



Abschlussbericht vom 23.10.2025

SE-ORF

Shading Effect – Overgrown Rope Façade

Verschattungswirkung bewachsener Fassaden



Quelle: Kilian Arnold 2021



HSLU Hochschule Luzern

Datum: 23.10.2025

Ort: Horw

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

-

Subventionsempfänger/innen:

Hochschule Luzern Technik und Architektur
Technikumstrasse 21, 6048 Horw
www.hslu.ch

Institut für Bauingenieurwesen IBI
Kompetenzzentrum Gebäudehülle und Ingenieurbau
Technikumstrasse 21, 6048 Horw
www.hslu.ch/ccghib

Autor/in:

Kilian Arnold, Institut für Bauingenieurwesen, kilian.arnold@hslu.ch
Thomas Wüest, Institut für Bauingenieurwesen, thomas.wueest@hslu.ch
Lars Oliver Grobe, Institut für Bauingenieurwesen, larsoliver.grobe@hslu.ch
Fritz Wassmann-Takigawa, Atelier für Ökologie und Gartenkultur, fritz.wassmann@posteo.de

BFE-Projektbegleitung:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Martin Ménard, menard@lowtechlab.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502187-01

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



Zusammenfassung

Diese Studie untersucht das Potenzial von Fassadenbegrünungen mit laubabwerfenden Kletterpflanzen zur Verbesserung des Energiehaushalts von Gebäuden und zur Reduktion städtischer Hitzeinseln. An einer praxisnahen Testinstallation wurden zehn verschiedene Kletterpflanzenarten systematisch vermessen und deren Verschattungswirkung sowie thermischer Effekt auf Glasfassaden analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass dicht belaubte Fassadenbegrünungen im Sommer die Fassaden- und Raumtemperaturen um bis zu zwei Grad Celsius senken können. Dies führt zu einer spürbaren Reduktion des Kühlenergiebedarfs und verringert das Risiko sommerlicher Überhitzung. Trotz hoher Verschattung gelangt durch Streuung und Transmission über die Blattstrukturen bis zu 20 % der Sonnenenergie weiterhin durch die Pflanzen hindurch. Dadurch bleibt das Tageslichtniveau im Gebäudeinnern angenehm, und die Räume bleiben auch im Sommer natürlich beleuchtet.

Im Winter sorgen die laubabwerfenden Pflanzen für einen nahezu ungehinderten solaren Wärmeeintrag, was die Heizenergiegewinne maximiert. Für die praktische Umsetzung ist es entscheidend, Pflanzenarten zu wählen, die ein hohes Blattvolumen im Sommer und einen zuverlässigen Laubabwurf im Winter aufweisen. Die Nutzerakzeptanz ist dabei ein wichtiger Aspekt: Während dichter Bewuchs maximale Verschattung bringt, ermöglichen lichtdurchlässigere Pflanzen eine bessere Durchsicht und können als angenehmer empfunden werden.

Die Ergebnisse bieten Planenden und Eigentümern eine fundierte Grundlage, um Fassadenbegrünungen gezielt einzusetzen und ihr energetisches Potenzial voll auszuschöpfen. Fassadenbegrünungen mit laubabwerfenden Kletterpflanzen sind damit ein wirkungsvolles, flexibles und nachhaltiges Instrument für die klimaangepasste Stadtentwicklung.

Résumé

Cette étude examine le potentiel des façades végétalisées avec des plantes grimpantes à feuilles caduques pour améliorer le bilan énergétique des bâtiments et réduire les îlots de chaleur urbains. Dix espèces différentes de plantes grimpantes ont été systématiquement mesurées sur une installation de test proche de la pratique, et leur effet d'ombrage ainsi que leur impact thermique sur les façades vitrées ont été analysés.

Les résultats montrent que, durant l'été, des façades végétalisées denses peuvent abaisser la température de la façade et des pièces intérieures jusqu'à deux degrés Celsius. Cela conduit à une réduction notable des besoins en refroidissement et diminue le risque de surchauffe estivale. Malgré un ombrage important, jusqu'à 20 % de l'énergie solaire atteint la végétation par diffusion et transmission via les structures foliaires. Cela maintient une agréable intensité lumineuse naturelle à l'intérieur du bâtiment, et les pièces bénéficient d'un éclairage naturel même en été.

En hiver, la chute des feuilles permet un apport solaire quasiment sans obstacle, ce qui maximise les gains de chaleur pour le chauffage. Pour la mise en œuvre pratique, il est essentiel de choisir des espèces de plantes avec un grand volume de feuillage en été et une défoliation fiable en hiver. L'acceptation par les utilisateurs reste un aspect important : alors qu'une végétation dense assure une ombre maximale, des plantes plus translucides permettent une meilleure vue et peuvent être perçues comme plus agréables.

Les résultats offrent aux planificateurs et aux propriétaires une base solide pour utiliser de manière ciblée les façades végétalisées et exploiter pleinement leur potentiel énergétique. Les façades végétalisées avec des plantes grimpantes à feuilles caduques constituent ainsi un instrument efficace, flexible et durable pour le développement urbain adapté au climat.



Summary

This study examines the potential of façade greening with deciduous climbing plants to improve the energy balance of buildings and reduce urban heat islands. In a practice-oriented test installation, ten different species of climbing plants were systematically measured, and their shading effect as well as thermal performance on glass façades were analysed.

The results show that densely leafed green façades can reduce façade and indoor temperatures by up to two degrees Celsius in summer. This leads to a noticeable reduction in cooling energy demand and lowers the risk of summer overheating. Despite high levels of shading, up to 20% of solar energy still passes through the plants due to scattering and transmission within the leaf structure. As a result, natural daylight levels inside the building remain pleasant, and rooms are naturally lit even in summer.

In winter, the loss of leaves allows almost unimpeded solar heat gain, maximising the energy benefit for heating. For practical application, it is crucial to select plant species with a high leaf volume in summer and reliable leaf fall in winter. User acceptance is also important: while dense vegetation provides maximum shading, more translucent plants offer better views and may be perceived as more pleasant.

The findings provide planners and property owners with a solid foundation for the targeted use of façade greening and for making full use of its energetic potential. Façade greening with deciduous climbing plants thus represents an effective, flexible and sustainable instrument for climate-adapted urban development.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	8
Glossar	9
1 Einleitung	10
1.1 Vertikale Begrünungen im städtischen Umfeld	10
1.2 Motivation des Projekts	10
1.3 Projektziele	10
1.4 Vorgehen	11
1.4.1 Ermittlung der Transmissionswerte von zehn Kletterpflanzen	11
1.4.2 Messung von Temperaturunterschieden durch unterschiedliche Begrünungen	11
1.4.3 Auswirkungen der Pflanzen auf Gebäude und Umwelt.....	11
1.4.4 Thermisches Rechenmodell und Parameterstudie	11
1.4.5 Flächenkonkurrenz Fassadenbegrünung zu Photovoltaik	12
1.5 Botanische und ökologische Grundlagen der Fassadenbegrünung	12
1.5.1 Kletterpflanzen und ihre Kletterstrategien	12
1.5.2 Lebensrhythmen und Artenvielfalt.....	12
1.5.3 Weitere Begrünungsmöglichkeiten an Fassaden.....	13
1.5.4 Grundlagen der Pflanzenwahl und Standortfaktoren	13
2 Methode	14
2.1 Funktion und Aufbau der Messeinrichtung.....	14
2.2 Messeinrichtung	16
2.2.1 Messung der solaren Einstrahlung	16
2.2.2 Temperaturmessungen	16
2.2.3 Bildbasierte Erfassung der Einstrahlungsverteilung.....	17
2.3 Auswahl der Pflanzenproben.....	17
2.4 Auswertung der Einstrahlungsverteilung.....	19
2.5 Grundlagen der thermischen Simulationen der Messaufbauten	20
2.5.1 Modell	20
2.5.2 Materialkennwerte	22
2.5.3 Optische Materialkennwerte des TIP	22
2.5.4 Randbedingungen	23
2.6 Grundlagen der thermischen Simulation für Fassaden.....	24
2.6.1 Modell	24
2.6.2 Randbedingungen	24



3	Ergebnisse und Diskussion der Messung	25
3.1	Verschattungswirkung	25
3.1.1	Einstrahlungskoeffizient.....	25
3.1.2	Solarer Transmissionskoeffizient	26
3.1.3	Vergleich Transmissionskoeffizient – direkter Einstrahlungskoeffizient.....	28
3.1.4	Abgleich Kamera-Pyranometer	29
3.1.5	Charakteristische Wachstumsgruppen der Pflanzen	29
3.1.6	Fazit Verschattungswirkung	31
3.2	Temperaturen – Thermische Wirkung der Begrünung anhand von Temperaturverläufen	31
3.2.1	Im Sommer anhand von Temperaturverläufen über wenige Tage.....	31
3.2.2	Im Winter anhand von Temperaturverläufen über wenige Tage.....	34
3.2.3	Fazit thermische Wirkung der Begrünung anhand von Temperaturverläufen	36
3.3	Temperaturen – Thermische Wirkung der Begrünung - Temperaturdatenauswertung	37
3.3.1	Temperaturdifferenz zur Referenzmessung in Bezug zur solaren Transmission	37
3.3.2	Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur in Bezug zur Transmission.....	42
3.3.3	Temperaturdifferenz zur Referenzmessung in Bezug zur solaren Einstrahlung.....	44
3.3.4	Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur in Bezug zur solaren Einstrahlung	49
3.3.5	Fazit Temperaturen	51
3.4	Thermischen Simulation	51
3.4.1	Resultate Temperatursimulationen mit Modelica	51
3.4.2	Fazit thermische Simulation des Messaufbauten.....	55
3.5	Thermische Simulationen der Verschattungswirkung an Fassaden	55
3.6	Auswirkung der Pflanzenarten auf die Umwelt und Gebäude.....	57
3.6.1	Rückschnitt	57
3.6.2	Düngung	57
3.6.3	Schädlinge.....	57
3.6.4	Schadenpotenzial auf das Gebäude	57
3.7	Pflanzenwahl, Pflege und Gestaltung – Expertenwissen aus der Praxis.....	57
3.7.1	Planung, Ausführung und Pflege.....	57
3.7.2	Die Pflanzenwahl.....	58
3.7.3	Gestaltungsmöglichkeiten und Qualitäten.....	58
3.7.4	Ökologische Bedeutung begrünter Fassaden	58
3.7.5	Brandschutz bei Fassadenbegrünung.....	59
3.7.6	Invasive Neophyten	60
3.7.7	Fazit und Perspektiven	60
3.8	Begrünte Fassaden und PV	60



4	Schlussfolgerungen und Ausblick	62
5	Nationale und internationale Zusammenarbeit	64
6	Publikation und andere Kommunikation	64
7	Literaturverzeichnis	65
8	Anhang A: Zuordnung der idealisierten Wachstumskurven	66
9	Anhang B: Diagramme Temperaturen.....	68
9.1	Transmission vs. Temperaturdifferenz zur Referenzmessung.....	68
9.1.1	S5 – bei der Vegetation	68
9.1.2	S4 - zwischen Vegetation und Glasscheibe	69
9.1.3	S3 - bei der Glasscheibe	71
9.1.4	S1 – im Raum (Messbox).....	73
9.2	Transmission vs. Temperaturdifferenz zu Ambient.....	74
9.2.1	S5 – bei der Vegetation	74
9.2.2	S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe	76
9.3	Solare Einstrahlung vs. Temperaturdifferenz zur Referenzmessung.....	78
9.3.1	S5 – bei der Vegetation	78
9.3.2	S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe	79
9.3.3	S3 – bei der Glasscheibe	81
9.3.4	S1 – im Raum (Box)	83
9.4	Solare Einstrahlung vs. Temperaturdifferenz zu Ambient.....	84
9.4.1	S5 – bei der Vegetation	84
9.4.2	S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe	86
10	Anhang C: g_{tot} Werte für die verschiedenen Verschattungskategorien	88



Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
BuGG	Bundesverband GebäudeGrün e.V.
CCGH&IB	Kompetenzzentrum Gebäudehülle und Ingenieurbau
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
HDRI	High Dynamic Range Imaging
HSLU T&A	Hochschule Luzern Technik und Architektur
RMSE	Root Mean Squared Error (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers)
SFG	Schweizerische Fachvereinigung für Gebäudebegrünung
SZFF	Schweizerische Zentrale für Fenster und Fassade
TIP	Transmission Illuminance Proxy (bildbasierte Methode)
UHIE	Urban Heat Island Effect (städtische Hitzeinseln)
VKF	Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen



Glossar

- **Diffuse Strahlung:**
Der Anteil der Sonnenstrahlung, der nicht direkt, sondern gestreut (zum Beispiel an Wolken, Blattwerk oder Luftteilchen) auf eine Fläche trifft.
- **g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad):**
Kennwert, der angibt, welcher Anteil der Sonnenenergie durch ein Fenster oder eine Verglasung ins Rauminnere gelangt. Je höher der g-Wert, desto mehr solare Energie wird durchgelassen.
- **Interpolieren:**
Mathematisches Verfahren, um fehlende Messwerte anhand bekannter Werte zu schätzen.
- **Laubabwerfend (deciduous):**
Pflanzen, die im Winter ihr Laub abwerfen, im Gegensatz zu immergrünen Arten.
- **Pyranometer:**
Messgerät zur Erfassung der gesamten solaren Strahlung (Globalstrahlung) auf einer Fläche.
- **Thermische Simulation:**
Computergestützte Nachbildung und Analyse des Energie- und Wärmeflusses in einem Bauteil oder Gebäude.
- **Transmissionskoeffizient:**
Kennwert, der angibt, welcher energetische Anteil der Sonneneinstrahlung – einschliesslich der diffusen (gestreuten) Anteile – durch die Begrünung hindurch die Fassade erreicht.
- **Urban Heat Island Effect (UHIE):**
Die Erwärmung von Städten im Vergleich zum ländlichen Umland, verursacht durch dichte Bebauung, versiegelte Flächen und fehlende Vegetation.
- **Einstrahlungskoeffizient**
Der direkte Einstrahlungskoeffizient beschreibt geometrisch den durch die Pflanzen verschatteten Anteil.
- **Wärmedurchgangskoeffizient (Ug):**
Kennwert für den Wärmeverlust durch ein Bauteil (z. B. Verglasung); je kleiner der Wert, desto besser die Wärmedämmung.
- **Ambienttemperatur**
Die Ambienttemperatur entspricht der "Umgebungstemperatur" und ist die Temperatur der Luft, die die Messinstallation umgibt.



1 Einleitung

1.1 Vertikale Begrünungen im städtischen Umfeld

Begrünte Fassaden bieten zahlreiche Vorteile für das urbane Leben. Sie verbessern das Wohlbefinden der Menschen durch ihre positiven sozialen und ökologischen Wirkungen [1]. Beispielsweise reduzieren Pflanzen durch Verdunstung von Wasser und Verschattung die Temperaturen in Städten und helfen so, den sogenannten Urban Heat Island Effect (städtische Hitzeinsel-Effekte, UHIE) deutlich zu verringern [2]. Darüber hinaus beeinflussen begrünte Fassaden den Gesamtenergiebedarf eines Gebäudes [3], [4], [5]. Insbesondere bei Glasfassaden wirken Kletterpflanzen im Sommer wie natürliche Sonnenschutzelemente, während sie im Winter nach dem Laubabwurf die solare Einstrahlung und somit die Wärmegewinne erhöhen. Pflanzen, die an Fassaden emporwachsen, bilden somit eine saisonal variable, begrünte Schicht vor Gebäuden, welche auf natürliche Weise Energie einsparen können [6].

1.2 Motivation des Projekts

Diese Studie befasst sich mit der Verschattungswirkung verschiedener Kletterpflanzen, die vor allem vor verglasten Fassaden eingesetzt werden können. Durch ihre Belaubung reduzieren sie in der warmen Jahreszeit den Energieeintrag ins Gebäude deutlich

In der kalten Jahreszeit verliert die Mehrheit der Kletterpflanzen ihr Laub, was dazu führt, dass deutlich mehr Sonnenenergie die Glasflächen erreicht und somit der Heizenergiebedarf sinkt. Dieser saisonale Effekt verspricht deutliche energetische und ökologische Vorteile, welche im Rahmen dieses Projekts näher untersucht werden sollen.

Die Präferenz von natürlichen Elementen im Blickfeld vor allem bei geringen Distanzen legt nahe, dass derartige natürliche Verschattungen eher akzeptiert werden als der durch mechanische Sonnenschutzsysteme teilweise oder vollständig verstellte Blick nach aussen. Anders als ein mechanisches Sonnenschutzsystem (z. B. Raffstores), das vollständig abdunkelt oder eine regelmässige Verteilung des durchgelassenen Lichts bewirkt, kombinieren Kletterpflanzen ein unregelmässiges Schattenbild mit einer durch das Blattwerk gefilterten, diffusen Transmission.

1.3 Projektziele

Das übergeordnete Ziel der Studie ist es, die saisonale energetische Wirkung von zehn verschiedenen Kletterpflanzenarten auf Fassaden in der Schweiz zu ermitteln und deren Potenzial für die Gebäudebegrünung besser zu verstehen. Dieses Wissen soll Architektinnen und Planer dabei unterstützen, begrünte Fassaden gezielt einzusetzen. Konkret werden folgende Fragen behandelt:

- Wie gross ist die Verschattungswirkung der untersuchten Pflanzenarten an Seilfassaden, und wie beeinflusst diese Verschattung den Energiebedarf von Gebäuden bei verschiedenen Fassadenausrichtungen?
- Welche Fassadenausrichtungen eignen sich besonders für eine Begrünung, und wo könnten Photovoltaikanlagen gegenüber Begrünungen die bessere Wahl sein?
- Wie gross sind die Temperaturunterschiede zwischen begrünten und nicht begrünten Glasfassaden, und welche Pflanzenarten erzielen die grössten Temperaturreduktionen, um somit optimal zur Verminderung des städtischen Hitzeinsel-Effektes beizutragen?
- Welche Auswirkungen haben verschiedene Pflanzenarten auf das Gebäude selbst und auf dessen Umgebung? Dabei werden Fragen zu Unterhalt, potenziellem Schaden am Gebäude, invasiven Arten (Neophyten) und speziellen Konstruktionsanforderungen berücksichtigt.



1.4 Vorgehen

1.4.1 Ermittlung der Transmissionswerte von zehn Kletterpflanzen

Um die Verschattungswirkung der verschiedenen Pflanzen präzise zu bestimmen, wurde ein einfaches und kostengünstiges Messsystem entwickelt. Vor einer Glasfläche ($1,6 \times 1,6$ m) wurden die Pflanzenproben installiert. Der Schattenwurf der Bepflanzung führt zu einer unregelmässig strukturierten Verteilung der solaren Einstrahlung auf die Glasfläche, die mit konventionellen Methoden an wenigen Messpunkten nicht bestimmt werden kann. Um diese Verteilung zu erfassen, wird ein diffus streuender, transluszenter Schirm auf der Innenseite der Verglasung angebracht. Die über HDRI (High Dynamic Range Imaging) von der Innenseite erfasste Helligkeit des von aussen beleuchteten Schirms erlaubt Rückschlüsse auf die lokale Einstrahlung auf der Verglasung [7], [8], [9]. Um Störungen durch Fremdlicht auszuschliessen, wurden an die Innenseite des Schirms anschliessende, schwarz ausgekleidete Messboxen gebaut, die den Bereich hinter der Scheibe abschirmen.

Als Referenz wurden eine Messbox ohne Pflanzen sowie ein externes Pyranometer zur Messung der direkten solaren Einstrahlung aufgestellt.

Für insgesamt zehn Pflanzenarten wurden über zwei Jahre hinweg systematische Messungen durchgeführt. Die gesammelten Daten wurden mit Python ausgewertet und die Kennzahlen für charakterisierter Pflanzengruppen aufbereitet.

1.4.2 Messung von Temperaturunterschieden durch unterschiedliche Begrünungen

Zusätzlich zur Messung der Lichtdurchlässigkeit wurden Temperaturdaten an verschiedenen Punkten aufgenommen (z. B. Innenraum der Messstation, Glasoberflächen, Zwischenraum zwischen Glas und Pflanzen sowie direkt bei der Vegetation). Diese Temperaturdaten ermöglichen Rückschlüsse auf die thermische Wirkung der Begrünungen und wurden ebenfalls in Python ausgewertet.

1.4.3 Auswirkungen der Pflanzen auf Gebäude und Umwelt

Im Verlauf der Kultivierung und Messungen wurden wichtige Merkmale der Pflanzen dokumentiert. Ergänzend dazu wurde die vorhandene Fachliteratur herangezogen, um mögliche Auswirkungen der Begrünungen auf Gebäudeunterhalt, Schadenspotenziale und geeignete Konstruktionsmethoden zu analysieren. Invasive Pflanzenarten (Neophyten) der Schweiz, beispielsweise das immergrüne Geissblatt, wurden bewusst nicht in die Studie einbezogen.

- ⇒ Es ist anzumerken, dass die Beurteilung der gebietsfremden Arten durch den Bund laufen neu beurteilt und aktualisiert wird. Daher ist es möglich, dass in dieser Studie verwendete Pflanzen zu einem späteren Zeitpunkt als schädlich oder invasiv eingestuft werden können.

1.4.4 Thermisches Rechenmodell und Parameterstudie

Für eine detaillierte und praxisnahe Bewertung der Ergebnisse wurde ein thermisches Simulationsmodell entwickelt. Dieses Modell berechnet den jährlichen Energiefluss durch begrünte Fassadenflächen. Die Validierung des Modells erfolgte anhand der gemessenen Verschattungs- und Temperaturwerte. Eine umfangreiche Parameterstudie wurde durchgeführt, um den energetischen Einfluss von Fassadenbegrünungen bei unterschiedlichen Ausrichtungen im Jahresverlauf zu ermitteln. Dabei wurde die Ausrichtung in 30° -Schritten variiert, um aus dem Energieertrag den g_{tot} - bzw. F_c -Wert zu bestimmen. Dies soll als Grundlage für zukünftige energetische Gebäudesimulationen mit begrünten Fassaden dienen.



1.4.5 Flächenkonkurrenz Fassadenbegrünung zu Photovoltaik

Kurz nach dem vorliegenden Projekt wurde am Institut für Gebäudetechnik und Energie (IGE) der Hochschule Luzern T&A das BFE-Projekt GreenPV gestartet. Dieses Projekt hat sich intensiv mit der Thematik der Flächenkonkurrenz von Photovoltaik und Fassadenbegrünung auseinandergesetzt.

Zwischen den beiden Projekten fand ein aktiver Austausch und gegenseitige Beteiligung statt, sodass diese Thematik im vorliegenden Bericht nur in komprimierter Form wiedergegeben wird.

1.5 Botanische und ökologische Grundlagen der Fassadenbegrünung

1.5.1 Kletterpflanzen und ihre Kletterstrategien

Kletterpflanzen sind die Hauptakteure jeder Fassadenbegrünung. In ihrer natürlichen Umgebung findet man sie vor allem an Waldrändern, in Lichtungen oder an Felsen. Dort herrschen meist gute Wasserversorgung, aber oft Lichtmangel – deshalb wachsen sie dem Licht entgegen und nutzen vorhandene Strukturen, um in die Höhe zu gelangen. Statt dicke Stämme auszubilden, sparen sie Energie und nutzen andere Pflanzen, Mauern oder Rankhilfen als Aufstiegshilfe.

Je nach Art haben Kletterpflanzen unterschiedliche Kletterstrategien entwickelt. Für die Planung einer langlebigen und schönen Fassadenbegrünung ist es wichtig, diese zu kennen und passende Kletterhilfen auszuwählen. Das richtige System fördert das Wachstum der Pflanzen, spart langfristig Kosten und erleichtert die Pflege.

Selbstklimmer wie Efeu (*Hedera helix*) oder Wilder Wein (*Parthenocissus tricuspidata*) haften mit Luftwurzeln oder Haftscheiben direkt an Mauern und benötigen keine zusätzlichen Kletterhilfen. Sie sind pflegeleicht, können aber bei unpassendem Untergrund Schäden oder unschöne Spuren hinterlassen.

Gerüstkletterpflanzen benötigen eine spezielle Unterstützung:

- **Schlinger** wie Geissblätter (*Lonicera*) winden sich ideal an senkrechten Seilen empor.
- **Ranker** wie Clematis bevorzugen dünne, senkrechte Seile oder gitterartige Strukturen.
- **Spreizklimmer** wie Kletterrosen halten sich mit ihren Trieben locker an waagerechten oder schrägen Stützen fest.
- Mit filigranen, weitmaschigen Gittern lassen sich verschiedene Kletterpflanzenarten kreativ an einer Fassade kombinieren.

1.5.2 Lebensrhythmen und Artenvielfalt

Bei Fassadenbegrünungen werden vor allem Klettergehölze eingesetzt, also mehrjährige, verholzende Arten wie Wisteria (Blauregen) oder Clematis. Sie sind entweder laubabwerfend oder immergrün und prägen das Erscheinungsbild oft über viele Jahre.

Seltener werden **Kletterstauden** wie Hopfen (*Humulus lupulus*) verwendet, die jährlich neu austreiben und im Herbst absterben. Einjährige Kletterpflanzen wie Trichterwinde (*Ipomoea*) eignen sich vor allem als temporärer Sichtschutz oder als Lückenfüller in jungen Begrünungen. Wärmeliebende, frostempfindliche Exoten wie Bougainvillea setzen farbige Akzente, sind in der Schweiz aber nur in geschützten Lagen oder als Kübelpflanzen verwendbar.



1.5.3 Weitere Begrünungsmöglichkeiten an Fassaden

Nicht alle Begrünungen beruhen auf klassischen Kletterpflanzen.

- **Obst- und Reben-Spaliere** an Fassaden haben eine lange Tradition und bringen Früchte direkt ans Haus – vorausgesetzt, Sortenwahl und Standort stimmen.
- **Zierpflanzen und Zwerggehölze** in Kübeln, wie Passionsblumen oder Säulenformen, sorgen für zusätzliche Vielfalt.
- **Hängende Pflanzen** wachsen in Gefässen von oben nach unten, eignen sich aber meist nur für geringe Höhen.
- Das **wandgebundene Grün** („mur végétal“ nach Patrick Blanc) – eine moderne Form vertikaler Begrünung – ist technisch aufwändig (z. B. automatische Bewässerung) und wird deshalb hier nur am Rande behandelt.

1.5.4 Grundlagen der Pflanzenwahl und Standortfaktoren

Die Pflanzenwahl beeinflusst das Erscheinungsbild, die Pflege und die energetische Wirkung einer Fassadenbegrünung massgeblich. Wichtige Kriterien:

- **Lichtverhältnisse:** Je nach Art verlangen Pflanzen einen sonnigen, halbschattigen oder schattigen Standort.
- **Mikroklima und Winterhärte:** Einige Arten sind frosthart, andere benötigen einen geschützten Platz.
- **Bodenansprüche:** Substrat und Versorgung mit Wasser und Nährstoffen müssen zur Art passen.
- **Laubabwurf oder Immergrün:** Für sonnige, nach Süden ausgerichtete Fassaden sind laubabwerfende Arten meist ideal, da sie im Sommer verschatten und im Winter Sonnenlicht durchlassen. Immergrüne Arten eignen sich für schattigere Lagen und bieten dauerhafte Begrünung.
- **Wuchseigenschaften:** Wuchshöhe, Breite, Wuchsgeschwindigkeit, Platzbedarf und Kontrollierbarkeit (z. B. Vermeidung von Verwilderung, Schutz vor Fensterüberwuchs oder Fallrohren).
- **Kletterstrategie und Kletterhilfen:** Die Art der Begrünung bestimmt, welche Kletterhilfe gewählt werden sollte.
- **Blühaspekte, Laub- und Fruchtschmuck:** Blütezeiten, Farben, Duft



2 Methode

2.1 Funktion und Aufbau der Messeinrichtung

Die Verschattungswirkung der Kletterpflanzen wurde an sechs Messeinrichtungen erfasst. Von den sechs identischen Messboxen wurden fünf mit Pflanzen versehen, während die sechste Box als Referenz ohne Pflanzenbewuchs diente. Jede Messeinrichtung bestand aus einem mit Sensoren ausgestatteten, isolierten und einseitig verglasten Raum mit den Abmessungen 1.6m x 1.6m x 1.0m (H x B x T). Vor der Verglasung werden vertikale Rankhilfen durch ein Holzgerüst gehalten.

An allen sechs identischen Messeinrichtungen wurden verschiedene Messmittel eingebaut (siehe auch Detailbeschreibung der Messmittel):

- Die Verteilung der Einstrahlung hinter der Bepflanzung wurde bildbasiert erfasst.
- Die Temperaturen wurden an mehreren Positionen der Messeinrichtungen gemessen.

Die Versuchsanordnung ist nach Süden ausgerichtet, um optimale Messbedingungen zu gewährleisten. Der Innenraum ist mit schwarzem, kaum reflektierendem Stoff ausgekleidet, um die bildbasierte Erfassung der Einstrahlung nicht zu beeinflussen. Die Abbildung 1 zeigt die Ansicht der Versuchseinrichtung, die Abbildung 2 den Schnitt durch die Versuchseinrichtung. Die Abbildung 3 zeigt Fotos aus vom Bau und Aufbau der Messstationen.

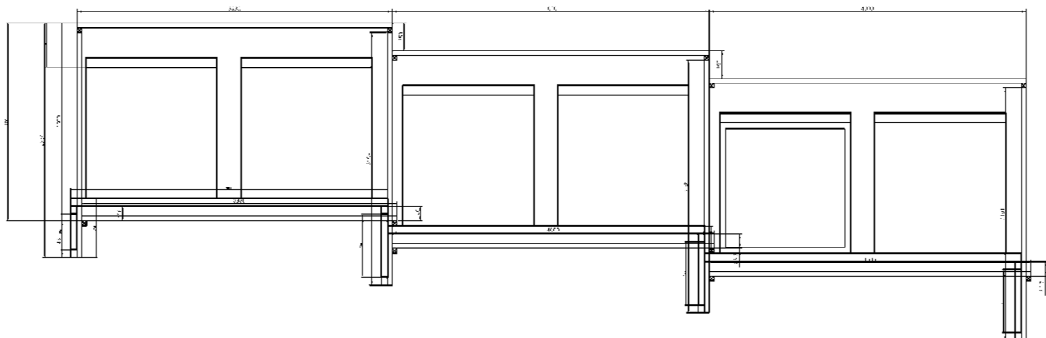


Abbildung 1: Ansicht der Versuchseinrichtung

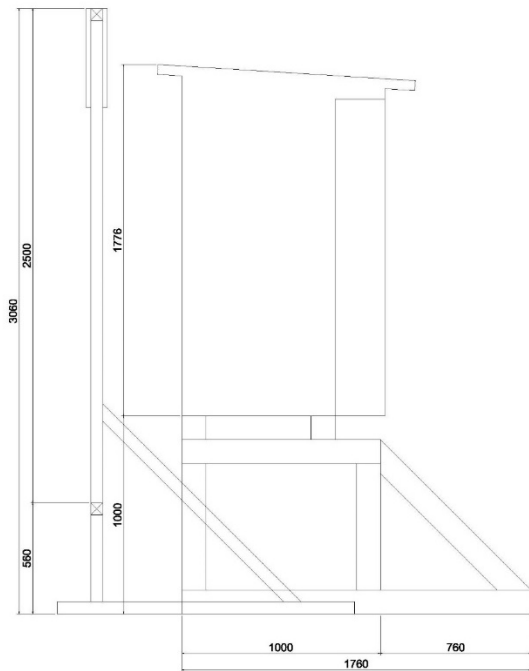


Abbildung 2: Schnitt durch die Versuchseinrichtung



Abbildung 3: Aufbau der Messstationen



2.2 Messeinrichtung

2.2.1 Messung der solaren Einstrahlung

Um die gesamte auftreffende Sonnenstrahlung (Globalstrahlung) zu erfassen, wurde oberhalb der Messstationen ein Pyranometer des Typs Kipp & Zonen SMP3 installiert. Dieses Pyranometer erfasst die solare Einstrahlung, die auf die Glasscheiben trifft, und dient als Referenz für die HDRI-Kameraaufnahmen.

Das Pyranometer entspricht der ISO 9060 Klasse C spektral flach, es misst im Spektralbereich von 300 to 2800 nm und mit 180° Blickwinkel.

2.2.2 Temperaturmessungen

Jede Messstation wurde mit fünf Temperatursensoren (Typ DS-18B20 von Dallas Semiconductor) ausgestattet, um die Temperatur an verschiedenen Positionen zu messen. Diese Sensoren befinden sich an folgenden Positionen (siehe auch Abbildung 4):

- **S0:** Aussentemperatur, einmalig unter der Messstation
- **S1:** Temperatur im Innenraum (an der Rückwand)
- **S2:** Temperatur unter dem Dach (zur Kontrollmessung)
- **S3:** Temperatur direkt an der Glasscheibe
- **S4:** Temperatur im Fassadenzwischenraum (frei hängend zwischen Pflanze und Glas)
- **S5:** Temperatur direkt bei den Pflanzen (frei hängend im Blattwerk)

Die Temperaturen wurden im Fünf-Minuten-Intervall aufgezeichnet. Die Sensoren wurden dabei möglichst so positioniert, dass sie nicht direkt von der Sonne bestrahlt wurden, da sonst leicht verfälschte Messwerte auftreten könnten. Auf ein Gehäuse wurde verzichtet, da dieses wiederum einen zusätzlichen Schattenwurf zur Folge hat.

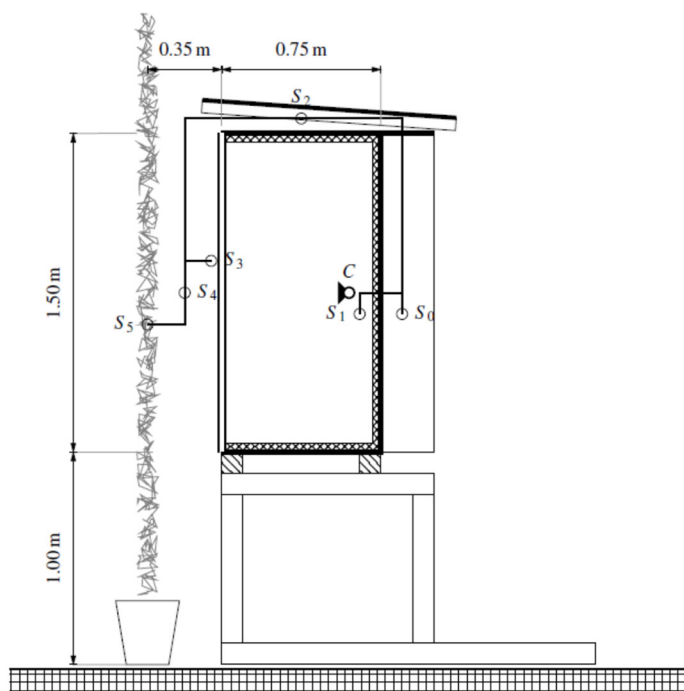


Abbildung 4: Querschnitt der Messstation mit Sensorpositionen



2.2.3 Bildbasierte Erfassung der Einstrahlungsverteilung

Für die Bestimmung der Verschattungswirkung wurde die Einstrahlung auf der Verglasung erfasst. Da diese durch die Struktur der Begrünung ungleichmässig über die Fläche verteilt ist, wurde ein bildbasiertes Verfahren eingesetzt. Eine kalibrierte, monochromatische Kamera vom Typ ZWO ASI 120mm-s ohne mechanischen Verschluss, deren Sensor das sichtbare und nahinfrarote Spektrum abdeckt, erfasst die Helligkeitsverteilung auf einem an der Innenseite der Verglasung angebrachten Papierschirms, der im Folgenden als Transmission Illuminance Proxy (TIP) bezeichnet wird.

Die Kamera wurde mit einem Fischaugenobjektiv mit einem Blickwinkel von ca. 150° ausgestattet, um trotz der geringen Distanz die gesamte Fläche des TIP abdecken zu können. Ein Peltierkühler stabilisierte die Temperatur auch im Sommer. Die erfassten, unkomprimierten und mit 10bit aufgelösten Bilder wurden aus Belichtungsreihen zusammengesetzt, um einen hohen Dynamikumfang zu erreichen. Dieses High Dynamic Range Imaging (HDRI) liefert Bilder, deren Pixelwerte der Strahldichte im erfassten Spektrum entsprechen und die auch starke Kontraste zwischen verschatteten und direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzten Teilflächen erfassen können.

2.3 Auswahl der Pflanzenproben

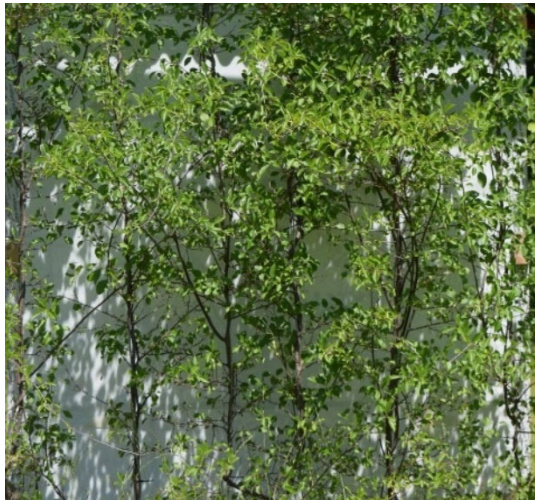
Die Pflanzenproben wurden bereits 2018 im Kompetenzzentrum Gebäudehülle und Ingenieurbau kultiviert, um zum Start des Projekts in gutem Zustand bereit zu stehen. Jede der fünf Messstationen wurde mit sechs einzelnen bewachsenen Seilsträngen ausgestattet. Bei den kultivierten Pflanzenarten handelt es sich um die Arten nach Tabelle 1 und nachfolgendem Beschrieb. Die Pflanzenarten wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Experten Fritz Wassmann (Atelier für Ökologie und Gartenkultur) hinsichtlich ihres Wachstums, ihrer Robustheit und ihrer Eignung für vertikale Begrünungen sorgfältig geprüft und entsprechend den Anforderungen des Projekts ausgewählt.

- *Lonicera caprifolium* / Echtes Geissblatt
In Mitteleuropa heimisch, gilt als nicht invasiv.
- *Clematis montana* / Berg Waldrebe
In Europa nicht heimisch, gilt als nicht invasiv.
- *Actinidia arguta* / Minikiwi
In Europa nicht heimisch, gilt im Gegensatz zu *Actinidia chinensis* nicht als invasiv.
- *Celastrus orbiculatus* / Baumwürger
In Europa nicht heimisch, gilt als Art die nachweislich Schäden in der Umwelt verursacht und ist für den direkten Umgang in der Umwelt verboten¹
- *Fallopia aubetii* / Schlingknöterich
In Europa nicht heimisch, gilt als nicht invasiv.
- *Schisandra chinensis* / Chinesisches Spaltröhrchen
In Europa nicht heimisch, gilt als nicht invasiv.
- *Aristolochia macrophylla* / Pfeifenwinde
In Europa nicht heimisch, gilt als nicht invasiv.
- *Wisteria sinensis* / Glyzinie
In Europa nicht heimisch, gilt als nicht invasiv (gilt in den USA als invasiv).
- *Akebia quinata* / Klettergurke
In Europa nicht heimisch, gilt als potentiell invasiv.
- *Periploca graeca* / Baumschlinge
In Europa nicht heimisch, gilt als nicht invasiv (gilt in den USA als invasiv).

