wichtig, dass Grünräume **arealübergreifend geplant** werden. Erschwerend ist dabei i.d.R., dass Investoren und Planende meist keinen Einfluss auf die Planung des Areals nehmen können, sondern nur im Rahmen des eigens bearbeiteten Baugrunds. Hier liegt die Verantwortung vorwiegend bei der Stadtverwaltung. Mittels raumplanerischer Vorgaben, Richtpläne oder Überbauungsordnungen sollten wichtige Aspekte arealübergreifend geregelt werden. So ist zum Beispiel die Kaltluftsituation in der Stadtplanung miteinzubeziehen und auch bei Arealgestaltungen zu berücksichtigen. Optimalerweise werden Kaltluftkorridore offengehalten und als Grünräume gestaltet. Gebäude sind parallel zum Kaltluftstrom auszurichten (99). Ein funktionierendes Kaltluftmanagement verbessert die Lebensqualität in den betroffenen Gebieten. Zudem profitiert die Biodiversität von den Grünräumen, die Kaltluftkorridore können auch als Vernetzungskorridore dienen.



## Gesamtheitliche Gestaltung mit Grün und PV

PV und Grün können somit nicht nur an der Fassade, sondern auch auf Dachflächen und im Aussenraum eingesetzt werden. Die verschiedenen Systeme bieten dabei diverse Vorteile, die miteinander kombiniert werden sollten. Um eine effiziente Stromproduktion über das ganze Jahr zu erzielen, sollten PV-Module sowohl auf dem Dach als auch an der Fassade angeordnet werden oder sogar arealübergreifende Lösungen in Betracht gezogen werden. Auch die Kombination verschiedener Grünelemente, d.h. von Fassadenbegrünungen, Dachbegrünungen, Bäumen und Rasenflächen kann verschiedene Vorteile miteinander verbinden. Welche Begrünungen vor Ort eingesetzt werden, ist anhand verschiedener Gegebenheiten abzuwägen, dazu gehören u.a. das verfügbare Platzangebot, statische Voraussetzungen, Zugänglichkeit etc.

## 10.7 Hemmnisse und Massnahmen zur Steigerung der Akzeptanz von Begrünungen und PV im Fassadenbereich

PV und Begrünungen müssen angesichts des **Klimawandels** zunehmend an Bedeutung gewinnen. Mit den **Energieperspektiven 2050+<sup>52</sup>** wurde eine mögliche Entwicklung des Schweizer Energiesystems analysiert und verschiedene Varianten durch einen unterschiedlichen Mix an Technologien und eine unterschiedliche Geschwindigkeit des Ausbaus erneuerbarer Energien im Stromsektor betrachtet, welche mit dem langfristigen Klimaziel von Netto-Null Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 kompatibel sind und gleichzeitig eine sichere Energieversorgung gewährleisten. Abbildung 133 zeigt ein Zielbild für eine klimaneutrale Schweiz im Jahr 2050. PV-Anlagen nehmen hier einen zentralen Stellenwert ein: Künftig sollen bis zu 40 % des Schweizer Strombedarfs durch PV-Anlagen gedeckt werden. Dies würde einen massiven Ausbau dieser Systeme bedeuten: Während heute ca. 2 TWh über PV-Anlagen gedeckt werden, sollen es künftig 34 TWh sein.



Abbildung 133: Zielbild klimaneutrale Schweiz 2050 (Quelle: Dina Tschumi, Prognos AG).

Heutzutage werden PV-Anlagen im Dachbereich bereits vermehrt umgesetzt, diese Flächen stehen jedoch nur begrenzt zur Verfügung. Eine Anwendung von PV-Systemen im Fassadenbereich und auf Infrastrukturen wird somit künftig zentral sein, um die Ziele des Bundes zu erreichen. Zusätzlich zur Beschleunigung des Ausbaus sollte insbesondere mehr Winterstrom produziert werden. PV-Fassaden und alpine Photovoltaik können dazu einen wichtigen Beitrag leisten.

<sup>52</sup> <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>



Neben der Mitigation ist aber auch eine **Adaption des Gebäudeparks** an künftige Klimabedingungen unabdingbar. Durch den Klimawandel und dem damit verbundenen Temperaturanstieg werden die Überhitzungsstunden oder der Klimakältebedarf unserer Gebäude stark ansteigen. Massnahmen zur **Hitzeminderung** werden immer wichtiger, insbesondere in städtischen Gebieten. **Begrünungen** können die Aussenluft abkühlen (Verdunstungskühlung) und somit einen wesentlichen Beitrag zur Aufenthaltsqualität leisten. Einige Städte haben bereits Verordnungen für Grünflächen erlassen, so fordert bspw. die Stadt Graz einen Grünflächenfaktor im gesamten Gemeindegebiet der Landeshauptstadt<sup>53</sup>.

Derzeit finden sowohl Begrünungen als auch PV-Anlagen an der Fassade kaum Anwendung. Gebäudefassaden bieten jedoch ein hohes Potential, welches vermehrt genutzt werden sollte. Bei der Umsetzung von begrünten und PV-Fassaden gibt es jedoch einige **Hemmnisse**, welche Planende, Bauherrschaften und Investoren/innen davon abhalten, diese Systeme vermehrt umzusetzen. Dazu gehören u.a.:

- **hohe Initialkosten** insbesondere bei PV und wandgebundenen Systemen, zusätzliche Kosten für Pflege- und Instandhaltung bei Begrünungen
- **erhöhter Planungsaufwand**, fehlende Erfahrungen, Mangel an guten Beispielen und theoretischen Grundlagen
- **Unsicherheit bei Planenden und Investoren/innen** bezüglich der Langzeitbetrachtung (z.B. Unklarheiten zu gesetzlichen Vorgaben, Förderungen und Preisentwicklungen)
- **Brandschutz**, sowohl für PV-Fassaden als auch für Fassadenbegrünungen fehlen klare Vorgaben und insbesondere explizite Lösungsansätze bei mittleren Gebäuden und Hochhäusern
- **Denkmalschutz**, fehlende Richtlinien, Zielkonflikt Kultur - Energie - Wohlbefinden / Hitzeminderung im Aussenraum
- fehlende Erfahrungen und Unklarheiten bei **Ausführung und Unterhalt**, Fachkräftemangel, Engpass Lieferungen (Abhängigkeit von Importprodukten)
- **Attraktivität und Ästhetik**, fehlende Akzeptanz insbesondere bei PV-Systemen, fehlende Kontrolle des Fassadenbilds bei Begrünungen
- **Unterhalt und Betrieb** (Nutzungsphase), Zugänglichkeit insbesondere bei hohen Fassaden (Platz für Hebebühne etc.), laufende Pflege- und Instandhaltung insbesondere bei Fassadenbegrünungen
- **Baulicher Kontext**, fehlender Bodenanschluss, ungeeignete Architektur bzw. Volumetrie (Eigenbeschattungen, Vor- und Rücksprünge etc.)

In diesem Kapitel wurden die am häufigsten auftretenden Themenfelder genauer betrachtet und Massnahmen zur Steigerung der Akzeptanz aufgezeigt.

#### 10.7.1 Hohe Initialkosten, zusätzliche Kosten für Pflege- und Instandhaltung bei Begrünungen

Die Kosten sind bei der Entscheidung für oder gegen ein System in den meisten Fällen ein **Hauptkriterium** und können ein entscheidendes Hemmnis für die Umsetzung von Fassadensystemen darstellen. In Kapitel 7.5 wurde eine ökonomische Betrachtung der verschiedenen Fassadensysteme durchgeführt, wobei sowohl Initial- als auch die Lebenszykluskosten betrachtet wurden. PV-Anlagen sowie auch Begrünungen an der Fassade, insbesondere wandgebundene Begrünungen, führen i.d.R.

---

<sup>53</sup> [https://www.graz.at/cms/beitrag/10412985/7765198/Gruenflaechenfaktor\\_Verordnung.html](https://www.graz.at/cms/beitrag/10412985/7765198/Gruenflaechenfaktor_Verordnung.html)



zu **hohen Initialkosten**. Bei Vertikalbegrünungen kommen zudem laufende Kosten für Pflege und Instandhaltung hinzu, die es von Beginn an mitzubedenken gilt.

Um die Investitionskosten möglichst gering zu halten, gibt es verschiedene Ansätze und **Einflussfaktoren**. Einerseits ist eine **gute Planung** sowohl bei PV-Fassaden als auch bei Fassadenbegrünungen ein wichtiger Schritt. Andererseits könnten **finanzielle Anreize seitens Bund, Kanton und Gemeinden** entscheidend für Investitionsentscheidungen sein.

### PV-Fassaden

Hohe Initialkosten einer PV-Fassade können Investoren/innen und Bauherrschaften von einer Umsetzung abhalten. Marktbedingte Schwankungen der Preise für PV-Anlagen erhöhen die Unsicherheit bezüglich deren Rentabilität zusätzlich. Die Kosten einer im Jahr 2022 offerierten PV-Anlage haben sich gegenüber 2021 beispielsweise um durchschnittlich 12 % erhöht. Dieses Wachstum wird sich 2023 aufgrund einer ungewöhnlich großen Menge an in Europa gelagerten Modulen (Versand von etwa 80 GW bei einem "normalen" Markt von 40 bis 50 GW) möglicherweise nicht wiederholen (100). Dennoch tragen solche Preisentwicklungen zum langfristigen Anstieg der PV-Stromproduktion nicht bei. Über den Lebenszyklus gesehen amortisieren sich PV-Module aufgrund der Einsparungen im Betrieb jedoch in den meisten Fällen. In Kapitel 7.5.2 wurden die annualisierten Kosten der verschiedenen Fassadensysteme aufgezeigt. Um die anfänglichen Kosten möglichst gering zu halten und eine hohe Rentabilität der PV-Fassade zu erzielen, sind folgende **Aspekte bei der Planung** relevant:

- Durch die **Verwendung von Standardmodulen** können die anfänglichen Investitionskosten möglichst tief gehalten werden.
- Ein **hoher Wirkungsgrad** von PV-Modulen führt zu höheren Erträgen, die anfänglichen Kosten können sich somit möglichst schnell amortisieren (Kapitel 7.5.2, Vergleich transparente und opake PV-Fassade).
- Ein **hoher Eigenverbrauch** führt i.d.R. zu einer besseren Wirtschaftlichkeit der Anlage (Netzstrom ist meist teurer als die Abnahmevergütung). Durch den Einsatz der PV-Module in unterschiedlichen Orientierungen und in Abstimmung mit den Nutzungszeiten kann der Eigenverbrauch gesteigert werden (früher Morgen - Ostfassade, Mittag - Südfassade, später Nachmittag - Westfassade, Kapitel 7.3.3) und das Stromnetz entlastet werden. Der Eigenverbrauch könnte dabei zusätzlich durch verschiedene Massnahmen gesteigert werden, bspw. durch eine Kombination mit einer Wärmepumpe, eine Warmwasserproduktion mittels PV-Strom, eine gezielte Gerätenutzung und -steuerung sowie eine intelligente Steuerung durch Energiemanagementsysteme.
- PV-Module sollten an **Fassadenflächen mit hohem Stromerzeugungspotential** angeordnet werden, d.h. an unverschatteten Flächen und in optimalen Orientierungen (Kapitel 7.3). Aufgrund des höheren Stromerzeugungspotentials können sich die anfänglichen Kosten schneller amortisieren, was zu einer besseren ökonomischen Bilanz führt.
- Die Wirtschaftlichkeit einer PV-Anlage sollte generell auf Basis der Netto-Kosten (Investitionskosten) beurteilt werden. Daher sollten bei den Brutto-Kosten folgende Positionen abgezogen werden:
  - Einsparungen für eine alternative Materialisierung der Gebäudehülle und ggf. Wertsteigerung durch den Einsatz von höherwertigen und langlebigeren Materialien
  - Förderbeiträge als Investitionsminderung
  - Berücksichtigung allfälliger steuerlicher Aspekte



Neben einer guten Planung können zudem **finanzielle Anreize** den Entscheid für eine PV-Anlage begünstigen. Dazu gehören u.a.

- **Förderprogramme:** In der Schweiz wurden diesbezüglich bereits verschiedene Förderprogramme initiiert. Fördergelder vom Bund können als Einmalvergütung bezogen und i.d.R. mit kantonalen oder städtischen Förderprogrammen kombiniert werden. Die aktuellen Förderbeiträge für PV-Fassaden reichen derzeit jedoch nicht aus, um die Mehrkosten dieser Systeme zu senken. Eine Erhöhung der Beiträge könnte einen höheren Anreiz schaffen.
- Ein wichtiger Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit einer PV-Anlage ist die Höhe der **Einspeisevergütung**, wobei zwei Ansätze verfolgt werden sollten:
  - Die Einspeisevergütungen sind derzeit je nach Elektrizitätswerk sehr unterschiedlich. Zudem variieren einige Elektrizitätswerke ihre Tarife mehrmals im Jahr, was zu weiteren Schwankungen führen kann und die Investitionsunsicherheit erhöht. Eine Angleichung der Tarife würde eine Vereinfachung und die langfristige Planungssicherheit für Planende und Investoren/innen erhöhen.
  - Eine Erhöhung der Einspeisevergütung - insbesondere in den Wintermonaten - könnte einen zusätzlichen Anreiz schaffen und die Wirtschaftlichkeit erhöhen. Dies wurde u.a. in Kapitel 10.4 anhand einer Sensitivitätsanalyse aufgezeigt.
- Mehr **steuerliche Anreize** schaffen: Steueransätze für den durch die PV-Anlage erzeugten Strom sollten künftig vermieden werden. Des Weiteren könnte eine geringere Besteuerung des Gebäudes in Abhängigkeit vom Grad des Eigenverbrauchs einen zusätzlichen Anreiz schaffen.

### Fassadenbegrünungen

Auch bei begrünten Fassaden sind die Kosten ein wichtiger Faktor, weshalb die Systeme noch nicht häufiger umgesetzt werden. Die **Initialkosten** können dabei je nach System sehr unterschiedlich sein. Bodengebundenen Begrünungen sind i.d.R. deutlich kostengünstiger als wandgebundene Systeme (Kapitel 7.5). Im Gegensatz zu PV-Fassaden sind bei Begrünungen insbesondere auch die **Pflege- und Instandhaltungskosten** zu berücksichtigen. Durch eine gute Planung können aber bei Fassadenbegrünungen ebenfalls die anfänglichen und laufenden Kosten möglichst gering gehalten werden. Folgende Aspekte sollten dabei beachtet werden:

- Die **Wahl des Begrünungssystems** ist entscheidend, bodengebundene Begrünungen sind i.d.R. einfacher zu planen, zu realisieren, kostengünstiger und einfacher in der späteren Pflege. Ist kein Bodenanschluss vorhanden, können Pflanzgefässe oder wandgebundene Systeme eine Alternative darstellen.
- Die **Pflanzenwahl** sollte in Abstimmung mit dem Standort und den zukünftigen klimatischen Entwicklungen (hitzeresistente Pflanzen) erfolgen. Dadurch kann eine gute Entwicklung der Pflanzen sichergestellt und ein Pflanzensterben verhindert werden. Ebenso sollte der Pflegeaufwand (Wachstum) und der Wasserbedarf von Pflanzen in die Entscheidung mit einbezogen werden.
- Eine **gute Zugänglichkeit** kann die Kosten für Pflege und Instandhaltung senken. Während Begrünungen im unteren Gebäudebereich i.d.R. gut erreichbar sind, müssen ab einer gewissen Wuchshöhe Hilfsmittel, wie Leitern oder Hebebühnen, hinzugezogen werden.
- Die Pflege und Instandhaltung der Fassadenbegrünung muss bereits in der Planungsphase einbezogen werden, ein **Pflegeplan** für die ersten Jahre ist vorgängig zu erstellen.
- **Einbezug einer Fachperson** in der frühen Planungsphase, der bei den zuvor genannten Punkten unterstützt.





Im Gegensatz zu PV-Fassaden, welche die Chancen auf Amortisation haben, ist das **Kosten-Nutzen-Verhältnis bei begrünten Fassaden** ein anderes. Die Kosten einer Fassadenbegrünung werden i.d.R. lediglich durch die Bauherrschaft / Eigentümer/in getragen, den Nutzen bzw. Mehrwert haben jedoch deutlich mehr Personen. Begrünungen sind essenziell für eine hohe Aufenthalts- und Lebensqualität unserer Städte. Grünflächen bieten eine Reihe positiver Aspekte, sie können u.a. Lärmemissionen mindern, die Luftqualität verbessern, die Biodiversität und die Gesundheit von Menschen fördern (Kapitel 6). Eine vermehrte Initiierung von **Fördergefässen für Fassadenbegrünungen** könnte diesem Ungleichgewicht entgegenwirken. Erste Förderprogramme wurden bereits lanciert, bspw. in der Stadt Zürich. Die Höhe der Fördergelder sollten sich dabei nicht nur an den anfänglichen Kosten orientieren, sondern ebenso laufende Kosten für Pflegeaufwände berücksichtigen. Dadurch kann gleichzeitig ein Einfluss auf die langfristige Attraktivität von Stadträumen genommen werden. Eine Herausforderung hierbei ist das in Wert setzen der qualitativen Aspekte wie auch deren Gewichtung im Vergleich zu den quantitativen Aspekten, welche direkt messbar sind. Qualitative Vorgaben sind meist subjektiv und in einem Baubewilligungsverfahren oder im Zusammenhang mit Förderungen diskutier- und anfechtbar. Klare Regelungen erweisen sich deshalb als problematisch.

Neben den direkt quantifizierbaren Kosten sollten bei Investitionsentscheidungen ebenso andere nicht quantifizierbare Aspekte in die Betrachtung miteinbezogen werden. Fassadenbegrünungen können nicht nur einen deutlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit in Zeiten des Klimawandels leisten, sondern auch die **Attraktivität einer Immobilie deutlich steigern**.

- Ein grüner Arbeits- und Wohnort zieht das Interesse von Arbeitnehmern und Mieterinnen an. Die Resultate sind eine gute Vermietbarkeit und langfristige Mietverhältnisse.
- Begrünungen können zudem die Produktivität und Kreativität von Arbeitnehmern / Arbeitnehmerinnen steigern oder auch die Zahl der Aufenthaltstage in Spitälern senken (bessere Erholung, Wohlbefinden durch *Biophilic Design* / Bezug zur Natur, etc.).
- Nachhaltige Investitionen können zudem auch die Attraktivität eines Unternehmens steigern (**Image**) und somit langfristig zu mehr Aufträgen führen. **Bauherrschaften** gilt es die verschiedenen Vorteile aufzuzeigen und sie diesbezüglich zu **sensibilisieren**.

In Kapitel 10.1.3 wurden verschiedene Kombinationen von PV und Begrünungen an der Fassade untersucht und deren Einfluss auf die Ökobilanz und die Lebenszykluskosten gegenübergestellt. Bei einer gezielten Anordnung von PV und Begrünungen an der Fassade übersteigen die Lebenszykluskosten der kombinierten Szenarien die der Referenzfassade nur geringfügig, gleichzeitig wird die Ökobilanz verbessert (Abbildung 128).

#### 10.7.2 Erhöhter Planungsaufwand, fehlende Erfahrungen, Unklarheiten und Unsicherheiten bei Planenden

PV und Begrünungen im Fassadenbereich können anfänglich mit einem **erhöhten Planungsaufwand** einhergehen. Hinzu kommen **fehlende Erfahrungen, Unklarheiten und Unsicherheiten** bei Planenden im Umgang mit den Systemen. Um eine gute Planung sicherzustellen, sollten **Fachexperten/innen** bereits zu Beginn des Projekts im interdisziplinären Planungsteam miteinbezogen werden. Diese können wichtige Hinweise geben und bei einer geeigneten und wirtschaftlichen Systemwahl unterstützen. **Beratungsangebote** (wie bspw. die Stadt Zürich anbietet) und eine **Übersicht mit Fachexperten/innen** im Bereich PV-Fassaden und Vertikalbegrünungen sollten für eine schnelle Kontaktaufnahme bereitgestellt werden.



### 10.7.3 Fehlende Erfahrungen und Unklarheiten bei der Ausführung, Fachkräftemangel, Engpass Lieferungen (Abhängigkeit von Importprodukten)

Da PV-Fassaden und Vertikalbegrünungen bisher nur vereinzelt umgesetzt wurden, **fehlen** auch bei der Umsetzung / Ausführung **Erfahrungen bei vielen Unternehmen**. Hinzu kommt der aktuelle **Fachkräftemangel**. Durch entsprechende **Aus- und Weiterbildungsangebote** kann das notwendige Wissen aufgebaut und Erfahrungen weitergegeben werden. Entsprechende Angebote sollten künftig durch die öffentliche Hand lanciert werden, worauf auf folgende Aspekte zu achten ist:

Insbesondere bei **Fassadenbegrünungen**, aber auch bei PV-Fassaden, ist nicht nur die **Planung und die Umsetzung** der Systeme entscheidend. Werden künftig vermehrt begrünte Systeme umgesetzt, dann wird insbesondere auch die Nachfrage nach **Pflege- und Instandhaltungen** ansteigen. Da eine gut gepflegte Vertikalbegrünung nicht nur für das Fassadenbild, sondern ebenso für die Sicherstellung des Brandschutzes relevant ist, sollte der künftige Bedarf an Fachkräften bereits heute analysiert und entsprechende Massnahmen eingeleitet werden.

Bei **PV-Modulen** besteht derzeit eine hohe Abhängigkeit von Importprodukten aus dem Ausland. Dies kann ein Hindernis darstellen, wenn PV-Systeme in Zukunft massiv ausgebaut werden sollen (Energieperspektive 2050+, Abbildung 133, von heute 2 TWh auf künftig 34 TWh). Um sich unabhängiger von Importen zu machen, ist es wichtig eigene Kompetenzen in diesem Bereich aufzubauen. Dies betrifft somit insbesondere auch den Bereich **Produktion / Herstellung**. Aufgrund der begrenzten Lebensdauer von technischen Systemen, sollten bereits heute Themen wie **Verwertbarkeit, Wieder- und Weiterverwendung sowie Aufwertung nach der Lebensdauer** mitberücksichtigt werden. Dies wird in Zukunft insbesondere im Hinblick auf Ressourcenknappheit und dadurch bedingte Preissteigerungen eine grosse Relevanz erhalten. Des Weiteren werden aber auch erweiterte Kompetenzen in der Planung sowie Fachkräfte zur Umsetzung der Systeme an Nachfrage gewinnen.

### 10.7.4 Brandschutz

Brandschutz ist im Fassadenbereich ein unabdingbares Thema, um die Sicherheit von Menschen zu garantieren. **Baubewilligungen und Genehmigungen durch die Gebäudeversicherer** werden ohne die Sicherstellung des Brandschutzes nicht erteilt. Dies ist mit zunehmender Gebäudehöhe sehr anspruchsvoll.

Bei **Fassadenbegrünungen** gibt es bereits verschiedene Konzepte, um den Brandschutz sicherzustellen. Dazu gehören u.a. Mindestabstände zwischen Bepflanzungen, horizontale Brandriegel oder auch eine streifenartige oder kassettenartige Bepflanzung von Fassaden. Weitere Infos zu diesem Thema sind im Kapitel 2.1.3 zu finden. Mit Blick auf den Brandschutz ist zudem eine regelmässige Pflege der Fassadenbegrünungen unabdingbar. Vertrocknete Pflanzenteile sowie ein Überwachsen der Brandriegel oder ein unkontrolliertes Pflanzenwachstum (Mindestabstände werden nicht mehr eingehalten) kann die Brandausbreitung begünstigen. Brandschutz ist ein relevantes Thema bei Fassadenbegrünungen und führte dazu, dass viele Begrünungsprojekte aufgrund der Brandschutzaufgaben nicht umgesetzt werden konnten.

Eine grössere Herausforderung mit Blick auf den Brandschutz stellen derzeit **PV-Fassaden bei Gebäuden mittlerer Höhe** (11 - 30 m) und insbesondere auch im **Hochhausbereich** (> 30 m) dar (Kapitel 2.2.2). Hier fehlen einerseits **klare Vorgaben der öffentlichen Hand**, andererseits gibt es im Moment noch keine validierten **Lösungsansätze / Produkte**, welche die Brandverhaltensgruppe RF1 bei PV-Modulen an Gebäuden über 30 m sicherstellen.

Im Mai 2023 wurde der Umgang mit dem Brandschutz bei PV-Fassaden in Frage gestellt, nachdem in einem Presseartikel publiziert wurde, dass die Zürcher Gebäudeversicherung PV-Anlagen an



Fassaden wegen der Brandgefahr vorerst nicht mehr zulässt<sup>54</sup>. Diese aktuelle Problematik trägt dazu bei, dass sich ein Misstrauen gegenüber solchen Systemen bei Bauherrschaften und Investoren/innen aber auch bei Planenden und weiteren Akteuren der Baubranche aufbaut.

Um schweizweit die Planungssicherheit für PV an Fassaden unter Berücksichtigung des Brand- und Personenschutzes sicherzustellen, wurde von Swissolar, Brandschutzbehörden, Planungsbüros und Bauherrschaften in Absprache mit der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF) folgendes Vorgehen festgelegt:

- «Ende September 2023 wurde von Swissolar in Abstimmung mit der VKF im Sinne einer Übergangslösung bis zum Vorliegen eines Stand-der-Technik-Papiers (STP) ein Leitfaden für die Planung von PV-Anlagen an Fassaden publiziert.<sup>55</sup> Dieser umfasst PV-Anlagen an Gebäuden mittlerer Höhe (11 – 30 m Gesamthöhe) und Hochhäusern (> 30 m Gesamthöhe).
- Für die Bewilligung von PV-Fassaden wird gemäss Brandschutzgesetz weiterhin ein Nachweisverfahren notwendig sein. Der Leitfaden wird aufzeigen, unter welchen Umständen auf Fassaden-Brandtests verzichtet werden kann. Zur Erarbeitung eines einheitlichen und von der VKF anerkannten STP braucht es Brandtests, die in akkreditierten Labors im Ausland gemacht werden müssen.
- Das STP wird von Swissolar gemeinsam mit PV- und Brandschutz-Experten erarbeitet und soll die Planung von PV-Fassaden weiter vereinfachen. Die Publikation des STP ist für Herbst 2024 geplant. Bis dahin hilft der Leitfaden als gemeinsame Übergangslösung<sup>56</sup>.
- Die Relevanz des Themas wurde somit bereits aufgegriffen und an Lösungen gearbeitet. Einheitliche Vorgaben und Konzepte zur Sicherstellung des Brandschutzes bei PV-Fassaden sowie bei Fassadenbegrünungen sind unabdingbar, um eine vermehrte Umsetzung solcher Systeme im Fassadenbereich voranzutreiben.

### 10.7.5 Denkmalschutz

Der **Denkmalschutz von Gebäuden** kann der Umsetzung von PV und Begrünungen an der Fassade entgegenstehen (Zielkonflikt). Denkmalgeschützte bzw. historische Gebäude machen **ca. 10 % des Bestands** in der Schweiz aus (101), wobei dieser Anteil in Städten höher als auf dem Land ist. Die nachfolgenden Ideen können Möglichkeiten bieten, um Begrünungen und PV auch bei denkmalgeschützten Gebäuden einzusetzen. In jedem Fall sollte eine gebäudespezifische Evaluation erfolgen.

Für Begrünungen könnten bspw. Bereiche am Gebäude gewählt werden, die das Gebäudebild nicht direkt beeinflussen. Das könnten u.a. **Innenhöfe** sein. Innenhöfe dienen in den meisten Fällen als Aufenthaltsbereiche, Begrünungen können hier somit nah am Menschen wirken und einen qualitativen Mehrwert leisten. Hinzu kommt, dass diese Bereiche meist windgeschützt sind, sodass die Wirkung von Begrünungen zur Hitzeminderung besonders wirksam sind (Kapitel 9.5). Neben Vertikalbegrünungen sollten zudem **andere Grünelemente** in Betracht gezogen werden, Bäume, Wiesen etc. sollten primär eingesetzt werden, wenn der entsprechende Platz zur Verfügung steht.

---

<sup>54</sup> Tages Anzeiger, 20.05.2023. Solaranlagen an Fassaden werden in Zürich nicht mehr toleriert.

<https://www.tagesanzeiger.ch/solaranlagen-an-fassaden-werden-in-zuerich-nicht-mehr-toleriert-384843863739>

<sup>55</sup> Projekt «PV Fassaden – Brandpräventionsphilosophie an Hochhäusern (höher als 30 m) – Holenacker 65+85»

<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51361>

<sup>56</sup> Swissolar, 20.07.2023. Photovoltaik-Fassaden: Swissolar und Brandschutzbehörden sorgen für Planungssicherheit.

<https://www.swissolar.ch/de/news/detail/photovoltaik-fassaden-swissolar-und-brandschutzbehoerden-sorgen-fuer-planungssicherheit-47198>



Der Einsatz von PV an denkmalgeschützten Gebäuden kann eine Herausforderung darstellen. Die Studie «Farbige PV-Module für denkmalgeschützte Zonen und Gebäude» (101) hat dieses Thema bei Dachanlagen betrachtet. Im Rahmen des Projekts wurde ein PV-Modul entwickelt, das die Eigenschaften der marktgängigen Hochleistungs-c-Si Technologie mit einem matten Oberflächenfinish und einem ziegelfarbenen Erscheinungsbild verknüpft. Diese PV-Lösung kann somit eine Alternative zu einem traditionellen Ziegeldach darstellen, um gleichzeitig das Erscheinungsbild zu erhalten. Entsprechende **Lösungen** sollten auch **für den Fassadenbereich** angedacht werden. Bei der **Entwicklung neuer PV-Produkte** sind dabei ästhetische, ökonomische und ökologische Anforderungen zu vereinen.

Die Stadt Zürich stellt finanzielle Mittel zur Verfügung, um Abklärungen bei Solaranlagen in denkmalgeschützten Gebäuden vorzunehmen<sup>57</sup>. Durch solche Ansätze können ebenso Anreize geschaffen werden, um das Thema etwas voranzutreiben und neue Möglichkeiten zu etablieren

### 10.7.6 Attraktivität, Ästhetik und fehlende Akzeptanz

Allgemein kann gesagt werden, dass **Begrünungen** i.d.R. eine **hohe gesellschaftliche Akzeptanz** haben. Grünbereiche sind ein wichtiger Aspekt für die Attraktivität und die Lebensqualität in Städten und haben auch einen positiven Einfluss auf das Wohlbefinden und die Gesundheit. Begrünungen bieten neue Gestaltungsmöglichkeiten im Fassadenbereich. Die Wirkung kann auf verschiedenen Ebenen wahrgenommen werden und sowohl den Stadtraum, das Gebäude sowie das Fassadenbild gestalten. Hinzu kommt das ständig wechselnde Fassadenbild, was durch des Pflanzenwachstum sowie der saisonalen Veränderung entsteht.

Die fehlende Akzeptanz hinsichtlich der Attraktivität und Ästhetik ist **vermehrt bei PV-Elementen** spürbar. Dabei gibt es bereits eine hohe Auswahl an Farben, Transparenzen und Mustern auf dem Markt. Einige PV-Module unterscheiden sich dabei kaum noch von anderen Materialien, wie bspw. Faserzementplatten. **Gute Beispiele**, wie bspw. das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt, welche die individuellen Gestaltungsmöglichkeiten aufzeigen und ästhetisch ansprechend sind, gilt es zusammenzutragen und zu kommunizieren. Dadurch kann die Motivation bei den beteiligten Akteuren erhöht und eine vermehrte Umsetzung gefördert werden.

### 10.7.7 Überblick Hemmnisse und Massnahmen zur Steigerung der Akzeptanz

Die nachfolgende Abbildung fasst die in diesem Kapitel behandelten Hemmnisse und Massnahmen bzw. Lösungsansätze zur Steigerung der Akzeptanz nochmals zusammen.



Abbildung 134: Übersicht Hemmnisse von begrünten und PV-Fassaden (gelbe Boxen) sowie mögliche Lösungsansätze (grüne Schrift).

