

## Energieeffizientes Solargewächshaus für den energieautarken Fruchtanbau mittels regenerativ erzeugter Energieströme und intelligenter Verwertungstechnologie – SolGreen

Stefan Krause<sup>1</sup>, Liesa Hübner<sup>1</sup>, Peter Kaufmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Strukturleichtbau und Energieeffizienz gGmbH

### Abstract

Terrestrische Ressourcenknappheit und globales Bevölkerungswachstum erfordern eine fortschrittliche, nachhaltige Nahrungsmittelproduktion unter Berücksichtigung der europaweiten Klimaziele. Der Anbau in Gewächshäusern spielt dabei eine bedeutende Rolle. Solare Energiegewinnung (PV, ST, PVT) auf Gewächshäusern ermöglicht gleichzeitig Energieerzeugung und Beleuchtungsoptimierung bzw. Verschattung. Unter Berücksichtigung steigender Energiekosten und der zum Gelingen der Energiewende nötigen Abkehr von der Nutzung fossiler Brennstoffe stellt das Projekt einen Beitrag im Rahmen der Ressourceneffizienz dar.

Ziel des Projektes SolGreen war die Entwicklung einer Technologie zur gleichzeitigen Wandlung der solaren Energie in elektrische und thermische Energie mittels eines teiltransparenten PVT-Kollektors einschließlich ihrer Nutzung für den Anwendungsfall in Gewächshäusern. Damit konnte ein energieeffizientes Solargewächshaus mit innovativer PVT-Technologie für den energieautarken Fruchtanbau mittels regenerativer Energieströme und intelligenter Verwertungstechnologien unter wirtschaftlichen Bedingungen für einen nahezu ganzjährigen Anbau entwickelt werden.

### 1. Einleitung

Die Ausgangssituation ist gekennzeichnet durch die steigenden Anforderungen zur Minderung der Treibhausgase über alle Bereiche mit dem Ziel der Einhaltung der Forderungen der Weltklimakonferenz von Paris (vgl. [1], [2], [3]) sowie die darauf aufbauenden nationalen und internationalen Gesetze und Abkommen. Dabei stellt die Logistik im Zusammenhang mit Lebensmitteltransporten einen wesentlichen Treibhausgasemittenten dar (vgl. [4] [5], [6]).

Wie aus Abbildung 1 deutlich wird, erzeugen international transportierte Früchte durch Transport mit Flugzeug und Produktion mehr als Faktor 20 CO<sub>2</sub> pro kg Gemüse und Früchte.

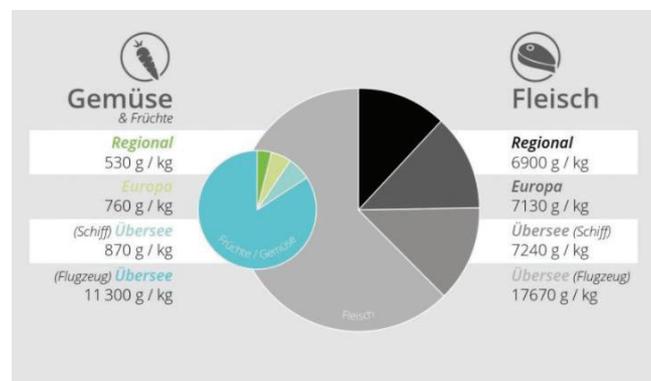


Abb. 1: Vergleich Treibhausgasemissionen von Gemüse im regionalen und internationalen Anbau [4]

Demnach ist die Verwendung von regionalem Gemüse und Früchten klimaschonender, wie es auch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit [7] sowie weitere Quellen belegen (siehe dazu [8], [9], [10], [11]).

Dabei ist neben Freilandanbau von Obst und Gemüse der Einsatz von Gewächshäusern zur Deckung des ganzjährigen Bedarfs erforderlich [12], [13]. Die auf dem Markt verfügbaren Gewächshäuser zeichnen sich durch unterschiedliche Bauweisen (Folie vs. Glas) sowie Funktionalitäten (Heizbarkeit, Wärmerückgewinnung) aus. Für die ganzjährige Nutzung ist es dabei erforderlich, wie aus den o.g. Quellen hervorgeht, Heizungen einzusetzen. Dabei führt wie [14] darstellt, der Einsatz beheizter Gewächshäuser zu einem drastischen Anstieg der Treibhausgasbilanz, wodurch sich der ökologische Vorteil des regionalen Anbaus maßgeblich vermindert.

Die Gewächshauslösungen des Standes der Technik zeichnen sich demnach durch Lösungen aus, die das ganzjährige Betreiben des Gewächshauses nur unter erheblicher Verschlechterung der Gesamtenergieeffizienz und damit verbundener Treibhausgasemissionssteigerung ermöglichen (siehe dazu auch [15], [16], [17]).

Zur Steigerung der Energieeffizienz, um die Klimaschutzziele der EU sowie der BRD zu erreichen (siehe dazu [18], [19], [20], [21]), sind dabei sowohl Energieverbräuche zu senken als auch den Anteil Erneuerbarer Energien zu steigern. Die auf dem Markt verfügbaren Ansätze zur Umsetzung der Zielstellungen mittels Gewächshäuser setzen dabei auf PV-Lösungen in Kombination mit Wärmemanagementlösungen. Ganzheitliche Ansätze sind nicht bekannt.

Zur Erfüllung der Zielstellungen, den regionalen Anbau von Gemüse und Obst zu steigern und die damit verbundene steigende Anzahl beheizter Gewächshäuser mit den Anforderungen der Energieeffizienz durch den Einsatz regenerativer Energiequellen zu vereinen, wird im Rahmen des Vorhabens ein Gewächshaus entwickelt, welches unter Einbeziehung intelligenter Steuerungstechnologien verbunden mit einer schnellen Montagetechnologie einen energieautarken Betrieb ermöglicht.

Der Marktbedarf ergibt sich im Wesentlichen aus den Erfordernissen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gewächshäusern zur Ermöglichung des ganzjährigen energieeffizienten regionalen Anbaus von Obst und Gemüse sowie weiteren Pflanzen, da die auf dem Markt verfügbaren Gewächshäuser keine Lösung zur Erzielung der Anforderungen darstellen. Eine Abschätzung der Marktgröße zeigen aktuelle Zahlen des statistischen Bundesamtes sowie des BMEL [22], wobei dort für das Jahr 2019 ca. 1.280 ha Anbauflächen in Gewächshäusern für Deutschland allein für Gemüse angegeben werden. Zusätzliche Flächen ergeben sich aus dem Obstanbau (v.a. Beerenobst) sowie Zier- und Nutzpflanzen.

Je nach Anbaukultur, regionalen Wetterbedingungen, Finanzrahmen und dem geforderten Klimamanagement werden verschiedene Gewächshaustypen eingesetzt, vgl. Tabelle 1.

