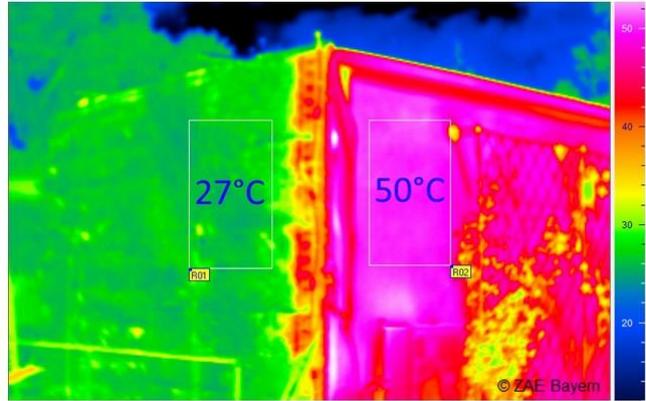


U-green

Titel: U-green – Bauphysikalische Bewertung von Fassaden- und Dachbegrünungen



Projektkoordinator:

Center for Applied Energy Research e.V. (CAE)
Magdalene-Schoch-Str. 3, 97074 Würzburg
Email: info@cae-zeroarbon.de



Kooperationspartner:

- Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG)
- Technische Universität Berlin (TUB)
FG Ökohydrologie & Landschaftsbewertung
Institut für Ökologie
- Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG)
- Beratungsstelle Energieeffizienz und Nachhaltigkeit (BEN) der Bayerischen Architektenkammer



Beratungsstelle
Energieeffizienz und
Nachhaltigkeit
Bayerische
Architektenkammer

Projektlaufzeit: 4 Jahre | 01.08.2021 – 31.10.2025

Fördergeber: Bundesministerium für Wirtschaft
und Energie (BMWE)

FkZ: 03EN1045A-C

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projekt U-green

Im Projekt U-green werden Fassaden- und Dachbegrünungssysteme unter Labor- und Realbedingungen thermisch charakterisiert sowie die Verdunstungsleistung von Pflanzen für Begrünungssysteme ermittelt. Die Messdaten sind in einem öffentlich zugänglichen Datenregister hinterlegt.

Die Messdaten dienen weiterhin zur Validierung von Simulationsmodellen zur Berechnung des energetischen Verhaltens von Gebäuden mit Dach- und Fassadenbegrünung. Die Simulationsergebnisse werden in einer Datenbank abgelegt und können über das U-green Berechnungstool für unterschiedliche Klimazonen und Typgebäude abgerufen werden. Dies erlaubt den Vergleich des Heizwärme- und Kältebedarfs eines Referenzgebäudes ohne Begrünung mit dem eines identischen Gebäudes mit unterschiedlichen Dach- und/oder Fassadenbegrünungssystemen. Auf diese Weise lässt sich das Energieeinsparpotenzial von Gebäudebegrünung für die hinterlegten Anwendungsfälle ermitteln.

Eine Übersicht der Projektergebnisse ist nachfolgend dargestellt.

1. Verdunstungsleistung von Pflanzen

In einer Klimakammer wird die Verdunstungsleistung unterschiedlicher Pflanzen unter kontrollierten Bedingungen bei 25 °C und 50 % rel. Feuchte unter Pflanzlampenbestrahlung bei ca. 70 kLux (entspricht einem sonnigen Tag) gemessen. Die Strömungsgeschwindigkeit der temperierten Luft in der Klimakammer beträgt ca. 1 m/s. Die Pflanzen werden für die Messungen auf Feldkapazität (Sättigung) gewässert und das Substrat mit Folie abgedeckt, damit nur die Transpiration der Pflanzen ohne Verdunstung durch das Substrat bestimmt werden kann. Die Substratevaporation ohne Pflanzen wird separat ermittelt. Die Verdunstungsmenge wird über Wägung bestimmt. Bei dicht wachsenden Pflanzen mit hoher Bodenbedeckung kann der Substratanteil vernachlässigt werden, bei luftig wachsenden Pflanzen kann der Substratanteil bis zu 30 % der Gesamtverdunstung betragen.



Abbildung 1: Transpirationsmessung der Pfeifenwinde *Aristolochia macrophylla* in der Klimakammer.

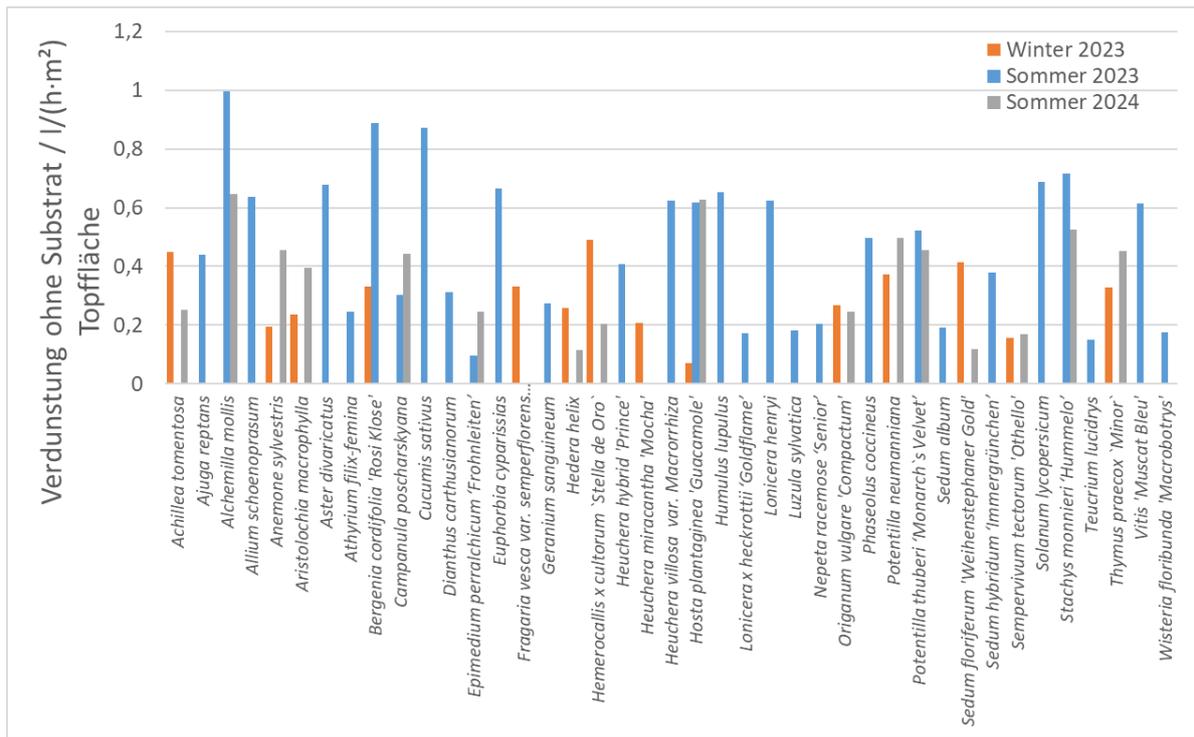


Abbildung 2: Gemessene Verdunstungsleistung (ohne Substratanteil) der untersuchten Pflanzen.