<sup>57</sup> <https://www.stadt-zuerich.ch/energie/de/index/foerderung/alle-foerderprogramme/photovoltaik.html>



# 11 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse in Kürze zusammengefasst, die Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsempfehlungen für Planende, Bauherrschaften und Behörden formuliert.

## 11.1 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

### Ergebnisse Fassadenbegrünungen

Fassadenbegrünungen haben einen positiven Einfluss auf die Biodiversität, den Regenwasserrückhalt, die Luftqualität, den Lärm und auf die Attraktivität der Aussenräume. Die positive Wirkung auf diese Faktoren ist dabei am grössten in der Nähe zur Emissionsquelle respektive in der Nähe zum Menschen.

Fassadenbegrünungen können auch einen Einfluss auf den Innenraum (thermisch und energetisch) nehmen. Dieser Effekt ist vor allem bei einer schlecht gedämmten Gebäudehülle vorhanden, bei einem Neubau mit einer guten Dämmung ist die Auswirkung sehr gering. Wandgebundene Fassadenbegrünungen haben eine deutlich höhere Umweltauswirkung und deutlich höhere Lebenszykluskosten als die Referenzfassade. Auch die bodengebundene Fassadenbegrünung beeinflusst die Ökobilanz leicht negativ und führt zu leicht höheren Kosten. Jedoch sind beide Auswirkungen deutlich kleiner als beim wandgebundenen System.

Mit einer Fassadenbegrünung können die Oberflächentemperaturen der Fassaden im Vergleich zur Referenzfassade deutlich gesenkt werden. Auch die PET in der Umgebung wird gesenkt. Der Effekt ist dabei nahe der Fassade am grössten und nimmt mit zunehmendem Abstand zur Fassade ab. Bei direkter Sonneneinstrahlung ist der positive Effekt auf die PET am grössten, Wind mindert hingegen den Effekt.

### Ergebnisse PV-Fassaden

PV-Fassaden haben auf die untersuchten quantitativen Aspekte nur einen geringen Einfluss. Der Einfluss auf die Biodiversität wurde aufgrund einer möglichen Blendung und der Einfluss auf den Aspekt Lärm aufgrund der Schallreflexion der glatten Oberfläche im Vergleich zur Referenzfassade leicht negativ bewertet. Im urbanen Raum können nicht nur Fassadenbegrünungen, sondern auch PV-Fassaden als architektonisches Gestaltungsmittel zur Steigerung der Attraktivität von Aussenräumen eingesetzt werden.

Der grösste Mehrwert von PV-Fassaden liegt bei den untersuchten quantitativen Aspekten. Um eine möglichst hohe Stromproduktion über die PV-Systeme zu erreichen, ist eine Platzierung an Süd-, Ost- und Westfassaden an nicht verschatteten Flächen sinnvoll. Dadurch kann die Stromproduktion mehr als verdoppelt werden im Vergleich zu einer Anordnung an Nordfassaden und an verschatteten Flächen. Wird eine sinnvoll angelegte PV-Fassade mit einer PV-Dachanlage verglichen, kann mit der Dachanlage über das Jahr gesehen höhere Erträge produziert werden, jedoch liegen die Erträge einer Südfassade in den Wintermonaten über denjenigen einer Dachanlage. PV-Fassaden führen zwar bei der Erstellung zu hohen Umweltbelastungen, jedoch können sich diese im Betrieb bei einer sinnvollen Platzierung der Module amortisieren, wodurch über den Lebenszyklus eine positive Ökobilanz entstehen kann. Ebenso sind die Investitionskosten für den Bau der Anlage hoch, aber auch diese lassen sich mit einer guten Anordnung der Anlage amortisieren. Ebenso sollte auf einen hohen Wirkungsgrad der Module geachtet werden.

Die PV-Fassade weist eine höhere Oberflächentemperatur auf als eine Referenzfassade. Jedoch wird die PET in der Umgebung dadurch nicht negativ beeinflusst. Durch die Umwandlung eines Teils der einfallenden Solarstrahlung in Strom und durch die tiefe Albedo, also die geringe Reflexion der



Strahlung in die Umgebung, hat die PV-Fassade sogar eine leichte Senkung der PET in der Umgebung im Vergleich zur Referenzfassade zur Folge.

### **Kombination**

Aus den Ergebnissen lässt sich schliessen, dass Fassadenbegrünungen insbesondere bei den untersuchten qualitativen Aspekten Vorteile aufweisen und die PV-Fassaden bei den quantitativen Aspekten besser abschneiden. Fassadenbegrünungen haben zudem eine deutlich kühlende Wirkung auf die Umgebung, während diese bei PV-Fassaden nur sehr gering ist. Aufgrund des Einflusses auf das Mikroklima und aufgrund der positiven Wirkung bezüglich der qualitativen Aspekte sollten Fassadenbegrünungen nahe am Menschen angewandt werden, was häufig die unteren Geschosse eines Gebäudes betrifft. PV-Fassaden hingegen sollten an Flächen mit einem hohen Stromerzeugungspotenzial angeordnet werden. Dies ist in einer urbanen Umgebung oft an den höheren und dadurch unverschatteten Flächen an süd-, west-, oder ostorientierten Fassaden der Fall. Diese Unterschiede an den bevorzugten Flächen führen dazu, dass sich Begrünungen und PV-Anlagen an Fassaden an einem Gebäude oft gut kombinieren lassen und nur selten in Konkurrenz zueinander stehen.

### **Systemwahl**

Die Wahl der Systeme hängt von dem Standort und den Projektzielen ab, trotzdem lassen sich einige allgemeine Schlussfolgerungen festhalten. Bei Begrünungen ist ein bodengebundenes System einem wandgebundenen System, trotz der etwas kleineren Wirkung auf die meisten qualitativen Aspekten, aufgrund der besseren Ökobilanz und den viel tieferen Kosten vorzuziehen. In speziellen Situationen, wie zum Beispiel bei fehlendem Bodenanschluss, ist trotzdem ein wandgebundenes System notwendig. Bei PV-Modulen sollte ein möglichst hoher Stromertrag angestrebt werden, um die Umweltbelastungen und Kosten über den Lebenszyklus zu amortisieren. Dazu sind, neben einer sinnvollen Platzierung, Module mit einem hohen Wirkungsgrad zu wählen. Aus diesem Grund sind meist opake Module vorzuziehen. Jedoch ermöglichen transparente oder farbige Module eine vielfältigere Gestaltung und können dadurch die Akzeptanz erhöhen, was einen Einsatz anstelle von opaken Modulen in entsprechenden Situationen rechtfertigt. Für ein sinnvolles und ganzheitliches Konzept ist es zentral, bei der Planung das ganze Areal zu betrachten und nicht nur die Fassadenflächen.

## **11.2 Handlungsempfehlungen**

In Kapitel 10.7 wurden Hemmnisse und mögliche Massnahmen zur Steigerung der Akzeptanz von PV-Fassaden und Fassadenbegrünungen beschrieben. Basierend auf diesen Massnahmen wurden Handlungsempfehlungen für Planende, Bauherrschaften und Behörden festgelegt.

### **11.2.1 Handlungsempfehlungen für Planende**

Begrünungen und PV im Fassadenbereich stellen Planende vor neue Herausforderungen. **Fehlende Erfahrungen und Unsicherheiten** mit den Systemen führen häufig dazu, dass diese nicht umgesetzt werden. Dazu gehören u.a. Themen wie Brandschutz (insbesondere bei Hochhäusern, wo Fassadenbegrünungen im Rahmen von Standardkonzepten nicht möglich sind) oder auch die richtige Planung von Fassadenbegrünungen, wo u.a. Fragen zur Systemwahl, Pflanzenwahl, dem Wasserbedarf oder auch der benötigten Platzverhältnisse zur Umsetzung auftauchen. Hinzu kommt z.T. die fehlende Akzeptanz für die Systeme bei den Akteuren hinsichtlich der Ästhetik bei PV-Anlagen oder das weniger kontrollierbare Fassadenbild bei Begrünungen (obwohl es mittlerweile eine hohe Auswahl an Gestaltungsmöglichkeiten bei PV-Modulen gibt und das Fassadenbild einer Begrünung durch eine regelmässige Pflege durchaus gesteuert werden kann).

Um Planende im Umgang mit den neuen Herausforderungen zu unterstützen und Unsicherheiten zu reduzieren, wurden folgende Handlungsempfehlungen formuliert:



- **Standort** als zentraler Faktor: Standortspezifische Faktoren wie die Umgebung, der architektonische und freiräumliche Kontext und der Denkmalschutz sind zu berücksichtigen und die Fassadengestaltung darauf abzustimmen. Auch ist bei der Standortanalyse das Potential der Fassadenflächen bezüglich Exposition, Verschattungen, Lärmsituation, Klima und vorhandene Grünflächen zu evaluieren.
- **Projektziele** sind zu Beginn eines Projekts gemeinsam mit den Bauverantwortlichen klar zu definieren. Die Mehrwerte von Begrünung und PV mit Blick auf Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt sind zu diskutieren und ein gemeinsamer Entscheid über die Systemwahl zu treffen. Dabei sind ebenso Abwägungen zum Einsatz von Begrünungen und PV auf dem Dach, sowie in der Umgebung unabdingbar (Was macht an der Fassade / auf dem Dach / in der Umgebung Sinn?). Auch hier gilt es, Vor- und Nachteile zu betrachten und ein nachhaltiges Gesamtkonzept zu definieren (ökologisch, ökonomisch und sozial).
- **Fachleute** für Fassadenbegrünungen sowie PV-Fassaden sind bereits in den frühen Planungsphasen zu konsultieren und bei der Entscheidungsfindung einzubeziehen. So können wichtige Hinweise zu Effizienz, Statik, Brandschutz, Unterhalt- und Pflege, Platzbedarf und Zugänglichkeit wie auch Denkmalschutz eingeholt und die Realisierbarkeit der Systeme abklärt werden. Der frühe Einbezug von Fachexperten/innen ist zudem auch für die Kostenplanung sowie die Wirtschaftlichkeit ein wesentlicher Faktor.
- **Geschoss- und fassadenspezifische Planung:** PV-Module sind an unverschatteten süd-, ost- und westorientierten Flächen zu bevorzugen, während Begrünungen den grössten Mehrwert nahe am Menschen erzielen können.
- **Low-Tech und High-Tech:** Low-Tech-Lösungen sind oft langlebig und weisen eine tiefe Fehleranfälligkeit auf. Zudem sind sie im Unterhalt weniger anspruchsvoll und weniger materialintensiv. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen sind sie daher oft vorzuziehen. Jedoch können auch High-Tech-Komponenten vorteilhaft sein, zum Beispiel im Bereich der Automatisierung und beim Energiemanagement.
- **Kombination der Systeme:** Durch Kombinationen können die Vorteile beider Systeme genutzt werden und es kann von Synergien profitiert werden.

### Empfehlungen für Fassadenbegrünungen

Bei Fassadenbegrünungen bietet die Pflanzen- und Systemwahl vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten. So sind die Wuchsbreite, das jährliche Wachstum, der Ranktyp, die Farbe und Form wie auch die Belaubungsphase Aspekte, mit welchen verschiedenste Erscheinungsbilder erstellt werden können. Bei Fassadenbegrünungen ist eine regelmässige und fachgerechte Pflege und Wartung essenziell. Zentrale Punkte sind dabei der Rückschnitt der Pflanzen und ein allfälliges Aufbinden in die Kletterhilfe, gewisse Flächen vom Bewuchs freizuhalten (z.B. Fenster, Luftaustrittsöffnungen, Brandriegel), das Entfernen von abgestorbenen Pflanzenteilen, wie auch die Wartung der Wasser- und Nährstoffversorgungsanlage. Das Entfernen von abgestorbenen Pflanzenteilen und die Freihaltung der Brandriegel sind aufgrund des Brandschutzes notwendige Pflegemassnahmen. Brandschutzmassnahmen sind jedoch auch in der Planung vorzunehmen, neben der Substrat- und Pflanzenwahl geht es dabei um die Anordnung der Begrünung respektive deren Unterteilung in Brandabschnitte mit Brandriegeln oder Barrieren.

### Empfehlungen für PV-Fassaden

Inzwischen gibt es eine Vielzahl an PV-Modulen mit unterschiedlichen Farben, Mustern und Transparenzen. Diese Diversität ermöglicht verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten. Wichtig bei PV-Anlagen ist eine regelmässige Kontrolle der Komponenten wie auch bei Bedarf eine Reinigung der Module. Grundsätzlich werden PV-Fassaden aufgrund der vertikalen Ausrichtung jedoch weniger stark verschmutzt als horizontale Anlagen. Da PV-Module der Brandverhaltensgruppe RF2 zugeordnet werden, gibt es für Gebäude geringer Höhe keine besonderen Einschränkungen. Bei Gebäuden



mittlerer Höhe sind Massnahmen zu ergreifen, welche einen Brand auf zwei Geschosse über dem Brandherd beschränken würden. Um diese vertikale Feuerübertragung zu verhindern, ist die Fassade in Brandabschnitte zu unterteilen, was beispielsweise durch Metallprofile oder belüftete Hohlraumabschottungen erfolgen kann. Bei Hochhäusern (Höhe > 30 m) sind laut VKF RF1 Baustoffe zu verwenden. Da PV-Module nicht dieser Kategorie zugeordnet werden, ist mit einem Fachexperten ein individuelles Brandschutzkonzept auszuarbeiten.

### 11.2.2 Handlungsempfehlungen für Bauherrschaften

Begrünungen und PV werden derzeit im Fassadenbereich nur selten umgesetzt. Grund dafür sind einerseits Unsicherheiten mit den Systemen (u.a. bzgl. Brandschutz, Angst vor fehlender Kontrolle des Fassadenbilds bei Begrünungen). Andererseits sind die hohen anfänglichen Initialkosten sowie die zusätzlichen laufenden Kosten für die Pflege- und Instandhaltung, was insbesondere bei Fassadenbegrünungen ein zentraler Punkt ist, ein Hemmnis für die vermehrte Umsetzung der Systeme. In Kapitel 10.7 wurden wichtige Aspekte und Massnahmen im Umgang mit den verschiedenen Hemmnissen aufgezeigt, welche ebenso für Bauherrschaften eine gute Grundlage darstellen.

Es wird Bauherrschaften empfohlen, sich frühzeitig mit dem Nutzen der Systeme auseinanderzusetzen, um den Mehrwert der jeweiligen Systeme zu quantifizieren. So kann eine PV-Fassade finanziell langfristig sehr attraktiv sein. Auch ist bereits in einer frühen Phase ein Kontakt zu den Behörden empfehlenswert. Frühzeitige Abklärungen bezüglich dem Brand- und Denkmalschutz geben Sicherheit für die Planung. Zudem kann eine Zertifizierung mit Nachhaltigkeitslabeln angestrebt werden. Eine solche kann zu einem Imagegewinn führen. So ist zum Beispiel für eine gute Bewertung in der Minergie- oder SNBS-Zertifizierung eine Anwendung von Fassadensystemen relevant (siehe Kapitel 12.1).

Fassadenbegrünungen können nicht nur einen deutlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit in Zeiten des Klimawandels leisten, sondern auch die Attraktivität einer Immobilie deutlich steigern. Ein grüner Arbeits- und Wohnort zieht das Interesse von Arbeitnehmenden und Mietenden an. Die Resultate sind eine gute Vermietbarkeit und langfristige Mietverhältnisse. Begrünungen können zudem die Produktivität und Kreativität von Arbeitnehmenden steigern. Gleichzeitig haben Grünräume einen positiven Effekt auf die menschliche Gesundheit, was die Anzahl Krankheitstage reduzieren kann (bessere Erholung, Wohlbefinden durch Biophilic Design<sup>58</sup> / Bezug zur Natur, etc.).

Auch PV-Systeme sind angesichts des Klimawandels eine wichtige Massnahme und eine nachhaltige Investition. Die anfänglichen Kosten können sich bei einer gut geplanten Anlage über den Lebenszyklus amortisieren und langfristig sogar finanzielle Gewinne bringen (Kapitel 7.5). In Kapitel 10.1.3 wurde zudem aufgezeigt, dass eine Kombination von Begrünungen und PV an der Fassade ökonomische und ökologische Vorteile mit sich bringen kann und durchaus empfehlenswert ist.

Nachhaltige Investitionen können die Attraktivität einer Immobilie oder eines Unternehmens steigern (Image) und somit langfristig zu einer guten Vermietbarkeit oder mehr Aufträgen führen. Bauherrschaften gilt es die verschiedenen Vorteile aufzuzeigen und sie diesbezüglich zu sensibilisieren.

Die zu diesem Projekt erarbeitete Broschüre kann nicht nur für Planende, sondern auch für Bauherrschaften eine wichtige Grundlage zur Fassadengestaltung darstellen. Ökologische, ökonomische und auch soziale bzw. gesellschaftliche Vorteile werden aufgezeigt. Insbesondere die Good-Practice-Beispiele sollen Anreize schaffen und zu einer vermehrten Umsetzung der Systeme im Fassadenbereich motivieren. Aber auch die Checkliste für die Planung oder Empfehlungen für eine gezielte Anordnung von Begrünungen und PV an der Fassade beinhalten wichtige Aspekte, die Bauherrschaften bekannt sein sollten und von ihnen bei den Planenden einzufordern sind

---

<sup>58</sup> <https://blog.hslu.ch/majorobm/2023/05/08/biophilic-design-die-verbinding-von-natur-und-arbeitsplatz-vbsnh4/>





(Bestellerkompetenz). Denn dadurch kann die Rentabilität und der qualitative Mehrwert der Investition langfristig gesteigert werden.

### 11.2.3 Handlungsempfehlungen für Behörden

Zur Wahrung der Interessen der Allgemeinheit / Gesellschaft wurden ebenso Handlungsempfehlungen für Behörden formuliert. Behörden können durch verschiedene Massnahmen dazu beitragen, die Umsetzung von PV und Begrünungen im Fassadenbereich künftig voranzutreiben (Kapitel 10.7.7). Die nachfolgenden Empfehlungen sind dabei unterteilt in wirtschaftliche, rechtliche und sonstige Anreize (Tabelle 52).

Tabelle 52: Wirtschaftliche, rechtliche und sonstige Anreize zur Förderung der Umsetzung von Begrünungen und PV im Fassadenbereich

PV-Fassaden	
Wirtschaftlich (Kapitel 10.7.1)	<ul style="list-style-type: none"><li>• höhere Einspeisevergütungen in den Wintermonaten &amp; einheitliche Tarife</li><li>• Steueransätze für den durch die PV-Anlage erzeugten Strom vermeiden</li><li>• geringere Besteuerung des Gebäudes in Abhängigkeit vom Grad des Eigenverbrauchs</li><li>• Erhöhung der Fördergelder bei vertikalen Anlagen</li></ul>
Rechtlich (Kapitel 10.7.4)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vereinfachung von Baubewilligungen</li></ul>
Sonstige	<ul style="list-style-type: none"><li>• Erstellung von Richtlinien/Protokollen für die Planung, den Bau und die Wartung der Systeme</li><li>• Förderung / Erleichterung der inländischen Produktion von PV-Anlagen</li><li>• Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten, Kompetenzen aufbauen (Planung, Ausführung, Unterhalt, Herstellung und Wiederverwendung/-verwertung)</li></ul>
Fassadenbegrünungen	
Wirtschaftlich (Kapitel 10.7.1)	<ul style="list-style-type: none"><li>• mehr Förderprogramme anbieten, wobei sich die Höhe der Fördergelder dabei nicht nur an den anfänglichen, sondern auch an den laufenden Kosten orientieren sollte</li><li>• Senkung von Steuern, bspw. Wasserentnahmegebühren</li></ul>
Rechtlich	<ul style="list-style-type: none"><li>• gesetzliche Mindestsätze für den Grünflächenfaktor, wie in der Stadt Graz, einführen</li><li>• Standardisierung Brandschutzkonzept bei Hochhäusern</li></ul>
Sonstige	<ul style="list-style-type: none"><li>• Unterhalt der Fassadenbegrünungen durch Stadtgärtnereien sicherstellen</li><li>• Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten, Kompetenzen aufbauen (Planung, Ausführung, Pflege- und Instandhaltung)</li></ul>



## 12 Ausblick

Der Klimawandel wird in Zukunft vermehrte Hitzetage mit sich bringen, was die thermische Behaglichkeit in Innenräumen herausfordern wird. Der Bedarf an Klimakälte in Wohngebäuden wird voraussichtlich dem Heizwärmebedarf gleichkommen, aktive Kühlung kann in Schweizer Gebäuden erforderlich werden. Der Bedarf an Kälte wird vor allem während intensiver Sonneneinstrahlung auftreten, weshalb die Stromerzeugung durch PV-Anlagen zur Deckung des Kühlungsbedarfs geeignet ist. Klimageräte erzeugen zwar Kälte für Innenräume, leiten jedoch die entzogene Wärme nach draussen, was den städtischen Wärmeinseleffekt verstärken kann. Grünflächen spielen daher eine entscheidende Rolle in urbanen Gebieten, da sie zur Abkühlung der Außenluft beitragen.

Die Gebäudehülle bietet Möglichkeiten sowohl für PV-Anlagen als auch für Begrünungen. Studien zeigen, dass es Synergien zwischen beiden Systemen gibt. Die Verdunstungskühlung von Pflanzen kann die Effizienz von PV-Modulen erhöhen. Daher werden PV-Dachanlagen in Kombination mit Dachbegrünungen bereits häufig umgesetzt. Im Hinblick auf die Ziele der Energiestrategie 2050 wird es immer wichtiger, nicht nur Dachflächen, sondern auch Fassaden mit PV-Elementen zu versehen.

### 12.1 Die Rolle von Standards und Label

Schon immer waren Label Innovationstreiber. Minergie hat z.B. im Bereich Energie jeweils strengere Vorgaben als das Gesetz vorgelegt, die dann jeweils von Behörden als Vorgaben für die Förderung übernommen wurden. Das Gesetz hat auch nach und nach die Vorgaben von Minergie übernommen, woraufhin Minergie wieder strengere Vorgaben aufstellte usw.

Die Nutzung von Fassadenflächen für PV und Begrünungen wurden im September 2023 nun auch als Kriterium der revidierten Vorgaben im Rahmen der BFE-Labelfamilie aufgenommen. In der neusten Version (Version 2023.1) des Kriterienbeschreibs zum **SNBS-Hochbau** werden **Dach- und Fassadenbegrünungen** als **empfehlenswerte Massnahmen** genannt, welche sich vor allem bei dichten Überbauungen und versiegelten Flächen anbieten. Das neu eingeführte **Kriterium 143 «Mikroklima»** sieht in einer expliziten Messgrösse vor, dass Fassadenbereiche der ersten zwei Geschosse zu begrünen seien und diese Begrünung bodengebunden auszubilden sei. Somit ist für die Erreichung der Maximalpunktzahl im Kriterium eine Fassadenbegrünung womöglich notwendig. Zusätzlich sollen die Fassaden- und Dachbegrünungen nicht mit Trinkwasser gewässert werden und es muss ein Bewirtschaftungskonzept vorgelegt werden (4).

Unter den Neuerungen des **Minergie-Standards 2023**, welche auch im SNBS-Kriterienkatalog einfließen, ist zudem eine **bessere Ausnutzung des Solarenergiepotenzials auf Fassaden** vorgesehen. Konkret werden bei Neubauten nach Minergie 2023 eine vollständige Belegung der belegbaren Dachfläche gefordert, wie auch eine Energiebezugsfläche von 20 Wp/m<sup>2</sup>, was je nach Dachfläche und Gebäudehöhe auch eine Fassaden-PV-Anlage voraussetzt. Letztere Anforderungen werden jedoch erst eingeführt, sobald das «Stand-der-Technik-Papier» zu den Brandschutzvorschriften, angekündigt auf Herbst 2024, vorliegt (5).

Diese Entwicklungen sind erfreulich und sprechen dafür, dass künftig eine breitere Anwendung der Systeme zu erwarten ist.

### 12.2 Themenfelder für mögliche weiterführende Untersuchungen

Der aufgezeigte Hintergrund zeigt die Relevanz, das bisher ungenutzte Potenzial der Gebäudefassaden zur Nutzung als PV- oder Begrünungsfläche in Zukunft zu erschliessen. So liegt das Solarstrompotenzial der Hausfassaden der Schweiz bei ungefähr 17 TWh pro Jahr, während die gesamte Solarstromproduktion der Schweiz im Jahr 2017 knapp 1.7 TWh betrug (102). Das vorhandene Potenzial wäre also gross und zeigt die Relevanz von weiterführenden Forschungen in diesem Bereich.



Nachfolgende Vorschläge könnten Themen für solch weiterführende Untersuchungen sein.

- Der Kühleffekt von Gebäudebegrünungen in spezifischen Situationen sowie in unterschiedlichen Regionen und unterschiedlich urbanisierten Orten (Dorf bis Grosstadt)
- Fassadenbegrünungen im Zusammenhang mit Lüftungen --> Vorkühlung / Temperierung der dem Gebäude zugeführten Aussenluft
- Der Einfluss der Eigenschaften der Begrünung auf seine Ökosystemleistungen (Einfluss unterschiedliche Begrünungssysteme, verschiedener Pflanzenarten und der Bewässerung zum Beispiel auf die Kühlleistung oder die Biodiversität)
- Erhebung neuer Daten und einer grösseren Anzahl Daten für unterschiedliche Varianten von Gebäudebegrünungen (Im Moment fehlen Grundlagen diesbezüglich, um Fassadenbegrünungen und deren Potential gut abzubilden und zu quantifizieren)
- Technische Weiterentwicklung von wandgebundenen Fassadenbegrünungssystemen, um deren Kosten zu senken und dadurch die Verbreitung zu begünstigen.
- Optimierung von Wasserkreisläufen bei wandgebundenen Fassadenbegrünungen
- Neue Lösungen im Unterhalt und der Pflege (Kostensenkung) und Verbreiten des vorhandenen Know-how.
- Bei PV-Fassaden wie auch den begrünten Fassaden fehlen Vorgaben zum Brandschutz bei mittleren Gebäuden und Hochhäusern. Vertiefte Brandschutzkenntnisse für diese Systeme sind notwendig, um bessere Brandschutzvorgaben zu erstellen. Mit dem Leitfaden von Swissolar wurde eine Übergangslösung geschaffen.<sup>59</sup>
- Die Anwendung von PV-Elemente und Begrünungen bei Gebäuden unter Denkmalschutz.
- Ausrichtung der Gebäude bei der Planung nach den Bedürfnissen einer Fassadenbegrünung oder PV-Fassade
- Kombinationen von PV-Fassaden und Begrünungen, zum Beispiel auch in Form von direkt kombinierten Systemen (bspw. transparente PV-Module vor einer Begrünung), welche sich saisonal oder räumlich ergänzen.
- Ansätze der Kreislaufwirtschaft bei PV-Anlagen (spätere Wiederverwendung / Weiterverwertung der Module nach Ende der Lebensdauer zum Schutz von Ressourcen etc.)
- Grünflächenanteil in Städten – Wie viel Grün braucht es? Entwicklung eines Grünflächenfaktors für bestimmte Städte (bestehendes Beispiel: Stadt Graz in Österreich)

---

<sup>59</sup> Projekt «PV Fassaden – Brandpräventionsphilosophie an Hochhäusern (höher als 30 m) – Holenacker 65+85»  
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51361>



## 13 Literaturverzeichnis

1. Pfoser, N. Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung. s.l. : Technische Universität Darmstadt, 2016.
2. Jakob, Martin und Stettler, Cornelia. Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich. Methodische Fragen. Zwischenbericht vom 26. Juli 2023 . Bern : BFE, 2023.
3. G. Settembrini, S. Domingo-Irigoyen, T. Heim, D. Jurt, A. Zakovorotnyi, A. Seerig, G. Zweifel und U. P. Menti. ClimaBau – Planen angesichts des Klimawandels: Energiebedarf und Behaglichkeit heutiger Wohnbauten bis ins Jahr 2100. s.l. : Bundesamt für Energie (BFE No. SI/501318-01), 2017.
4. Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz NNBS. Kriterienbeschrieb SNBS-Hochbau - Nutzungsarten Wohnen, Verwaltung, Bildungsbauten, Gewerbenutzung im Erdgeschoss. Zürich : s.n., 2023.
5. Minergie. Übersicht Neuerungen Minergie 2023, Neubau. Basel : s.n., 2023.
6. (NCCS), National Centre for Climate Services. CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz. Zürich : s.n., 2018.
7. Hui, S. C. M. und Chan, S. C. Integration of green roof and solar photovoltaic systems. Proceedings of Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability. 2011.
8. Lamnatou, C. und Chemisana, D. A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 43, 2015.
9. Köhler, M., Wiartalla, W. und Feige, R. Interaction between PV-systems and extensive green roofs. Proceedings of the 5. annual international greening rooftops for sustainable communities conference. 2007.
10. Shafique, M., Luo, X. und Zuo, J. Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. Solar Energy. 202, 2020.
11. J. Stampfli, G. Settembrini, S. Domingo, B. Schrader, S. Büttner. Bereit für den Klimawandel? Handlungsempfehlungen für Bauherrschaften und Planende. s.l. : Bundesamt für Energie BFE, 2021.
12. S. Domingo, G. Settembrini, O. Steiger, S. Büttner. Klimageräte im Kontext des Klimawandels. s.l. : Bundesamt für Energie (BFE), 2020.
13. Koschenz, Markus, et al. ResCool: Klimaanpassung von Neu-, Umund bestehenden Wohnbauten – effiziente Kühlkonzepte. Horw : Hochschule Luzern, Institut für Gebäudetechnik und Energie, 2021.
14. Zakovorotnyi, A. et al. ROG EK - Robustheitsbewertung von integrierten gebäudetechnischen Kühlkonzepten in Verwaltungsbauten hinsichtlich Klima und Nutzervariabilität. Bern : Bundesamt für Energie (BFE), 2017.
15. S. Domingo, G. Settembrini, M. Koschenz, F. Sidler. SIA Klimadaten der Zukunft für Planende. s.l. : Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2021.
16. SIA. SIA Merkblatt 2028. Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik. Zürich : Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2010.
17. D. Bionda, C. Derungs, M. Niffeler, C. Kempf, C. Kraft, U. P. Menti, M. Müller, L. Nilles, G. Settembrini, F. Städtler, T. Steiner. ITC Begrünung und Stadtklima. 2020.
18. M. Koschenz, S. Ahsaine, D. Bionda, R. Marek, U. P. Menti, M. Niffeler, A. Seifert, O. Steiger, T. von der Brück, A. Zakovorotnyi. ITC Quartierklima Modellierung. 2022.
19. A. Luible, K. Arnold, M. Büeler, J. Commerell, L. O. Grobe, K. Rubin, S. Villiger, T. Wüest. Verschattungswirkung bewachsener Fassaden. s.l. : Bundesamt für Energie (BFE), 2023.
20. Arnold, Kilian und Luible, Andreas. Käfte in pflanzenbewachsenen Seilfassaden und -strukturen - Experimentelle Untersuchung und Entwicklung eines Lastmodells und Bemessungskonzepts. Hochschule Luzern, Kompetenzzentrum Gebäudehülle und Ingenieurbau : Innosuisse – Schweizerische Agentur für Innovationsförderung, 2021.
21. Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle nachhaltiges Bauen. NNBS, Gute Beispiele - Fassadenbegrünung Stadtgärtnerei Zürich. [Online] 2017. [Zitat vom: 12. 03 2022.] <https://www.nnbs.ch/-/fassadenbegrunung-stadtgaertnerei->



zurich?inheritRedirect=true&redirect=https%3A%2F%2Fwww.nnbs.ch%2Fhome%3Fp\_p\_id%3Dcom\_liferay\_portal\_search\_web\_portlet\_SearchPortlet%26p\_p\_lifecycle%3D0%26p\_p\_state%3Dmaximized%26p\_p\_mode%3Dview%26\_co.