**Tab. 1: Gewächstypen und ihre Eigenschaften [23]**

Offene Systeme	Geschlossene Systeme
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzen natürlicher Ventilation</li> <li>▪ Kostengünstig</li> <li>▪ Stark abhängig von Wind</li> <li>▪ Wetterabhängig - erhöhter Bedarf an Luftentfeuchtung und Temperaturkontrolle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rein mechanische Ventilation</li> <li>▪ Großer Grad an Kontrolle über Ventilation, Temperatur und Temperaturgradient</li> <li>▪ Höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration möglich</li> <li>▪ Geringerer Pestizidbedarf</li> <li>▪ Höhere Investitionskosten</li> <li>▪ Höhere Operationskosten</li> <li>▪ Signifikant höherer Ernteertrag</li> </ul>

Typischerweise besteht ein Gewächshaus aus:

- Strukturgerüst
- Deckmaterial
- Beeten bzw. Pflanztischen
- Sonnenblenden bzw. Energieschirmen
- Heiz- und Kühlsystemen
- Ggf. CO<sub>2</sub>-Anreicherung
- Bewässerungs- und Düngesystemen
- Luftbe- und -entfeuchtungssystemen
- Kontrollsystemen

Als Deckmaterialien, bei denen UV-Stabilität eine Grundvoraussetzung für die Eignung ist, kommen Glas oder Hartplastik (PMMA, PC, PVC) zum Einsatz für Gewächshäuser mit starrer Verkleidung. Glas bietet eine hohe Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und Chemikalien, eine hohe Lichtdurchlässigkeit für sichtbares Licht, eine hohe Infrarotabsorption und eine hohe Lebensdauer. Dagegen ist Hartplastik kostengünstiger und bietet eine höhere Wärmedämmwirkung, allerdings zeigt es auch eine geringere Lichtdurchlässigkeit. Doppel- oder Dreifachverglasung werden selten eingesetzt, da der Verlust an Lichttransmission die Energieeinsparung durch Wärmedämmung überwiegt [23]. Schattierungselemente, Energieschirme, Heizung, Kühlsysteme, Bewässerungs- und Düngesysteme etc. werden nach den Wünschen der Auftraggeber in manueller oder automatischer Ausführung installiert. Bei der Errichtung eines Gewächshauses sind die größten Anteile an den Investitionskosten die Kosten für das Gewächshaus selbst sowie für die Heizung [24]. Demnach bietet sich hier ein besonderes Innovationspotenzial im Hinblick auf kostengünstigere und energieeffizientere Gewächshäuser.

Aktuell bestehen folgende Defizite:

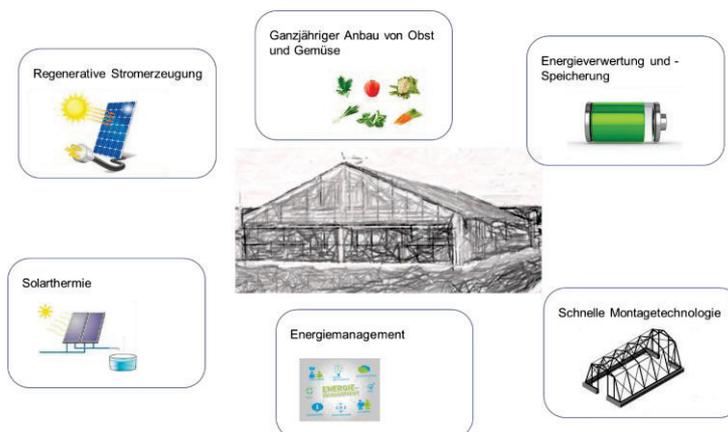
- Konventionelle Gewächshäuser werden mittels fossiler Brennstoffe beheizt (bei aktueller Preisentwicklung sehr teuer; steht im Widerspruch zu den Energiezielen)
- Bisher unzureichender Einsatz regenerativer Energien und Energiemanagementsysteme
  - Bisher nur PV und bei unzureichendem Einsatz
  - Erfordernis: Senkung des Energiebedarfs, Einsatz Erneuerbarer Energien, Speicherung von solaren Energieüberschüssen saisonal und im Tag/Nacht-Zyklus
  - Einsatz niederkalorischer Systeme zur besseren Ermöglichung des Einsatzes Erneuerbarer Energien

Mit dem hier vorgestellten Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird die Grundlage für den nahezu energieautarken Gewächshausanbau unter wirtschaftlichen Bedingungen geschaffen sowie zukunftsweisende Systeme für einen nahezu ganzjährigen Anbau entwickelt.

## 2. Zielstellungen und Konzeptentwicklung

Die technologische Zielstellung des FuE-Projektes besteht in der Entwicklung eines energieeffizienten Solargewächshauses für Landwirte mit dem Ziel des energieautarken Fruchtanbaus mittels regenerativ erzeugter Energieströme und intelligenter Verwertungstechnologie.

Die angestrebten Funktionalitäten des zu entwickelnden Gewächshauses zeigt zusammengefasst Abbildung 2.



**Abb. 2: Schematische Darstellung Entwicklungsziele**

Das entwickelte SolGreen-Gewächshaus zeichnet sich demnach aus durch

- regenerative Erzeugung thermischer und elektrischer Energie aus solarer Einstrahlung
- Einbindung der Energieströme in ein Energiemanagementsystem in Verbindung mit anforderungsgerechten Speicher- und Verwertungstechnologien
- schnell montierbare Stahlkonstruktion

mit dem Ziel des energieeffizienten ganzjährigen Anbaus von Obst und Gemüse mit minimalen CO<sub>2</sub>-Footprint zu ermöglichen.

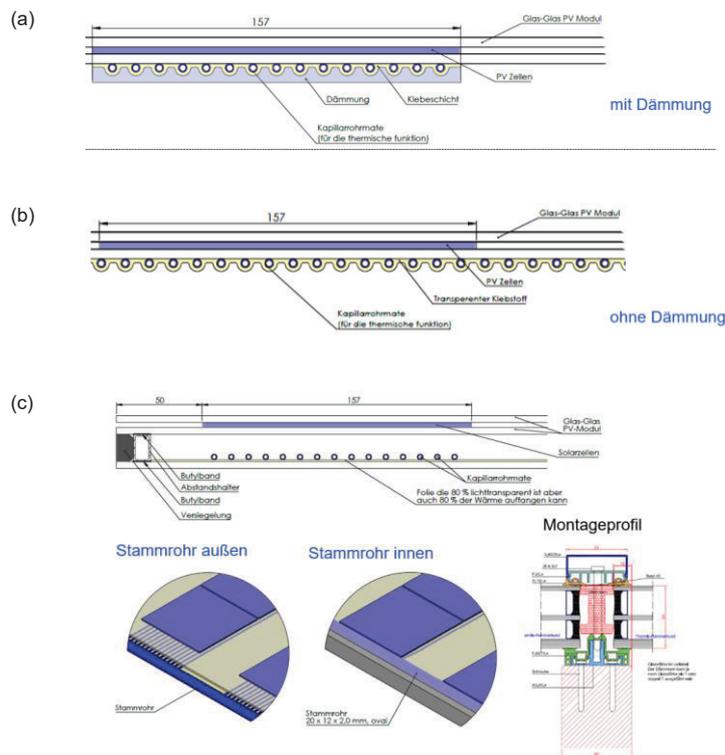
### 3. Erprobung und Technologieevaluierung

Ein wesentlicher Bestandteil in der Entwicklung des energieeffizienten Solargewächshauses bildet die PVT-Technologie zur regenerativen Energiegewinnung bei gleichzeitiger Verschattungsfunktion und hinreichender Lichttransparenz zur Gewährleistung optimaler Anbaubedingungen für einen möglichst breiten Bereich an Pflanzenkulturen.

Für die Entwicklung der Kollektoren wurde eine Anforderungsanalyse erstellt, die sowohl technologische als auch anwendungsspezifische Anforderungen berücksichtigt. Im Ergebnis der Anforderungsanalyse und dem daraus abzuleitenden Pflichtenheft wurden erste Lösungsansätze für PVT-Kollektoren entwickelt (s. Abbildung 3 und 4). Diese stellen eine Kombination aus PV-Modulen und Solarthermie-Kollektoren dar.