¹ Verordnung über den Umgang mit Organismen in der Umwelt, Anhang 2.1, <https://www.fedlex.admin.ch/eli/oc/2024/116/de>



Tabelle 1: Vermessene Pflanzenproben

Lonicera caprifolium / Echtes Geissblatt 	Clematis montana / Berg Waldrebe 
Actinidia arguta / Minikiwi 	Celastrus orbiculatus / Baumwürger 
Fallopia aubetii / Schlingknöterich 	Schisandra chinensis / Chinesisches Spaltkörbchen 



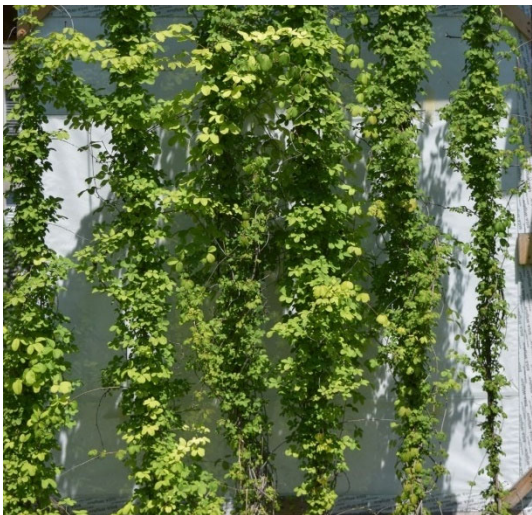
Aristolochia macrophylla / Pfeifenwinde



Wisteria sinensis / Glyzinie



Akebia Qinata / Klettergurke



Periploca graeca / Baumschlinge



2.4 Auswertung der Einstrahlungsverteilung

Da die Messeinrichtung innen mit einem schwarzen, kaum reflektierenden Stoff ausgekleidet ist, resultiert die durch die Kamera aufgenommene Strahldichte aus der lokalen Beleuchtung bzw. Bestrahlungsichte von aussen sowie den Transmissionseigenschaften des Schirms. Letztere wurden goniophotometrisch vermessen, so dass die direkt-hemisphärische Transmission als Funktion der Einfallsrichtung ermittelt werden konnte. Die lokale Bestrahlungsstärke E kann dann aus der durch die Kamera erfassten Bestrahlungsichte L und der für den jeweiligen Sonnenstand geltenden, direkt-hemisphärischen Transmission τ pro Pixel ermittelt werden:

$$E = L \pi \tau^{-1}$$

Auf diese Weise lässt sich über die Fläche hoch aufgelöst messen, wie viel Sonnenlicht durch das Blattwerk der Pflanzen hindurch auf die Glasoberfläche trifft.

Die vorgestellte Berechnung geht von einer ideal-diffusen Transmission durch den TIP aus. Diese Vereinfachung wurde durch Vergleich mit den Messwerten des Pyranometers bestätigt, ein derzeit in Arbeit befindliches Manuskript untersucht jedoch darüber hinaus die Berücksichtigung von



Vorwärtsstreuung durch das Papier durch Verwenden der richtungsaufgelösten Bidirektionalen Transmissionsverteilungsfunktion anstelle des Transmissionsintegrals.

Um eine Beeinflussung durch den Bewuchs benachbarter Messeinrichtungen bei seitlicher Einstrahlung auszuschliessen, wurden nur die zwischen 11:00 und 13:00 Uhr aufgenommenen Bilddaten ausgewertet (Winterzeit, ohne Berücksichtigung der Sommerzeit). Die Aufnahmen der Kamera wurde in Intervallen von 15 Minuten durchgeführt und dann zu Wochenmittelwerten zusammengefasst. Vereinzelt fehlten Daten aufgrund von Messausfällen oder längeren bewölkten Perioden. Diese Lücken wurden durch eine lineare Interpolation zwischen den benachbarten, vorhandenen Datenpunkten geschlossen. Zur besseren Aussagekraft wurden die Daten zudem durch einen gleitenden Mittelwert geglättet und anschliessend in Jahresdiagrammen dargestellt.

Zur Bestimmung der Verschattungswirkung wurden nur Daten aus sonnigen Tagen ausgewertet, um klare Schatteneffekte zu erhalten. Die Trennung zwischen bewölkten und sonnigen Tagen erfolgte auf Basis eines „Clear Sky“ Modells. Dazu wurde ein Schwellenwert von 80 % dieser theoretisch maximal möglichen Einstrahlung festgelegt. Alle Messungen, bei denen die vom Pyranometer gemessene Globalstrahlung oberhalb dieser Grenze lag, wurden als sonnige Tage klassifiziert und für die Auswertung verwendet, siehe dazu Abbildung 5. Bewölkte Tage, bei denen diese Werte unterschritten wurden, wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

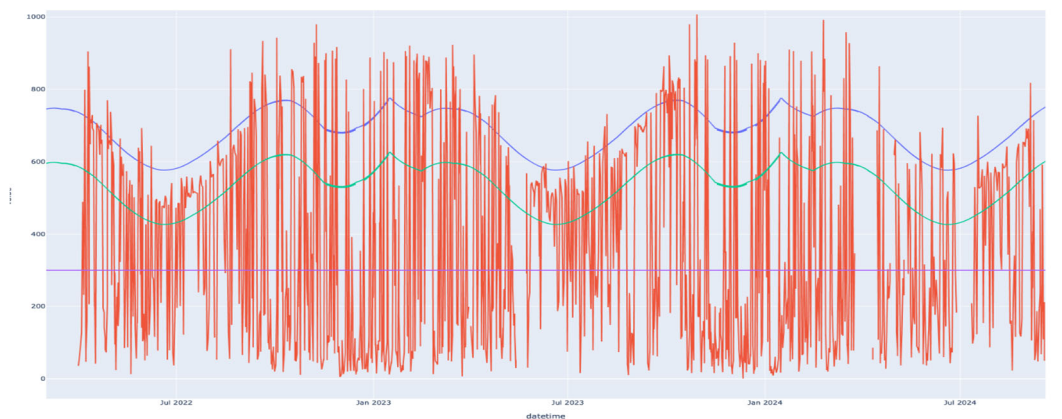


Abbildung 5: Trennung der bewölkten von den sonnigen Tagen über die clear sky radiation. Blaue Kurve clear sky radiation, grüne Kurve 80% Wert der clear sky radiation, in rot, Einstrahlungswerte des Pyranometers.

2.5 Grundlagen der thermischen Simulationen der Messaufbauten

2.5.1 Modell

Das thermische Berechnungsmodell wird in Modelica-Dymola, einem Multiphysik-Simulationsprogramm, als thermisches Netzwerk erstellt (siehe Abbildung 6). Das Simulationsmodell basiert auf gängigen eindimensionalen Wärmetransportmodellen gemäss den einschlägigen Normen und berücksichtigt effektive temperaturabhängige Vorgänge (Gaseigenschaften, Strahlungsaustausch) sowie instationäre Effekte (zeitabhängige Temperaturverläufe unter Berücksichtigung der Speichereigenschaften der Materialien). Das Modell repräsentiert jeweils den mittleren, von Randeinflüssen ungestörten Bereich der Wandelemente.

Solare Absorption wird auf den Kern von transparenten Materialien (Glas) aufgegeben.



Zugrundeliegende Normen:

- Glaseigenschaften SN EN 572-1:2012
- Gaseigenschaften EN ISO 52022-3:2017, Anhang F
- Wärmeübergang innen nach SN EN 6946 (fixe Koeffizienten)²
- Wärmeübergang aussen Strahlung nach ISO 15099 8.4.3.2 (T^4 -Gesetz) mit Strahlungstemperatur T_{rm} = Aussenlufttemperatur
Konvektion nach ISO 15099 8.3.3.4

Die Verglasungen sind mit jeweils einer zentralen Masse für jede Glasscheibe modelliert. Die absorbierte Sonnenenergie wird direkt auf die Scheibenmitte / Masse eingespeist und über Wärmeleiter von Scheibenmitte an die Oberfläche weitergegeben. Die solaren Energieströme (Direktstrahlung «Dir» & Diffusstrahlung «Diff») sind vektoriell als numerische Werte (Real) inklusive dem resultierenden Einfallswinkel α modelliert [Dir, Diff, α].

Die solare Transmission τ der Verglasungen wird unter Berücksichtigung des Einfallswinkels α zur Flächennormalen berechnet. Dies führt zu einer, je nach Einfallswinkel stärkeren oder schwächeren, Abminderung der Transmission, wodurch die im Speicher absorbierte Energie nicht überschätzt wird.

Opake Elemente mit Speicherfähigkeit sind in 1/5 Wärmeleitwiderstände (WallConductor) und insgesamt 6 Massen (WallLayer) (1/12, 1/5, 1/10, 1/5, 1/5, 1/12) modelliert. Der solare Wärmeeintrag, falls vorhanden, wird auf die äusserste Oberflächenschicht aufgegeben.

Die durch die Verglasung transmittierte Solarstrahlung (bzw. solare Energie) wird aufgrund der Diffusen Papierschicht innen am Glas zu gleichen Teilen auf alle inneren Oberflächen verteilt. Die Innenraumtemperatur ergibt sich somit als Resultat des thermischen Gleichgewichtes, wobei nur eine Aussenwand (Glasscheibe) Energie ins Innere transmittiert.

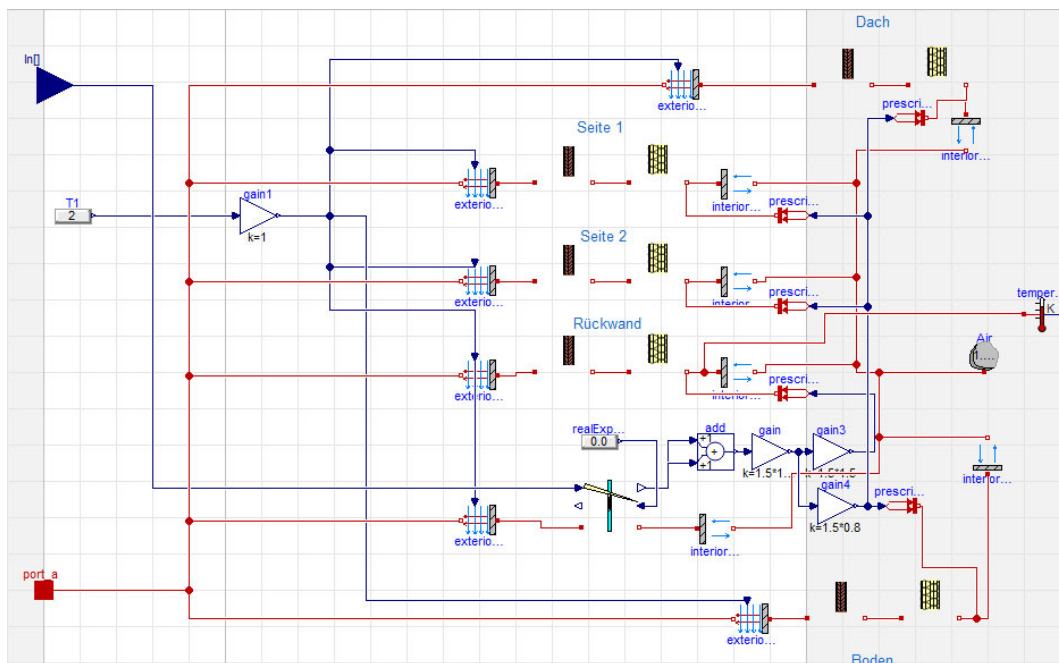


Abbildung 6: Modell einer Messstation in Modelica

² Frühere Studien haben gezeigt, dass das Modell nach EN 6946 stabiler ist und bessere Ergebnisse erzielt als das dynamische Modell nach ISO 15099



Da die Bepflanzung nur lokal vor der Box besteht, ist deren Einfluss auf die Konvektion bzw. Temperatur vor der Verglasung von untergeordneter Bedeutung. Auf die Modellierung des Strahlungsaustauschen zwischen Verglasung und Pflanzen wird verzichtet.

- ⇒ Die Bepflanzung wird als ideale, thermisch nicht beeinflussende Verschattung berücksichtigt, indem lediglich die Energietransmission auf die Verglasung skaliert wird.

Modellanwendung des Modelica-Dymola Netzwerkansatzes siehe auch [10] und [11].

2.5.2 Materialkennwerte

Die verwendeten Materialkennwerte sind in Tabelle 2 zusammengefasst und entsprechen üblichen Werten aus der Literatur.

Die Absorption der inneren Oberfläche der Isolation wird mit 100% ($\alpha = 1$) berücksichtigt. Dies da zur Vermeidung interner Reflexionen die Oberfläche mit schwarzem Vorhangstoff ausgekleidet ist. Auf die gesonderte Modellierung des direkt anliegenden Stoffes wird verzichtet.

- ⇒ der Innere Temperatursensor ist zwischen Stoff und Isolation an der Rückwand, die Entspricht im Modell der Oberfläche der Isolation an der Rückwand.

Tabelle 2: Materialeigenschaften im Messboxmodell

	λ [W/m]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kgK)]	ε [-]	α [-]	τ [-]	t [mm]
Glas	1	2500	750	0.837	0.11	0.14*	6
Isolation	0.035	30	1500	0.9	1	-	50
Holz	0.14	470	1600	0.9	-	-	25

2.5.3 Optische Materialkennwerte des TIP

Die solare Transmission τ des TIP wurde unter Berücksichtigung des Einfallswinkels α zur Flächennormalen in der Umrechnung von Kameradaten zu lokaler Bestrahlungsstärke berücksichtigt. Die Transmission durch das papierbespannte Glas wurde daher für unterschiedliche Einfallswinkel am Goniophotometer der HSLU T&A (Modell pg2, pab advanced technologies, Freiburg im Breisgau) gemessen. Während bei klaren und unbeschichteten Verglasungen die Winkelabhängigkeit der Transmission mit dem Gesetz von Fresnel beschrieben werden kann, weicht die Messung vom Glas mit Papier stark von diesem ab und wurde mit einem Polynom modelliert (siehe Abbildung 7).

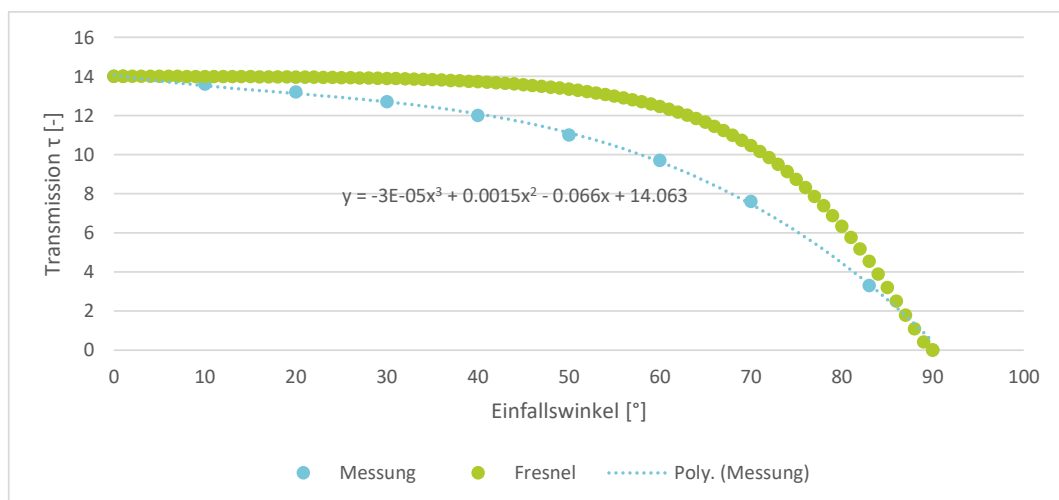


Abbildung 7: Vergleich winkelabhängige Transmission von Glas nach Fresnel und Messung am Glas mit Papier



2.5.4 Randbedingungen

Die Randbedingungen Umgebungstemperatur & solare Strahlung werden gemäss den Messdaten in das Modell eingelesen und verwendet.

Die solare Leistung wird gemäss der gemessenen Werten durch das Pyranometer (Abschnitt 2.2.1) angewendet und auf die Verglasung der Testbox aufgebracht. Die transmittierte solare Energie wird gleichmässig auf die inneren Wände verteilt und ideal absorbiert ($\alpha = 1$).

Der Einfallswinkel für die Korrektur der Transmission der Verglasung wurde für den Standort Horw mit Python errechnet.

Da die Messdaten nur Globalstrahlung beinhalten, werden diese mittels Konverter in Direkt- und Diffusstrahlung umgewandelt

Diffusstrahlung	100% bis 100 W/m ² , 100W/m ² + 5% über 100 W/m ²
Direktstrahlung	0% bis 100 W/m ² , 95% - 100W/m ² über 100 W/m ²

Dieses Verfahren beruht auf vorgängigen Betrachtungen wie z.B. in *An Innovative Façade Element with Controlled Solar-Thermal Collector and Storage*, doi:10.3390/su12135281 bereits angewendet. Ebenso wurde in der Masterthesis *Wüest 2015* gezeigt, dass immer ein gewisser Anteil Diffusstrahlung an der Globalstrahlung vorhanden ist. Die Betrachtung normaler Tagesverläufe der Global- und Diffusstrahlung in Horw wie in Abbildung 8 zeigen, dass bei ca. 100 W/m² Einstrahlung Global- und Diffusstrahlungsanteil auseinanderklaffen.

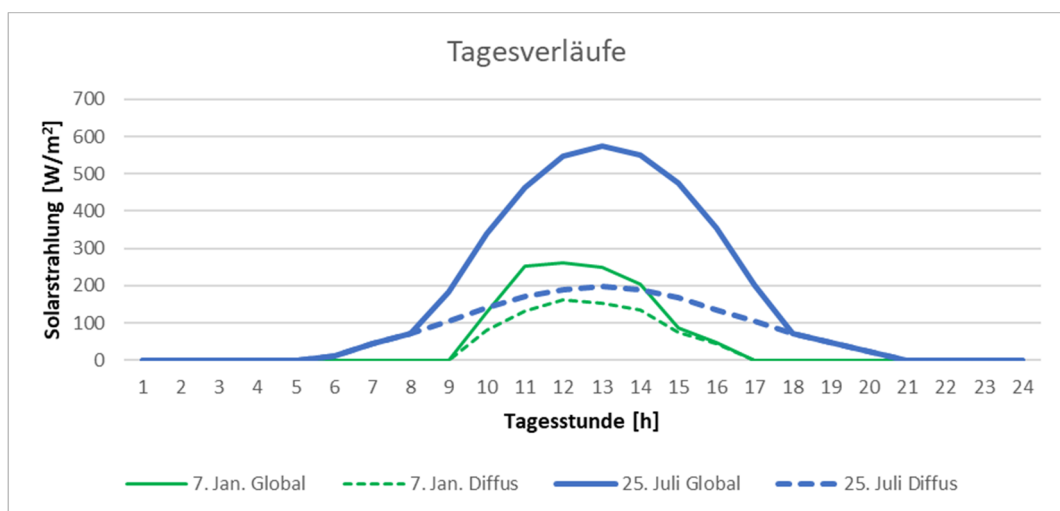


Abbildung 8: Vergleich Global- und Diffusstrahlung für Horw an zwei Tagen

Notiz: Das Konverter-Modell hat geringen Einfluss auf die Resultate, da die Winkelabhängigkeit der Glasscheibe bei üblichen Einstrahlungswinkeln nur geringen Einfluss auf die Absorption hat. Der Einfluss betrifft besonders die Transmission ab ca. 45°, was aber aufgrund der geringen Transmission ebenfalls von untergeordneter Rolle ist.

Für die Windgeschwindigkeit liegen keine Messwerte vor, der Wert wird auf 2 m/s fixiert. Da das Modell nach ISO 15099 unter 2 m/s konstant ist und darüber eine Steigung von 1.9 W/(m/s) besitzt, ist dies für die meisten Zeitschritte ein zu vernachlässigender Fehler.

Granularität: Messdaten 1 min



2.6 Grundlagen der thermischen Simulation für Fassaden

2.6.1 Modell

Das Simulationsmodell für zur Berechnung der Energieströme an begrünten Fassaden wird wie bei den Messaufbauten mittels Modelica-Dymola aufgebaut und repräsentiert den mittleren, von Randeinflüssen ungestörten Bereich des Fassadenelementes.

Ergänzend werden folgende Festlegungen angewendet:

- Die Winkelabhängigkeit des Glases wird im Modell nach dem Gesetz von Fresnel als relative Abminderung (τ/τ_0) zur echtwinkligen Eigenschaft nach SN EN 410 berücksichtigt. Dies gilt für gerichtete Solarstrahlung (Direktstrahlung), Diffusstrahlung wird rechtwinklig angenommen und nicht abgemindert.
- Low-E Beschichtungen von Glas werden mit $\epsilon = 0.02$ oder bereitgestelltem Wert berücksichtigt

Aufgrund der Berücksichtigung der Winkelabhängigen Eigenschaften des Glases, variiert die direkte Transmission aufgrund des Sonnenstandes und kann zu geringen Abweichungen je nach Ausrichtung führen.

Das Modell wurde vom CCGH+IB bereits mehrfach eingesetzt und mit Messdaten verglichen, weitere Informationen können in der Literatur [12] und [10] entnommen werden.

2.6.2 Randbedingungen

Die externen Randbedingungen werden mit Meteonorm als Standardjahr für den Standort Zürich und für jede Fassadenausrichtung auf Stundenbasis generiert und interpoliert.

- Aussenlufttemperatur °C
- Globalstrahlung W/m²
- Diffusstrahlung W/m²
- Sonnenposition ° (Azimut & Höhenwinkel)
- Wind m/s

Innenklima

- Raumlufthtemperatur Konstant 20°C



3 Ergebnisse und Diskussion der Messung

Die Messungen wurden über drei Vegetationsperioden hinweg (01. April 2022 bis 30. Juni 2024) durchgeführt. Die Ergebnisse umfassen detaillierte Daten zur Verschattungswirkung und zur Temperaturentwicklung in den Messstationen. Im März 2023 erfolgte ein Pflanzenwechsel, bei dem die jeweils nächsten fünf Pflanzenarten für das zweite Messjahr eingesetzt wurden.

3.1 Verschattungswirkung

3.1.1 Einstrahlungskoeffizient

Der direkte Einstrahlungskoeffizient beschreibt geometrisch den durch die Pflanzen verschatteten Anteil des TIP. Dazu wurden alle Pixel der HDR-Aufnahmen in „verschattete“ und „unverschattete“ Bereiche eingeteilt und gezählt. Der Anteil der unverschatteten Pixel liefert den direkten Einstrahlungskoeffizienten. In der Abbildung 9 ist exemplarisch eine Auswertung einer Aufnahme gezeigt. Dabei beschreiben alle roten und orangen Pixel die verschatteten Flächen.

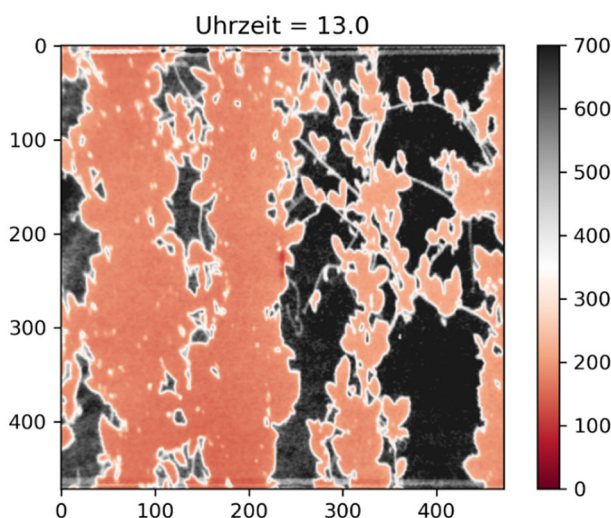


Abbildung 9: Einstrahlungsfläche einer Probe

Die Auswertungen der Abbildung 10 zeigen, dass im Hochsommer alle Pflanzenarten etwa >80 % der Scheibenfläche verschatteten. In der Wachstumsphase (Frühling) verlief der Blattzuwachs relativ gleichmässig, während der Blattabwurf im Herbst bei den verschiedenen Pflanzen deutlich stärker variierte. Die Monatsmittelwerte sind detailliert in Tabelle 3 dargestellt.

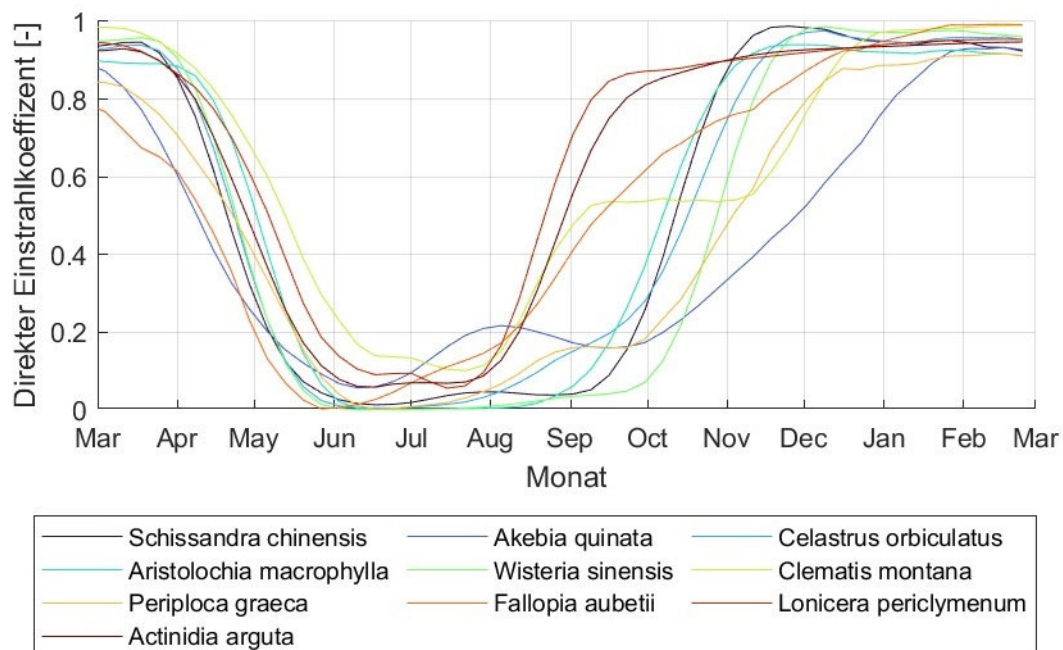


Abbildung 10: Direkter Einstrahlungskoeffizient der Proben

Tabelle 3: Monatsmittelwerte der direkten Einstrahlungskoeffizienten aller vermessenen Pflanzen

	Schisandra chinensis	Akebia quinata	Celastrus orbiculatus	Aristolochia macrophylla	Wisteria sinensis	Clematis montana	Periploca graeca	Fallopia aubetii	Lonicera periclymenum	Actinidia arguta
Januar	0.95	0.87	0.95	0.92	0.97	0.98	0.90	0.97	0.95	0.94
Februar	0.92	0.91	0.95	0.91	0.95	0.98	0.86	0.91	0.95	0.92
März	0.94	0.79	0.93	0.89	0.95	0.97	0.81	0.70	0.93	0.92
April	0.60	0.42	0.65	0.76	0.67	0.81	0.57	0.44	0.76	0.69
Mai	0.11	0.14	0.11	0.22	0.10	0.45	0.21	0.06	0.34	0.23
Juni	0.02	0.06	0.01	0.01	0.00	0.17	0.01	0.02	0.11	0.07
Juli	0.04	0.16	0.02	0.00	0.00	0.11	0.02	0.11	0.08	0.07
August	0.04	0.20	0.09	0.02	0.02	0.28	0.11	0.25	0.37	0.27
September	0.12	0.17	0.21	0.20	0.05	0.52	0.17	0.52	0.82	0.72
Oktober	0.62	0.25	0.52	0.67	0.30	0.54	0.33	0.70	0.88	0.88
November	0.96	0.42	0.89	0.92	0.83	0.60	0.62	0.80	0.91	0.92
Dezember	0.97	0.64	0.96	0.93	0.98	0.89	0.86	0.92	0.93	0.93

3.1.2 Solarer Transmissionskoeffizient

Der solare Transmissionskoeffizient gibt an, wie viel solare Energie im Vergleich zu einem komplett unverschatteten Aufbau durch die Begrünung oder zwischen den Pflanzen hindurch auf den TIP trifft. Im Gegensatz zum geometrischen Einstrahlungskoeffizienten berücksichtigt der Transmissionskoeffizient auch diffuses, mehrfach reflektiertes Licht, das durch das Blattwerk hindurchdringt.



Für die Messung wurden dieselben Bilddateien wie für den Einstrahlungskoeffizienten verwendet. Anstatt die Pixel in verschattet und unverschattet (0 und 1) zu unterteilen, wurde die für die einzelnen Pixel ermittelte Bestrahlungsstärke betrachtet. Der Mittelwert der Bestrahlungsstärke aller Pixel wurde dazu mit jenem der unverschatteten Referenzbox verglichen, wodurch der Transmissionskoeffizient bestimmt werden konnte.

Die Auswertungen zeigten, dass die Pflanzen selbst bei dichtem Bewuchs im Sommer etwa 15 bis 38 % der solaren Energie hindurchlassen (Abbildung 11). Dies bestätigt, dass hinter einer Begrünung immer genügend diffuses Tageslicht vorhanden ist. Die monatlichen Mittelwerte der Transmissionskoeffizienten sind detailliert in Tabelle 4 zu finden.

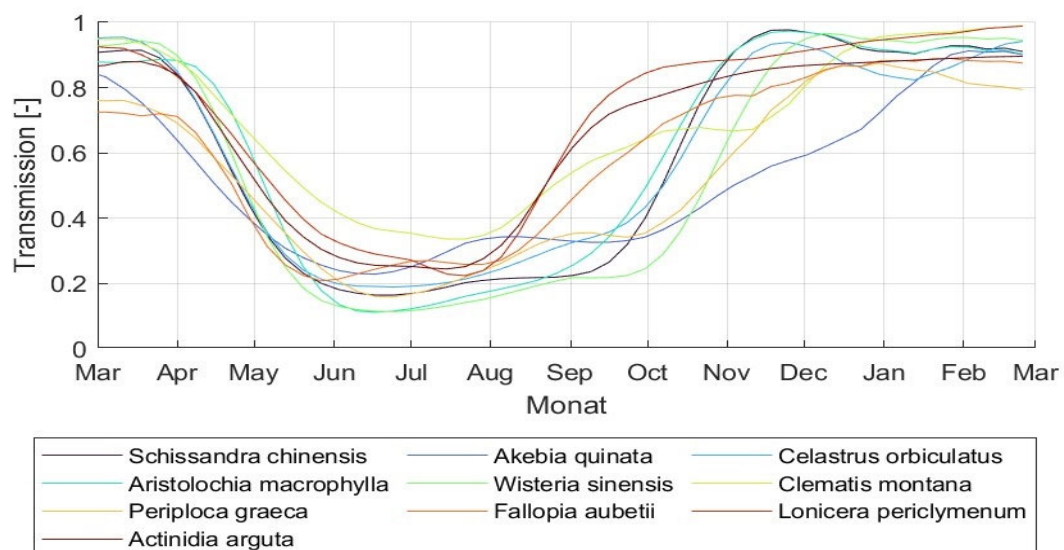


Abbildung 11: Transmissionskoeffizient der Pflanzen

Tabelle 4: Monatsmittelwerte der Transmission aller vermessenen Pflanzen

	Schisandra chinensis	Akebia quinata	Celastrus orbiculatus	Aristolochia macrophylla	Wisteria sinensis	Clematis montana	Periploca graeca	Fallopia aubetii	Lonicera periclymenum	Actinidia arguta
Januar	0.91	0.84	0.84	0.92	0.95	0.97	0.85	0.89	0.96	0.89
Februar	0.91	0.89	0.93	0.90	0.94	0.97	0.79	0.83	0.96	0.88
März	0.91	0.77	0.94	0.88	0.93	0.94	0.75	0.72	0.90	0.87
April	0.65	0.51	0.66	0.78	0.70	0.78	0.59	0.57	0.72	0.70
Mai	0.26	0.30	0.27	0.32	0.23	0.52	0.33	0.25	0.43	0.38
Juni	0.17	0.23	0.19	0.12	0.12	0.38	0.18	0.24	0.30	0.26
Juli	0.19	0.30	0.21	0.15	0.13	0.34	0.20	0.26	0.24	0.25
August	0.22	0.34	0.28	0.20	0.19	0.44	0.30	0.33	0.41	0.43
September	0.29	0.33	0.37	0.36	0.23	0.60	0.35	0.56	0.76	0.70
Oktober	0.68	0.41	0.64	0.73	0.42	0.67	0.46	0.73	0.87	0.80
November	0.95	0.54	0.91	0.95	0.81	0.70	0.69	0.79	0.89	0.85
Dezember	0.94	0.65	0.88	0.94	0.96	0.89	0.86	0.86	0.93	0.87



3.1.3 Vergleich Transmissionskoeffizient – direkter Einstrahlungskoeffizient

Ein Vergleich der Transmissionskoeffizienten mit den geometrischen direkten Einstrahlungskoeffizienten zeigt, dass auch bei geringen direkten Einstrahlungskoeffizienten ein nennenswerter Anteil diffuser Transmission erhalten bleibt. Im Sommer liegt dieser diffuse Anteil zwischen 10 % und 20 % (Abbildung 12), was bedeutet. Diese moderate, diffuse Transmission ist für die Tageslichtversorgung von Innenräumen nutzbar. Die genauen Werte sind in Tabelle 5 dargestellt.

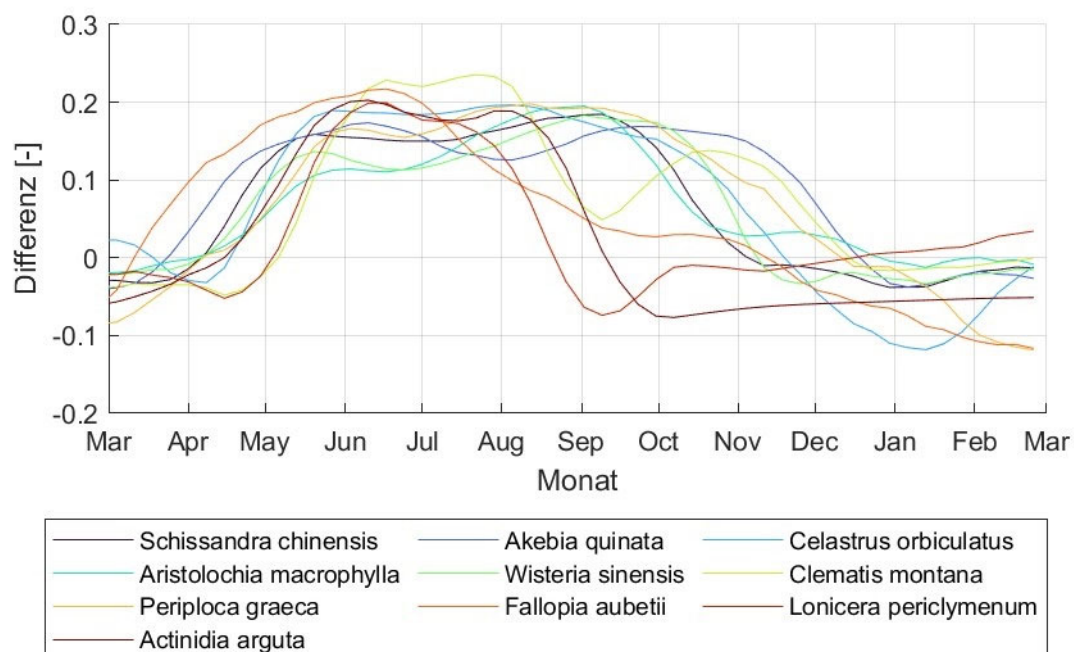


Abbildung 12: Differenz zwischen Transmissionskoeffizienten und direktem Einstrahlungskoeffizienten

Tabelle 5: Differenz Monatsmittelwerte zwischen Transmissionskoeffizienten und direktem Einstrahlungskoeffizienten

	Schisandra chinensis	Akebia quinata	Celastrus orbiculatus	Aristolochia macrophylla	Wisteria sinensis	Clematis montana	Periploca graeca	Fallopia aubetii	Lonicera periclymenum	Actinidia arguta
Januar	-0.03	-0.03	-0.11	-0.01	-0.03	-0.01	-0.05	-0.09	0.01	-0.05
Februar	-0.01	-0.01	-0.03	0.00	-0.01	0.00	-0.07	-0.07	0.02	-0.03
März	-0.03	-0.02	0.01	-0.01	-0.02	-0.04	-0.06	0.02	-0.02	-0.05
April	0.05	0.09	0.01	0.02	0.03	-0.04	0.01	0.13	-0.04	0.01
Mai	0.15	0.16	0.16	0.10	0.13	0.08	0.12	0.19	0.09	0.15
Juni	0.15	0.17	0.19	0.11	0.12	0.21	0.16	0.21	0.19	0.20
Juli	0.15	0.14	0.19	0.14	0.13	0.23	0.18	0.15	0.17	0.18
August	0.18	0.14	0.19	0.19	0.17	0.16	0.19	0.08	0.04	0.16
September	0.17	0.16	0.16	0.16	0.18	0.07	0.19	0.04	-0.06	-0.02
Oktober	0.06	0.16	0.12	0.05	0.12	0.13	0.13	0.03	-0.01	-0.07
November	-0.01	0.13	0.02	0.03	-0.01	0.10	0.07	-0.01	-0.01	-0.06
Dezember	-0.03	0.01	-0.08	0.01	-0.02	0.00	0.00	-0.05	0.00	-0.06



3.1.4 Abgleich Kamera-Pyranometer

Das bildbasierte Verfahren zur Erfassung der lokalen Bestrahlungsstärke wurde durch Vergleich der am unverschatteten Aufbau bildbasiert ermittelten Bestrahlungsstärken mit den am Pyranometer gemessenen Werten überprüft. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung unter den ausgewerteten Bedingungen an sonnigen Tagen (Abbildung 13).