22. Markus Fierz, Regula Luder. Fassadenbegrünung - Machbarkeitsstudie Begrünung Südfassade Hochhaus Triemli Zürich. Zürich : Stadt Zürich, Amt für Hochbau (AHB), 2020.
23. R. Dopheide, J. Hollands, B. Knoll, A. Korjenic, M. Mitterböck, U. Pitha, A. Renkin, F. Schiefermair, R. Stangl, P. Skolek, I. Süß, O. Weiß. greening UP! Nachhaltige Grünpflege, Wartung, Instandhaltung von Vertikalbegrünungen inklusive rechtlicher Aspekte. Wien : Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 22/2021.
24. Elke Meinken, Martin Jauch, Irena Krummradt, Heinz-Josef Schmitz. Optimierung der Evaporations- und Kühlleistung extensiver Dachbegrünungen durch gezielte Nutzung von Grauwasser. s.l. : Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, 2015.
25. Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF. VKF-Brandschutzvorschriften 2015. [Online] 2015. [Zitat vom: 14. 09 2023.] <https://www.bsvoonline.ch/de/vorschriften/>.
26. Dieter Werner, Georg Pommer, Kurt Danzinger, Stephan Pomper. Brandverhalten von Grünfassaden in großmaßstäblichen Versuchen. s.l. : Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien, 2018.
27. Bachmeier, Peter. Brandschutz großflächig begrünter Fassaden - Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes. München : Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz, 2020.
28. VKF, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen. Brandschutzmerkblatt Gebäudebegrünungen. Bern : VKF, 2024.
29. Hostettler, Thomas und Hekler, Andreas. Statistik Sonnenenergie. Referenzjahr 2022. Bern : Bundesamt für Energie BFE, 2023.
30. Martin A. Green, Ewan D. Dunlop, Jochen Hohl-Ebinger, Masahiro Yoshita, Nikos Kopidakis, Xiaojing Hao. Solar cell efficiency tables (version 59). Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2022, Volume 30, Issue 1.
31. Best Research-Cell Efficiency Chart. [Online] NREL - National Renewable Energy Laboratory, 2022. [Zitat vom: 15. 12 2022.] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
32. Sehati, Parisa, et al. Aesthetically pleasing PV modules for the Built Environment. Växjö : RISE Research Institutes of Sweden, 2019. 978-91-88907-30-1.
33. VKF, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen. Brandschutzmerkblatt Solaranlagen. Bern : s.n., 2015.
34. Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF). Brandschutznorm 1-15. Bern : VKF, 2015.
35. —. Brandschutzrichtlinie 14-15, «Verwendung von Baustoffen». Bern : VKF, 2017.
36. Swisssolar. Übergangsdokument Brandschutz für PV-Anlagen an Fassaden. 2023.
37. SIA 183.051+A1, SN EN 13501-1+A1:2009 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten. Zürich : Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein, 2009.
38. Update: The Green-roof integrated PV canopy study at Bronx Design and Construction Academy. Perez, M. J. R., et al. s.l. : American Solar Energy Society, 2021.
39. Chemisana, D. und Lamnatou, C. Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. Applied Energy. 2014, Bd. Volume 119.
40. Schindler, B. Y., et al. Green roof and photovoltaic panel integration: Effects on plant and arthropod diversity and electricity production. Journal of Environmental Management. 2018, Bd. Volume 225.
41. Cavadini, G. B. und Cook, L. M. Green and cool roof choices integrated into rooftop solar energy modelling. Applied Energy . 2021, Bd. Volume 296.



42. Performance analysis of PV green roof systems. Baumann, T., et al. Munich : 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2016), 2016.
43. Bucher, C. Photovoltaikanlagen – Planung, Installation, Betrieb. Zürich : Faktor Verlag, 2021. 978-3-905711-62-2.
44. Penaranda-Moren, M. S. und Korjenic, A. Green buffer space influences on the temperature of photovoltaic modules: Multifunctional system: Building greening and photovoltaic. Energy and Buildings. 2017, Bd. Volume 146.
45. Architektenverein, Schweizerischer Ingenieur- und. Anwendungsempfehlungen zu den stündlichen Klimadatensätzen für die Zukunft in Ergänzung zu SIA 2028. [Online] 2022. [https://www.sia.ch/fileadmin/Klimaszenarien\\_DT\\_03.pdf](https://www.sia.ch/fileadmin/Klimaszenarien_DT_03.pdf).
46. Energieschweiz. Simulation von Energiesystemen mit dem Tachion-Simulation-Framework. Benutzerdokumentation, Oktober 2022. [Online] [Zitat vom: 24. Mai 2023.] [https://tachionframework.com/603/client21/res/603/docs/Usermanual\\_de.pdf](https://tachionframework.com/603/client21/res/603/docs/Usermanual_de.pdf).
47. Giuseppe Barbiero, Rita Berto, Alice Venturella, Nicola Maculan. Bracing Biophilia: When biophilic design promotes pupil's attentional performance, perceived restorativeness and affiliation with Nature. s.l. : Springer, 2021.
48. SIA. SIA Merkblatt 2032. Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden. Zürich : Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, 2020.
49. —. Norm SIA 480. Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau. Zürich : Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2016.
50. Meins, Erika, et al. Nachhaltigkeit und Wertermittlung von Immobilien : Leitfaden für Deutschland, Österreich und die Schweiz. Zürich : CCRS, Center for Corporate Responsibility and Sustainability., 2012.
51. Dennis Melzer, Susanne Herfort. Der Biotopflächenfaktor 2020 - Abschluss- und Gesamtbericht zweier Studien zur Anpassung des Berliner Planungsinstrumentes an den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik. Berlin : Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, 2020.
52. SIA. Norm SIA 180. Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. Zürich : Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, 2014.
53. —. Norm SIA 382/2. Klimatisierte Gebäude - Leistungs- und Energiebedarf. Zürich : Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, 2011.
54. Trachsel Geissmann, E. et al. IVECT – Auswirkungen der Begrünung auf die Energiebilanz und den thermischen Komfort von Gebäuden und Quartieren. In Bearbeitung.
55. KBOB, eco-bau und IPB. Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022. [Online] 2022. [Zitat vom: 22. Mai 2023.] [https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten\\_baubereich.html](https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html).
56. Institut Bauen und Umwelt e.V. IBU.data. Ökobilanzbasierten Daten aus den Umwelt-Produktdeklarationen (EPDs- Environmental Product Declarations) von Bauprodukten. [Online] Institut Bauen und Umwelt e.V., 2020. [Zitat vom: 24. März 2023.] <https://ibu-epd.com/ibu-data-start/>.
57. Jungbluth, N. Vergleich der Umweltbelastungen von Hahnenwsser und Mineralwasser. [Online] 2006. [https://www.oberaegeri.ch/\\_docn/121825/Bericht%20Hahnenwasser%20und%20Mineralwasser.pdf](https://www.oberaegeri.ch/_docn/121825/Bericht%20Hahnenwasser%20und%20Mineralwasser.pdf).
58. Frehner, A., Kröhnert, H. und Stucki, M. Umweltauswirkungen von Fassadenbegrünungen - Ökobilanz der Fassadenbegrünung am Triemli-Turm in Zürich. Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil : Im Auftrag der Stadt Zürich, 2022.
59. SIA. SIA D 0199. Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau Leitfaden zur Anwendung der Norm SIA 480. Zürich : Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2004.
60. CRB . LCC-Handbuch. Instandhaltung und Instandsetzung von Bauwerken. Zürich : CRB Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung, 2012.



61. CRB. EAK Kostenkennwerte Elementarten Katalog. Zürich : CRB Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung, 2011.
62. EnergieSchweiz. Solarrechner: Kosten- und Nutzenrechner für Ihre Solaranlage. [Online] EnergieSchweiz. [Zitat vom: 31. März 2023.] <https://www.energieschweiz.ch/tools/solarrechner/>.
63. raderschallpartner ag. 1065 - Stadtgärtnerei Zürich Fassadenbegrünung. Schlussbericht. Meilen : s.n., 2019.
64. Renken, Christian, et al. Integrierte Solaranlagen. Handlungsanleitung zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung. Ittigen : EnergieSchweiz, 2020.
65. Hollands, Jutta und Korjenic, Azra. Ansätze zur ökonomischen Bewertung vertikaler Begrünungssysteme. Bauphysik 41 (2019), Heft 1. Berlin : Ernst & Sohn - Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co, 2019.
66. Pfoser, Nicole. Vertikale Begrünung. Stuttgart : Eugen Ulmer, 2018.
67. VSE. Wege in die neue Stromzukunft. Aarau : Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen , 2012.
68. OECD/IEA. World Energy Outlook 2018. s.l. : International Energy Agency, 2018.
69. Ott, Walter und von Grünigen, Stefan. Wirtschaftlichkeit von Neubau- und Erneuerungsinvestitionen in der 2000-Watt-Gesellschaft. Zürich : s.n., 2011.
70. Koschenz, M und Renggli, M. Anwender-Handbuch Quartierklimamodellierung. Unveröffentlicht, 2023.
71. Berliner Leitfaden - Lärmschutz in der verbindlichen Bauleitplanung 2017. Berlin : Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, 2017.
72. Inès Neuhaus, Fabian Neuhaus. Akustisch gute Architektur für Strassenräume. s.l. : Kanton Zürich, 2016.
73. Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau. Absorptionsgrad verschiedener Materialien und Oberflächen -  $\alpha$  (-). [Online] [Zitat vom: 27. 07 2022.] <https://www.schweizer-fn.de/stoff/akustik/absorptionsfaktoren.php>.
74. Nyuk Hien Wong, Alex Yong, Kwang Tan, Puay Yok Tan, Kelly Chiang, Ngian Chung Wong. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. 2010.
75. Thomas Claßen, Maxie Bunz. Einfluss von Naturräumen auf die Gesundheit – Evidenzlage und Konsequenzen für Wissenschaft und Praxis. s.l. : Bundesgesundheitsblatt, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00103-018-2744-9>.
76. Künzle, Thomas. Karten von Jahreswerten der Luftbelastung in der Schweiz - Datengrundlagen, Berechnungsverfahren und Resultate bis zum Jahr 2020. Bern : Bundesamt für Umwelt BAFU, 2021.
77. Jörg Dettmar, Nicole Pfoser, Sandra Sieber. Gutachten Fassadenbegrünung. s.l. : Technische Universität Darmstadt, 2016.
78. Maria Manso, Ines Teotonio, Cristina Matos Silva, Carlos Oliveira Cruz. Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. Portugal : s.n., 2021.
79. Schröder, F.-G. Automatisierte, biologische, senkrechte, städtische Fassadenbegrünung mit dekorativen funktionellen Parametern. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden : Abschlussbericht zum Kooperationsprojekt im Rahmen von PRO INNO II., 2009.
80. C. Kappis, O. Gorbachevskaya, R. Valbuena, H. Schreiter. Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen. 2007.
81. K. Perini, E. Roccotiello. Vertical Greening Systems for Pollutants Reduction. in Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability. 2018.
82. Jun Yang, Qian Yu, Peng Gong. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. 2008.
83. Thönnessen, M. Staubfilterung durch Gehölzblätter. Beispiele aus Düsseldorf, Essen und Köln. 2007.



84. BAFU, BLW, Swiss Biodiversity Forum, BirdLife Schweiz, pro nature, Schweizer Bauernverband, WWF, Zoo Schweiz. Biodiversität – Definition und Bedeutung (Faktenblatt 1). [Online] 2010. [Zitat vom: 29. 07 2022.] <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/17883.pdf>.
85. Z. Liu, C. He, J. Wu. The Relationship between Habitat Loss and Fragmentation during Urbanization: An Empirical Evaluation from 16 World Cities. 2016.
86. Willy Geiger, Thomas Göttin, Evelyne Marendaz Guignet, Christine Hofmann, Florian Wild. Strategie Biodiversität Schweiz. s.l. : BAFU, 2012.
87. Chiquet, C. The Animal Biodiversity of green walls in the urban environment. s.l. : Staffordshire University, 2014.
88. Schlegel, Jürg. Biodiversität und Solarpanels auf der grünen Wiese: Geht das? energiea plus, Magazin des Bundesamtes für Energie BFE. 27. Januar 2022.
89. Stadt Zürich. Fakten zur räumlichen Stadtentwicklung - Arbeitsgrundlage für die räumliche Planung. 2013.
90. MeteoSchweiz, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. Typische Wetterlagen im Alpenraum. [https://www.meteoswiss.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publicationen/Publikationen/doc/Web\\_Wetterlagen\\_DE\\_low.pdf](https://www.meteoswiss.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publicationen/Publikationen/doc/Web_Wetterlagen_DE_low.pdf).
91. Stadt Zürich, Amt für Hochbauten. Bauen an der Stadt - Architektur im Amt für Städtebau. Zürich : s.n., 2012.
92. Daniel Baumgartner, Klemens Rosin. Bevölkerungsszenarien 2022 bis 2040. s.l. : Stadt Zürich Statistik, 2022.
93. Gander, Marlis. Aussenraumqualitäten, Aussenraumrealitäten - Gestaltungsprinzipien für Planung und Architektur. s.l. : vdf Hochschulverlag, 2015.
94. Frischknecht, Rolf. KBOB Empfehlung 2009/1:2022: Informationsveranstaltung der Plattform Ökobilanzdaten im Baubereich. 2022.
95. Padey, P., et al. EcoDynBat – Final Report. Dynamic Life Cycle Assessment of Buildings. Bern : BFE, Bundesamt für Energie, 2020.
96. KBOB, eco-bau und IPB. Liste Oekobilanzdaten im Baubereich 2009-1-2016. [Online] 2016. [Zitat vom: 22. Mai 2023.] [https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten\\_baubereich.html](https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html).
97. Pathé, Julien. Impact Environnemental - Installation d'arbres sur les balcons: Tour des cèdres. Montreux, 2023.
98. Lone Severin, Jacqueline Parish. Hitzeminderung Stadt Zürich. Anlass der Vereinigung Zürich-West / Kulturmeile vom 26. Oktober 2020. [Online] <https://docplayer.org/212795415-Hitzeminderung-stadt-zuerich.html>.
99. Kanton Zürich. Massnahmen gegen Hitze. [Online] Kanton Zürich, 2023. [Zitat vom: 19. 09 2023.] <https://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/klima/hitze-im-siedlungsraum/massnahmen-gegen-hitze.html#1106032702>.
100. Lionel Bloch, Yannick Sauter, Florent Jacqmin. Photovoltaikmarkt: Preisbeobachtungsstudie 2022. s.l. : energieschweiz, 2023.
101. Patrick Heinstein, Diego Fischer, Laure-Emmanuelle Perret-Aebi, Christoph Ballif, Karin Söderström. Farbige PV-Module für denkmalgeschützte Zonen und Gebäude. s.l. : Bundesamt für Energie (BFE), 2018.
102. BFE, Bundesamt für Energie. Schweizer Hausdächer und -fassaden könnten jährlich 67 TWh Solarstrom produzieren. [Online] Bundesamt für Energie BFE, 15. 04 2019. [Zitat vom: 15. 09 2023.] <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-74641.html>.
103. SIA. SIA Merkblatt 2024 Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik. Zürich : Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, 2021.





104. Ramseier, L. und Frischknecht, R. Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen. Uster : Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB, 2022.
105. Koschenz, M und Zakovorotnyi, A. Modellierungswerkzeug zur Quantifizierung und Optimierung des Quartierklimas in einer sehr frühen Planungsphase. In Bearbeitung.
106. Miriam Brune, Steffen Bender, Markus Groth. Gebäudebegrünung und Klimawandel - Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. s.l. : GERICS Climate Service Center Germany, 2017.
107. SIA. SIA Merkblatt 2024. Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik. Zürich : Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2015.
108. Magistrat der Stadt Wien, MA 19 - Architektur und Stadtgestaltung. Fassaden- und Vertikalbegrünung - Internationale & nationale Best-Practice-Beispiele. 2019.
109. J. Feldmann, M. Möser, R. Volz. Umweltbelastung durch Verkehrsgeräusche sowie Aspekte der Schallausbreitung und Schallabsorption in Straßenschluchten. s.l. : Institut f. Technische Akustik, Technische Universität Berlin, 2000.
110. Köhler, M. Historie und positive Wirkung von Fassadenbegrünungen, Tagungsmappe 1. FBB-Fassadenbegrünungssymposium 2008. Remscheid : s.n., 2008.
111. E. Buchta, K. Hirsch, C. Buchta. Lärmindernde Wirkung von Bewuchs in Straßenschluchten und Höfen. s.l. : Bonn, 1984.
112. David Lunain, David Ecotiere, Benoit Gauvreau. In-situ evaluation of the acoustic efficiency of a green wall in urban area. 2016.
113. R. Djedjig, E. Bozonnet, R. Belarbi. Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. 2015.
114. Gabriel Pérez, Julià Coma, Camila Barreneche, Alvaro de Gracia, Miguel Urrestarazu, Silvia Burés, Luisa F. Cabeza. Acoustic insulation capacity of Vertical Greenery Systems for buildings. 2016.
115. A. M. Lacasta, A. Penaranda, I. R. Cantalapiedra, C. Auguet, S. Bures, M. Urrestarazu. Acoustic evaluation of modular greenery noise barriers. 2016.
116. Knut Veisten, Yuliya Smyrnova, Ronny Klæboe, Maarten Hornikx, Marjan Mosslemi, Jian Kang. Valuation of Green Walls and Green Roofs as Soundscape Measures: Including Monetised Amenity Values Together with Noise-attenuation Values in a Cost-benefit Analysis of a Green Wall Affecting Courtyards. 2012.
117. Timothy Van Renterghem, Maarten Hornikx, Jens Forssen, Dick Botteldooren. The potential of building envelope greening to achieve quietness. 2012.
118. A. Korjenic, D. Tudiwer, M. S. Penaranda Moren, J. Hollands, T. Salonen, M. Mitterböck, U. Pitha, I. Zluwa, R. Stangl, J. Kräftner, K. Gump, G. Becker. Hocheffiziente Fassaden- und Dachbegrünung mit Photovoltaik-Kombination. Wien : Bundesministerium Verkehr, Innovation und Technologie, 2019.
119. Kirill V Horoshenkov, Amir Khan, Hadj Benkreira. Acoustic properties of low growing plants. 2013.
120. Hannah, Lindsay. Ground, Terrain and Structure Effects on Sound Propagation. Wellington : s.n., 2006.
121. V. M. Jayasooriya, A. W. M. Ng, S. Muthukumaran, B. J. C. Perera. Green infrastructure practices for improvement of urban air quality. Melbourne, Australia : s.n., 2017.
122. B. Deutsch, H. Whitlow, M. Sullivan, A. Savineau. Re-greening Washington DC : a green roof vision based on environmental benefits for air quality and stormwater management. Kanada : s.n., 2005.
123. Beth Anne Currie, Brad Bass. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. Kanada : s.n., 2008.
124. Baumann, T., et al. Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs. Solar Energy. 190, 2019.



125. A. Tiwary, K. Godsmark, J. Smethurst. Field evaluation of precipitation interception potential of green façades. UK : s.n., 2018.
126. Noder, Julia. Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht. s.l. : Technische Universität München, 2019.
127. Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft. Handbuch Grüne Wände. 2020.
128. Ott, Walter und von Grünigen, Stefan. Wirtschaftlichkeit von Neubau- und Erneuerungsinvestitionen. Zürich : Amt für Hochbauten. Fachstelle nachhaltiges Bauen, 2011.
129. Stadt Zürich, Amt für Hochbauten. Werkzeug "Variantenvergleich Energiesysteme". Energie- und Gebäudetechnik. Planungshilfen und Werkzeuge. [Online] 23. März 2023. [Zitat vom: 4. April 2023.] <https://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/beratung/energie-gebuedetechnik/planungshilfen-werkzeuge.html> .
130. Moro, Niccolò, et al. Das Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern Eine Analyse anhand von Sonnendach.ch. s.l. : ZHAW Wädenswil, 2021.
131. SIA. Merkblatt 2032 "Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden". Zürich : Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2020.
132. —. SIA 183.051, SN EN 13501-1:2018 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten. Zürich : Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2018.
133. Interaction between PV-systems and extensive green roofs. Kohler, M., Feige, R. und Wiartalla, W. Minneapolis : Fifth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, 2007.
134. Ramseier, , L. und Frischknecht, R. Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen. Uster : KBOB, 2022.
135. Patrick Heinstejn, Diego Fischer, Laure-Emmanuelle Perret-Aebi, Christoph Ballif, Karin Söderström. Farbige PV-Module für denkmalgeschützte Zonen und Gebäude. s.l. : Bundesamt für Energie , 2018.
136. Pauli, G. Integrierte Photovoltaik Ratgeber für Bauherrschaften. Ittigen : EnergieSchweiz, 2021.
137. SIA. SIA Merkblatt 2062. Photovoltaik auf und an Gebäuden. Zürich : Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein, 2023.
138. Frehner, Alena, Kröhnert, Hanna und Stucki, Matthias. Umweltauswirkungen von Fassadenbegrünungen - Ökobilanz der Fassadenbegrünung am Triemli-Turm in Zürich. Wädenswil : Im Auftrag der Stadt Zürich, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, 2022.
139. NCCS und Services, National Centre for Climate. Temperatur. [Online] 2023. [Zitat vom: 01. 12 2023.] <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/zahlen-und-fakten/temperatur.html>.
140. EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE. Winterstrom für die Schweiz. Bern : s.n., 2020.



## 14 Anhang

### 14.1 Datengrundlagen für die Simulationen

In diesem Kapitel sind die Rahmenbedingungen und die getroffenen Annahmen beschrieben, auf denen die Simulationen basieren. Diese Parameter haben einen signifikanten Einfluss auf die Resultate, was bei der Analyse der Simulationsergebnisse entsprechend berücksichtigt wurde.

Bei den Referenzgebäuden handelt es sich um fiktive Gebäude mit rechteckigem Grundriss, ohne Vorsprünge oder Verschattungselemente. Diese Annahmen sollen die Interpretation der Ergebnisse vereinfachen.

Bei dem Referenzgebäude «Wohnen Altbau» handelt es sich um ein vierstöckiges Gebäude (EG + 3. OG) mit einem Fensteranteil von 25 %. Bei dem Referenzgebäude «Wohnen sanierter Altbau» handelt es sich um dasselbe Gebäude wie beim Referenzgebäude «Wohnen Altbau» aber mit sanierter Gebäudehülle. Bei dem Referenzgebäude «Wohnen Neubau» handelt es sich um ein achtstöckiges Gebäude (EG + 7. OG) mit einem Fensteranteil von 50 %. Abbildung 135 zeigt den Grundriss der Referenzgebäude.



Abbildung 135: Grundrisse der Referenzgebäude «Wohnen Neubau» (links) sowie «Wohnen Altbau» und «Wohnen sanierter Altbau» (rechts). Die blaue Kontur markiert die Wohnung und die blaue Schattierung die Innenräume (mit unterschiedlichen Ausrichtungen), auf welche sich die Ergebnisse beziehen.

Um das Potential von Fassadenbegrünungen und PV-Systemen in Abhängigkeit der Orientierung und der Geschossigkeit abschätzen zu können, werden in einem ersten Schritt Simulationen auf Ebene Orientierung / Geschoss analysiert. In einem zweiten Schritt wird basierend auf diesen Erkenntnissen das Potential einer Kombination der beiden Fassadensysteme auf Ebene Gebäude analysiert.



## 14.1.1 Konstruktionen

### 14.1.1.1. «Wohnen Neubau»

#### Wand gegen aussen

Tabelle 53: Baustoffkennwerte der Wand gegen aussen.

Konstruktionsaufbau (von innen nach aussen)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Innenputz	0.015	0.700	1400	1000
2. Modulbackstein	0.150	0.440	1100	1000
3. Glaswolle	0.170	0.032	29	1030
4. Winddichtung	0.000	-	60 g/m <sup>2</sup>	-
5. Luftschicht (Hinterlüftung)	0.050	-	-	-
6. Faserzementplatte / PV-Modul	0.008 / 0.008	-	15.7 / 17.7	-
Summe	0.393			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>0.17</b>

#### Dach

Tabelle 54: Baustoffkennwerte des Daches.

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Kies	0.100	2.000	2000	1050
2. Drainageschicht	0.020	0.220	27	1050
3. Schutzlage	0.001	0.250	1000	1000
4. Bitumen	0.008	0.230	1100	1000
5. swissporPUR (PIR) Alu	0.120	0.022	30	1400
6. Beton armiert mit 2% Stahl	0.260	2.500	2400	1000
7. Innenputz	0.015	0.700	1400	1000
Summe	0.524			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>0.17</b>



## Innenwand

Tabelle 55: Baustoffkennwerte der Innenwand.

Konstruktionsaufbau	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Gipskarton	0.015	0.250	900	1000
2. Glaswolle / Metallständer	0.100	0.035	30	1030
3. Gipskarton	0.015	0.250	900	1000
Summe	0.130			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>0.32</b>

## Zwischenboden

Tabelle 56: Baustoffkennwerte des Zwischenbodens.

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Klebeparkett	0.015	-	900	2200
2. Anhydritunterlagsboden (Bodenheizung)	0.070	-	2000	1000
3. Glaswolle	0.020	0.035	30	1030
4. Isover PS 81	0.020	0.032	80	1030
5. Beton armiert mit 2% Stahl	0.240	2.500	2400	1000
6. Innenputz	0.015	0.700	1400	1000
Summe	0.38			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>0.57</b>

## Boden gegen Erdreich

Tabelle 57: Baustoffkennwerte des Bodens.

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Klebeparkett	0.015	-	900	2200
2. Anhydritunterlagsboden (Bodenheizung)	0.070	-	2000	1000
3. Glaswolle	0.020	0.035	30	1030
4. swissporPUR Alu	0.110	0.023	30	1404
5. Beton armiert mit 2% Stahl	0.240	2.500	2400	1000
Summe	0.465			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>0.17</b>



### 14.1.1.2. «Wohnen Altbau»

#### Wand gegen aussen

Tabelle 58: Baustoffkennwerte der Wand gegen aussen.

Konstruktionsaufbau (von innen nach aussen)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Innenputz	0.010	0.700	1400	1000
2. Modulbackstein	0.200	0.440	1100	1000
3. Zementmörtel	0.010	1.600	2200	1000
Summe	0.220			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>1.55</b>

#### Dach

Tabelle 59: Baustoffkennwerte des Daches.

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Dachziegel Ton	0.020	-	2000	1000
2. Hinterlüftung	0.020	-	1.23	1008
3. Holzwerkstoffplatte	0.030	0.130	600	1700
4. Holzbankenkonstruktion	0.160	-	600	1700
Summe	0.230			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>2.70</b>

#### Dachboden

Tabelle 60: Baustoffkennwerte des Bodens gegen ungeheizten Dachraum.

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Dampplatte	0.010	0.080	400	1000
2. Beton armiert mit 2% Stahl	0.150	2.500	1800	1000
3. Innenputz	0.010	0.700	1400	1700
Summe	0.170			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>2.50</b>



## Innenwand

Tabelle 61: Baustoffkennwerte der Innenwand.

Konstruktionsaufbau	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Innenputz	0.010	0.700	1400	1000
2. Mauerwerk	0.130	0.580	1500	1000
3. Innenputz	0.010	0.700	1400	1000
Summe	0.150			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>2.14</b>

## Zwischenboden

Tabelle 62: Baustoffkennwerte des Zwischenbodens.

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Parkett	0.010	0.170	780	1700
2. Unterlagsboden Zement	0.070	1.000	1800	1000
3. Trittschalldämmung EPS	0.020	0.033	30	1450
4. Beton armiert mit 2% Stahl	0.150	2.500	2400	1000
5. Innenputz	0.010	0.700	1400	1000
Summe	0.260			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>1.02</b>

## Boden gegen Erdreich

Tabelle 63: Baustoffkennwerte des Bodens.

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Parkett	0.010	0.170	780	1700
2. Unterlagsboden Zement	0.070	1.000	1800	1000
3. Trittschalldämmung EPS	0.020	0.033	30	1450
4. swissporPUR Alu	0.070	0.022	30	1400
5. Beton armiert mit 2% Stahl	0.150	2.500	2400	1000
Summe	0.330			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>0.24</b>



### 14.1.1.3. «Wohnen sanierter Altbau»

#### Wand gegen aussen

Tabelle 64: Baustoffkennwerte der Wand gegen aussen.

Konstruktionsaufbau (von innen nach aussen)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Innenputz	0.010	0.700	1400	1000
2. Modulbackstein	0.150	0.440	1100	1000
3. Glaswolle	0.110	0.032	29	1030
4. Winddichtung	0.000	-	60 g/m <sup>2</sup>	-
5. Luftschicht (Hinterlüftung)	0.050	-	-	-
6. Faserzementplatte / PV-Modul	0.008 / 0.008	-	15.7 / 17.7	-
Summe	0.328			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>0.25</b>

#### Dach

Tabelle 65: Baustoffkennwerte des Daches.

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	Dicke m	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Wärmekapazität J/(kgK)
1. Dachziegel Ton	0.020	-	2000	1000
2. Hinterlüftung	0.020	-	1.23	1008
3. Holzwerkstoffplatte	0.030	0.130	600	1700
4. Steinwolle (mit Holzbankenkonstruktion)	0.180	0.050	100	1030
Summe	0.419			
<b>U-Wert</b>	<b>W/m<sup>2</sup>K</b>			<b>0.25</b>

#### Innenwand

Gleiche Konstruktion wie beim Referenzgebäude «Wohnen Altbau» (Tabelle 61).

#### Zwischenboden

Gleiche Konstruktion wie beim Referenzgebäude «Wohnen Altbau» (Tabelle 62).

#### Boden gegen Erdreich

Gleiche Konstruktion wie beim Referenzgebäude «Wohnen Altbau» (Tabelle 63).





#### 14.1.2 Verglasung und Verschattungssystem

Für das Gebäude «Wohnen Neubau» wird eine Dreifachwärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von  $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ , einem g-Wert von  $0.51$ , einem  $T_{\text{vis}}$  von  $0.71$  und einem  $T_e$  von  $0.42$  gemäss SIA 382/1:2007 (Anhang C, Tabelle 32), welches in der IDA-ICE-Datenbank enthalten ist, angenommen. Der Fensterrahmenanteil mit einem U-Wert von  $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$  beträgt  $12.5 \%$  an Fensterfläche. Als Sonnenschutz wird eine Stoffmarkisen mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) von  $0.12$  und einer Lichttransmission ( $T_{\text{vis}}$ ) von  $0.16$  gewählt.

Für die Gebäude «Wohnen Altbau» und «Wohnen sanierter Altbau» wird eine Zweifachwärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von  $1.0$ , einem g-Wert von  $0.57$ , einem  $T_{\text{vis}}$  von  $0.75$  und einem  $T_e$  von  $0.45$  gemäss SIA 382/1:2007 (Anhang C, Tabelle 32), welches in der IDA-ICE-Datenbank enthalten ist, angenommen. Der Fensterrahmenanteil mit einem U-Wert von  $1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$  beträgt  $20 \%$  an Fensterfläche. Als Sonnenschutz wird eine Stoffmarkisen mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) von  $0.15$  und einer Lichttransmission ( $T_{\text{vis}}$ ) von  $0.20$  gewählt.

Alle Fenster sind mit einem aussenliegenden beweglichen Sonnenschutz mit Windwiderstandsklasse 6 (Windfestigkeit von  $40 \text{ km/h}$ ) ausgestattet. Der Sonnenschutz wird geschlossen, wenn die Sonnenstrahlung an der Fassade grösser als  $200 \text{ W/m}^2$  ist und die empfundene Temperatur im Raum behaglich oder zu warm ist (SIA 180:2014 (52), Anhang C).

#### 14.1.3 Lüftung / Nachtauskühlung

Für die Simulationen wird eine **Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung (WRG, 80 %)** und einem konstanten hygienebedingten Luftvolumenstrom von  $0.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  angenommen. Bei geöffneten Fenstern wird der Betrieb eingestellt.