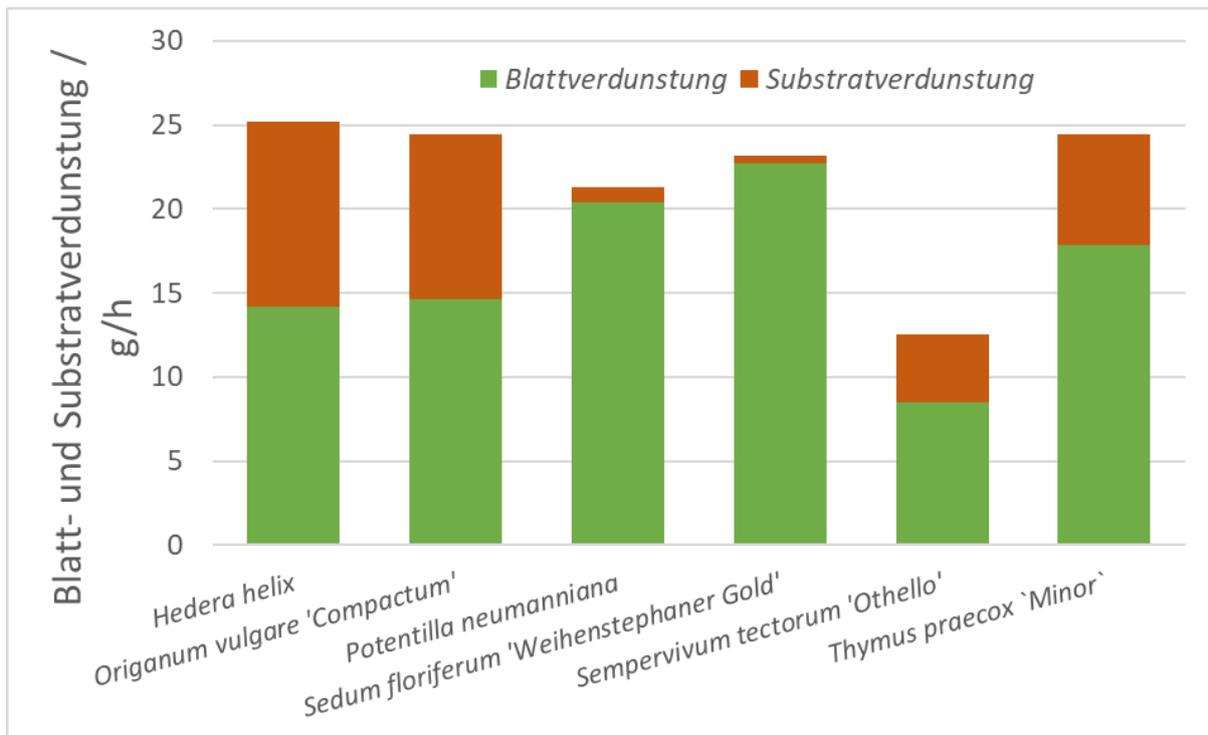


Abbildung 3: Verdunstungsleistung für Blattwerk und Substrat einiger Pflanzenarten mit unterschiedlicher Bodenbedeckung.

2. U-Wert-Messung

In einer Hot-Box-Apparatur wird der Wärmedämmwert (U-Wert) unterschiedlicher wandgebundener Fassadenbegrünungssysteme ermittelt. Die Hot-Box-Apparatur besteht aus einer warmen und einer kalten Kammer zwischen denen sich die Probe befindet. Der durch die Probe fließende Wärmestrom wird gemessen und stellt ein Maß für die Wärmedämmeigenschaften der Probe dar. Die Fassadenbegrünungssysteme werden dabei vor einer Referenzwand mit bekanntem U-Wert installiert. Die Probengröße liegt je nach System bei ca. 1 - 1,5 m². Die Messungen erfolgen einmal mit und einmal ohne Hinterlüftung der Fassadenbegrünung. Die Fassadenbegrünungssysteme werden an in der Referenzwand befestigten Halterungen aufgehängt, so dass der Wärmebrückeneffekt der Haltekonstruktion im U-Wert der Referenzwand enthalten ist.



Abbildung 4: Gabionensystem in der Hot-Box mit (links) und ohne Hinterlüftung durch Abdichtung des Luftspaltes mit Schaumstoff (rechts).

Tabelle 1: Gemessene U-Werte der untersuchten Fassadenbegrünungssysteme.

Systemaufbau	U-Wert in W/(m ² K)	U-Wert-Verbesserung durch Begrünung
Leermessung	0,83 ± 0,02	-
Gabionen (hinterlüftet)	0,75 ± 0,02	10 %
Rinnen (hinterlüftet)	0,74 ± 0,02	11 %
Vliestaschen 1 (hinterlüftet)	0,74 ± 0,02	11 %
Vliestaschen 2 (hinterlüftet)	0,72 ± 0,02	13 %
Gabionen (nicht hinterlüftet)	0,58 ± 0,02	30 %
Rinnen (nicht hinterlüftet)	0,68 ± 0,02	18 %
Vliestaschen 1 (nicht hinterlüftet)	0,69 ± 0,02	17 %
Vliestaschen 2 (nicht hinterlüftet)	0,64 ± 0,02	23 %

3. Realmessungen Fassadenbegrünung

An der Klimaforschungsstation des CAE in Würzburg werden unterschiedliche Fassadenbegrünungssysteme installiert und deren energetische Auswirkungen auf die Fassade unter Realbedingungen über mehrere Jahre gemessen. An der West- und Südfassade kommen insgesamt sieben wandgebundene Fassadenbegrünungssysteme zum Einsatz, an der Ostfassade zwei bodengebundene Fassadenbegrünungen. Für jede Orientierung steht eine Fassade ohne Begrünung als Referenz zur Verfügung. Der Wandaufbau hinter den Begrünungssystemen ist mit 18 cm Mineralwolle gedämmt, was einen U-Wert der Wand von $0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ergibt. Der Innenraum wird über ein Klimagerät im Sommer auf 24 °C und im Winter auf 21 °C temperiert. Aufgrund unterschiedlicher Anströmungen der einzelnen Messfelder durch das Klimagerät im Innenraum sowie unterschiedliche Verschattungen der Messfelder durch umliegende Bäume sind die einzelnen Messfelder nicht direkt miteinander vergleichbar. Die Ergebnisse dienen in erster Linie zur Validierung von Simulationsmodellen. Dennoch können anhand der Messdaten einige generelle Aussagen getroffen werden.



Abbildung 5: Westfassade (links) und Südfassade (rechts) mit wandgebundener Fassadenbegrünung und Referenzfeld an der Klimaforschungsstation des CAE in Würzburg.



Abbildung 6: Ostfassade mit bodengebundener Fassadenbegrünung (links Hopfen, rechts Geißblatt) und Referenzfeld an der Klimaforschungsstation des CAE in Würzburg.