**Abb. 3: Prinzipielle Aufbauvarianten: links WÜ vollflächig auf gesamtem PV-Modul und rechts WÜ partiell (nur unter Wavern)**



**Abb. 4: Konstruktionsvarianten mit Kapillarrohrmatte: (a) direkt mit Dämmung, (b) direkt ohne Dämmung und (c) mit Luftspalt und zwei Möglichkeiten zur Stammrohrführung sowie mögliches Montageprofil**

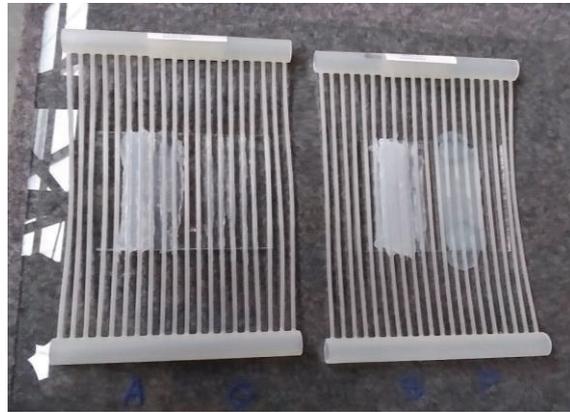
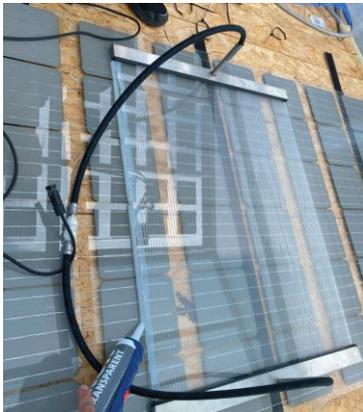
### 3.1 Labortechnische Voruntersuchung der PVT-Fertigung

Zur Herstellung der PVT-Module labortechnische Voruntersuchungen zur Erprobung verschiedener Fügetechnologien durchgeführt. Die Anforderungen an diese Fügetechnologie lagen in einer hohen Wärmeleitfähigkeit bei maximaler Transparenz, wobei die durchgeführten Recherchen zeigen, dass glasklare Systeme immer wesentlich kostenintensiver sind als ihre opaken Pendanten. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene transparente Klebe- und Dichtungsmaterialien untersucht. Außerdem wurden die Möglichkeiten von lösbaren Verbindungen, wie Klemmen und Laminieren sowie formschlüssigen Verbindungen betrachtet, bei denen der flächige Wärmeübertrager über Klemmleisten mit dem PV-Modul verbunden ist. Zur Verbesserung des Wärmeübergangs wurden Al-Profil-Schienen zur Optimierung des Wärmeübergangs im Spalt zwischen PV-Modul und Wärmeübertrager verwendet.

Bereits in den Vorversuchen zeigte sich, dass nicht lösbare Verbindungen eine höhere Verbundfestigkeit aufweisen. Für die Entwicklung der Klebetechnologien wurden entsprechend eines erarbeiteten Pflichtenhefts Voruntersuchungen (Haft-Zug-Untersuchen, Temperaturbelastungen, Temperaturwechselbelastungen, etc.) mit verschiedenen Klebstoffen sowie den dazugehörigen Vor- und Nachbehandlungen durchgeführt.

Um das Konzept des Verbindens von PV- und WÜ-Elementen weiterzuentwickeln, wurden zunächst Klebeversuche mit verschiedenen Arten von Klebern durchgeführt. Hierbei wurde transparente PP-Kapillarrohrmatten auf eine Glasscheibe geklebt. Bei einigen Kapillarrohren wurde nur die Unterseite verklebt, während andere vollständig eingebettet wurden, wie in Abbildung 5 dargestellt. Vor dem Auftragen der Kleber wurden die Oberflächen mit handelsüblichem Glasreiniger entfettet.

Einkomponenten-Kleber wurden manuell aus der Verpackung aufgetragen, Zweikomponenten-Kleber entsprechend der Gebrauchsanweisung angemischt und aufgebracht.



**Abb. 5: Klebeversuche PP auf Glas zur Entwicklung der Füge-technologie PV-WÜ**

Tabelle zeigt die Ergebnisse der Versuche. Demnach zeigen vier Varianten eine gute Anbindung der Kapillarrohrmatte am Glas, insbesondere bei Volleinbettung. Die Transparenz ist erwartungsgemäß umso höher, je dünner die Klebschicht ist, jedoch sind drei der untersuchten Transparenzkleber nur bei extrem dünnen Schichten optisch vollständig transparent.

Allerdings stellte sich bereits nach wenigen Wochen eine deutliche Verfärbung der Röhrchen ein, die Klebeverbindungen begannen sich aufgrund der Schälbelastung im montierten Zustand der Testobjekte abzulösen. Nach Rücksprache mit dem Hersteller Clina wurde empfohlen, stattdessen eine nicht-transparenten Variante der Kapillarrohrmatten einzusetzen, um Alterungserscheinungen vorzubeugen.

**Tabelle 2: Versuchsergebnisse - Kleben**

Aquarium Silikon transparent	Pattex ONE FOR ALL CRYSTAL	Silikon transparent	Ponal Holzleim wasserfest
			
Viskos → leichte Applikation	Hochviskos → schwierige Applikation (hoher Kraftaufwand)	Viskos → leichte Applikation	Niederviskos → schwierige Applikation (läuft weg)
Hohe Transparenz nur bei dünner Schicht	Hohe Transparenz	Hohe Transparenz nur bei dünner Schicht	Hohe Transparenz nur bei sehr dünner Schicht

Mit dem 2-Komponenten-Klebersystem Elastocoat konnten gute Ergebnisse erreicht werden. Allerdings kam es nach einige Wochen realistischer Einwirkungen von UV-Einstrahlung, Temperaturgradienten, Feuchteintrag zum Ablösen der Matten mit Elastocoat-Verguss ohne vorherigen Auftrag von Haftvermittlern (Primer) von den PV-Modulen.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die finale Klebstoffkonstellation, basierend auf einer 2K-Polyurethan-Vergussmasse, Elastocoat C95, die eine gute UV-Beständigkeit, sowie eine hohe Wärmeleitfähigkeit vom Modul zum Kapillarrohr aufweist, entwickelt. Eine Herausforderung bei der Verwendung dieses Klebstoffes bestand in den Hafteigenschaften der Vergussmasse auf Glas, da sich in einigen Vorversuchen, wie bereits bei den zuvor betrachteten Klebevarianten, bereits nach einigen Tagen im montierten Zustand aufgrund der Schälbelastung vom Test-Modul eine Ablösung der Matten einstellte. Abhilfe schaffte das vorherige Aufbringen eines Haftvermittlers (Sika Primer 207). Die Testmodule wurden unterhalb der Einzelzellen des PV-Modul mit Primer eingestrichen und die Kapillarrohrmatten präzise auf den Modulen in Position gebracht. Die mit Haftvermittler eingestrichenen Flächen wurden mit einer Kontur aus Gummi-Dichtband umgeben, sodass eine Gussform für den Kleber unterhalb jeder Einzelzelle des PV-Moduls entstand. Diese Form wurde anschließend mit der 2K-Polyurethan-Vergussmasse ausgefüllt und die Kapillarrohre umschlossen. Es konnte eine langzeitstabile, elastische und witterungsbeständige Fügevariante mit einer besonders guten Wärmeleitfähigkeit und geringer Verschattung, da die Kapillarrohrmatten ausschließlich hinter den Einzel-PV-Zellen vergossen wurden, entwickelt werden.