Die Öffnung der Fenster zur Nachtauskühlung erfolgt zusätzlich bei den folgenden Temperaturbedingungen der Aussen- und Raumluft: Bei  $T_{\text{AUL}} < T_{\text{RAL}} & T_{\text{RAL}} > 22 \text{ °C}$  werden die Fenster geöffnet bis  $T_{\text{RAL}} 20 \text{ °C}$  beträgt. Die Fensterflügel werden zwischen 06:00 Uhr und 07:00 Uhr und zwischen 18:00 Uhr und 22:00 Uhr zu  $100 \%$  als geöffnet angenommen (Je nachdem wie hoch der Anteil der Fixverglasung pro Fenster ist, entspricht dies ca.  $30 \%$  (Neubau) -  $50 \%$  (sanierter Altbau) der gesamten Glasfläche).

#### 14.1.4 Geräte

Die **Geräte** werden über einen Zeitplan (Abbildung 136) gesteuert. Die elektrische Leistung der Geräte beträgt  $10 \text{ W/m}^2$  (gemäss SIA MB 2024:2021) (103).



Abbildung 136: Zeitplan des Lastprofils der Geräte (gemäss SIA MB 2024:2021) (103).

1.0 entspricht einer Volllast der Geräte ( $10 \text{ W/m}^2$ ), 0.2 einer Last von  $20 \%$  ( $2 \text{ W/m}^2$ ).

Bei 1.0 ist das Licht eingeschaltet. Dies erfolgt, wenn das Tageslicht nicht den Wert von  $50 \text{ Lux}$  garantiert. Bei 0.0 ist das Licht ausgeschaltet.



### 14.1.5 Beleuchtung

Die **Beleuchtung** wird über einen Zeitplan (Abbildung 137) und über die natürliche Belichtung der Räume gesteuert. Die minimale Beleuchtungsstärke wird mit 50 Lux und einer elektrischen Leistung der Raumbelichtung von 7.7 W/m<sup>2</sup> definiert (gemäss SIA MB 2024:2021) (103).

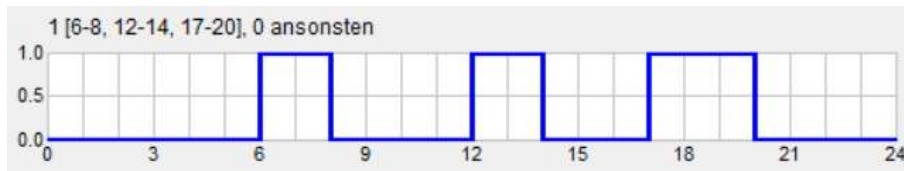


Abbildung 137: Zeitplan der Beleuchtung (gemäss SIA MB 2024:2021) (103).

Bei 1.0 ist das Licht eingeschaltet. Dies erfolgt, wenn das Tageslicht nicht den Wartungswert von 50 Lux garantiert. Bei 0.0 ist das Licht ausgeschaltet.

### 14.1.6 Personenbelegung

Die **Personenbelegung** wird ebenso gemäss dem Zeitplan nach SIA MB 2024:2021 (103) angenommen (Abbildung 138), unter Berücksichtigung eines Jahresprofils von 80 %. Die Anzahl der Personen pro Wohneinheit definiert sich nach der Nettogeschossfläche der Wohnung (35 m<sup>2</sup> NGF pro Person).

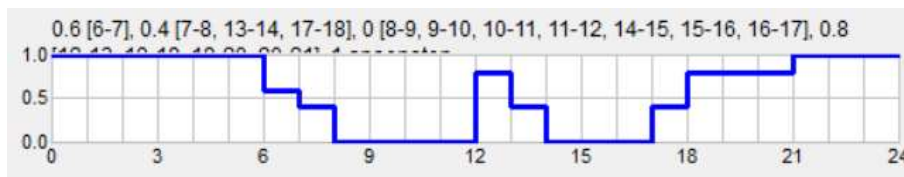


Abbildung 138: Zeitplan der Personenbelegung (gemäss SIA MB 2024:2021) (103)

1.0 entspricht einer Vollbelegung des Raums, 0.0 einer Personenabwesenheit.

### 14.1.7 Heiz- und Kühlsystem

Als Heiz- und Kühlsystem wird ein **Fernkälte-/Wärmeverbund** mit einer JAZ von 5.8 für Heizung und 7.0 für Kühlung angenommen. Die Wärme- und Kälteabgabe erfolgt via Fussbodenheizung.

## 14.2 Datengrundlagen für die Ökobilanz der Fassadesysteme (LCA)

Tabelle 66 bis Tabelle 72 stellen die Komponenten / Bauteile der einzelnen Fassadensysteme sowie PV-Dachanlage mit den Materialien und Mengen, technischer Lebensdauer und Quelle der Daten dar.

Die Tabellen mit den Komponenten / Bauteile der einzelnen Systeme, Material und Menge, technischer Lebensdauer und Quelle der Daten finden sich ebenso wie die Tabellen mit den Ergebnissen der Ökobilanz nach Komponenten / Bauteile aufgeschlüsselt im Anhang 14.2.

Die Umweltauswirkung für die Tragschicht, Unterkonstruktion und Dämmung der Fassaden wurden nicht berücksichtigt, da sie für alle Systeme gleich sind. Eine Ausnahme stellt hier die wandgebundene Begrünung dar. Da die Unterkonstruktion etwas stärker als die der Referenzfassade ausgelegt worden, wurden bei diesem Fassadensystem die zusätzlichen Umweltauswirkung in die Berechnung einbezogen.



Tabelle 66: Komponenten eines Quadratmeters der Referenzfassade (Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).

Referenzfassade – Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Dicke (m)	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Menge	Einheit	Techn. Lebensd.	Quelle
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
Faserzementplatte	03.003 Faserzementplatte gross	0.008	1'800	14.40	kg	40	(55)
Befestigung	06.006 Chromstahlblech blank		7'700	0.03	kg	40	(55)
Fugenblech	06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank		7'900	0.16	kg	40	(55)
<b>Unterhalt</b>							
Reinigung	Leitungswasser		1'000	18.00	l	Alle 10 Jahre	(57)
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)		-	0.33	kWh	Alle 10 Jahre	(55)

Tabelle 67: Komponenten eines laufenden Meters der bodengebundenen Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hедера helix). Kursiv gedruckte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, welche für dieses Fassadensystem erforderlich sind. Blau markierte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade (in diesem Fall Unterhaltsarbeiten), die bei diesem Fassadensystem nicht erforderlich sind.

Bodengebundene Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hедера helix) – 1 m							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Dicke (m)	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Menge	Einheit	Techn. Lebensd.	Quelle
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
Substrat	Torffreie Erde aus mineralischen Strukturstoffen mit Kompost	0.5	680	136.00	kg	60	(58), (56)
Aushub	62.001 Aushub maschinell, Durchschnitt	0.5	-	0.20	m <sup>3</sup>	60	(55)
Rankgitter	06.012 Stahlprofil, blank		7'850	1.54	kg	60	(55)
	14.008 Verzinken, Stahl		-	0.16	m <sup>2</sup>	60	(55)
Faserzementplatte	03.003 Faserzementplatte gross	0.008	1'800	14.40	kg	40	(55)
Befestigung	06.006 Chromstahlblech blank		7'700	0.03	kg	40	(55)
Fugenblech	06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank		7'900	0.16	kg	40	(55)
<b>Unterhalt</b>							
Es wird nur die Bewässerung durch Regenwasser berücksichtigt. Dünger ausserhalb der Systemgrenzen aufgrund fehlender Ökobilanzdaten.							
<i>Abzug der Unterhalt der Referenzfassade</i>	<i>Leitungswasser</i>		<i>1'000</i>	<i>18.00</i>	<i>l</i>	<i>Alle 10 Jahre</i>	<i>(57)</i>
	<i>Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)</i>		<i>-</i>	<i>0.33</i>	<i>kWh</i>	<i>Alle 10 Jahre</i>	<i>(55)</i>



Tabelle 68: Komponenten eines Quadratmeters der wandgebundenen Begrünung (Living Wall – Vliessystem). Blau markierte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, die bei diesem Fassadensystem nicht erforderlich sind. Da die Unterkonstruktion etwas stärker als die der Referenzfassade ausgelegt wurde, wurden bei diesem Fassadensystem die zusätzlichen Umweltauswirkung in die Berechnung einbezogen.

Wandgebundene Begrünung (Living Wall – Vliessystem) – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Dicke (m)	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Menge	Einheit	Techn. Lebensd.	Quelle
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
Living wall	Aluminiumverbundplatte (05.022 Fassadenplatte, Aluverbund, 4 mm)	0.004	-	1.00	m <sup>2</sup>	40	(55)
	Abdeckvlies (PE/PP Vlies)		750	0.75	kg	20	(56)
	Taschenvlies (09.008 Polyethylenvlies (PE))		1'000	2.00	kg	20	(55)
	Untervlies (PE/PP Vlies)		300	0.30	kg	20	(56)
	Mineralisches Substrat		600	7.50	kg	20	(56)
	Tropfrohr (13.002 Polyethylen (PE))		960	0.07	kg	20	(55)
Verstärkung der Unterkonstruktion	34.027.01 Fassadenunterkonstruktion, integriert, Eternit		-	1.00	m <sup>2</sup>	60	(55)
Bewässerungssystem – 1 Einheit (Bewässerungssteuerung inkl. Düngermischgerät, Ventile und Durchflussmessgerät)*	Schutzkästen und Wasserbehälter (15.004 Polyester (UP) glasfaserverstärkt)		1'500	21.29	kg	30	(55)
	Stromkabel - Kupfer (06.008 Kupferblech, blank)		8'300	1.74	kg	30	(55)
	Stromkabel - PVC (13.004 Polyvinylchlorid (PVC))		1'390	2.06	kg	30	(55)
	Wasserrohre (13.002 Polyethylen (PE))		960	38.85	kg	30	(55)
	Düngemittel-Schlauch (13.004 Polyvinylchlorid (PVC))		1'390	0.31	kg	30	(55)
	Ventile und andere Komponenten (06.006 Chromstahlblech)		7'700	2.80	kg	30	(55)
	Bewässerungssteuerung, Dosierpumpe und Durchflussmessgerät - PVC (13.004 Polyvinylchlorid (PVC))		1'390	1.96	kg	30	(55)
	Bewässerungssteuerung, Dosierpumpe und Durchflussmessgerät - Kupfer (06.008 Kupferblech, blank)		8'300	0.84	kg	30	(55)
	Bewässerungssteuerung, Dosierpumpe und Durchflussmessgerät - Aluminium (06.002 Aluminiumprofil, blank)		2'690	0.56	kg	30	(55)
Abzug der Erstellung der Referenzfassade	03.003 Faserzementplatte gross	0.008	1'800	14.40	kg	40	(55)
	06.006 Chromstahlblech blank		7'700	0.03	kg	40	(55)
	06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank		7'900	0.16	kg	40	(55)
<b>Unterhalt</b>							
Dünger ausserhalb der Systemgrenzen aufgrund fehlender Ökobilanzdaten.							
Bewässerung**	Leitungswasser		1'000	1'200.00	l	Jährlich	(57)
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)**		-	0.35	kWh	Jährlich	(55)
Abzug des Unterhalts der Referenzfassade	Leitungswasser		1'000	18.00	l	Alle 10 Jahre	(57)
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)		-	0.33	kWh	Alle 10 Jahre	(55)

\* Diese Werte entsprechen einer Bewässerungsanlage (ganzes System). Pro Werte pro Quadratmeter Fassade hängt von der Gesamtfläche der begrüneten Fassade ab.

\*\* Um die Daten pro Quadratmeter Fassade darzustellen, wurde eine begrünete Fläche von 500 m<sup>2</sup> angenommen.



Tabelle 69: Komponenten eines Quadratmeters der PV-Fassade (mit opaken Modulen). Die Ökobilanzdaten der Solarstromanlage werden in der KBOB-Liste pro kWp maximaler Leistung zusammengestellt, für die Umrechnung in Quadratmeter wurde die im Dokument «Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen» (104) angegebene Modulfläche berücksichtigt. Blau markierte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, die bei diesem Fassadensystem nicht erforderlich sind.

PV-Fassade (opake Module) – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Dicke (m)	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Menge	Einheit	Techn. Lebensd.	Quelle
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
PV-Fassade	34.027 Solarstromanlage Fassade		-	0.19	kWp	30	(55), (104)
Abzug der Erstellung der Referenzfassade	03.003 Faserzementplatte gross	0.008	1'800	14.40	kg	40	(55)
	06.006 Chromstahlblech blank		7'700	0.03	kg	40	(55)
	06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank		7'900	0.16	kg	40	(55)
<b>Unterhalt</b>							
Reinigung	Leitungswasser		1'000	6.00	l	Jährlich	(57)
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)		-	0.09	kWh	Jährlich	(55)
Abzug des Unterhalts der Referenzfassade	Leitungswasser		1'000	18.00	l	Alle 10 Jahre	(57)
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)		-	0.33	kWh	Alle 10 Jahre	(55)

Tabelle 70: Komponenten eines Quadratmeters der PV-Fassade (mit transparenten Modulen). Die Ökobilanzdaten der Solarstromanlage werden in der KBOB-Liste pro kWp maximaler Leistung zusammengestellt, für die Umrechnung in Quadratmeter wurde die im Dokument «Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen» (104) angegebene Modulfläche berücksichtigt. Die Ökobilanzdaten wurden für die Berücksichtigung der transparenten Module (CdTe) angepasst. Blau markierte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, die bei diesem Fassadensystem nicht erforderlich sind.

PV-Fassade (transparente Module) – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Dicke (m)	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Menge	Einheit	Techn. Lebensd.	Quelle
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
PV-Fassade	34.027 Solarstromanlage Fassade		-	0.19	kWp	30	(55), (104)
Abzug der Erstellung der Referenzfassade	03.003 Faserzementplatte gross	0.008	1'800	14.40	kg	40	(55)
	06.006 Chromstahlblech blank		7'700	0.03	kg	40	(55)
	06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank		7'900	0.16	kg	40	(55)
<b>Unterhalt</b>							
Reinigung	Leitungswasser		1'000	6.00	l	Jährlich	(57)
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)		-	0.09	kWh	Jährlich	(55)
Abzug der Unterhalt der Referenzfassade	Leitungswasser		1'000	18.00	l	Alle 10 Jahre	(57)
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)		-	0.33	kWh	Alle 10 Jahre	(55)



Tabelle 71: Komponenten eines Quadratmeters der PV-Dachanlage – Flachdach inklusiv der Referenzfassade für das Referenzgebäude «Neubau». Die Ökobilanzdaten der Solarstromanlage werden in der KBOB-Liste pro kWp maximaler Leistung zusammengestellt, für die Umrechnung in Quadratmeter wurde die im Dokument «Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen» (104) angegebene Modulfläche berücksichtigt. Kursiv gedruckte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, welche für dieses Fassadesystem erforderlich sind.

PV-Dachanlage – Flachdach und Referenzfassade – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Dicke (m)	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Menge	Einheit	Techn. Lebensd.	Quelle
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
PV-Anlage Flachdach	34.035 Solarstromanlage Schrägdach		-	0.19	kWp	30	(55), (104)
Erstellung der Referenzfassade	<i>03.003 Faserzementplatte gross</i>	<i>0.008</i>	<i>1'800</i>	<i>14.40</i>	<i>kg</i>	<i>40</i>	<i>(55)</i>
	<i>06.006 Chromstahlblech blank</i>		<i>7'700</i>	<i>0.03</i>	<i>kg</i>	<i>40</i>	<i>(55)</i>
	<i>06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank</i>		<i>7'900</i>	<i>0.16</i>	<i>kg</i>	<i>40</i>	<i>(55)</i>
<b>Unterhalt</b>							
Reinigung	Leitungswasser		1'000	6.00	l	Jährlich	(57)
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)		-	0.09	kWh	Jährlich	(55)
Unterhalt der Referenzfassade	<i>Leitungswasser</i>		<i>1'000</i>	<i>18.00</i>	<i>l</i>	<i>Alle 10 Jahre</i>	<i>(57)</i>
	<i>Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)</i>		<i>-</i>	<i>0.33</i>	<i>kWh</i>	<i>Alle 10 Jahre</i>	<i>(55)</i>

Tabelle 72: Komponenten eines Quadratmeters der PV-Dachanlage – Schrägdach inklusiv der Referenzfassade für die Referenzgebäude «Altbau» / «sanierter Altbau». Die Ökobilanzdaten der Solarstromanlage werden in der KBOB-Liste pro kWp maximaler Leistung zusammengestellt, für die Umrechnung in Quadratmeter wurde die im Dokument «Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen» (104) angegebene Modulfläche berücksichtigt. Kursiv gedruckte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, welche für dieses Fassadesystem erforderlich sind.

PV-Dachanlage – Schrägdach und Referenzfassade – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Dicke (m)	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Menge	Einheit	Techn. Lebensd.	Quelle
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
PV-Anlage Schrägdach	34.026 Solarstromanlage Flachdach			0.18	kWp	30	(55), (104)
Erstellung der Referenzfassade	<i>03.003 Faserzementplatte gross</i>	<i>0.008</i>	<i>1'800</i>	<i>14.40</i>	<i>kg</i>	<i>40</i>	<i>(55)</i>
	<i>06.006 Chromstahlblech blank</i>		<i>7'700</i>	<i>0.03</i>	<i>kg</i>	<i>40</i>	<i>(55)</i>
	<i>06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank</i>		<i>7'900</i>	<i>0.16</i>	<i>kg</i>	<i>40</i>	<i>(55)</i>
<b>Unterhalt</b>							
Reinigung	Leitungswasser		1'000	6.00	l	Jährlich	(57)
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)		-	0.09	kWh	Jährlich	(55)
Unterhalt der Referenzfassade	<i>Leitungswasser</i>		<i>1'000</i>	<i>18.00</i>	<i>l</i>	<i>Alle 10 Jahre</i>	<i>(57)</i>
	<i>Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)</i>		<i>-</i>	<i>0.33</i>	<i>kWh</i>	<i>Alle 10 Jahre</i>	<i>(55)</i>

Tabelle 73 bis Tabelle 79 stellen die Ökobilanzierungen der einzelnen Fassadensysteme sowie PV-Dachanlage nach Komponenten / Bauteile aufgeschlüsselt dar.



Tabelle 73: Ökobilanzierung eines Quadratmeters der Referenzfassade (Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten).

Referenzfassade – Hinterlüftete Fassade mit Faserzementplatten – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Treibhausgas-emissionen (THGE)		Primärenergie nicht erneuerbar (PEne)		Gesamt-umweltbelastung (UBP)	
		kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> Jahr)	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> Jahr)	UBP/m <sup>2</sup>	UBP/(m <sup>2</sup> Jahr)
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
Faserzementplatte	03.003 Faserzementplatte gross	14.98	0.37	42.19	1.05	21'888	547.20
Befestigung	06.006 Chromstahlblech blank	0.07	0.00	0.21	0.01	177	4.43
Fugenblech	06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank	0.65	0.02	2.31	0.06	1'534	38.35
<b>Unterhalt</b>							
Reinigung	Leitungswasser	0.01	0.00	0.05	0.01	0.00*	0.00
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)	0.04	0.00	0.68	0.07	167	16.67

\* Null, da keine zuverlässigen Daten zur Verfügung stehen.

Tabelle 74: Ökobilanzierung eines laufenden Meters der Bodengebundene Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hедера helix). Kursiv gedruckte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, welche für dieses Fassadesystem erforderlich sind. Blau markierte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade (in diesem Fall Unterhaltsarbeiten), die bei diesem Fassadensystem nicht erforderlich sind.

Bodengebundene Begrünung (Kletterpflanze mit Rankhilfe – Efeu hедера helix) – 1 m							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Treibhausgas-emissionen (THGE)		Primärenergie nicht erneuerbar (PEne)		Gesamt-umweltbelastung (UBP)	
		kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> Jahr)	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> Jahr)	UBP/m <sup>2</sup>	UBP/(m <sup>2</sup> Jahr)
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
Substrat	Torffreie Erde aus mineralischen Strukturstoffen mit Kompost	20.74	0.35	70.40	1.17	0.00*	0.00
Aushub	62.001 Aushub maschinell, Durchschnitt	0.09	0.00	0.33	0.01	140	2.33
Rankgitter	06.012 Stahlprofil, blank	1.14	0.02	5.21	0.09	2'004	33.40
	14.008 Verzinken, Stahl	0.96	0.02	4.02	0.07	4'634	77.23
<i>Faserzementplatte</i>	<i>03.003 Faserzementplatte gross</i>	<i>14.98</i>	<i>0.37</i>	<i>42.19</i>	<i>1.05</i>	<i>21'888</i>	<i>547.20</i>
<i>Befestigung</i>	<i>06.006 Chromstahlblech blank</i>	<i>0.07</i>	<i>0.00</i>	<i>0.21</i>	<i>0.01</i>	<i>177</i>	<i>4.43</i>
<i>Fugenblech</i>	<i>06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank</i>	<i>0.65</i>	<i>0.02</i>	<i>2.31</i>	<i>0.06</i>	<i>1'534</i>	<i>38.35</i>
<b>Unterhalt</b>							
Es wird nur die Bewässerung durch Regenwasser berücksichtigt. Dünger ausserhalb der Systemgrenzen aufgrund fehlender Ökobilanzdaten.							
<i>Abzug der Unterhalt der Referenzfassade</i>	<i>Leitungswasser</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00</i>	<i>0.05</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00*</i>	<i>0.00</i>
	<i>Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)</i>	<i>0.04</i>	<i>0.00</i>	<i>0.68</i>	<i>0.07</i>	<i>167</i>	<i>16.67</i>

\* Null, da keine zuverlässigen Daten zur Verfügung stehen.



Tabelle 75: Ökobilanzierung eines Quadratmeters der wandgebundenen Begrünung (Living Wall – Vliessystem). Blau markierte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, die bei diesem Fassadensystem nicht erforderlich sind. Da die Unterkonstruktion etwas stärker als die der Referenzfassade ausgelegt wurde, wurden bei diesem Fassadensystem die zusätzlichen Umweltauswirkung in die Berechnung einbezogen.

Wandgebundene Begrünung (Living Wall – Vliessystem) – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Treibhausgasemissionen (THGE)		Primärenergie nicht erneuerbar (PEne)		Gesamtumweltbelastung (UBP)	
		kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> Jahr)	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> Jahr)	UBP/m <sup>2</sup>	UBP/(m <sup>2</sup> Jahr)
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
Living wall	Aluminiumverbundplatte (05.022 Fassadenplatte, Aluverbund, 4 mm)	43.40	1.09	192.00	4.80	74'900	1'872.50
	Abdeckvlies (PE/PP Vlies)	2.36	0.12	9.30	0.46	0.00*	0.00
	Taschenvlies (09.008 Polyethylenvlies (PE))	11.26	0.56	52.00	2.60	14'200	710.00
	Untervlies (PE/PP Vlies)	0.94	0.05	3.72	0.19	0.00*	0.00
	Mineralisches Substrat	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00*	0.00
	Tropfrohr (13.002 Polyethylen (PE))	0.31	0.02	1.53	0.08	396	19.79
Verstärkung der Unterkonstruktion	34.027.01 Fassadenunterkonstruktion, integriert, Eternit	2.69	0.04	11.90	0.20	5'860	97.67
Bewässerungssystem – 1 Einheit (Bewässerungssteuerung inkl. Düngermischgerät, Ventile und Durchflussmessgerät)**	Schutzkästen und Wasserbehälter (15.004 Polyester (UP) glasfaserverstärkt)	209.71	6.99	668.51	22.28	293'802	9'793.40
	Stromkabel - Kupfer (06.008 Kupferblech, blank)	3.85	0.13	15.53	0.52	42'704	1'423.45
	Stromkabel - PVC (13.004 Polyvinylchlorid (PVC))	9.24	0.31	40.14	1.34	12'865	428.83
	Wasserrohre (13.002 Polyethylen (PE))	184.51	6.15	901.21	30.04	233'848	7'794.93
	Düngemittel-Schlauch (13.004 Polyvinylchlorid (PVC))	1.41	0.05	6.13	0.20	1'965	65.50
	Ventile und andere Komponenten (06.006 Chromstahlblech)	7.67	0.26	23.91	0.80	19'824	660.80
	Bewässerungssteuerung, Dosierpumpe und Durchflussmessgerät - PVC (13.004 Polyvinylchlorid (PVC))	8.80	0.29	38.22	1.27	12'250	408.33
	Bewässerungssteuerung, Dosierpumpe und Durchflussmessgerät - Kupfer (06.008 Kupferblech, blank)	1.86	0.06	7.48	0.25	20'580	686.00
	Bewässerungssteuerung, Dosierpumpe und Durchflussmessgerät - Aluminium (06.002 Aluminiumprofil, blank)	3.19	0.11	14.34	0.48	6'440	214.67
Abzug der Erstellung der Referenzfassade	03.003 Faserzementplatte gross	14.98	0.37	42.19	1.05	21'888	547.20
	06.006 Chromstahlblech blank	0.07	0.00	0.21	0.01	177	4.43
	06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank	0.65	0.02	2.31	0.06	1'534	38.35
<b>Unterhalt</b>							
Bewässerung	Leitungswasser	0.52	0.52	3.52	3.52	0.00*	0.00
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)***	0.04	0.04	0.73	0.73	180	179.76
Abzug des Unterhalts der Referenzfassade	Leitungswasser	0.01	0.00	0.05	0.01	0.00*	0.00
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)	0.04	0.00	0.68	0.07	167	16.67





\* Null, da keine zuverlässigen Daten zur Verfügung stehen.

\*\* Diese Werte entsprechen einer Bewässerungsanlage (ganzes System). Pro Werte pro Quadratmeter Fassade hängt von der Gesamtfläche der begrünten Fassade ab.

\*\*\* Um die Daten pro Quadratmeter Fassade darzustellen, wurde eine begrünte Fläche von 500 m<sup>2</sup> angenommen.

Tabelle 76: Ökobilanzierung eines Quadratmeters der PV-Fassade (mit opaken Modulen). Die Ökobilanzdaten der Solarstromanlage werden in der KBOB-Liste pro kWp maximaler Leistung zusammengestellt, für die Umrechnung in Quadratmeter wurde die im Dokument «Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen» (104) angegebene Modulfläche berücksichtigt. Blau markierte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, die bei diesem Fassadensystem nicht erforderlich sind.

PV-Fassade (opake Module) – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Treibhausgasemissionen (THGE)		Primärenergie nicht erneuerbar (PEne)		Gesamtumweltbelastung (UBP)	
		kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> Jahr)	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> Jahr)	UBP/m <sup>2</sup>	UBP/(m <sup>2</sup> Jahr)
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
PV-Fassade	34.027 Solarstromanlage Fassade	225.93	7.53	820.37	27.35	535'185	17'839.51
Abzug der Erstellung der Referenzfassade	03.003 Faserzementplatte gross	14.98	0.37	42.19	1.05	21'888	547.20
	06.006 Chromstahlblech blank	0.07	0.00	0.21	0.01	177	4.43
	06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank	0.65	0.02	2.31	0.06	1'534	38.35
<b>Unterhalt</b>							
Reinigung	Leitungswasser	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00*	0.00
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)	0.01	0.01	0.19	0.19	46	46.17
Abzug des Unterhalts der Referenzfassade	Leitungswasser	0.01	0.00	0.05	0.01	0.00*	0.00
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)	0.04	0.00	0.68	0.07	167	16.67

\* Null, da keine zuverlässigen Daten zur Verfügung stehen.

Tabelle 77: Ökobilanzierung eines Quadratmeters der PV-Fassade (mit transparenten Modulen). Die Ökobilanzdaten der Solarstromanlage werden in der KBOB-Liste pro kWp maximaler Leistung zusammengestellt, für die Umrechnung in Quadratmeter wurde die im Dokument «Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen» (104) angegebene Modulfläche berücksichtigt. Die Ökobilanzdaten wurden für die Berücksichtigung der transparenten Module (CdTe) angepasst. Blau markierte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, die bei diesem Fassadensystem nicht erforderlich sind.

PV-Fassade (transparente Module) – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Treibhausgasemissionen (THGE)		Primärenergie nicht erneuerbar (PEne)		Gesamtumweltbelastung (UBP)	
		kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> Jahr)	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> Jahr)	UBP/m <sup>2</sup>	UBP/(m <sup>2</sup> Jahr)
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
PV-Fassade	34.027 Solarstromanlage Fassade	179.39	5.98	744.75	24.82	522'443	17'414.76
Abzug der Erstellung der Referenzfassade	03.003 Faserzementplatte gross	14.98	0.37	42.19	1.05	21'888	547.20
	06.006 Chromstahlblech blank	0.07	0.00	0.21	0.01	177	4.43
	06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank	0.65	0.02	2.31	0.06	1'534	38.35
<b>Unterhalt</b>							
Reinigung	Leitungswasser	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00*	0.00
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)	0.01	0.01	0.19	0.19	46	46.17
Abzug des Unterhalts der Referenzfassade	Leitungswasser	0.01	0.00	0.05	0.01	0.00*	0.00
	Strom (45.020 CH-Verbrauchermix)	0.04	0.00	0.68	0.07	167	16.67

\* Null, da keine zuverlässigen Daten zur Verfügung stehen.



Tabelle 78: Ökobilanzierung eines Quadratmeters der PV-Dachanlage – Flachdach inklusiv der Referenzfassade für das Referenzgebäude «Neubau». Die Ökobilanzdaten der Solarstromanlage werden in der KBOB-Liste pro kWp maximaler Leistung zusammengestellt, für die Umrechnung in Quadratmeter wurde die im Dokument «Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen» (104) angegebene Modulfläche berücksichtigt. Kursiv gedruckte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, welche für dieses Fassadesystem erforderlich sind.

PV-Dachanlage – Flachdach und Referenzfassade – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Treibhausgas-emissionen (THGE)		Primärenergie nicht erneuerbar (PEne)		Gesamt-umweltbelastung (UBP)	
		kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> Jahr)	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> Jahr)	UBP/m <sup>2</sup>	UBP/(m <sup>2</sup> Jahr)
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
PV-Anlage Flachdach	34.035 Solarstromanlage Schrägdach	211.11	7.04	751.85	25.06	438'889	14'629.63
<i>Erstellung der Referenzfassade</i>	<i>03.003 Faserzementplatte gross</i>	<i>14.98</i>	<i>0.37</i>	<i>42.19</i>	<i>1.05</i>	<i>21'888</i>	<i>547.20</i>
	<i>06.006 Chromstahlblech blank</i>	<i>0.07</i>	<i>0.00</i>	<i>0.21</i>	<i>0.01</i>	<i>177</i>	<i>4.43</i>
	<i>06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank</i>	<i>0.65</i>	<i>0.02</i>	<i>2.31</i>	<i>0.06</i>	<i>1'534</i>	<i>38.35</i>
Reinigung	Leitungswasser	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00*	0.00
	Strom (45.020 CH-Verbraucher-mix)	0.02	0.02	0.25	0.25	63	62.84
<i>Unterhalt der Referenzfassade</i>	<i>Leitungswasser</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00</i>	<i>0.05</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00*</i>	<i>0.00</i>
	<i>Strom (45.020 CH-Verbraucher-mix)</i>	<i>0.04</i>	<i>0.00</i>	<i>0.68</i>	<i>0.07</i>	<i>167</i>	<i>16.67</i>

\* Null, da keine zuverlässigen Daten zur Verfügung stehen.

Tabelle 79: Ökobilanzierung eines Quadratmeters der PV-Dachanlage – Schrägdach inklusiv der Referenzfassade für die Referenzgebäude «Altbau» / «sanierter Altbau». Die Ökobilanzdaten der Solarstromanlage werden in der KBOB-Liste pro kWp maximaler Leistung zusammengestellt, für die Umrechnung in Quadratmeter wurde die im Dokument «Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen» (104) angegebene Modulfläche berücksichtigt. Kursiv gedruckte Werte zeigen den Komponenten der Referenzfassade, welche für dieses Fassadesystem erforderlich sind.