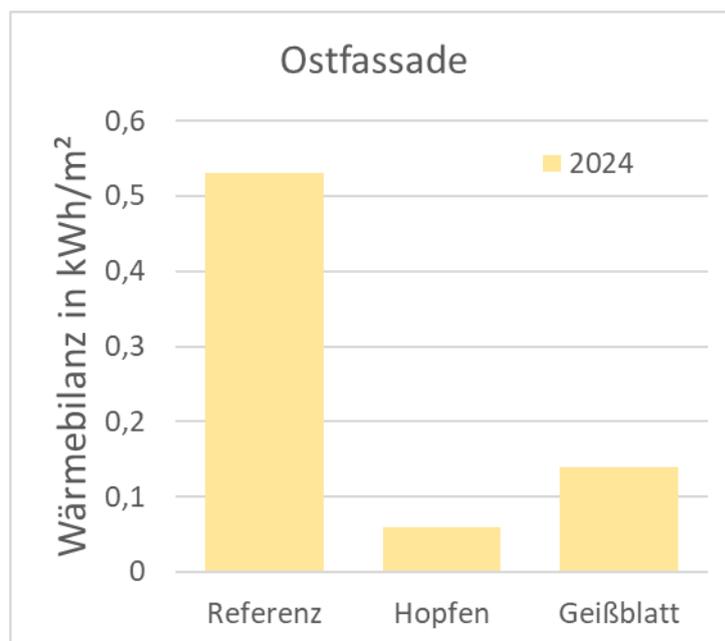
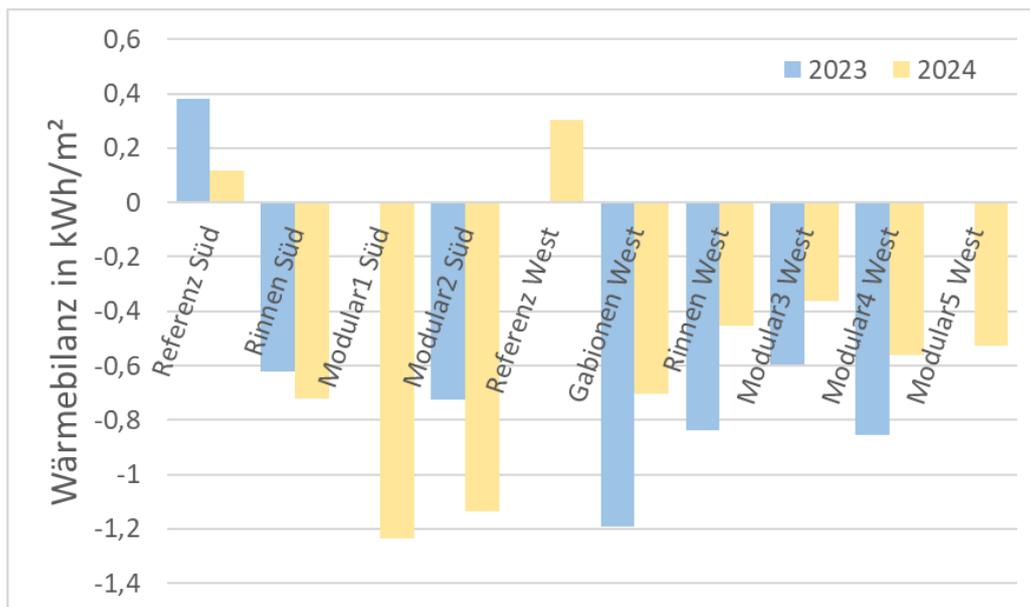


Abbildung 7: Wärmebilanz der wandgebundenen Fassadenbegrünungssysteme auf Süd- und Westfassade (oben) und der bodengebundenen Fassadenbegrünung auf der Ostfassade (unten) für die Sommer 2023 und 2024. Positive Werte bedeuten Wärmeeinträge, d.h. durch die Fassade gelangt insgesamt Wärme ins Gebäude. Negative Werte bedeuten Wärmeverluste, d.h. durch die Fassade wird insgesamt Wärme abgeführt (Kühleffekt).

Alle Referenzfassaden weisen eine positive Wärmebilanz auf, d.h. es gelangt insgesamt Wärme in den dahinter liegenden Raum, so dass diese Fassaden zur Wärmelast des Gebäudes beitragen. Die wandgebundenen Fassadenbegrünungssysteme auf Süd- und Westfassade weisen insgesamt eine negative Wärmebilanz auf, d.h. durch die Vollverschattung der Systeme kann insgesamt Wärme durch die Fassade abgeführt werden, so dass ein Kühleffekt für den dahinterliegenden Raum entsteht. Die bodengebundenen Fassadenbegrünungssysteme auf der Ostfassade weisen eine positive Wärmebilanz auf, so dass auch hier insgesamt Wärme in den dahinterliegenden Raum gelangt, allerdings je nach Dichte des Blattwerkes deutlich weniger als bei der unbegrünten Referenzfassade, so dass die Wärmelasten durch die bodengebundene Fassadenbegrünung reduziert werden.

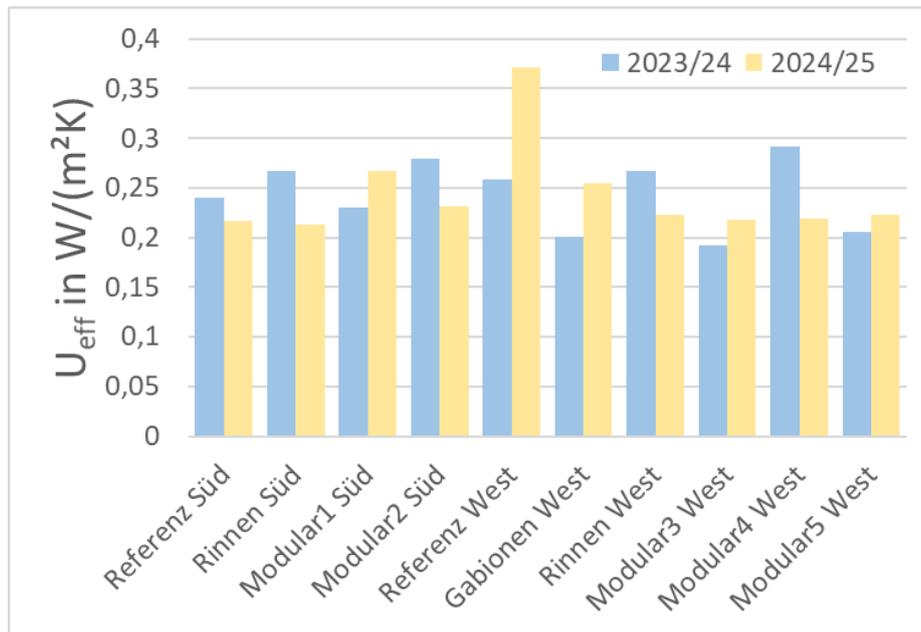


Abbildung 8: Effektive U-Werte der wandgebundenen Fassadenbegrünungssysteme auf Süd- und Westfassade in den Wintern 2023/24 und 2024/25.

Im Winter zeigen die effektiven U-Werte der wandgebundenen Fassadenbegrünungssysteme, dass im Vergleich zu den Referenzfassaden keine generelle Reduktion der Wärmeverluste auftritt. Je nach Aufbau und Fassadenorientierung verursachen die Fassadenbegrünungssysteme teilweise auch einen Mehrverbrauch. Dies liegt an der Vollverschattung durch die wandgebundenen Fassadenbegrünungssysteme, die vor allem an sonnigen Tagen die passive Nutzung solarer Wärmegewinne der dahinterliegenden Wand verhindern, was häufig eine Verschlechterung der Wärmebilanz bewirkt.

