

Photovoltaik und wandgebundene Begrünung – Welche Auswirkungen hat eine wandgebundene Begrünung in Form einer Moosmatte auf ein Photovoltaikmodul?

„PVMoss“ - Bau, Errichtung und Inbetriebnahme eines Messstandes

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Bachelor of Science

Vorgelegt von: Matteo Gibb
Bastianstraße 21
13357 Berlin

Studiengang: Architektur
Matrikelnummer 33345635

Erstgutachter*in: Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard
Zweitgutachter*in: M.Sc. Frederik Ecke

Datum: 29.08.2023

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
1. Einleitung	1
2. Grundlagen	2
2.1 Gebäudebegrünung	2
2.2 Fassadenbegrünung	3
2.2 Synergieeffekte von PV und Gebäudebegrünung	3
2.3 Rückblick: Entwurfliche Konsequenz – „SolarArchitecture 2.0“	4
3. „PVMoss“ – Ein Messstand zur vertikalen Kombination von PV und Moosmatten	5
3.1 Versuch	5
3.2 Versuchsaufbau	8
3.2.1 Materialien	10
3.2.2 Monitoring und Metering	12
3.2.3 Bewässerung	13
3.2.4 Fertigung und Wartung der Anlage	14
3.3 Durchführung der Messung	14
3.3.1 Analyse der Daten	14
3.3.2 Messprotokoll	15
4. Auswertung	15
4.1 Ergebnisse	16
4.1.1 Temperatur von Moos und Kaschierung	16
4.1.2 PV-Modultemperaturen	19
4.1.3 Energieerträge	19
5. Fazit	21
6. Ausblick	22
7. Literaturverzeichnis	24
8. Abbildungsverzeichnis	25
9. Anhang	26
9.1 Planzeichnungen	26
9.2 Diagramme – Wochenübersicht	27
9.3 Messprotokoll	28
9.4 Datensätze	29

Danksagung

Den inhaltlichen Ausführungen dieser Arbeit voran ein paar Worte an alle, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben. Ich möchte mich hiermit für die große Unterstützung bedanken.

Zuerst ist hier das Helmholtz-Zentrum für Materialien und Energie GmbH für die Finanzierung des Materials und die Bereitstellungen von messtechnischen und personellen Ressourcen zu erwähnen.

Im Besonderen möchte ich mich bei Maximilian Riedel bedanken, der mich mit viel Geduld und Hilfsbereitschaft an vielen Stellen unterstützt hat. Sowohl bei der Hilfe beim Bestellen der Materialien, beim Errichten und Anschließen des Messstandes, als auch bei der Analyse und Interpretation der Messergebnisse. Ebenfalls Dank an Niklas Albinus, der in Debatten um Ergebnisse und deren Analyse zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ebenfalls möchte ich mich bei Dr. Carolin T. Ulbrich und Dr. Björn Rau für das Vertrauen in die im Exposé formulierte These und die Zusage der finanziellen Mittel zur Durchführung bedanken.

Weiterhin Dank an die Kommiliton*innen und Betreuer*innen der Universität Kassel für die Betreuung dieser Arbeit.

Ohne Euch hätte ich folgende Arbeit nicht anfertigen können.

1. Einleitung

Die Folgen des Klimawandels sind im Jahr 2023 nicht von der Hand zu weisen. Nach Becker (2006) und Kahraman et al. (2021) nehmen Starkregenereignisse und Hitzewellen seit dem Wechsel ins neue Jahrtausend stark zu. Tendenz steigend. Es gilt Maßnahmen gegen Ursache des Klimawandels zu ergreifen und Strategien zur Anpassung zu entwickeln. Im architektonischen Kontext existieren bereits Lösungen, die nachgewiesenermaßen zur Reduzierung der Emissionen, umweltfreundlicheren Stromproduktion und Entsiegelung von Stadtraum beitragen. Die Rede ist von Bauwerksbegrünung und Photovoltaik. Über eine Kombination der beiden Technologien können Synergieeffekte freigeschaltet werden, die vorteilhaft sind. Während Solargründächer bereits seit Längerem zum Stand der Technik gehören, befinden sich begrünte Solarfassaden weitgehend im Forschungsstadium.

Einen Beitrag zu Forschung an begrünten Solarfassaden soll diese Arbeit liefern. Es wird ein Messstand geplant und gebaut, der die vertikale Kombination eines Photovoltaikmoduls mit einer Moosmatte ermöglicht. Eine Referenzkonstruktion soll eine Vergleichbarkeit mit herkömmlichen Solarfassaden herstellen. Nach der Errichtung werden an verschiedenen Stellen Temperaturen gemessen und die Erträge der beiden Module erfasst.

Die Ergebnisse eines beispielhaften Messzeitraums von 10 Tagen sollen eine Formulierung von ersten Eindrücken und Vermutungen ermöglichen, inwiefern eine wandgebundene Begrünung in Form von Moos Einfluss auf ein davor platziertes Photovoltaikmodul hat. Weiterhin können erste Beobachtungen zum Verhalten der Moospflanzen gemacht werden.

2. Grundlagen

Im Folgenden soll der Kontext des Hauptteils dieser Arbeit, der Solarmessung, dargestellt werden. Zunächst wird ein Überblick über die Thematik der Gebäudebegrünung gegeben. Neben der Dachbegrünung wird die Fassadenbegrünung vielerorts erfolgreich umgesetzt. Beide Formen der Gebäudebegrünung ermöglichen die Nutzung der Gebäudehülle für mehr als nur die Abgrenzung zu Umwelteinflüssen. Sie erlauben ein Verschmelzen eines Bauwerks mit der Umwelt, nicht nur optisch in das „Außen“, sondern auf physikalischer und energetischer Ebene in das „Innen“. Wird eine Gebäudebegrünung mit einer Photovoltaikanlage kombiniert, entstehen vorteilhafte Synergieeffekte. Diese werden bereits genutzt und unter anderem in einem Forschungsprojekt der TH Nürnberg erforscht. Bereits im Jahr 2021 wird in dem Projekt „SolarArchitecture 2.0“ am Fachgebiet „BAU KUNST ERFINDEN“ der Universität Kassel ein Entwurf präsentiert, der Fassadenbegrünung in Form von Moos und Photovoltaik kombiniert. Offene Fragen bezüglich des Verhaltens der Pflanzen auf die Kombination mit einer Photovoltaikanlage inspirieren diese Abschlussarbeit.

2.1 Gebäudebegrünung

Die Begrünung eines Gebäudes kann sowohl auf dem Dach, als auch an der Fassade stattfinden. Dachbegrünung wird zumeist zwischen extensiver Begrünung, einfacher Intensivbegrünung und Intensivbegrünung differenziert. Die Substrattiefen reichen von 5 – 200 cm und lassen eine Bepflanzung von Moosen, Sedum, Kräutern, Zwiebeln- und Knollenpflanzen bis hin zu Stauden, Gräsern, Blumenzwiebeln, Sommerblumen, Gehölzen Bäumen sowie Rasenflächen zu (vgl. Mann 2012, Kolb 20216, FLL 2018). Eine bepflanzte Gebäudehülle kann bis zu 25 – 30°C weniger Oberflächentemperatur im Vergleich zu herkömmlichen Dach- und Fassadenbelägen führen (vgl. Pfoser et al. 2013, Kolb 2016). Weiterhin bietet Gebäudebegrünung einen reduzierten Transmissionswärmeverlust, der in hochverdichteten Innenstädten zum Hitzeinseleffekt führt. Verdunstungsflächen, die sich weniger stark aufheizen, reduzieren die Problematik (vgl. Minke 2009, Santamouris 2012). Im Innern des begrünten Gebäudes können sich durch den geringeren Wärmestrom optimierte Kühl- und Heizlasten ergeben. Neben der energetischen Bilanz verbessert sich das Retentionsverhalten des Gebäudes um bis zu 100% in sehr hohem Maße (vgl. DeNardo et al.2005, VanWoert et al. 2005). Darüber hinaus wird durch die Einbringung von organischem Material in den Versiegelten Stadtraum die Biodiversität erhöht, die Aufenthaltsqualität erhöht sich durch psychologische Vorteile und verbesserte Luftqualität und begrünte Gebäudeflächen beeinflussen den Schallschutz in positiver Weise.

2.2 Fassadenbegrünung

Die Begrünung einer Fassade ist in boden- und wandgebundene Begrünung zu unterscheiden. Während bodengebundene Fassadenbegrünung vorwiegend mit Selbstklimmern oder Gerüstkletterpflanzen, wie beispielsweise wildem Wein und Blauregen realisiert werden, finden in der wandgebundenen Begrünung vor allem Moose, Stauden und Kleingehölze Verwendung. Sie werden in Form von Modularen Systemen und flächigen Konstruktionen realisiert (vgl. Pfoser et al. 2013). Wandgebundene Begrünung setzt in den meisten Fällen eine Versorgung mit Wasser und Nährstoffen voraus. Bei der Verwendung von vorkultivierten Systemen kann eine sofortige bis kurzfristige Flächenwirkung erzielt werden. Gerade in Bezug auf Moose ist hier die luftreinigende Wirkung zu nennen, die in mehreren Studien analysiert und bewiesen worden ist. Das im Jahr 2020 erfolgreich abgeschlossene Forschungsprojekt „MoosTex“ weist den positiven Einfluss von Moos auf Feinstaub- und Kohlendioxidgehalt der Luft und Verkehrslärmpegel nach (vgl. Architekturblatt 2020). Ein im Jahr 2018 ebenfalls in Stuttgart durchgeführtes Projekt scheiterte aufgrund von problematischer Umsetzung. Die falsche Art der Bewässerung, zu viel Sonne und Fahrtwind führten zur schnellen Austrocknung (vgl. Nebel 2018). Das Moos konnte seine positive Wirkung nicht entfalten. Dabei stellt sich Moos, neben den obengenannten Attributen, vor allem durch die hohe Wasserspeicherkapazität heraus, die im Hinblick auf mögliche Synergieeffekte in der Kombination von Bauwerksbegrünung mit einer Photovoltaikanlage von Mehrwert ist.

2.3 Synergieeffekte von PV und Gebäudebegrünung

Synergetische Effekte von Photovoltaikanlagen und Gebäudebegrünung wurden bislang vor allem auf dem Dach nachgewiesen. Hier wurden in Messungen eine Ertragssteigerung der Photovoltaikanlage um bis zu 4% festgestellt (vgl. ZinCo GmbH 2009). Einerseits profitiert die Photovoltaikanlage von der im Vergleich zu herkömmlichen Dachdeckungen kühleren Lufttemperatur über dem Gründach. Wissenschaftlichen Hintergrund bildet die Abdämpfung Temperaturkoeffizienten der Photovoltaikmodule, der die ihre Effizienz beeinflusst. Bei monokristallinem Silizium liegt dieser bei -0.4% pro K. Andererseits begünstigt der Schattenwurf der Photovoltaikmodule die Zunahme der Pflanzen- und Insektenvielfalt (vgl. Köhler et al. 2007). Van der Roest et al. (2023) weisen bei der Kombination mit einem blau-grünen Dach eine Steigerung des Ertrags um 4,4 % nach. Die obengenannten Studien beziehen sich aufs Dach. Doch auch in vertikaler Ausrichtung existieren bereits Datenlagen. So konnte an der TU Wien eine temperaturregulierende Wirkung bodengebundenen Fassadenbegrünung auf die Temperatur von Photovoltaikmodulen von $1 - 4\text{ °C}$

nachgewiesen werden. Das Forschungsprojekt „GreenPV“ der TH Nürnberg von 2022 ist hier ebenfalls zu nennen. In einer Laufzeit von 12 Monaten bis August 2022 werden Messungen mit verschiedenen Umbauten des Messtandes durchgeführt. Entwurfliche Ansätze von PV und Begrünung an der Fassade entstehen im Projekt „SolarArchitecture 2.0“ im Wintersemester 2021.

2.4 Rückblick: Entwurfliche Konsequenz – „SolarArchitecture 2.0“

Die obengenannten Synergieeffekte finden im Projekt „SolarArchitecture 2.0“ des Fachgebiets „BAU KUNST ERFINDEN“ der Universität Kassel im Wintersemester 2021 eine entwurfliche Ausprägung. Es wird eine als pflegeextensiv eingeschätzte Fassadenbegrünung in Form von Moosmatten mit einem Photovoltaikmodul als doppelt vorgehängte, hinterlüftete Fassade kombiniert. In einem Zwischenstand werden Zeichnungen präsentiert, die fast exakt dem Aufbau des Hauptteils dieser Abschlussarbeit entsprechen (siehe Abb.1). Der Unterschied besteht in der Planung mit einem opaken Modul. Vor allem in Bezug auf das Verhalten des Moores bei einer Kombination mit opaker PV stellen sich Fragen.