PV-Dachanlage – Schrägdach und Referenzfassade – 1 m <sup>2</sup>							
	Material (mit ID-Nummer aus KBOB-Liste)	Treibhausgas-emissionen (THGE)		Primärenergie nicht erneuerbar (PEne)		Gesamt-umweltbelastung (UBP)	
		kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> Jahr)	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/(m <sup>2</sup> Jahr)	UBP/m <sup>2</sup>	UBP/(m <sup>2</sup> Jahr)
<b>Erstellung (inkl. Entsorgung)</b>							
PV-Anlage Schrägdach	34.026 Solarstromanlage Flachdach	182.82	6.09	654.48	21.82	383'912	12'797.07
<i>Erstellung der Referenzfassade</i>	<i>03.003 Faserzementplatte gross</i>	<i>14.98</i>	<i>0.37</i>	<i>42.19</i>	<i>1.05</i>	<i>21'888</i>	<i>547.20</i>
	<i>06.006 Chromstahlblech blank</i>	<i>0.07</i>	<i>0.00</i>	<i>0.21</i>	<i>0.01</i>	<i>177</i>	<i>4.43</i>
	<i>06.004 Chromnickelstahlblech 18/8 blank</i>	<i>0.65</i>	<i>0.02</i>	<i>2.31</i>	<i>0.06</i>	<i>1'534</i>	<i>38.35</i>
<b>Unterhalt</b>							
Reinigung	Leitungswasser	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00*	0.00
	Strom (45.020 CH-Verbraucher-mix)	0.02	0.02	0.25	0.25	63	62.84
<i>Unterhalt der Referenzfassade</i>	<i>Leitungswasser</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00</i>	<i>0.05</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00*</i>	<i>0.00</i>
	<i>Strom (45.020 CH-Verbraucher-mix)</i>	<i>0.04</i>	<i>0.00</i>	<i>0.68</i>	<i>0.07</i>	<i>167</i>	<i>16.67</i>

\* Null, da keine zuverlässigen Daten zur Verfügung stehen.



## 14.3 Interviewleitfaden

### 14.3.1 Expertengespräch: Fassadenbegrünung

#### Allgemein Begrünung

1. Welches Begrünungssystem (bodengebunden - mit/ohne Kletterhilfe - oder wandgebunden - modulares System, flächige Konstruktion, mit Pflanzgefässen) kommt im Fassadenbereich heutzutage am häufigsten zur Anwendung? Warum?
2. Welches dieser Systeme werden künftig häufiger zur Anwendung kommen? Warum?
3. Fassadenbegrünungen kommen heutzutage nicht häufiger zur Anwendung. Welche Faktoren / Massnahmen könnten dazu beitragen, dass begrünte Fassaden in Zukunft häufiger umgesetzt werden?
4. Im Rahmen unserer Studie möchten wir gern zwei Begrünungssysteme untersuchen, ein **bodengebundenes** und ein **fassadengebundenes**. Dabei würden wir gern Begrünungen in Betracht ziehen, die häufiger vorkommen und angesichts des zukünftigen Klimas widerstandsfähig sind. Ebenso würden wir für unsere Studie gern Begrünungen mit einer hohen Blattdichte betrachten, um den Effekt besser aufzeigen zu können. Welche Annahmen können wir treffen hinsichtlich:
  - **Vegetationsstruktur** (mit/ohne Kletterhilfe, Seilstruktur, Abstand zwischen Pflanzen, mit/ohne Luftzwischenraum...)
  - **Dicke der Vegetationsschicht**
  - **Pflanzenart** inkl. Eigenschaften (Immergrün/sommergrün? Sommergrüne Pflanzen bieten für einen grossen Teil des Jahres keine Vorteile, sollten die Priorität diesbezüglich auf immergrünen Pflanzen liegen? Ebenso Klimawandel bei der Pflanzenart berücksichtigen). Was sollte zudem beachtet werden bei den einzelnen Systemen:
    - Berücksichtigung der Gebäudehöhe / **Wuchshöhe** der Pflanzen (bspw.  $\leq 4$  Geschosse /  $\leq 8$  Geschosse) Wie viel Zeit muss hier eingeplant werden?
    - Fassadenausrichtung (N / O / S / W – direkte / indirekte Sonneneinstrahlung)
    - Weitere Aspekte?
  - **Substrat** inkl. Eigenschaften (Substrattiefe für bodengebundene Fassadenbegrünung)
  - **Bewässerung** (Typ, Wassermenge und Häufigkeit je nach Jahreszeit - Wie viel Wasser wird pro  $m^2$  Fassade (bei fassadengebundener Begrünung) oder pro Laufmeter bei bodengebundener Begrünung benötigt? Sowohl im Winter als auch im Sommer?)
  - **Pflege- und Wartungsaufwand** (wie häufig sollten die Pflanzen geschnitten/gepflegt werden?)
  - **Lebensdauer** des gesamten Systems / Häufigkeit des Austauschs von Pflanzen
5. In welchen **Preissegmenten** befinden sich die verschiedenen Begrünungssysteme (bodengebunden – mit und ohne Rank-/Kletterhilfe – und fassadengebundenes – flächiges und modulares System – und in Pflanzgefässen)? Welche Kosten fallen für die Erstellung sowie für die spätere Pflege an?
6. Kennen Sie Objekte, die gute **Beispiele** – mit Blick in die Zukunft – für begrünte Fassaden (bodengebunden und fassadengebunden) darstellen?



7. Kennen Sie Objekte mit begrünter Fassade, die durch **Messungen** (Temperatur, Feuchtigkeit, Luftqualität) überwacht werden?

#### Kombination PV + Begrünung

8. Sind Ihnen **Beispiele** bekannt, wo Fassadenbegrünungen mit PV-Modulen kombiniert wurden? Wie häufig werden solche Systeme derzeit umgesetzt?
9. Wie könnte die Kombination dieser Systeme an Gebäudefassaden in Zukunft aussehen: **Direkte Kombination** der beiden Systeme (Begrünung und PV übereinander) oder eine **Anordnung der Systeme an verschiedenen Bereichen der Fassade** (Begrünung und PV nebeneinander)?
10. Welche **Begrünungssystem und Pflanzenart** eignet sich Ihrer Meinung nach am besten für die **Kombination** mit einer «transparenten» Photovoltaikanlage - begrenztes Sonnenlicht, kein Wachstum auf den Paneelen selbst usw.?

#### 14.3.2 Expertengespräch: PV

##### Allgemein PV

1. Welche **PV-Systeme und Zelltypen** kommen im Fassadenbereich heutzutage am häufigsten zur Anwendung? Warum?
2. Welche dieser Systeme und Zelltypen werden **künftig** häufiger zur Anwendung kommen?
3. Wie schätzen Sie den **technologischen Fortschritt** von PV-Systemen an der Fassade ein? Welche Effizienzsteigerung ist in den nächsten 20-25 Jahren zu erwarten?
4. Im Rahmen unserer Studie möchten wir gern zwei PV-Systeme untersuchen, ein **opakes Modul** und ein **transparentes Modul** (für die spätere Kombination mit Begrünung). Welche Annahmen können wir hier mit Blick in die Zukunft treffen hinsichtlich **Zelltyp und Effizienz**.
5. Was sind Ihrer Meinung nach die **Vorteile einer PV-Fassade** im Vergleich zu einer Dachanlage?
6. Können **PV-Module im Norden** sinnvoll sein? (z.B. Preis-Leistungs-Verhältnis?)
7. In welchem **Preissegment** finden sich die verschiedenen PV-Systeme für Fassaden?
8. Welche Schritte sind bei der **Entscheidungsfindung** zu beachten, wenn ein Kunde eine PV-Fassade wünscht? Was sind die wichtigsten Aspekte, die zu beachten sind?



9. Kennen Sie Objekte, die sowohl in architektonischer als auch in technischer Hinsicht gute **Beispiele** - im Hinblick auf die Zukunft - für PV-Fassaden (transparent und opak) darstellen?
10. Kennen Sie Objekte mit PV-Fassaden, die durch Messungen (Temperatur der Module, Stromertrag) überwacht werden? Welche Aspekte wirken sich am stärksten auf die **Effizienz der Module** aus (Schmutz, hohe Temperaturen...)?

#### Kombination PV + Begrünung

1. Sind Ihnen (Schweizer) Beispiele bekannt, wo Fassadenbegrünungen mit PV-Modulen kombiniert wurden? Wie häufig werden solche Systeme derzeit umgesetzt?
2. Welche Vor- und Nachteile bringt die Kombination dieser Systeme? Wo gibt es noch Forschungsbedarf in diesem Bereich?
3. Welche Steigerung der Stromerzeugung kann die Vegetation - vor allem im Sommer - bewirken? Kann die Pufferwirkung der Begrünung - höhere Temperatur im Winter und niedrigere Temperatur im Sommer - die Lebensdauer der Zellen erhöhen? Sind Ihnen diesbezüglich Studien bekannt?
4. Sehen Sie mit Blick auf den Klimawandel (Zukunft) die Kombination von PV und Begrünung im Fassadenbereich eher bei einzelnen Beispielen oder in der breiten Anwendung?



## 14.4 Messergebnisse

### 14.4.1 Bewölkter Sommertag

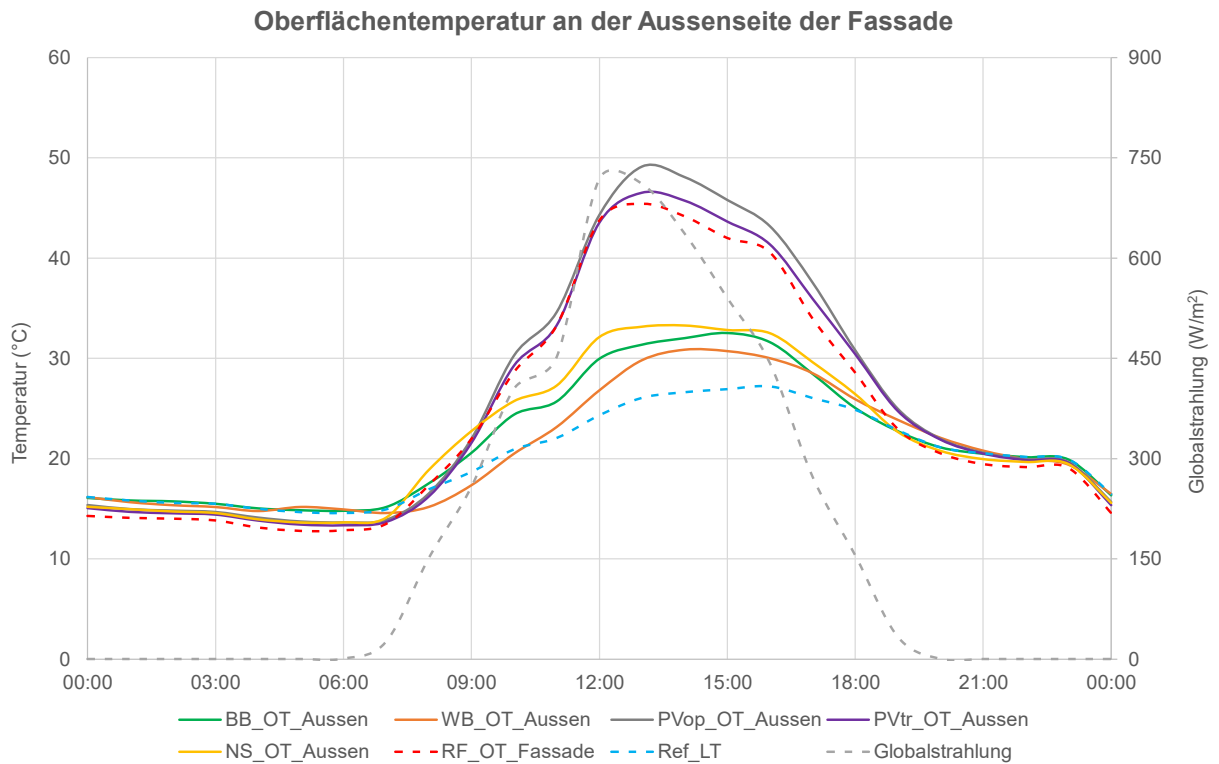


Abbildung 139: Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter Sommertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 80: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassadensysteme. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	20.3	24.5	21.9	21.1	26.0	25.3	22.2
	$\Delta T$ zur RF			-2.6	-3.4	1.5	0.7	-2.4
<b>Max</b>	°C	27.8	47.2	33.8	31.0	50.1	47.2	34.2
	$\Delta T$ zur RF			-13.4	-16.2	2.9	-0.1	-13.0
<b>Min</b>	°C	14.3	12.6	14.6	14.5	13.6	13.3	13.4
	$\Delta T$ zur RF			2.0	1.9	1.0	0.7	0.8

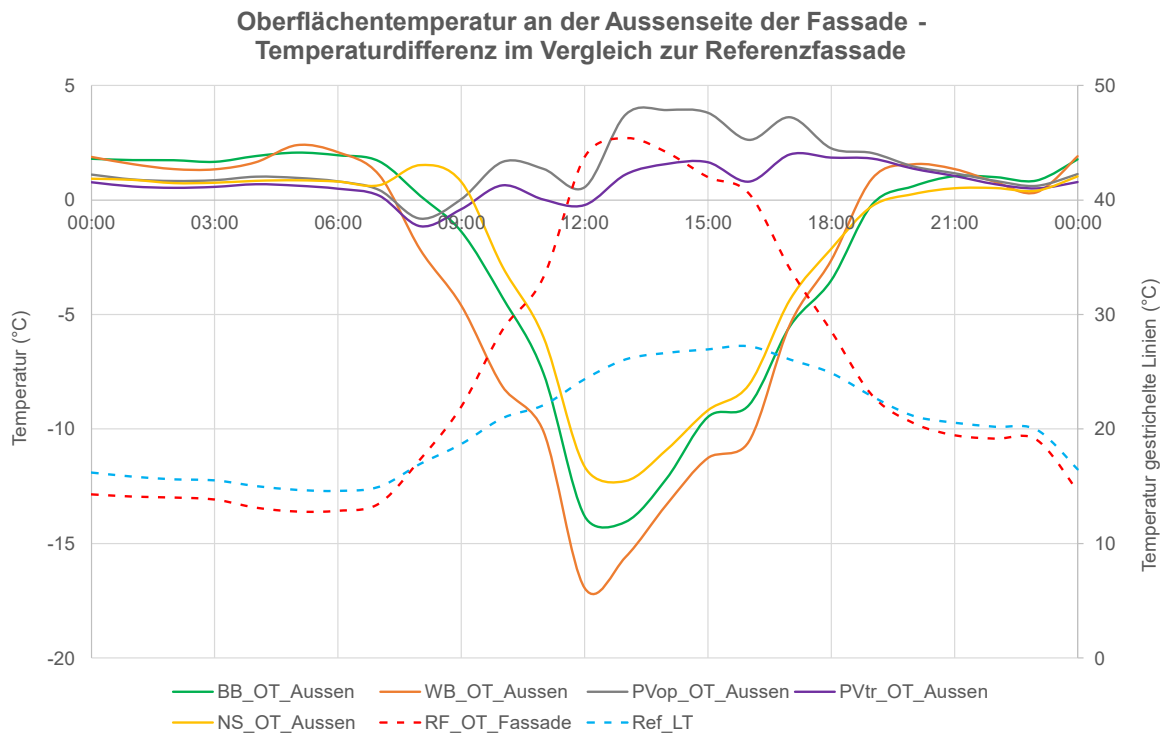


Abbildung 140: Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter Sommertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



### Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade

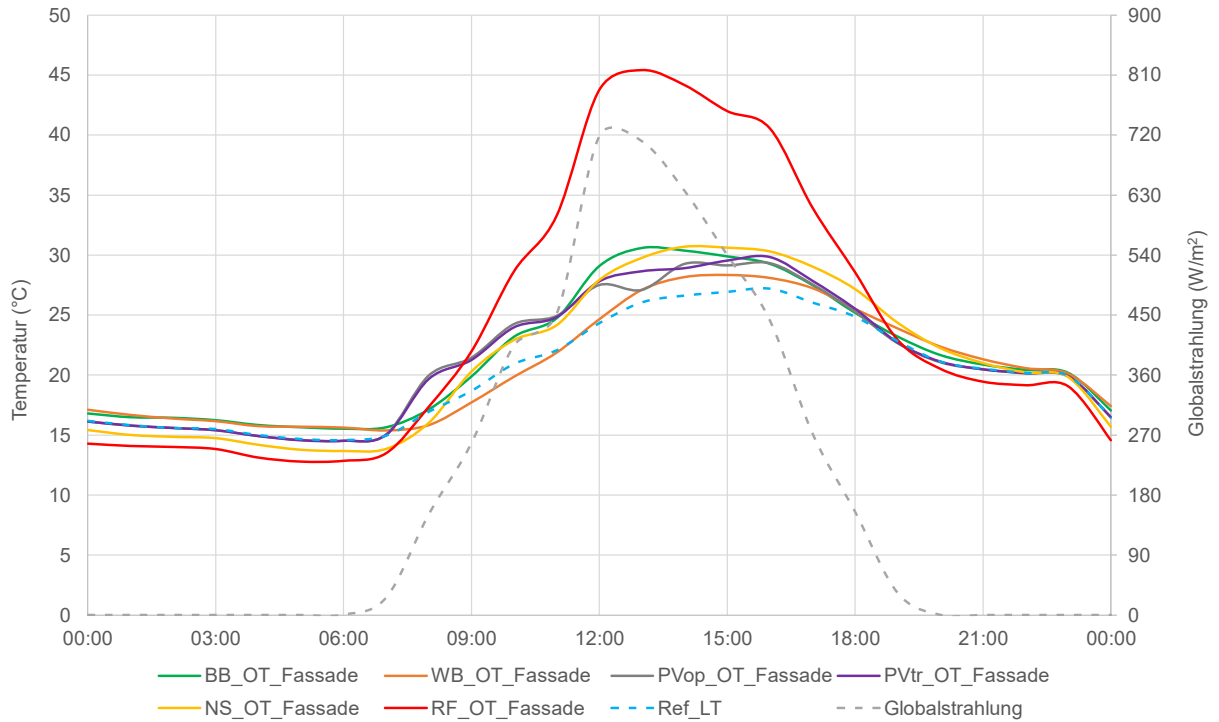


Abbildung 141: Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter Sommertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 81: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	20.3	24.5	21.8	20.9	21.3	21.4	21.3
	$\Delta T$ zur RF			-2.8	-3.7	-3.2	-3.1	-3.2
<b>Max</b>	°C	27.8	47.2	30.9	28.4	30.8	32.0	30.9
	$\Delta T$ zur RF			-16.3	-18.8	-16.4	-15.3	-16.3
<b>Min</b>	°C	14.3	12.6	15.3	15.3	14.4	14.3	13.7
	$\Delta T$ zur RF			2.7	2.7	1.8	1.7	1.0



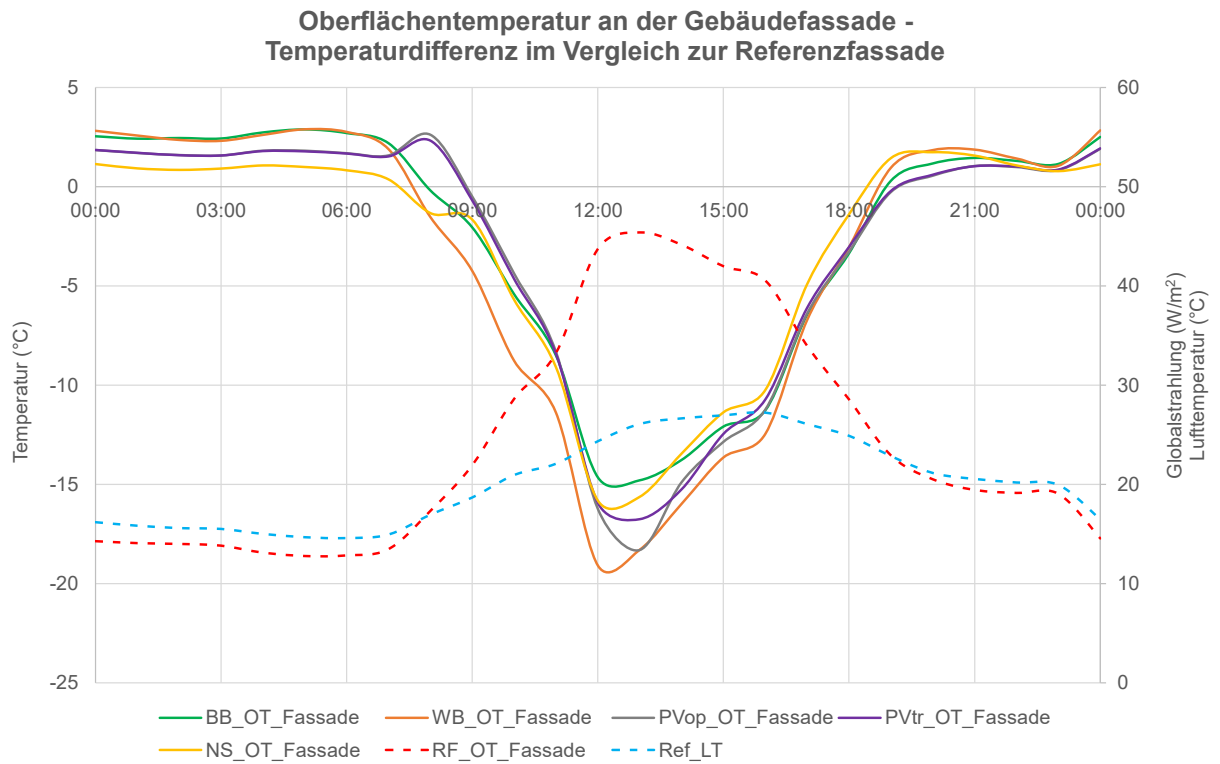


Abbildung 142: Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter Sommertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



## 14.4.2 Regnerischer Sommertag

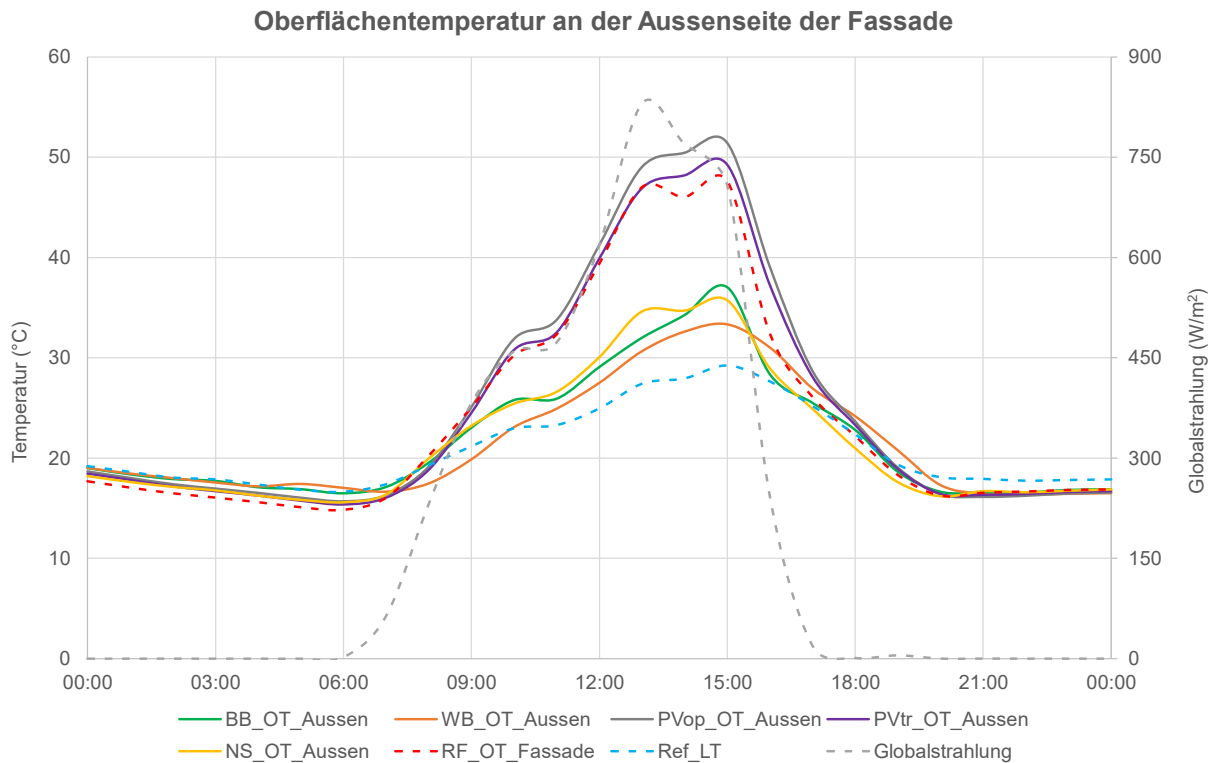


Abbildung 143: Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer Sommertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 82: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassadensysteme. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	21.0	24.3	22.0	21.7	25.5	24.9	21.8
	$\Delta T$ zur RF			-2.2	-2.6	1.3	0.6	-2.5
<b>Max</b>	°C	29.9	49.9	37.9	33.7	52.3	49.9	37.5
	$\Delta T$ zur RF			-12.0	-16.2	2.4	0.1	-12.4
<b>Min</b>	°C	16.4	14.8	16.3	16.3	15.6	15.3	15.4
	$\Delta T$ zur RF			1.5	1.5	0.8	0.5	0.6

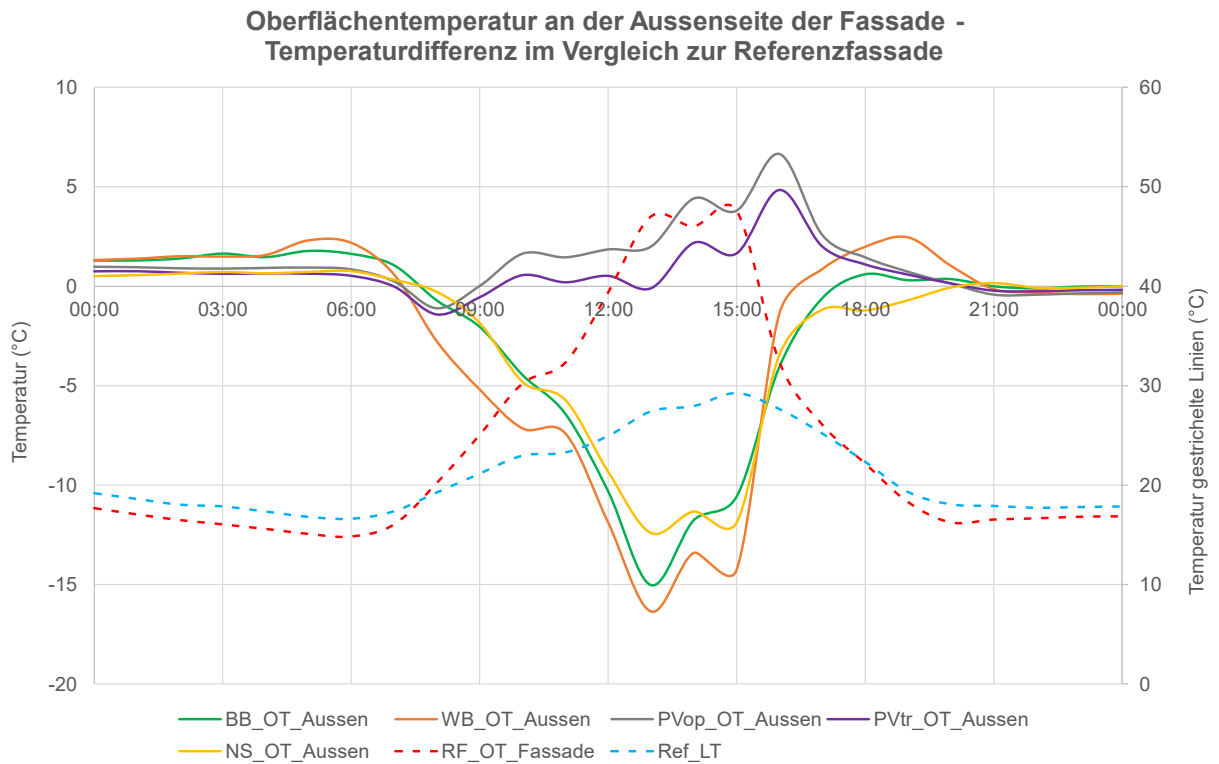


Abbildung 144: Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer Sommertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



### Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade

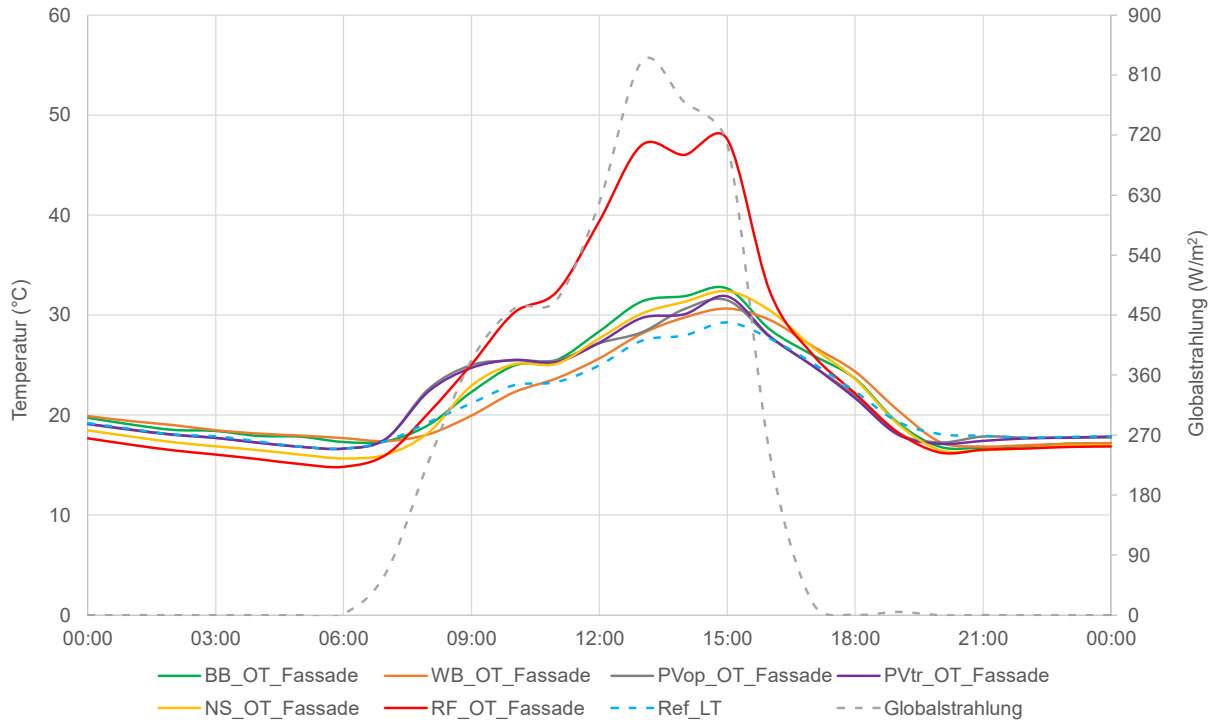


Abbildung 145: Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer Sommertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 83: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
Mittelwert	°C	21.0	24.3	22.0	21.5	21.7	21.7	21.4
	$\Delta T$ zur RF			-2.3	-2.8	-2.5	-2.5	-2.8
Max	°C	29.9	49.9	33.3	31.1	32.7	33.6	33.3
	$\Delta T$ zur RF			-16.6	-18.8	-17.2	-16.3	-16.6
Min	°C	16.4	14.8	16.5	16.7	16.6	16.5	15.6
	$\Delta T$ zur RF			1.7	1.9	1.8	1.7	0.8