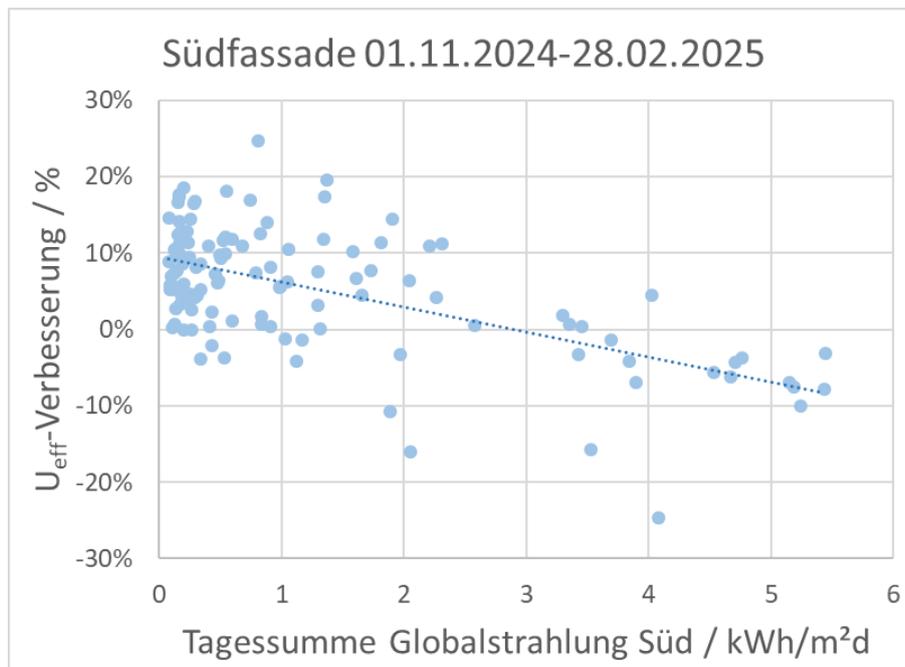


Abbildung 9: Tägliche Verbesserung des effektiven U-Wertes durch ein modulares wandgebundenes Fassadenbegrünungssystem auf der Südfassade in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung. Positive Werte bedeuten eine Verbesserung der Wärmedämmwirkung, negative Werte eine Verschlechterung der Wärmedämmwirkung durch die Fassadenbegrünung.

4. Realmessungen Dachbegrünung

In speziellen Außenmessständen werden am CAE in Würzburg unterschiedliche Dachbegrünungssysteme installiert und deren energetisches Verhalten unter Realbedingungen über mehrere Jahre gemonitort. Als Referenzsystem kommt ein Kiesdach zum Einsatz. Neben der Verdunstungsleistung der Systeme werden die Wärmeströme in den darunterliegenden „Raum“ gemessen. Die Dachaufbauten sind mit 10 cm XPS-Dämmung versehen, was einem U-Wert von $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ entspricht. Das Innere der Boxen ist über einen Thermostat im Sommer auf $24 \text{ }^\circ\text{C}$ und im Winter auf $21 \text{ }^\circ\text{C}$ temperiert.

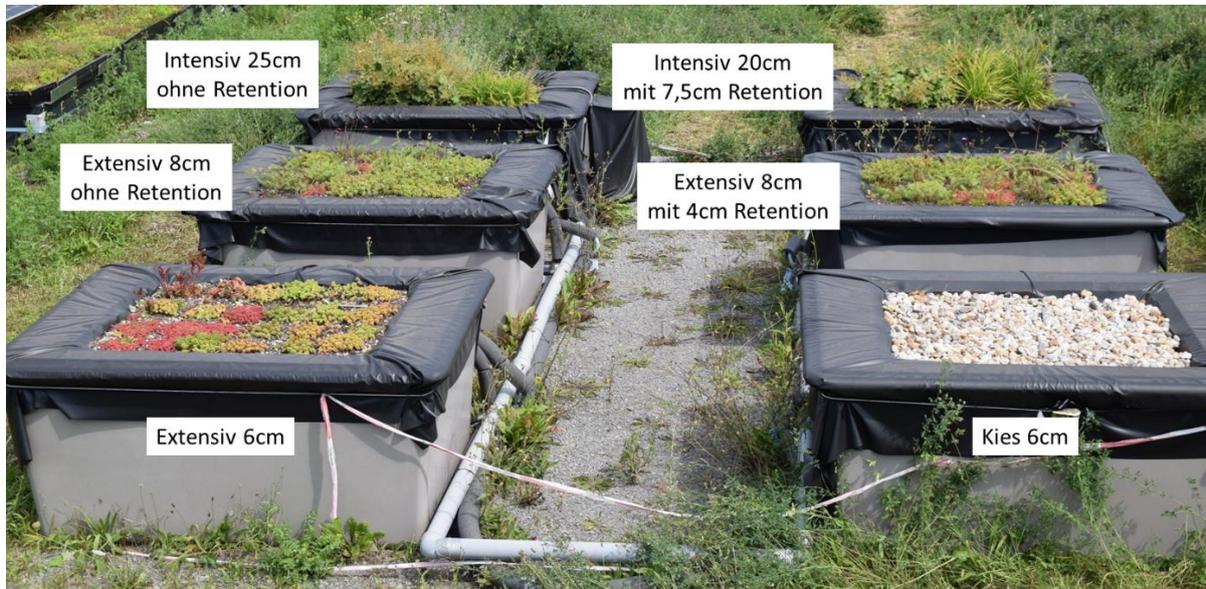


Abbildung 10: Außenmessstände zur thermischen Charakterisierung von Dachbegrünungssystemen am CAE in Würzburg.

Im Sommer reduzieren die Dachbegrünungen die Wärmeeinträge erheblich (s. Abbildung 11), vor allem bei dickeren Aufbauten (Intensivdächer). Allerdings wird gleichzeitig auch die nächtliche Auskühlung behindert, so dass in Summe die Wärmebilanz der Gründachaufbauten meist schlechter ausfällt als die des Kiesdaches. Die genauen Auswirkungen auf das Gebäude lassen sich aus diesen Daten nicht pauschal ableiten und werden deshalb über individuelle Simulationen ermittelt.

Im Winter reduzieren die Dachbegrünungen die Wärmeverluste (s. Abbildung 12). Auch hier wirken sich dickere Aufbauten vorteilhaft aus. Die Reduktion der Wärmeverluste lässt sich in eine äquivalente Dämmstoffstärke umrechnen.

Tabelle 2: Winterliches Wärmeeinsparpotenzial der Dachbegrünungsaufbauten im Vergleich zum Kiesdach ausgedrückt als äquivalente Dämmstoffstärke (WLG 040 entspricht dabei einem Standarddämmstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit von $40 \text{ mW}/(\text{mK})$).