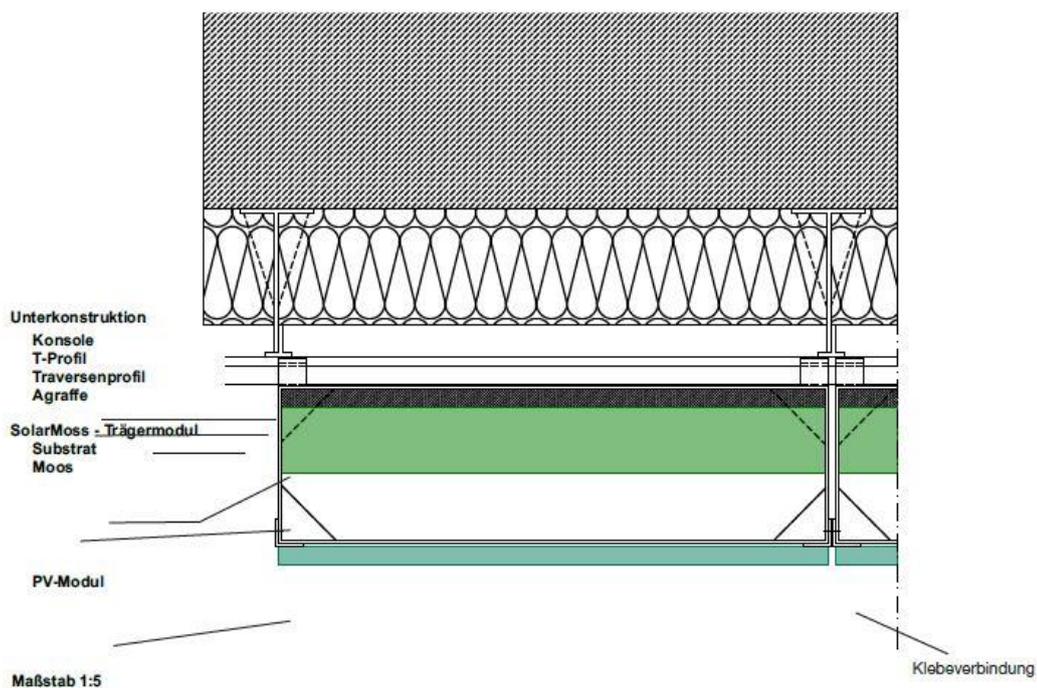


Abbildung 1: Zwischenstand aus dem Projekt „SolarArchitecture 2.0“. Horizontaler Schnitt durch eine doppelt vorgehängte, hinterlüftete Fassade.

Bislang fehlen Erfahrungswerte hinsichtlich Schimmelentwicklung, Austrocknung oder positivem Einfluss auf die Entwicklung der Moospflanzen. Diese offenen Fragen

inspirieren den Bau des Messstandes und die Untersuchung, die den Kern dieser Arbeit bildet.

3. „PVMoss“ - Vertikale Kombination von PV und Moosmatten

Im folgenden Kapitel wird ein Versuch beschrieben, der die in „SolarArchitecture 2.0“ entstandenen Unklarheiten beleuchtet. Die gesammelten Daten und Beobachtungen können zur Klärung der Frage beitragen, ob eine Kombination von Photovoltaik und vertikaler Begrünung sinnvoll scheint. Zunächst wird der eigens angefertigte Messstand in textlicher und grafischer Form dargestellt. Informationen über Standort und Methodik verdeutlichen die Absichten der Solarmessung.

Weiterhin wird ein detaillierter Überblick über den Versuchsaufbau gegeben. Dies umfasst die Auswahl der Materialien, die sich im Verlauf der Bearbeitungszeit durch unvorhersehbare Umstände veränderte und die Sensorik und ihre Platzierung, die eine zentrale Rolle in der Thematik spielt. Der Bau, die Errichtung und Inbetriebnahme der Anlage wird in diesem Kapitel beschrieben, ebenso wie die Wartung und Bewässerung.

Im letzten Abschnitt des Kapitels wird die Durchführung der Messung beschrieben. Im Messstand werden Temperaturen und Energieerträge gemessen. Die Datensätze werden aufbereitet und in Form von Diagrammen lesbar gemacht. Ein Messprotokoll gibt einen Überblick über den Messzeitraum.

3.1 Versuch

Im Rahmen der Solarmessung wird eine Konstruktion geplant und ausgeführt, mit der sich Photovoltaikmodule (vorne) und ein weiteres Material (hinten) kombinieren lassen (siehe Abb. 2). Die Anlage besteht aus insgesamt zwei Aufständungen, die jeweils dasselbe Photovoltaikmodul, jedoch verschiedene „Hintergründe“ aufnehmen. Die Anlage wird mit Temperatursensoren ausgestattet, die ein Monitoring des Ertrags und der Temperatur ermöglichen und Daten liefern. Die Temperatur wird an der verschatteten Rückseite der Module und an der Oberfläche der Hintergrundmaterialien gemessen. Nach Auswertung der Daten und Beobachtung der Begrünung, soll bewertet werden, inwiefern eine Kombination von Photovoltaik und Moos plausibel erscheint.

In der Mooskonstruktion wird ein semitransparentes Photovoltaikmodul mit einer Form von Gebäudebegrünung, in diesem Fall eine Moosmatte, kombiniert und steht

modellhaft für eine begrünte Photovoltaikfassade. Die Referenzkonstruktion fasst ebenfalls ein semitransparentes Photovoltaikmodul, wird jedoch mit einem anderen Hintergrund kombiniert. Hier wird ein Material gewählt, welches im Kontext von vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden als Kaschierung der Bauwerksdämmung verwendet wird. Die Referenzkonstruktion soll in ihrem Aufbau für eine herkömmliche vorgehängte, hinterlüftete Photovoltaikfassade stehen und dient als Vergleich für die Mooskonstruktion. Beide werden nebeneinander platziert.



Abbildung 2: Referenz- und Mooskonstruktion auf dem Dach des ZPV Adlershof.

Dank der Unterstützung und Finanzierung des Projekts durch das Helmholtz-Zentrum Berlin (im Folgenden HZB genannt) kann die Anlage im eigenen Freiluft-Labor auf dem Gründach (Extensive Begrünung) des Zentrums für Photovoltaik und Erneuerbare Energien (im Folgenden ZPV genannt) in eine bestehende Messinfrastruktur eingebunden werden. Die Umgebung lässt eine absolute Südausrichtung zu.

Der Bau und die Errichtung des Messstandes finden aus logistischen Gründen gestaffelt statt. Ab dem 13.07.23 wurden die Photovoltaikmodule montiert und liefern Daten zu Energieertrag und Temperatur an den Modulen. Seit dem 20.07.23 sind die Hintergründe in die Konstruktion eingebunden. Ab dem 04.08.23 stehen alle Daten aus dem geplanten Versuchsaufbau zur Verfügung.

Nach der Finalisierung des Versuchsaufbaus beginnt die Messperiode vom 05.08. – 14.08.2023. Diese soll erste Daten liefern und der Formulierung von ersten Thesen zur Thematik dienen.

3.2 Versuchsaufbau

Um zu klären, welchen Einfluss ein Hintergrundmaterial auf den Ertrag eines Photovoltaikmoduls hat, muss eine Vergleichbarkeit erzeugt werden. In der Konstruktion unterscheiden sich daher nur die Materialien hinter den Photovoltaikmodulen. Werden nun unterschiedliche Werte gemessen und entsprechend zugeordnet, deutet dies auf den Einfluss der verschiedenen Materialien hin.



Abbildung 3: Baugleiche Konstruktionen mit verschiedenen Materialien hinter den PV-Modulen. Temperatursensoren (blau) befinden sich an der verschatteten Hinterseite der Module und auf den Materialoberflächen.

Die Temperatursensoren werden an denselben Stellen platziert, es werden dieselben Photovoltaikmodule verwendet und es herrscht derselbe Abstand zwischen PV-Modul und der dahinter liegenden Oberfläche. Aufgrund der Baugleichheit wird zunächst die Mooskonstruktion beschrieben. In Abbildung 3 und 4 werden beide Konstruktionen gezeigt. Im Anhang die Planzeichnungen zur Ausführung.

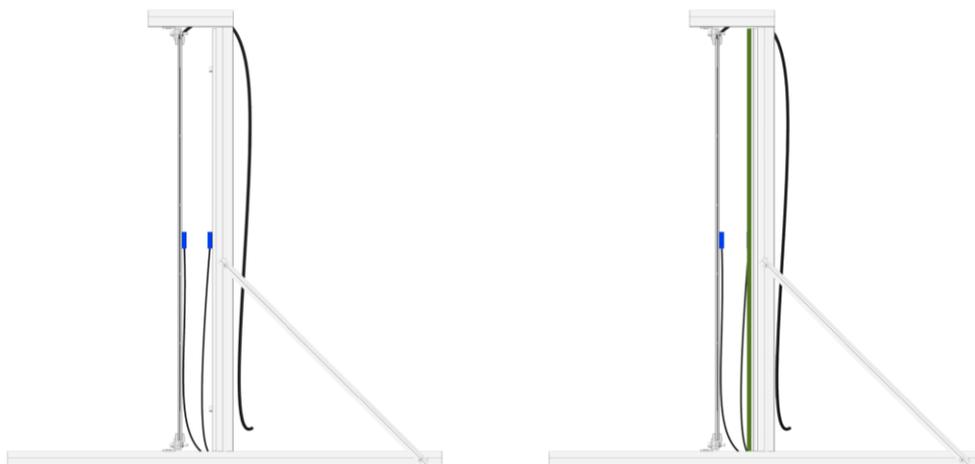


Abbildung 4: Seitenansicht der angefertigten Konstruktionen. Temperatursensoren in Blau.

Zwei galgenförmige Standfüße aus Aluminiumnutprofilen bilden die Aufständering. Unterhalb des Galgenstegs und auf dem Fußprofil werden über eine Winkelverbindung Laminatendklammern befestigt, die das Photovoltaikmodul aufnehmen. In das Stützprofil (vertikal) werden oben und unten Nutensteine eingesetzt. Das hinter dem PV-Modul positionierte Oberflächenmaterial, auf eine Siebdruckplatte geklebt, kann so mittels Schrauben an den Nutensteinen und also der Aufständering befestigt werden. Die Stützprofile sind mit zwei diagonalen Zug- bzw. Druckstäben am hinteren Teil des Fußprofils befestigt, um ein Kippen der Konstruktion zu verhindern. Die Abstände zwischen den Gelenkpunkten der L-Winkelprofile mussten aufgrund der Limitierung des Materialbestands kurz dimensioniert werden (siehe Abb. 5 – 6).

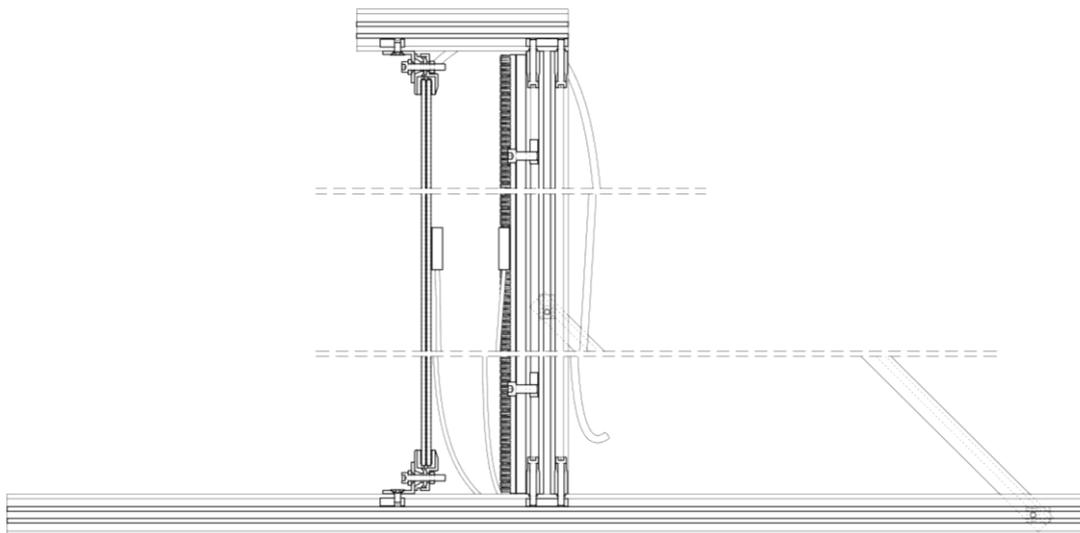


Abbildung 5: Schnitt durch einen Standfuß der Mooskonstruktion.

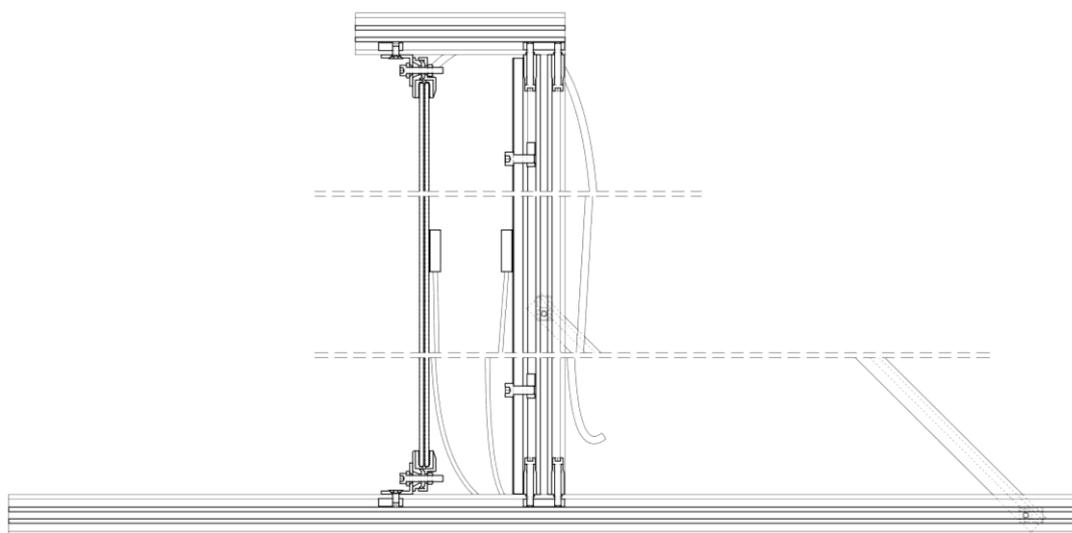


Abbildung 6: Schnitt durch einen Standfuß der Referenzkonstruktion.

3.2.1. Materialien

Die Photovoltaikmodule „Aleo Elegante 210 Wp“ weisen laut einen Transparenzgrad von ~28 % auf und bestehen aus zwei Schichten teilvorgespanntem Sicherheitsglas mit einer Dicke von 4 mm. Bei einem Gewicht von 31,5 kg pro Modul erfüllen sie die Richtlinie DIN 18008 für Vertikal- und Überkopfverglasung und sind vom deutschen Institut für Bautechnik mit einer allgemeinen baulichen Zulassung versehen worden (vgl. Aleo Elegante Produktdatenblatt).