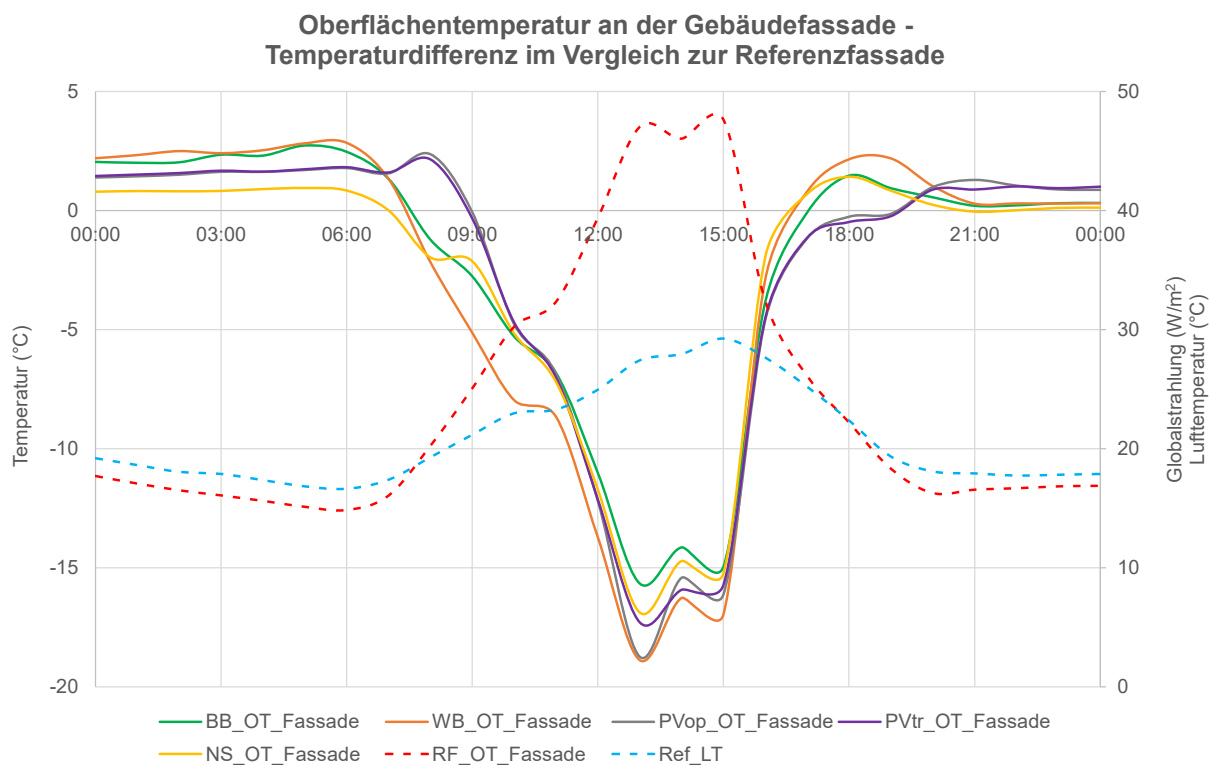


Abbildung 146: Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer Sommertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



### 14.4.3 Bewölkter, milder Tag

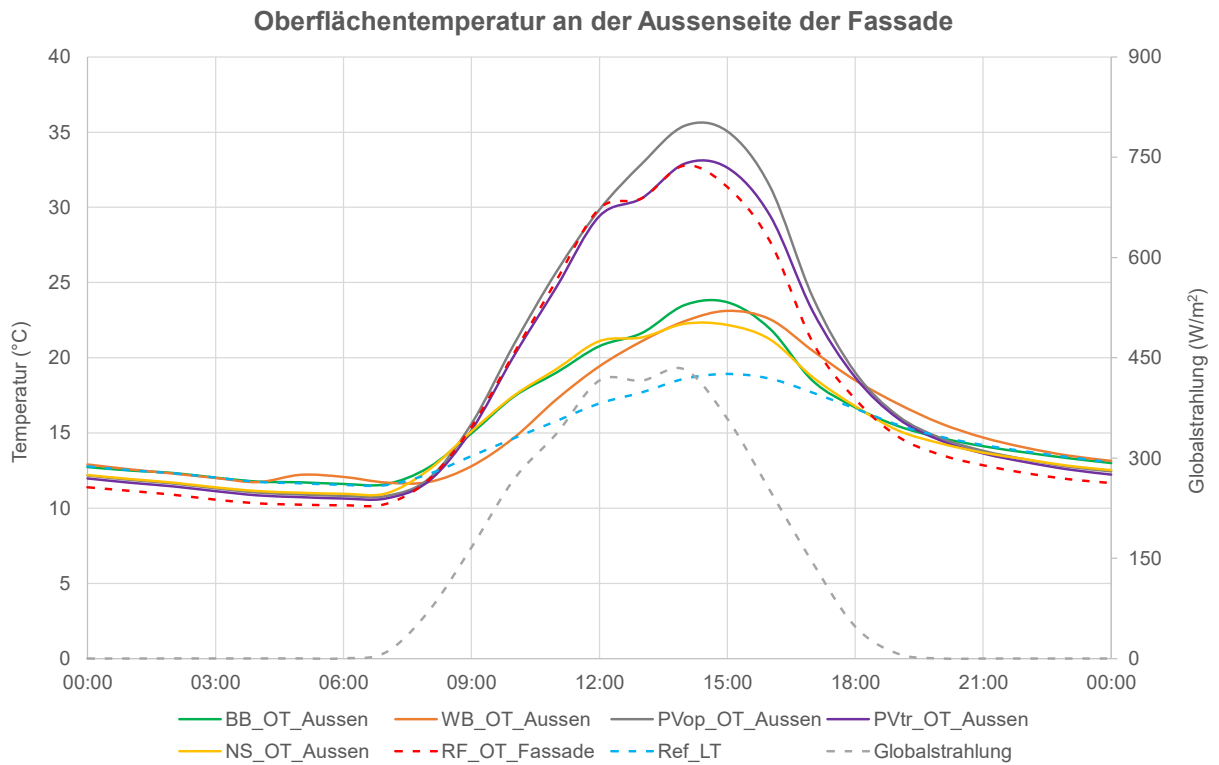


Abbildung 147: Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter, milder Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 84: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassadensysteme. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	14.5	17.2	15.8	15.7	18.5	17.8	15.4
	$\Delta T$ zur RF			-1.5	-1.6	1.2	0.6	-1.9
<b>Max</b>	°C	19.0	34.5	24.3	23.2	36.7	34.1	22.8
	$\Delta T$ zur RF			-10.2	-11.3	2.2	-0.4	-11.7
<b>Min</b>	°C	11.4	10.1	11.5	11.6	10.7	10.6	10.8
	$\Delta T$ zur RF			1.4	1.5	0.7	0.5	0.7

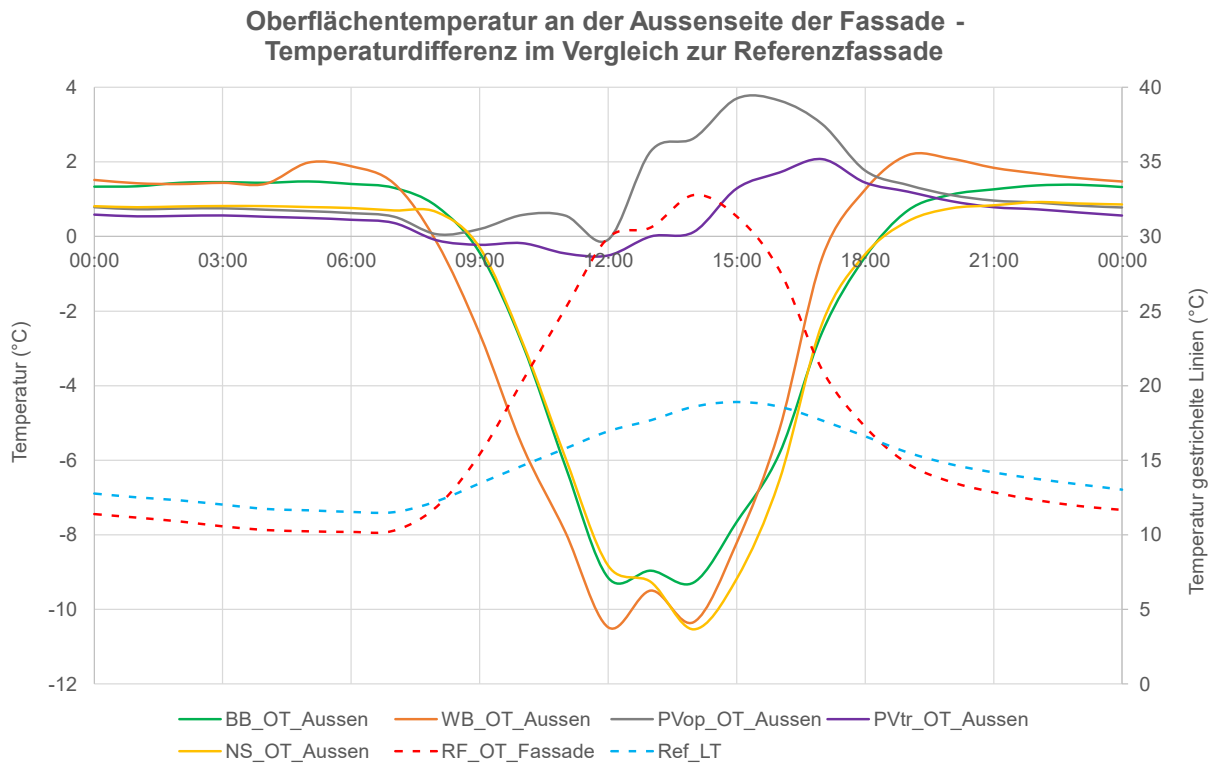


Abbildung 148: Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölckter, milder Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).

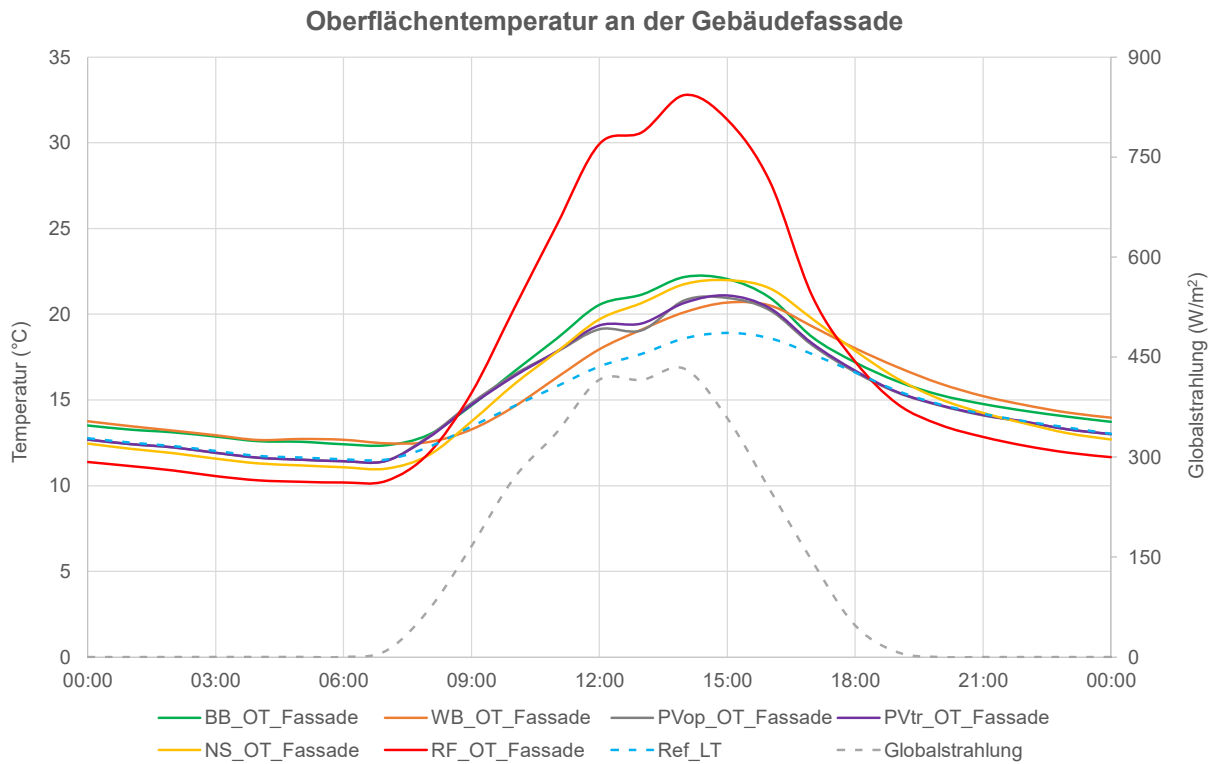


Abbildung 149: Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter, milder Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 85: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	14.5	17.2	15.9	15.6	15.1	15.2	15.3
	$\Delta T$ zur RF			-1.3	-1.7	-2.1	-2.1	-2.0
<b>Max</b>	°C	19.0	34.5	22.6	20.8	21.4	21.5	22.2
	$\Delta T$ zur RF			-11.9	-13.7	-13.1	-13.0	-12.3
<b>Min</b>	°C	11.4	10.1	12.3	12.4	11.3	11.3	10.9
	$\Delta T$ zur RF			2.2	2.3	1.2	1.2	0.9



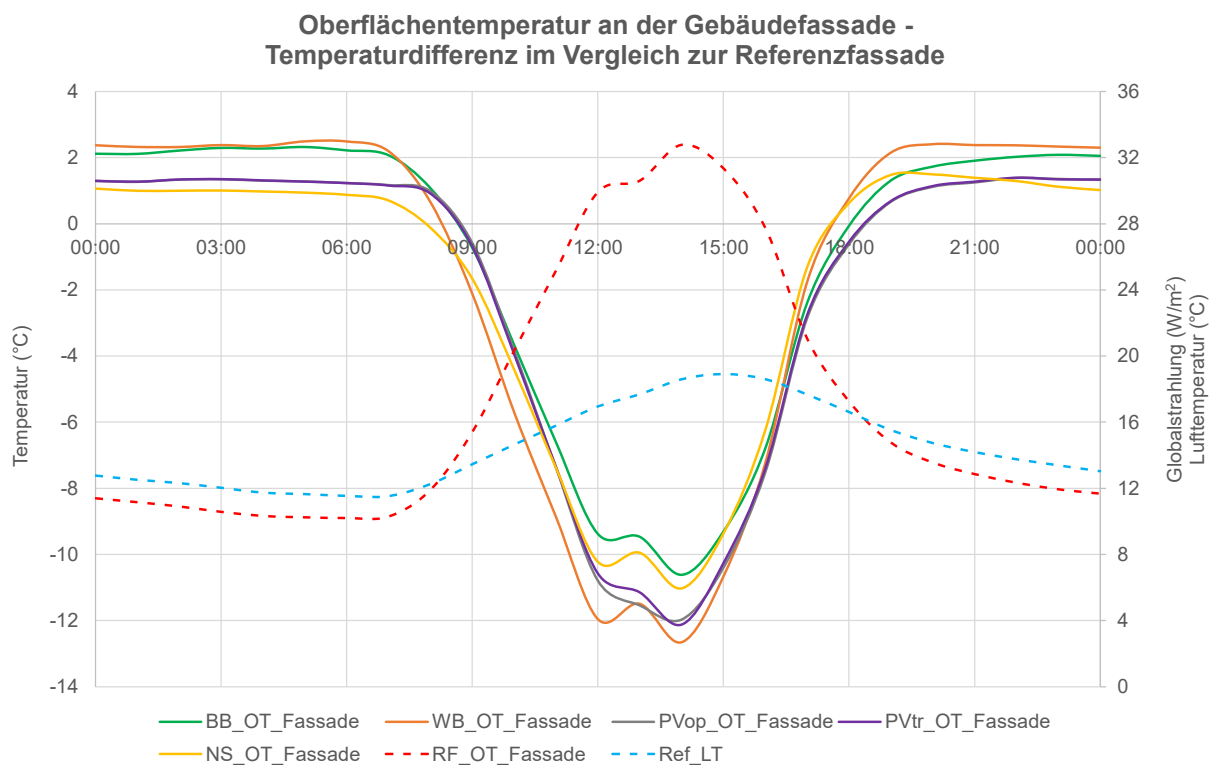


Abbildung 150: Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter, milder Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



#### 14.4.4 Regnerischer, milder Tag

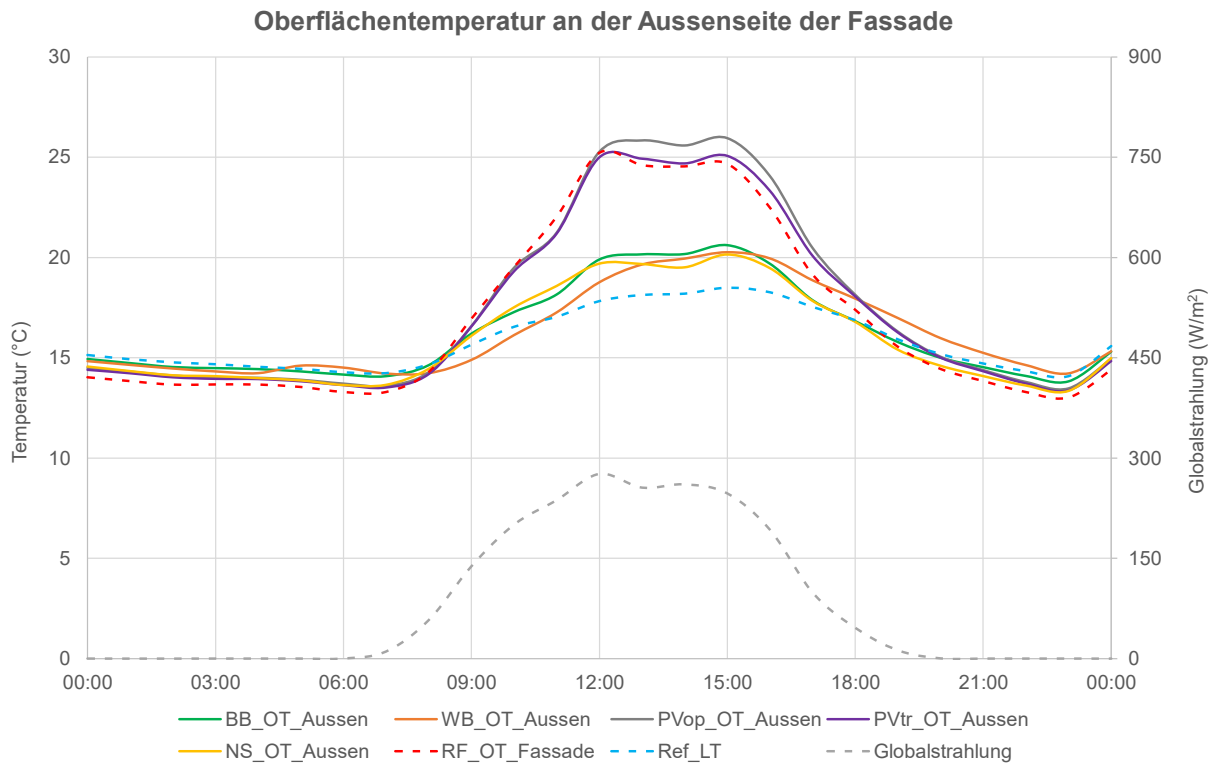


Abbildung 151: Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer, milder Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 86: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassadensysteme. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	15.8	17.1	16.3	16.3	17.6	17.4	16.0
	$\Delta T$ zur RF			-0.8	-0.8	0.5	0.3	-1.1
<b>Max</b>	°C	18.6	26.6	21.1	20.4	26.4	25.9	20.6
	$\Delta T$ zur RF			-5.5	-6.2	-0.2	-0.6	-6.0
<b>Min</b>	°C	14.0	12.9	13.7	14.1	13.4	13.3	13.2
	$\Delta T$ zur RF			0.8	1.1	0.4	0.3	0.3

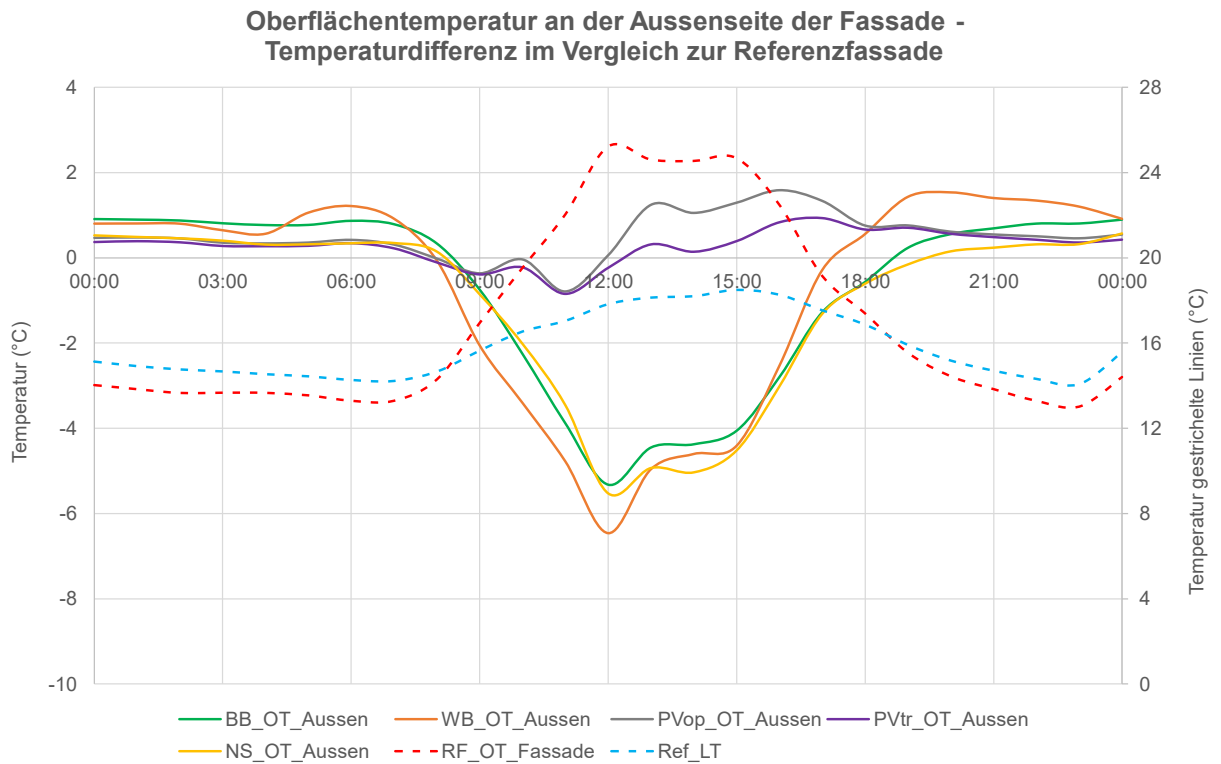


Abbildung 152: Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer, milder Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).

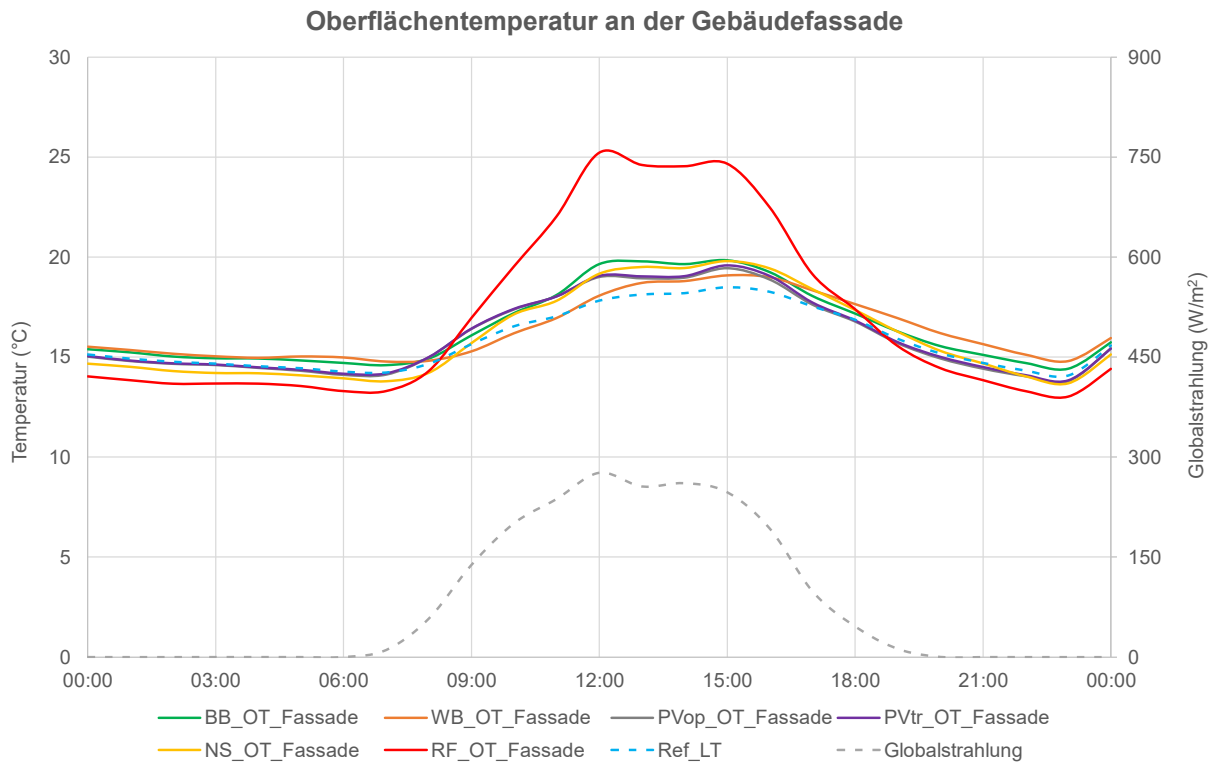


Abbildung 153: Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer, milder Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 87: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	15.8	17.1	16.5	16.4	16.1	16.1	16.1
	$\Delta T$ zur RF			-0.6	-0.7	-1.0	-1.0	-1.0
<b>Max</b>	°C	18.6	26.6	20.0	19.2	19.7	19.8	19.9
	$\Delta T$ zur RF			-6.5	-7.4	-6.8	-6.7	-6.6
<b>Min</b>	°C	14.0	12.9	14.3	14.7	13.7	13.7	13.6
	$\Delta T$ zur RF			1.4	1.8	0.7	0.8	0.6

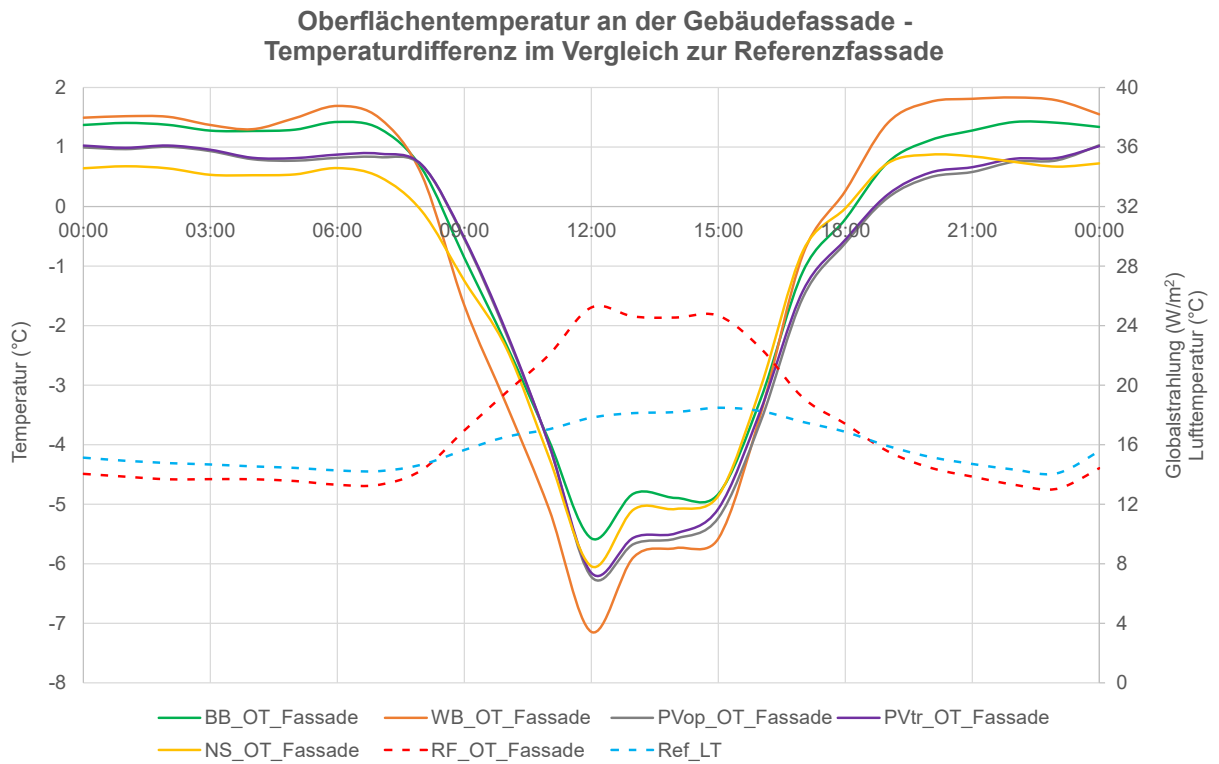


Abbildung 154: Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer, milder Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



#### 14.4.5 Sonniger, kalter Tag

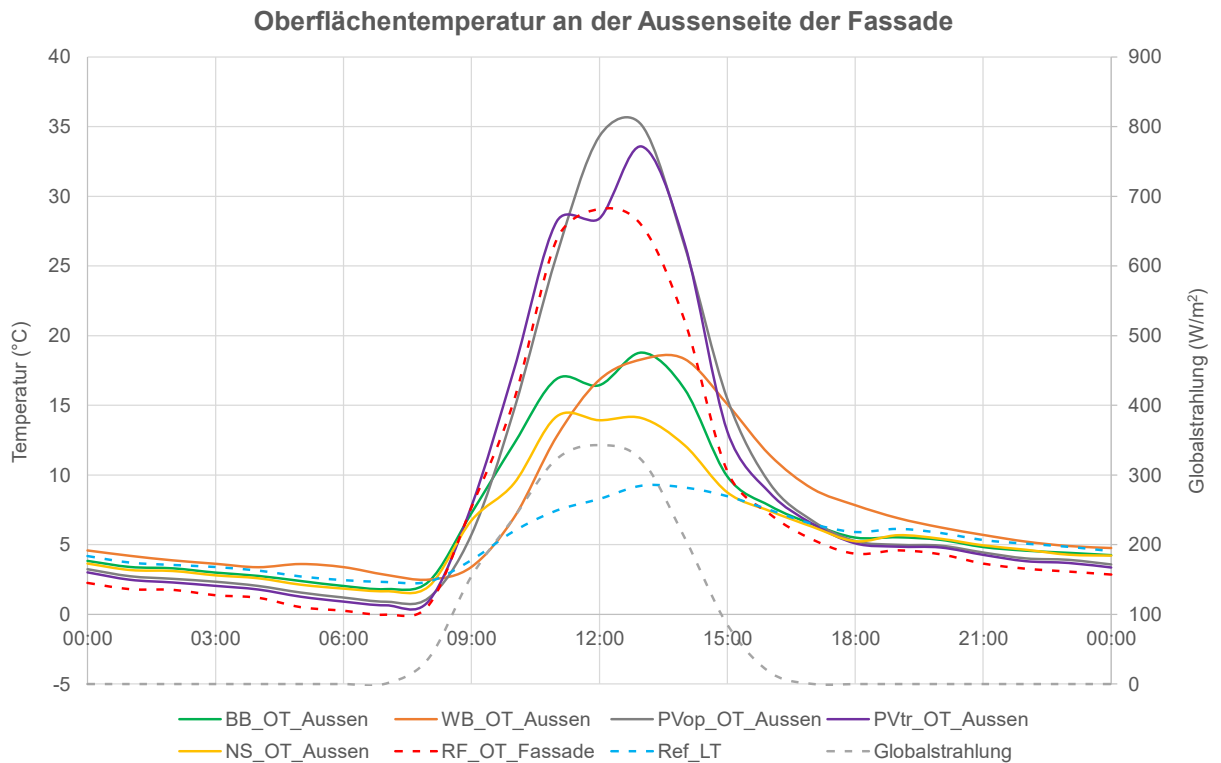


Abbildung 155: Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «sonniger, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 88: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassadensysteme. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	5.3	7.7	7.0	7.5	9.1	8.8	6.1
	$\Delta T$ zur RF			-0.7	-0.1	1.5	1.2	-1.6
<b>Max</b>	°C	9.6	34.0	19.9	18.5	37.6	35.4	15.8
	$\Delta T$ zur RF			-14.1	-15.5	3.6	1.4	-18.2
<b>Min</b>	°C	2.1	-0.3	1.7	2.4	0.8	0.5	1.3
	$\Delta T$ zur RF			1.9	2.7	1.0	0.7	1.5