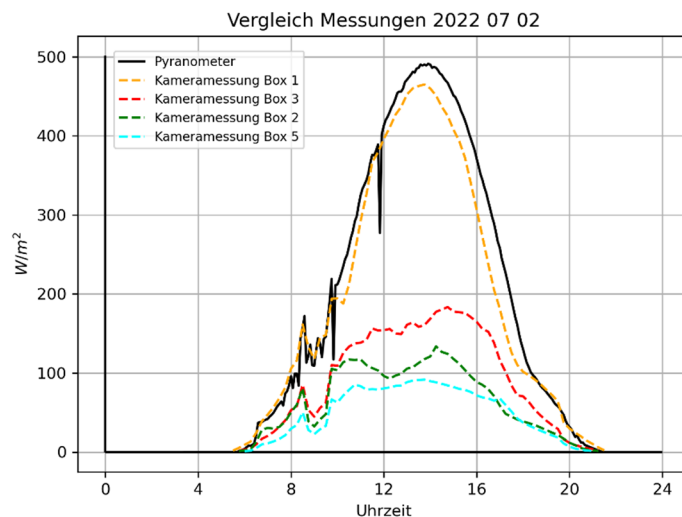


Abbildung 13: Abgleich zwischen Box 1 (ohne Proben) und Pyranometer

3.1.5 Charakteristische Wachstumsgruppen der Pflanzen

Aufgrund der grossen Streuung der Messdaten (Abbildung 14) wurden charakteristische Wachstums- bzw. Transmissionskoeffizientkurven für die Pflanzen bestimmt. Dazu wurden sogenannte „idealisierte Umhüllende“ berechnet und daraus jeweils drei typische Wachstumstypen (Low, High und Mid) abgeleitet. Zudem wurden zwei zusätzliche Varianten („Lo-Hi“ und „Hi-Lo“) definiert, die unterschiedliche saisonale Bewuchsdichten berücksichtigen. Die umhüllende mit tiefer Transmission wird mit «Low», jene mit hoher Transmission mit «High» bezeichnet. Die Variante «Mid» entspricht dem Mittelwert von Low und high. Die Variante «Lo-Hi» besitzt eher tiefe Transmission im Winter und hohe Transmission im Sommer (wie High) (75% Low / 25% High). Die Variante «Hi-Lo» ist umgekehrt (25% Low / 75% High); hohe Transmission im Winter und tiefe Transmission im Sommer (wie Low), siehe Abbildung 15. Deren Fixpunkte über den Jahresverlauf zeigt die Tabelle 6.

So können Planer und Architekten die thermische Wirkung verschiedener Pflanzenarten auf einfache Weise einschätzen und für zukünftige Anwendungen gezielt auswählen.

Die Zuordnung der untersuchten Pflanzenarten zu diesen Wachstumsgruppen gemäss Abschnitt 0 (Anhang A) ist wie folgt:

- **High:** *Periploca graeca*
- **Hi-Lo:** *Schisandra chinensis*, *Celastrus orbiculatus*, *Aristolochia macrophylla*, *Wisteria sinensis*, *Lonicera periclymenum*
- **Mid:** *Akebia quinata*, *Clematis montana*, *Fallopia aubetii*, *Actinidia arguta*

Keine gemessene Pflanze konnte der Wachstumsgruppen Lo-Hi und Low zugeordnet werden.

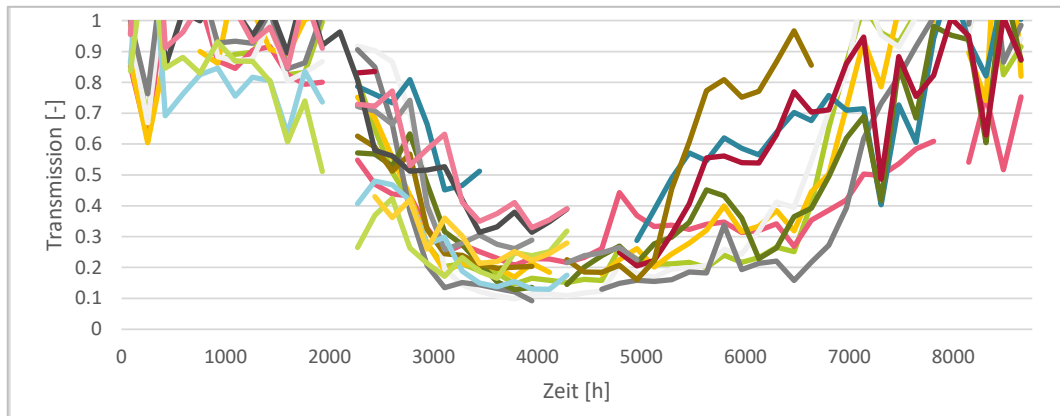


Abbildung 14: Transmissionskoeffizienten der Pflanzenarten (Rohdaten)

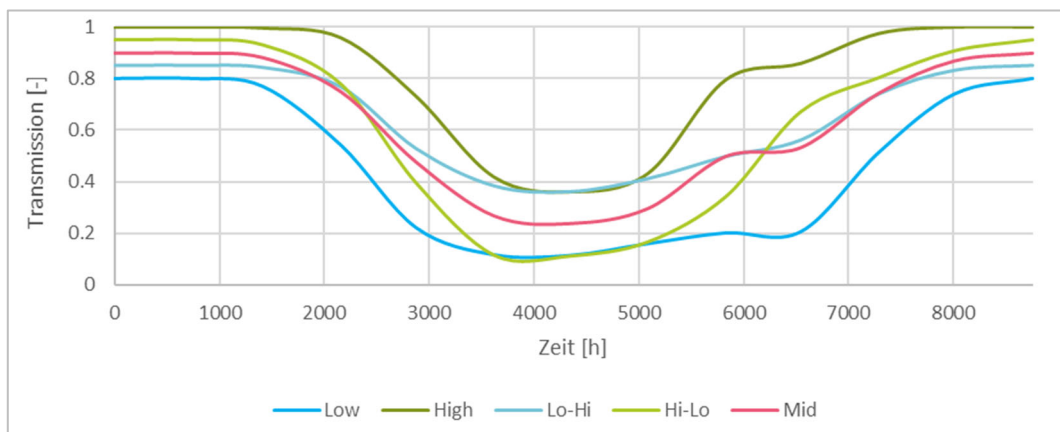


Abbildung 15: Generierung von charakteristischen Wachstumskurven für die Transmissionskoeffizienten

Tabelle 6: Fixpunkte der charakteristischen Wachstumskurven

	Low	High	Mid	Lo-Hi	Hi-Lo
01. Januar	0.80	1.00	0.90	0.85	0.95
01. Februar	0.80	1.00	0.90	0.85	0.95
01. März	0.77	1.00	0.88	0.84	0.93
01. April	0.54	0.96	0.75	0.77	0.78
01. Mai	0.22	0.73	0.47	0.53	0.39
01. Juni	0.11	0.42	0.27	0.38	0.11
01. Juli	0.11	0.36	0.24	0.36	0.11
01. August	0.16	0.43	0.29	0.41	0.16
01. September	0.20	0.79	0.50	0.50	0.34
01. Oktober	0.21	0.86	0.53	0.56	0.67
01. November	0.51	0.98	0.74	0.74	0.80
01. Dezember	0.74	1.00	0.87	0.83	0.91



3.1.6 Fazit Verschattungswirkung

Die Untersuchung zeigt, dass alle betrachteten Pflanzenarten im Sommer eine deutliche Verschattung der Fassadenfläche gewährleisten, auch wenn der Bewuchs nicht überall blickdicht ist. Besonders bemerkenswert ist, dass trotz einer teilweise guten Durchsicht von innen nach aussen die Pflanzen einen grossen Teil der direkten Sonneneinstrahlung mit Transmissionswerten unter 40% wirksam abschirmen. Gleichzeitig sorgt die diffuse Lichtstreuung im Blattwerk dafür, dass bis zu 20 % der solaren Strahlung als indirektes Licht weiterhin durch die Begrünung auf die Glasoberfläche trifft und für die Belichtung des anschliessenden Innenraums zur Verfügung steht.

3.2 Temperaturen – Thermische Wirkung der Begrünung anhand von Temperaturverläufen

3.2.1 Im Sommer anhand von Temperaturverläufen über wenige Tage

In der Abbildung 17 bis Abbildung 19 werden die Temperaturverläufe der ersten Messperiode (Sommer 2022) dargestellt. In dieser Phase wurden Pflanzen mit eher dichtem Blattwerk untersucht (siehe Abbildung 16). Dabei zeigt sich deutlich, dass in den Bereichen direkt bei der Vegetation (Sensor S5), zwischen der Vegetation und der Glasscheibe (Sensor S4), sowie an der Glasscheibe (Sensor S3) die Temperaturen dank der dichten Begrünung nahezu mit der Umgebungstemperatur übereinstimmen. Dies bestätigt den stark kühlenden Effekt einer dichten Pflanzenbeschattung im Sommer.

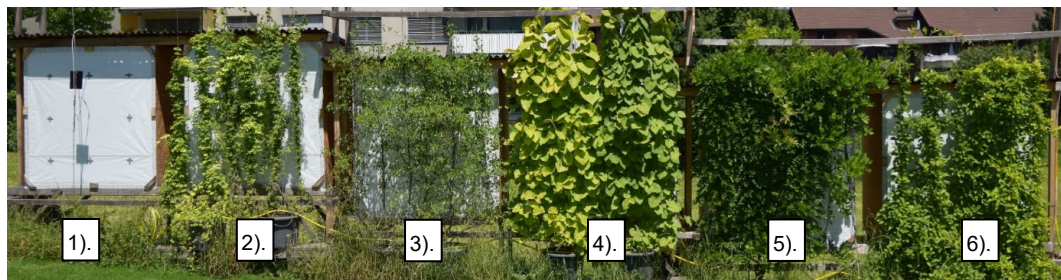


Abbildung 16: Proben der Messperiode 2022, 1). Referenz; 2). *Akebia quinata*; 3). *Celastrus orbiculatus*; 4). *Aristolochia macrophylla*; 5). *Wisteria sinensis*; 6). *Schisandra chinensis*

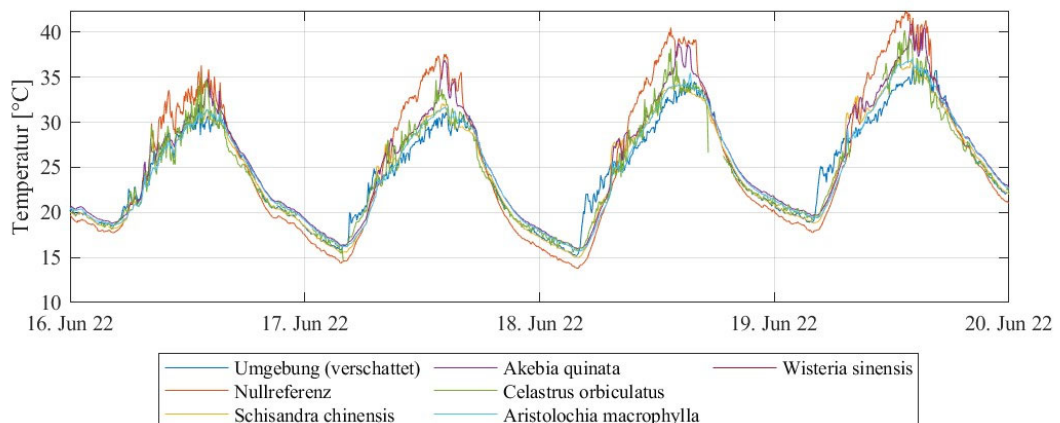


Abbildung 17: Temperaturen S5 bei der Vegetation im Juni 2022

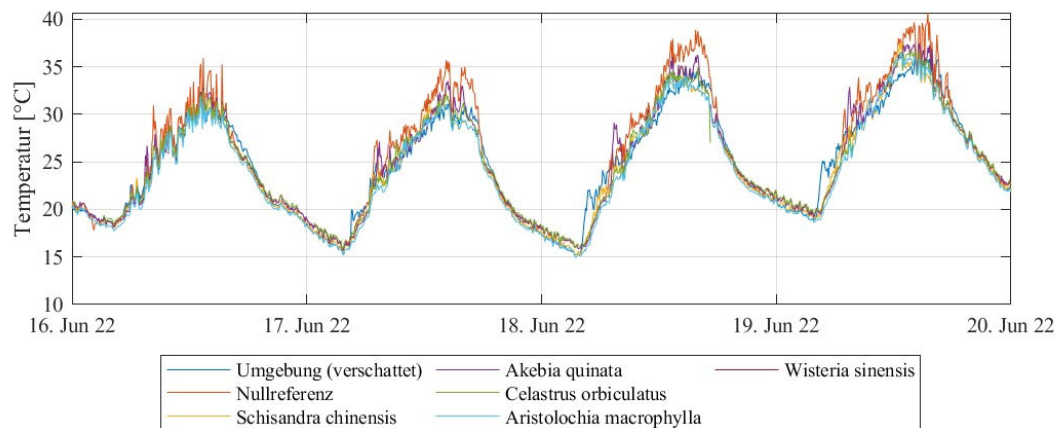


Abbildung 18: Temperaturen S4 zwischen Vegetation und Glasscheibe im Juni 2022

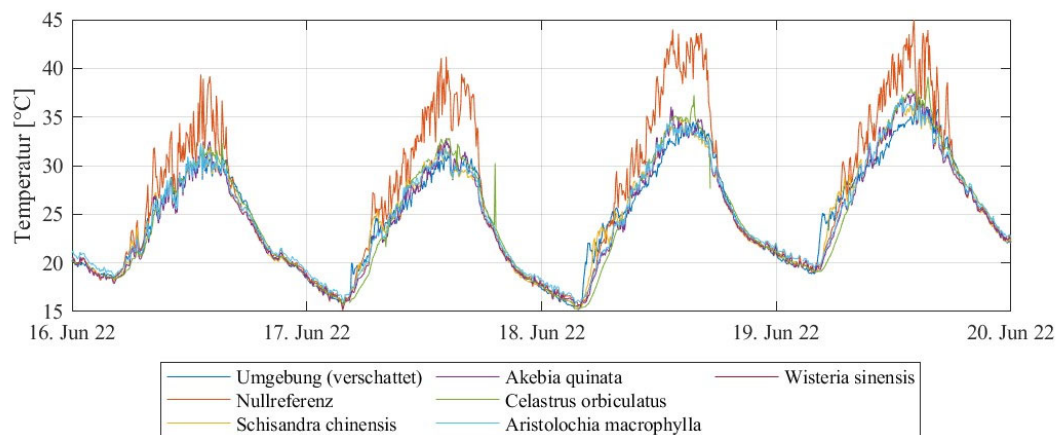


Abbildung 19: Temperaturen S3 zwischen der Glasscheibe im Juni 2022

Die Abbildung 21 bis Abbildung 23 zeigen die Ergebnisse der zweiten Messperiode (Sommer 2023/24), in der die Pflanzenarten mit weniger dichtem Bewuchs untersucht wurden (siehe Abbildung 20). Hier zeigt sich ein deutlich anderes Bild: Die Temperaturen im Bereich der Pflanzen und vor der Glasscheibe sind bei diesen Pflanzenarten ähnlich hoch wie die der unverschatteten Referenzmessstation. Dies verdeutlicht, dass der kühlende Effekt der Begrünung stark von der Dichte und vom Laubvolumen abhängt.



Abbildung 20: Proben der Messperiode 2023 bis 2024, 1). Referenz; 2). *Periploca graeca* 3). *Fallopia aubetii* 4). *Lonicera periclymenum* 5). *Actinidia arguta* 6). *Clematis montana*

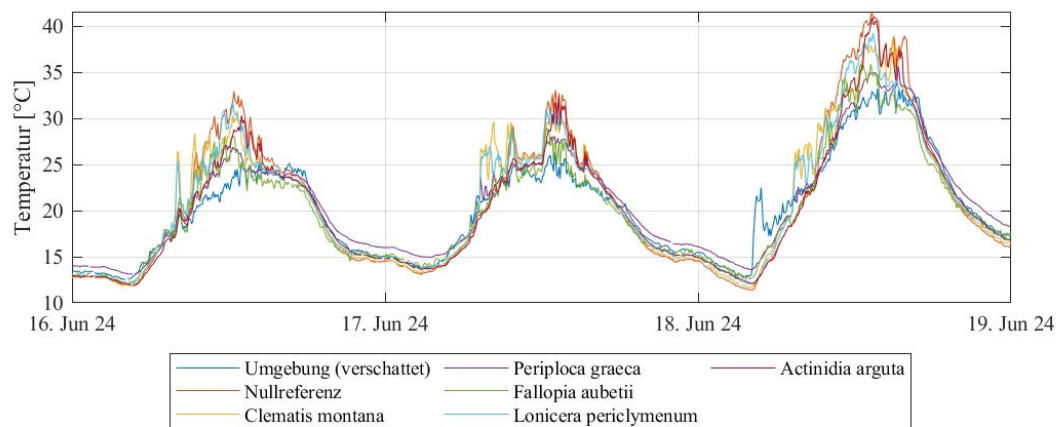


Abbildung 21: Temperaturen S5 bei der Vegetation im Juni 2024

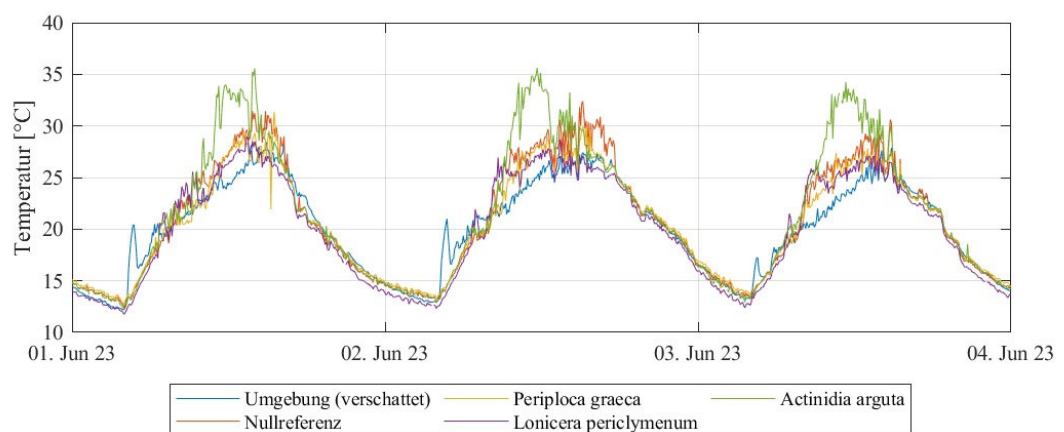


Abbildung 22: Temperaturen S4 zwischen Vegetation und Glasscheibe im Juni 2023

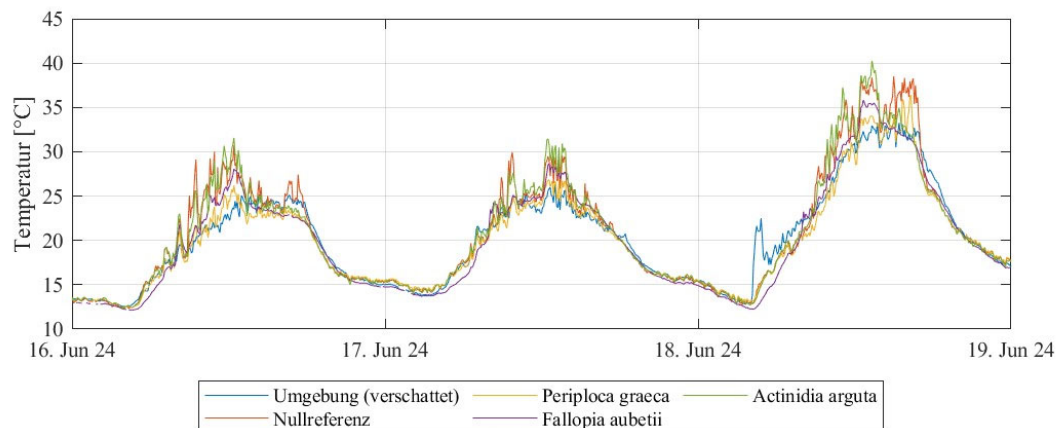


Abbildung 23: Temperaturen S3 bei der Glasscheibe im Juni 2024

3.2.2 Im Winter anhand von Temperaturverläufen über wenige Tage

In den Wintermonaten verlieren alle untersuchten Pflanzenarten ihr Blattwerk (siehe Abbildung 24). Die Auswertungen der Temperaturdaten aus dieser Zeit zeigen klar, dass die Temperaturen hinter der Begrünung (Sensoren S3 bis S5) dann nahezu identisch sind mit der unbewachsenen Referenzmessstation (siehe Abbildung 25 bis Abbildung 29). Dies bestätigt den erwünschten Effekt, dass begrünte Fassaden im Winter nach dem Laubabwurf genügend Sonnenenergie passieren lassen, um Wärmegewinne zu ermöglichen und somit Heizenergie einzusparen.



Abbildung 24: Die Pflanzen verlieren im Herbst ihr Blattwerk, womit die Wintersonne durch sie hindurch dringt.

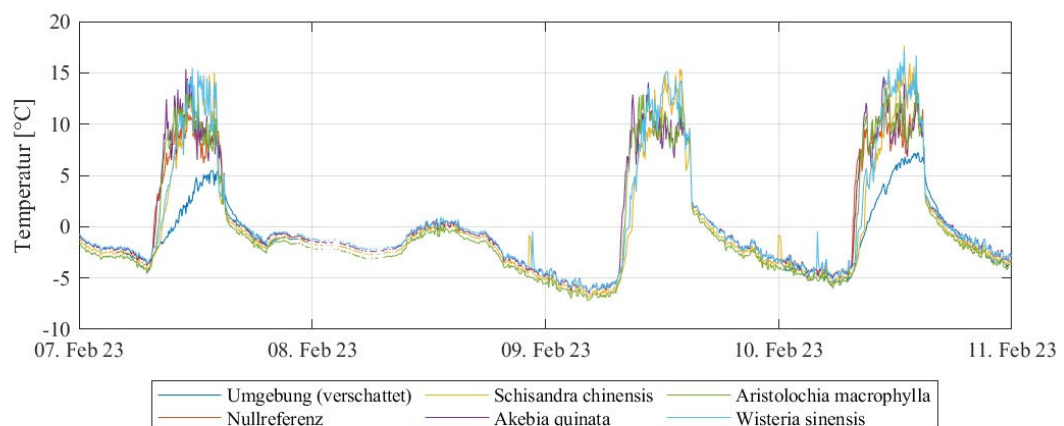


Abbildung 25: Temperaturen S5 bei der Vegetation im Februar 2023

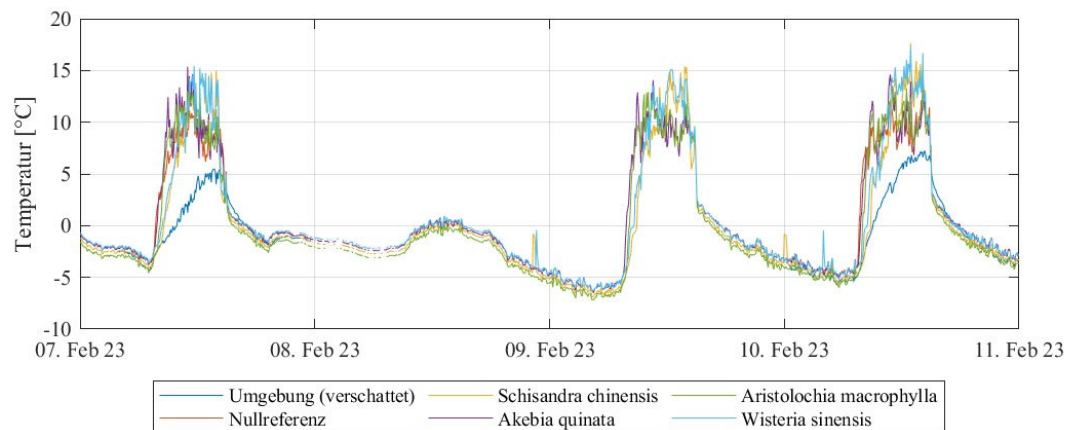


Abbildung 26: Temperaturen S4 zwischen Vegetation und Glasscheibe im Februar 2023

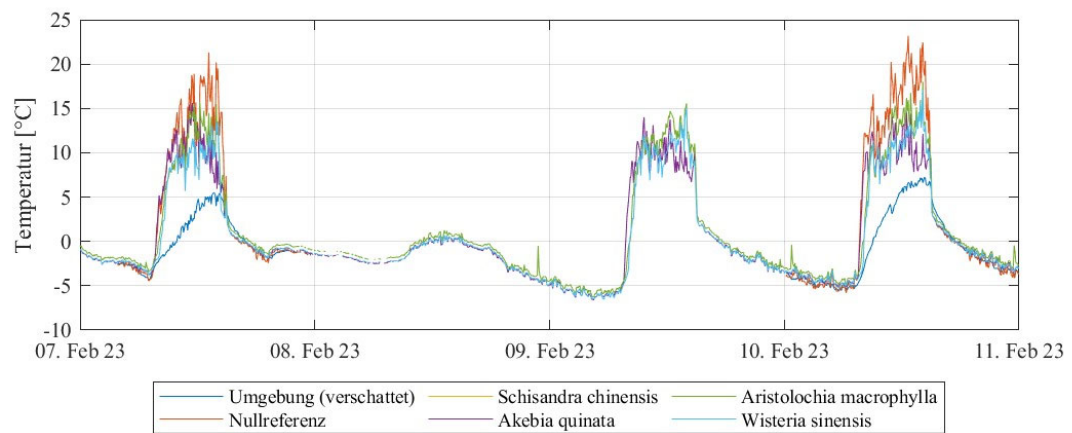


Abbildung 27: Temperaturen S4 der Glasscheibe im Februar 2023

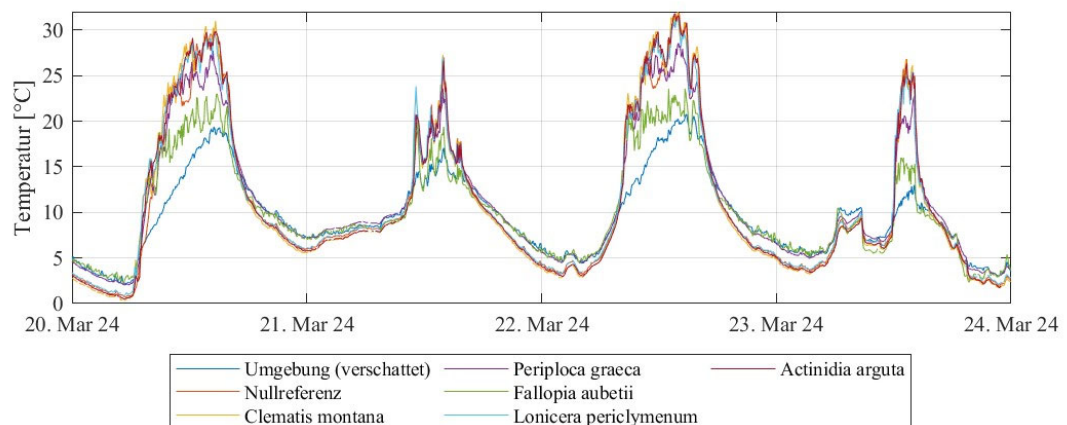


Abbildung 28: Temperaturen S5 bei der Vegetation im März 2024

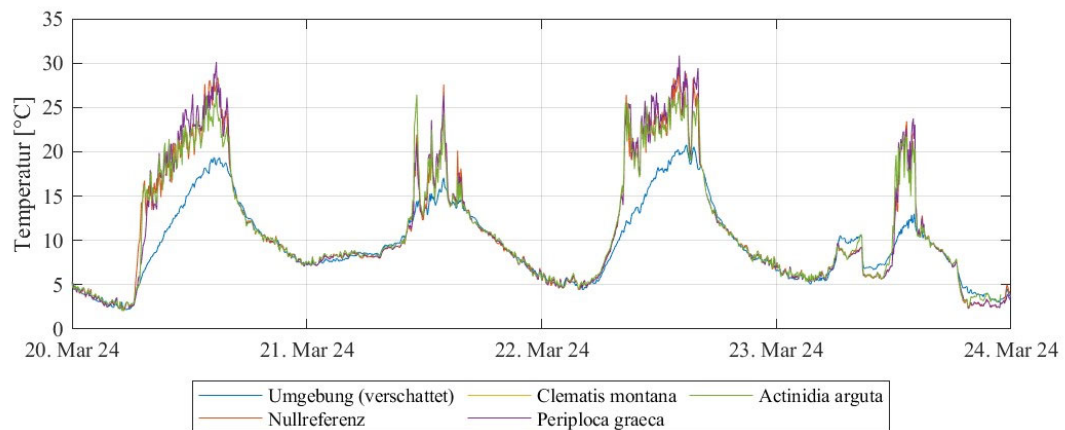


Abbildung 29: Temperaturen S3 der Glasscheibe im März 2024

3.2.3 Fazit thermische Wirkung der Begrünung anhand von Temperaturverläufen

Die Auswertung der Temperaturverläufe zeigt, dass im Sommer insbesondere Pflanzen mit dichtem Blattwerk die Temperaturen im Bereich der Fassade deutlich senken können. Dieser Kühleffekt ist bei Arten mit starker Belaubung klar messbar, während Pflanzen mit weniger Laub nur einen geringeren Einfluss auf das Fassadenklima ausüben.

Im Winter ist bei allen untersuchten Pflanzenarten der gewünschte Effekt erkennbar: Nach dem Laubabwurf gleichen sich die Temperaturen hinter der Begrünung den Werten der Referenzbox ohne Begrünung an. Dadurch kann die solare Einstrahlung ungehindert genutzt werden, um den Heizenergiebedarf des Gebäudes zu reduzieren.

Insgesamt belegen die Temperaturverläufe, dass begrünte Fassaden im Sommer wirksam zur Kühlung beitragen und im Winter eine optimale Nutzung der Sonnenenergie ermöglichen.



3.3 Temperaturen – Thermische Wirkung der Begrünung - Temperaturdatenauswertung

Die Temperaturdaten wurden über die gesamte Messperiode hinweg systematisch ausgewertet. Ziel war es, die Unterschiede zwischen den einzelnen Pflanzenarten und den verschiedenen Messpositionen (z. B. bei der Vegetation, zwischen Vegetation und Glas, an der Glasscheibe und im Innenraum der Box) genau zu erfassen. Dabei wurden sowohl die Temperaturdifferenzen zur unbewachsenen Referenzmessstation als auch zur Umgebungstemperatur (Ambienttemperatur) untersucht und jeweils der Bezug zur solaren Transmission oder zur aktuellen Sonneneinstrahlung hergestellt. In diesem Kapitel wird die Auswertung der Daten anhand von zwei Pflanzenarten nach Abbildung 30 erläutert. Bei den Pflanzenarten handelt es um die *Aristolochia macrophylla* / Pfeifenwinde welche im Sommer eine hohe Verschattung und im Winter eine leichte Verschattung generiert und in die Verschattungsgruppe Hi-Lo eingegliedert wurde. Als zweite Pflanzenart wurde die *Actinidia arguta* / Minikiwi gewählt, welche im Sommer wie auch im Winter einer mittleren Verschattung folgt (Verschattungsgruppe Mid).



Abbildung 30: Vergleich der Auswertung anhand der Pflanze *Aristolochia macrophylla* (links; Hi.Lo) und *Actinidia arguta* (recht; Mid)

3.3.1 Temperaturdifferenz zur Referenzmessung in Bezug zur solaren Transmission

Für jede Pflanzenart und jede Sensorposition wurde die Differenz zwischen den Temperaturwerten der jeweiligen Pflanzenbox und der unbewachsenen Referenzbox berechnet. Anschliessend wurde diese Temperaturdifferenz mit dem aktuellen Transmissionswert der jeweiligen Pflanze in Beziehung gesetzt.

Es resultieren dadurch Grafiken, die auf der y-Achse die Temperaturdifferenz und auf der x-Achse die solare Transmission zeigen. Die Temperaturdifferenzen sind in den Grafiken durch schwarze Punkte dargestellt. Um diese Punktwolken besser interpretieren zu können wurden in Intervallen der solaren Transmission in 0.1 bzw. 10% Schritten die Mittelwerte aus den Temperaturdifferenzen (schwarze Punkte) gebildet. Diese Mittelwerte sind in grösseren roten Punkten dargestellt. Die Werte dieser roten Punkte wurden ausgewertet, indem über den solaren Transmissionsbereich von 0 bis 0.4 (volle Begrünung im Sommer) und 0.6 bis 1 (keine Begrünung im Winter) die Mittelwerte gebildet wurden. Diese Mittelwerte sind in der



Tabelle 8 für die Sensoren S5 – bei der Vegetation; Tabelle 10 für die Sensoren S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe; Tabelle 11 für die Sensoren S3 – bei der Glasscheibe und Tabelle 14 für die Sensoren S1 – im Raum ausgewertet. In den Tabellen ist weiterhin die Differenz gebildet:

$$\text{Differenz} = \Delta T \text{ Transm.} < 0.4 - \Delta T \text{ Transm.} < 0.6$$

Aus dieser Differenz wurde wiederum der Mittelwert pro Verschattungsgruppe (High, Hi-Lo und Mid) sowie der Mittelwert über alle Pflanzenarten gebildet. Diese Ergebnisse finden sich in der Tabelle 7, der Tabelle 9 und der Tabelle 11. Alle Diagramme dieser Auswertung sind im Anhang B, Kapitel 9.1 zu finden.

S5- bei der Vegetation

Im Bereich der Vegetation zeigen sich teils deutliche Temperaturunterschiede gegenüber der Referenzmessstation. Einzelne Pflanzenarten mit dichter Belaubung führten in Einzelmessungen zu bis zu 15 °C niedrigeren Temperaturen. Die Mittelwerte der Temperaturdifferenzen liegen bei hoher Bewuchsdichte (Gruppe „Hi-Lo“) bei etwa 5 °C. Bei Pflanzen mit geringerem Bewuchs (Pflanzenkategorie Mid) ist dieser Effekt mit ca. 2 °C deutlich weniger ausgeprägt.

Bei der Bildung der Mittelwerte aus allen Differenzen resultiert eine Wirkung der Begrünung von 1.9 °C tieferen Temperaturen bei hoher Bewuchsdichte gegenüber dem Zustand ohne Blattwerk (Pflanzenkategorie Hi-Lo). Bei Pflanzenarten mit geringerer Bewuchsdichte (Pflanzenkategorie Mid) sind im Blattwerk kaum tiefere Temperaturen gegenüber dem Zustand ohne Blattwerk feststellbar.

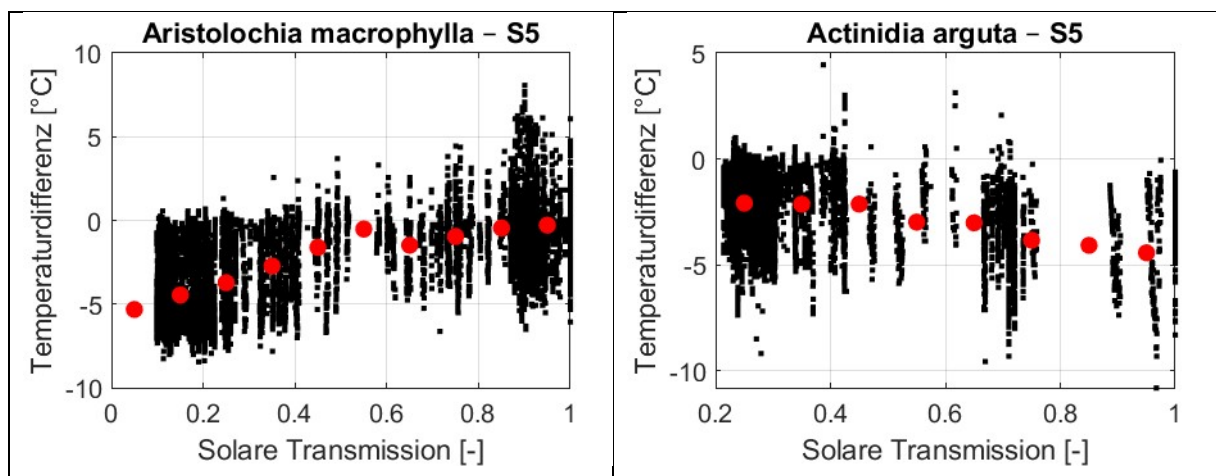


Abbildung 31: Bildung der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung für den Sensor S5 – bei der Vegetation

Tabelle 7: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe durch die Differenzbildung, S5 – bei Verschattung

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert Differenz alle Pflanzen [°C]
-1.4	-1.9	0.9	-0.7



Tabelle 8: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung, S5 – bei der Vegetation

Pflanze	Gruppe Verschattung	ΔT Transm. < 0.4, [°C]	ΔT Transm. > 0.6, [°C]	Differenz [°C]
Periploca graeca	High	-2.9	-1.5	-1.4
Schisandra chinensis	Hi-Lo	-5.0	-4.0	-1.0
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	-4.3	-4.0	-0.3
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	-4.1	-0.6	-3.6
Wisteria sinensis	Hi-Lo	-5.6	-3.5	-2.1
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	-3.0	-0.6	-2.4
Akebia quinata	Mid	-3.6	-5.4	1.8
Clematis montana	Mid	-1.6	-1.2	-0.5
Fallopia aubetii	Mid	-4.3	-5.0	0.7
Actinidia arguta	Mid	-2.1	-3.7	1.6

S4- zwischen Vegetation und Glasscheibe

Die Auswertung ergab gegenüber der Sensorposition S5 – bei der Vegetation weniger ausgeprägte Temperaturdifferenzen gegenüber der Referenzmessung. Die Maximalwerte betragen bis zu 7°C kühlere Temperaturen gegenüber der Referenzmessung. Die Wirkung der Begrünung liegt im Mittelwert der Messpunkte hoher Bewuchsdichte (Pflanzenkategorie Hi-Lo) bei maximal 2°C. Bei mittlerer Bewuchsdichte (Pflanzenkategorie Mid) ist dies mit ca. 0 – 1°C weniger ausgeprägt.

In der Bildung Mittelwerte aus allen Differenzen resultiert eine Wirkung der Begrünung von 2.1°C tieferen Temperaturen bei hoher Bewuchsdichte gegenüber dem Zustand ohne Blattwerk (Pflanzenkategorie Hi-Lo). Bei Pflanzenarten mit geringerer Bewuchsdichte (Pflanzenkategorie Mid) sind mit Blattwerk kaum tiefere Temperaturen gegenüber dem Zustand ohne Blattwerk feststellbar.