### 3.2 Demonstratoruntersuchungen - Freifeld-Solarlabor

Für die wissenschaftliche Erprobung der Funktionsfähigkeit und Leistungsparameter der entwickelten PVT-Modullösungen wurde ein spezieller Versuchsstand auf dem Freifeld-Solarlabor des ISE entwickelt. Dieser besteht aus einer I-Profilkonstruktion, welche Platz für die gleichzeitige Erprobung von bis zu 6 PVT-Modulen bietet (s. Abbildung 6 und 7). Für die Abbildung einer vergleichbaren Gewächshausatmosphäre wurde die Tragkonstruktion mit transparenten PC-Stegplatten verkleidet. Die Aufbauhöhe von ca. 1,5 m wurde als Kompromiss zwischen einer guten Zugänglichkeit für Installations- und Wartungsarbeiten sowie einer hinreichenden Stabilität gegenüber Windlasten gewählt. Die PVT-Module sind über speziell entwickelte Profillösungen mit dem Tragskelett des Versuchsstandes verbunden. Der Versuchsstand ermöglicht die Erfassung der Umgebungsbedingungen (Globalstrahlung, Außentemperatur, Windgeschwindigkeiten) sowie der elektrischen und thermischen Leistungsparameter der PVT-Module. Über einen individuell steuerbaren Kühlkreislauf lässt sich der Einfluss unterschiedlicher Betriebsparameter (Volumenstrom, Vorlauftemperatur) auf die thermische Leistung des PVT-Moduls in Abhängigkeit von verschiedenen Umgebungsbedingungen bestimmen.



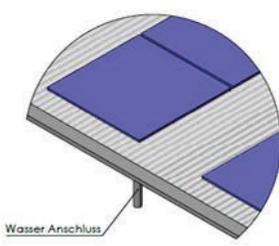
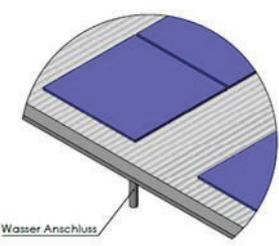
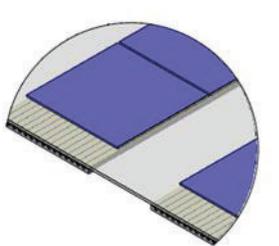
**Abb. 6: Versuchsstand zur Erprobung der PVT-Kollektoren: (a) Konstruktionsentwurf und (b) Tragskelett**



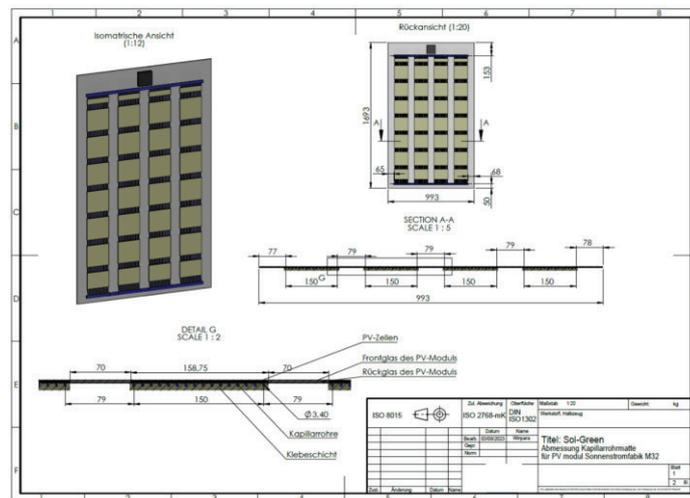
Abb. 7: Versuchsstand zur Erprobung der PVT-Kollektoren

Für die im Rahmen der Laborversuche untersuchten PVT-Module wurden zwei unterschiedliche Glas-Glas-PV-Module des Herstellers Wismar Solar verwendet. Der Modultyp M48 besteht aus 48 monokristallinen Solarzellen und hat eine elektrische Spitzenleistung von 240 W<sub>p</sub> bei einer Transparenz von ca. 27 %. Der Modultyp M32 besteht aus 32 monokristallinen Solarzellen und hat eine elektrische Spitzenleistung von 170 W<sub>p</sub> bei einer Transparenz von ca. 50 %.

Tab. 3: PVT-Modulkonzepte mit unterschiedlichen Wärmeübertragungssystemen

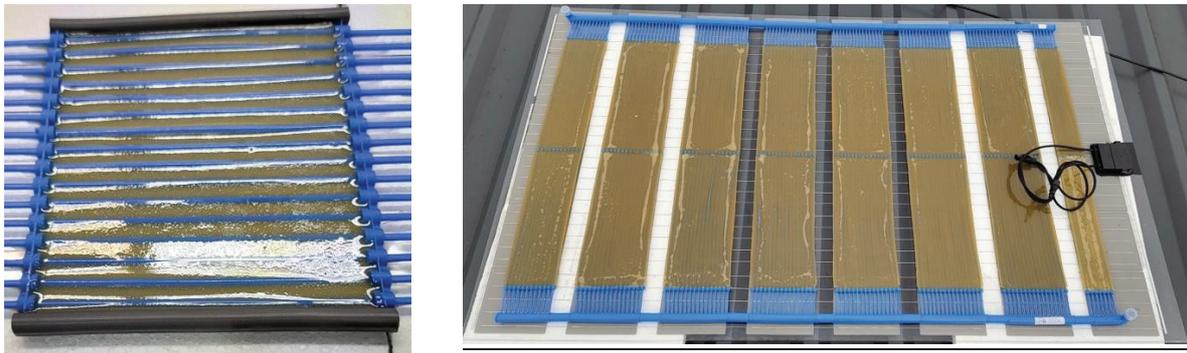
	V1 – LaWin-Glas	V2 – PC-Stegplatte	V3 – Kapillarrohrmatte
Bild			
Verbindung	Klemmverbindung mit Aluleisten zur Wärmeübertragung	Klemmverbindung mit Aluprofilen	Klebeverbindung mit Pattex ONE FOR ALL CRYSTAL
WÜ-Fläche	vollflächig	vollflächig	partiell
Kontaktfläche	vollflächig	vollflächig	linear

Für die thermische Energiewandlung an der Rückseite der Glas-Glas-PV-Module-Wärmeübertrager wurden die in Tabelle 3 dargestellten Wärmeübertragerkonzepte untersucht. Am geeignetsten erwiesen sich hier die rückwärtige Anbringung von UV-beständige Kapillarrohrmatten aus Polypropylen. Für eine optimale Wärmeübertragung zwischen den PV-Modulen und den Kapillarrohrmatten wurde die umwelt- und UV-stabile 2K-Vergussmasse (Elastocoat C95 – Vosschemie) verwendet. Um eine gute Haftung der Vergussmasse auf den PV-Modulen zu gewährleisten, wurde diese zuvor mit einer Primer-Grundierung (Sika 207) versehen. Das Aufbringen sowohl des Primers als auch der Vergussmasse erfolgte nur unter den Solarzellen (s. Abbildung 8).



**Abb. 8: Versuchsstand zur Erprobung der PVT-Kollektoren**

Nach dem Trocknen des Haftvermittlers wurden auf den Rückseiten der PV-Module Guss-Formen oberhalb der Einzelzellen aufgebracht. Hierfür wurden Gummi-Dichtbänder und Clina Omega-Bänder verwendet, um Einzelformen zu erstellen (s. Abbildung 9).



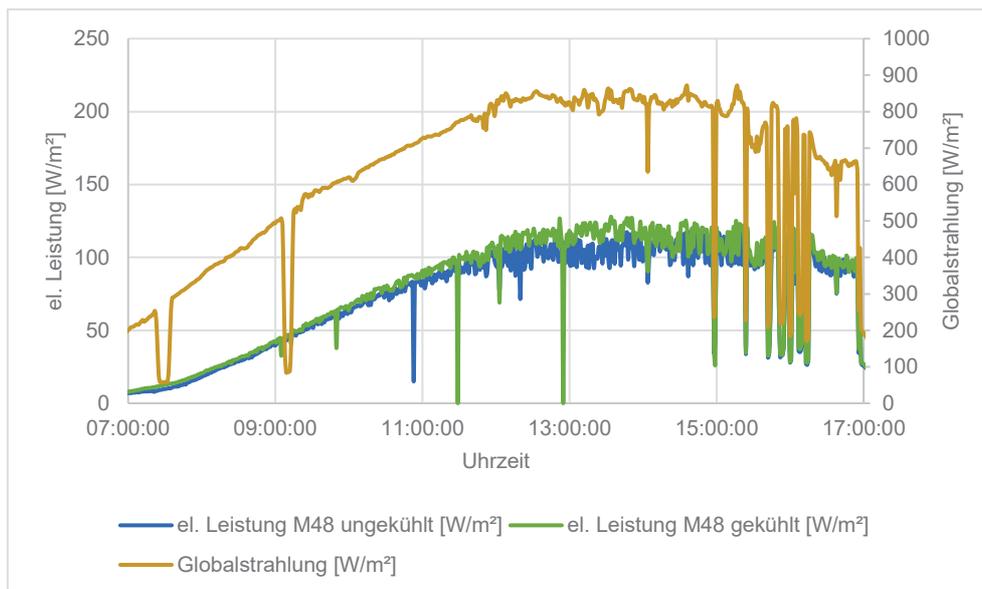
**Abb. 9: Aufnahmen aus der Fertigung der PVT-Module, links: ausgegossene Einzelform M32-PVT-Modul, rechts: streifenförmig vergossenes M48-PVT-Modul**

Nach dem Ausgießen der Einzelformen mit Elastocoat wurden die Kapillare der Matte in der noch flüssigen Vergussmasse heruntergedrückt, um einen guten Kontakt mit dem PV-Modul während des Aushärteprozesses zu gewährleisten (s. Abbildung 10).



**Abb. 10: Aufnahmen aus der Fertigung der M48-PVT-Module**

Für die Evaluierung der elektrischen Leistungsfähigkeit der PVT-Module wurden Untersuchungen mit verschiedenen PV-Modultypen (M48, M32), bei verschiedenen Himmelsausrichtungen (West-Ost-Ausrichtung), einem repräsentativen Dachneigungswinkel (15°) bei unterschiedlichen technischen Betriebsparametern (Volumenstrom, Vorlauftemperatur) und variierenden Umgebungsbedingungen (Globalstrahlung, Außentemperatur, Windgeschwindigkeit) durchgeführt. Die nachstehende Abbildung zeigt auszugsweise ein Messergebnis aus der Erprobung eines M48-PVT-Moduls.



**Abb. 11: Nachweis elektrischer Energie**

Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass die Kühlung der PV-Module einen Leistungsabfall, infolge der Modulerwärmung verhindert. Die Leistung von PV-Module wird nach STC-Testbedingungen standardmäßig bei Umgebungstemperaturen von 25 °C bestimmt. Für höhere Temperaturen ergeben sich je nach Modultyp Leistungsverluste von ca. 0,3 – 0,4 % Verlust an Leistung pro Kelvin. Diesen Leistungsabfällen kann durch eine wirkungsvolle Kühlung der Module durch Kapillarrohrmatten entgegengewirkt werden.

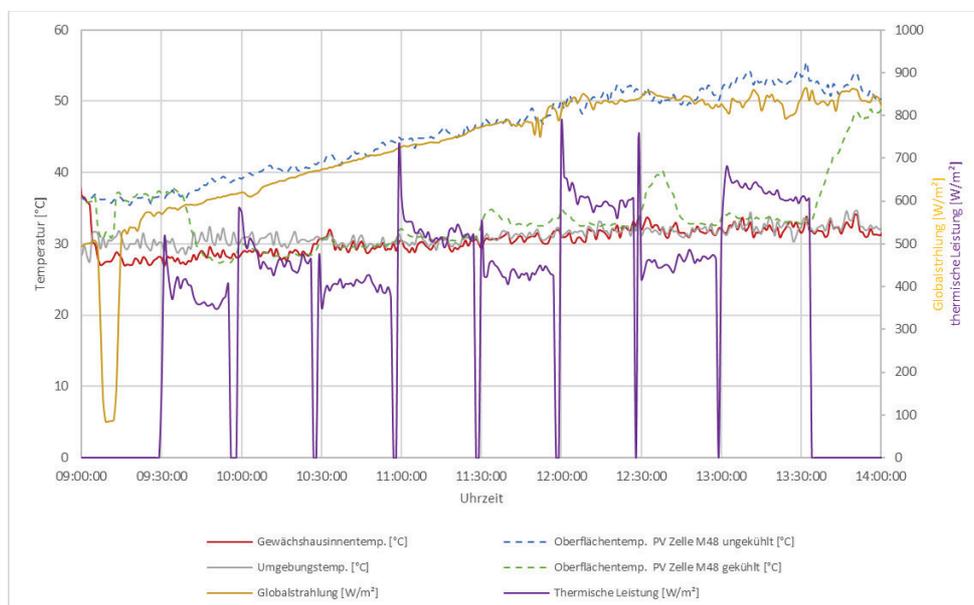
Die in Abbildung 11 dargestellten Messergebnisse resultieren aus den nachfolgenden Versuchsbedingungen:

- Vorlauftemperatur ca. 15°C

- Durchfluss: ca. 1,8 Liter/min. → 108 Liter/h → 80 Liter/h m<sup>2</sup>
- Himmelsrichtung: West; Dachneigungswinkel 15°
- M48 ist die Bezeichnung des Moduls, welches eine Lichtdurchlässigkeit von 27 % aufweist

Die gelbe Kurve im Diagramm zeigt die Globalstrahlung, die im Tagesverlauf zunimmt (max. Wert ca. 850 W/m<sup>2</sup>). Die grüne Kurve stellt das gekühlte Modul M 48 dar, die blaue Kurve das ungekühlte Modul M48. Mit steigender Globalstrahlung nimmt auch die elektrische Leistung der Module (blaue und grüne Kurve) zu, außerdem ist erkennbar, dass die grüne Kurve des gekühlten Moduls mehr elektrische Leistung erbringt als die blaue Kurve des ungekühlten Modells.

Für die Untersuchung der thermischen Leistungsfähigkeit der entwickelten PVT-Module wurden Versuche bei unterschiedlichen technischen Betriebsparametern (Volumenstrom, Vorlauftemperatur) und variierenden Umgebungsbedingungen (Globalstrahlung, Außentemperatur, Windgeschwindigkeit) durchgeführt. Die nachstehende Abbildung zeigt auszugsweise ein Messergebnis aus der Erprobung eines M48-PVT-Moduls mit unterschiedlichen technischen Parametern.



**Abb. 12: Nachweis thermischer Energie**

Die Untersuchungsergebnisse zeigen das thermische Spitzenleistungen zwischen ca. 400 – 650 W/m<sup>2</sup> ermittelt werden konnten. Das dargestellte Diagramm die unter den Umgebungsbedingungen (Globalstrahlung, Umgebungstemperatur, Gewächshausinnentemperatur) ermittelten Oberflächentemperaturen sowie thermischen Leistungen. Im Vergleich der Oberflächentemperaturen lässt sich feststellen das deren Verlauf ohne rückseitige Kühlung (blau gestrichelte Kurve) dem Verlauf der Globalstrahlung (d.h. ansteigend) folgt. Durch die aktive Kühlung können die Oberflächentemperaturen der PV-Module (grün gestrichelte Kurve) signifikant reduziert werden, wodurch einerseits elektrische Leistungsabfälle der PV-Module reduziert und zum anderen thermische Leistungen für die angestrebte Verwertung als Strahlungsheizung gewonnen werden können.

Die in Abbildung 12 messtechnisch nachgewiesene Änderung der Oberflächentemperaturen konnte auch durch thermographische Messungen mit einer Wärmebildkamera dokumentiert werden. Wie in Abbildung 13 dargestellt, zeigt sich eine bessere Temperaturverteilung der PV-Module bzw. eine gleichmäßigere Kühlung bei der Kaltwasserzufuhr von unten nach oben.

Richtung der Kaltwasserzufuhr von oben nach unten (15° Modulneigung)

Richtung der Kaltwasserzufuhr von unten nach oben (15° Modulneigung)

Ungekühltes PV-Modul für die Referenz (15° Modulneigung)

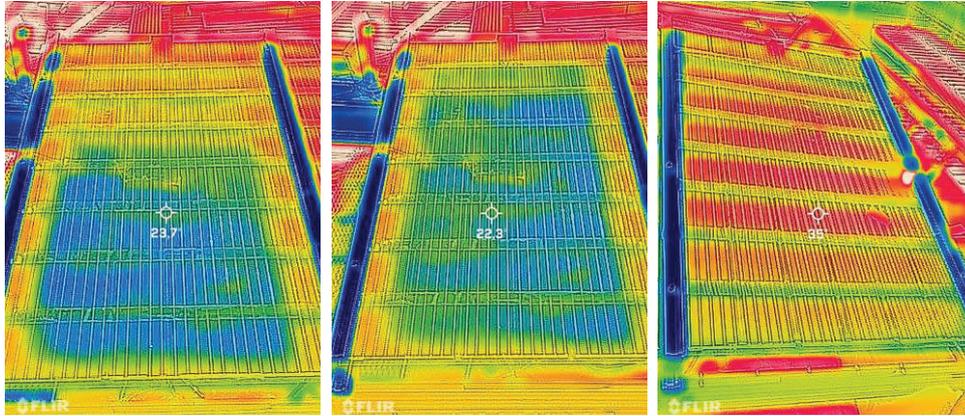


Abb. 13: Aufnahmen aus der Vermessung der PVT-Module mittels Wärmebildkamera bei aktiver Kühlung (linkes, mittleres Bild) bzw. ohne aktive Kühlung (rechtes Bild)

Das rechte Bild zeigt ein vergleichbares Modul ohne aktive Kühlung. Insbesondere im Bereich der schwarzen Wafer ist eine deutliche Erhöhung der Temperatur auf der Oberfläche zu erkennen, hier ca. 35 °C bei einer Umgebungstemperatur von ca. 30 °C.

Neben dem Einfluss unterschiedlicher Vorlauftemperatur wurden auch die thermischen Leistungen im Vergleich unterschiedlicher Modultypen (M48, M32) untersucht. Die Abhängigkeit der Wärmeleistung von der Vorlauftemperatur (VLT) bei konstantem Volumenstrom ist in Abbildung 14 dargestellt. Bei diesem Versuch wurde der Einfluss unterschiedlicher Vorlauftemperaturen (8 – 24 °C) in Abhängigkeit vom Modultyp in verschiedenen Zeitintervallen (15 Minuten) untersucht. Die Messungen zeigen, dass bei gleichem Volumenstrom und gleicher Vorlauftemperatur für die M48-Module signifikant höhere Rücklauftemperaturen und damit auch höhere thermische Leistungen ermittelt werden konnten.

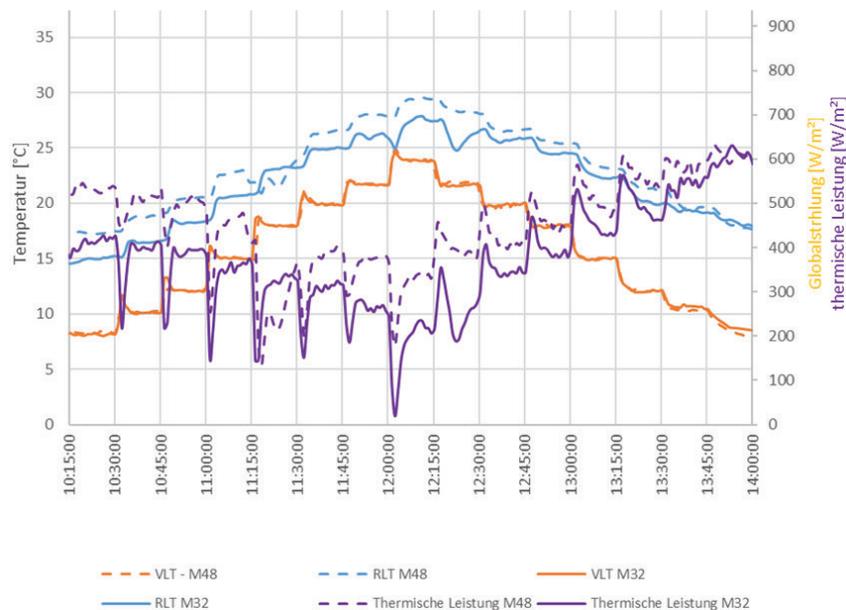
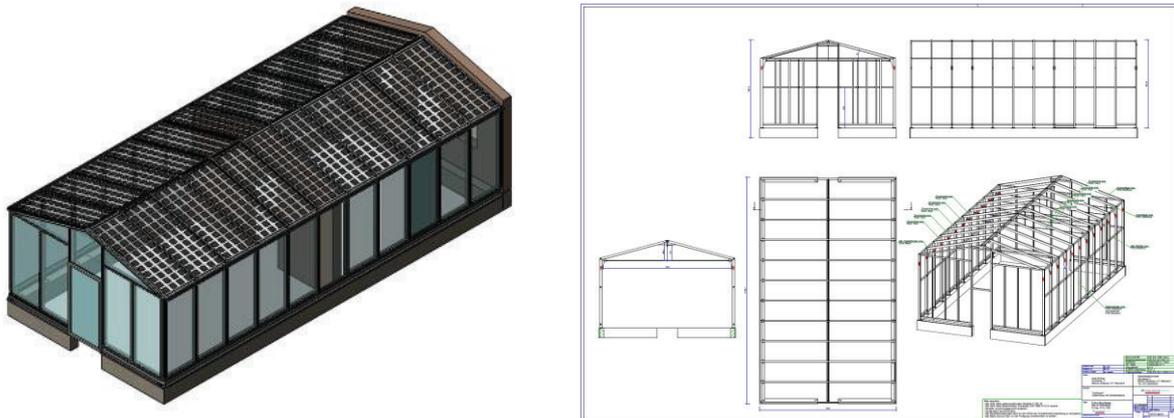


Abb. 14: Vergleich der Module M48 und M32

Im Rahmen der durchgeführten Messungen konnte ein linearer Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Vorlauftemperatur und der Abnahme der Wärmeleistung nachgewiesen werden. Mit zunehmender Durchflussmenge in den Kapillarrohrmatten steigt die aufnehmbare Wärmemenge logarithmisch an. Das resultiert aus der Tatsache, dass bei höherem Durchfluss die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauftemperatur und Wafer-Temperatur maximal ist, was den Antrieb für den Wärmeübergang optimiert. Die labortechnischen Voruntersuchungen belegten damit die prinzipielle Umsetzbarkeit von PVT-Modulen für die Entwicklung eines energieeffizienten Solargewächshauses.

### 3.3 Großdemonstrator - Monitoring

Aufbauend auf den entwickelten Gesamtkonzepten und Teilkonzepten für ein energieeffizientes Solargewächshaus, sowie den Erkenntnissen der Technologievalidierung im Labormaßstab wurde ein Großdemonstrator-Gewächshaus entwickelt. Ziel dieses Gewächshauses war der fertigungstechnische Nachweis der Realisierbarkeit eines energieeffizienten Solargewächshauses sowie die wissenschaftliche Erprobung und Evaluierung der entwickelten Produkt- und Verfahrenstechnologien. Die nachstehende Abbildung 15 zeigt eine 3D-Darstellung des entwickelten Solargewächshauses sowie die dazugehörige Stahlbau- und Fundamentplanung.



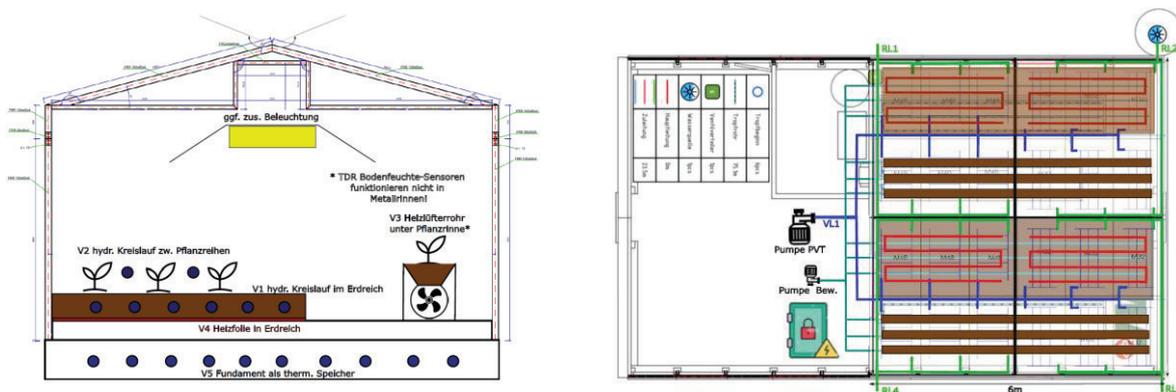
**Abb. 15: Großdemonstrator-Gewächshaus, links: 3D-Model, rechts: Stahlbau- und Fundamentplanung**

Das Großdemonstrator-Gewächshaus hat eine Grundfläche von ca. 11 m x 6 m und eine Firsthöhe von ca. 4 m. Es unterteilt sich in einen Monitoring-Bereich für die wissenschaftliche Erprobung von verschiedenen Pflanzenkulturen unter definiert einstellbaren Anbaubedingungen, sowie einen Technikbereich für die Unterbringung der technischen Ausstattung (z.B. Schaltschrank mit Energiemanagementsystem, Wechselrichter, Batteriespeicher, etc.). Das Gewächshaus wurde so ausgerichtet, dass die Dachfläche eine PV-Anlage mit Ost-West-Ausrichtung abbildet. Die Auslegung der Stahltragkonstruktion erfolgte unter Berücksichtigung der standortspezifischen Lastannahmen aus Eigenlast sowie den Standort Lichtenau (Chemnitz) anzusetzenden Wind und Schneelasten. Die Außenhülle des Gewächshauses besteht aus einer Doppelverglasung, für die Ermöglichung einer energieeffizienten Gebäudebilanz, d.h. die Senkung des Energieverbrauches und die Nutzbarkeit von regenerativen Energien. Für die Erprobung der entwickelten PVT-Technologie wurden zwei Modultypen des Herstellers Wismar Solar M48 und M32 mit Transparenzgraden von 20 % und 50 %. Insgesamt wurden 40 PVT-Module auf der Dachfläche des Großdemonstrator-Gewächshauses installiert. Die nachstehende Abbildung 16 zeigt den Medien- und Verlegeplan für die elektrische Installation und die Medienführung für den Thermiekreislauf.



**Abb. 16: Medien- und Verlegeplan für die installierten PVT-Module**

Wie in Abbildung 16 dargestellt, kann somit im Monitoring-Bereich des Gewächshauses der Einfluss unterschiedlicher Einstrahlungen infolge der Himmelsausrichtung (Ost-West) sowie unterschiedlicher Transparenzgrade der PVT-Module (20 %, 50 %) für verschiedene Pflanzenkulturen evaluiert werden. Der Anbau der zu untersuchenden Pflanzenkulturen erfolgte in insgesamt 4 Hochbeeten (s. Abbildung 17 rechts). Im Rahmen des Projektes wurde der Anbau von Tomaten, Salaten und Erdbeeren als ausgewählte repräsentative Pflanzenkulturen untersucht. Abbildung 17 zeigt in der linken Abbildung die im Rahmen des Vorhabens entwickelten Heiztechnologiekonzepte. Davon wurden im Großdemonstrator-Gewächshaus die Varianten V1 in der Erde eingelassene Strahlungsheizung und V2 pflanzennahe oberflächige Strahlungsheizung realisiert.



**Abb. 17: Anbau- und Heizungskonzepte, links: entwickelten Heiztechnologiekonzepte, rechts: umgesetzte TGA-Lösung**

Für den energieeffizienten Betrieb des Großdemonstrator-Gewächshauses und dessen Erprobung wurde ein Energiemanagementsystem entwickelt. Dieses ermöglicht die Messung, Steuerung und Regelung der Energieströme im Gewächshaus auf Basis eines Steuerungsmoduls und entsprechender Sensorik und Aktorik. Abbildung 18 zeigt den dem Energiemanagementsystem zugrunde liegende R&I-Schaltplan. Das Energiemanagementsystem ermöglicht die anwendungsspezifische Steuerung und Bilanzierung der PVT-Technologie durch die Erfassung der elektrischen und thermischen





**Abb. 19: Aufnahmen aus der Bauphase des Großdemonstrator-Gewächshauses: oben links: Bodenplatte mit Rahmenscheiben und Stützen vor der Montage, oben rechts: fertig montiertes Gewächshaus, unten: Dachkonstruktion mit Doppelverglasung ohne PVT-Module**

Im Anschluss an die Montage der Stahlbaukonstruktion inklusive Doppelverglasung erfolgte die Fertigung der PVT-Module entsprechend der im Rahmen der Laboruntersuchungen entwickelten Fertigungstechnologie. Abbildung 20 zeigt exemplarisch ein M32-PVT-Modul bestehend aus einem Glas-Glas-PV-Modul und einer rückwärtig mittels Klebtechnologie applizierten Kapillarrohmatte. Die gefertigten PVT-Module wurden anschließend zum Standort transportiert und dort auf dem Dach montiert sowie an die elektrische und thermische Medienführung angeschlossen.



**Abb. 20: Aufnahmen aus der Fertigung der PVT-Module (oben links) und der Montage entsprechend des Medine- und Verlegeplans, unten rechts: elektrische und thermische Medienführung im Firstbereich**

Parallel dazu erfolgte der Bau und die Installation der Hochbeete für den Anbau der zu untersuchenden Pflanzenkulturen. Abbildung 21 zeigt Bilder aus dem Fertigungsprozess. Zunächst wurden die Beete in einer gedämmten Stahlkonstruktionsausführung gefertigt. Anschließend wurden die erdgebundene und oberflächige pflanzennahe Strahlungsheizung installiert. Abschließend wurden die Hochbeete mit Erde gefüllt sowie die Setzlinge der Pflanzenkulturen in der vorgegebenen Versuchsabfolge angepflanzt. Abschließend erfolgte die Installation der Bewässerung sowie die Integration und Vernetzung der Sensorik für die Erfassung der Anbaubedingungen (Temperatur, Feuchte) und Aktorik für die Steuerung der Heizung und Bewässerung.



**Abb. 21: Aufnahmen aus dem Fertigungsprozess der Hochbeete, links: Installation der erdgebundenen Strahlungsheizung V1, Mitte: Installation der pflanzennahen oberflächigen Strahlungsheizung V2**

Abschließend erfolgte die Verlegung und Installation der für das Energiemanagement erforderlichen technischen Ausrüstung bestehend aus Leitungen, Rohren, Sensoren, Aktoren, Batteriespeicher, Wechselrichter sowie Schaltschrank inklusive Mess-, Steuer- und Regeleinheit. Abbildung 22 zeigt Aufnahmen des fertiggestellten Großdemonstrator-Gewächshauses aus der Monitoringphase, welche noch bis 2026 laufen wird.



**Abb. 22: Solargewächshaus nach Fertigstellung in der Monitoringphase**

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden Konzeptlösungen für energieeffiziente Solargewächshäuser für den energieautarken Obst- und Gemüseanbau mittels regenerativ erzeugter Energieströme und intelligenter Verwertungstechnologie entwickelt. Darauf aufbauend wurden Technologien für die Umsetzung der entwickelten Konzeptlösungen erarbeitet und im Rahmen labortechnischer Untersuchungen am ISE im Freifeldversuch erprobt. In der finalen Entwicklungsstufe konnte ein

Großdemonstrator eines energieeffizienten Solar-Gewächshauses für die wissenschaftlich-technische Erprobung der entwickelten Konzeptlösungen im Rahmen von Monitoring-Untersuchungen entwickelt werden.

Um die Ergebnisse über einen erweiterten Zeitraum hinweg zu analysieren, wird die Erfassung und Auswertung von Daten im Rahmen eines umfassenden Monitorings über sämtliche Anbauphasen und Jahreszeiten in den kommenden Jahren fortgesetzt werden. In Zusammenarbeit mit landwirtschaftlichen Betrieben sollen detaillierte standort- und anbauabhängige Daten erfasst werden, die im späteren Produkt anwendungsfallspezifisch berücksichtigt werden können. In diesem Rahmen ist geplant, weitere unterschiedliche Gemüse- und Obstsorten im SolGreen-Gewächshaus anzubauen, um das Verständnis für unterschiedliche Anbaubedingungen zu vertiefen und die Bandbreite der gewonnenen Erkenntnisse zu erweitern. Damit werden die im Projekt gewonnenen Ergebnisse kontinuierlich validiert und ihre Nachhaltigkeit und Übertragbarkeit sichergestellt.

### 5. Literaturverzeichnis

- [1] BMU, „Die Klimakonferenz in Paris,“ [Online]. Available: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/>.
- [2] European Commission, „Übereinkommen von Paris,“ [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de).
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Abkommen von Paris,“ [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html>.
- [4] Swissveg, „Was fällt ökologisch mehr ins Gewicht: Transportweg oder Produktion,“ [Online]. Available: <https://www.swissveg.ch/transport>.
- [5] T. Mangold und M. Bauer, „Nachhaltigkeit beim Lebensmitteltransport,“ HS Aalen, Aalen, (2015).
- [6] nachhaltig-sein.info, „Lebensmittel-Transporte mit dem Flugzeug: Eine Infografik,“ [Online]. Available: <https://nachhaltig-sein.info/privatpersonen-nachhaltigkeit/wirkung-von-lebensmittel-transporten-auf-umwelt-infografik>.
- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, „Was ist regionales Gemüse? Tipps für mehr Klimaschutz,“ [Online]. Available: <https://www.mein-klimaschutz.de/beim-einkauf/a/essen/was-ist-regionales-gemuese/>.
- [8] Verbraucherzentrale NRW e.V., „Regionale Lebensmittel,“ [Online]. Available: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/kennzeichnung-und-inhaltsstoffe/regionale-lebensmittel-11403>.
- [9] GBI-Genios Deutsche Wirtschaftsdatenbank GmbH, „Obst und Gemüse - regionale Herkunft gewinnt an Bedeutung,“ [Online]. Available: [https://www.wiso-net.de/info/branchenwissen/obst\\_und\\_gemuese\\_regionale\\_herkunft\\_gewinnt\\_an\\_bedeutung](https://www.wiso-net.de/info/branchenwissen/obst_und_gemuese_regionale_herkunft_gewinnt_an_bedeutung).
- [10] K. Istel, „Regionale Lebensmittel - NABU,“ [Online]. Available: <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/oekologisch-leben/essen-und-trinken/bio-fair-regional/labels/regio.html>.
- [11] H. Kögl, J. Tietze, C. Möller, G. Reinhardt und S. Mann, „Regionale Erzeugung, Verarbeitung und Vermarktung von Lebensmitteln,“ Rostock, (2009).
- [12] sharemen media GmbH, „Regionale Lebensmittel haben nicht immer eine gute Ökobilanz,“ [Online]. Available: <https://www.ecowoman.de/ernaehrung/essen/regionale-lebensmittel-oekobilanz-oft-schlecht-210>.

- [13] Verbraucherzentrale NRW e.V., „Regionale Lebensmittel,“ (2020). [Online]. Available: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/kennzeichnung-und-inhaltsstoffe/regionale-lebensmittel-11403>.
- [14] S. Meinert und M. Stollt, „Factsheet: ‚Ernährung und Klima‘“.
- [15] FAKT AG, „GAP – Gesunde Agrarprodukte/Gewächshausparks,“ [Online]. Available: <https://www.fakt-ag.com/gap-gesunde-agrarprodukte-gewaechshausparks/>.
- [16] U. Poetsch, „Nachhaltige Ernährung: Aus der Region und nach der Saison – Vorteile für Verbraucher,“ [Online]. Available: <https://www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/D58A32E6A3826437C1257727004728C8?OpenDocument>.
- [17] M. Müller-Lindelauf, G. Zipfel, N. Rettenmaier, S. Gärtner, J. Münch, D. Paulsch und G. Reinhardt, „CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und weitere Umweltauswirkungen von Gemüse aus Baden-Württemberg,“ ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, (2013).
- [18] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU),“ (2021). [Online]. Available: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/eu-klimapolitik/>.
- [19] European Commission, „Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030,“ [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de).
- [20] Umweltbundesamt, „Treibhausgasminderungsziele Deutschlands,“ (2021). [Online].
- [21] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, „Deutsche Klimaschutzpolitik,“ [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-deutsche-klimaschutzpolitik.html#:~:text=Zentrales%20Ziel%20der%20deutschen%20Klimaschutzpolitik,dem%20Jahr%201990%20reduziert%20werden>.
- [22] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, „BMEL-Statistik: Produktionsgartenbau,“ [Online]. Available: <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/gartenbau/produktionsgartenbau/>.
- [23] Syed, A. M., Hachem, C.: Review of Construction; Geometry; Heating, Ventilation, and Air-Conditioning; and Indoor Climate Requirements of Agricultural Greenhouses. *Journal of Biosystems Engineering* 44 (2019), S. 18–27.
- [24] LfL, Redaktion: Dr. Gerald Lattauschke: Ökonomische Betrachtungen zum Anbau von Gemüse im Gewächshaus.