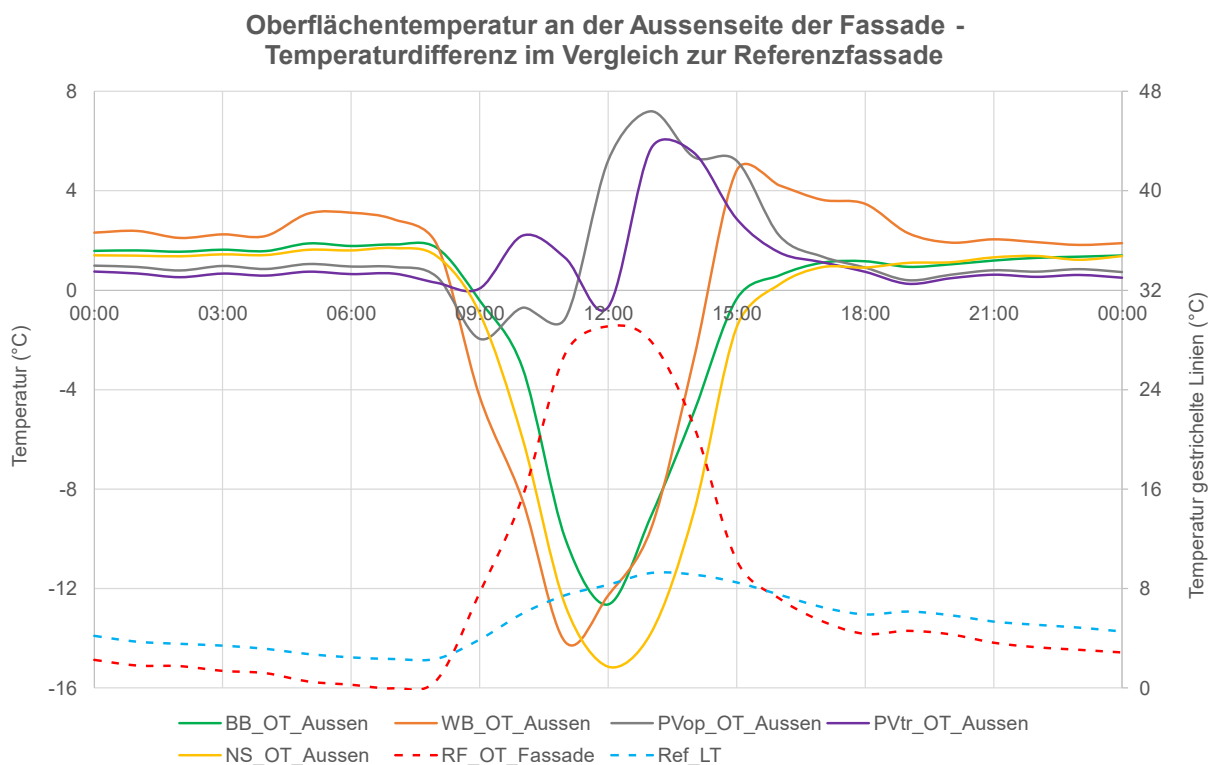


Abbildung 156: Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «sonniger, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



### Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade

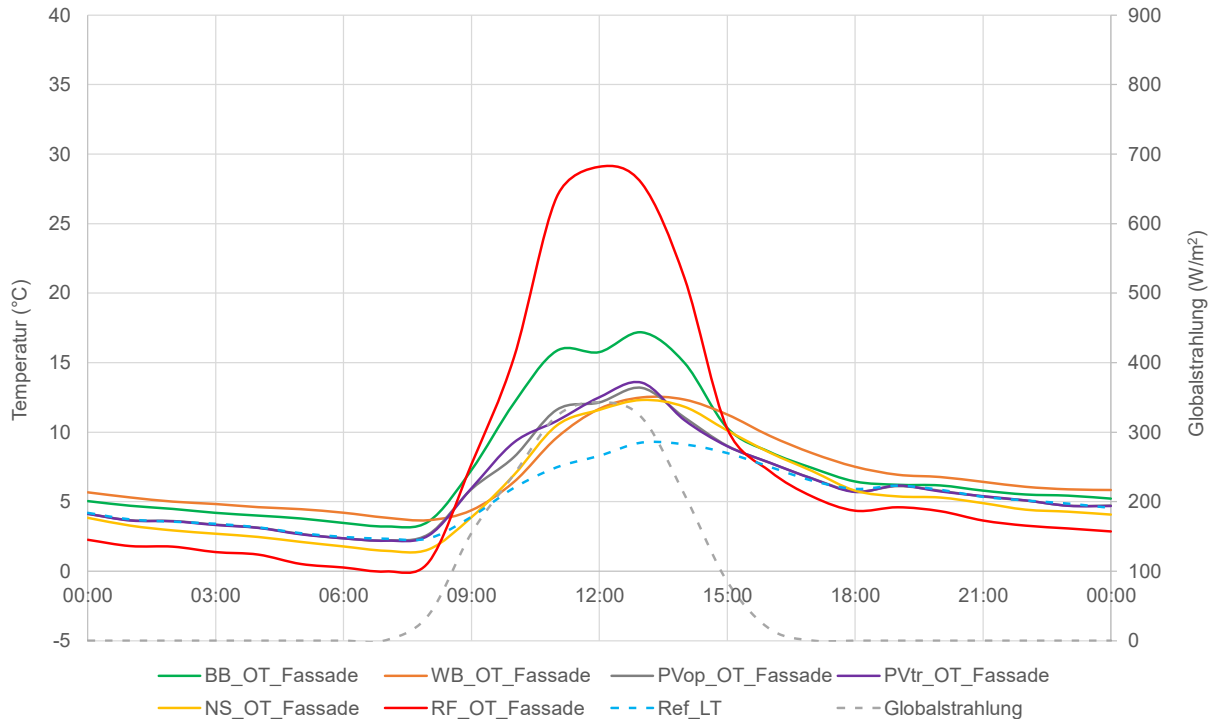


Abbildung 157: Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «sonniger, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 89: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
Mittelwert	°C	5.3	7.7	7.6	7.0	6.1	6.1	5.6
	$\Delta T$ zur RF			-0.1	-0.7	-1.6	-1.5	-2.0
Max	°C	9.6	34.0	18.0	12.7	14.5	15.0	12.5
	$\Delta T$ zur RF			-16.0	-21.3	-19.5	-19.0	-21.5
Min	°C	2.1	-0.3	3.1	3.6	1.9	1.8	1.3
	$\Delta T$ zur RF			3.3	3.8	2.1	2.0	1.6



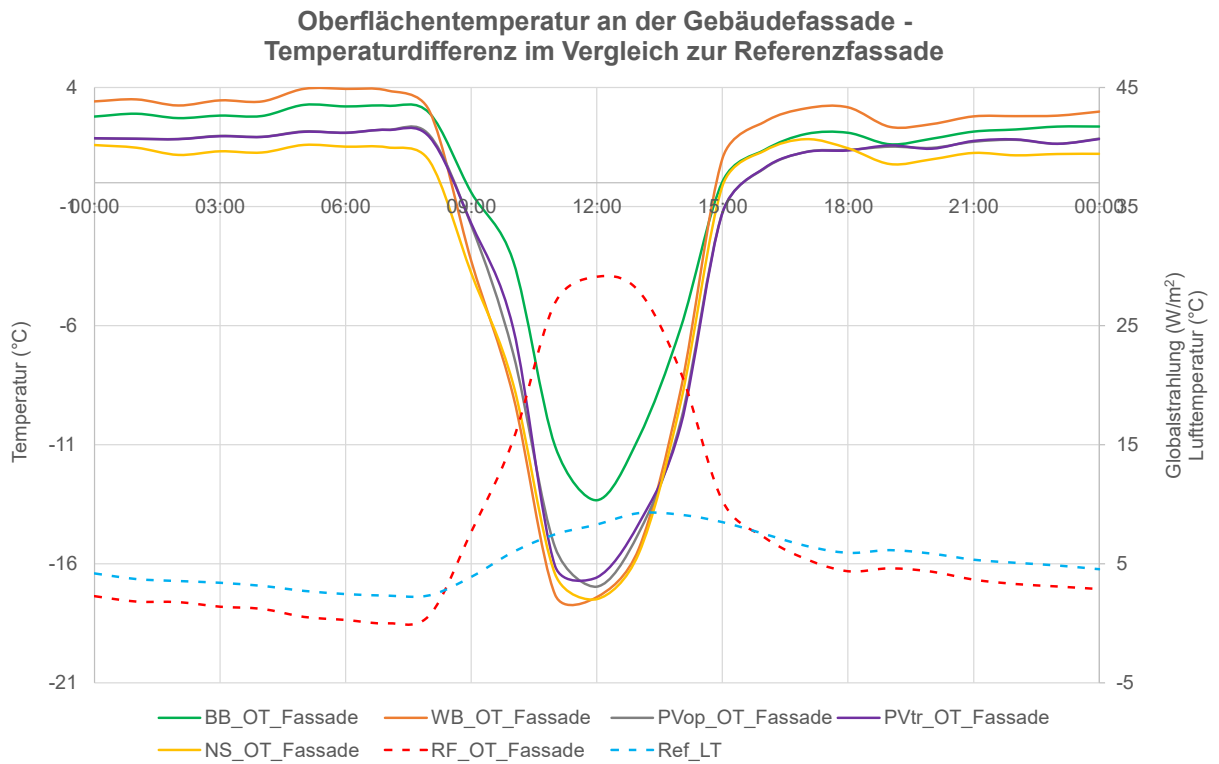


Abbildung 158: Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «sonniger, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



#### 14.4.6 Bewölkter, kalter Tag

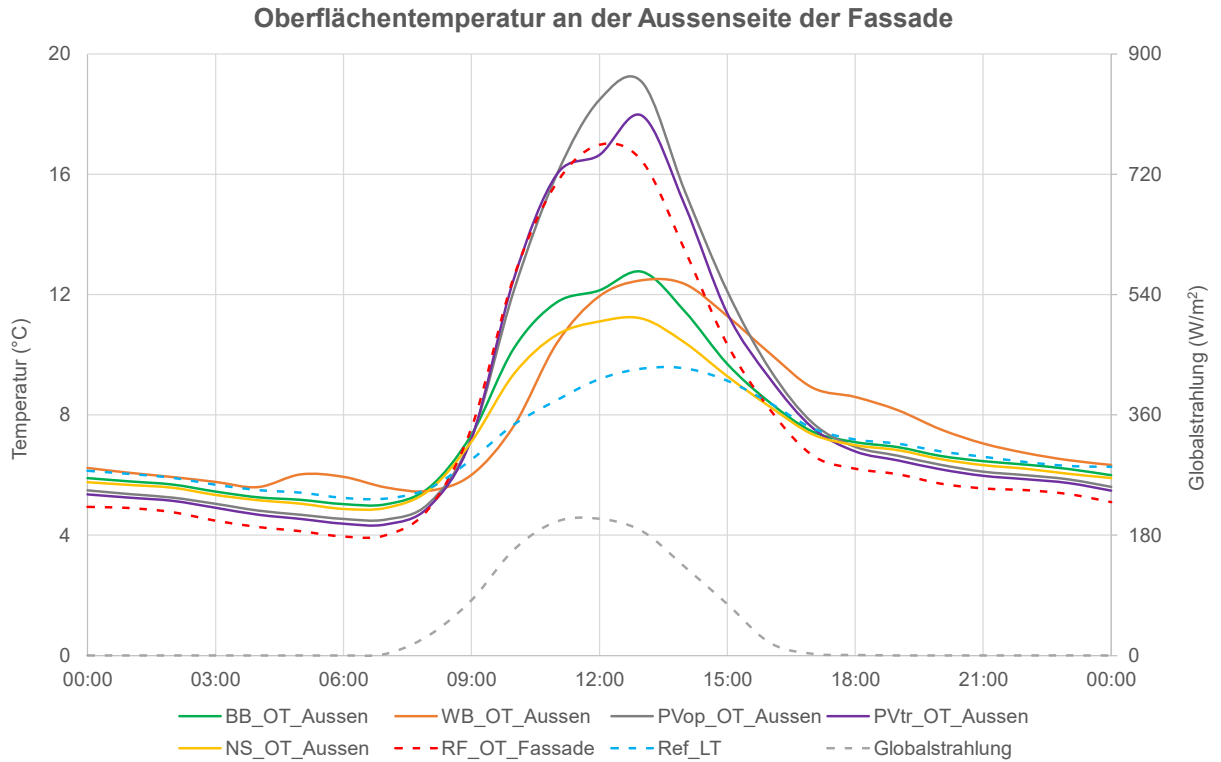


Abbildung 159: Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 90: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassadensysteme. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	7.0	7.6	7.5	7.8	8.3	8.1	7.1
	$\Delta T$ zur RF			-0.1	0.2	0.7	0.5	-0.5
<b>Max</b>	°C	9.6	17.9	13.0	12.6	19.8	18.4	11.6
	$\Delta T$ zur RF			-4.9	-5.3	1.9	0.5	-6.3
<b>Min</b>	°C	5.2	3.9	5.0	5.4	4.5	4.3	4.8
	$\Delta T$ zur RF			1.1	1.6	0.6	0.5	0.9

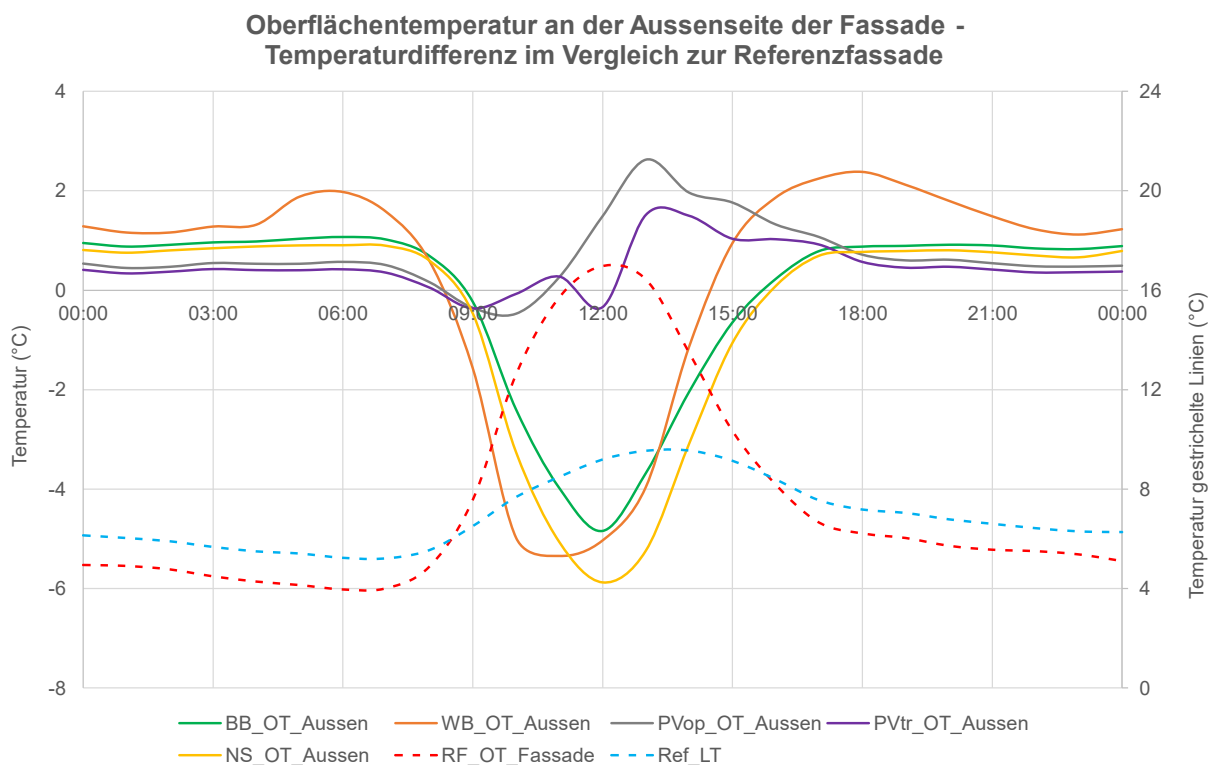


Abbildung 160: Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölker, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



### Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade

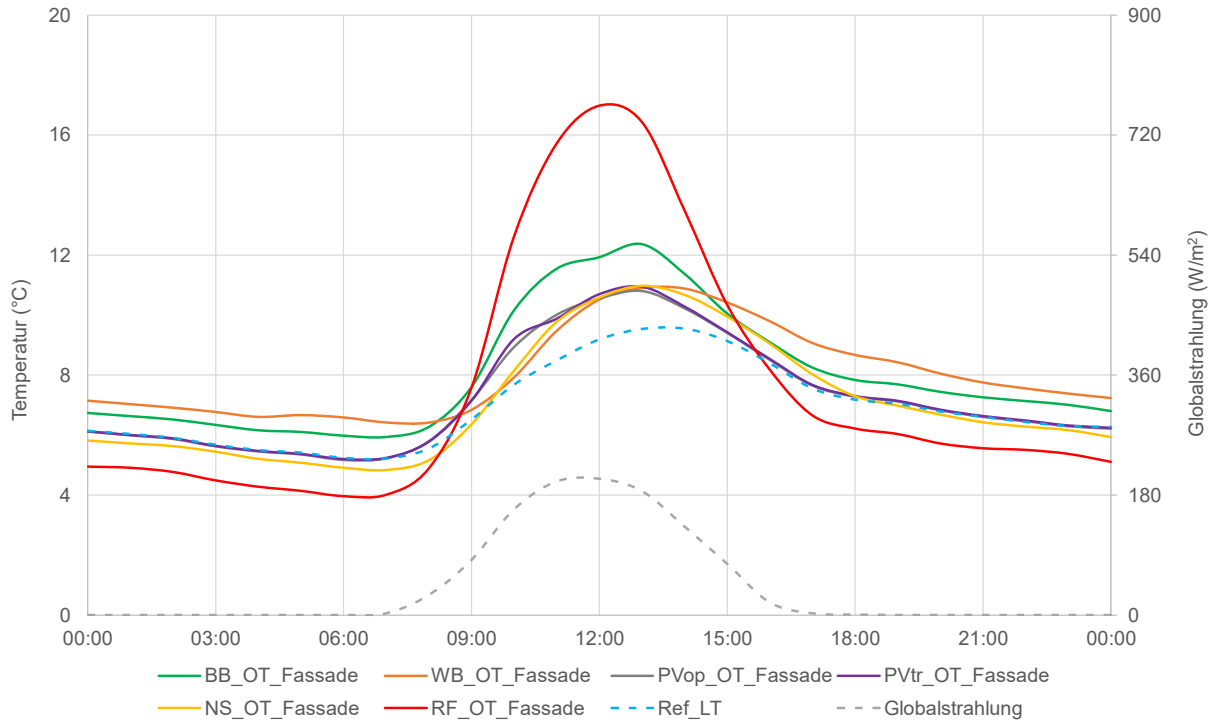


Abbildung 161: Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölkter, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 91: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
Mittelwert	°C	7.0	7.6	8.1	8.1	7.3	7.3	7.1
	$\Delta T$ zur RF			0.4	0.5	-0.4	-0.3	-0.5
Max	°C	9.6	17.9	12.6	11.0	11.1	11.2	11.1
	$\Delta T$ zur RF			-5.3	-6.9	-6.8	-6.7	-6.8
Min	°C	5.2	3.9	5.9	6.4	5.1	5.1	4.8
	$\Delta T$ zur RF			2.0	2.5	1.2	1.2	0.9

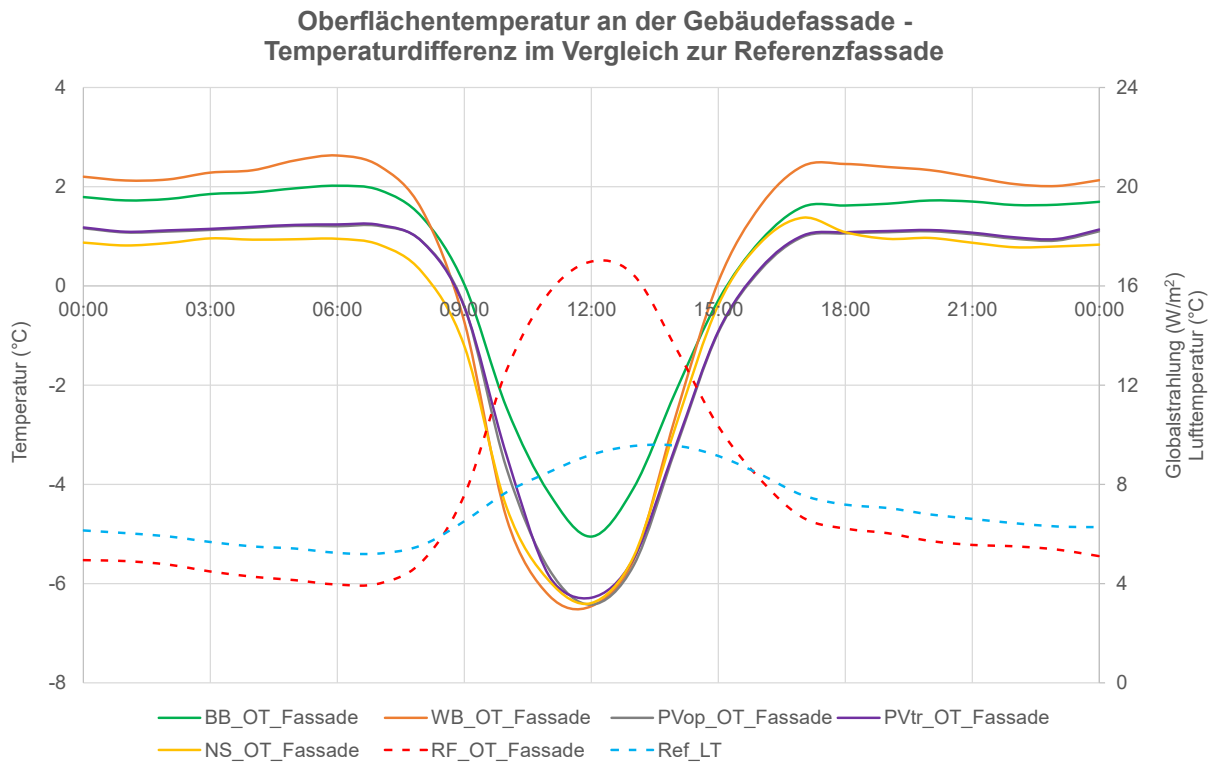


Abbildung 162: Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «bewölker, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



#### 14.4.7 Regnerischer, kalter Tag

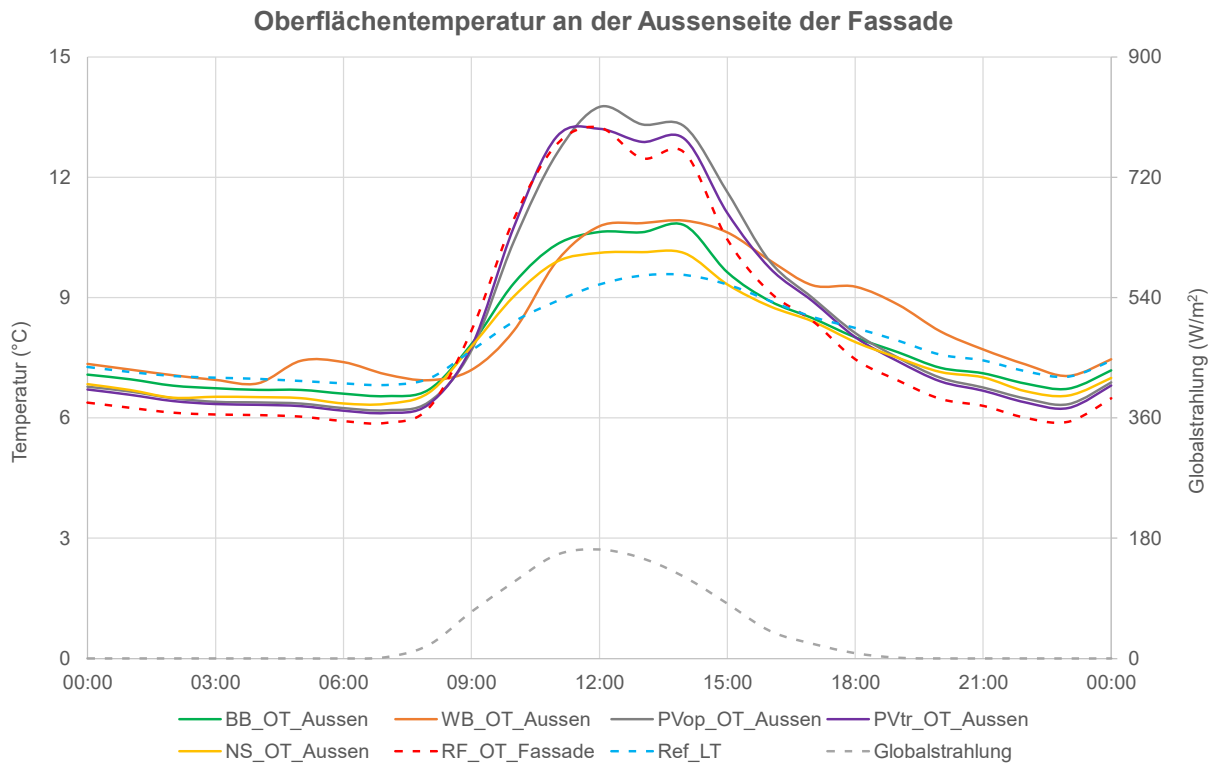


Abbildung 163: Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 92: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassadensysteme. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	7.9	8.0	8.0	8.3	8.4	8.3	7.7
	$\Delta T$ zur RF			-0.1	0.3	0.4	0.3	-0.3
<b>Max</b>	°C	9.6	13.7	11.0	11.0	13.9	13.4	10.3
	$\Delta T$ zur RF			-2.7	-2.7	0.2	-0.3	-3.4
<b>Min</b>	°C	6.8	5.8	6.5	6.8	6.2	6.1	6.3
	$\Delta T$ zur RF			0.6	1.0	0.3	0.3	0.4

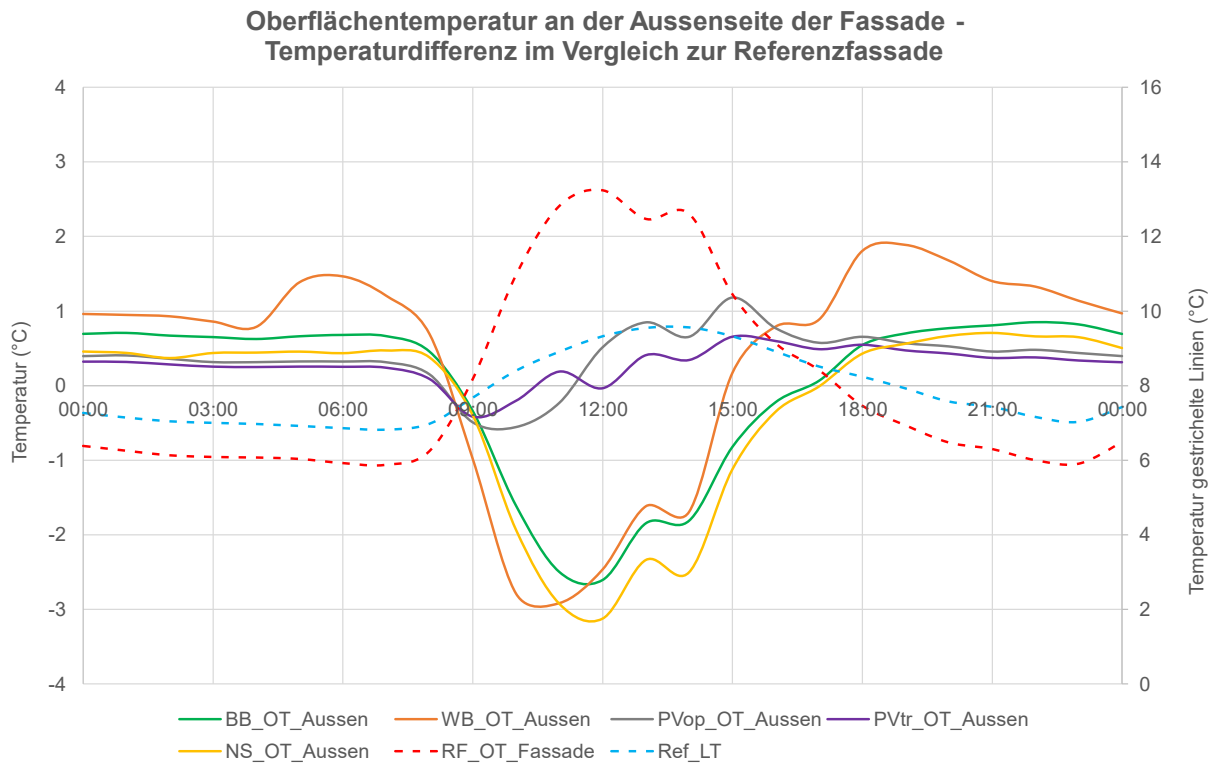


Abbildung 164: Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).