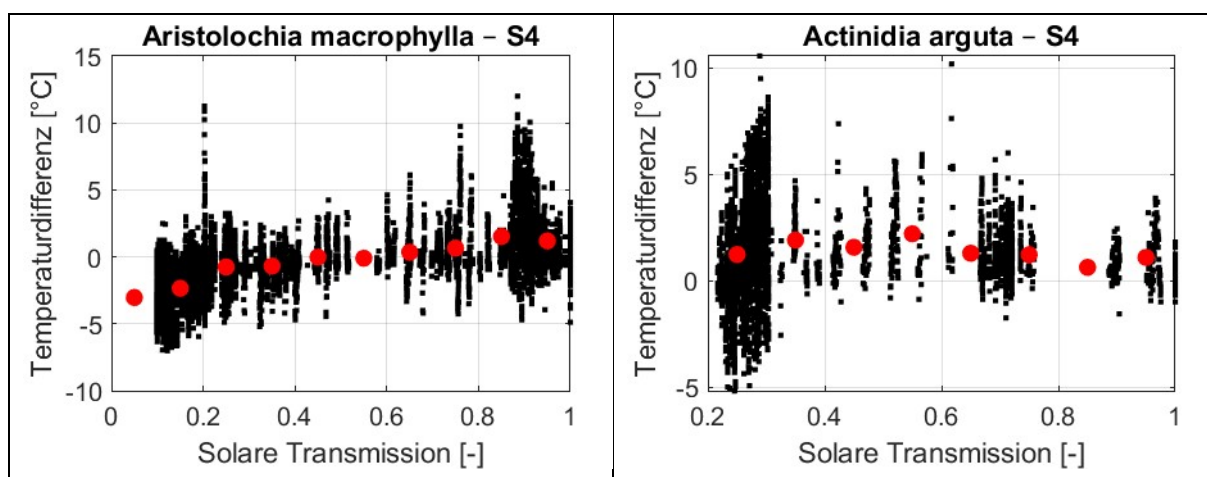


Abbildung 32: Bildung der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung für den Sensor S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe



Tabelle 9: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe durch die Differenzbildung, S4 – zwischen Verschattung und Glasscheibe

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert Differenz alle Pflanzen [°C]
-1.9	-2.1	-0.7	-1.8

Tabelle 10: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung, S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

Pflanze	Gruppe Verschattung	ΔT Transm. < 0.4, [°C]	ΔT Transm. > 0.6, [°C]	Differenz [°C]
Periploca graeca	High	-1.3	0.7	-1.9
Schisandra chinensis	Hi-Lo	-2.0	0.7	-2.7
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	-1.3	-0.2	-1.2
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	-1.8	1.0	-2.8
Wisteria sinensis	Hi-Lo	-1.8	0.4	-2.2
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	-1.6	-0.1	-1.5
Akebia quinata	Mid	-1.3	0.3	-1.7
Clematis montana	Mid	-	-	-
Fallopia aubetii	Mid	-	-	-
Actinidia arguta	Mid	1.3	1.1	0.2

S3- bei der Glasscheibe

Die Sensorposition S3 wird durch die Temperatur im Raum beeinflusst, da die Messstationen leicht gedämmt sind, erwärmt sich die Glasscheibe durch den Temperaturanstieg in der Messbox. Ohne Verschattung ist der Temperaturanstieg in der Messbox deutlich höher als mit Verschattung. Der dichte Bewuchs (Pflanzengruppe Hi-Lo) im Sommer reduziert die Glasscheibentemperaturen mit bis zu 10°C deutlich, gegenüber der Referenzmessung. Auch die Pflanzenarten mit weniger dichtem Bewuchs (Pflanzengruppe Mid) führen zu etwas weniger aber dennoch deutlich spürbaren Reduktion der Scheibentemperaturen. Die Mittelwerte über die Differenztemperaturen im Sommer betragen bis zu 5°C Reduktion. Die Verschattungswirkung im Sommer gegenüber dem Winter führt bei allen Pflanzen eine Reduktion von 1.1°C bis 2.9°C mit Mittelwerten über die Pflanzen von 1.9°C bis 2.1°C

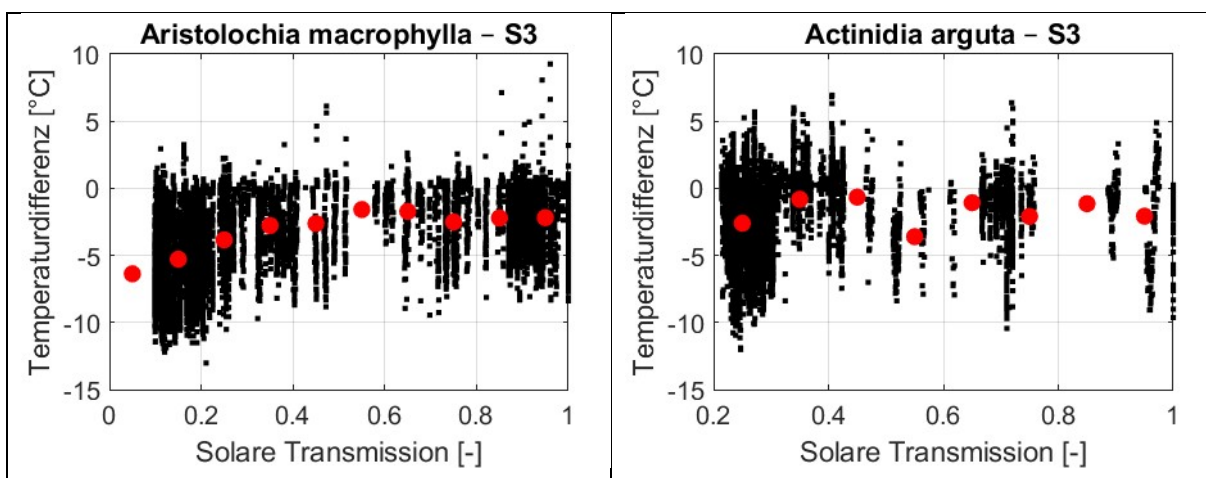


Abbildung 33: Bildung der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung für den Sensor S3 – bei der Glasscheibe



Tabelle 11: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe durch die Differenzbildung, S3 – bei der Glasscheibe

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert Differenz alle Pflanzen [°C]
-1.5	-2.1	-1.5	-1.9

Tabelle 12: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung, S3 – bei der Glasscheibe

Pflanze	Gruppe Verschattung	ΔT Transm. < 0.4, [°C]	ΔT Transm. > 0.6, [°C]	Differenz [°C]
Periploca graeca	High	-3.5	-1.9	-1.5
Schisandra chinensis	Hi-Lo	-4.9	-2.2	-2.7
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	-4.2	-1.4	-2.9
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	-4.7	-2.2	-2.5
Wisteria sinensis	Hi-Lo	-5.1	-3.7	-1.4
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	-3.9	-2.6	-1.3
Akebia quinata	Mid	-4.8	-3.7	-1.1
Clematis montana	Mid	-	-	-
Fallopia aubetii	Mid	-2.1	0.8	-2.9
Actinidia arguta	Mid	-2.3	-1.8	-0.5

S1 – im Innenraum der Messstation

Im Raum der Messstation zeigt sich die Wirkung der Begrünung in den Sommermonaten auch stets positiv, indem die Temperaturen der Messstationen mit Begrünung um bis zu 15°C tiefer ausfallen als die Referenzbox. Im Mittelmass beträgt der Unterschied 4°C bis 7°C. Auffällig ist, dass die Temperaturen des Innenraums schon ab einem Transmissionskoeffizienten zwischen 0.6 und 0.8 spürbar reduziert werden. Dies wirkt sich auch auf die Ermittlung der Differenzen aus, welche im Mittelwert mit -2.6°C (Pflanzenkategorie Hi-Lo) und -1.2 (Pflanzenkategorie Mid) nicht so ausgeprägt ausfallen.

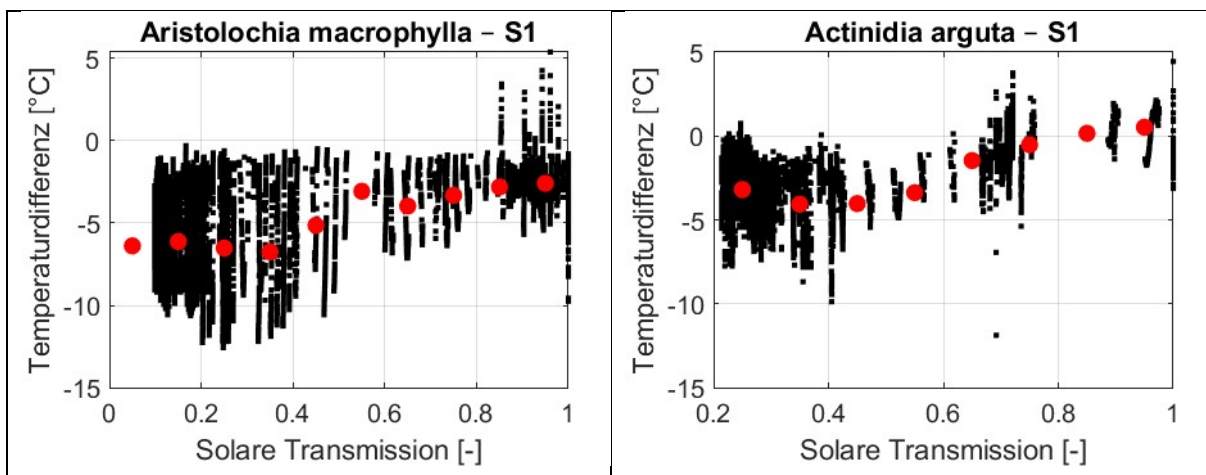


Abbildung 34: Bildung der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung für den Sensor S1 – im Raum



Tabelle 13: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe durch die Differenzbildung, S1 – im Raum

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert Differenz alle Pflanzen [°C]
-0.2	-2.6	-1.2	-1.9

Tabelle 14: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung, S1 – im Raum

Pflanze	Gruppe Verschattung	ΔT Transm. < 0.4, [°C]	ΔT Transm. > 0.6, [°C]	Differenz [°C]
Periploca graeca	High	-5.1	-4.8	-0.2
Schisandra chinensis	Hi-Lo	-6.6	-4.5	-2.0
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	-5.2	-3.6	-1.6
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	-6.3	-2.9	-3.4
Wisteria sinensis	Hi-Lo	-6.7	-2.8	-3.9
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	-4.2	-2.0	-2.1
Akebia quinata	Mid	-5.1	-4.5	-0.6
Clematis montana	Mid	-	-	-
Fallopia aubetii	Mid	-5.3	-4.9	-0.4
Actinidia arguta	Mid	-3.3	-0.6	-2.7

3.3.2 Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur in Bezug zur Transmission

Im Unterschied zu Kapitel 3.3.1 wurde in diesem Kapitel die Differenztemperatur der Temperatursensoren S5 – bei der Vegetation und S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe zur Ambienttemperatur gebildet. Ersichtlich wird bei dieser Auswertung, dass die Temperaturen bei kleinen Transmissionswerten (hohe Verschattung) der Ambienttemperatur sehr nahekommen. Dies ist die gleiche Beobachtung, welche im Kapitel 3.2.1 erzielt wurde.

S5- bei der Vegetation

Die Temperaturen bei der Begrünung fallen mit bis zu 15°C deutlich höher aus als die Ambienttemperatur. Im Mittelmass liegen diese bei ca. 5°C bei einem Transmissionskoeffizient grösser als 0.4. Bei einem Transmissionskoeffizienten von kleiner als 0.4 gegen die Differenztemperaturen im Mittelmass gegen 0. Der Mittelwert der Differenz für die Pflanzenkategorie Hi-Lo ist mit -4.0°C ausgeprägt. Einen Einfluss hat vermutlich die gute Verschattung der Sensoren in den Sommermonaten und eine schlechte Verschattung der Sensoren in den Wintermonaten. Bei der Pflanzenkategorie Mid ist dies mit -2.2°C deutlich weniger ausgeprägt.

Da die Sensoren bei geringer Verschattung partiell besonnt wurden, sind insbesondere die Daten der Wintermonate bzw. hoher Transmission mit Vorsicht zu betrachten.

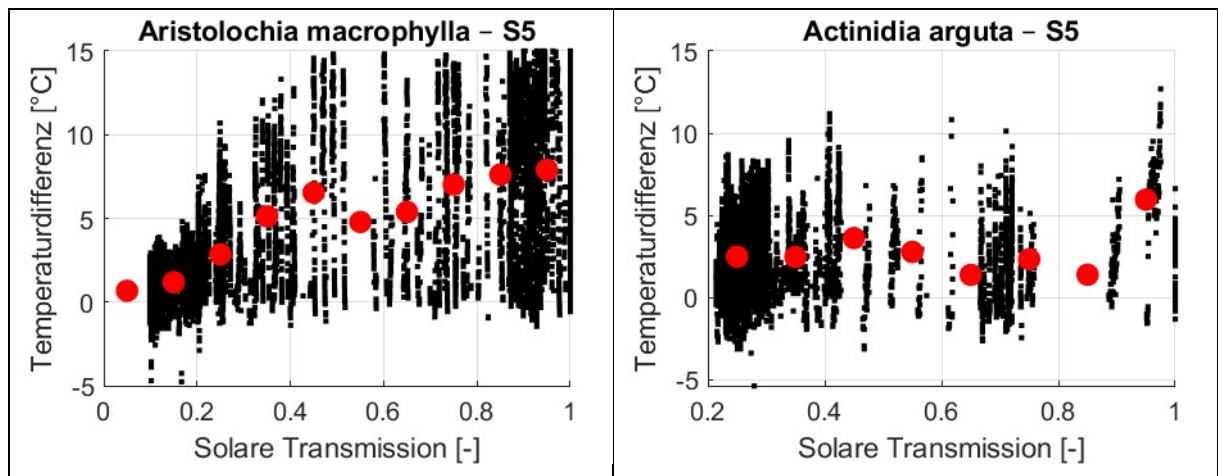


Abbildung 35: Bildung der Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur für den Sensor S5 – bei der Vegetation

Tabelle 15: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe durch die Differenzbildung, S5 – bei der Vegetation

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert Differenz alle Pflanzen [°C]
-4.7	-4.0	-2.2	-3.4

Tabelle 16: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur S5 – bei der Vegetation

Pflanze	Gruppe Verschattung	ΔT Transm. < 0.4, [°C]	ΔT Transm. > 0.6, [°C]	Differenz [°C]
Periploca graeca	High	1.8	6.5	-4.7
Schisandra chinensis	Hi-Lo	1.2	4.8	-3.6
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	2.0	3.8	-1.8
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	2.0	7.4	-5.4
Wisteria sinensis	Hi-Lo	1.1	5.2	-4.1
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	1.7	7.0	-5.3
Akebia quinata	Mid	2.7	4.9	-2.2
Clematis montana	Mid	2.6	6.3	-3.7
Fallopia aubetii	Mid	0.6	3.4	-2.8
Actinidia arguta	Mid	2.5	2.4	0.1

S4- zwischen Vegetation und Glasscheibe

Bei der Messung zwischen Vegetation und Glasscheibe sind die maximalen Differenztemperaturen weniger ausgeprägt als beim Sensor S5 – Vegetation. Der Verlauf ist jedoch ähnlich. Die mittlere Differenz der Pflanzenkategorie Hi-Lo erzielt mit -2.8°C und -1.3 der Pflanzenkategorie Mid ähnliche Ergebnisse wie in Kapitel 3.3.1.

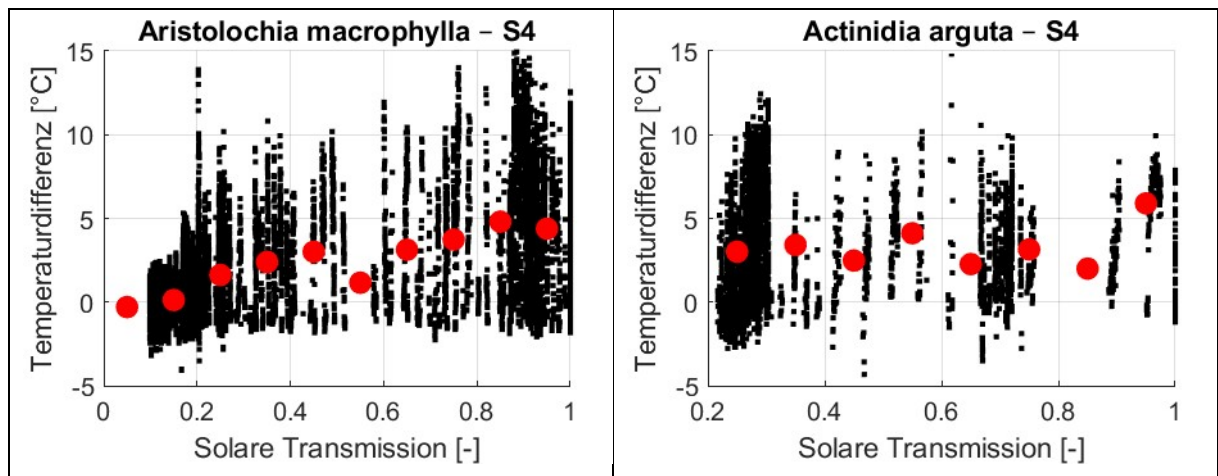


Abbildung 36: Bildung der Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur für den Sensor S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

Tabelle 17: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe durch die Differenzbildung, S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert Differenz alle Pflanzen [°C]
-2.9	-2.8	-1.3	-2.5

Tabelle 18: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

Pflanze	Gruppe Verschattung	ΔT Transm. < 0.4, [°C]	ΔT Transm. > 0.6, [°C]	Differenz [°C]
Periploca graeca	High	0.4	3.3	-2.9
Schisandra chinensis	Hi-Lo	0.5	3.8	-3.3
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	1.1	3.2	-2.1
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	0.7	4.2	-3.5
Wisteria sinensis	Hi-Lo	0.7	3.8	-3.1
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	0.4	2.5	-2.1
Akebia quinata	Mid	1.2	3.7	-2.5
Clematis montana	Mid	-	-	-
Fallopia aubetii	Mid	-	-	-
Actinidia arguta	Mid	3.1	3.1	-0.1

3.3.3 Temperaturdifferenz zur Referenzmessung in Bezug zur solaren Einstrahlung

In einem weiteren Auswertungsschritt wurden die Temperaturdifferenzen zur Referenzbox in Bezug zur aktuellen Sonneneinstrahlung (anstatt zur Transmission) betrachtet. Die Messpunkte wurden dabei nach Transmissionswerten (Sommer Transmission < 0.4 / Winter Transmission > 0.6) gruppiert. Alle Werte mit solarer Transmission < 0.4 werden in blau, alle Werte mit solarer Transmission > 0.6 in rot abgebildet. Aus all diesen Punkten wird in den Grafiken in Intervallen von 50 W/m² der Mittelwert. Diese Mittelwerte werden in grossen runden Punkten dargestellt. Im nächsten Auswertungsschritt werden in Intervallen von 200W die mittleren Abweichungen dieser Differenzen gebildet. Diese mittleren Abweichungen ist in der Tabelle 19, 21, 23 und 25 von 200 W/m² bis 800 W/m² für jede Pflanzenart ausgewiesen. Auf eine Darstellung der Werte unterhalb von 200 W/m² wird verzichtet, da es sich hierbei um bewölkte Phasen ohne direkt Einstrahlung handelt. Ebenso wird der Bereich über



800 W/m² nicht berücksichtigt, da diese Einstrahlwerte in der vertikalen Ebene in Phasen nach Regentagen auftreten, bei welchen der Himmel klar ist und die Wolken aufreissen. Solche Phasen sind jedoch meistens von kurzer Dauer. Die kurze Einstrahlzeit führt aufgrund der Trägheit kaum zu Temperaturunterschieden. In den Tabellen 18, 20, 22 und 24 sind für die Pflanzengruppen High, Hi-Lo und Mid die Mittelwerte der Temperaturdifferenzen zur Referenzmessung von 200 W/m² bis 800 W/m² gebildet.

Die folgenden Ergebnisse korrespondieren mit den Ergebnissen des Kapitels 3.3.1.

S5- bei der Vegetation

Die Temperaturdifferenzen bei der Vegetation, aufgeteilt zwischen solarer Transmission > 0.6 (rot, Winterfall) und solarer Transmission < 0.4 (blau, Sommerfall) sind bei Pflanzenarten mit starker Bewuchsdichte (Verschattungsgruppe Hi-Lo) mit bis zu -4°C und im Mittelwert -1.8°C deutlich ausgeprägter als bei Pflanzenarten mit mildem Bewuchs (Verschattungsgruppe Mid) mit 0.3°C im Mittelwert, wo keine Wirkung zwischen Bewuchs im Sommer und laubfrei im Winter feststellbar ist.

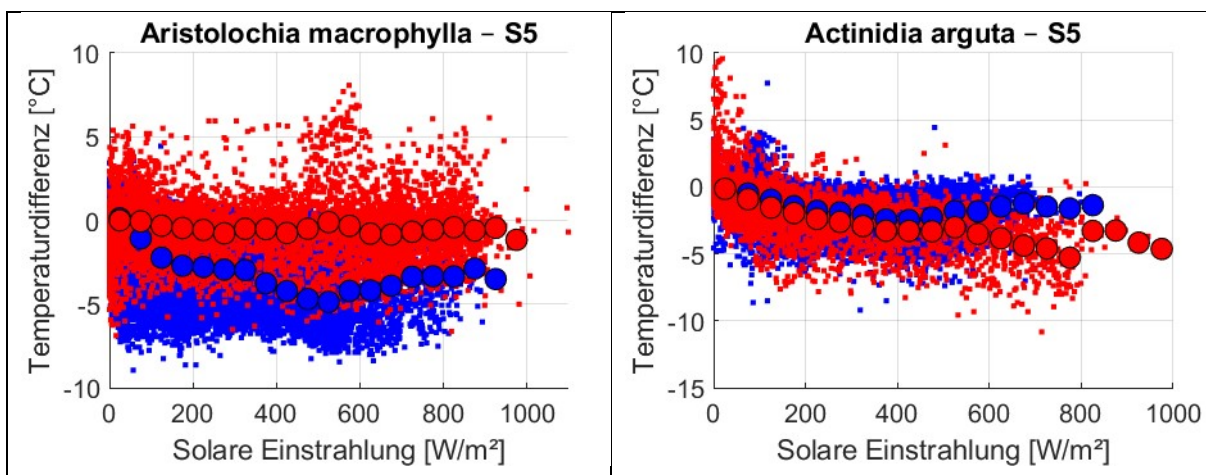


Abbildung 37: Bildung der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung für den Sensor S5 – bei der Vegetation

Tabelle 19: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe, S5 – bei der Vegetation

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert alle Pflanzen [°C]
-0.4	-1.8	0.3	-0.9



Tabelle 20: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz je 200W Einstrahlungsintervall S5 – bei der Vegetation

Pflanze	Gruppe Verschattung	200 – 400 W/m ² [°C]	400 – 600 W/m ² [°C]	600 - 800 W/m ² [°C]	200 - 800 W/m ² [°C]
Periploca graeca	High	-0.5	-1.4	0.6	-0.4
Schisandra chinensis	Hi-Lo	-1.0	-1.7	-1.6	-1.4
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	-0.3	-0.6	-0.3	-0.4
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	-2.5	-4.1	-3.0	-3.2
Wisteria sinensis	Hi-Lo	-2.0	-2.3	-2.7	-2.3
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	-1.5	-2.3	-1.3	-1.7
Akebia quinata	Mid	-0.4	-0.1	-1.2	-0.5
Clematis montana	Mid	-0.3	-0.4	0.6	-0.1
Fallopia aubetii	Mid	-0.3	-0.7	1.2	0.1
Actinidia arguta	Mid	0.7	1.2	3.1	1.7

S4- zwischen Vegetation und Glasscheibe

Im Zwischenraum zwischen Pflanze und Glasscheibe zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Pflanze selbst. Bei den Pflanzenarten der Verschattungsgruppe Hi-Lo ist dies im Mittelmass mit -1.6°C feststellbar. Bei den Pflanzenarten der Verschattungsgruppe Mid ist mit -0.6 die Wirkung deutlich geringer.

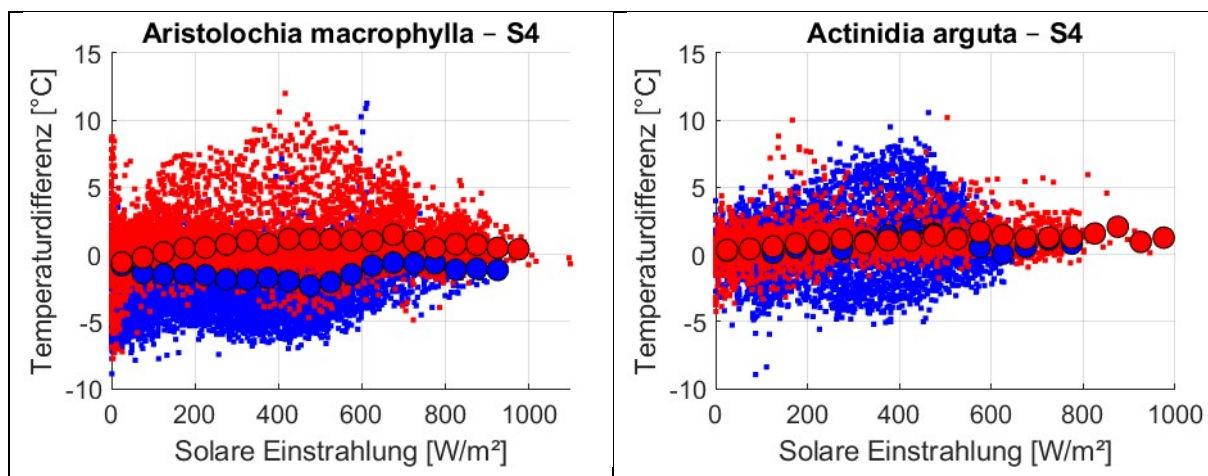


Abbildung 38: Bildung der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung für den Sensor S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

Tabelle 21: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe, S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert alle Pflanzen [°C]
-1.5	-1.6	-0.6	-1.3



Tabelle 22: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz je 200W Einstrahlungsintervall S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

Pflanze	Gruppe Verschattung	200 – 400 W/m ² [°C]	400 – 600 W/m ² [°C]	600 - 800 W/m ² [°C]	200 - 800 W/m ² [°C]
Periploca graeca	High	-1.6	-1.8	-1.2	-1.5
Schisandra chinensis	Hi-Lo	-1.6	-1.9	-2.0	-1.8
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	-1.2	-1.4	-0.6	-1.0
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	-2.5	-3.0	-1.7	-2.4
Wisteria sinensis	Hi-Lo	-1.6	-1.8	-1.9	-1.8
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	-1.2	-1.3	-0.8	-1.1
Akebia quinata	Mid	-0.9	-0.9	-0.7	-0.8
Clematis montana	Mid	-	-	-	-
Fallopia aubetii	Mid	-	-	-	-
Actinidia arguta	Mid	-0.1	-0.1	-0.6	-0.3

S3- bei der Glasscheibe

Das gleiche Bild zeigt sich auch bei den Temperaturen der Glasscheibe, welche bei der Verschattungsgruppe Hi-Lo im Mittelmass eine Differenztemperatur zwischen dem Sommer und dem Winterfall von -2°C ergibt. Bei den Pflanzenarten der Verschattungsgruppe Mid ist die Wirkung mit einer gemittelten Differenz von -0.8°C kleiner.

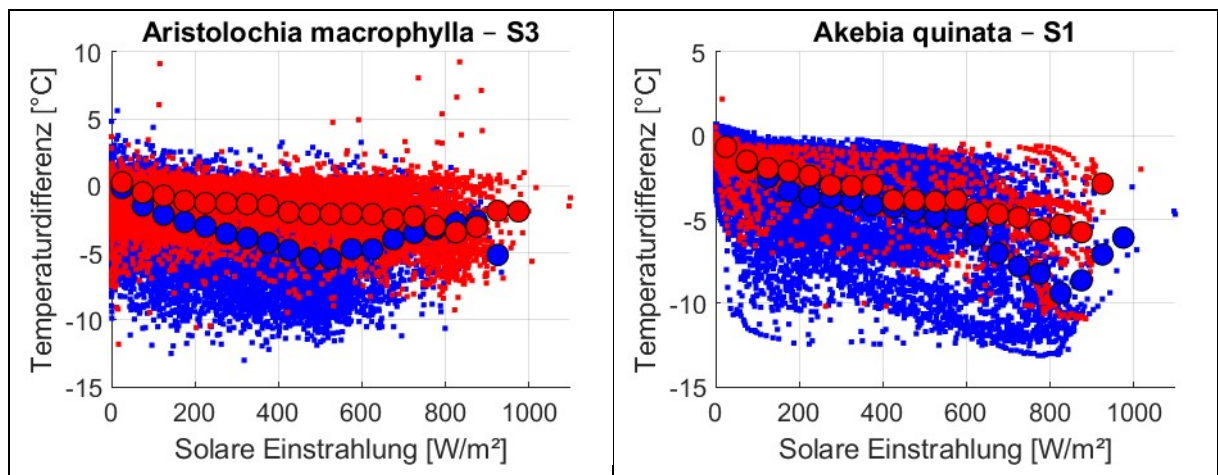


Abbildung 39: Bildung der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung für den Sensor S3 – bei der Glasscheibe

Tabelle 23: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe, S3 – bei der Glasscheibe

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert alle Pflanzen [°C]
-0.8	-2.0	-0.8	-1.5



Tabelle 24: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz je 200W Einstrahlungsintervall S3 – bei der Glasscheibe

Pflanze	Gruppe Verschattung	200 – 400 W/m ² [°C]	400 – 600 W/m ² [°C]	600 - 800 W/m ² [°C]	200 - 800 W/m ² [°C]
Periploca graeca	High	-1.4	-1.8	0.9	-0.8
Schisandra chinensis	Hi-Lo	-2.9	-2.6	-2.2	-2.6
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	-2.4	-2.6	-3.0	-2.7
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	-2.3	-3.1	-1.4	-2.3
Wisteria sinensis	Hi-Lo	-1.8	-1.5	-1.5	-1.6
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	-1.7	-2.0	1.4	-0.8
Akebia quinata	Mid	-1.3	-1.4	-1.5	-1.4
Clematis montana	Mid	-	-	-	-
Fallopia aubetii	Mid	-1.4	-2.3	-0.8	-1.5
Actinidia arguta	Mid	-0.8	-0.7	2.7	0.4

S1 – im Raum (Messbox)

Im Raum der Messbox ist die Wirkung der Verschattung stärker messbar, insbesondere bei Einstrahlungswerten über 500 W/m². Dies deutet auf eine Trägheit der Messstationen, welche eine gewisse Zeit beanspruchen, um sich zu erwärmen. Im Mittelmass wirkt die Verschattung bei der Verschattungsgruppe Hi-Lo mit -2.6°C mehr als bei der Verschattungsgruppe Mid mit einer gemittelten Temperaturdifferenz von -0.8°C.

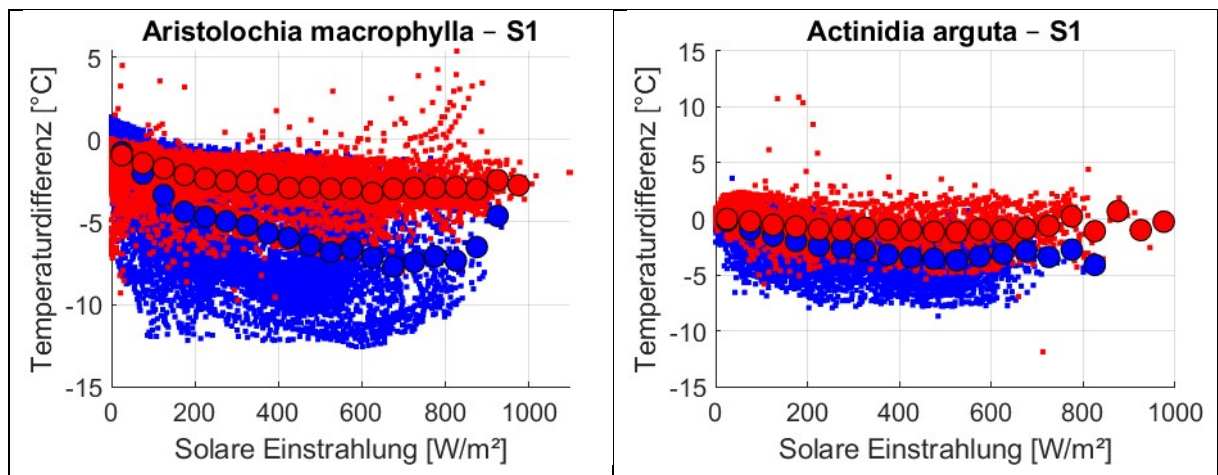


Abbildung 40: Bildung der Temperaturdifferenz zur Referenzmessung für den Sensor S1 – im Raum

Tabelle 25: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe, S1 – im Raum

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert alle Pflanzen [°C]
-0.7	-2.6	-0.8	-1.7



Tabelle 26: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz je 200W Einstrahlungsintervall S1 – im Raum

Pflanze	Gruppe Verschattung	200 – 400 W/m ² [°C]	400 – 600 W/m ² [°C]	600 - 800 W/m ² [°C]	200 - 800 W/m ² [°C]
Periploca graeca	High	-1.0	-1.7	0.6	-0.7
Schisandra chinensis	Hi-Lo	-1.2	-1.8	-3.7	-2.2
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	-1.5	-1.4	-2.1	-1.7
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	-2.6	-3.5	-4.3	-3.5
Wisteria sinensis	Hi-Lo	-2.9	-3.4	-4.9	-3.8
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	-1.4	-2.2	-1.7	-1.8
Akebia quinata	Mid	0.0	0.1	-1.4	-0.4
Clematis montana	Mid	0.1	0.0	0.9	0.3
Fallopia aubetii	Mid	-0.8	-0.9	-0.5	-0.7
Actinidia arguta	Mid	-1.8	-2.4	-2.5	-2.2

3.3.4 Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur in Bezug zur solaren Einstrahlung

Die Auswertung der Temperaturdifferenzen zur Ambienttemperatur in diesem Kapitel erfolgte auf die gleiche Art wie in Kapitel 3.3.3, mit dem einzigen Unterschied, dass die Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur berechnet wurde und nicht zur Referenz. Die Auswertung wird jedoch nur mit den Sensorpositionen S5 – bei der Vegetation und S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe durchgeführt.

Die folgenden Ergebnisse korrespondieren mit den Ergebnissen des Kapitels 3.3.2

S5- bei der Vegetation

Die Vegetation reduziert in ihrer direkten Umgebung in den Sommermonaten bei Pflanzenarten mit starkem Bewuchs (Verschattungsgruppe Hi-Lo) die Temperaturen um -3.3 °C gegenüber den Wintermonaten. Bei Pflanzenarten mit geringerer Verschattung (Verschattungsgruppe Mid) ist dies mit -2.2°C leicht weniger ausgeprägt (Tabelle 27). Die Pflanzenspezifischen Wirkungen der Begrünungen variieren je nach Einstrahlungsintensität von -0.7°C bis 7.7°C (Tabelle 28).

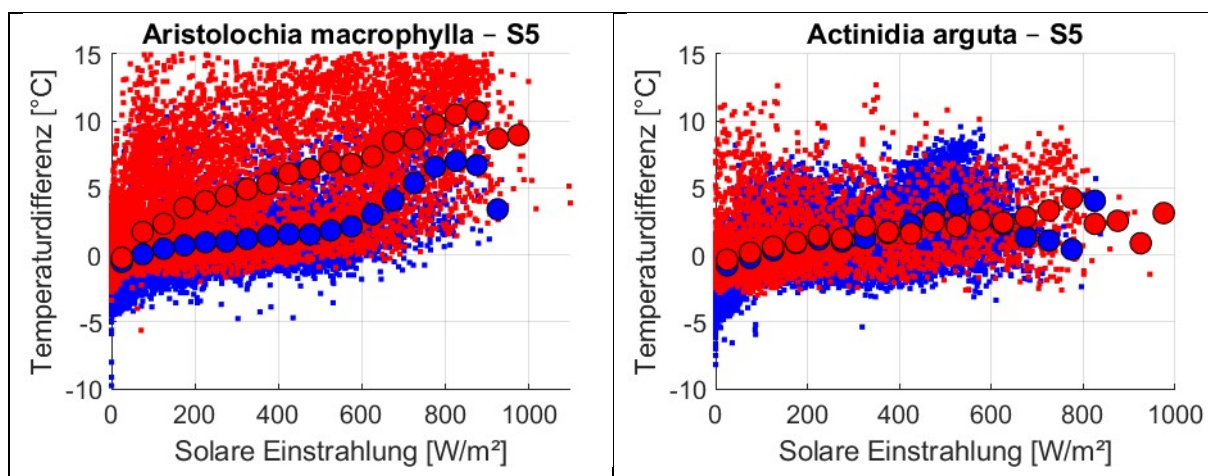


Abbildung 41: Bildung der Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur für den Sensor S5 – bei der Vegetation



Tabelle 27: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe, S5 – bei der Vegetation

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert alle Pflanzen [°C]
-4.2	-3.3	-2.2	-3.0

Tabelle 28: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz je 200W Einstrahlungsintervall S5 – bei der Vegetation

Pflanze	Gruppe Verschattung	200 – 400 W/m ² [°C]	400 – 600 W/m ² [°C]	600 - 800 W/m ² [°C]	200 - 800 W/m ² [°C]
Periploca graeca	High	-2.9	-4.1	-5.6	-4.2
Schisandra chinensis	Hi-Lo	-2.2	-2.9	-2.7	-2.6
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	-0.9	-1.6	-1.6	-1.4
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	-3.5	-4.8	-3.8	-4.0
Wisteria sinensis	Hi-Lo	-2.8	-3.8	-4.3	-3.6
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	-3.2	-4.0	-7.7	-5.0
Akebia quinata	Mid	-2.0	-2.0	-2.7	-2.2
Clematis montana	Mid	-2.6	-2.3	-5.5	-3.5
Fallopia aubetii	Mid	-2.6	-2.4	-2.7	-2.6
Actinidia arguta	Mid	-0.4	0.7	-1.9	-0.5

S4- zwischen Vegetation und Glasscheibe

Die Vegetation reduziert die Temperaturen zwischen der Vegetation und Glasscheibe in den Sommermonaten bei Pflanzenarten mit starkem Bewuchs (Verschattungsgruppe Hi-Lo) die Temperaturen um -2.4 °C gegenüber den Wintermonaten. Bei Pflanzenarten mit geringerer Verschattung (Verschattungsgruppe Mid) ist dies mit -1.7°C leicht weniger ausgeprägt (Tabelle 29). Die pflanzenspezifischen Wirkungen der Begrünungen variieren je nach Einstrahlungsintensität von 0°C bis -4.5°C (Tabelle 30).