Dachaufbau	Reduktion Wärmeverluste	≅ Dämmstoffstärke (WLG 040)
Extensiv 6 cm	-3 %	-4 mm
Extensiv 8 cm mit 4 cm Retention	8 %	11 mm
Extensiv 8 cm ohne Retention	7 %	9 mm
Intensiv 20 cm mit 7,5 cm Retention	28 %	51 mm
Intensiv 25 cm ohne Retention	17 %	27 mm

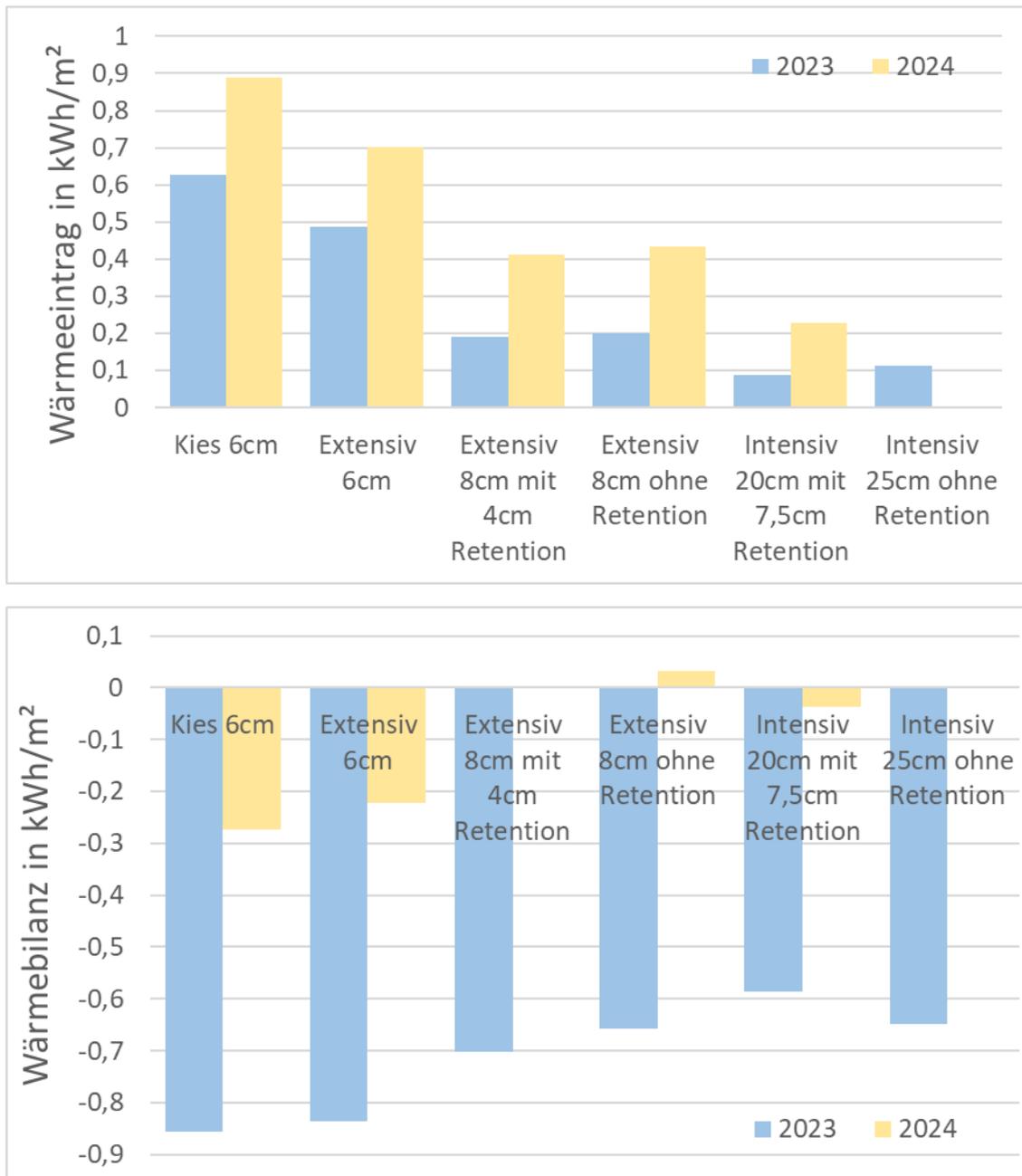


Abbildung 11: Wärmeeinträge (oben) und Wärmebilanz (unten) der Dachaufbauten für die Sommer 2023 und 2024. Positive Werte der Wärmebilanz bedeuten Wärmeeinträge, d.h. durch das Dach gelangt insgesamt Wärme ins Gebäude. Negative Werte bedeuten Wärmeverluste, d.h. durch das Dach wird insgesamt Wärme abgeführt (Kühleffekt).

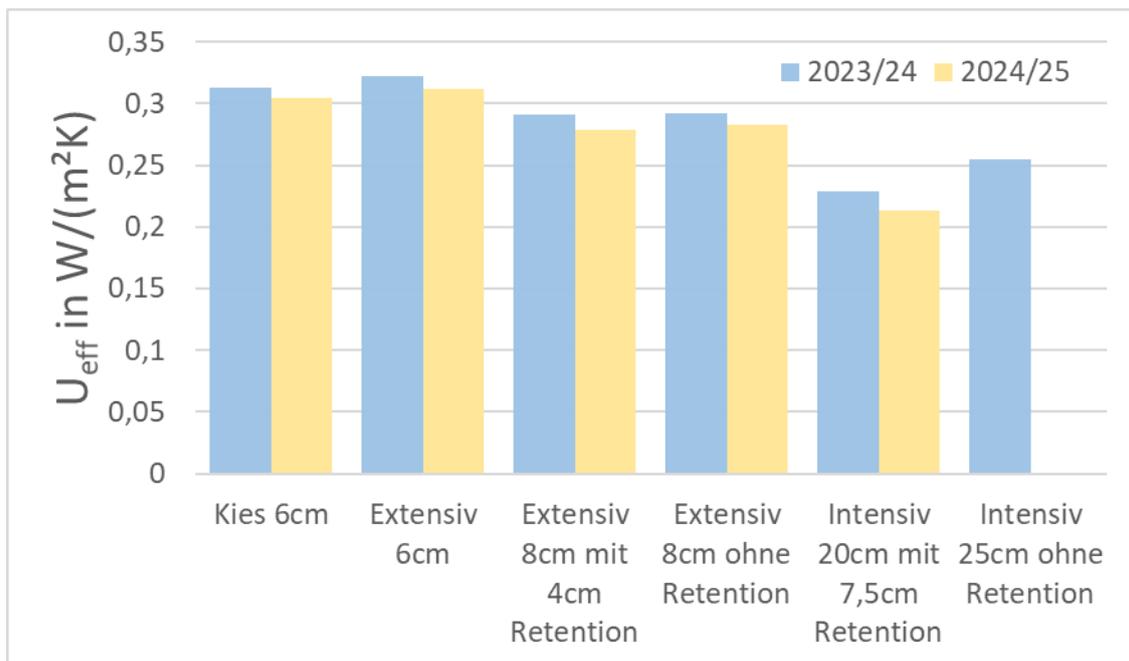


Abbildung 12: Effektive U-Werte der Dachbegrünungssysteme in den Wintern 2023/24 und 2024/25.