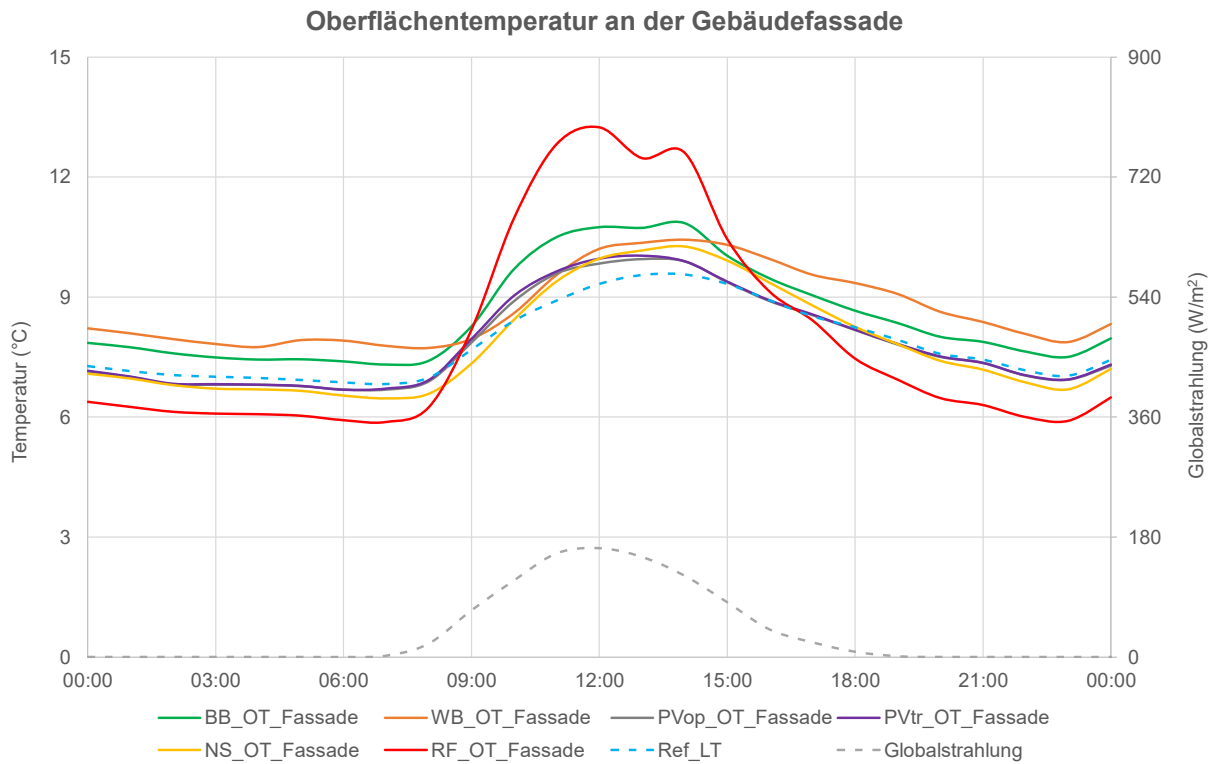


Abbildung 165: Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 93: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	7.9	8.0	8.5	8.7	7.9	7.9	7.8
	$\Delta T$ zur RF			0.5	0.7	-0.1	-0.1	-0.2
<b>Max</b>	°C	9.6	13.7	10.9	10.5	10.1	10.2	10.3
	$\Delta T$ zur RF			-2.8	-3.2	-3.6	-3.5	-3.4
<b>Min</b>	°C	6.8	5.8	7.3	7.7	6.6	6.6	6.5
	$\Delta T$ zur RF			1.4	1.9	0.8	0.8	0.6



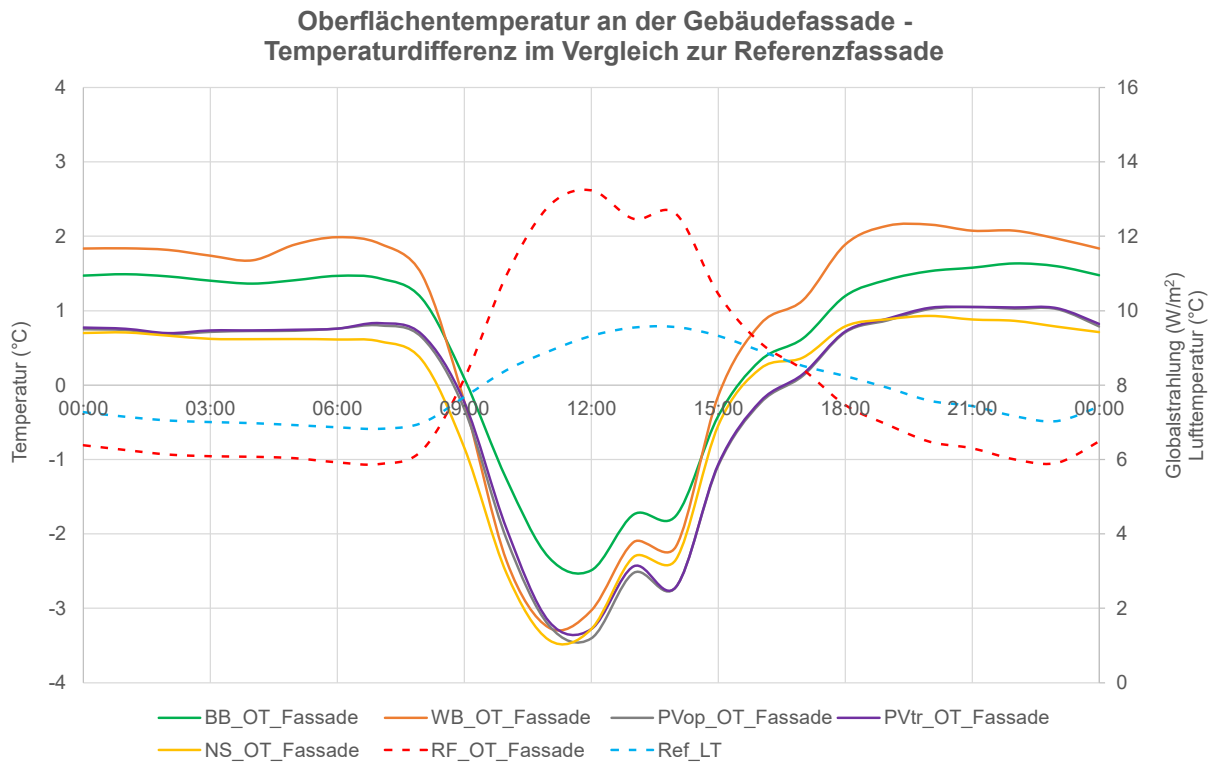


Abbildung 166: Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer, kalter Tag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



#### 14.4.8 Sonniger Wintertag

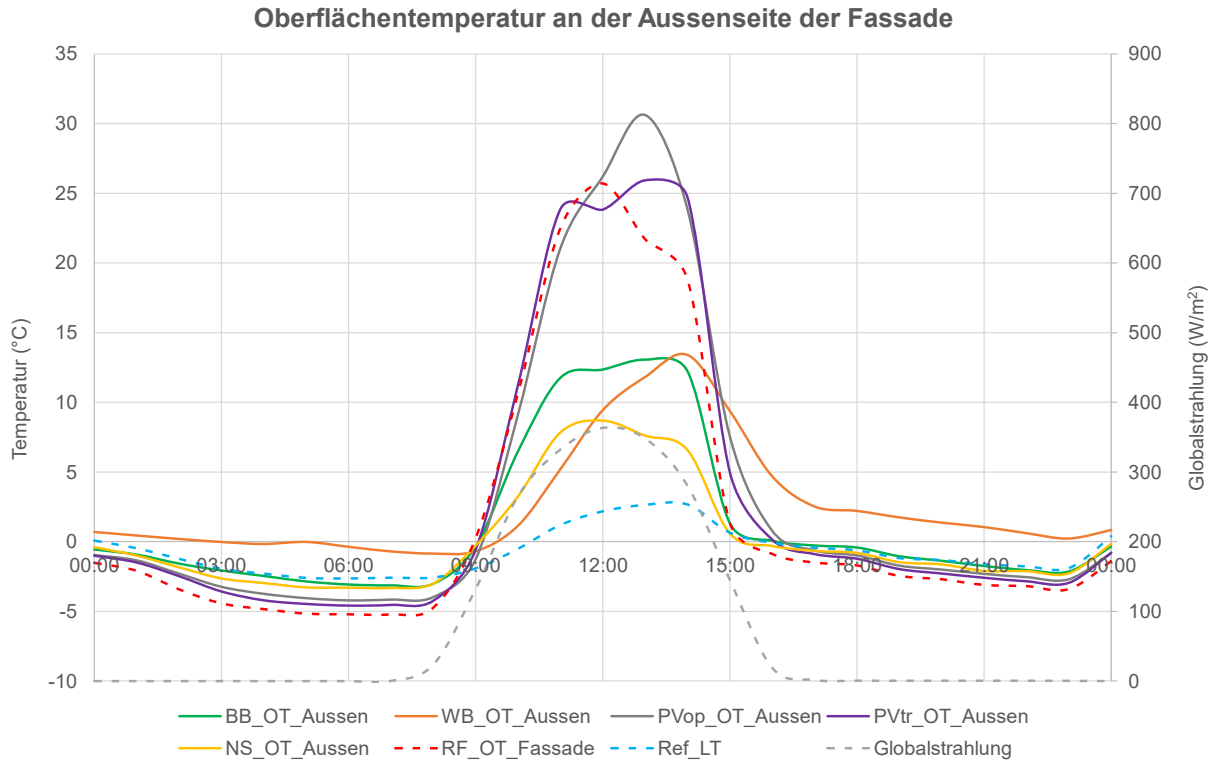


Abbildung 167: Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «sonniger Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 94: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassadensysteme. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	-0.8	1.9	1.2	2.6	3.2	2.9	0.0
	$\Delta T$ zur RF			-0.7	0.7	1.3	1.0	-1.9
<b>Max</b>	°C	3.3	27.4	15.3	14.1	33.1	30.3	9.8
	$\Delta T$ zur RF			-12.2	-13.4	5.7	2.8	-17.7
<b>Min</b>	°C	-2.9	-5.4	-3.2	-0.9	-4.3	-4.7	-3.7
	$\Delta T$ zur RF			2.2	4.5	1.1	0.7	1.7

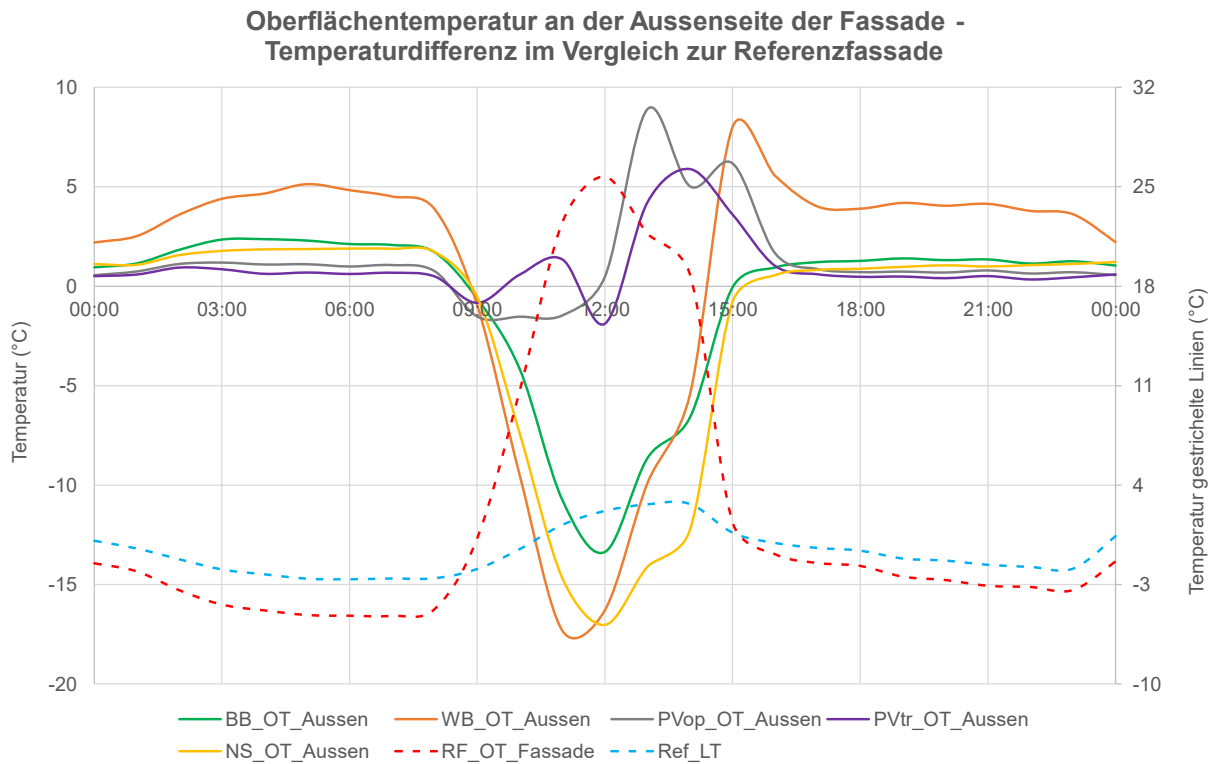


Abbildung 168: Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «sonniger Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



### Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade

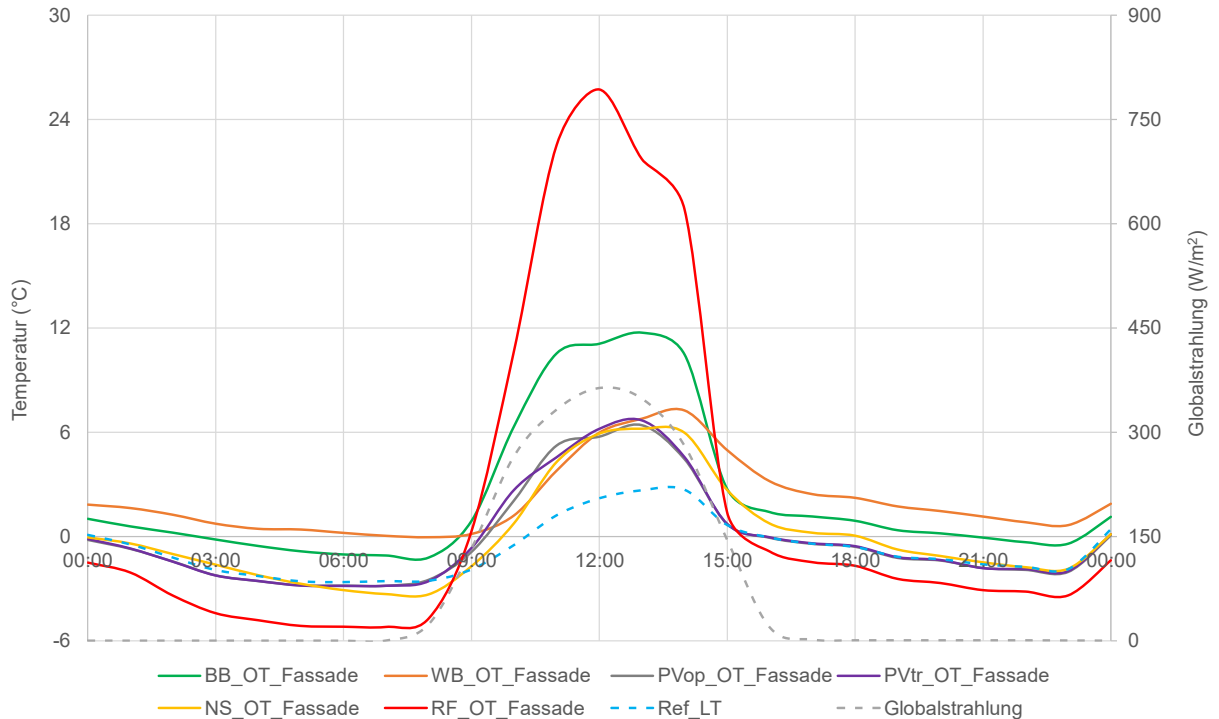


Abbildung 169: Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «sonniger Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 95: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
Mittelwert	°C	-0.8	1.9	2.2	2.1	-0.2	-0.1	0.0
	$\Delta T$ zur RF			0.3	0.2	-2.1	-2.0	-1.9
Max	°C	3.3	27.4	12.8	7.4	7.7	7.7	6.5
	$\Delta T$ zur RF			-14.6	-20.0	-19.7	-19.8	-20.9
Min	°C	-2.9	-5.4	-1.4	-0.1	-3.2	-3.2	-3.6
	$\Delta T$ zur RF			4.0	5.3	2.2	2.2	1.8

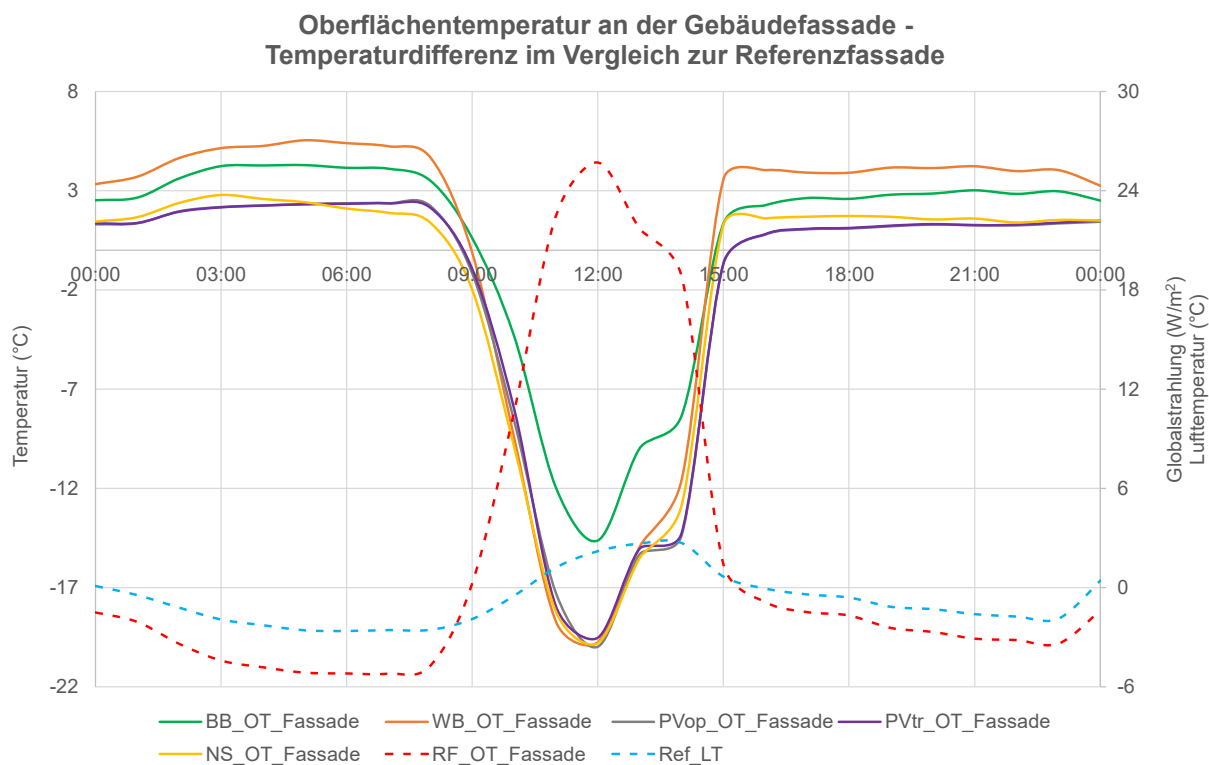


Abbildung 170: Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «sonniger Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).



### 14.4.9 Regnerischer Wintertag

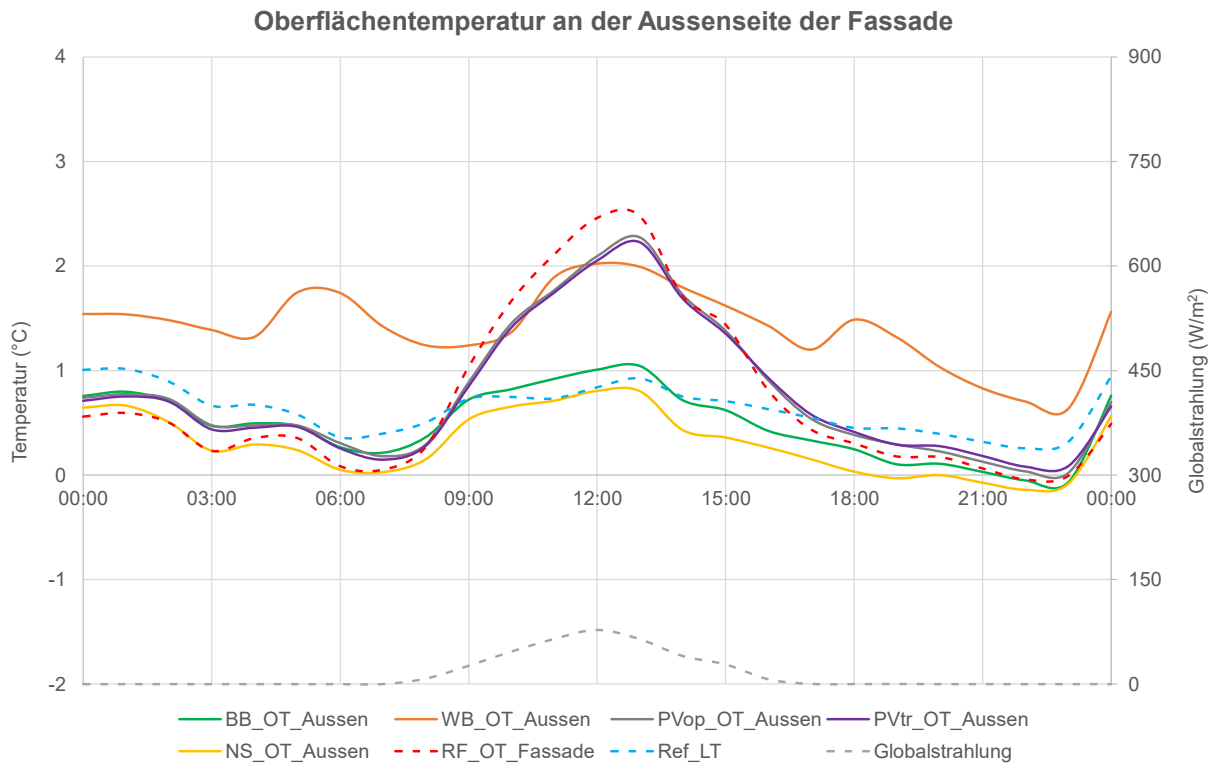


Abbildung 171: Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 96: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Aussenseite der Fassadensysteme. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	0.6	0.7	0.5	1.4	0.8	0.8	0.3
	$\Delta T$ zur RF			-0.3	0.7	0.0	0.0	-0.4
<b>Max</b>	°C	1.1	2.8	1.1	2.2	2.4	2.4	1.0
	$\Delta T$ zur RF			-1.7	-0.7	-0.4	-0.5	-1.8
<b>Min</b>	°C	0.2	-0.1	-0.2	0.6	0.0	0.0	-0.2
	$\Delta T$ zur RF			0.0	0.7	0.1	0.2	-0.1

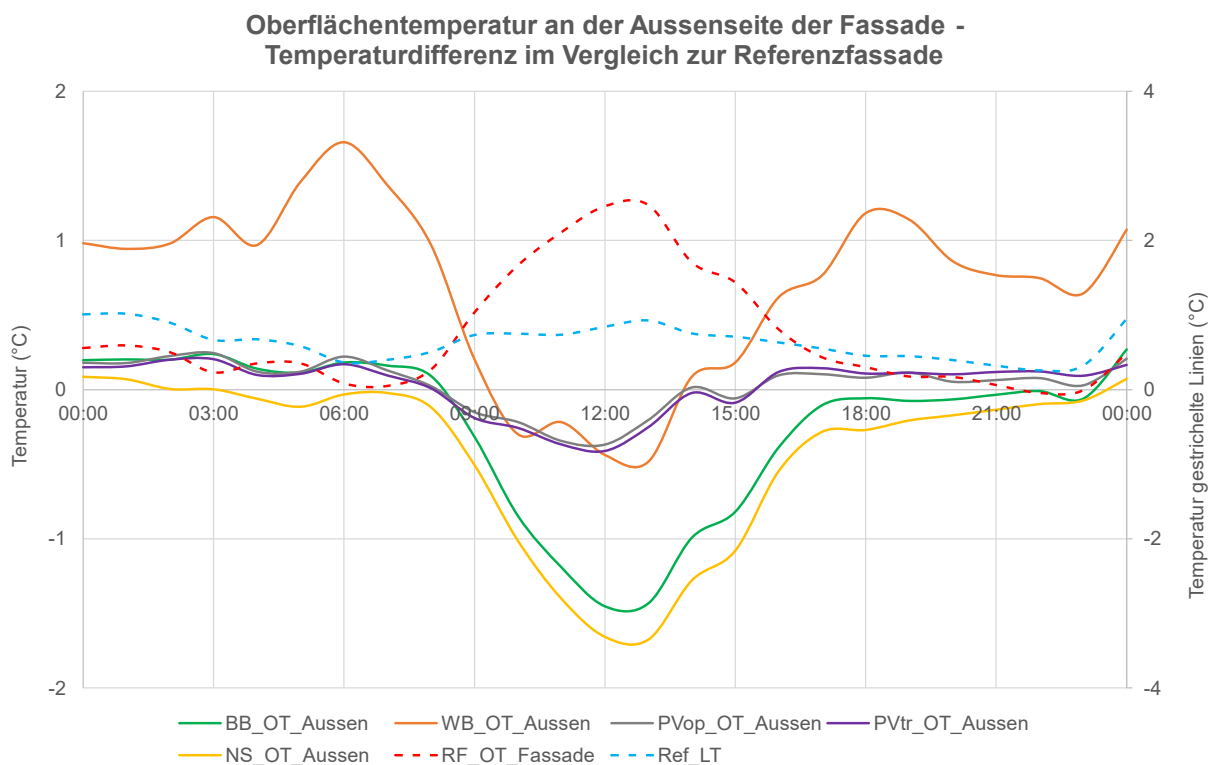


Abbildung 172: Oberflächentemperatur an der Aussenseite der Fassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade («rot gestrichelte Linie»). Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).

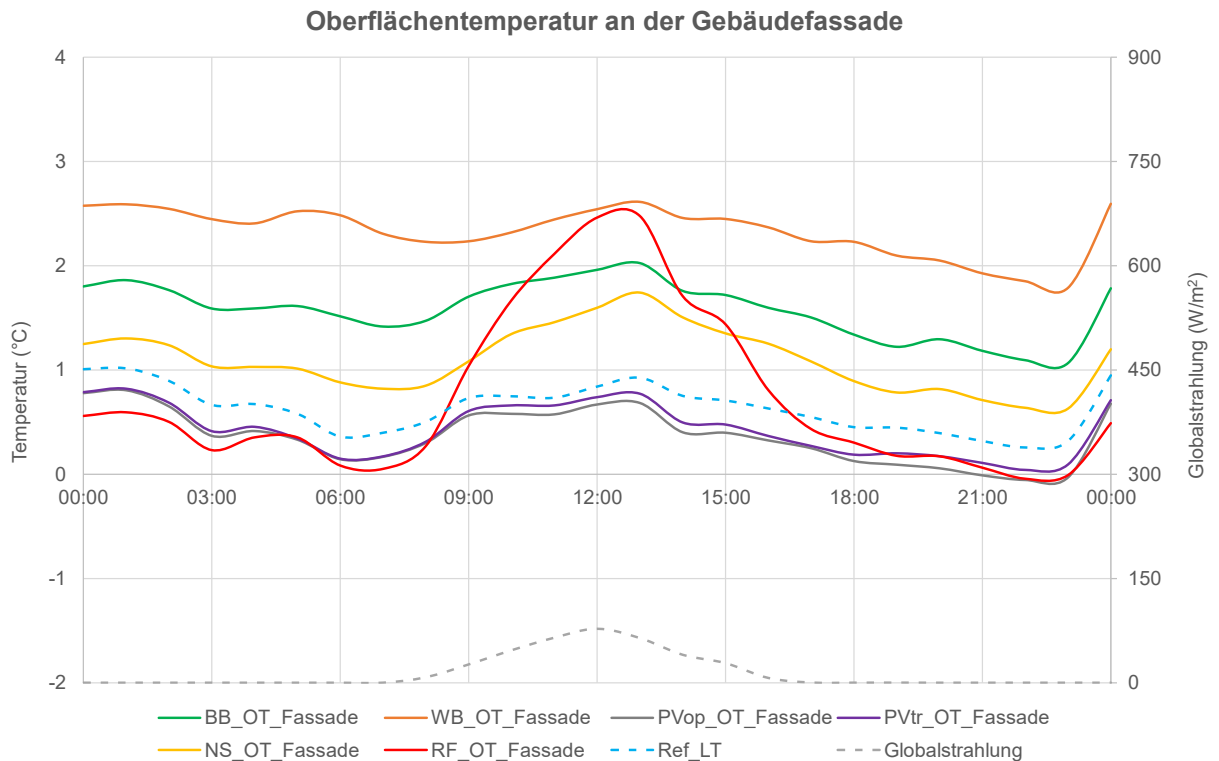


Abbildung 173: Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot»), die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt») sowie die Globalstrahlung («grau gestrichelt»).

Tabelle 97: Übersicht Messwerte, dargestellt sind die Mittel-, Maximal- und Mindestwerte der Oberflächentemperaturen an der Gebäudefassade. Ebenso abgebildet ist die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zur Messreferenzfassade (RF).

		LT	Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade					
			RF	BB	WB	PVop	PVtr	NS
<b>Mittelwert</b>	°C	0.6	0.7	1.6	2.3	0.4	0.4	1.1
	$\Delta T$ zur RF			0.8	1.6	-0.4	-0.3	0.4
<b>Max</b>	°C	1.1	2.8	2.1	2.7	0.9	0.9	1.8
	$\Delta T$ zur RF			-0.7	-0.1	-2.0	-1.9	-1.0
<b>Min</b>	°C	0.2	-0.1	1.0	1.8	-0.1	0.0	0.5
	$\Delta T$ zur RF			1.1	1.9	0.0	0.1	0.6



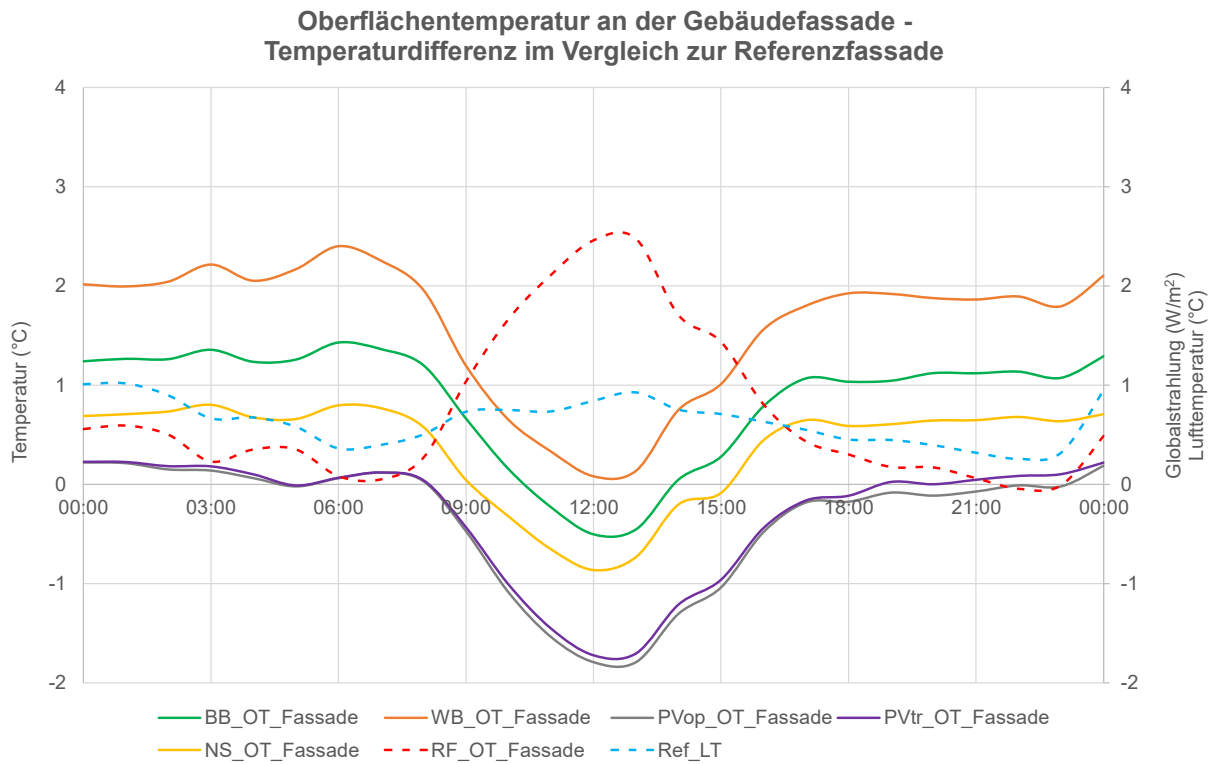


Abbildung 174: Oberflächentemperatur an der Gebäudefassade, Temperaturdifferenz im Vergleich zur Messreferenzfassade «rot gestrichelte Linie». Die Messdaten zeigen die durchschnittlichen Werte aller Tage, welche als «regnerischer Wintertag» kategorisiert wurden. Dargestellt ist die bodengebundene Fassadenbegrünung (BB, «grün»), die wandgebundene Fassadenbegrünung (WB, «orange»), die opake PV-Fassade (PVop, «grau»), die transparente PV-Fassade (PVtr, «violette»), der Nasse Schwamm (NS, «gelb»), die Messreferenzfassade (RF, «rot gestrichelt») sowie die Lufttemperatur (LT, «blau gestrichelt»).