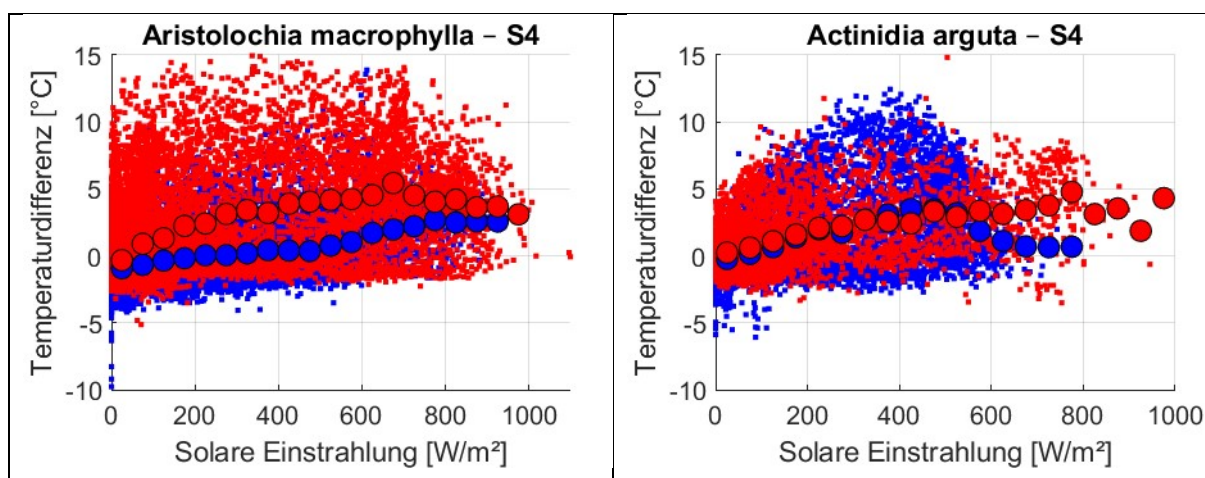


Abbildung 42: Bildung der Temperaturdifferenz zur Ambienttemperatur für den Sensor S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe



Tabelle 29: Wirkung der Begrünung anhand des Mittelwerts je Verschattungsgruppe, S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

Mittelwert High [°C]	Mittelwert Hi-Lo [°C]	Mittelwert Mid [°C]	Mittelwert alle Pflanzen [°C]
-3.1	-2.4	-1.7	-2.3

Tabelle 30: Wirkung der Begrünung anhand der Temperaturdifferenz je 200W Einstrahlungsintervall S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

Pflanze	Gruppe Verschattung	200 – 400 W/m ² [°C]	400 – 600 W/m ² [°C]	600 - 800 W/m ² [°C]	200 - 800 W/m ² [°C]
Periploca graeca	High	-2.4	-3.0	-3.8	-3.1
Schisandra chinensis	Hi-Lo	-2.2	-2.4	-2.5	-2.4
Celastrus orbiculatus	Hi-Lo	-1.3	-1.9	-1.9	-1.7
Aristolochia macrophylla	Hi-Lo	-2.9	-3.5	-2.5	-2.9
Wisteria sinensis	Hi-Lo	-2.1	-2.7	-3.0	-2.6
Lonicera periclymenum	Hi-Lo	-1.3	-1.5	-4.5	-2.5
Akebia quinata	Mid	-2.5	-2.3	-2.3	-2.4
Clematis montana	Mid	-	-	-	-
Fallopia aubetii	Mid	-	-	-	-
Actinidia arguta	Mid	0.0	0.0	-3.0	-1.0

3.3.5 Fazit Temperaturen

Die Temperaturmessungen zeigen deutlich, dass dichte und vitale Pflanzen im Sommer die Fassadentemperaturen messbar senken. Besonders bei Begrünungen der Kategorie „Hi-Lo“ (starke Verschattung im Sommer, Laubabwurf im Winter) nähern sich die Temperaturen im Bereich der Fassadenbegrünung der Umgebungstemperatur an. Dadurch wird das Gebäude wirksam vor sommerlicher Überhitzung geschützt und es entsteht ein angenehmeres Raumklima. Im Mittel konnte eine Temperaturreduktion von rund 2 °C vor der Fassade gemessen werden.

Im Winter, nach dem Laubabwurf, gleichen sich die Temperaturen an den verschiedenen Messstationen wieder an, und es sind keine Unterschiede zwischen den begrünten und unbegrünten Fassaden mehr feststellbar. So kann die tief stehende Sonne ungehindert auf die Fassade treffen und der solare Gewinn optimal für die Beheizung des Gebäudes genutzt werden.

Insgesamt bestätigen die Messungen, dass die Verschattung durch laubabwerfende Kletterpflanzen ein wirksames Mittel ist, um im Sommer Überhitzung zu vermeiden und im Winter trotzdem von den solaren Wärmegeinnen zu profitieren.

3.4 Thermischen Simulation

3.4.1 Resultate Temperatursimulationen mit Modelica

Die jeweiligen Messstationen sind alle identisch modelliert, mit den exakt gleichen Eigenschaften. Auch erhalten die Messstationen dieselben äusseren Randbedingungen. Der einzige Unterschied ist der Zwischenschritt, bei dem die solare Einstrahlung für jede Box mit dem Transmissionskoeffizienten skaliert wird (linear für Direkt- und Diffusstrahlung).

Für den Vergleich stehen die Sensoren an der Rückwand, am Glas und unter der Dachbekleidung zur Verfügung, wobei jener am Glas teilweise besonnt sein kann und daher höhere Abweichungen erwartet werden.



Nachfolgend werden die Resultate der Simulationen detailliert für den Zeitraum von 13 Tagen im Sommer 2022 (1. – 13. Juli) betrachtet. Dabei waren die Messboxen folgendermassen bestückt:

- Box 1 Akebia quinata
- Box 2 Celastrus orbiculatus
- Box 3 Aristolochia macrophylla
- Box4 Wisteria sinensis (Ausfall der Messungen)
- Box5 Schisandra chinensis

Vergleich Simulation und Messung am Dach

Die Simulation der Temperatur unter dem Dach zeigt, wie zu erwarten, grössere Abweichungen (siehe Abbildung 43 «Differenz»). Dies da die Modellierung der Hinterlüftung sowie die Solarstrahlung auf die Dachfläche komplex wäre und daher vernachlässigt wird. Eine kurze Simulationsstudie hat gezeigt, dass wegen des nach unten gerichteten (schwachen) Wärmestromes der Einfluss auf die Temperatur in der Box gering ist, daher wird diese Abweichung toleriert.

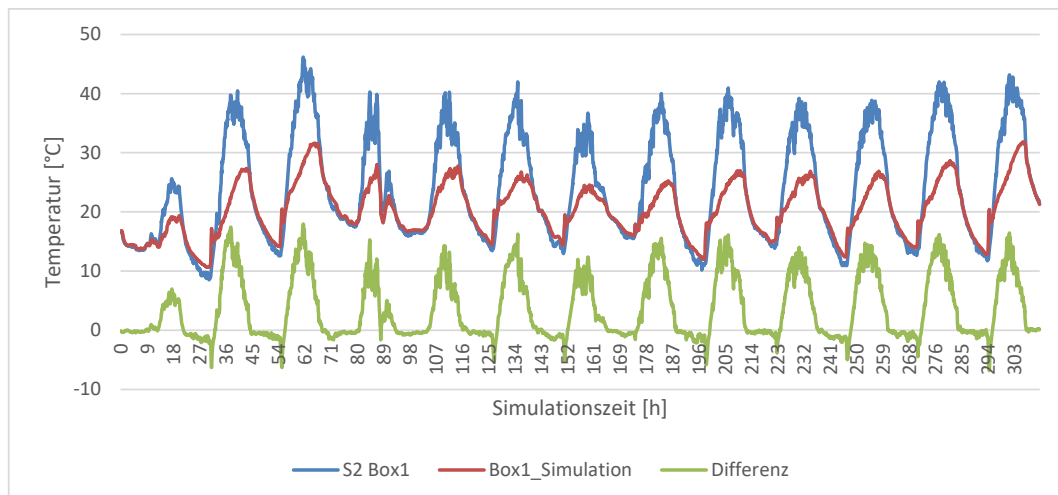


Abbildung 43: Resultat Juli 2022 für Box 1 Messpunkt Dach (S2)

Vergleich Simulation und Messung am Glas

Die Simulation der Temperatur am Glas zeigt ebenfalls Abweichungen. An Box 1, siehe Abbildung 44, sind die Abweichung aufgrund der fehlenden Verschattung deutlich. Bei den übrigen Messstationen ist der Effekt geringer als erwartet, siehe z.B. Abbildung 45 von Box 5 (eine der tiefsten Transmissionskoeffizienten).

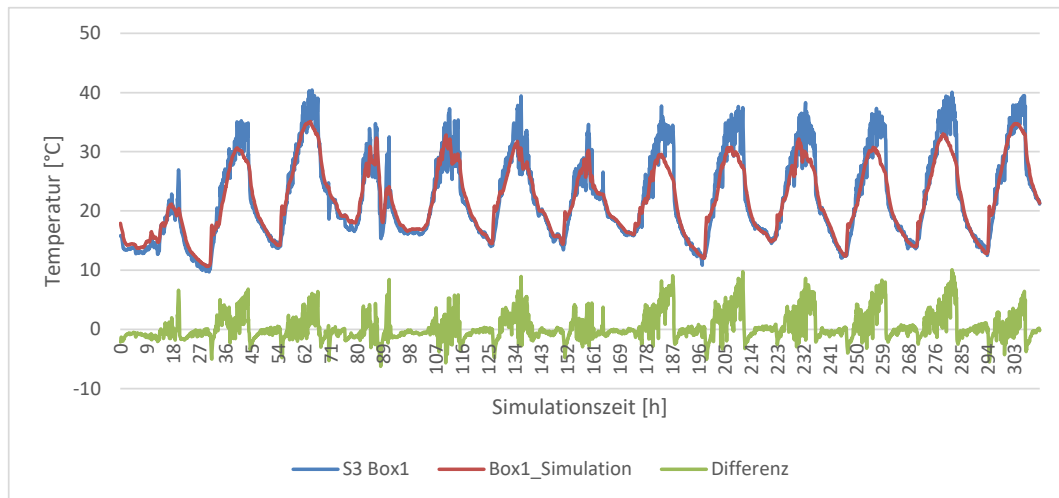


Abbildung 44: Resultat Juli 2022 für Box 1 Messpunkt Glas (S3)

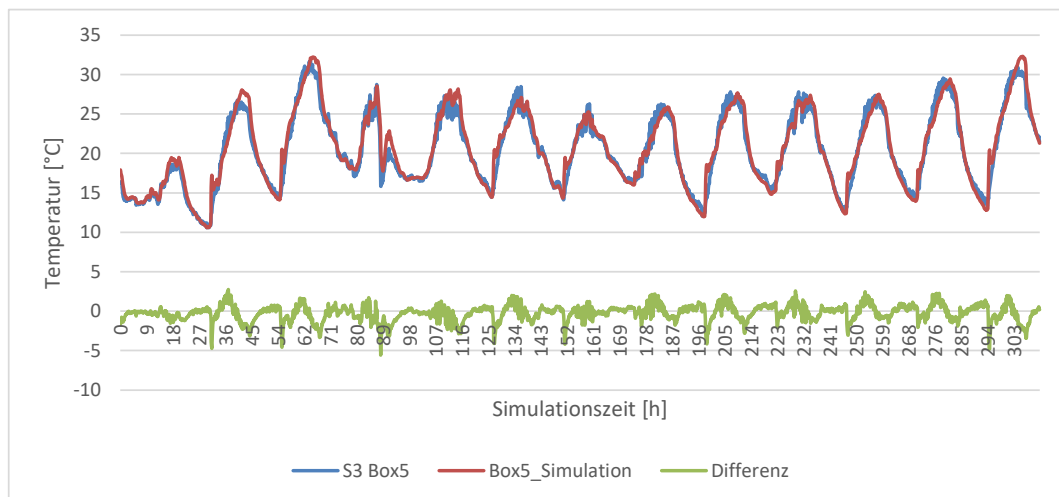


Abbildung 45: Resultat Juli 2022 für Box 5 Messpunkt Glas (S3)

Die Numerische Auswertung ist in Tabelle 31 zu sehen. Dabei wird die Simulation von der Messung subtrahiert, wodurch eine negative Abweichung eine höhere Temperatur in der Simulation bedeutet.

Der RMSE (Root Mean Squared Error) bzw. "Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers" ist eine absolute Fehlerkennzahl, die die Abweichungen quadriert, um zu verhindern, dass sich die positive und negative Abweichung gegenseitig aufhebt. Der RMSE beschreibt die Güte der Simulation im Vergleich zu Messdaten. Der cvRMSE ist der Variationskoeffizient des RMSE und beschreibt die Güte der Anpassung bezogen auf die Zielgrösse, hier der Mittelwert der Messgrösse in [°C].

Tabelle 31: Abweichungen "Messung - Simulation" am Glas in [K]

	Box1	Box2	Box3	Box5
Δ min	-6.24	-6.22	-6.12	-5.59
Δ mittel	0.38	-0.71	-0.73	-0.24
Δ max	10.07	2.13	4.00	2.75
RMSE	2.31	1.17	1.43	1.04
cvRMSE	10.4%	5.8%	7.0%	5.1%



Vergleich Simulation und Messung im Innenraum

Die Simulation der Temperatur am internen Messpunkt an der Rückwand zeigt sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten, siehe exemplarisch Abbildung 46 und Abbildung 47. Die numerische Auswertung sowie die Kennwerte zur Güte der Anpassung sind in Tabelle 32 aufgeführt. Die grössten Abweichungen sind:

- a) in den frühen Morgenstunden, wo die Simulation die Temperatur überschätzt, und
- b) beim Tagesmaximum, wo die Simulation die Temperatur unterschätzt

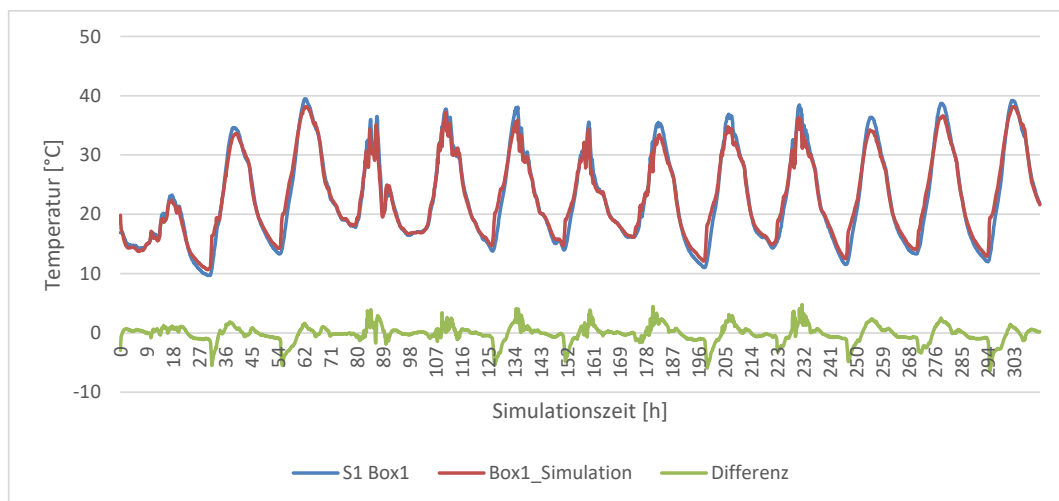


Abbildung 46: Resultat Juli 2022 für Box 1 Messpunkt Rückwand (S1)

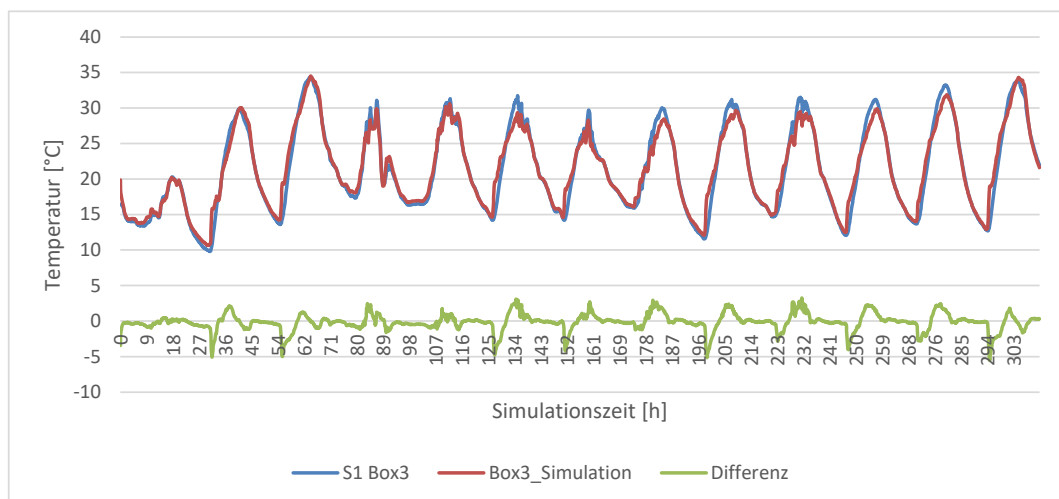


Abbildung 47: Resultat Juli 2022 für Box 3 Messpunkt Rückwand (S1)



Tabelle 32: Abweichungen "Messung - Simulation" im Innenraum in [K]

	Box1	Box2	Box3	Box5
Δ min	-6.40	-4.98	-5.54	-5.12
Δ mittel	-0.16	-0.10	-0.13	-0.20
Δ max	4.79	2.87	3.25	2.04
RMSE	1.42	1.05	1.18	1.03
cvRMSE	6.2%	5.0%	5.5%	5.0%

3.4.2 Fazit thermische Simulation des Messaufbauten

Der Vergleich der Simulation mit den Messdaten zeigen gewisse Abweichungen, diese sind jedoch im tolerierbaren Rahmen, dies da:

- eine gewisse Unsicherheit beim Strahlungsmodell (gemessene Diffusstrahlung, Transmission der Direktstrahlung) vorherrscht.
- eine gewisse Unsicherheit bei der Auswertung des Transmissionskoeffizienten vorherrscht.
- Die grössten Abweichungen beim schnellen Aufheizen auftreten, wo bereits geringe Modellabweichungen oder zeitliche Versatzeffekte stark auf den Vergleich auswirken.
- Alle Messstationen mit demselben Modell berechnet werden und alle Vergleiche eine sehr gute Übereinstimmung in Form und Amplitude aufweisen.
- Die Abweichungen generell sehr klein sind (RMSE < 1.5 K)

Die thermischen Simulationen an sich werden als valide bewertet. Zugleich lässt sich daraus auch aussagen, dass die Transmissionskoeffizienten für die Betrachtung der thermischen Lasten aussagekräftig und zuverlässig sind.

Für die solare Beurteilung von begrünten Fassaden an Gebäuden lässt sich aber ableiten, dass der Transmissionskoeffizienten von folgenden Parametern abhängig ist:

1. Alter der Pflanze (Grösse, Verästelung und Verholzung der Pflanze)
2. Saisonale Bewuchsdichte
3. Orientierung der Fassade & Begrünung
4. Sonnenstand

3.5 Thermische Simulationen der Verschattungswirkung an Fassaden

Um den Einfluss der Begrünung von verglasten Fassaden zu evaluieren, wurden detaillierte thermische Simulationen basierend auf der Modellvalidierung an den Messaufbauten durchgeführt. Dabei wurden für verschiedene Ausrichtungen in 30°-Schritten Jahressimulationen einer 3-fach Wärmeschutz-Isolierverglasung mit der Verschattung anhand der charakteristischen Wachstumskurven nach Abbildung 15 durchgeführt. Aus den Energieströmen lässt sich der Verlauf des g_{tot} -Wertes (dynamischer g_{tot} -Wert) auf Monatsbasis berechnen.

Grundlage: 3-fach Isolierglas $U_g = 0.7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $g = 0.53$

⇒ Die Kontrolle der Muster-Isolierverglasung unter stationären Bedingungen ergab einen U_g von $0.6783 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($\Delta T = 30 \text{ K}$) und einen g -Wert von 0.5298 (500 W/m^2 und $\Delta T = 30 \text{ K}$).

Die Fassadenausrichtungen werden in 30° Schritten von Nord (0°) über Ost (90°), Süd (180°), West (270°) für die ganzen 360° betrachtet.

Die Berechnungen erfolgen für 1 m^2 Verglasung mit einer Verschattung durch die Pflanzen gemäss den Verschattungskurven. Anhand den thermischen Simulationen nach Abschnitt 3.4 sowie der Temperaturdatenauswertung nach Abschnitt 3.3 ist ersichtlich, dass durch die Pflanzen kein bzw.



kaum Wärmestau vor der Verglasung entsteht, welche einen erhöhten sekundären Wärmestrom nach innen bewirken. Daher wird in der Simulation der freie Luftaustausch der Verglasung zur Aussenluft angenommen.

Aufgrund der unterschiedlichen Aufteilung von Direkt- und Diffusstrahlung bzw. Einstrahlungswinkel variiert der g_{tot} -Wert der Verglasung für die jeweiligen Fassadenausrichtung geringfügig. Die Simulationsergebnisse von Solarstrahlung, Wärmestrom und solarer Transmission werden auf monatlicher Basis für jede Ausrichtung zusammengefasst und anschliessen zu einem g_{tot} -Wert, Gesamtenergiedurchlassgrad von Verglasung mit Sonnenschutz, reduziert, welcher für alle Fassadenausrichtungen gültig ist.

Da die Transmission der Pflanzen massgeblich den Energiehaushalt der Verglasung beeinflusst, folgen die g_{tot} -Kurven auch den Transmissionskurven (vergleiche Abbildung 48 mit Abbildung 15). Wobei in Abbildung 48 die Mittelwerte über alle Fassadenausrichtungen dargestellt sind.

Die Variabilität zum Mittelwert aller Ausrichtungen liegt im Bereich von:

- ca. $\pm 6\%$ des g_{tot} im Winter
- ca. $-6\% / +3\%$ des g_{tot} im Sommer

Sieh dazu die Grafiken Anhang C (Abschnitt 10).

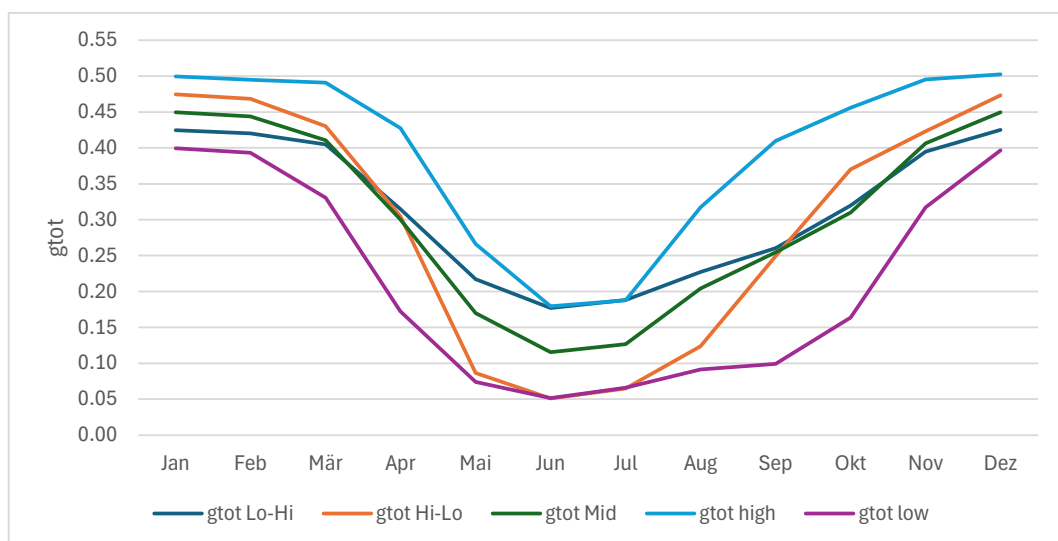


Abbildung 48: Energiedurchlasswerte der Pflanzen anhand der Verschattungswirkung über alle Fassadenausrichtungen

Da die Begrünung thermisch «neutral» ist, was heisst sie erwärmt sich nicht und führt somit zu keinem Hitzestau vor der Verglasung, wodurch der F_c -Wert gleich dem Transmissionsfaktor ist.

Dadurch lässt sich der g_{tot} Wert auch mit der vereinfachten Formel nach SN EN 52022-1 berechnen. Dabei ist die Absorption bzw. der Term « $1 - \tau_{e,B}$ » = 0 zu setzen. Dadurch wird die Formel dahingehend angepasst, dass man den Wärmestau vernachlässigt und auf folgenden Ausdruck reduziert:

$$g_{\text{tot}} = g \cdot \text{Transmissionskoeffizient.}$$

Der Transmissionskoeffizient ist in Abbildung 15 bzw. Tabelle 6 festgehalten.



3.6 Auswirkung der Pflanzenarten auf die Umwelt und Gebäude

Die Auswirkungen der Pflanzenarten auf die Umwelt und das Gebäude (Unterhalt z.B. Rückschnitt, Wasserbedarf und Düngung oder Schadenpotenzial am Gebäude durch falsche Wartung usw.) werden aufgezeigt.

3.6.1 Rückschnitt

Für ein gesundes Wachstum und eine ansprechende Optik ist ein regelmässiger Rückschnitt notwendig. Die meisten untersuchten Arten sind schnittverträglich und treiben nach dem Rückschnitt zuverlässig wieder aus. Besonders bei kräftig wachsenden Arten wie *Wisteria sinensis* oder *Lonicera periclymenum* empfiehlt sich 2 bis 4 Rückschnitte im Jahr, um unerwünschte Ausbreitung und mögliche Schäden an der Fassade zu verhindern. Bei wenig kräftig wachsenden Arten genügt ein Rückschnitt pro Jahr.

3.6.2 Düngung

Die Nährstoffversorgung ist bei Pflanzen an Fassaden ein wichtiger Punkt, da das Wurzelvolumen oft eingeschränkt ist. Im Projekt zeigte sich, dass eine intensive Düngung jeden Monat vom Frühling bis in den Spätsommer das Wachstum und die Blattbildung fördert. Im Winter wurde weder künstlich bewässert noch gedüngt.

3.6.3 Schädlinge

Wie bei allen Begrünungsmassnahmen kann es gelegentlich zu Schädlingsbefall kommen. Im Versuchszeitraum traten nur vereinzelt Blattläuse oder andere Schädlinge auf. Insbesondere die Pflanzenart *Lonicera caprifolium* / Echtes Geissblatt zeigte ein hoher Befall von Blattläusen. Ein gesunder Standort und regelmässige Kontrolle helfen, Probleme frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Im Allgemeinen zeigten sich die untersuchten Arten robust und widerstandsfähig.

3.6.4 Schadenpotenzial auf das Gebäude

Der grösste Teil der getesteten Arten ist mit moderatem Pflegeaufwand gut kontrollierbar und verursacht keine relevanten Schäden an der Bausubstanz, sofern die Begrünung fachgerecht geplant und ausgeführt wird. Kräftige Arten wie die *Wisteria sinensis* oder *Fallopia aubetii* benötigen intensiveren Kontrollaufwand, damit sie keine Bauschäden erzeugen. Solche Arten sollten nicht direkt an Fugen, Fenster oder andere empfindliche Bauteile heranwachsen.

3.7 Pflanzenwahl, Pflege und Gestaltung – Expertenwissen aus der Praxis

Das Atelier für Ökologie und Gartenkultur stellt ihr Wissen rund um die Pflanzenwahl, Pflege und Gestaltung zusammen.

3.7.1 Planung, Ausführung und Pflege

Die erfolgreiche Begrünung einer Fassade beginnt mit einer sorgfältigen Planung und der Auswahl geeigneter Pflanzenarten. Kleine Projekte wie Einfamilienhäuser können durchaus in Eigenregie umgesetzt und gepflegt werden – vorausgesetzt, man informiert sich gründlich, plant passende Kletterhilfen und bringt etwas handwerkliches Geschick mit. Für grössere oder komplexe Fassaden ist die Zusammenarbeit mit erfahrenen Fachfirmen unbedingt zu empfehlen. Beratung und Adressen bietet zum Beispiel die Schweizerische Fachvereinigung Gebäudebegrünung (SFG).

Kletterpflanzen benötigen ausreichend Wasser, insbesondere bei grosser Blattmasse und an sonnigen Standorten. Natürliche Niederschläge reichen an Fassaden meist nicht aus, vor allem an wetterabgewandten Seiten. Deshalb ist eine zuverlässige Bewässerung – insbesondere für grössere oder höher gelegene Grünflächen – unerlässlich.



Pflanzen sind Lebewesen mit individuellen Ansprüchen. Arten- und sortenspezifische Eigenschaften, etwa Wuchsgeschwindigkeit, Blühverhalten oder Frosthärte, sollten bei der Planung und Pflege berücksichtigt werden.

3.7.2 Die Pflanzenwahl

Die Auswahl der passenden Pflanzen ist eine zentrale Grundlage für eine gelungene und langlebige Fassadenbegrünung. Gartencenter, Baumschulen und spezialisierte Fachbetriebe bieten heute eine grosse Auswahl geeigneter und attraktiver Arten an. Viele dieser Betriebe führen Schaugärten, in denen die Pflanzen während der Vegetationszeit im Original betrachtet werden können – ein grosser Vorteil bei der Entscheidungsfindung.

Ausführliche Pflanzenlisten sprengen zwar den Rahmen dieses Berichts, doch einige Grundüberlegungen zur Auswahl sind wichtig:

- **Einheimische oder exotische Arten?**

Die Frage, ob nur einheimische Pflanzen oder auch Exoten und Zuchtsorten eingesetzt werden sollen, wird häufig diskutiert. Die einheimische Flora der Schweiz ist bei Kletterpflanzen allerdings sehr arm: Im Schweizer Mittelland gibt es eigentlich nur Efeu (*Hedera helix*), die Waldrebe (*Clematis vitalba*) und das Wald-Geissblatt (*Lonicera periclymenum*). Hinzu kommen wenige Stauden wie Hopfen (*Humulus lupulus*) oder Bittersüßer Nachtschatten (*Solanum dulcamara*, Vorsicht: giftig!).

Deshalb sind fremdländische Arten und Gartensorten wie Kletterrosen, die grosse Vielfalt der Clematis-Sorten, Trompetenwinde (*Campsis*) und viele weitere ein echter Gewinn und eine wertvolle Ergänzung.

- **Gestalterische Vielfalt:**

Die Kombination verschiedener Arten ermöglicht abwechslungsreiche Blütenaspekte, farbige Herbstfärbungen, unterschiedliche Laubformen und immer neue Eindrücke im Verlauf des Jahres.

Ein gezielter Besuch bei spezialisierten Betrieben, kombiniert mit einer guten Beratung, hilft dabei, die idealen Pflanzen für jeden Standort und Zweck zu finden.

3.7.3 Gestaltungsmöglichkeiten und Qualitäten

Begrünte Fassaden eröffnen eine grosse Vielfalt an gestalterischen Möglichkeiten:

- **Raum- und Flächengestaltung:** Mit Kletterhilfen, Gittern und der Auswahl unterschiedlicher Pflanzenarten lässt sich das Erscheinungsbild individuell gestalten.
- **Vegetationsdichte:** Die Dichte und Richtung der Begrünung kann durch die Art der Kletterhilfe beeinflusst werden.
- **Farbaspekte:** Austrieb, Blüte, Herbstfärbung und Fruchtschmuck setzen im Jahresverlauf unterschiedliche Akzente.
- **Duft und Blüte:** Viele Arten bieten zudem duftende Blüten, was die Lebensqualität im urbanen Raum weiter erhöht.
- **Früchte und Samen:** Neben dem Zierwert bieten manche Arten essbare Früchte oder dienen als Nahrungsquelle für Wildtiere.

3.7.4 Ökologische Bedeutung begrünter Fassaden

Fassadenbegrünungen sind wertvolle Ersatzlebensräume im städtischen Raum. Sie schaffen Rückzugsorte und Nahrungsquellen für Insekten, Vögel und andere Tiere. Mit ergänzenden Massnahmen wie Nistkästen, Insektenhotels oder Wasserstellen lässt sich die ökologische Wirkung noch steigern. Besonders in dicht bebauten Gebieten helfen begrünte Fassaden, das Mikroklima zu verbessern, die Luftfeuchtigkeit zu erhöhen und Hitzeinseln abzumildern.



3.7.5 Brandschutz bei Fassadenbegrünung

Brandschutz spielt bei der Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen eine zentrale Rolle – insbesondere bei mehrgeschossigen Gebäuden. Die Schweizer Vorschriften gelten im internationalen Vergleich als besonders detailliert und verbindlich. Sie stellen hohe Anforderungen an die Sicherheit, unabhängig davon, ob es sich um private, öffentliche oder gewerbliche Bauvorhaben handelt.

Schweizer Regelungen:

In der Schweiz sind die Vorgaben der **Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF)** massgebend. Das VKF-Merkblatt „Gebäudebegrünung – Brandschutz“ [13] definiert klare Anforderungen für die Planung und Ausführung von begrünten Fassaden. Zu den wichtigsten Punkten gehören:

- **Materialwahl der Kletterhilfen:** Für Kletterstrukturen werden nicht brennbare oder schwer entflammbare Materialien wie Edelstahlseile empfohlen. Brennbare Kletterhilfen sollten – insbesondere bei höheren Gebäuden – vermieden werden.
- **Abstände:** Begrünte Flächen müssen ausreichende Abstände zu Fenstern, Lüftungsöffnungen, Dachrändern und technischen Installationen aufweisen. So wird verhindert, dass sich ein Brand schnell ausbreitet.
- **Pflege und Unterhalt:** Eine regelmässige Pflege ist unerlässlich. Totes Holz, trockenes Laub und unkontrollierter Pflanzenwuchs müssen entfernt werden, um Brandlasten zu minimieren. Die langfristige Funktionsfähigkeit des Brandschutzes ist nur bei konsequenter Wartung gewährleistet.
- **Gebäudehöhe:** Für Gebäude mit mehr als drei Geschossen oder einer Höhe über 11 Metern gelten besonders strenge Anforderungen, wie brandschutztechnisch wirksame Unterbrechungen der Begrünung (zum Beispiel horizontale Barrieren) und regelmässige Kontrollintervalle.
- **Fachplanung:** Für grössere oder komplexe Begrünungsprojekte empfiehlt sich die Zusammenarbeit mit spezialisierten Planungsbüros und Fachfirmen, die mit den aktuellen Brandschutzvorgaben vertraut sind.

Vergleich mit Deutschland:

Auch in Deutschland gelten strenge Brandschutzregeln für Fassadenbegrünungen [14]. Sie sind jedoch föderal organisiert und werden je nach Bundesland und Projekt unterschiedlich umgesetzt. Oft bestehen grössere Spielräume in der praktischen Auslegung und Detailumsetzung. In der Schweiz dagegen sind die VKF-Vorgaben landesweit einheitlich und besonders restriktiv. Für internationale Projekte oder bei Orientierung an ausländischen Beispielen ist es deshalb wichtig, die Schweizer Vorschriften frühzeitig zu prüfen und mit der örtlichen Brandschutzbehörde abzustimmen.

Spezielle Risiken bei einzelnen Pflanzenarten:

Praxisberichte und Analysen zeigen, dass ein grosser Teil der dokumentierten Brände an begrünten Fassaden auf Efeu (*Hedera helix*) zurückgeht³. Grund hierfür ist die vergleichsweise hohe Brennbarkeit älterer Efeupflanzen sowie die Tendenz, dass sich im dichten Bewuchs trockenes Laub und Totholz ansammeln. Mit regelmässigem Rückschnitt, gezielter Pflege und einer sorgfältigen Artenwahl lassen sich diese Risiken jedoch deutlich reduzieren.

³ Nach Erfahrung von Brandschutzexperten und Feuerversicherungen ist die überwiegende Mehrheit der bekannten Brände an begrünten Fassaden auf Efeu (*Hedera helix*) zurückzuführen (vgl. VKF-Merkblatt „Gebäudebegrünung – Brandschutz“, 2020; BuGG, „Brandschutz bei Fassadenbegrünungen“ 2021).



Empfehlung:

Für eine sichere und dauerhaft erfolgreiche Fassadenbegrünung empfiehlt sich:

- die konsequente Beachtung der VKF-Merkblätter und der örtlichen Brandschutzvorschriften,
- eine durchdachte Pflanzen- und Materialwahl,
- sowie ein professioneller Unterhalt, um Brandlasten möglichst gering zu halten.

Eine frühzeitige Abstimmung mit der Brandschutzbehörde und gegebenenfalls die Einbindung von Experten helfen, Risiken zu minimieren und die gesetzlichen Anforderungen zuverlässig zu erfüllen.

3.7.6 Invasive Neophyten

Einige gebietsfremde Pflanzenarten haben das Potenzial, sich unkontrolliert auszubreiten und einheimische Arten zu verdrängen. So ist beispielsweise das japanische Geissblatt (*Lonicera japonica*) wegen seiner invasiven Eigenschaften in der Schweiz verboten. Die aktuellen Listen invasiver Pflanzenarten sind bei den zuständigen Behörden oder unter www.neophyten-schweiz.ch abrufbar. Seriöse Baumschulen führen keine verbotenen Arten mehr im Sortiment.

3.7.7 Fazit und Perspektiven

Begrünte Fassaden bieten vielfältige Vorteile für Städte, Gebäude und ihre Bewohner. Sie verbessern das Mikroklima, leisten einen Beitrag zur Biodiversität und erhöhen die Lebensqualität im urbanen Raum. Der bewusste Einsatz verschiedener Kletterpflanzenarten ermöglicht nicht nur energetisch sinnvolle Lösungen, sondern erweitert auch die gestalterischen Möglichkeiten und bereichert das Erscheinungsbild unserer Städte.

Insbesondere die Kombination unterschiedlicher Pflanzenarten, die gezielte Auswahl nach Standort, Wuchsform und jahreszeitlicher Wirkung, eröffnet eine grosse Vielfalt an individuellen Gestaltungslösungen. Mit fachgerechter Planung, passender Kletterhilfe und regelmässiger Pflege können Fassadenbegrünungen langfristig und nachhaltig zur städtischen Anpassung an den Klimawandel beitragen.

Für die Zukunft liegt grosses Potenzial darin, Fassadenbegrünungen nicht nur als ästhetisches oder ökologisches Element zu betrachten, sondern als integralen Bestandteil nachhaltiger Architektur und Stadtentwicklung. Es lohnt sich, innovative Konzepte – wie die Kombination von Begrünung mit dezentraler Energiegewinnung (z. B. Photovoltaik) oder die Integration ökologischer Nischen für Tiere – weiterzuentwickeln und praktisch umzusetzen.

Die Projektergebnisse zeigen, dass Begrünte Fassaden weit mehr sind als blosser Dekoration: Sie sind ein zukunftsweisender, flexibler und wirkungsvoller Baustein für lebendige, gesunde und klimafitte Städte. Durch kontinuierliche Forschung, Praxisbeispiele und den Austausch zwischen Fachleuten, Planenden und Nutzenden kann das volle Potenzial der Fassadenbegrünung weiter ausgeschöpft und ihre Akzeptanz noch gesteigert werden.

3.8 Begrünte Fassaden und PV

Die Forschungsfrage nach der Flächenkonkurrenz zwischen Begrünung und PV wurde parallel an der HSLU T&A seitens Instituts für Gebäudetechnik und Energie im Projekt «GreenPV», mit Unterstützung der Autoren, bearbeitet.

Mit Verweis auf den Schlussbericht GreenPV, Potential Gebäudehülle – Lösungsansätze zur optimalen Fassadengestaltung mit PV und Begrünung im Hinblick auf den Klimawandel [15], können folgende Kernaussagen übernommen werden:

- Fassadenbegrünungen können die Oberflächentemperaturen an der Fassade deutlich senken.
- Fassadenbegrünungen vermögen die Physiological Equivalent Temperature (PET) in der nahen Umgebung deutlich zu senken, der Effekt nimmt mit zunehmendem Abstand ab.