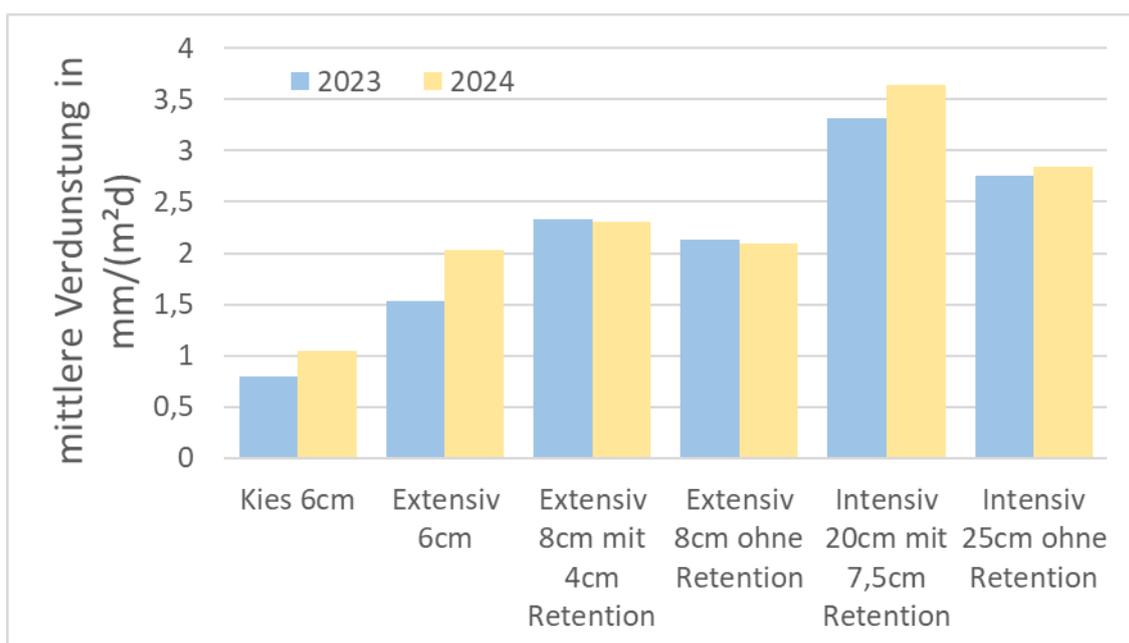


Abbildung 13: Mittlere tägliche Verdunstung der Gründachaufbauten in den Sommern 2023 und 2024.

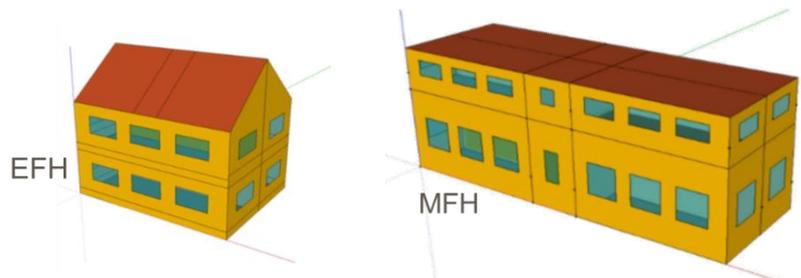
Die Verdunstungsleistung der Gründachaufbauten wird ebenfalls wesentlich durch die Substratstärke bestimmt, so dass dickere Aufbauten (Intensivdächer) größere Verdunstungsleistungen und damit auch eine größere Kühlwirkung zeigen. Eine Retentionsschicht wirkt sich positiv auf die Verdunstungsleistung aus.

5. Energetische Abschätzung von Typgebäuden ohne und mit Begrünung

Anhand einer Parameterstudie wurde die Energiebilanz unterschiedlicher Typgebäude für zwei in Deutschland vorherrschende Klimazonen berechnet. Neben dem Referenzfall ohne Begrünung wurden dabei auch die nachfolgend dargestellten Dach- und Fassadenbegrünungssysteme betrachtet. Die untersuchten Parameter sind wie folgt:

Gebäudetypen:

- Einfamilienhaus (EFH),
- Mehrfamilienhaus (MFH),
- Bürogebäude (BUERO).



Dämmstandards:

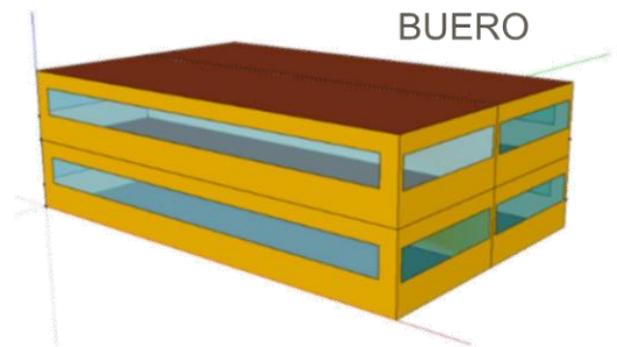
- Effizienzhausstandard (EFF): Heizwärmebedarf $\approx 45 - 65 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) \rightarrow \text{Neu+}$,
- Helsinki-Standard (HEL): Heizwärmebedarf $\approx 80 - 95 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) \rightarrow \text{Neu}$,
- Straßburg-Standard (STR): Heizwärmebedarf $\approx 160 - 170 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) \rightarrow \text{Alt}$,
- Athen-Standard (ATH): Heizwärmebedarf $\approx 335 - 415 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) \rightarrow \text{Alt-}$.

Regelung:

- Heizsolltemperatur Winter $21 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Kühlsolltemperatur Sommer $24 \text{ }^\circ\text{C}$.

Klimadaten:

- Würzburg (Klimazone nach Köppen-Geiger: Cfb),
- Berlin (Klimazone nach Köppen-Geiger: Dfb),
- jeweils für die Jahre 2020 und 2050 (RCP4.5).



Gründachaufbauten:

- Extensivdach mit 6cm Substrat $\rightarrow 6 \text{ cm}$,
- Intensivdach mit 25cm Substrat $\rightarrow 25 \text{ cm}$.

Referenzdachaufbauten:

- 6cm Kieddach ($\alpha_s = 0,45$),
- Ziegeldach ($\alpha_s = 0,6$).

Grünfassaden:

- Wandgebundene Fassadenbegrünung Standard $\rightarrow \text{FGR}$,
- Wandgebundene Fassadenbegrünung mit niedriger Wärmeleitfähigkeit (z.B. Dämmschaum) $\rightarrow \text{FGR+}$.

Referenzfassaden mit unterschiedlichem solarem Absorptionsgrad α_s :

- $\alpha_s = 0,4$,
- $\alpha_s = 0,6$,
- $\alpha_s = 0,8$.

Größe und Konstruktion der Typgebäude wurden dem Projekt Speicher-LCA entnommen, Details können im

öffentlichen Abschlussbericht¹ nachgelesen werden. Die Klimadaten für das Jahr 2050 wurden anhand der „Repräsentativen Konzentrationspfade“ (Representative Concentration Pathways - RCP) ermittelt, wie sie im 5. Sachstandsbericht des IPCC² verwendet werden. RCP4.5 bezeichnet dabei ein mittleres Szenario mit einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis zum Jahr 2100 von 2,6°C im Vergleich zum vorindustriellen Wert.