Die Moosmatten, im Format 100 x 170 cm, bestehen laut Hersteller „Siemens & Lasak - Vegetationssysteme“ primär aus Moosen der Gattung der Drehzahnmoose (Tortula) und der Laubmoose (Racomitrioideae, Racomitrium). Als Substrat dient ein Wasserspeichervlies mit 3D-PA-Gewebe aus Polyester, auf denen die Moose wachsen und Wurzeln bilden. Mit einem Trockengewicht von 2,1 kg/m² und einer Materialdicke von 15 mm sind die Matten vergleichsweise leicht. Durch hervorragende Wasserspeichereigenschaften können allein die Moose 13,8 l/m² aufnehmen. Zusammen mit dem Wasserspeichervlies liegt das Gewicht bei 20 kg/m² (vgl. Produktdatenblatt Siemens & Lasak SL 600). Hierbei muss herausgestellt werden, dass diese Angaben für die horizontale Montage gelten. Laut Hersteller kann von einem Viertel der Wasserspeicherkapazität bei einer vertikalen Montage ausgegangen werden. Hierzu wird die Moosmatte auf eine 9 mm Siebdruckplatte in 100 x 160 cm aus Birke aufgeklebt, um sie senkrecht montieren zu können. Als Klebstoff dient der vom Hersteller empfohlene „Soudaseal 240 FC“.



Abbildung 7 – 9: PV Module in angelieferten Zustand (links, Quelle: Eigene); Moosmatte (mitte, Quelle: Siemens & Lasak); zugeschnittenes und auf Siebdruckplatte verklebtes Kaschierungsmaterial (rechts, Quelle: Eigene).

In der zweiten Konstruktion wird die Kaschierung einer Dämmschicht in Form einer Unterspannbahn verbaut. Sie soll durch eine ähnliche Farbe, wie die eines tatsächlichen Kaschierungsmaterials, eine vergleichbare Albedo haben.

Weiterhin ist der Abstand der Photovoltaikmodule und des dahinter liegenden Materials eine Variable. Herkömmliche vorgehängte, hinterlüftete Fassaden werden mit einem Abstand ab 2 cm zwischen Unterkonstruktion dimensioniert (siehe IFD-Richtlinie 2018). Um die Moosmatte zu bewässern, wird der Abstand auf 7,5 cm festgelegt. Für zukünftige Messungen könnte der Abstand verkleinert werden.

Die Beschreibung der Verbindungen der Konstruktionen erschließt sich aus den Darstellungen im Anhang und den Abbildungen 10 – 11.

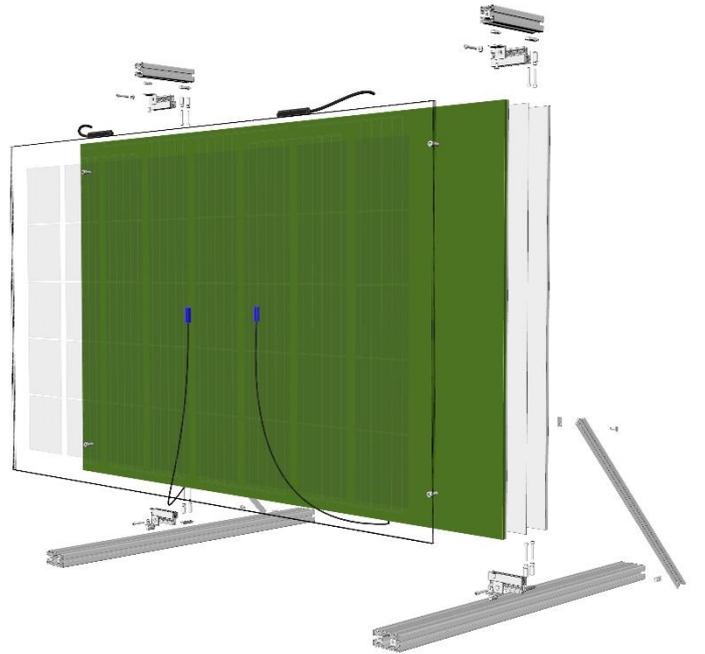


Abbildung 10: Mooskonstruktion in explodierter Darstellung

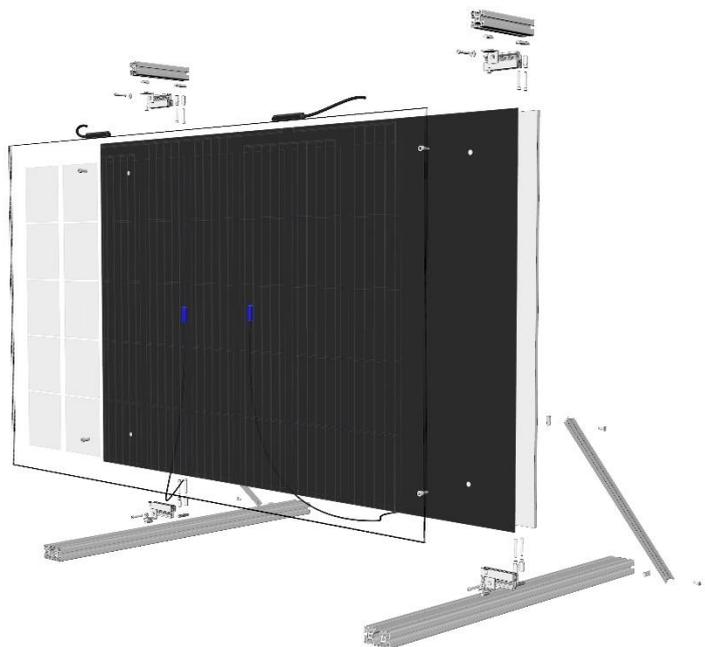


Abbildung 11: Referenzmodul in explodierter Darstellung.

3.2.2 Monitoring und Metering

Einerseits wird der Ertrag des Moduls gemessen. Die Module werden jeweils an einen eigenen MPP-Tracker angeschlossen, um die Erträge einzeln erfassen zu können. Im Versuch ist die das PV-Modul der Mooskonstruktion an Anschluss 5/11 und das PV-Modul der Referenzkonstruktion an Anschluss 6/12 der Monitoring-Anlage des HZB angeschlossen (siehe Abb. 13).

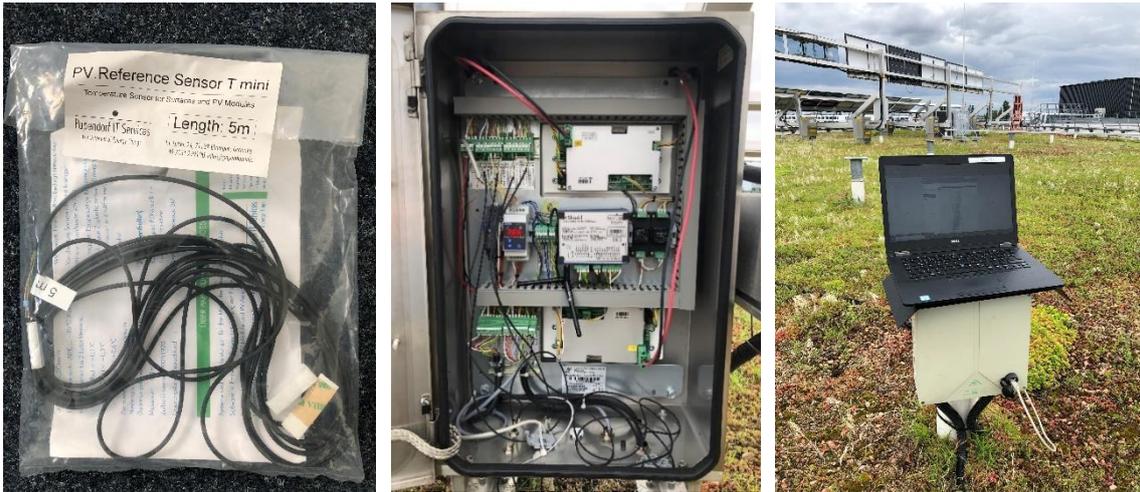


Abbildung 12 – 14: Temperatursensor (links); Anschlusskasten (mitte); Datahub (rechts).

Andererseits werden die Temperaturen an zwei verschiedenen Positionen innerhalb der jeweiligen Konstruktion gemessen. Mittels eines Platinwiderstands PT 1000 1/3 wird ein Widerstand gemessen und daraufhin durch die Temperaturkennlinie nach DIN EN 60751 in die entsprechende Temperatur umgewandelt. Jeweils ein Temperatursensor wird an der verschatteten Rückseite der PV-Moduls, sowie an der Oberfläche des dahinter liegenden Materials befestigt (siehe Abb. 12 - 15).



Abbildung 15: Temperatursensoren in der Mooskonstruktion (links); Temperatursensoren in der Referenzkonstruktion (rechts).

3.2.3 Bewässerung

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, benötigen die meisten Arten von Fassadenbegrünungen eine Bewässerung. Zwar können Moose längere Phasen von Trockenheit überstehen, dennoch ist eine Zufuhr von Wasser notwendig, um Evapotranspiration herzustellen. Diese ist für das Konzept der Verdunstungskühlung verantwortlich und soll daher in der Messanlage stattfinden.

Anders als ursprünglich geplant, werden in den Versuchsaufbau keine Bewässerungsschläuche integriert. Diese erfordern einen Mindestdruck von 0,5 bar und somit eine Wasserpumpe. Auch wenn vergleichsweise einfache Systeme erhältlich sind, erfordert eine Errichtung im Reallabor die Sicherung gegen Wind und das Erfüllen weiterer sicherheitsrelevanter Auflagen. Darüber hinaus müsste ein Wasserspeicher installiert werden, der genug Volumen fasst, um die Moosmatte effektiv zu bewässern. Die Entwicklung eines solchen Bewässerungssystems kommt daher in dieser Versuchsphase nicht infrage. Moose nehmen das Wasser in erster Linie über die gesamte Oberfläche der Blätter in tropfbar-flüssiger Form auf. Die Rhizoide, wurzeleretzende Haarbildungen, dienen vor allem der Anheftung an das Substrat. Nur in Sonderfällen, wie beim Laubmoos, kann Wasser über die Rhizoide aufgenommen (vgl. Mägdefrau & Wutz 1951, Stocker 1956).

Daher wird die Bewässerung von vorne per Hand mit einem Drucksprühgerät mit zerstäubender Teleskopdüse durchgeführt. Um Fehlfunktionen der Messanlage frühestmöglich zu erkennen und die Messdaten zu übertragen, muss die Anlage jeden Tag (wochentags) überprüft und gewartet werden. Hierzu ist das Betreten des Dachs notwendig und die Bewässerung wird dabei erledigt. Die vom Hersteller der Moosmatten angegebene Wasserspeicherkapazität im vertikalen Zustand beträgt bei 1,6 m² Moosmatte ein Volumen von 5,52 l. Vom Hersteller wird zur Bewässerung kalkarmes Regenwasser empfohlen oder gefiltertes Leitungswasser empfohlen. Letzteres durch die Filterung mit einem herkömmlichen Tischwasserfilter hergestellt und im Versuch verwendet.

Moose sind aufgrund der fehlenden Spaltöffnungen nicht in der Lage Wasser zu speichern und damit direkt von dem umgebenden Medium abhängig (vgl. Mägdefrau & Wutz 1951). Aufgrund eines bei Wassermangel ausgeschütteten Stresshormons und der Bildung eines Austrocknungsschutzes, dem Protein Dehydrin, kann Moos lange Phasen der Trockenheit überstehen (vgl. Emmerich 2015). Dennoch muss es für die volle Entfaltung der Lebensfunktionen mit Wasser gesättigt sein (Mägdefrau 1951). Daher

wird das Moos jeden Wochentag bewässert, um eine möglichst hohe Kühlleistung zu erzeugen.

3.2.4 Fertigung und Wartung der Anlage

Vom 14. auf den 15. Juni wird das Helmholtz-Zentrum Berlin Opfer einer Cyber-Attacke und alle Abteilungen werden heruntergefahren. Die PV-Module sind zu dem Zeitpunkt bereits geliefert worden, nicht so die für die Konstruktion bestimmten Aluminiumprofile. Die Planung einer aufgehängten Konstruktion bereits abgeschlossen, kann wegen der Inaktivität des institutseigenen Einkaufs nichts bestellt werden. Daher wird eine Umplanung auf Bestandsmaterial notwendig und es entsteht dabei eine sehr leichte, materialarme und stehende Konstruktion. Diese wird, ohne Wartezeiten auf Material in Kauf nehmen zu müssen, umgehend in der Werkstatt des Instituts gefertigt. Sie erweist sich als funktionstüchtig, nachdem die Module testweise eingefügt werden und die finale Errichtung auf dem Dach des ZPV geschieht am 13.07.2023. Am selben Tag werden die Temperatursensoren an den Modulen befestigt. Nach der Lieferung des Moores im trockenen Zustand wird es umgehend auf die Siebdruckplatte aufgeklebt und nach einer eintägigen Trocknungsphase des Klebers am 20.07.2023 der Konstruktion montiert. Die Temperatursensoren an der Oberfläche der Hintergrundmaterialien werden aus logistischen Gründen erst später befestigt und am 31.07.2023 in Betrieb genommen, wobei der finale Versuchsaufbau mit allen Schichten am 04.08.2023 fertig gestellt wird.

Die Anlage wird ab Errichtung täglich gewartet. Die Verbindungen der Konstruktion werden überprüft, die korrekte Ausrichtung gen Süden sichergestellt, der Zustand des Moores optisch beurteilt und die Rohdaten aus dem Netzwerk heruntergeladen. Darüber hinaus wird das Moos mit jedem Wartungsgang bewässert, wenn es nicht mit Wasser gesättigt ist oder eine Trockenphase des Moores geplant ist.

Aus Sicherheitsgründen darf das Dach des ZPV am Wochenende nicht betreten werden.

3.3 Durchführung der Messung

3.3.1 Analyse der Daten

Die Analyse der im Rahmen dieser Arbeit ausgewertete Daten wird auf einen beispielhaften Testzeitraum beschränkt. Sie sollen der Formulierung von ersten Beobachtungen und Vermutungen dienen, die in einem langen Zeitraum tiefergehend untersucht werden könnten. Mit einer Laufzeit von 12 Monaten besitzt das Projekt „GreenPV“, der TH Nürnberg, mehr Aussagekraft (vgl. GreenPV Projektdatenblatt).

In dem Testzeitraum vom 05. – 14.08. werden Daten zur Auswertung gesammelt und analysiert. Pro Modul wird in jeder Minute des Tages die Stromspannung U [V] und Stromstärke I [A] in insgesamt sechs Zeitabschnitten erfasst. Unter Verwendung der Formel $P=U \cdot I$ werden für die sechs Zeitabschnitte die resultierenden Leistungen P [W] ermittelt und durch $Wh=P/360$ in die zeitliche Relation gesetzt. So kann der Energieertrag in Wh festgestellt werden. Um Verfälschung der Ertragsprofile durch eine Verschattung der Module durch die umliegenden Konstruktionen zu vermeiden, wird pro Tag ein Zeitraum von 11-16 Uhr analysiert. Zusammen mit den gemessenen Temperaturen werden die Ertragsprofile der Messtage in Form von Graphen dargestellt.

3.3.2 Messprotokoll

Um etwaige Korrelationen von Bewässerungszeitpunkt und Temperaturänderungen im Versuchsstand zuordnen zu können, wird im Testzeitraum ein Messprotokoll geführt. Hier werden Tag, Uhrzeit der Begehung, Außentemperatur, Zustand der PV, Zustand des, Mooses, Uhrzeit der Bewässerung, Volumen der Wassergabe, Richtung der Wassergabe und Bemerkungen dokumentiert. Das Protokoll wird zunächst von Tag zu Tag ausgefüllt und nach Schließung des Messzeitraums tabellarisch zusammengefasst (siehe Anhang).

4. Auswertung

Dieses Kapitel dient der Besprechung und Zusammenfassung der Ergebnisse. Mittels mehrerer Diagramme werden verschiedene mögliche Korrelation untersucht und beschrieben und erste Vermutungen formuliert. Zunächst werden die Temperaturdaten der Hintergrundflächen betrachtet. Auf dieser Grundlage werden die Messpunkte und etwaige Auffälligkeiten der Temperaturen an der Rückseite der Photovoltaikmodule besprochen und auf mögliche Zusammenhänge mit den jeweiligen Hintergrundmaterialien überprüft. Weiterhin werden die Ergebnisse der Energieerträge auf Zusammenhänge zum Versuchsaufbau untersucht. Nach der Besprechung der Ergebnisse wird Fazit gezogen. Im Anschluss daran folgt ein Ausblick, der die Thematik auf der Grundlage der Beobachtungen und gewonnenen Erkenntnisse in einen architektonischen Kontext rückt.

4.1 Ergebnisse

Pro Konstruktion liegen jeweils drei Datensätze zur weiteren Verarbeitung vor. Ihre Zuordnung ist der unten liegenden Tabelle zu entnehmen.

Tab.: Zuordnung der verwendeten Temperatursensoren und ihrer Bezeichnung im folgenden Kapitel.

Zuordnung im Text	Temperatur Oberfläche d. Materialien [°C]	Temperatur Rückseite der PV-Module [°C]	Energieertrag [Wh]
Mooskonstruktion, Anschluss 5/11 (Rohdaten)	"Temperatur Moos"	"Temperatur PVMoos"	"Energieertrag Mooskonstruktion"
Referenzkonstruktion 6/12 (Rohdaten)	"Temperatur Kaschierung"	"Temperatur PVKaschierung"	"Energieertrag Referenzkonstruktion"

Die Ergebnisse zugunsten eines Gesamtüberblicks in einem großen Diagramm zusammengefasst (siehe Anhang). Die folgenden Unterkapitel zeigen und diskutieren die erfassten Daten.

Wie im Messprotokoll festgehalten, ist das Wetter im Messzeitraum vorwiegend wechselhafter Natur, von Wolken und Regenereignissen und einem stetigen Anstieg der Außentemperatur geprägt (siehe Anhang). Lediglich der 14.08.2023 ist warm, sonnig und wolkenlos.

4.1.1 Temperatur von Moos und Kaschierung

Beim Vergleich der Temperaturverläufe an den Oberflächen von Moos und Kaschierung lassen sich an einigen Stellen deutliche Unterschiede erkennen. Die Markierungen in Abbildung 16 stehen für die unterschiedlichen Auffälligkeitenmuster.

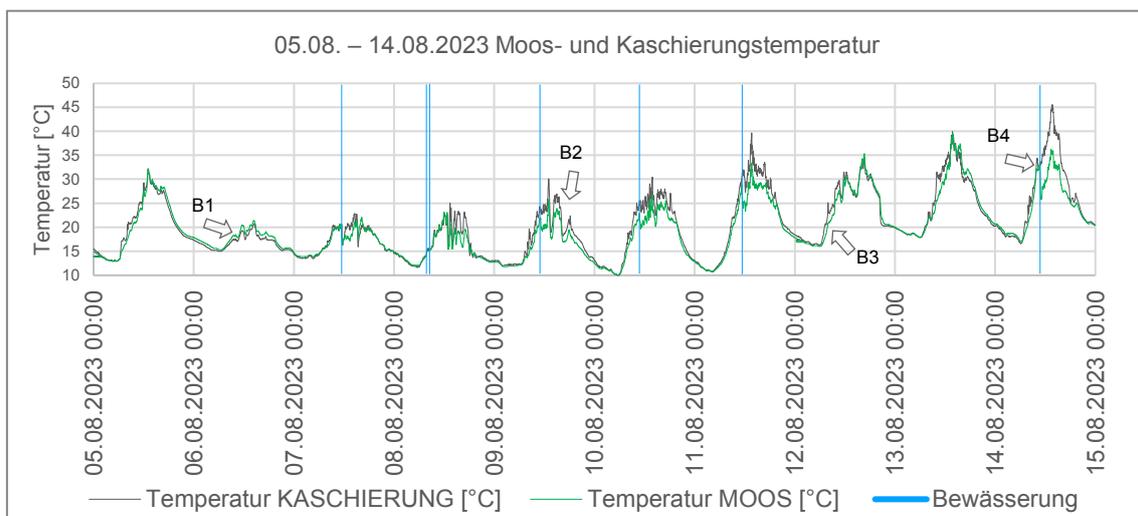


Abbildung 16: Temperaturverlauf des gesamten Messzeitraums.

Markierung B1 verweist auf eine erhöhte Temperatur am Moos am Sonntag, den 06.08.2023 (siehe Abb. 17). Samstags und sonntags wird nicht bewässert und das Moos ist somit trockener, als an den übrigen Tagen. Hierin könnte eine mögliche Erklärung Grund für die erhöhte Temperatur am Moos im Vergleich zur Kaschierung liegen. Diese Unterschiede wiederholen sich am folgenden Wochenende, jedoch weniger stark ausgeprägt. Ob dies mit der vergleichsweise kühleren Umgebungstemperatur oder mit unterschiedlicher Konvektion durch Wind zusammenhängt, müsste durch weitere Untersuchungen unter ähnlichen Voraussetzungen überprüft werden.

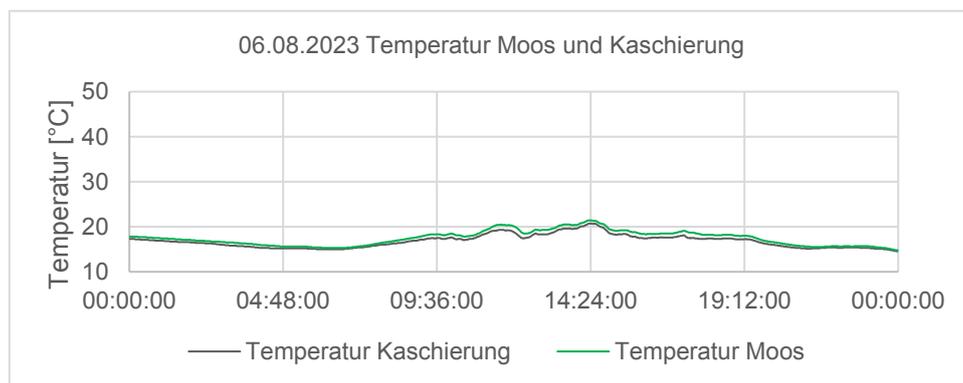


Abbildung 17: Markierung B1

Markierung B2 verweist auf eine deutliche Senke an beiden Kurven (siehe Abb. 18). Die Unterschiede könnten eine geringere Bestrahlung durch Bewölkung hervorgerufen worden sein. Diese These wird durch eine Senke im Ertragsprofil zur selben Uhrzeit des 09.08.2023 bestätigt (siehe Anhang Ertragsprofil). Starke Dynamiken der Erwärmung und Abkühlung stehen vermutlich mit der Bestrahlungsstärke in Zusammenhang. Diese wird durch Bewölkung, sowie die direkte Bestrahlung der Sensoren und Module durch direkt einfallendes Sonnenlicht bestimmt. Dies ist beispielweise gegen 13:24 Uhr der Fall.

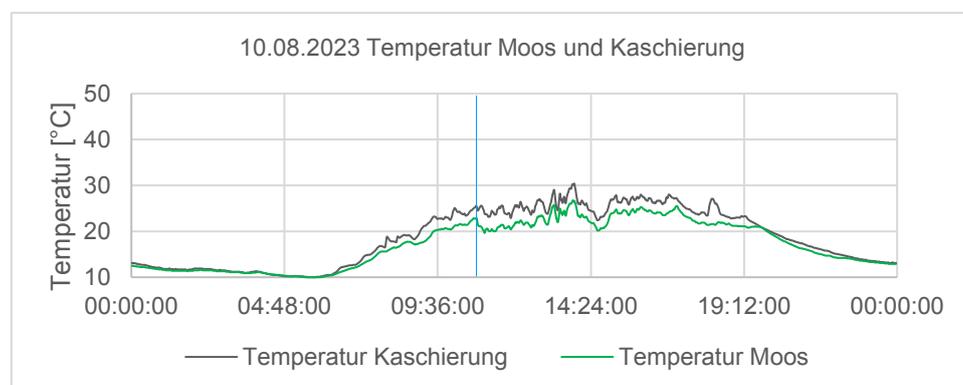


Abbildung 18: Markierung B2

Markierung B3 verweist auf die Glättung des Erwärmungs- und Abkühlungsprofils der Moosoberfläche (siehe Abb. 19). Das Moos erwärmt sich langsamer und kühlt langsamer ab. Nur Sonntag, der 06.08.2023 bildet hier eine Ausnahme. Ein möglicher Grund könnten hier die niedrigen Temperaturen und die Wassersättigung bzw. Trockenheit des Moores sein. Durch weniger Wassersättigung tritt weniger Kühleffekt ein.

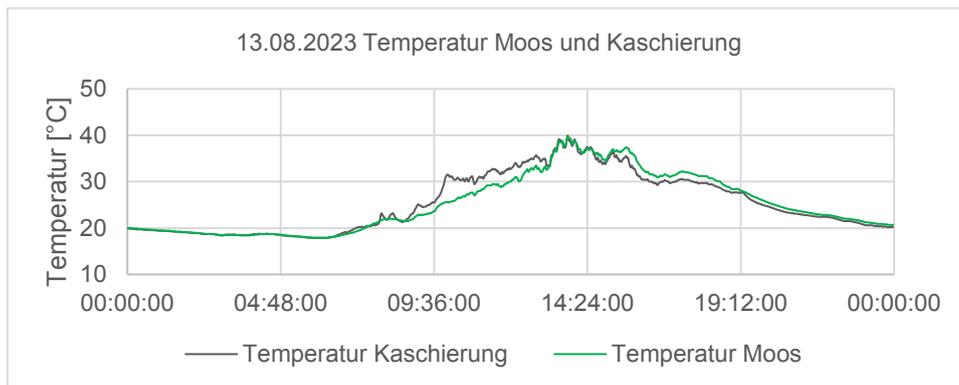


Abbildung 19: Markierung B3

Markierung B4 verweist auf die Auffälligkeit der reduzierten Oberflächentemperatur am Moos unter hoher Sättigung mit Wasser. Nach der Bewässerung sinkt die Temperatur am Moos ab. Daraufhin lässt sich ein erneuter Anstieg der Temperatur des Moores erkennen - allerdings auf einem geringeren Niveau im Vergleich zur Kaschierung. Selbst zum wärmsten Zeitpunkt des Tages liegt es signifikant unter dem der Kaschierung. Am Montag, dem 14.08.2023, lässt sich diese Auffälligkeit am deutlichsten beobachten (siehe Abb. 20). Zunächst fällt die Temperatur des Moores um ca. 7,5 °C ab. Am wärmsten Zeitpunkt des Tages liegt die Temperatur des Moores nun ca. 10 °C unter dem Niveau der Kaschierung. Die Ursache für dieses Phänomen könnte in der hohen Wärmekapazität von Wasser liegen, die die zuzuführende Energie pro +1 K beschreibt. Die Wärmekapazität der Kaschierung liegt deutlich unter der von Wasser.

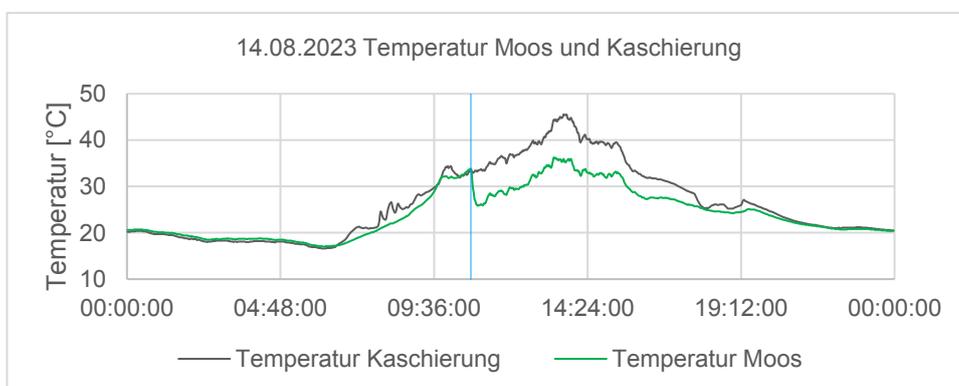


Abbildung 20: Markierung B4

4.1.2 PV-Modultemperaturen

Die Temperaturmessungen an der Rückseite der Photovoltaikmodule weniger stark ausgeprägte Auffälligkeiten. An den Wochenenden zeigt sich eine sehr ähnliche, fast gleiche Erwärmung und Abkühlung der Module.

Die Markierung B5 verweist auf das Verhalten der Temperatur nach der Bewässerung (siehe Abb. 21). Am deutlichsten wird diese ebenfalls am 14.08.2023. Jeweils nach den Bewässerungen zeigt sich eine Reduzierung der Temperatur am Modul „PVMoos“. Hier liegt die mittlere Temperatur am Modul im Zeitraum von 12:00 – 15:00 Uhr um 2,73 K unter der Referenz.

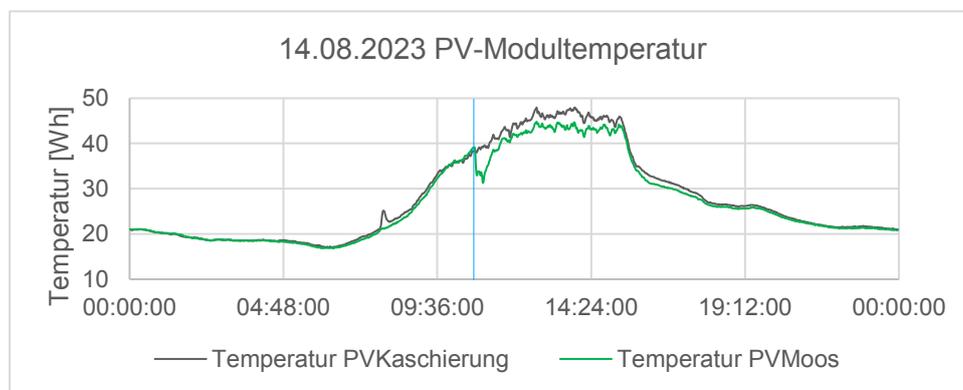


Abbildung 21: Markierung B5

4.1.3 Energieerträge

Die Energieertrag der Photovoltaikmodule ist von Bestrahlungsstärke bzw. Verschattung und der Temperatur des Moduls abhängig.

Markierung B6 verweist auf eine sich wiederholende Auffälligkeit im Ertragsprofil des Moduls der Mooskonstruktion (siehe Abb. 22). Aufgrund der Positionierung des Messstandes ist das Modul der Mooskonstruktion bis ca. 11:15 Uhr verschattet. Dies führt zu einer geringeren Effizienz des Photovoltaikmoduls, bis die Verschattung nicht mehr vorhanden ist.

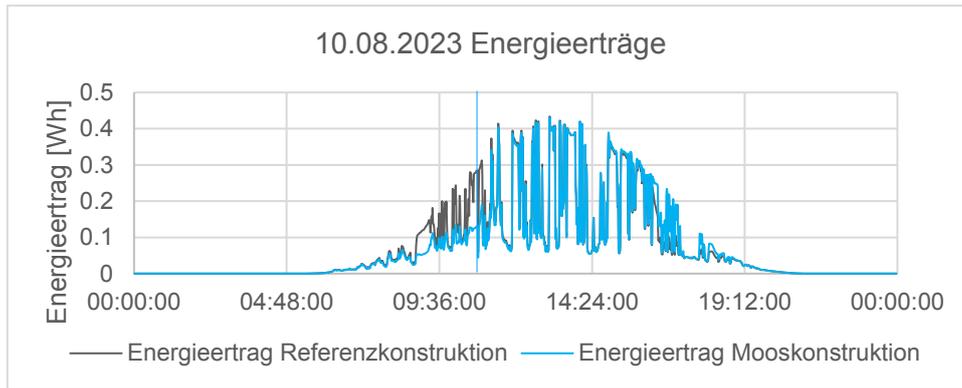


Abbildung 22: Markierung B6

Markierung B7 verweist auf eine Auffälligkeit im Vergleich der beiden Ertragsprofile am Montag, den 14.08.2023 (siehe Abb. 23). Ab ca. 12:00 Uhr lässt sich eine leichte Steigerung der Effizienz des Moosmoduls feststellen.

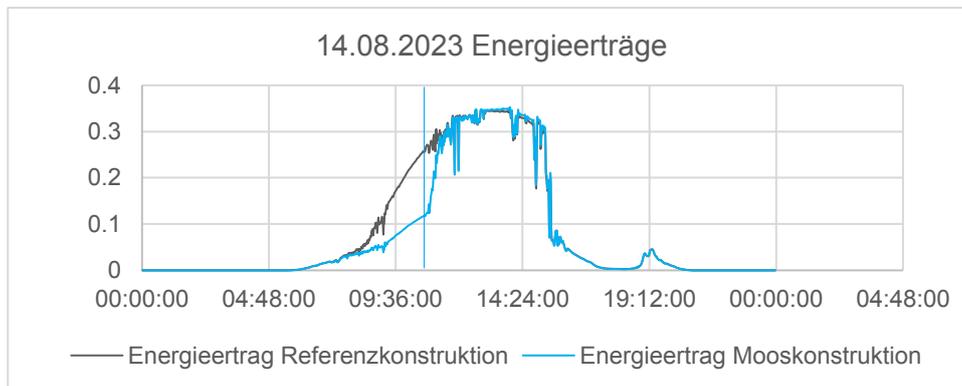


Abbildung 23: Markierung B7

In Abbildung 24 ist der Zeitraum von 12:00 bis 15:00 Uhr dargestellt, in dem sich die Temperaturen am Moosmodul unter denen des Referenzmoduls eingependelt haben. In diesem Zeitraum lässt sich eine Verbesserung des Ertrags feststellen, der gegebenenfalls auf den Einfluss der Verdunstungskühlung zurückzuführen ist. Wie in Abbildung 21 beschrieben, liegt die mittlere Temperatur von PVMoos 2,73 K unter der Referenz. Unter Berücksichtigung des Temperaturkoeffizienten von monokristallinem Silizium, -0.4 % pro K, wäre in diesem Zeitraum 1,1 % mehr Ertrag zu erwarten. Die Messung bestätigt dies. Im obengenannten Zeitraum steigt die Effizienz des Moduls der Mooskonstruktion um 1,01 % im Mittel (siehe Abb. 24).

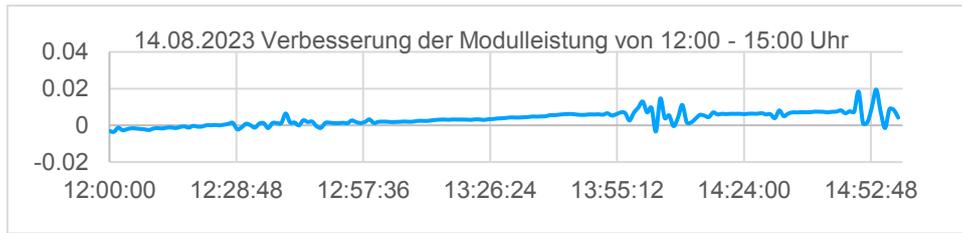


Abbildung 24: Verbesserung der Modulleistung von 12:00 – 15:00 Uhr

5. Fazit

Die maximale Temperaturdifferenz der Oberflächen beträgt 7,65 K. Dies bewirkt eine Kühlung auf der Modulrückseite von 2,73 K, bei einem Abstand von 7,5 cm zwischen Modul und Hintergrundmaterial. Die Ertragsenergie der Mooskonstruktion verbessert sich in den Stunden nach der Bewässerung um 1,01%.

Ob der positive Einfluss auf den Ertrag der Mooskonstruktion durch Verdunstungskühlung oder Schwankungen aufgrund von Arbeitstoleranzen der Photovoltaikmodule oder des Messsystems entsteht, müsste durch zukünftige Messungen geprüft werden. Der Effekt der Kühlung des Moduls durch Evapotranspiration des Moores ist an wärmeren Tagen deutlich ausgeprägter und effektiver als an kalten Tagen. Vermutlich steht der Kühlungseffekt der Module durch Moos in Abhängigkeit zum Abstand der Rückseite des PV-Moduls und des Moores. Die Verringerung des Abstands bei zukünftigen Messungen könnten zu Validierung dieser These beitragen.

Der vom Photovoltaikmodul verschattete Bereich auf der Moosmatte trocknet langsamer als die unverschatteten Randbereiche (siehe Abb. 24). Das Moos scheint sich langsamer zu erwärmen und kühlt sich langsamer wieder ab. Diese Eigenschaft ist im Kontext von Hitzeinseln und Gebäudeenergie von Interesse.

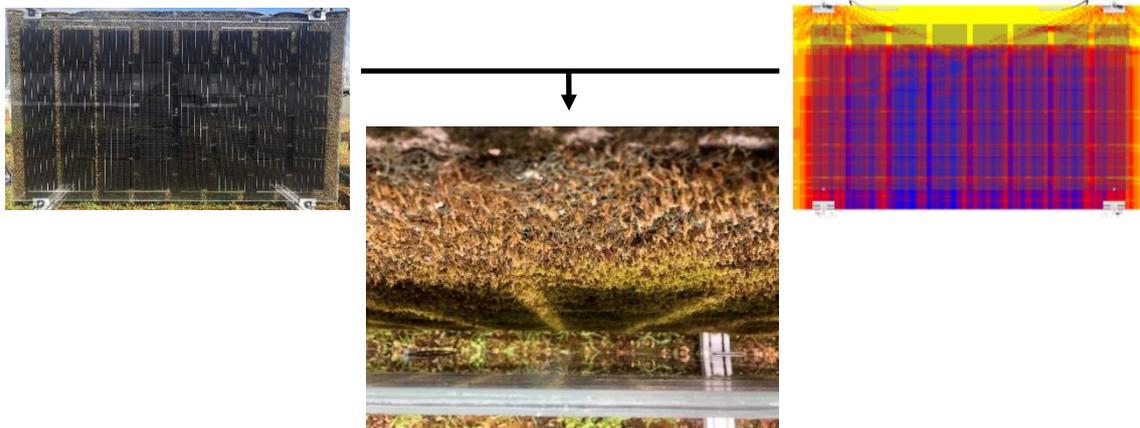


Abbildung 25: Trocknungsverhalten des Moores.

Bemerkenswert ist ebenfalls die Wasserspeicherkapazität des Mooses. Bei einem Bewässerungsvolumen von täglich 5,5 Litern war die Wasserspeichermatte niemals nass, jedoch liegen hierzu keine Daten vor. Der Eindruck entsteht durch die haptische Prüfung mit der Hand nach der Bewässerung. Das Moos war augenscheinlich in der Lage, das gesamte Bewässerungsvolumen aufzunehmen. Hier liegen Potenziale in Bezug auf Retentionsflächen am Gebäude.

Somit könnten sich durch die Kombination von Photovoltaikmodulen und Moos basierend auf oben genannten Messungen nicht nur Verbesserungen der Effizienz der Photovoltaik ergeben, sondern ein Gebäude und die Umgebung würden durch eine geringere Temperatur an der Fassade und große Wasserspeicherkapazität profitieren. Moos als Fassadenbegrünung könnte ein Teil der Lösung in Bezug auf durch den Klimawandel auftretende Phänomene wie Starkregen und intensive Hitzeperioden sein.

6. Ausblick

Die im Verlauf dieser Abschlussarbeit entstandenen ersten Eindrücke und Annahmen sind durch die Erweiterung der Datenlage zu validieren. Eine Vergrößerung des Messzeitraums auf bis zu 12 Monate könnte vor allem Hinblick auf das Moos umfassendere Einblicke liefern. Augenscheinlich kommt das Moos mit den sommerlichen Standortbedingungen gut zurecht. Beobachtungen und Datenlagen in kalten Phasen des Jahres müssen jedoch ebenfalls in eine Beurteilung des Systems mit einfließen.

Eine Laufzeit von beispielsweise 12 Monaten ließe Umbauten am Messstand zu. Im Hinblick auf die Kühlung des Photovoltaikmoduls könnte dies die Ergebnisse beeinflussen. Der derzeitige Abstand zwischen Photovoltaikmodul und Moos kann verringert werden, um möglicherweise einen stärkeren Kühlungseffekt zu erzielen, was sich positiv auf den Energieertrag auswirken könnte. Weiterhin wäre es denkbar die Messungen unter Verwendung eines opaken Photovoltaikmoduls durchzuführen, um das Verhalten des Mooses bei weniger Sonnenlicht zu beobachten. So würde eine direkte Bestrahlung der Temperatursensoren vermieden werden. Die Installation eines bifazialen, semitransparenten Moduls könnte Einblicke in den Einfluss der Albedo des Mooses und anderer Hintergrundmaterialien liefern.

Durch die Erfassung der Feuchtigkeit könnten Daten zu verschiedenen Arten der Bewässerung gesammelt werden. Im Kontext von integrierter Gebäudebegrünung ist eine Bewässerung von Hand, wie in diesem Messzeitraum geschehen, nicht geeignet.

Daher könnte das Verhalten des Moores bei automatischer Bewässerung von vorne und von hinten beobachtet werden. Auch Versuche mit der Bewässerung von oben kämen in Betracht. Die große Retentionskapazität der Moosmatten könnte eine Konstruktion inspirieren, bei der überschüssiges Wasser vom Dach in eine begrünte Fassade geleitet wird. Die Referenz zu derartigen Versuchen könnte eine nicht künstlich bewässerte Moosfläche sein. Sie könnte Aussagen über die Integrität einer vertikalen Moosfläche unter realen Standortbedingungen liefern.

Im Gebäudekontext wirft die Trockenheit eines Materials Fragen in Bezug auf den Brandschutz auf. Einen interessanten Einblick könnten die Brandprüfungen von Moosmatten ergeben. Ein positiver Effekt von wassergesättigtem Material auf das Verhalten von Brandüberschlägen wäre denkbar. Ein automatisches Bewässerungssystem, welches im Brandfall eine gewisse Menge von Wasser ins Material gibt, könnte vorteilhaft sein. Eine automatische Bewässerung des Moores von vorne könnte weitere Vorteile in Bezug auf Brandlasten an einer Photovoltaikanlage bieten. Die Bewässerungsanlage könnte in einer Art und Weise installiert werden, die im Brandfall Moos und PV mit Wasser versorgt, um Brandentwicklung so gut wie möglich zu vermeiden. Dies kann in Bezug auf Photovoltaikanlagen an Sonderbauten der Gebäudeklasse 5 interessant sein, um Fassadenflächen an Hochhäusern für die Stromproduktion zu erschließen.

7. Literaturverzeichnis

<https://www.uni-wuerzburg.de/aktuelles/pressemitteilungen/single/news/laubmoos-a/>

<https://www.architekturblatt.de/mit-moos-gegen-feinstaub-eine-nachhaltige-loesung-zur-luftreinigung/>

https://www.umweltzentrum-braunschweig.de/fileadmin/_uwz-pdfs/2018-05/Die_Mooswand_in_Stuttgart.pdf

Die Wasserkapazität der Moos- und Flechtendecke des Waldes
K. Mägdefrau & A. Wutz 1951

O. Stocker, HANDBUCH DER PFLANZENPHYSIOLOGIE, Band 3 - Pflanze und Wasser, 1956

Diurnal variation in photochemical dynamics and surface reflectance of
the desiccation-tolerant moss, *Tortula ruralis*
E. P. Hamerlynck et al. 2000

Grünfassaden und Photovoltaik, Prof. Dr.-Ing. Roland Krippner 2021

<https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/rueckblick.asp?id=23&datum0=14.07.2023&datum1=10.08.2023&jr=2023&mo=8&datum=13.08.2023&t=4&part=2>

Kolb, W. (2016): Dachbegrünung - Planung, Ausführung, Pflege. Stuttgart 2016

Mann, G. (2012): Vegetationstechnik. In: Köhler, M. (2012): Handbuch Bauwerksbegrünung, Köln 2012.

FLL, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e. V. (2018):
Dachbegrünungsrichtlinien -
Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen. FLL, Forschungsgesellschaft
Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e. V., 2018.

Pfoser, N./Jenner, N. et al. (2013): Gebäude, Begrünung und Energie. Potenziale und Wechselwirkungen.
Bonn 2013

Minke, G. (2009): Ermittlung des Wärmedämmverhaltens von Gründächern, Abschlussbericht.

Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies
to fight heat
island and improve comfort in urban environments, in: Solar Energy, Vol. 103, pp. 682– 703.

VanWoert, N. D., et al. (2005): Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media
depth. J
Environ Qual 2005.

DeNardo JC, Jarrett AR, Manbeck HB, Beattie DJ, Berhage RD. Stormwater mitigation and surface
temperature
reduction by green roofs. Trans ASABE 2005;48(4):1491–6

ZinCo GmbH (2009): Solarmessung <https://www.zinco.de/solarmessung>

Köhler, M., Wiartalla, W., & Feige, R. (2007). Interaction between PV-systems and extensive green roofs.
In: Proceedings
of the Fifth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show.
Mineapolis,
2007.

Van der Roest, E. et al. (2023), Increasing solar panel output with blue-green roofs in water-circular and
nature inclusive urban development, Building and Environment, Volume 244, 1 October 2023

Krippner, R. 2021 GreenPV-Projektdatenblatt.final.pdf (th-nuernberg.de)

Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V. (FVHF, 2018), IFD-
Richtlinie Berlin 2018

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zwischenstand aus dem Projekt „SolarArchitecture 2.0“. Horizontaler Schnitt durch eine doppelt vorgehängte, hinterlüftete Fassade.

Abbildung 2: Referenz- und Mooskonstruktion auf dem Dach des ZPV Adlershof.

Abbildung 3: Baugleiche Konstruktionen mit verschiedenen Materialien hinter den PV-Modulen. Temperatursensoren

(blau) befinden sich an der verschatteten Hinterseite der Module und auf den Materialoberflächen.

Abbildung 4: Seitenansicht der angefertigten Konstruktionen. Temperatursensoren in Blau.

Abbildung 5: Schnitt durch einen Standfuß der Mooskonstruktion.

Abbildung 6: Schnitt durch einen Standfuß der Referenzkonstruktion.

Abbildung 7 – 9: PV Module in angelieferten Zustand (links); Moosmatte (mitte, Quelle: Siemens & Lasak); zugeschnittenes und auf Siebdruckplatte verklebtes Kaschierungsmaterial (rechts).

Abbildung 10: Mooskonstruktion in explodierter Darstellung.

Abbildung 11: Referenzmodul in explodierter Darstellung.

Abbildung 12 – 14: Temperatursensor (links); Anschlusskasten (mitte); Datahub (rechts).

Abbildung 15: Temperatursensoren in der Mooskonstruktion (links);
Temperatursensoren in der Referenzkonstruktion (rechts).

Abbildung 16: Temperaturverlauf des gesamten Messzeitraums.

Abbildung 17: Markierung B1

Abbildung 18: Markierung B2

Abbildung 19: Markierung B3

Abbildung 20: Markierung B4

Abbildung 21: Markierung B5

Abbildung 22: Markierung B6

Abbildung 23: Markierung B7

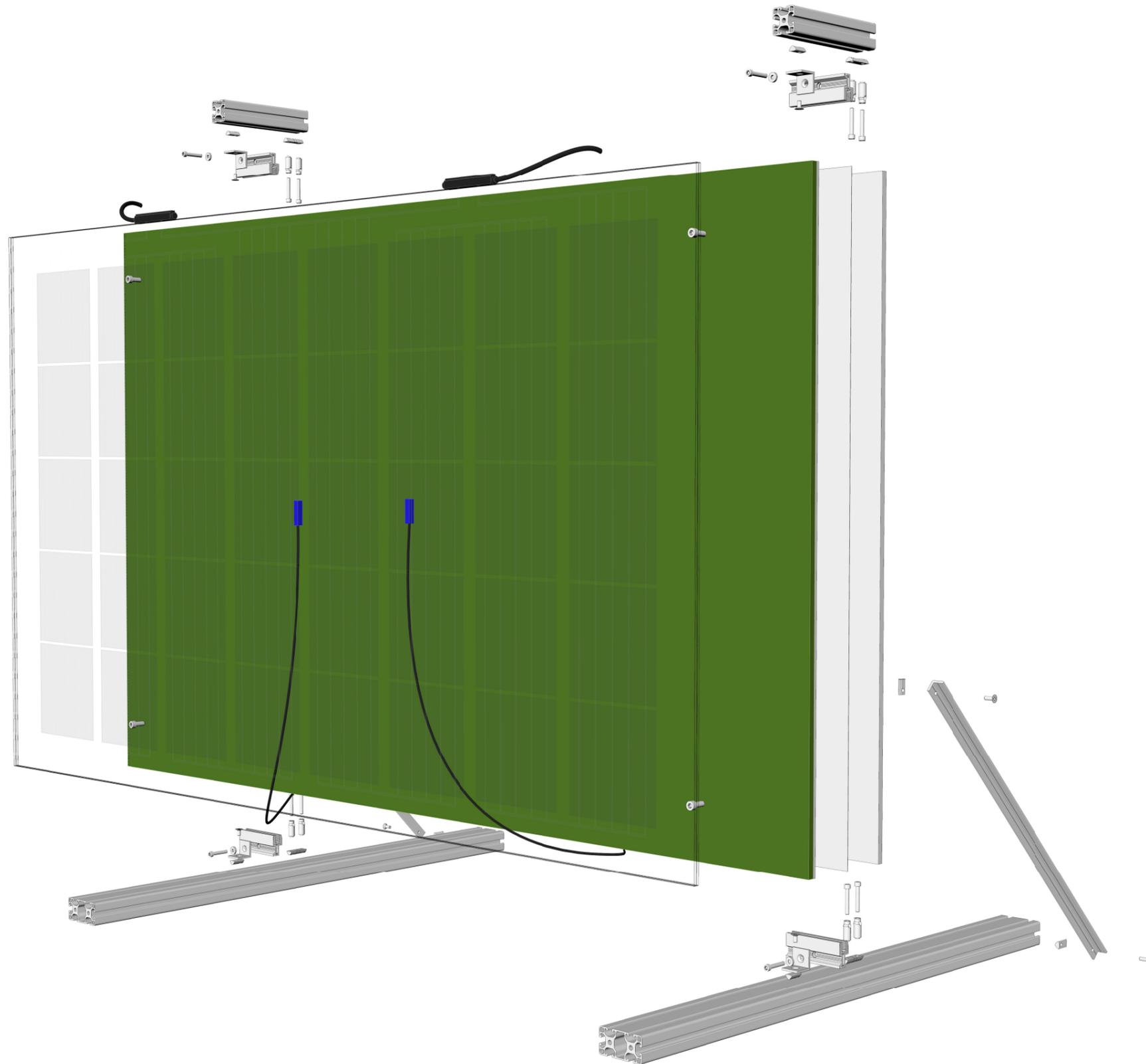
Abbildung 24: Verbesserung der Modulleistung von 12:00 – 15:00 Uhr

Abbildung 25: Trocknungsverhalten des Moooses

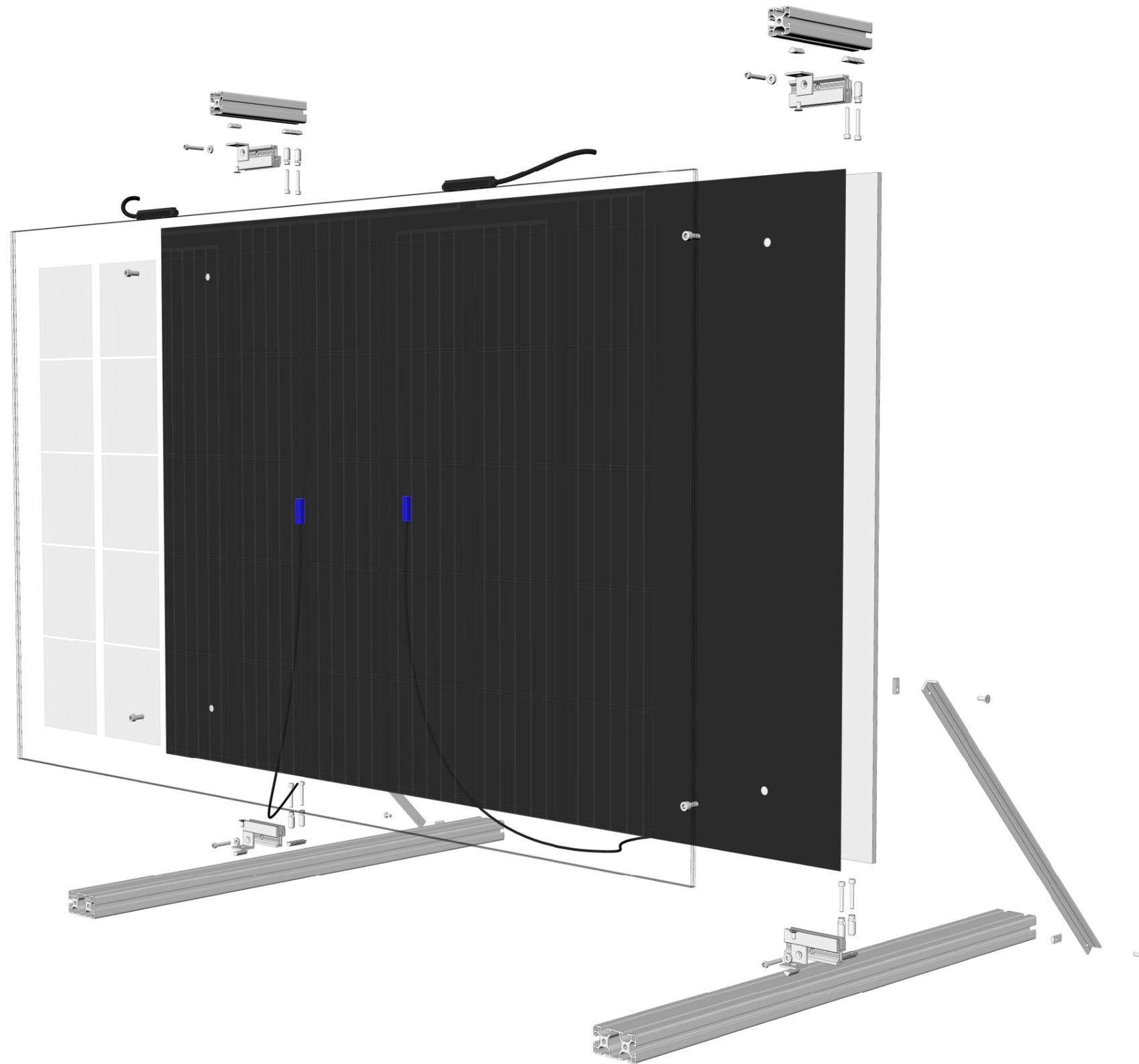
Alle Darstellungen gelten als eigene, sofern nicht anders angegeben.

9. Anhang

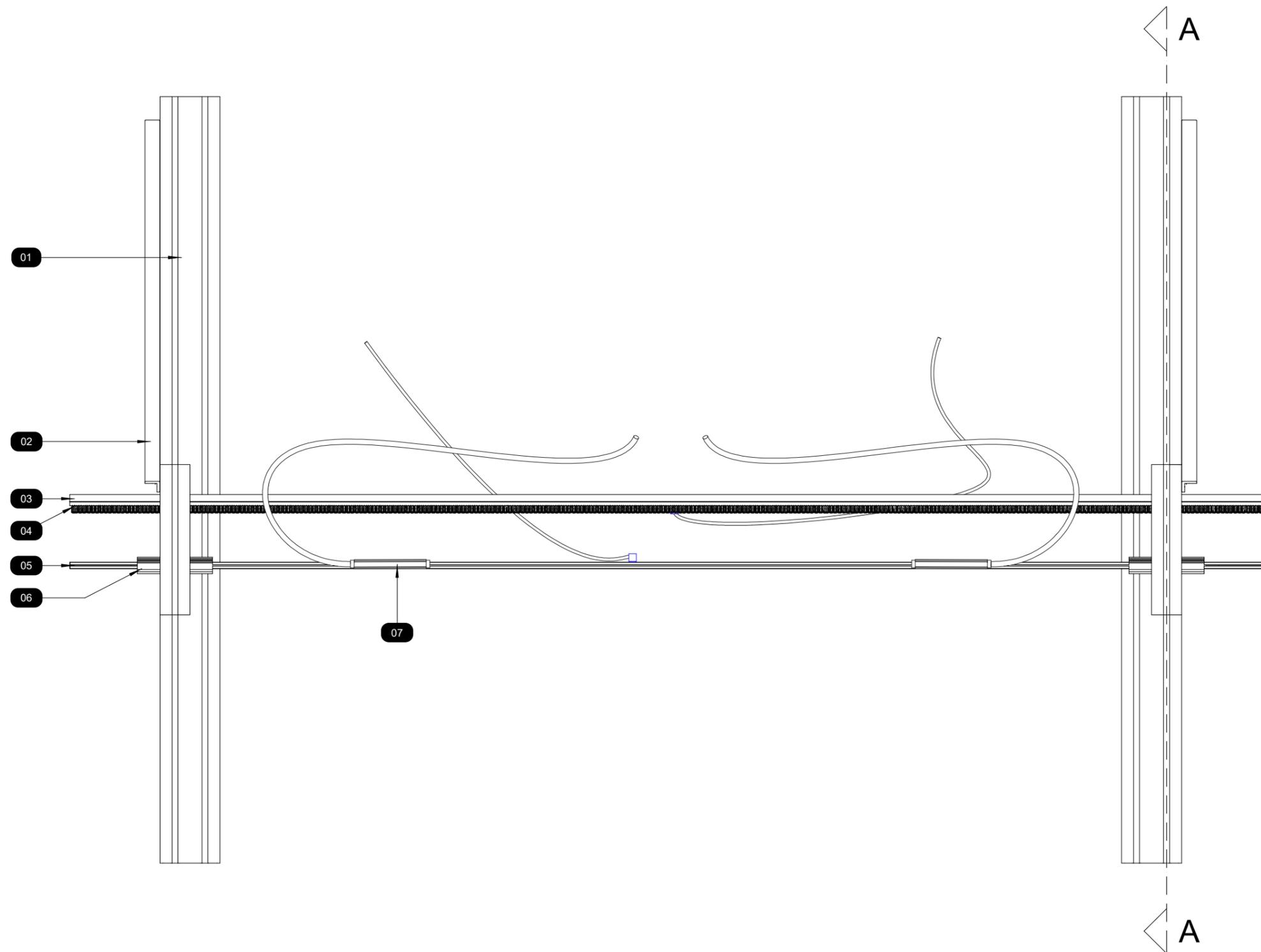
9.1 Planzeichnungen



Planinhalt	Mooskonstruktion	
Projekt	"PVMoss"	
Projektadresse	Johann-Hittorf-Straße 8, 12489 Berlin	Darstellung Explosionszeichnung
Betreuer:innen	Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard, M.Sc. Frederik Ecke	Maßstab -
Planverfasser:in	Matteo Gibb - 33345635	Plannummer 001

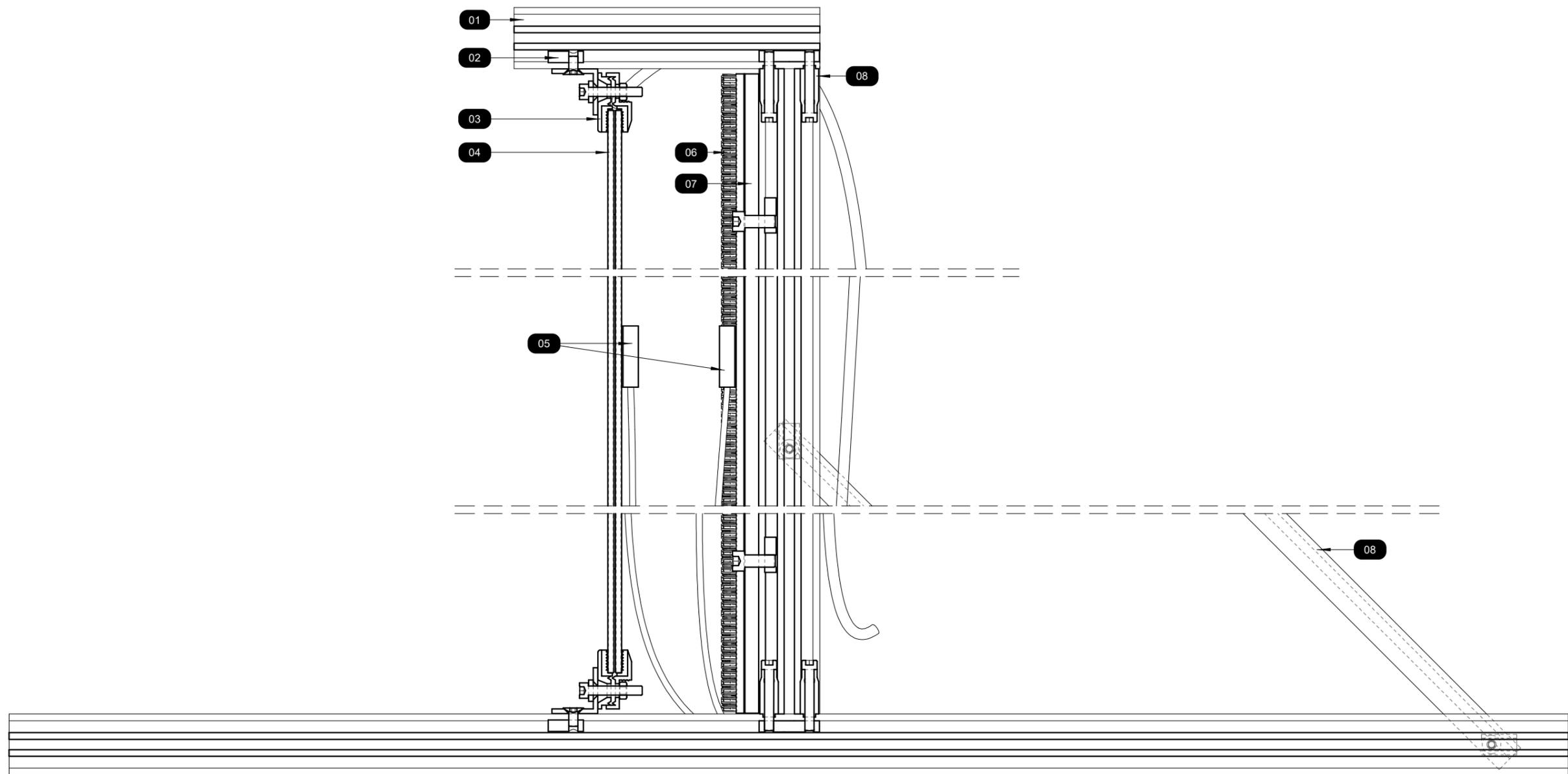


Planinhalt		
Projekt	"PVMoss"	
Projektadresse	Johann-Hittorf-Straße 8, 12489 Berlin	Darstellung Explosionszeichnung
Betreuer:innen	Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard, M.Sc. Frederik Ecke	Maßstab -
Planverfasser:in	Matteo Gibb - 33345635	Plannummer 002



- 01 Aluminiumprofil 40 x 80 x 1000 mm
- 02 L-Winkelprofil 20 x 20 x 680
- 03 Siebdruckplatte 1600 x 1000 x 9 mm
- 04 Moosmatte 1600 x 1000 x 20 mm
- 05 Semitransparentes PV-Modul 1600 x 950 x 9 mm
- 06 Laminatendklemme 100 mm
- 07 Junctionbox 1,5 x 1,25 x 10,58 mm

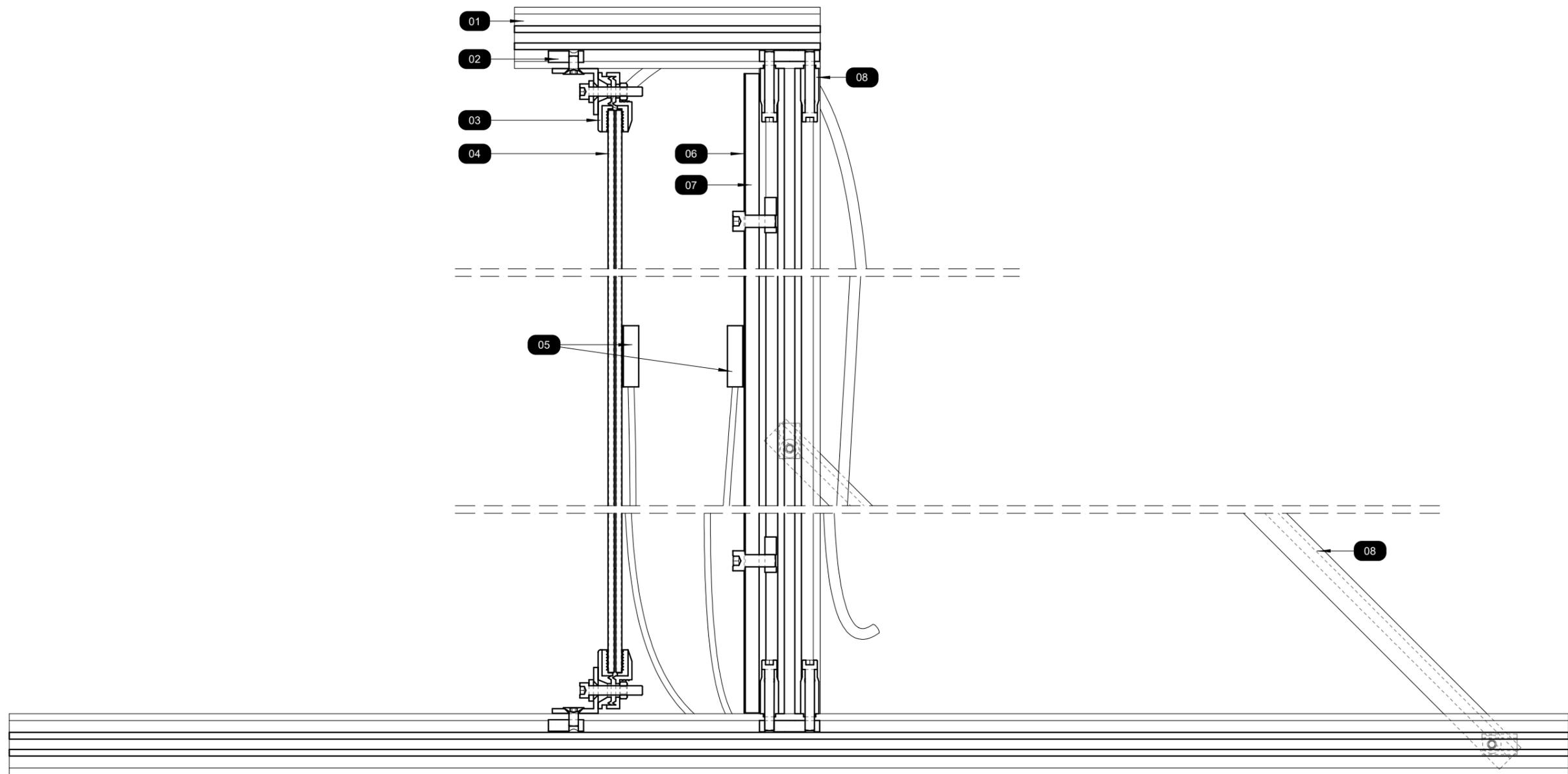
Planinhalt	Mooskonstruktion	
Projekt	"PVMoss"	
Projektadresse	Johann-Hittorf-Straße 8, 12489 Berlin	Darstellung Draufsicht
Betreuer:innen	Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard, M.Sc. Frederik Ecke	Maßstab 1:6
Planverfasser:in	Matteo Gibb - 33345635	Plannummer 003



- 01 Aluminiumprofil 40 x 40 mm
- 02 Nutenstein M8
- 03 Laminatendklemme 100 mm
- 04 Semitransparentes PV-Modul 1600 x 950 x 9 mm
- 03 Temperatursensor 10 x 10 x 40 mm
- 06 Moosmatte 1600 x 1000 x 20 mm
- 07 Siebdruckplatte 1600 x 1000 x 9 mm
- 08 Automatikverbinder 35 x 40 x 14 mm
- 09 L-Winkelprofil 20 x 20 x 680 mm

- Senkkopfschrauben M6 12 mm, Edelstahl, verzinkt, sechskant
- Zylinderkopfschrauben M6 40 mm, "
- Zylinderkopfschrauben M8 20 mm, "

Planinhalt	Mooskonstruktion	
Projekt	"PVMoss"	
Projektadresse	Johann-Hittorf-Straße 8, 12489 Berlin	Darstellung Schnitt AA
Betreuer:innen	Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard, M.Sc. Frederik Ecke	Maßstab 1:3
Planverfasser:in	Matteo Gibb - 33345635	Plannummer 004



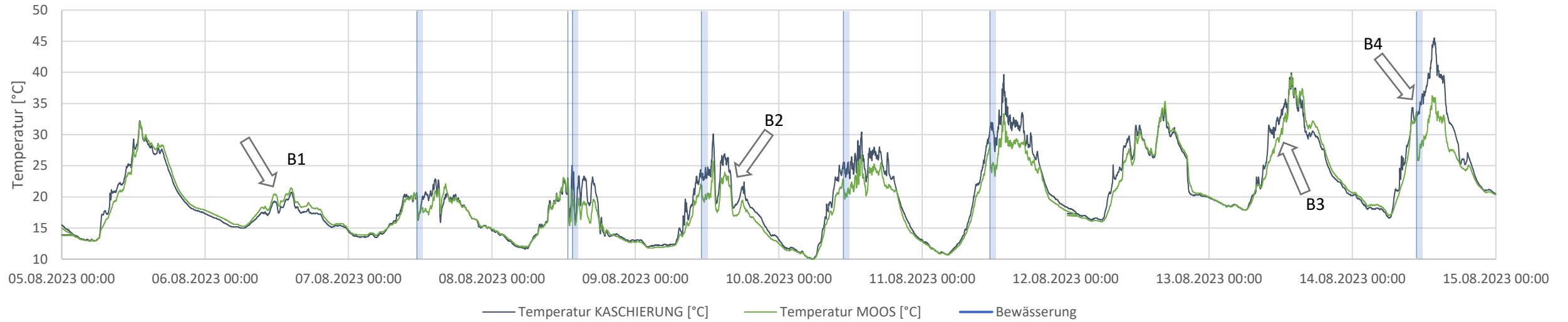
01 Aluminiumprofil 40 x 40 mm
 02 Nutenstein M8
 03 Laminatendklemme 100 mm
 04 Semitransparentes PV-Modul 1600 x 950 x 9 mm
 03 Temperatursensor 10 x 10 x 40 mm
 06 Kaschierung 1600 x 950 x 0.5 mm
 07 Siebdruckplatte 1600 x 1000 x 9 mm
 08 Automatikverbinder 35 x 40 x 14 mm
 09 L-Winkelprofil 20 x 20 x 680 mm

Senkkopfschrauben M6 12 mm, Edelstahl, verzinkt, sechskant
 Zylinderkopfschrauben M6 40 mm, "
 Zylinderkopfschrauben M8 20 mm, "

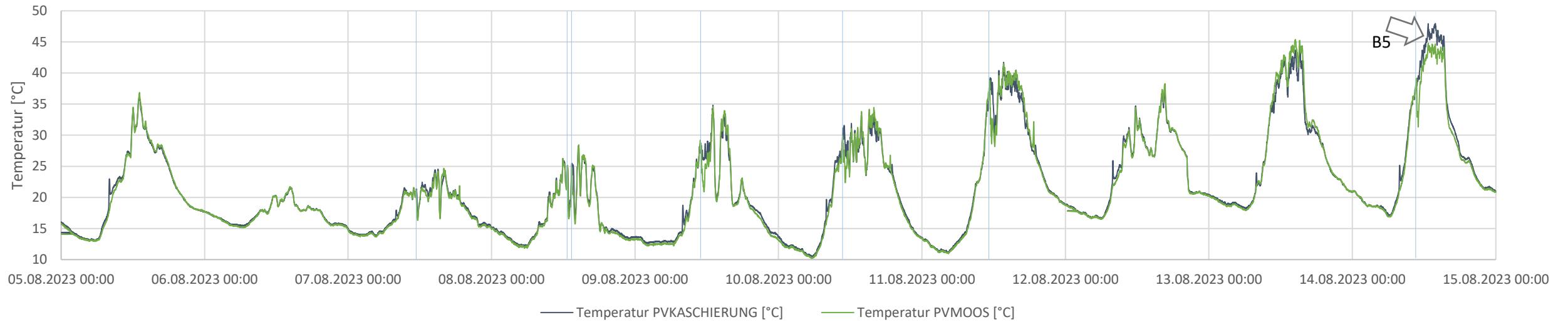
Planinhalt	Referenzkonstruktion	
Projekt	"PVMoss"	
Projektadresse	Johann-Hittorf-Straße 8, 12489 Berlin	Darstellung Schnitt AA
Betreuer:innen	Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard, M.Sc. Frederik Ecke	Maßstab 1:3
Planverfasser:in	Matteo Gibb - 33345635	Plannummer 005

9.2 Diagramme – Wochenübersicht

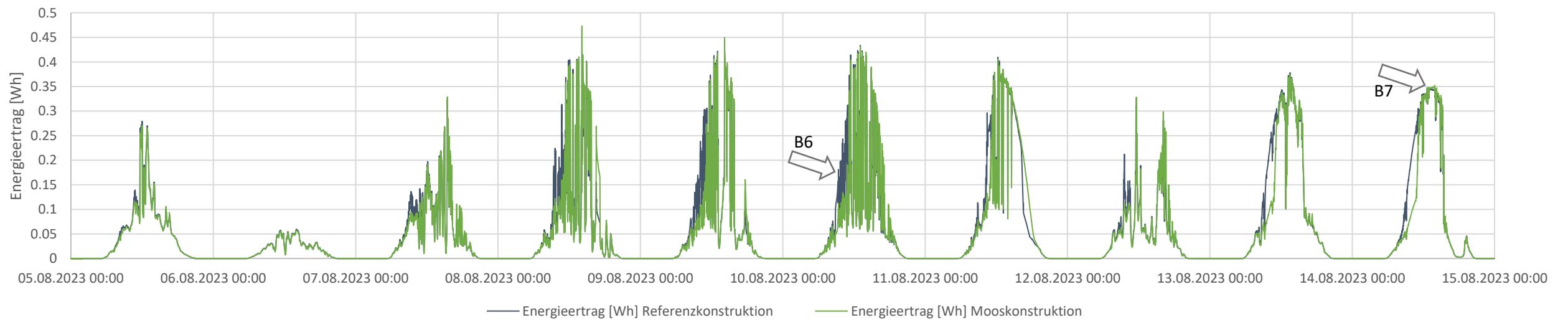
05.08. – 14.08.2023 Moos- und Kaschierungstemperatur



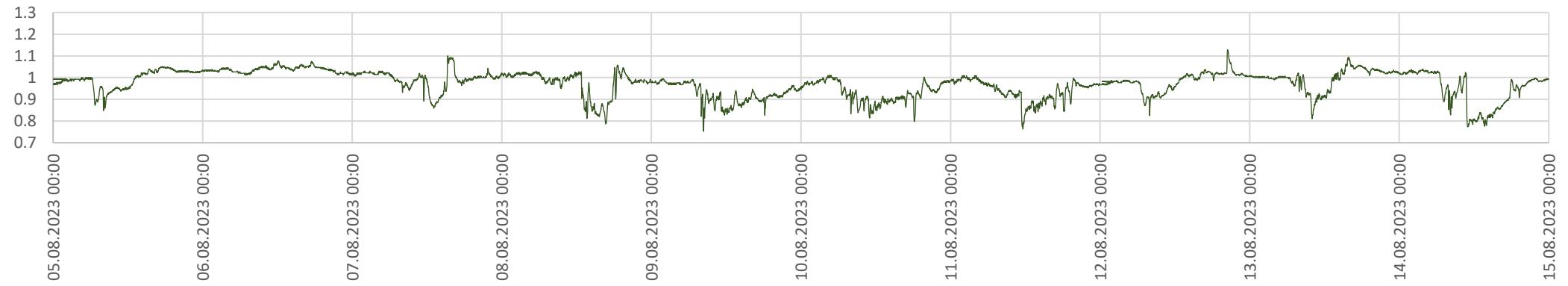
05.08. – 14.08.2023 PV-Modultemperaturen



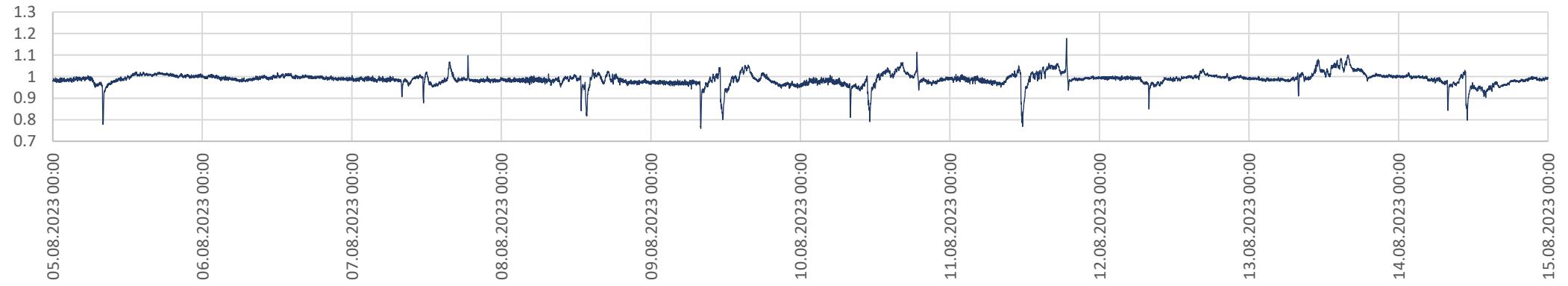
05.08. – 14.08.2023 Energieerträge



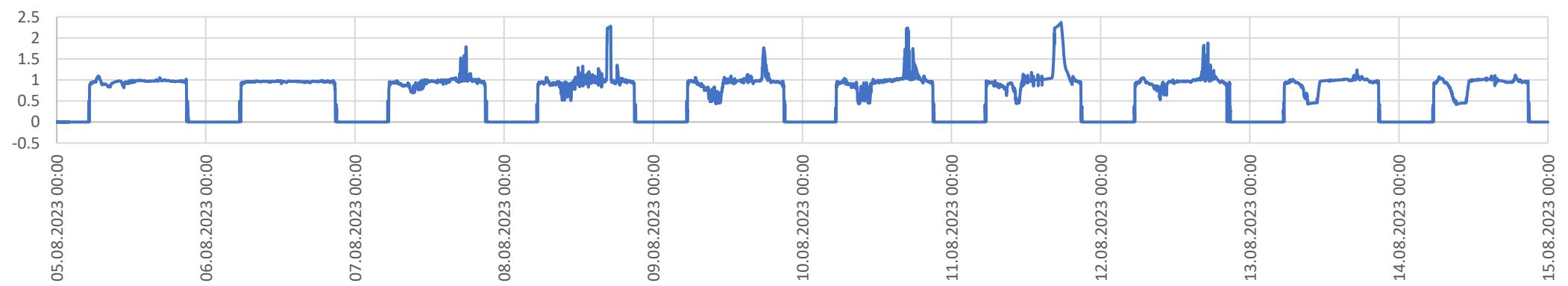
Temperaturverhältnisse von PVMoos und PVKaschierung



Temperaturverhältnisse von PVMoos und PVKaschierung



PVMoos/PVKaschierung



9.3 Messprotokoll

Tag	Uhrzeit der Begehung	Wetter	Außentemperatur (gemittelt)	Zustand der PV	Zustand der Kaschierung	Zustand des Moooses	Uhrzeit der Bewässerung	Volumen der Wassergabe in l	Richtung der Wassergabe	Bemerkungen
05.08.2023	-	-	17,8 °C (DWD)	-	-	-	-	-	-	-
06.08.2023	-	-	16,2 °C (DWD)	-	-	-	-	-	-	-
07.08.2023	11:15 h	Bewölkt, stärkerer Regen	16,5° C (DWD)	gut	leicht vom Untergrund gelöst, Ausbesserungsmaßnahmen erforderlich	gut	11:20 Uhr, Regen bis ca. 11:37 Uhr	1,75 l	von vorne	Abbruch der Bewässerung aufgrund von Regen, Die Kaschierung hat sich an der linken Seite gelöst
08.08.2023	12:35	Bewölkt, stärkerer Regen	14,9° C (DWD)	gut	Ablösung von Platte wurde behoben	gut	12:40 Uhr, stärkerer Regen, 13:24-13:36	1 und 4,5 l	von vorne	Um 13:24 Uhr liegt TEMP 2.1 frei und wird nicht von Wafern verschattet.
09.08.2023	10:58	Heiter bis wolkig, kein Regen	15,9 °C (DWD)	gut	gut	gut	11:03 – 11:25 Uhr	5,5	von vorne	
10.08.2023	10:30 Uhr	Heiter bis wolkig	16,2 °C (DWD)	gut	gut	gut	10:43	5,5	von vorne	Verschattung der PV um 11:30, Foto des Trocknung um 12:17 Uhr
11.08.2023	11:11 Uhr	Sonnig mit ein paar Wolken	19,0 °C (DWD)	gut	gut	gut	11:17	5,5	von vorne	-
12.08.2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13.08.2023	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14.08.2023	10:35 Uhr	Wolkenlos, Sonnig	23,4°C (DWD)	gut	gut	gut	10:41 – 10:57 Uhr	5,5 l	von vorne	-

9.4 Datensätze

Die Rohdaten können auf Nachfrage zu Verfügung gestellt werden.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die folgende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war.

Berlin, den 29.08.2023

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'H. Giff', written above a horizontal line.

Unterschrift Verfasser*in