- 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
- PV-Fassaden führten zu höheren Oberflächentemperaturen an der Fassade, aufgrund der geringen solaren Rückstrahlung der Module ist jedoch kein negativer Einfluss auf die PET in der Umgebung vorhanden.
- Fassadenbegrünungen vermögen den Energiebedarf des Gebäudes (bei opaken Fassaden) nur geringfügig zu senken (insbesondere bei Neubauten mit guter Isolierung), daher liegen die Vorteile der Systeme vor allem im Aussenraum.
- PV-Fassaden bieten Vorteile durch die Stromproduktion und können eine positive Ökobilanz wie auch positive Lebenszykluskosten aufweisen. In dieser Betrachtung kann die Fassadenbegrünung in der Regel nicht mithalten.

Durch die gezielte Kombination von Begrünungen und PV an der Fassade lassen sich mit einem geringfügigen Mehraufwand an Lebenszykluskosten die Ökobilanz bedeutend verbessern, der städtische Wärmeinseleffekt reduzieren und die Aufenthaltsqualität trotz der zunehmenden städtischen Verdichtung erhalten.

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 eine sinnvolle Kombination bspw. obere Geschosse PV, untere Geschosse Begrünung, kein System an der Nordfassade wäre.



4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse dieses Projekts zeigen deutlich: Fassadenbegrünungen mit laubabwerfenden Kletterpflanzen sind eine wirksame und nachhaltige Massnahme, um den Energiehaushalt von Gebäuden zu optimieren und das städtische Klima positiv zu beeinflussen. Die Kombination aus saisonaler Verschattung im Sommer und hoher Lichtdurchlässigkeit im Winter schafft einen natürlichen, dynamischen Sonnenschutz, der weit mehr kann als klassische technische Systeme.

Im Sommer bewirken dicht belaubte Fassadenpflanzen eine signifikante Absenkung der Fassaden- und Raumtemperaturen. Dadurch sinkt der Kühlenergiebedarf spürbar und das Risiko sommerlicher Überhitzung wird verringert. Unsere Messungen und Simulationen bestätigen, dass sich Temperaturdifferenzen von bis zu zwei Grad Celsius vor der Fassade ergeben können – besonders dann, wenn der Pflanzenbestand dicht, vital und gut gepflegt ist.

Ein wichtiger Aspekt betrifft den Zusammenhang zwischen dem Sonnenstand im Sommer und der Verschattungswirkung von Pflanzen mit lichterem Bewuchs. Während der Nutzer in der Regel horizontal durch den lichterem Bewuchs blickt und eine gute Durchsicht geniesst, trifft die hochstehende Sonne mit ihren Strahlen im steilen Winkel von oben auf die Fassade. Die Sonnenstrahlung passiert also nicht waagrecht die Bepflanzung, sondern durchdringt diese schräg aus einem im Sommer steilen Einfallswinkel. Selbst bei lichterem Pflanzenarten entsteht auf diese Weise eine erstaunlich effektive Verschattung der Glasflächen mit solaren Transmissionswerten von 40%, da für die Sonne ein dichteres „Blattwerk“ zu durchqueren ist, als es der Nutzer von innen optisch wahrnimmt. Selbst bei dichtem Bewuchs ist es hinter den Pflanzen nie dunkel, da diffus strahlende Sonnenstrahlen von bis zu 20% solare Transmission gegenüber der kompletten flächigen Verschattung durch die Pflanzen tritt.

Im Winter verlieren die laubabwerfenden Pflanzen ihr Blattwerk, sodass die tief stehende Sonne nahezu ungehindert auf die Fassadenfläche trifft. Der resultierende Wärmegewinn kann voll genutzt werden, was den Heizenergiebedarf reduziert und die saisonale Gesamtenergiebilanz des Gebäudes verbessert.

Für die Praxis ist es entscheidend, die jeweils geeigneten Pflanzenarten auszuwählen: Arten mit hohem Blattvolumen und zuverlässigem Laubabwurf sorgen für maximale Verschattung und somit maximale Kühlung im Sommer, ohne die gewünschten solaren Gewinne im Winter zu verhindern. Gleichzeitig gilt es jedoch, die Nutzerakzeptanz zu beachten. Nicht jeder wünscht sich im Sommer eine dichte, fast blickdichte Begrünung vor den Fenstern. Pflanzenarten mit leichterem Bewuchs bieten zwar weniger Kühlung auf der Aussenseite, ermöglichen dafür aber eine bessere Durchsicht und können als angenehmer empfunden werden. Das Projekt zeigt: Auch ein etwas lichterem Pflanzenbestand bietet bereits einen guten Kompromiss aus Verschattung, Kühlung und Tageslichtversorgung – und stösst vielfach auf eine höhere Akzeptanz bei den Nutzern.

Eine sorgfältige Planung der Pflanzenwahl und Kletterhilfen ist für den langfristigen Erfolg unverzichtbar. Die Unterhaltsfreundlichkeit und die langfristigen Kosten müssen ebenso beachtet werden wie energetische Aspekte. Die neuen Daten und Erfahrungswerte ermöglichen es, Begrünungen energetisch zu bilanzieren und gezielt in Planungsprozesse einzubeziehen. Fassadenbegrünungen sind ein vielseitiges, klimawirksames und gestalterisch bereicherndes Element der modernen Architektur. Richtig geplant, ausgeführt und gepflegt, leisten sie einen entscheidenden Beitrag zur Anpassung unserer Städte an den Klimawandel und verbessern die Lebensqualität für alle Nutzerinnen und Nutzer – heute und in Zukunft.

Gleichzeitig zeigen die Projektergebnisse wichtige Perspektiven für die weitere Entwicklung: Durch die Charakterisierung typischer Wuchsgruppen, wie dichter, lichter oder immergrüner Bewuchs, lassen sich künftig neue Pflanzenarten leichter einordnen und ihr Nutzen für unterschiedliche Fassadentypen abschätzen. Zukünftige Forschung sollte darauf abzielen, den Energiehaushalt des Gebäudes möglichst optimal auf die Wachstumsphasen der Pflanzen abzustimmen. Besonders interessant ist die Übergangszeit im Frühling und Herbst, wenn die Pflanzen austreiben oder ihr Laub abwerfen: Kann der zusätzliche Energieeintrag durch natürliche Lüftung oder Fensteröffnung kompensiert werden? Oder ist dennoch eine technische Kühlung erforderlich? Daraus ergeben sich



neue Planungsfragen: Unter welchen Bedingungen kann ganz auf einen mechanischen Sonnenschutz verzichtet werden, und lässt sich dadurch der Pflegeaufwand für die Begrünung gegenfinanzieren?

Es ist zudem wünschenswert, den klimatischen und stadtökologischen Mehrwert von Begrünungen künftig anhand von Praxisbeispielen und Monitoringprojekten noch besser zu dokumentieren und öffentlich sichtbar zu machen. Weitere Studien sollten ausserdem die unterschiedlichen Wirkungen von bodengebundenen und wandgebundenen Begrünungssystemen auf das Mikroklima, den Wasserbedarf und die Pflegeansprüche systematisch vergleichen. So können Planende und Bauherrschaften noch besser fundierte Entscheidungen treffen und das grosse Potenzial von Fassadenbegrünungen gezielt und nachhaltig nutzen.



5 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Fritz Wassmann-Takigawa, Atelier für Ökologie und Gartenkultur

Im engen fachlichen Austausch unterstützte Herr Fritz Wassmann-Takigawa das Projekt mit botanischer und ökologischer Expertise. Seine langjährige Erfahrung in der Praxis der Gebäudebegrünung brachte wertvolle Impulse bei der Auswahl und Bewertung der Pflanzenarten sowie bei der Interpretation der Versuchsergebnisse.

Fachverbände

Die Hochschule Luzern steht zudem in regelmässigem Austausch mit wichtigen Fachverbänden und Netzwerken wie der Schweizerischen Fachvereinigung für Gebäudebegrünung (SFG), dem Bundesverband GebäudeGrün e. V. (BuGG), GRÜNSTATTTGRAU und der Schweizerischen Zentrale für Fenster und Fassaden (SZFF). Diese Zusammenarbeit dient dem kontinuierlichen Wissens- und Erfahrungsaustausch rund um das Themenfeld nachhaltiger Fassadenbegrünung.

Forschungsprojekte

Im Rahmen des parallel an der HSLU T&A durchgeführte BFE-Projekt «GreenPV» fand ein aktiver, interdisziplinärer Austausch zwischen den Projekten statt.

<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=50466>

International fand ein Austausch sowie Teilnahme an Workshops bzw. Vorstellung des vorliegenden Projektes statt mit zwei Projekten aus Österreich statt:

- "HEDWIG": Erhebung von Messdaten zur Wirkungsabschätzung von begrünten Gebäuden: <https://boku.ac.at/lawi/iblb/news-archiv/projektstart-hedwig>
- "MARGRET" Messtechnische Erfassung begrünter/nicht begrünter Objekte zur Adaptierung von Berechnungsmodellen: <https://www.aee-intec.at/project/margret-messtechnische-erfassung-begrueunter-nicht-begrueunter-objekte-zur-adaptierung-von-berechnungsmodellen>

6 Publikation und andere Kommunikation

Das Projekt und seine Zielsetzungen wurden bislang im Rahmen verschiedener Veranstaltungen vorgestellt. Präsentationen erfolgten unter anderem am Abend der Wirtschaft an der HSLU T&A am 20. Oktober 2022, an der Mitgliederversammlung der Schweizerischen Fachvereinigung für Gebäudebegrünung (SFG) am 9. Mai 2023 sowie am Status Seminar vom 27. August 2024 an der Fachhochschule Nordwestschweiz in Brugg-Windisch. Bei diesen Gelegenheiten wurden das Projekt, der innovative Messaufbau sowie die angestrebten Forschungsziele einem breiten Fachpublikum aus Praxis, Forschung und Verwaltung nähergebracht. Die detaillierten Projektergebnisse werden im Anschluss an diese Berichterstattung noch publiziert und kommuniziert.

Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurden noch keine wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht. Die Veröffentlichung von Fachartikeln in einschlägigen Medien wie „Fassade“ oder „die Gebäudehülle“ ist in Planung. Ebenso vorgesehen ist die Veröffentlichung der Projektergebnisse des bildbasierten Messansatzes in als Artikel in wissenschaftlichen Fachzeitschriften.). Zusätzlich sollen die zentralen Projekterkenntnisse künftig über die Netzwerke der SFG, GRÜNSTATTTGRAU und des BuGG bekannt gemacht werden, um einen praxisnahen Wissenstransfer zu fördern.



7 Literaturverzeichnis

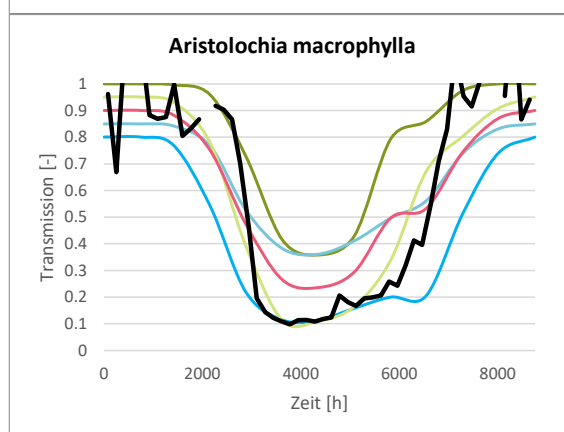
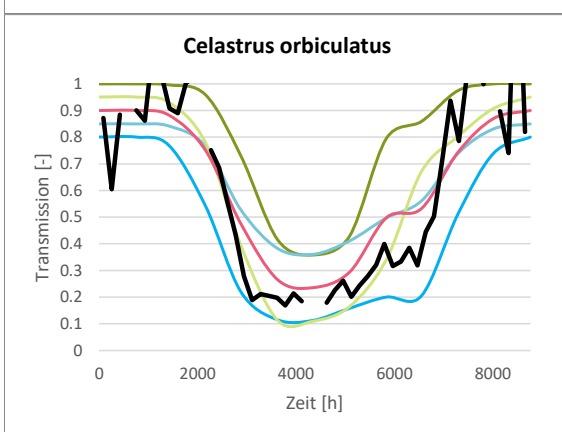
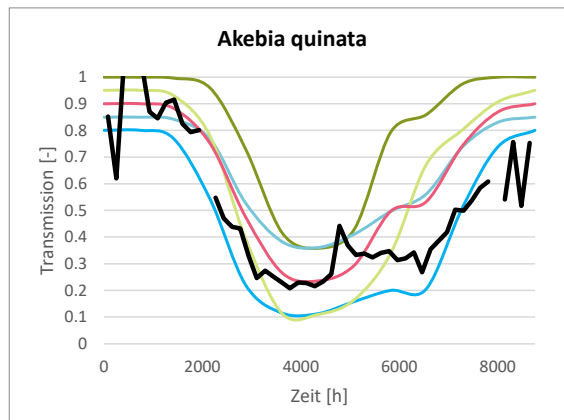
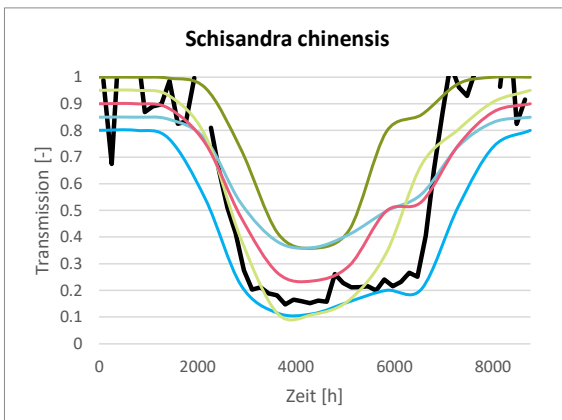
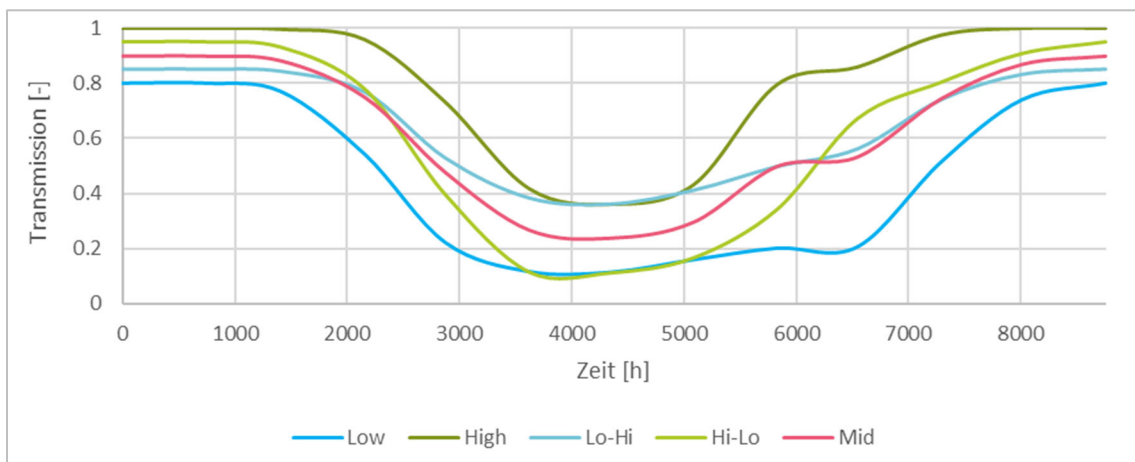
- [1] M. Radić, M. Brković Dodig, und T. Auer, „Green Facades and Living Walls—A Review Establishing the Classification of Construction Types and Mapping the Benefits“, *Sustainability*, Bd. 11, Nr. 17, Art. Nr. 17, Jan. 2019, doi: 10.3390/su11174579.
- [2] A. Price, E. C. Jones, und F. Jefferson, „Vertical Greenery Systems as a Strategy in Urban Heat Island Mitigation“, *Water Air Soil Pollut*, Bd. 226, Nr. 8, S. 247, Juli 2015, doi: 10.1007/s11270-015-2464-9.
- [3] N. D. A. Mohammad Shuhaimi, S. Mohamed Zaid, M. Esfandiari, E. Lou, und N. Mahyuddin, „The impact of vertical greenery system on building thermal performance in tropical climates“, *Journal of Building Engineering*, Bd. 45, S. 103429, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103429.
- [4] G. Pérez, J. Coma, I. Martorell, und L. F. Cabeza, „Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 39, S. 139–165, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.055.
- [5] R. A. Bustami, M. Belusko, J. Ward, und S. Beecham, „Vertical greenery systems: A systematic review of research trends“, *Building and Environment*, Bd. 146, S. 226–237, Dez. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.09.045.
- [6] N. Pfoser, „Fassade und Pflanze. Potenziale einer neuen Fassadengestaltung“, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2016. Zugriffen: 24. Februar 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/5587/>
- [7] Y. Wu, J. H. Kämpf, und J.-L. Scartezzini, „Design and validation of a compact embedded photometric device for real-time daylighting computing in office buildings“, *Building and Environment*, Bd. 148, S. 309–322, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.11.016.
- [8] A. Wolska und D. Sawicki, „Practical application of HDRI for discomfort glare assessment at indoor workplaces“, *Measurement*, Bd. 151, S. 107179, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107179.
- [9] G. K. Adam, P. A. Kontaxis, L. T. Doulos, E.-N. D. Madias, C. A. Bouroussis, und F. V. Topalis, „Embedded Microcontroller with a CCD Camera as a Digital Lighting Control System“, *Electronics*, Bd. 8, Nr. 1, Art. Nr. 1, Jan. 2019, doi: 10.3390/electronics8010033.
- [10] T. Wüest, P. Schuetz, und A. Luible, „Outdoor Test Cell Modelling with Modelica“, *Buildings*, Bd. 9, Nr. 10, Art. Nr. 10, Okt. 2019, doi: 10.3390/buildings9100209.
- [11] T. Wüest, „SEBF: Parameterstudie. Ermitteln der Einflussgrößen an der Solar Energy Balanced Facade (SEBF)“, Hochschule Luzern - Technik & Architektur CC Gebäudehülle, Horw, März 2020. doi: 10.5281/zenodo.3743058.
- [12] T. Wüest, L. O. Grobe, und A. Luible, „An Innovative Façade Element with Controlled Solar-Thermal Collector and Storage“, *Sustainability*, Bd. 12, Nr. 13, Art. Nr. 13, Jan. 2020, doi: 10.3390/su12135281.
- [13] VKF / AEAI, „Brandschutzmerkblatt Gebäudebegrünung / 2011-15de“, 21. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bsvonline.ch/de/aktuell/merkblatt-2011-15>
- [14] BuGG, „BuGG-Fachinformation "Anforderungen an Brandschutz bei Dach- und Fassadenbegrünungen“, 2023.
- [15] L. Keiser, G. Settembrini, S. Büttner, S. Domingo Irigoyen, A. Sotnikov, K. Arnold, GreenPV Potential Gebäudehülle – Lösungsansätze zur optimalen Fassadengestaltung mit PV und Begrünung im Hinblick auf den Klimawandel, Bundesamt für Energie (BFE), 2024.

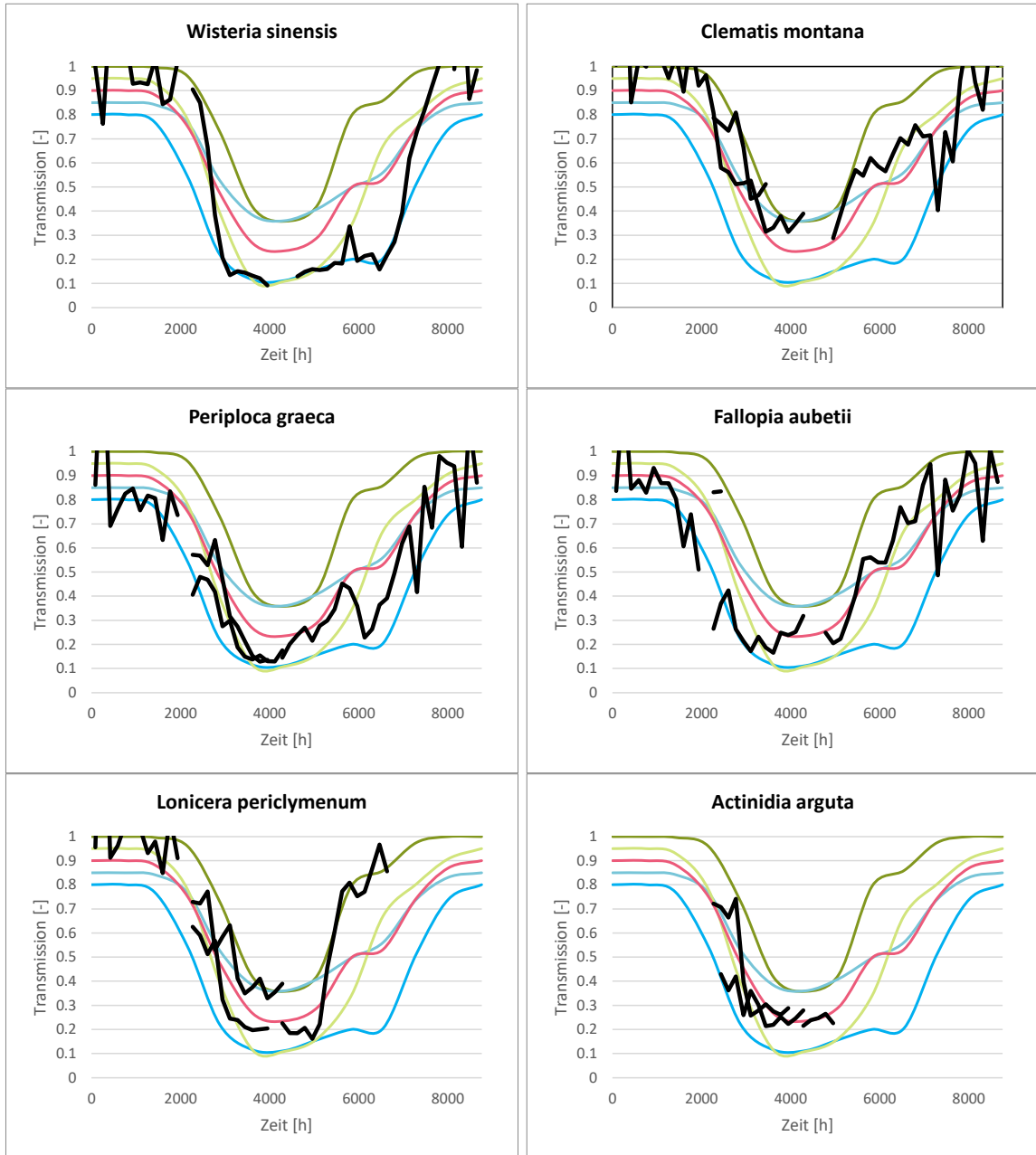


8 Anhang A: Zuordnung der idealisierten Wachstumskurven

Nachfolgend erfolgt die Zuordnung der verschiedenen Pflanzen aus den Feldversuchen zu den idealisierten Wachstumskurven gemäss Abbildung 15, welche als Legende nochmals abgebildet ist.

Wie in den Abbildungen zu sehen ist, ist die Variante «Hi-Lo» am stärksten vertreten, sowie einige «Mid». Dies ist aufgrund der Daten überraschend, jedoch ist anzumerken, dass die Daten eine erhebliche Streuung aufgrund des Feldversuches aufweisen und die derzeit «nicht benötigten» idealisierten Kurven für andere Pflanzen oder Wachstumsstadien nützlich sein können.



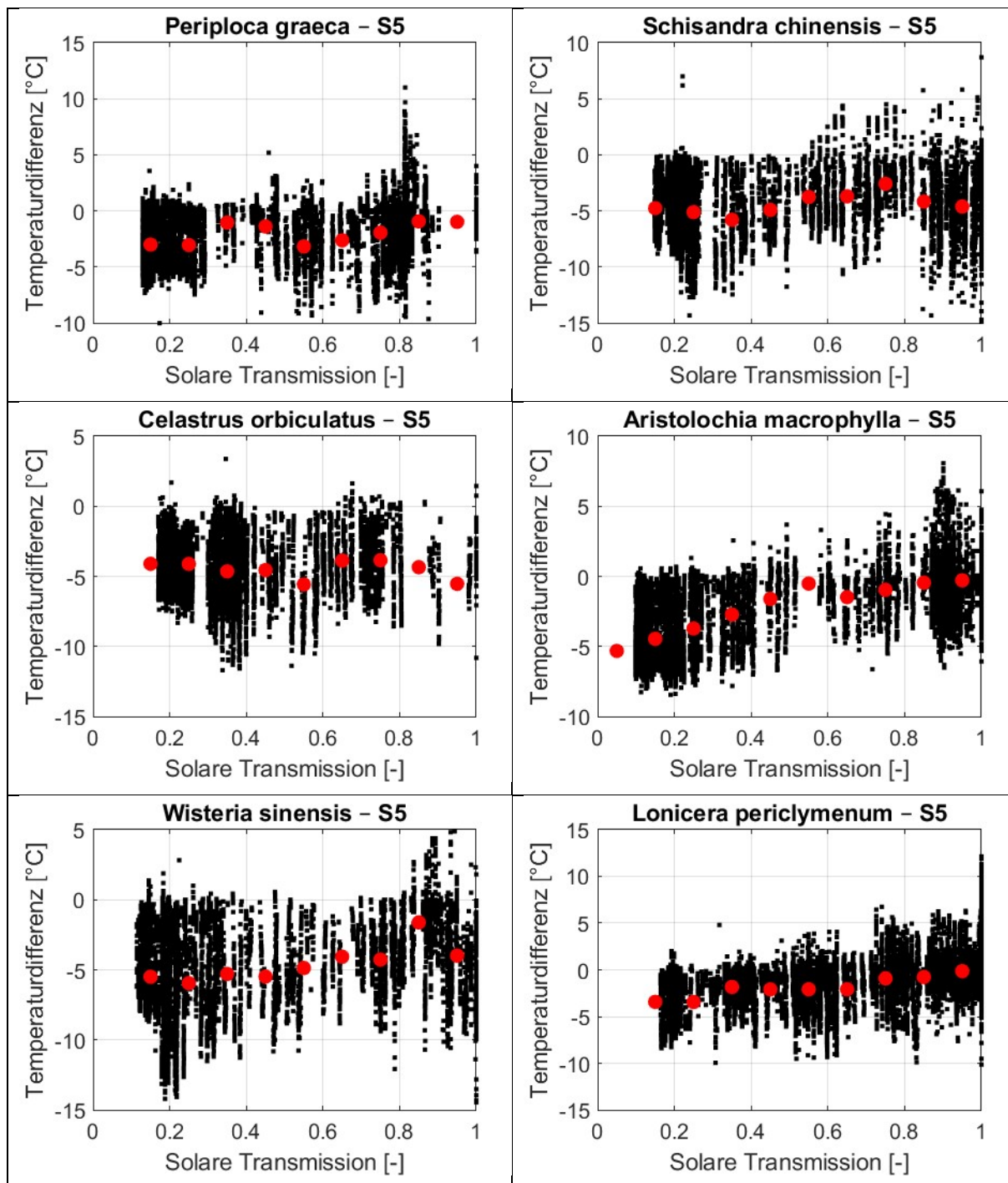


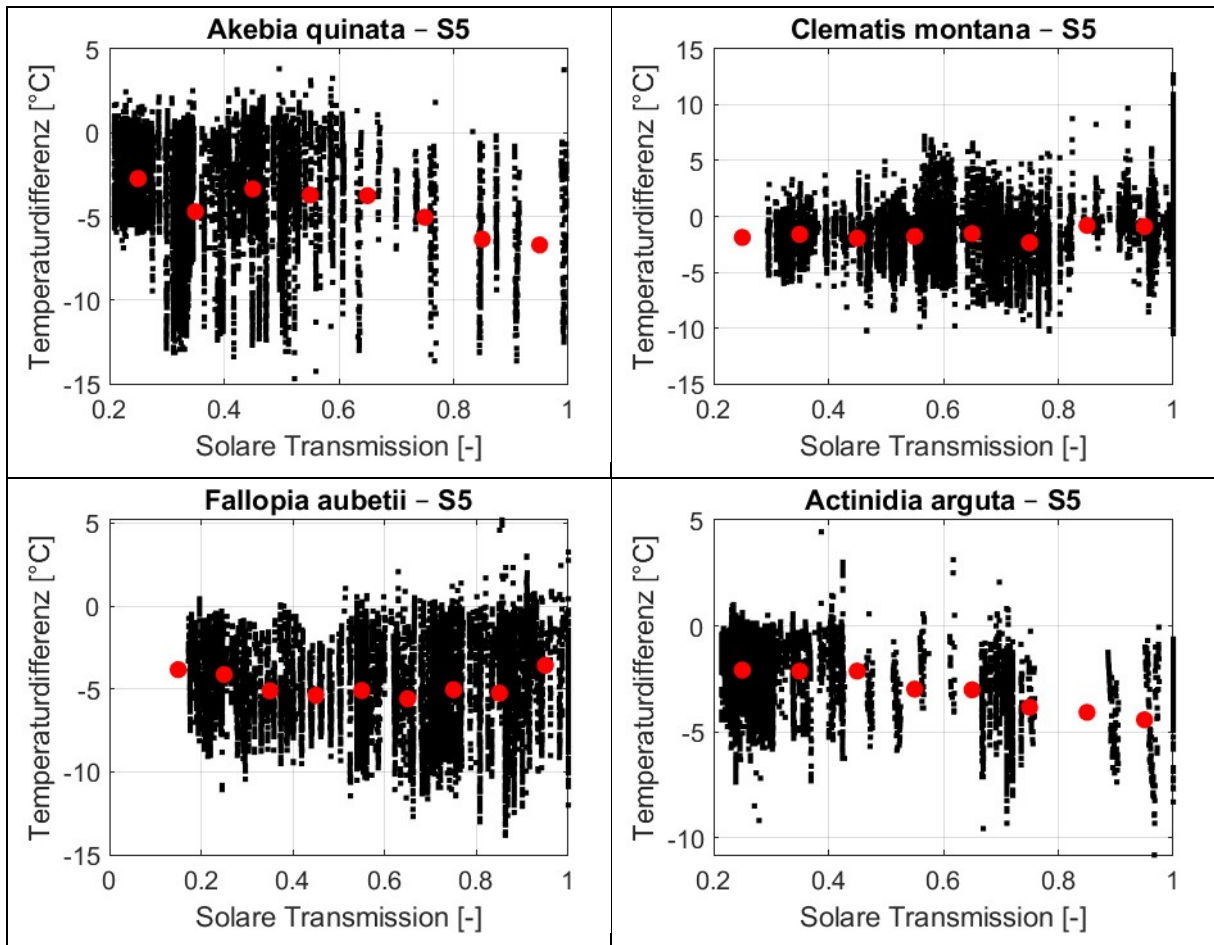


9 Anhang B: Diagramme Temperaturen

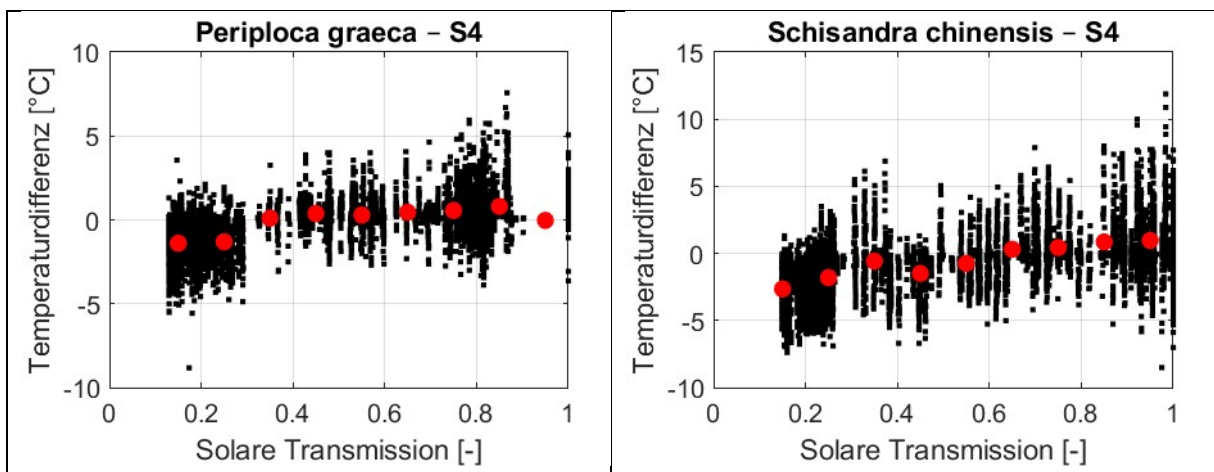
9.1 Transmission vs. Temperaturdifferenz zur Referenzmessung