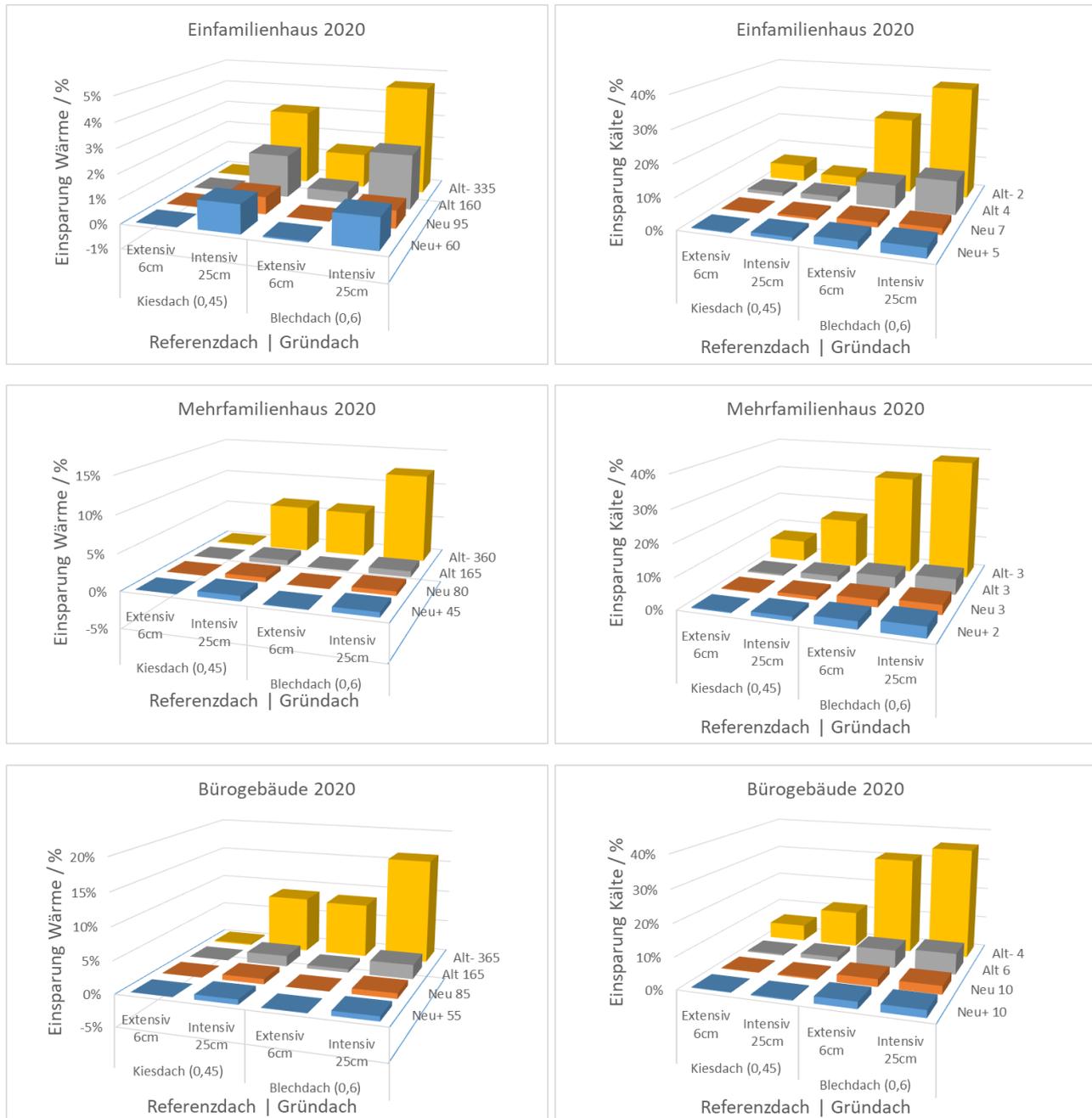


Abbildung 14: Reduktion des Wärme- (links) und Kältebedarfs (rechts) für die unterschiedlichen Gebäudetypen am Standort Berlin mit Klimadaten von 2020 durch Dachbegrünung. Negative Einsparungen bedeuten einen Mehrbedarf. Die Zahlen hinter den Dämmstandards beziffern den mittleren spezifischen Heizwärme- bzw. Kältebedarf in kWh/(m²a).

¹ Björn Nienborg, Stefan Henninger, Stefan Gschwander, Rafael Horn, Roberta Di Bari, Felix Klinker, Helmut Weinläder: Ökologische Bewertung ausgewählter Konzepte und Materialien zur Wärme- und Kältespeicherung (Speicher-LCA), Abschlussbericht, Förderkennzeichen: 03ET1333A,B,C, 30. September 2019

² IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press

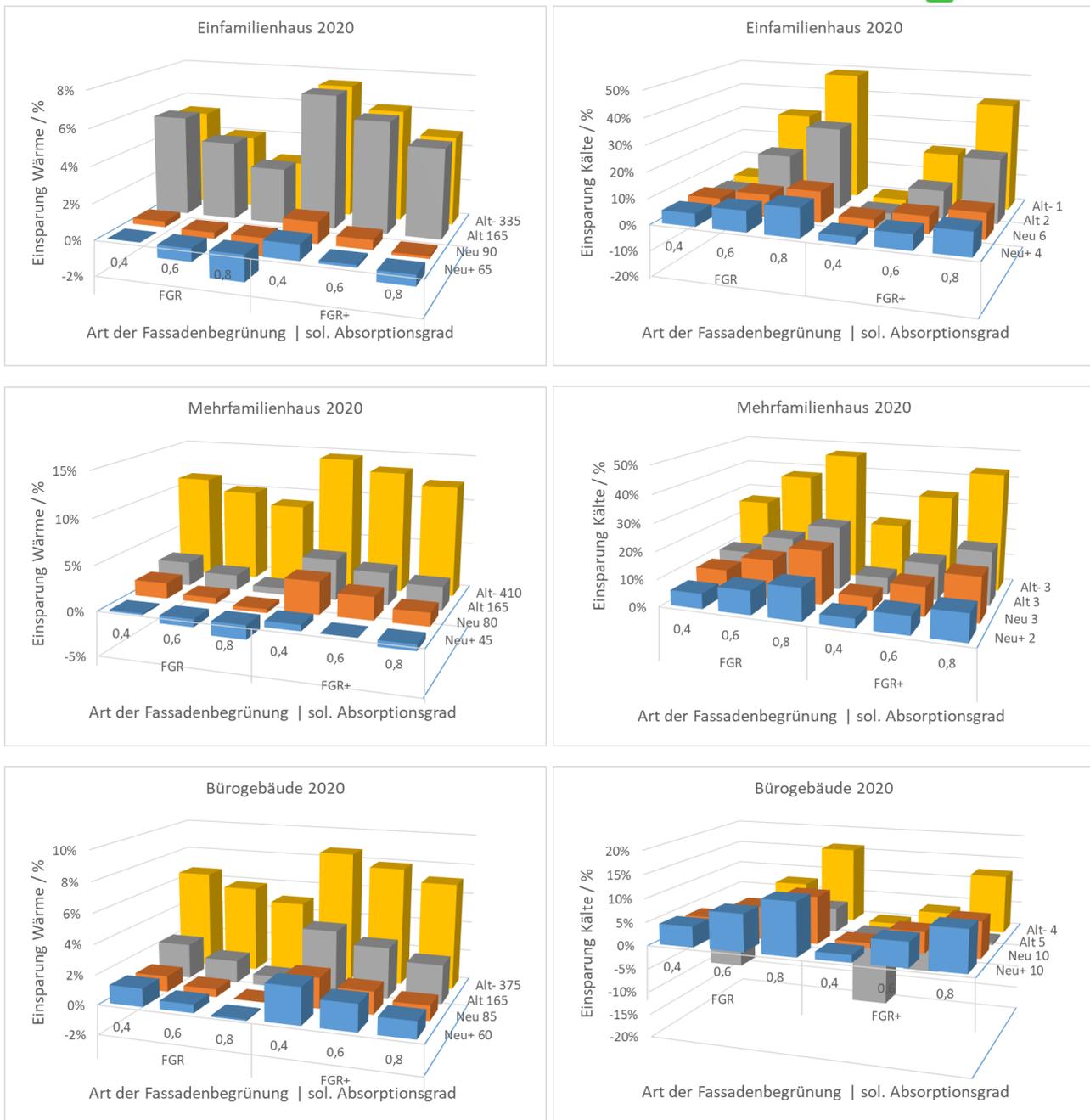


Abbildung 15: Reduktion des Wärme- (links) und Kältebedarfs (rechts) für die unterschiedlichen Gebäudetypen am Standort Berlin mit Klimadaten von 2020 durch wandgebundene Fassadenbegrünung. Negative Einsparungen bedeuten einen Mehrbedarf. Die Zahlen hinter den Dämmstandards beziffern den mittleren spezifischen Heizwärme- bzw. Kältebedarf in kWh/(m²a).

Insgesamt stellen sich die energetischen Auswirkungen der beiden untersuchten Dachbegrünungssysteme auf den winterlichen Wärmeschutz bei Gebäuden mit einem gewissen Mindestdämmstandard (Neu+, Neu, Alt) als recht gering dar. Das Extensivgründach mit 6 cm zeigt hier keinen nennenswerten Effekt, während das Intensivgründach leichte Einsparungen von 1 - 2 % bewirkt. Lediglich beim Dämmstandard Alt- ergeben sich größere Einsparpotenziale. Diese betragen für das Extensivgründach mit 6 cm 1 - 8 % im Vergleich zum Blechdach und für das Intensivgründach mit 25 cm 3 - 9 % im Vergleich zum Kieddach sowie 4 - 16 % im Vergleich zum Blechdach.

Beim sommerlichen Kältebedarf fällt das Energieeinsparpotenzial teilweise höher aus. Für die Dämmstandards Neu+, Neu und Alt erreicht das Extensivgründach mit 6 cm Substratstärke eine Reduktion

des Kältebedarfs von 0-2 % im Vergleich zum Kiesdach und von 1 - 13 % im Vergleich zum Blechdach. Das Intensivgründach mit 25 cm Substratstärke erreicht hier Einsparungen von 0 - 3 % im Vergleich zum Kiesdach und von 1 - 19 % im Vergleich zum Blechdach. Bei den schlecht gedämmten Gebäuden Alt- sind die Einsparungen signifikant höher: das Extensivgründach mit 6 cm erreicht hier Reduktionen von 6 - 13 % im Vergleich zum Kiesdach und 24 - 49 % im Vergleich zum Blechdach, das Intensivgründach mit 25 cm 3 - 31 % im Vergleich zum Kiesdach und 36 - 60 % im Vergleich zum Blechdach.

Bei den Fassadenbegrünungssystemen stellen sich die energetischen Auswirkungen auf die untersuchten Gebäude differenzierter dar. Im Winterfall können neben Einsparungen vor allem bei gut gedämmten Gebäuden mit dunklen Fassaden (hoher solarer Absorptionsgrad) auch höhere Heizwärmebedarfe von bis zu 2 % auftreten. Dies wird durch die Verschattungswirkung der wandgebundenen Fassadenbegrünungssysteme verursacht, was eine Nutzung der auf die Fassade treffenden Solarstrahlung zur Minderung der Wärmeverluste weitgehend verhindert. Bei helleren Fassaden wirken sich die Systeme in der Regel positiv aus. Im Neubaubereich (Neu, Neu+) ergeben sich leichte Reduktionen des Heizwärmebedarfs von bis zu 2 % für das Standardfassadenbegrünungssystem (FGR) und von bis zu 4 % für das Fassadenbegrünungssystem mit niedriger Wärmeleitfähigkeit (FGR+). Bei Altbauten (Alt, Alt-) sind auch bei dunklen Fassaden Reduktionen des Heizwärmebedarfs von 1 - 9 % (FGR) bzw. 3 - 12 % (FGR+) erzielbar. Bei hellen Fassaden steigt das Einsparpotenzial auf 2 - 11 % (FGR) bzw. 4 - 15 % (FGR+) an.

Im Sommerfall zeigen die untersuchten wandgebundenen Fassadenbegrünungssysteme im Neubaubereich (Neu, Neu+) generell eine teilweise signifikante Reduktion des Kältebedarfs. Während das Fassadenbegrünungssystem mit niedriger Wärmeleitfähigkeit (FGR+) hier Einsparungen von 1 - 6 % bei hellen und von 8 - 21 % bei dunklen Fassaden aufweist stellt sich das Standardfassadenbegrünungssystem (FGR) hier mit Einsparungen von 4 - 11 % bei hellen und von 9 - 26 % bei dunklen Fassaden insgesamt positiver dar.

Im Altbaubereich (Alt, Alt-) können die wandgebundenen Fassadenbegrünungssysteme wiederum einen Mehrbedarf an Kälte bewirken, vor allem bei helleren Fassaden. Die Auswirkungen unterscheiden sich hier zusätzlich noch stark zwischen den einzelnen Gebäudetypen:

- Beim Mehrfamilienhaus erzielen die Fassadenbegrünungssysteme in allen untersuchten Fällen eine signifikante Reduktion des Kältebedarfs. Diese beträgt bei hellen Fassaden 6 - 32 % (FGR+) bzw. 11 - 39 % (FGR) und steigt bei dunklen Fassaden auf Werte von 20 - 59 % (FGR+) bzw. 23 - 62 % (FGR) an.
- Beim Einfamilienhaus werden bei dunklen und mittleren Fassaden von beiden untersuchten Fassadenbegrünungssystemen ebenfalls signifikante Einsparungen des Kältebedarfs in Höhe von 11 - 40 % (FGR+) bzw. 15 - 49 % (FGR) erzielt. Bei hellen Fassaden dagegen erzielt nur das System FGR eine leichte Reduktion des Kältebedarfs von 3 - 7 % während das System FGR+ einen Mehrbedarf von bis zu 12 % verursachen kann.
- Beim Bürogebäude können sowohl Reduktionen im Kältebedarf auftreten – bis zu 13 % (FGR+) bzw. 18 % (FGR) bei dunklen Fassaden, als auch ein Mehrbedarf verursacht werden – bis zu 16 % (FGR) bzw. 24 % (FGR+).

Insgesamt scheint also vor allem im Bereich Kälte eine Einzelfallbetrachtung je nach Gebäudetyp, Wärmedämmstandard und Nutzung angebracht.

Mit den Klimadaten für das Jahr 2050 ergeben sich prinzipiell ähnliche Werte was die prozentuale Reduktion bzw. den Mehrverbrauch anbelangt. Allerdings steigt durch die prognostizierte Klimaerwärmung der Kältebedarf 2050 im Mittel um rund 114 % an, während der Heizwärmebedarf im Mittel um rund 8 % abnimmt.