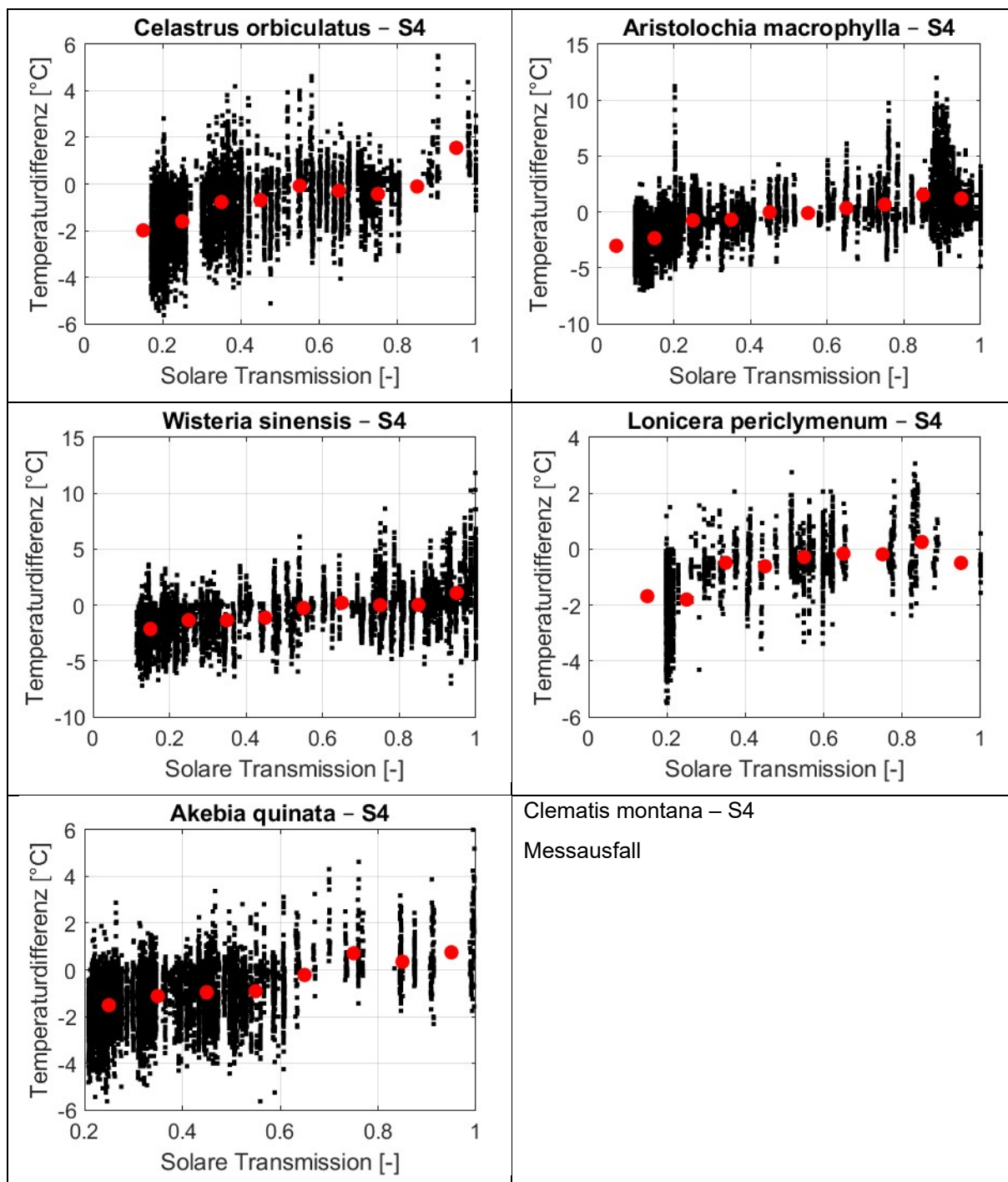
9.1.1 S5 – bei der Vegetation





9.1.2 S4 - zwischen Vegetation und Glasscheibe



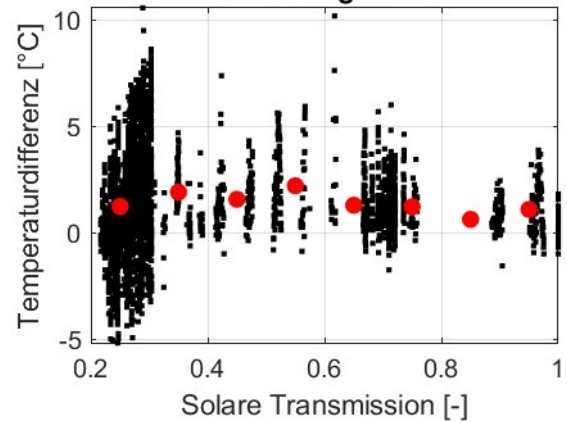




Fallopia aubettii – S4

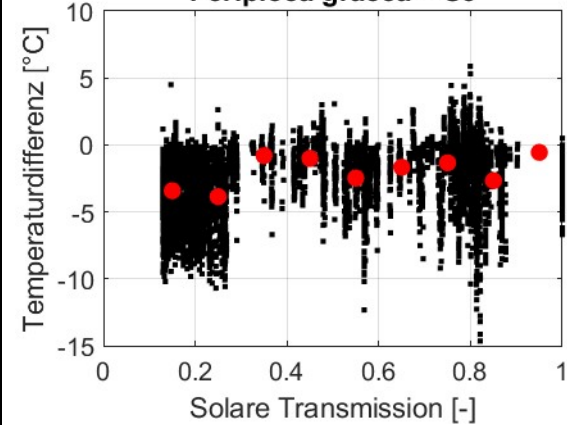
Messausfall

Actinidia arguta – S4

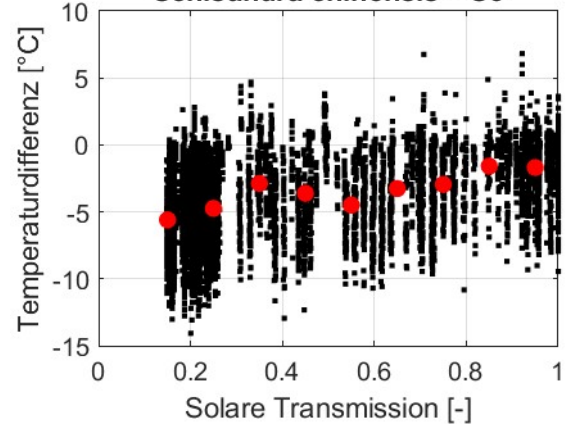


9.1.3 S3 - bei der Glasscheibe

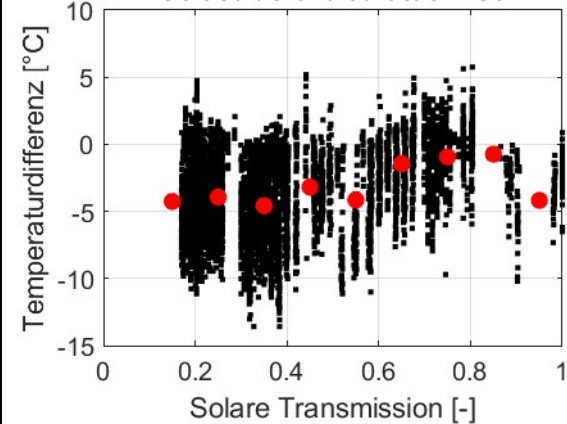
Periploca graeca – S3



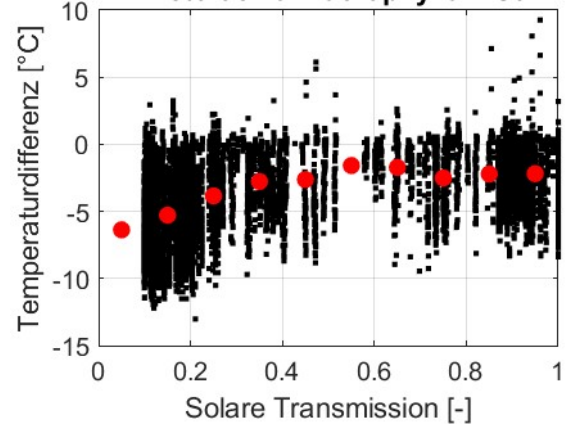
Schisandra chinensis – S3

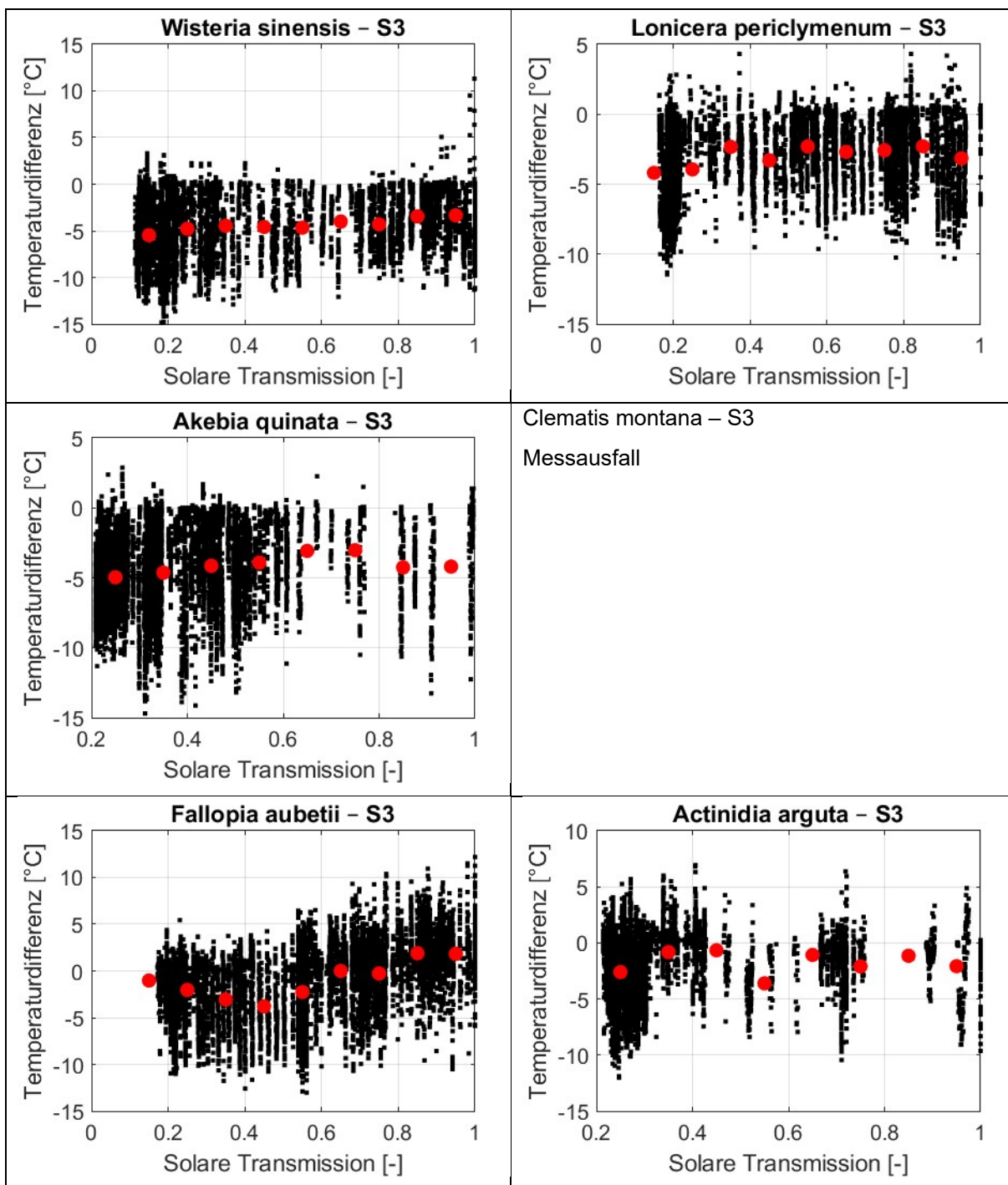


Celastrus orbiculatus – S3



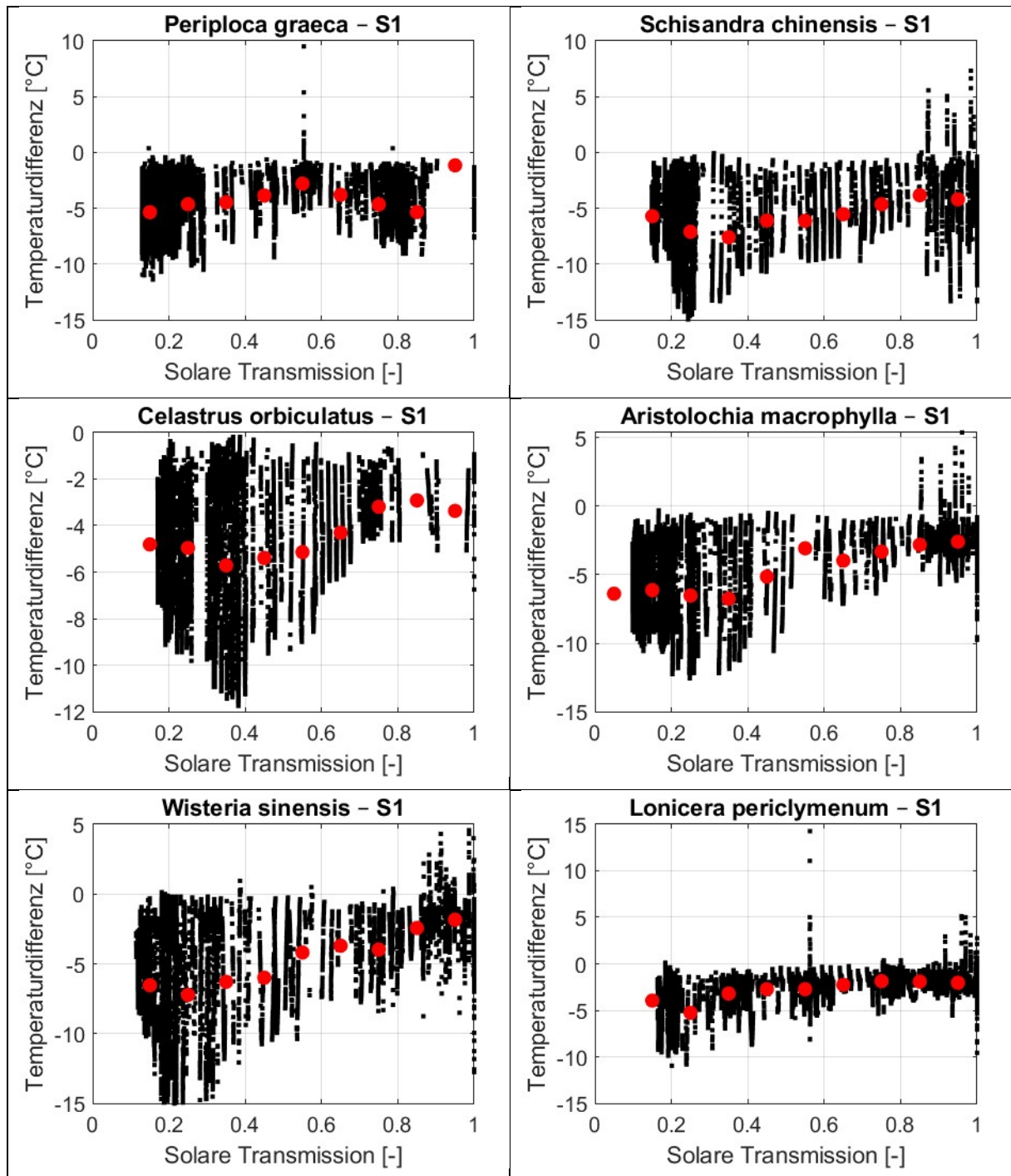
Aristolochia macrophylla – S3

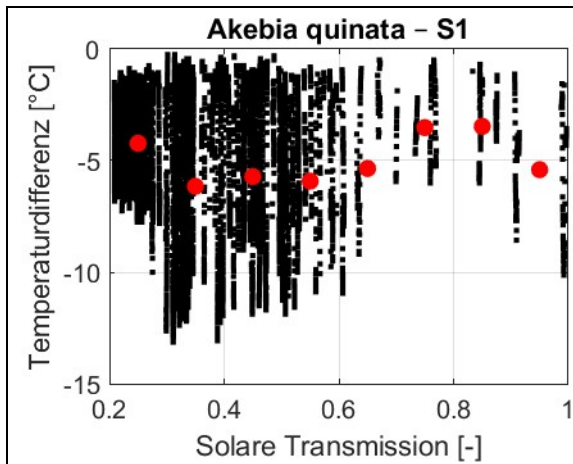






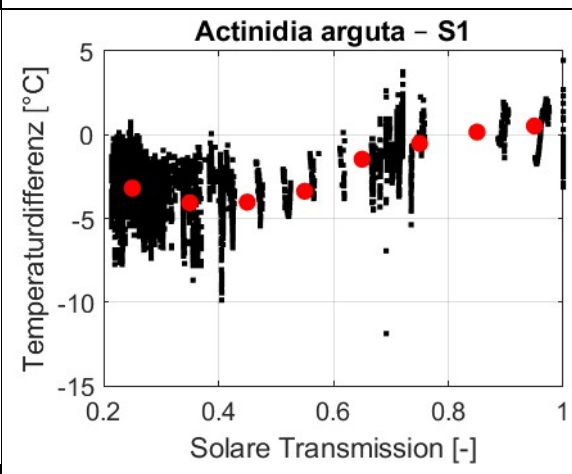
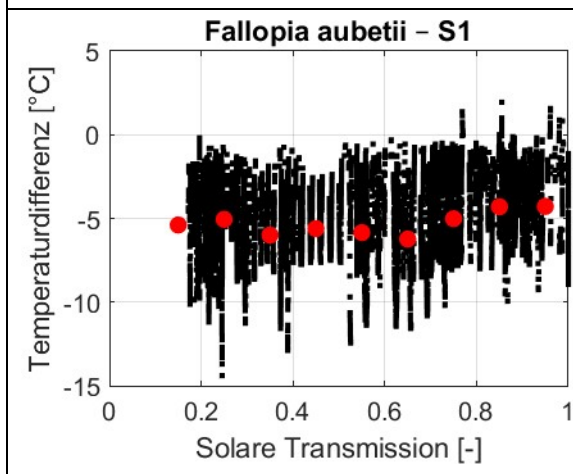
9.1.4 S1 – im Raum (Messbox)





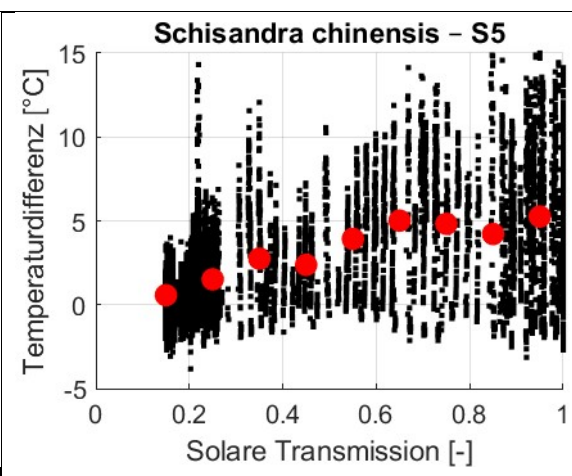
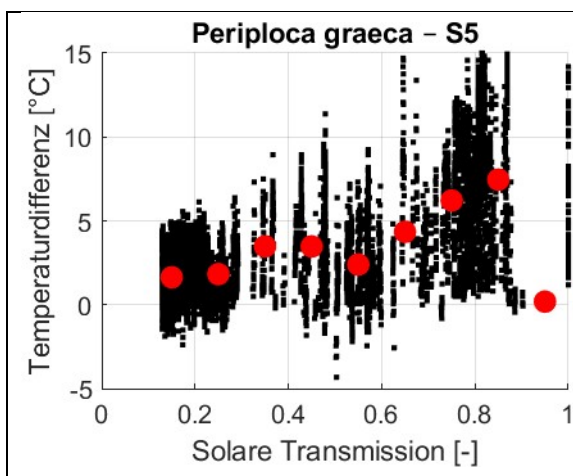
Clematis montana – S1

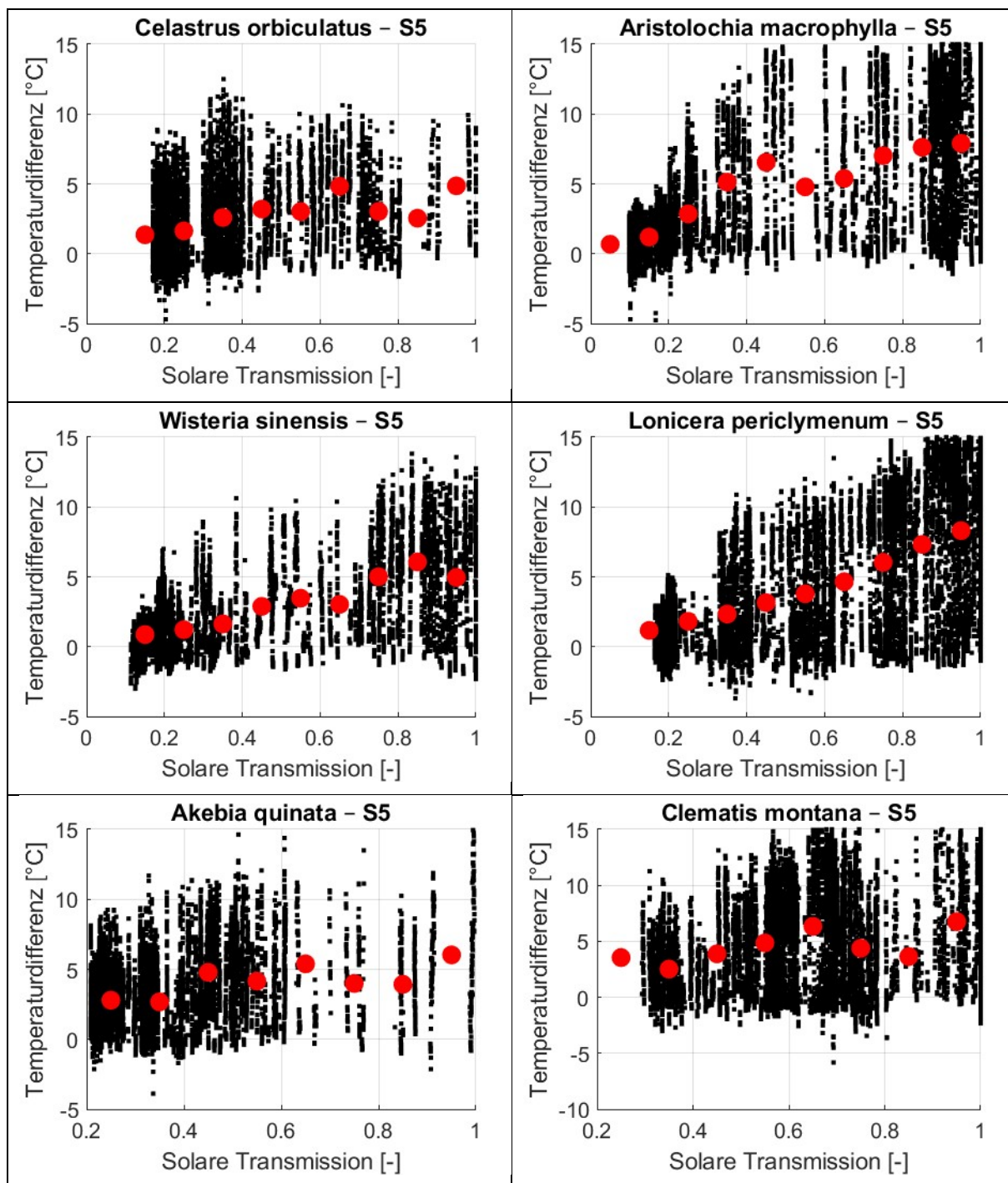
Messausfall

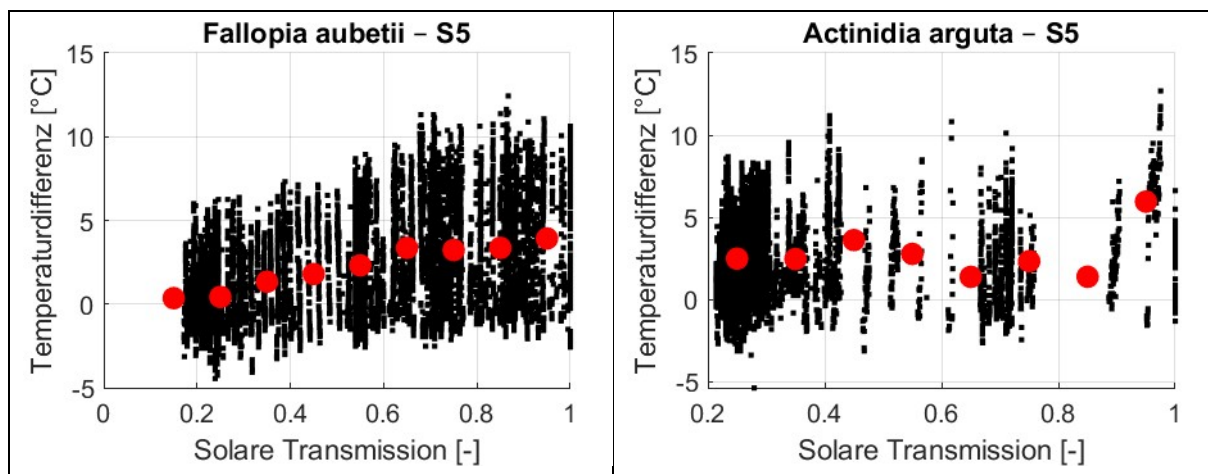


9.2 Transmission vs. Temperaturdifferenz zu Ambient

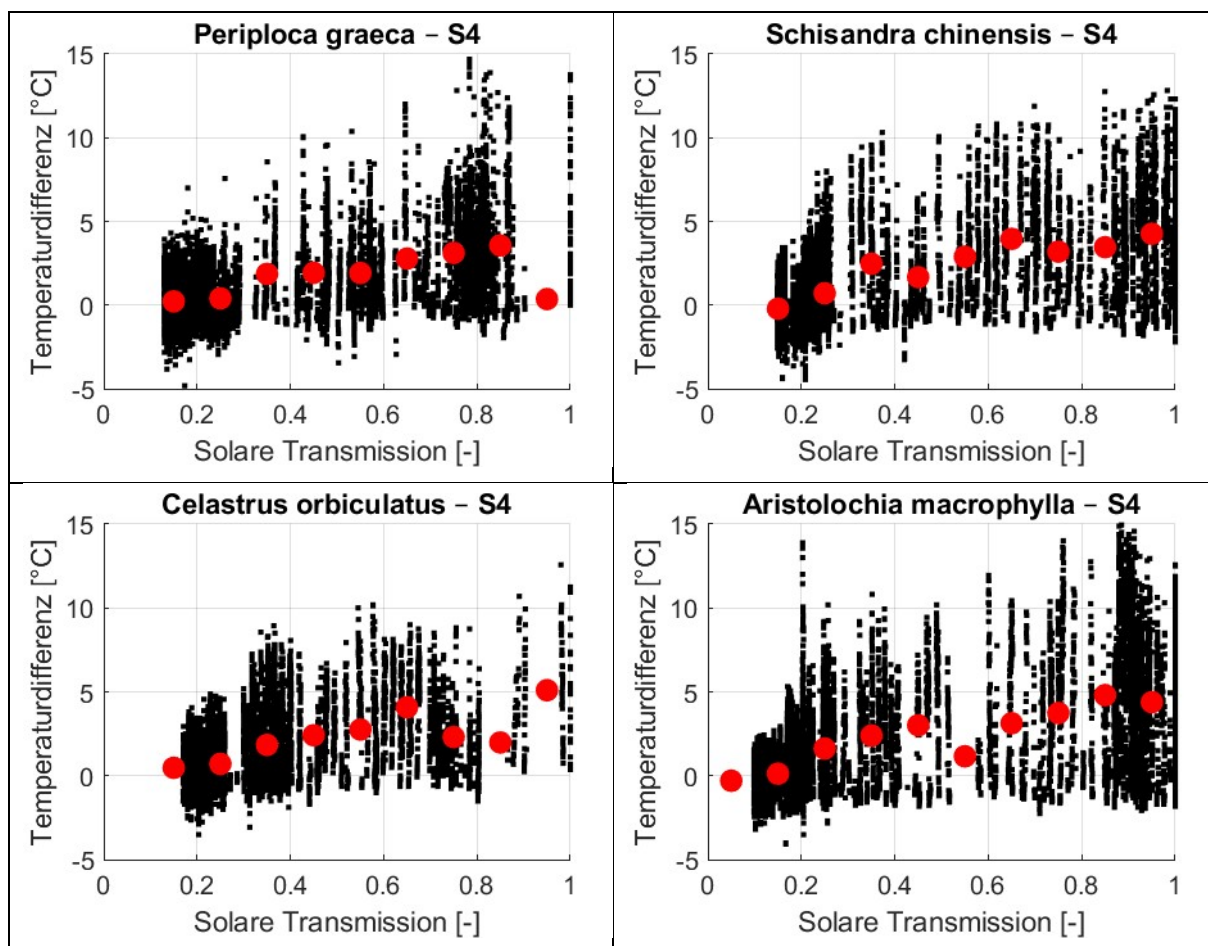
9.2.1 S5 – bei der Vegetation

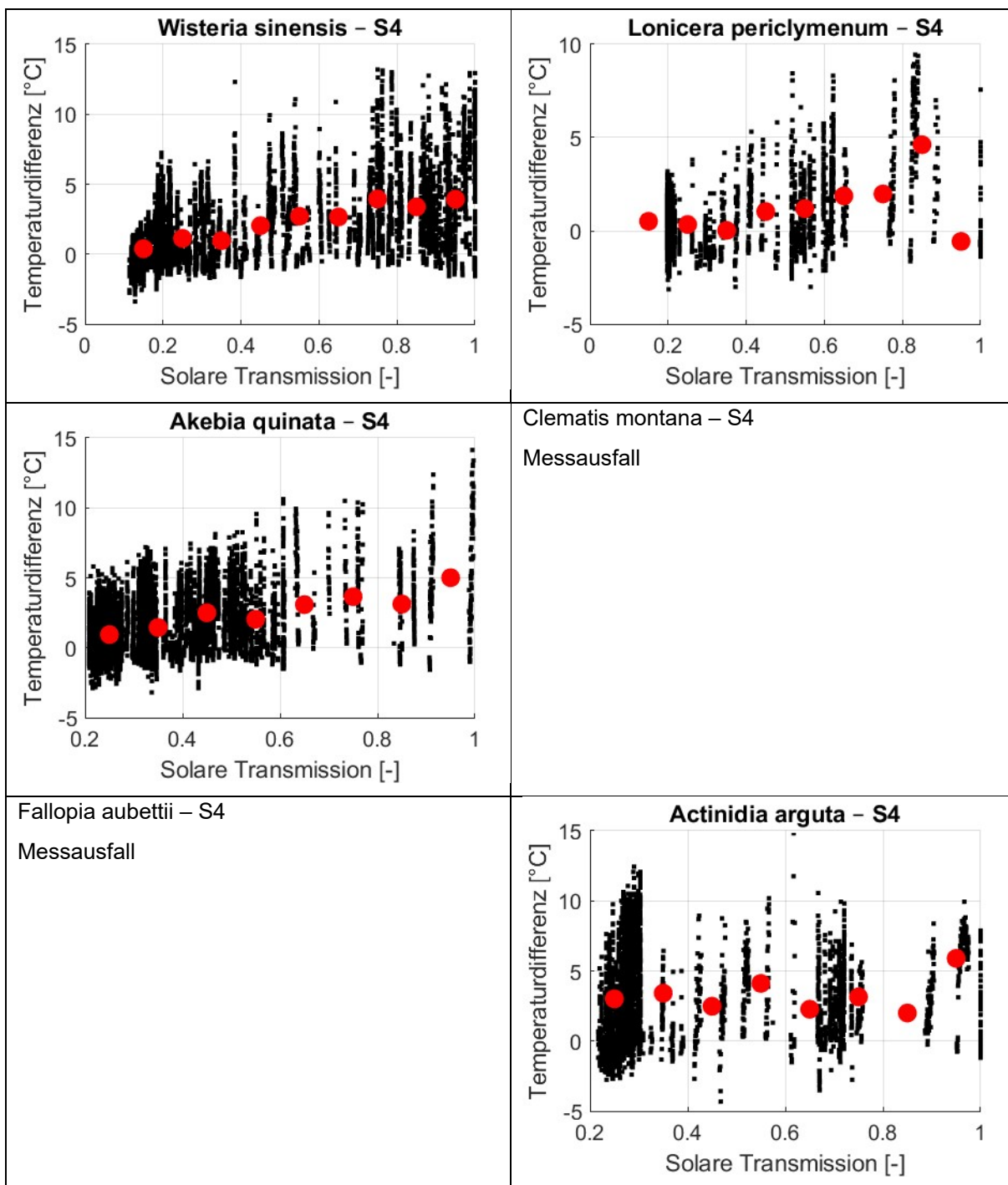






9.2.2 S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

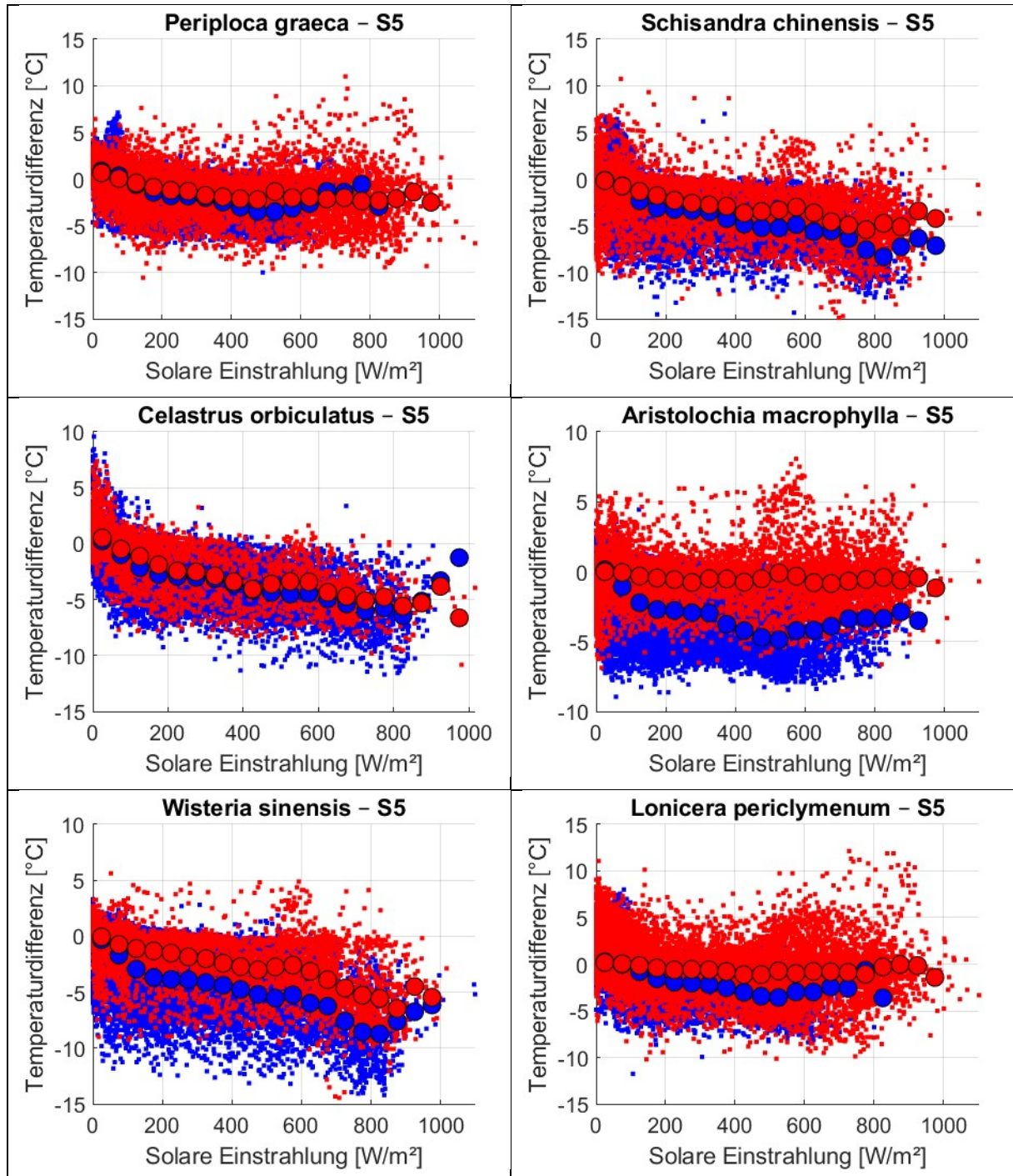


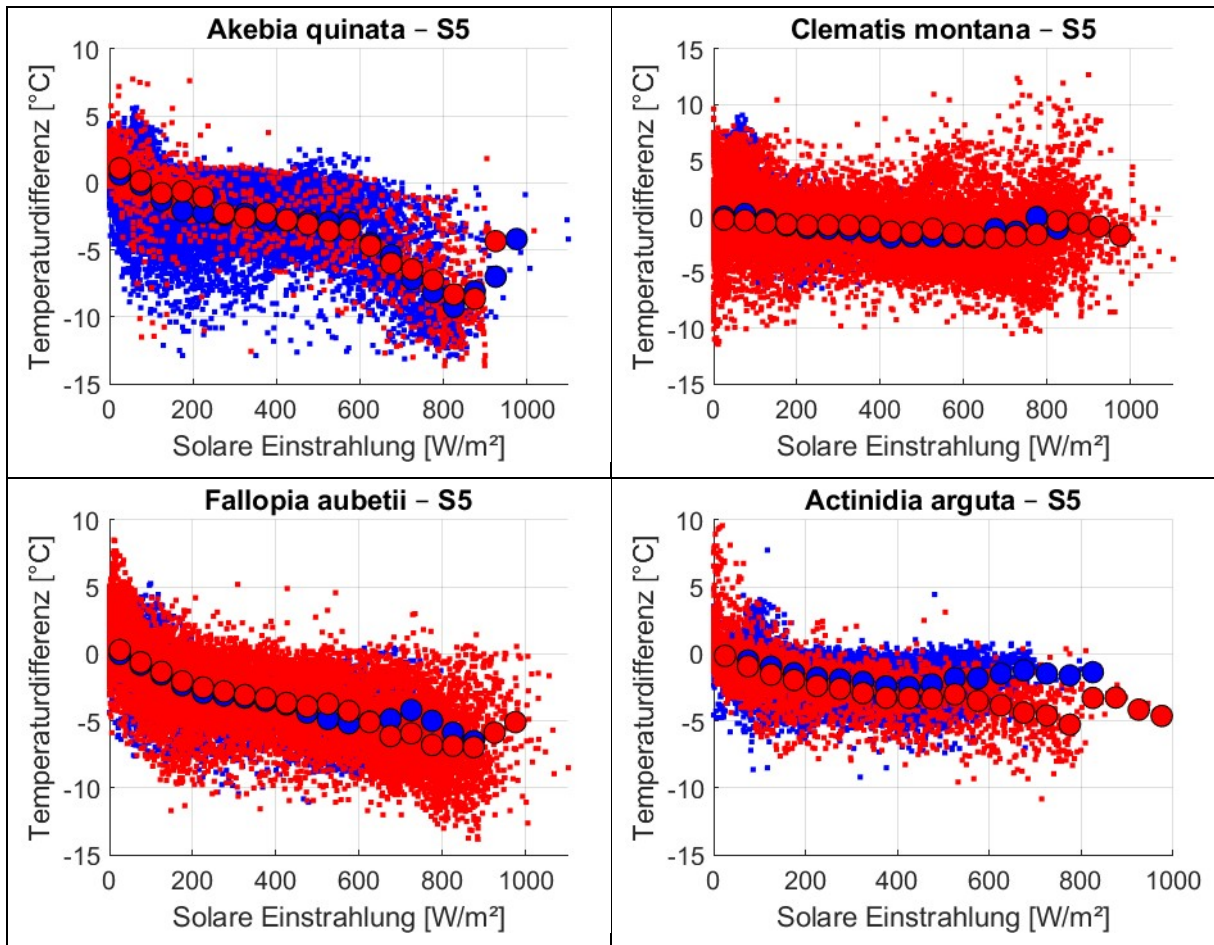




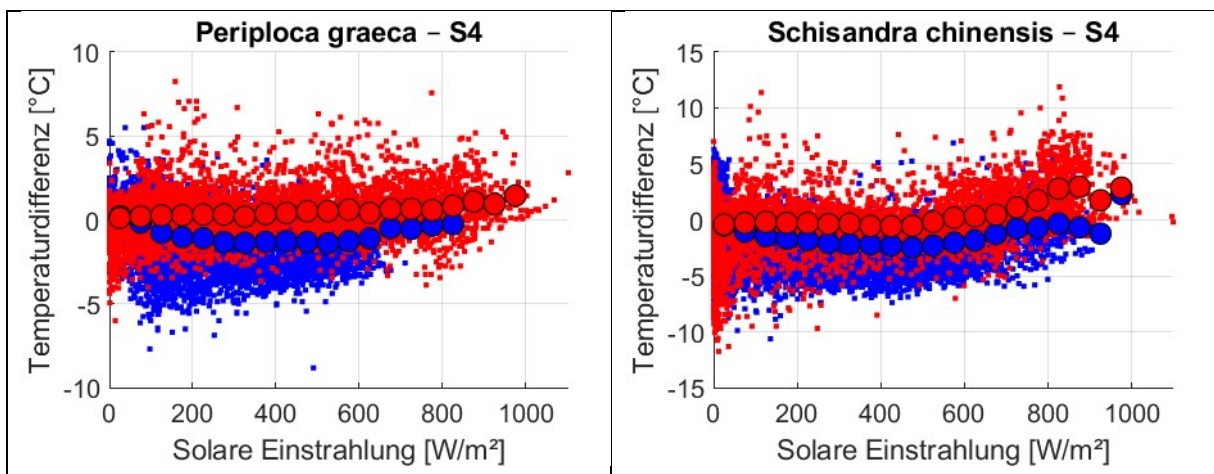
9.3 Solare Einstrahlung vs. Temperaturdifferenz zur Referenzmessung

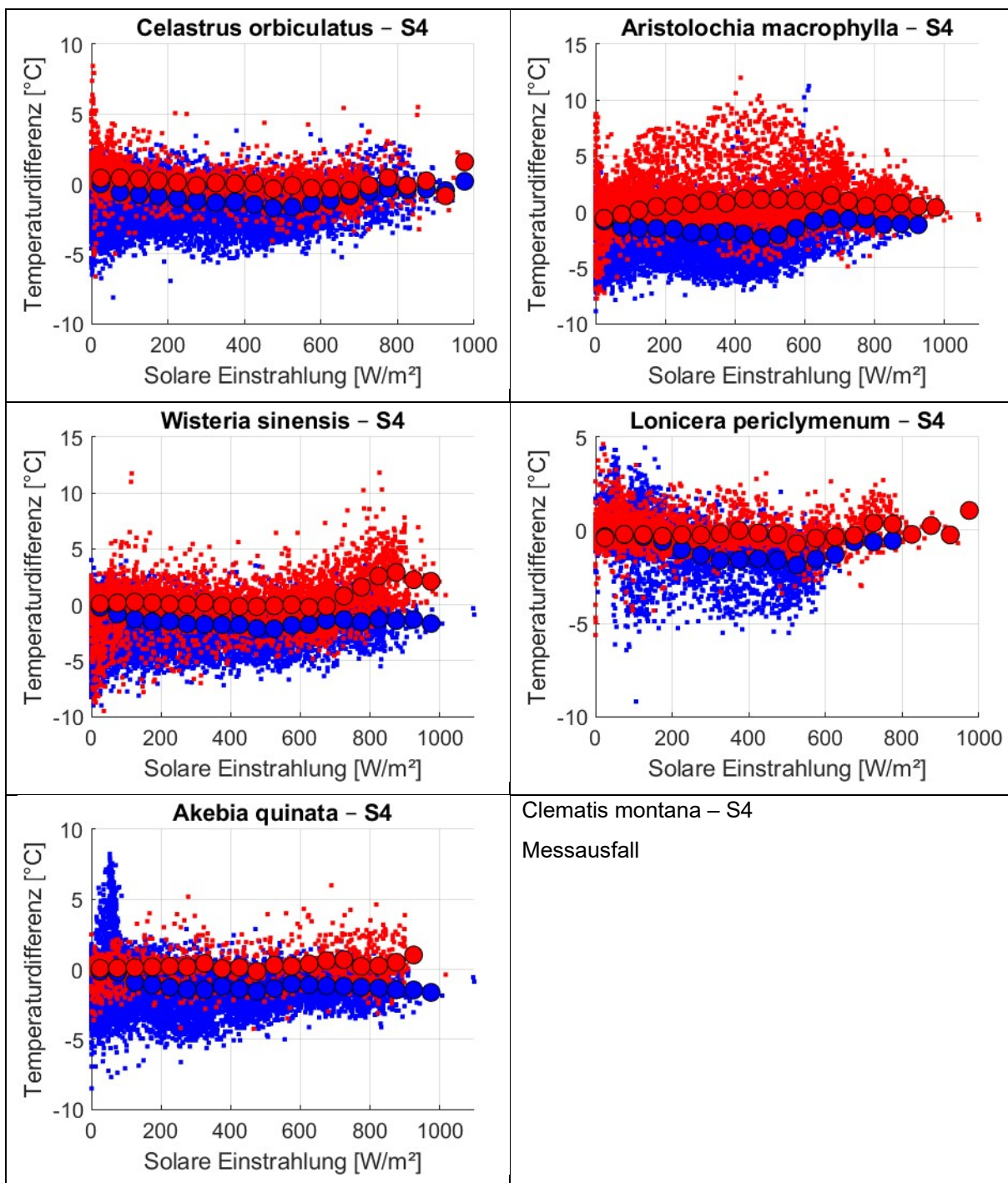
9.3.1 S5 – bei der Vegetation





9.3.2 S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

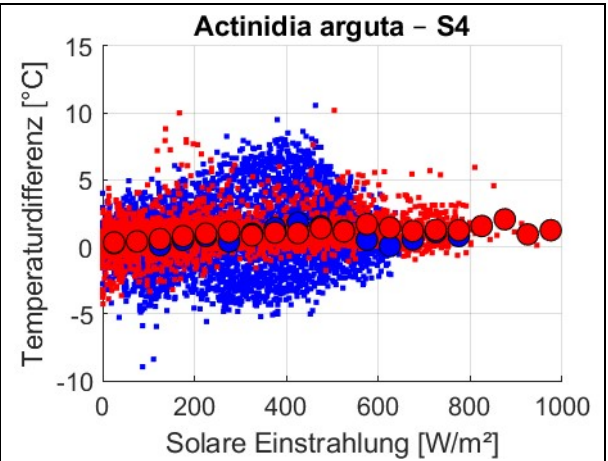




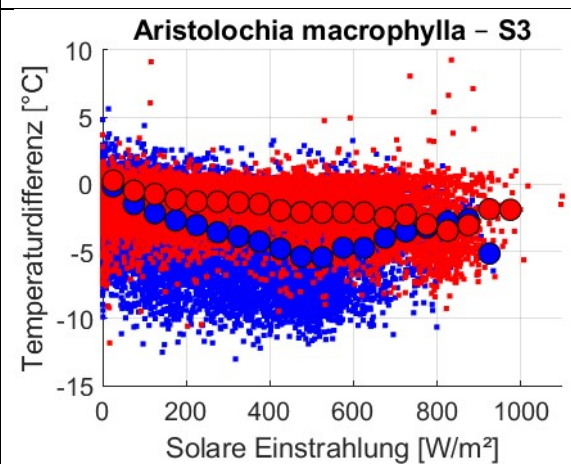
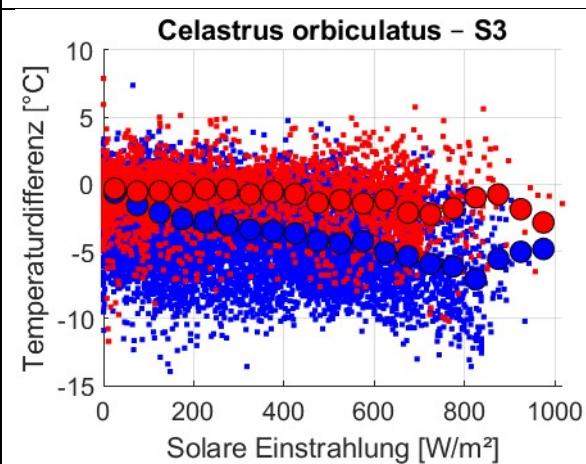
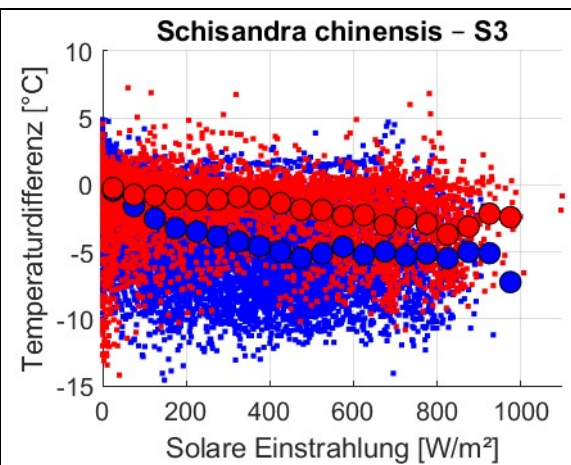
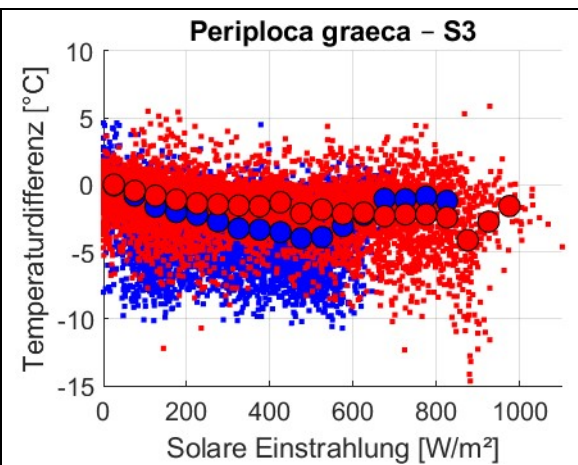


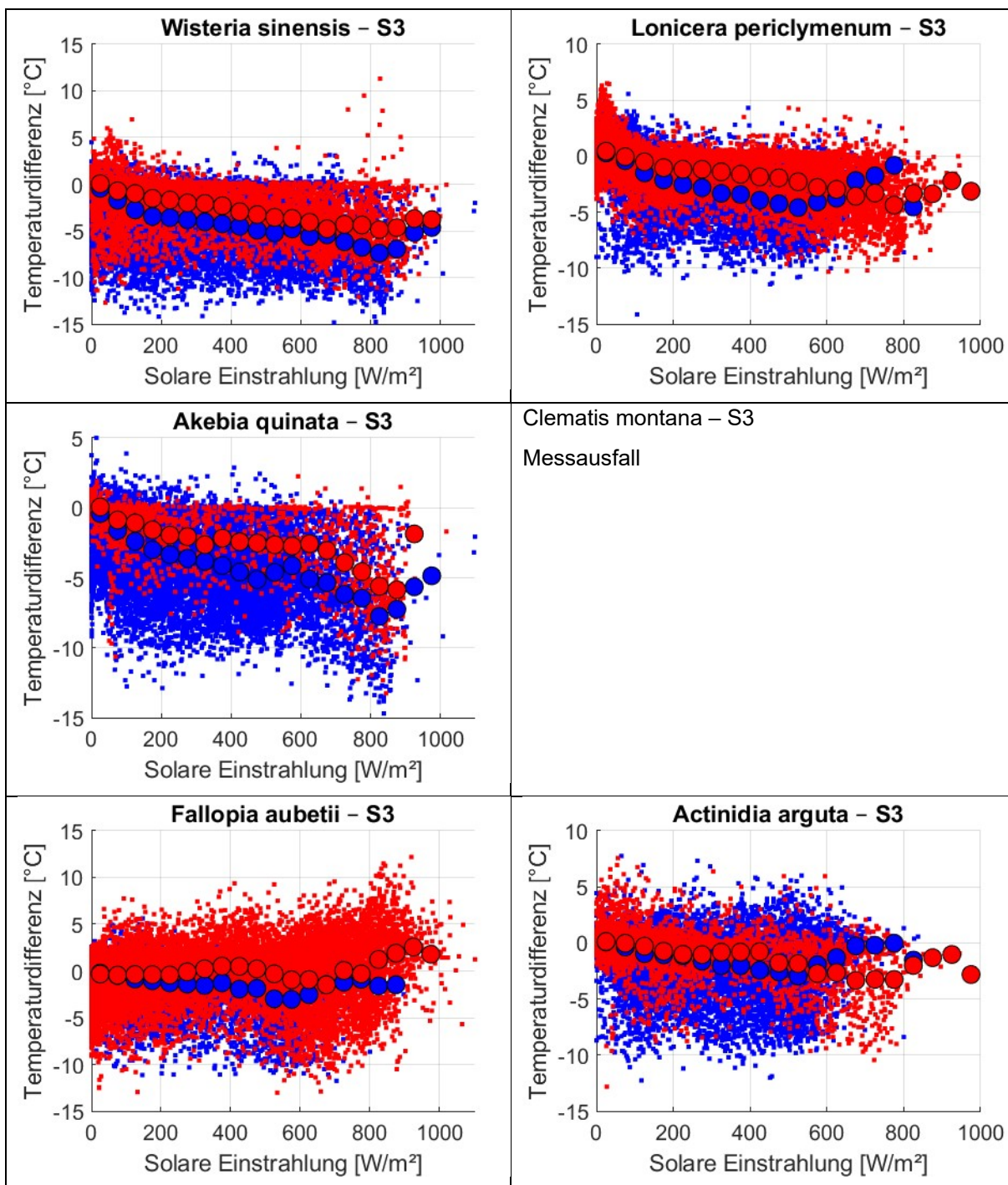
Fallopia aubettii – S4

Messausfall



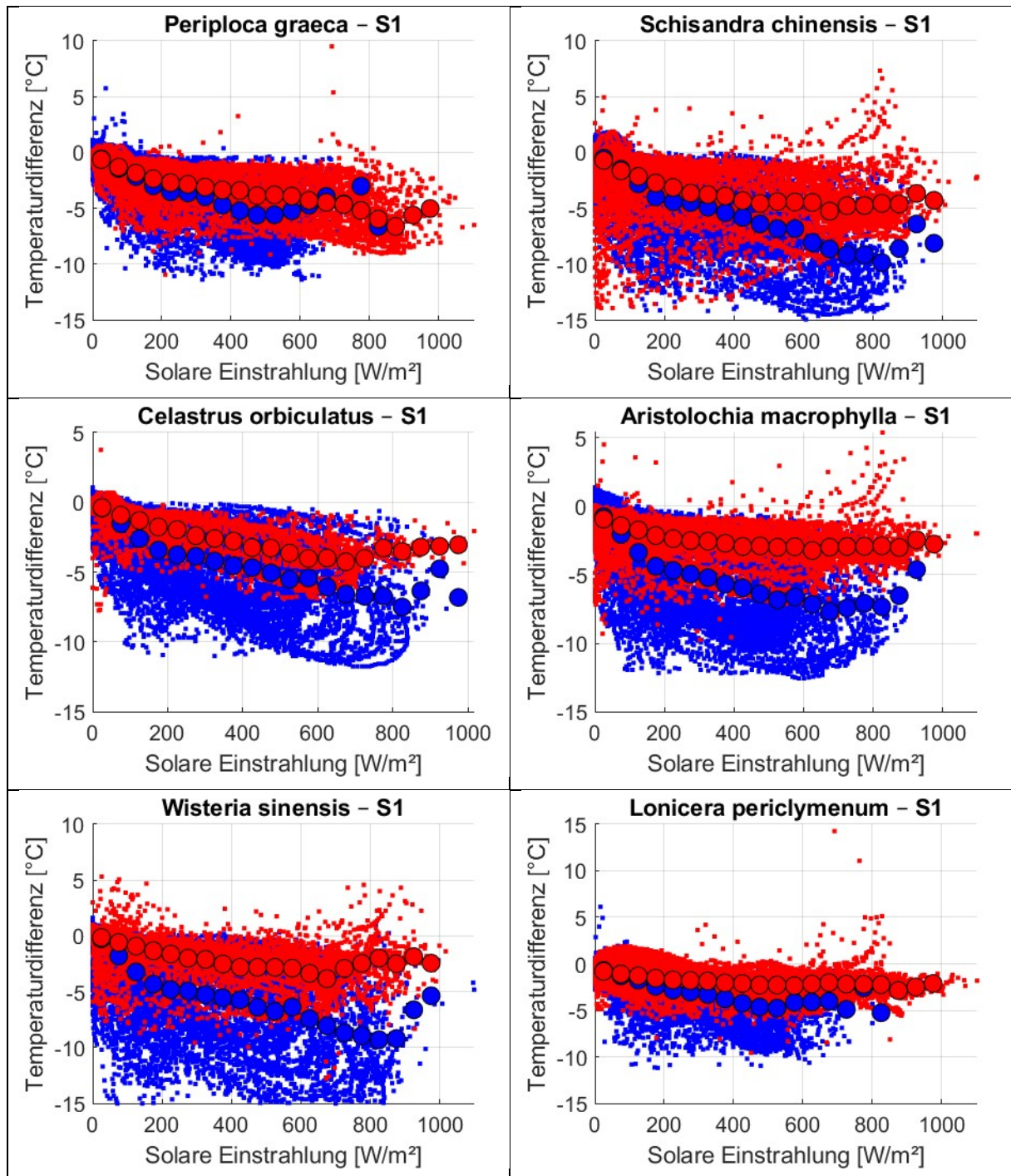
9.3.3 S3 – bei der Glasscheibe

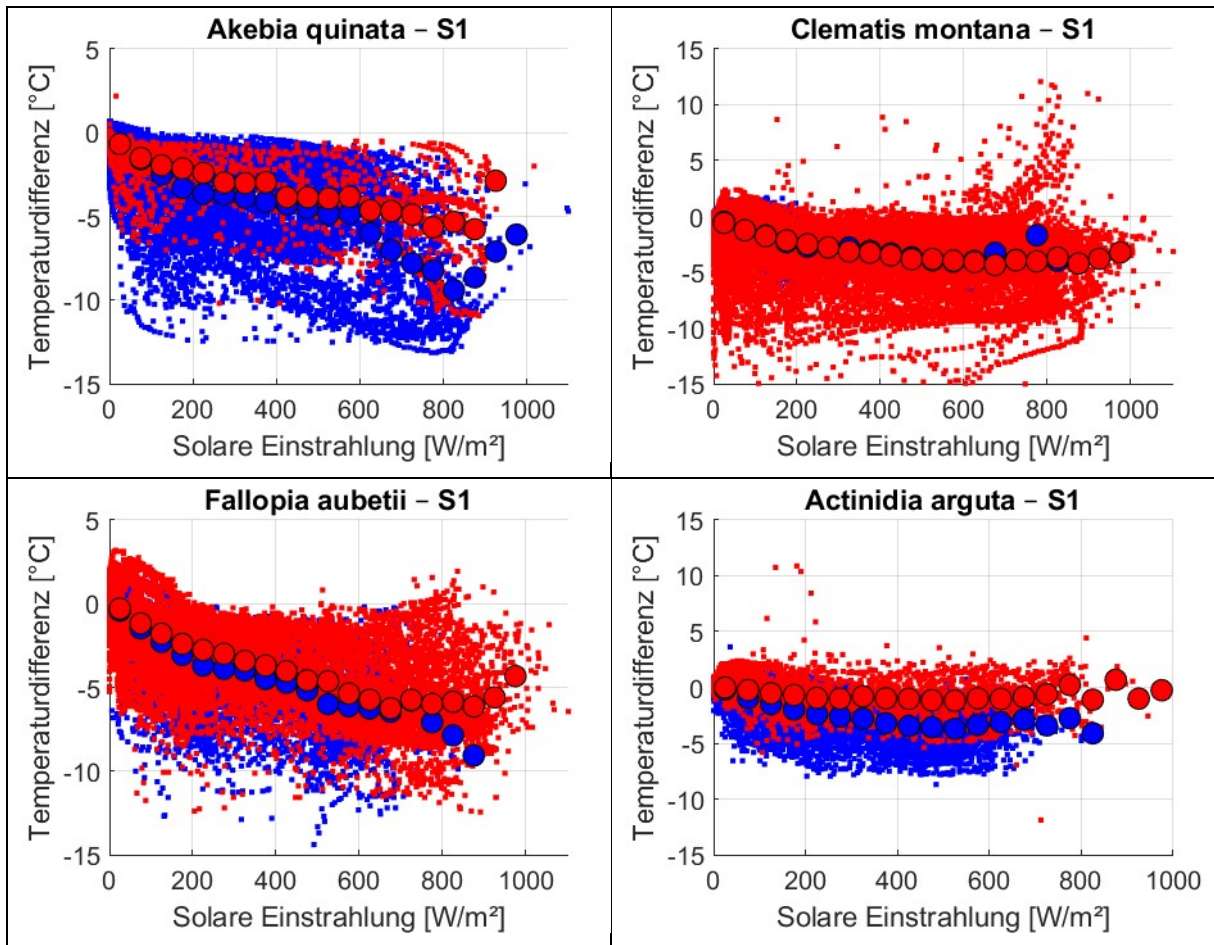






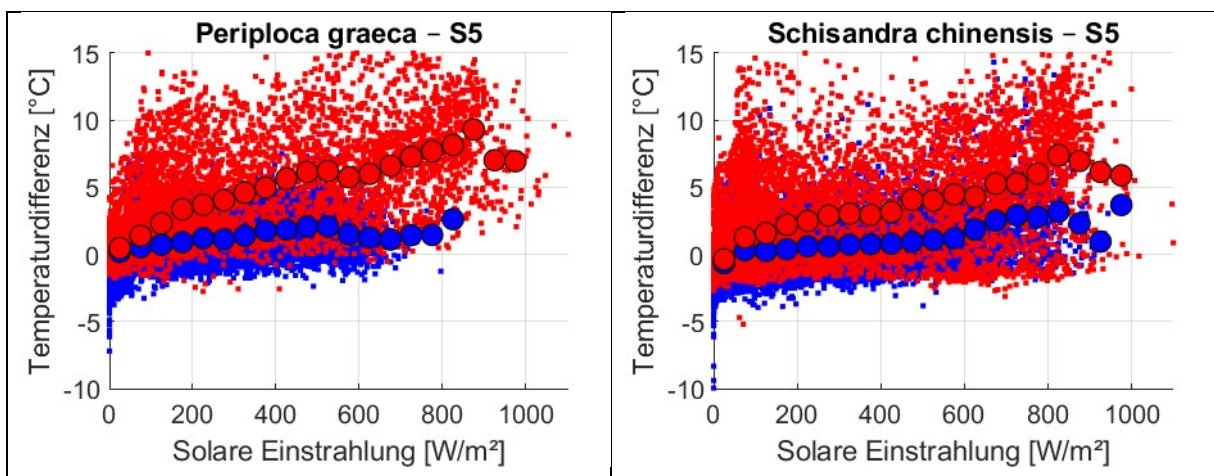
9.3.4 S1 – im Raum (Box)

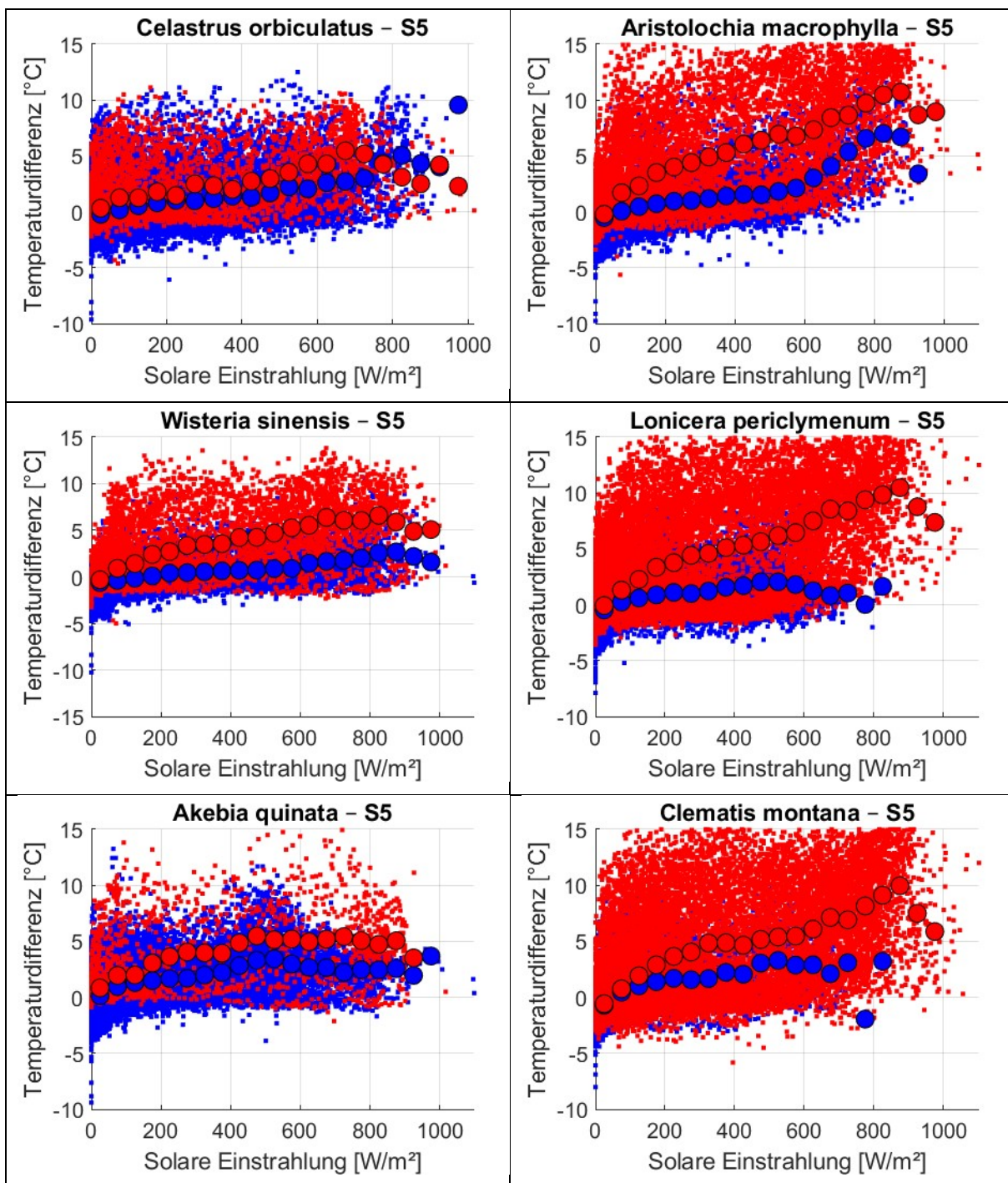


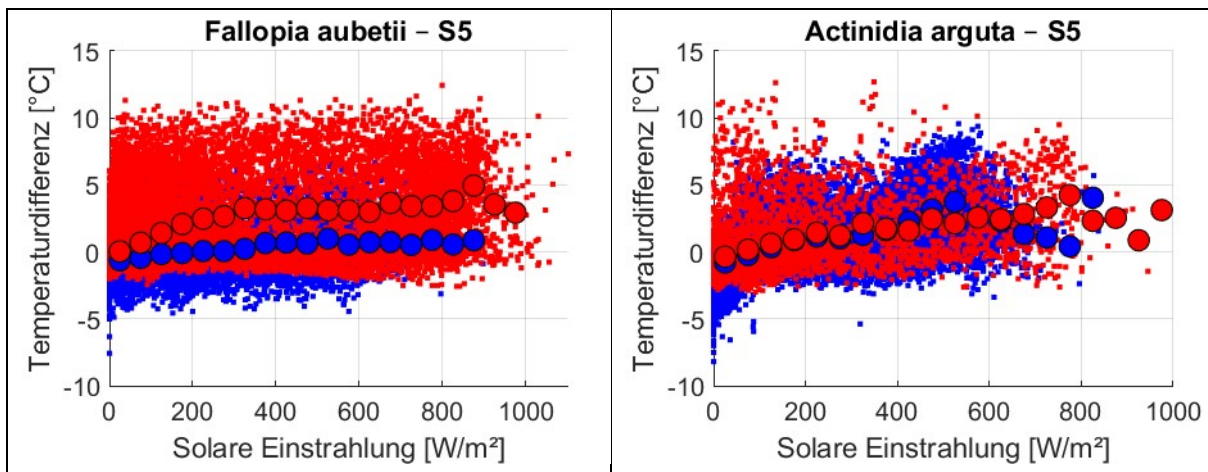


9.4 Solare Einstrahlung vs. Temperaturdifferenz zu Ambient

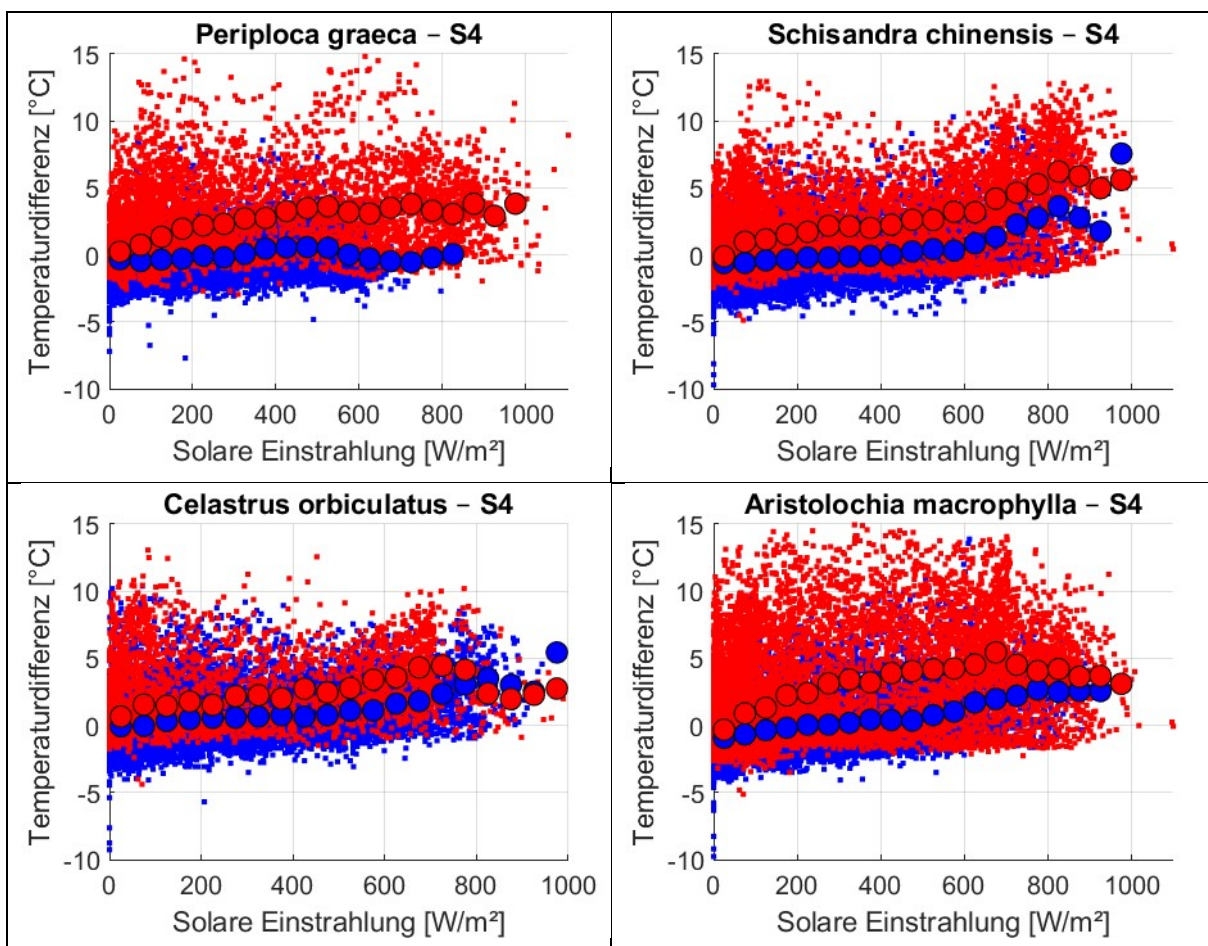
9.4.1 S5 – bei der Vegetation

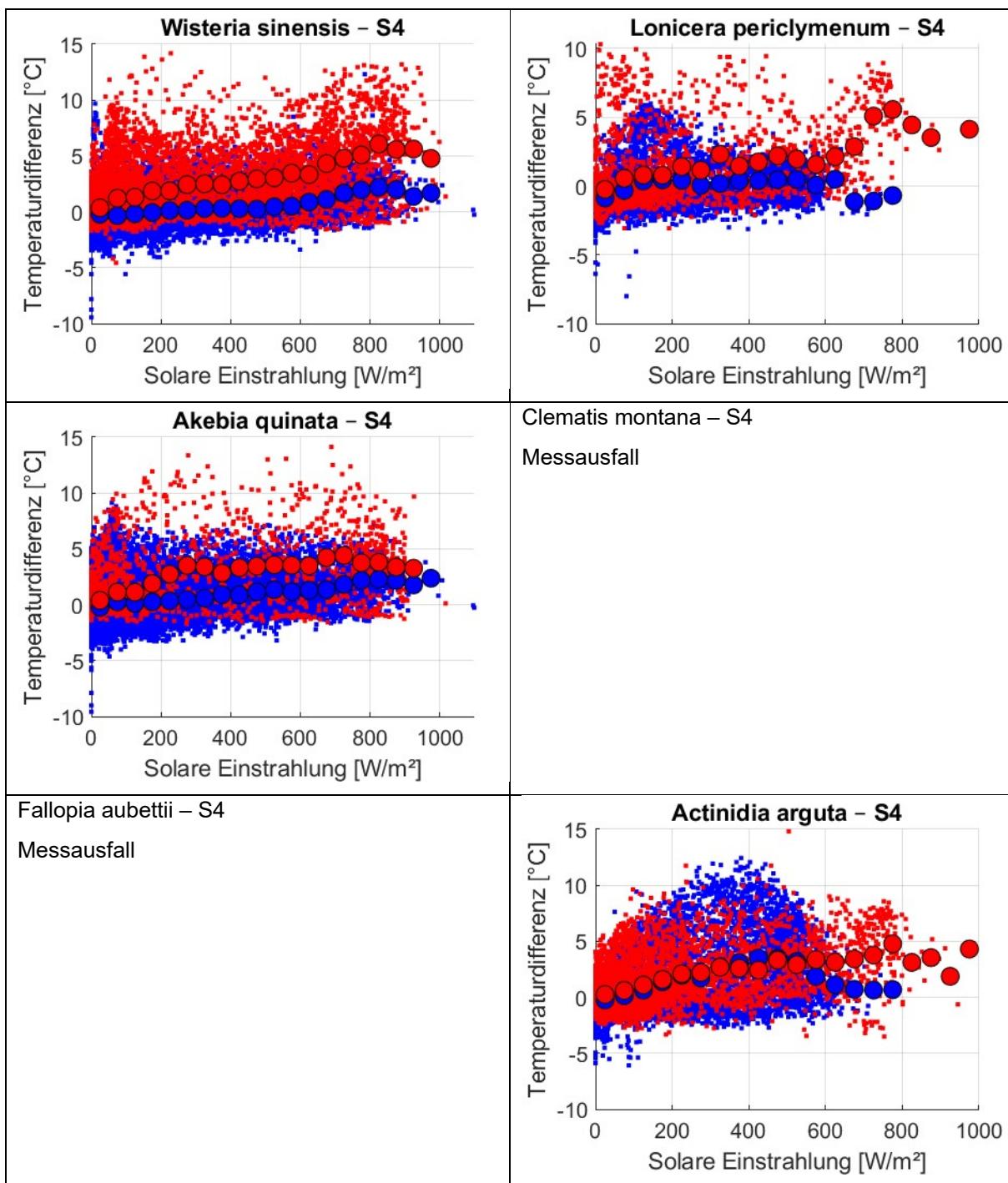






9.4.2 S4 – zwischen Vegetation und Glasscheibe

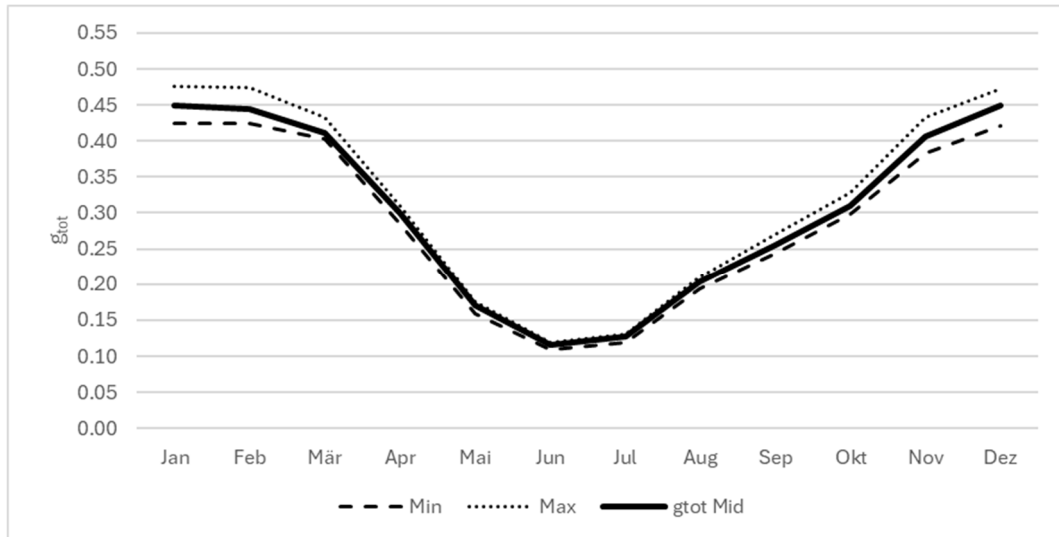




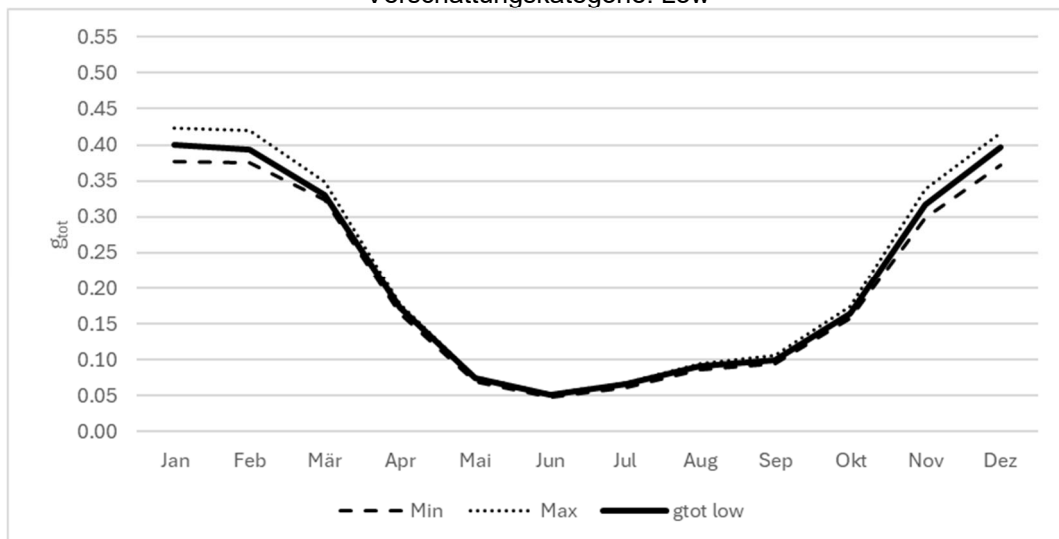


10 Anhang C: g_{tot} Werte für die verschiedenen Verschattungskategorien

Verschattungskategorie Mid:

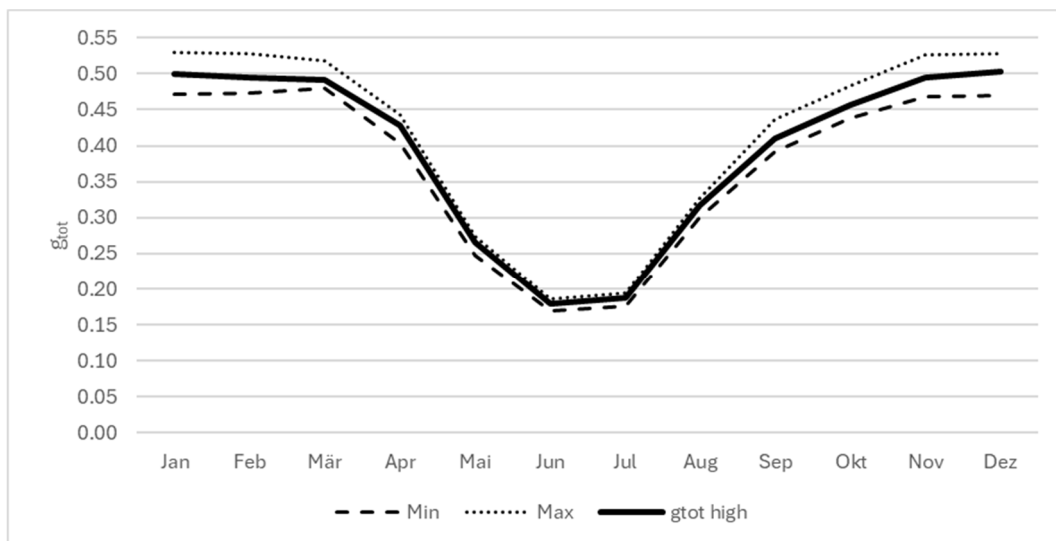


Verschattungskategorie: Low

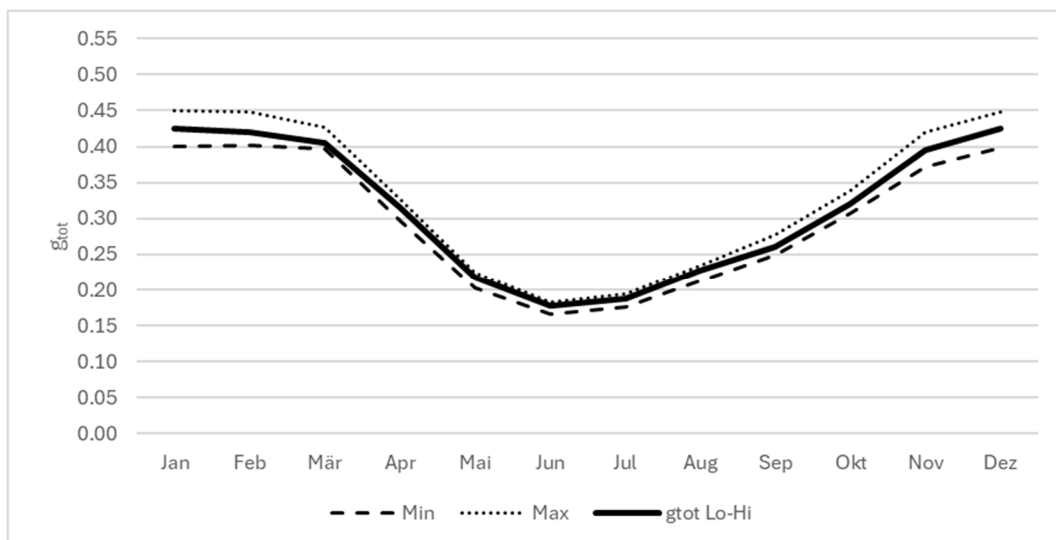




Verschattungskategorie: High



Verschattungskategorie: Lo-Hi





Verschattungskategorie Hi-Lo:

