

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

Stefan Krause¹, Liesa Hübner¹, Peter Kaufmann¹

¹ 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. Photovoltaik (PV) auf Gewächshäusern ermöglicht gleichzeitig Energieerzeugung und Beleuchtungsoptimierung bzw. Verschattung. Diese Integration kann große Energiegewinne bei minimalem Einfluss auf die Ernteerträge liefern.

Ziel des hier dargestellten Forschungs- und Entwicklungsprojektes ist die Entwicklung einer Technologie zur gleichzeitigen Wandlung der solaren Energie in elektrische und thermische Energie einschließlich ihrer Nutzung für den Anwendungsfall in Gewächshäusern. So soll ein energieeffizientes Solargewächshaus mit PV und Solarthermie (ST) für Landwirte mit dem Ziel des energieautarken Fruchtanbaus mittels regenerativ erzeugter Energieströme und intelligenter Verwertungstechnologie 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 Abb. 1 deutlich wird, erzeugen international transportierte Früchte durch Transport mit Flugzeug und Produktion mehr als Faktor 20 CO₂ pro kg Gemüse und Früchte.

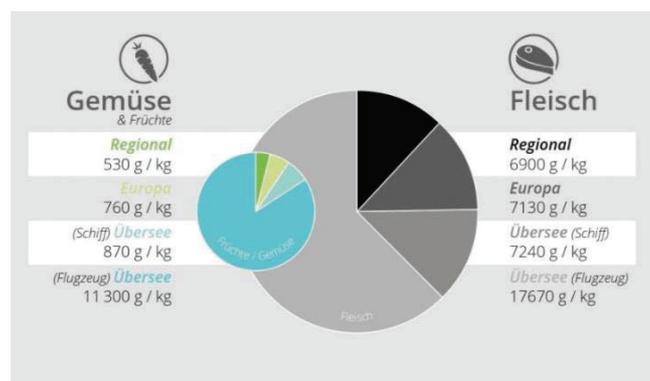


Abb. 1: Vergleich Treibhausgasemissionen von Gemüse im regionalen und internationalen Anbau [4]

Demnach ist der Einkauf 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 Gewächshausstypen eingesetzt, vgl. **Tab. 1**.

Tab. 1: Gewächstypen und ihre Eigenschaften [23]

| Offene Systeme | Geschlossene Systeme |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzen natürlicher Ventilation ▪ Kostengünstig ▪ Stark abhängig von Wind ▪ Wetterabhängig - erhöhter Bedarf an Luftentfeuchtung und Temperaturkontrolle | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rein mechanische Ventilation ▪ Großer Grad an Kontrolle über Ventilation, Temperatur und Temperaturgradient ▪ Höhere CO₂-Konzentration möglich ▪ Geringerer Pestizidbedarf ▪ Höhere Investitionskosten ▪ Höhere Operationskosten ▪ Signifikant höherer Ernteertrag |

Typischerweise besteht ein Gewächshaus aus:

- Strukturgerüst
- Deckmaterial

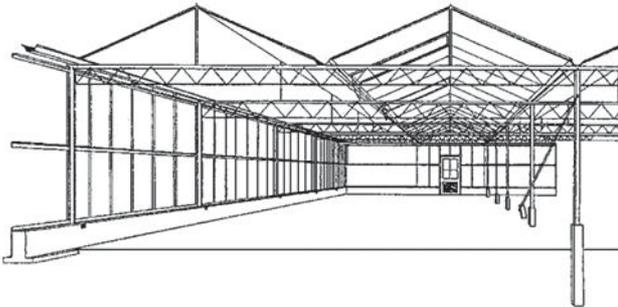
- Beeten bzw. Pflanztischen
- Sonnenblenden bzw. Energieschirmen
- Heiz- und Kühlsystemen
- Ggf. CO₂-Anreicherung
- Bewässerungs- und Düngesystemen
- Luftbe- und -entfeuchtungssystemen
- Kontrollsystemen

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.

Typische Bauformen von Gewächshäusern mit starrer Verkleidung sind in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Bauformen von Gewächshäusern mit starrer Verkleidung [23], [24]

| Widespan-Gewächshaus | Venlo-Gewächshaus |
|--|---|
|  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mehrpaneliges Dachdesign ▪ Metallisches Gestell (Stahl oder Aluminium) ▪ Spannweiten von 6 - 15 Metern ▪ Verbindungen mehrerer Spannen möglich ▪ Typische Ventilationsklappen entlang der Längsachse ▪ Keine standardisierten Typen ▪ Hohes Volumen und gute Belüftungsmöglichkeiten | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Design mit Dachfirst und Rinnen, einzelnes Panel zwischen First und Rinne ▪ Gestützt von Säulen ▪ Standardisiert in Europa, dadurch einfachere Konstruktion <div style="text-align: center;">  </div> |

Venlo-Gewächshäuser haben sich durch die bewährte Konstruktion für universellen Einsatz in Mitteleuropa etabliert. Die bekannten, geschlossenen Gewächshäuser holländischer Produktion in Stahl-Glas-Bauweise eignen sich für alle Kulturformen und -techniken. Sie sind als Venlo-Block in 3,20 m Kappenbreite mit Gitterbindern in Breiten bis zu 12,80 m oder als Breitkappen-Haus mit bis zu 2,00

m Breite verfügbar. Beide Typen gibt es in verstärkter Schneelast-Ausführung und auch als Verkaufshaus bzw. Lagerhalle. Die Häuser sind gekennzeichnet durch die rundum geschlossene Bauweise und eine stabile Konstruktion. Feuerverzinkte Stahlrohre auf Betonfundamenten (Stahlkonstruktion nach DIN 11535) sind die Basis der Standfestigkeit und hohen Lebensdauer der Venlo-Gewächshäuser. Bedachung, Seitenwände und Giebel können aus Einfachglas, Nörpelglas, Zweischiebenglas, Isolierglas und Sicherheitsglas sein [25]. Bei der Errichtung eines Gewächshauses sind die größten Anteile an den Investitionskosten die Kosten für das Gewächshaus selbst sowie für die Heizung [26]. 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 Abb. 2.

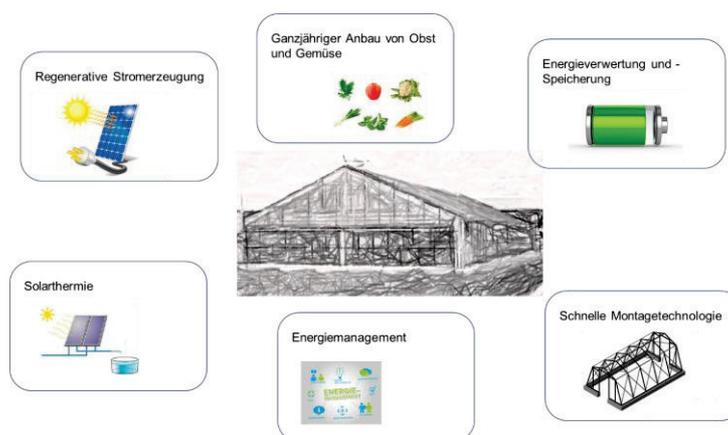


Abb. 1: Schematische Darstellung Entwicklungsziele

Das zu entwickelnde 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

- eine schnell montierbare Stahlkonstruktion

mit dem Ziel des energieeffizienten ganzjährigen Anbaus von Obst und Gemüse mit minimalen CO₂-Footprint zu ermöglichen.

Demnach gibt es 3 Hauptentwicklungen, die sich wie folgt benennen lassen:

1. Entwicklung Hybrid-Kollektoren
2. Entwicklung Steuerungstechnik
3. Entwicklung Gesamtprodukt

Nachstehend werden die drei Entwicklungsschwerpunkten näher beschrieben.

2.1 Entwicklung Hybrid-Kollektoren

Für den energieeffizienten und energieautarken Betrieb des Gewächshauses ist die Einbindung von energiewandelnden Komponenten in das Bauwerk erforderlich. Da das Gewächshaus für den Sommer- und Winterbetrieb geeignet sein soll, sind sowohl thermische als auch elektrische Energieströme erforderlich. Daher ist der Einsatz von Hybrid-Kollektoren erforderlich, die gleichzeitig elektrische und thermische Energie aus solarer Einstrahlung ermöglichen.

Für die Entwicklung der Kollektoren wurde zunächst eine Anforderungsanalyse erstellt, die sowohl technologische Anforderungen als auch anwendungsspezifische berücksichtigt. So wurde geprüft, welche Mindest-Lichtmenge für das Wachstum von Pflanzen erforderlich ist, um ein optimales Wachstum zu realisieren. Mehrere Literaturquellen geben an, dass für ein effizientes Wachstum die Einstrahlungsleistung nicht 1.000 W/m² betragen muss, sondern eine verminderte Intensität sogar förderlich ist (vgl. dazu [27], [28], [29], [30], [31], [32] und [33]). Weiterhin wurden Anforderungen an die Mindestenergieerträge zum Betreiben eines Gewächshauses (elektrisch und thermisch) ermittelt, die durch eine simulative Ermittlung das energetische Konzept ergaben, welches besagt, welche Flächen zur Energieerzeugung mindestens zu belegen sind mit entsprechenden Kollektoren. Weitere Anforderungen ergaben sich beispielsweise aus regulativen und mechanischen sowie fertigungstechnologischen Einflüssen.

Im Ergebnis der Anforderungsanalyse und dem daraus abzuleitenden Pflichtenheft erfolgte die Erarbeitung des funktionalen Aufbaus des zu entwickelnden Kollektors. Eine schematische nicht maßstabsgerechte Darstellung zeigt nachstehende Abb.3.

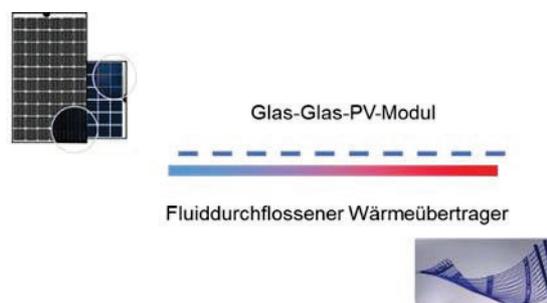


Abb. 3: Schematischer Aufbau PVT-Kollektor

Demnach besteht das Bauelement aus einem Glas-Glas-PV-Kollektor und einem darunter angebrachten Wärmeübertrager. Das PV-Modul wurde dabei derart ausgewählt, dass durch eine gezielte Beabstandung der einzelnen Zellen eine Mindestdurchlässigkeit von solarer Strahlung realisiert wird. Das Wärmeübertragungssystem, dessen Ausführungsform beispielsweise eine Kapillarrohrmatte sein kann, wurde so gewählt, dass eine ausreichende Beleuchtung des Gewächshausinneren

gewährleistet wird. Dazu wurden entsprechende Simulationen sowie Versuche durchgeführt.

Neben der begründeten Auswahl der Komponenten des Kollektors durch Materialanalysen wurden fūgetechnologische Entwicklungen durchgefūhrt, einerseits für die Verbindung der beiden Teilkomponenten, andererseits zur Einbindung dieser Bauelemente in das Gesamtprodukt Gewächshaus. Als favorisierte Fūgetechnologie zur Herstellung des Kollektors wurde eine Klebeverbindung gewāhlt, wobei die Anforderungen an den Kleber in einer hohen Wärmeleitfähigkeit bei maximaler Transparenz liegen. Für die Entwicklung der Klebetechnologien erfolgten entsprechend des erarbeiteten Pflichtenhefts Voruntersuchungen (Haft-Zug-Untersuchen; Temperaturbelastungen, Temperaturwechselbelastungen, etc.) mit verschiedenen Klebstoffen sowie den dazugehörigen Vor- und Nachbehandlungen.

Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt lag in der Medienführung dahingehend, dass Anschlusslösungen für Strom- und Wärmeträgerfluid entwickelt werden mussten, was maßgeblich war für die Verwertungstechnologie der zu gewinnenden Energieströme. So waren die Anschlussdosen der PV-Elemente in den funktionalen Gesamtaufbau einzubinden mit entsprechend entwickelten Kabellösungen (Kabelführung, Zusammenführen mehrerer PV-Elemente zu einem Kabel, etc.). Für die Wärmeübertrager wurden verschiedene Verschaltungsformen (Parallel- und Reihenschaltung) hinsichtlich ihrer Passfähigkeit zu den Anforderungen untersucht (labortechnisch und simulativ). Weiterhin wurde eine technische Lösung für die Medienver- und -entsorgung entwickelt und erprobt, je nach gewāhlter Verschaltungsform.

Für den Einsatz der PVT-Kollektoren als Gebäudeabschluss des Gewächshauses erfolgte die Entwicklung der Montagelösung. Der Lösungsansatz hierfür ist in Abb. 4 schematisch dargestellt.

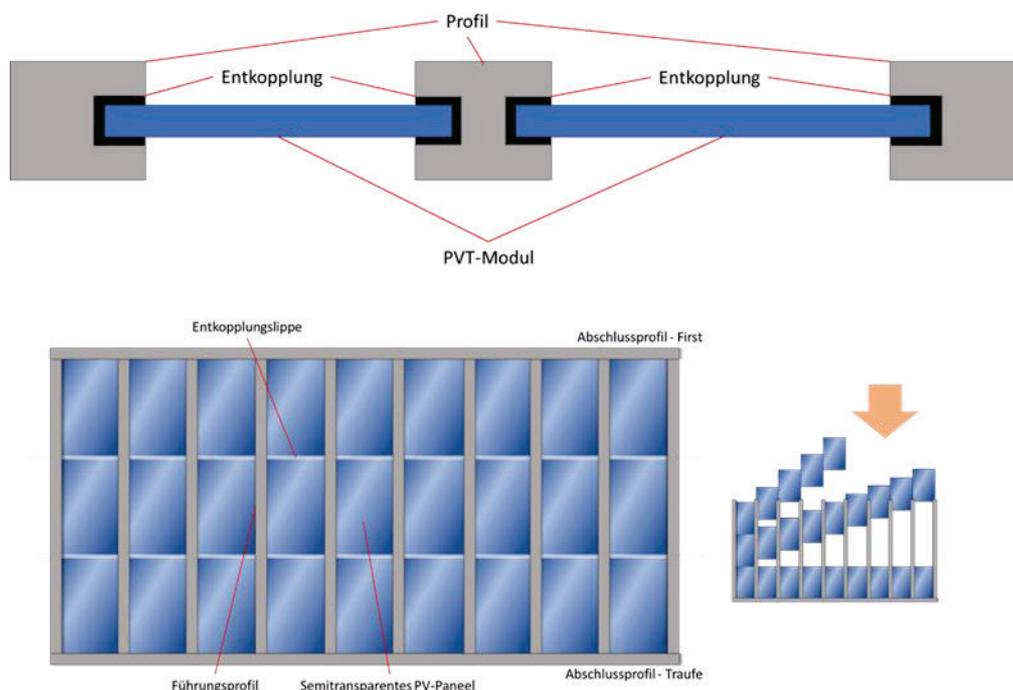


Abb. 4: Schematische Darstellung Montagetechnologie Gewächshauswand

Die PVT-Elemente werden an ihren Längsseiten in zu entwickelnden Profilen aufgenommen, welche in den Profilmitten mit einem elastischen, wetterbeständigen Entkopplungs- und Dichtungsband ausgestattet sind (Profilform und Dichtung wurde im Rahmen des Vorhabens entwickelt und erprobt).

Um mit hoher Materialeffizienz zu arbeiten und die Montage zu vereinfachen, werden je drei Elemente

im Hochformat übereinander in U- bzw. Doppel-T-Profilen geführt. Die Paneele werden an ihren kurzen Seiten nicht direkt miteinander in Kontakt gebracht, sondern mittels einer elastischen, wetterbeständigen Lippe voneinander entkoppelt. Diese Abstandslippe dient weiterhin als Dichtung und Dehnungsfuge.

Aufbauend auf die technologischen Teillösungen erfolgte die Entwicklung der Fertigungstechnologie zur Herstellung der PVT-Kollektoren als Wand- und Dachelemente eines Gewächshauses unter Anwendung der entwickelten Fügeverfahren.

2.2 Entwicklung Steuerungstechnik

Für den autarken Betrieb des Gewächshauses war die Entwicklung einer Steuerungstechnik dringend erforderlich im Zusammenhang mit der im Rahmen des Vorhabens entwickelten Verwertungsstechnologie.

Für die Entwicklung eines Energiemanagement-Systems wurden zunächst die zu regelnden Bereiche definiert; diese sind:

- Heizung
- Warmwasserbereitung (zum Gießen)
- Kühlung
- Lüftung
- Licht
- Verschattung
- Energieerzeugung (regenerativ)
- Nachfragesteuerung (Energiespeicherung)
- Überwachung und Kontrolle

Das Zusammenführen dieser Teilbereiche sowie die Einführung entsprechender Regelungstechnik erforderte das Erarbeiten eines Systems unter Zusammenwirken von Sensorik und Aktorik und der Entwicklung einer entsprechenden Software zur Steuerung und Regelung der einzelnen Systembestandteile.

Zu den spezifischen Anforderungen an die Steuerungstechnik von Gewächshäusern zählen:

- Defizite des Leichtbaus (Wärmedämmung und Wärmespeicherung) sowie der hohen Glasflächen haben unmittelbaren Einfluss auf die Steuerung der Klimatisierungstechnik → entsprechend veränderte Zeitintervalle
- Fehlende Erfahrungen für die Steuerung im Gewächshausbau
- Hoher Vorfertigungsgrad der Gewächshäuser erfordern den Einbau der Sensorik noch im Werk → keine Nachrüstlösungen (Stand der Technik) → Erfordernis einer genauen Planung
- Modulare Bauweise erfordern Modularität der Steuerung (Vorbereitung entsprechender Schnittstellen)

Eine Übersicht der Teilaufgaben des Energiemanagement sowie der Wechselwirkungen untereinander zeigt schematisch nachstehende Abb. 5. Anhand dessen wird die Komplexität des Energiemanagementsystems deutlich.

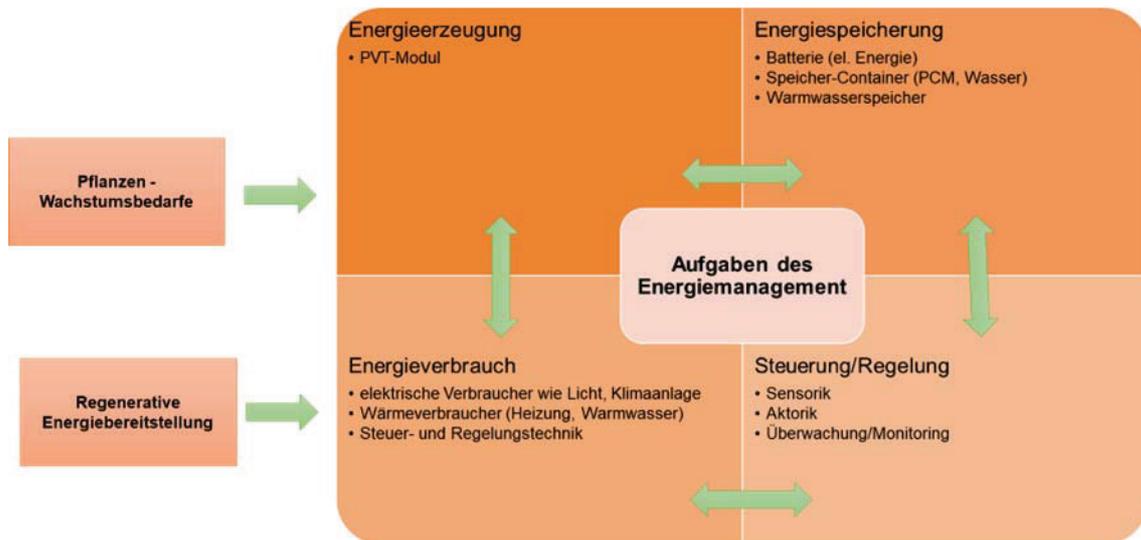


Abb. 5: Übersicht der Teilaufgaben des Energiemanagement sowie der Wechselwirkungen untereinander

Für eine effektive Wirkweise des Energiemanagementsystems war es erforderlich, die an das System gestellten Anforderungen zu analysieren und in einem Pflichtenheft zusammenzustellen. Aufbauend darauf wurde unter Einbeziehung der energieerzeugenden Bauelemente und deren Anforderungen ein Regelkreis entworfen und Nutzerprofile ermittelt.

Da die Energiemengen in der Regel dann zur Verfügung stehen, wenn keine Bedarfe notwendig sind (beispielsweise Mittag maximale solare Einstrahlung führt zu hoher Helligkeit und großer Wärmeentwicklung → weder Beheizung noch Beleuchtung notwendig, obwohl zu diesem Zeitpunkt maximale Energiemengen anfallen), war ein intelligentes Speichersystem zu entwickeln, zu erproben und in die Steuerungstechnologie einzubinden. Dabei wurden sowohl elektrische Speicher, als auch thermische Speicher eingebunden. Dafür wurden entsprechende Platzierungen im Gesamtaufbau des Gewächshauses erarbeitet und optimal eingebunden („Technik-Raum“ im Gewächshaus). Weitere erforderliche Komponenten zur Verwertung der gewonnenen Energieströme wurden analysiert und technologisch in den Gesamtprozess sowie die Steuerungstechnik eingebunden.

Im Ergebnis dieser Entwicklung wurde ein Großdemonstrator eines energieautarken Gewächshauses mit allen erforderlichen Sensoren und Aktoren inklusive Energiemanagement inklusive eines zugehörigen Versuchsprogramms entwickelt. Hier sind umfassende Monitoringuntersuchungen im Rahmen der noch verbleibenden Projektlaufzeit vorgesehen.

2.3 Entwicklung Gesamtprodukt

Für die Herstellung des finalen Produkts SolGreen war die Entwicklung einer Stahlkonstruktion erforderlich, die den Anforderungen des Leichtbaus als Schlüsseltechnologie gerecht wird und gleichzeitig wirtschaftlich herstellbar ist. Die dafür entwickelten Profile ermöglichen eine schnelle Montagetechnologie. Als geeignete Fertigungstechnologie wurde hier eine Umformtechnologie erarbeitet, da damit Blechwerkstoffe eingesetzt werden können, die ein wesentliches Leichtbaupotential mit maximaler mechanischer Stabilität vereinen im Vergleich zu konventionellen massiven Trägerkonstruktionen.

Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt bestand in der Entwicklung der Dichtungstechnologie (vgl. dazu Abb. 4) für die Abdichtung zwischen den PVT-Kollektoren untereinander sowie gegen die Profile und Randabschlüsse. Die Abdichtungen wurden dabei so ausgeführt, dass ein Luftaustausch zwischen innen und außen unterbunden, die Medienführung ermöglicht sowie eine dauerhafte mechanisch stabile

Gesamtkonstruktion realisiert wurde. Dafür wurden verschiedene Materialpaarungen untersucht und analysiert. Weiterhin wurde eine Füge-technologie zwischen Dichtung und PVT-Kollektor sowie zwischen Dichtung und Profil entwickelt und erprobt. Im Fokus standen dabei formschlüssige Verbindungen.

Ein weiterer Schwerpunkt bestand in der Zusammenführung der Einzellösungen (PVT-Kollektor, Energiemanagement) in eine Fertigungs- und Montagetechnologie als Gesamtlösung. Dafür wurden detaillierte Füge-lösungen und Verschaltungen entwickelt und erprobt.

3. Bau und Erprobung von Demonstratoren

Für die wissenschaftliche Evaluierung der entwickelten Konzepte wurde ein Freifeldversuchsstand (s. Abb. 6) für das institutseigene Solarlabor entwickelt. Dieser Versuchsstand ermöglicht die Erprobung verschiedener PVT-Kollektorvarianten. Er ist für 4 PVT-Module mit einer Erweiterungsmöglichkeit auf bis zu 6 Module ausgelegt. Die Bauhöhe von knapp 1,5 m bietet eine gute Zugänglichkeit für Anschluss und Wartung der Module sowie die Möglichkeit zum Einbringen von Versuchspflanzen bei gleichzeitig guter Stabilität gegenüber Windlast. Das Gerüst besteht aus item-Profilen, die Verkleidung aus PC-Ste-gelplatten. Die Montage der Kollektoren erfolgt über eigens entwickelte Montageprofile.

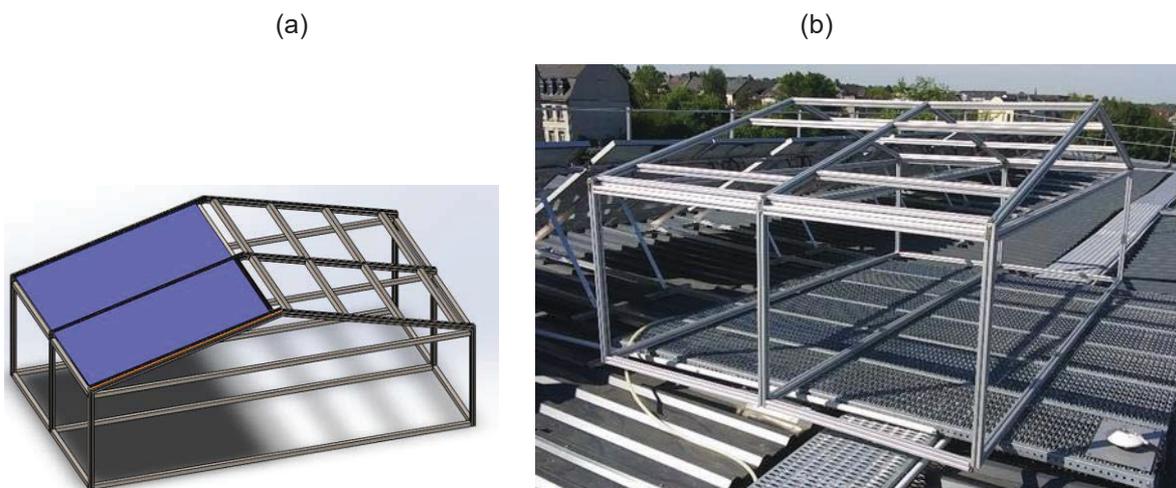
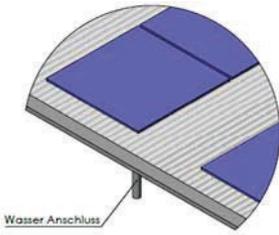
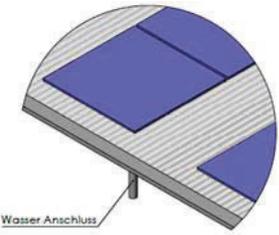
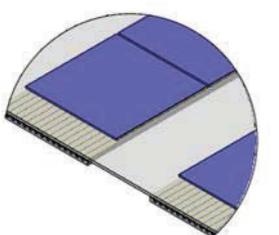


Abb. 6: Versuchsstand zur Erprobung der PVT-Kollektoren: (a) Konstruktionsentwurf und (b) Foto

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden die in Tab. 3 dargestellten PVT-Varianten getestet. Für die Beprobung wurde der in Tab. 4 dargestellte Versuchsplan erarbeitet. Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung der elektrischen und thermischen Spitzenleistungen sowie Erträge in Abhängigkeit verschiedener Umgebungsbedingungen (Umgebungstemperatur, Globalstrahlung, Windbedingungen) und variierender technischer Parameter (z.B. Volumenstrom, Vorlauftemperaturen, Temperaturspreizen, etc.). Darüber konnten zum einen Aussagen über die mögliche Wärmeeinkopplung bei unterschiedlichen Wärmeübertragungssystemen sowie zum anderen über die elektrische Leistung der PV-Module in Abhängigkeit von der rückseitigen Kühlung erlangt werden.

Tab. 3: Experimentell erprobte PVT-Kollektoren

| | 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 |

Tab. 4: Versuchsplan zur Erprobung der entwickelten PVT-Kollektoren

| Versuch Nr. | Versuchszweck |
|-------------|--|
| 1 | Ermittlung der ST-Leistung bei Verwendung von Wasser – ohne PV |
| 2 | Ermittlung der ST-Leistung bei Verwendung von Wasser – mit PV |
| 3 | Ermittlung der ST-Wirkungsgradkennlinien in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur |
| 4 | Ermittlung der PV-Leistung und Leistungssteigerung durch Kühlung |
| 5 | Ermittlung der ST-Spitzenleistung bei verschiedenen Betriebszuständen (Einstrahlungsbedingungen, Ausfall elektrische Abnahme, ...) |
| 6 | Abtauverhalten |
| 7 | Notlaufeigenschaften (Ausfall der Kühlung) |
| 8 | Ermittlung der ST-Spitzenleistung bei verschiedenen Volumenströmen |
| 9 | Ermittlung der ST-Spitzenleistung bei verschiedenen Fluidmischungen |

Für die Anwendung der Kapillarrohrmatten war insbesondere die Eruiierung geeigneter Klebstoffsysteme für die rückseitige Anbindung an den PV-Modulen von zentraler Bedeutung. Die Anforderungen bestanden hier in der Gewährleistung einer stabilen, dauerhaften Verbindung, einer maximalen Wärmeinkopplung sowie einer möglichst transparenten Ausführung zur Gewährleistung der für das Pflanzenwachstum erforderlichen Lichtdurchlässigkeit. Hierfür wurden an semi-transparenten Kapillarrohrmatten Klebversuche (s. Abb. 7) mit verschiedenen Klebstoffsystemen durchgeführt.



| Aquarium Silikon transparent | <u>Pattex</u> ONE FOR ALL CRYSTAL | Silikon transparent | <u>Ponal</u> 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 |

Abb. 7: Klebversuche zur Applikation von Kapillarrohmatten an PV-Modul-Rückseitenverglasung

Für die Evaluierung der möglichen erzielbaren elektrischen Leistungsdaten wurden PV-Module mit unterschiedlichen Transparenzgraden untersucht. Die Optimierungsaufgabe bestand hierbei zwischen der Gewährleistung möglichst hoher Stromausbeuten bei gleichzeitig ausreichenden Transparenzgraden für das Wachstum der im Gewächshaus anzubauenden Pflanzenkulturen. In Abb. 8 sind hierfür beispielhaft zwei transparente PV-Module von CS Wismar zu sehen. Die Modulvariante M 48 besteht aus 48 Solarzellen, die nur eine vertikale Beabstandung aufweist und bei einer elektrischen Spitzenleistung von 260 Wp eine Transparenz von 27 % ermöglicht. Die Modulvariante M 32 besteht aus 32 Solarzellen, welche sowohl horizontal als auch vertikal beabstandet sind und eine elektrische Spitzenleistung von 170 Wp bei einer Transparenz von 51 % ermöglichen.

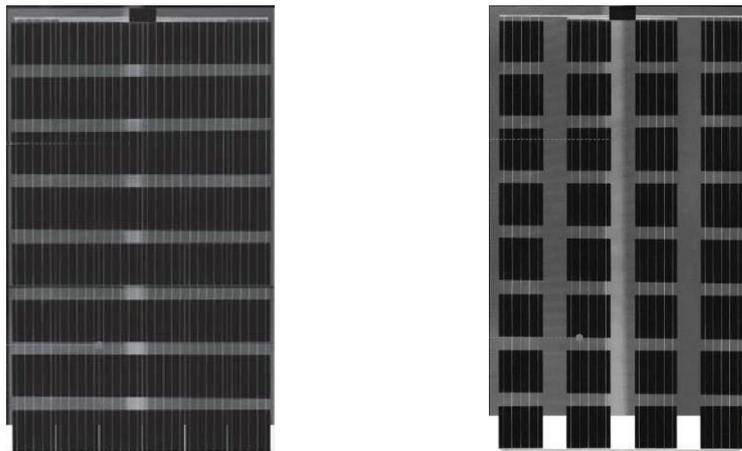


Abb. 8: Semi-transparente PV-Module des Herstellers CS Wismar; links: PV-Modul M48 (260 Wp), rechts: PV-Modul M32 (170 Wp)

Im Ergebnis der experimentellen Untersuchungen konnte sowohl die elektrische Ertragssteigerung infolge der rückseitigen PV-Modulkühlung als auch die Wärmeinkopplung und damit Bereitstellung thermischer Energie nachgewiesen werden. Abb. 9 zeigt hierfür beispielhaft Untersuchungsergebnisse für die PV-Modulvariante M 48 mit und ohne Kapillarrohrrmatte als rückwärtiges Wärmeübertragungssystem.

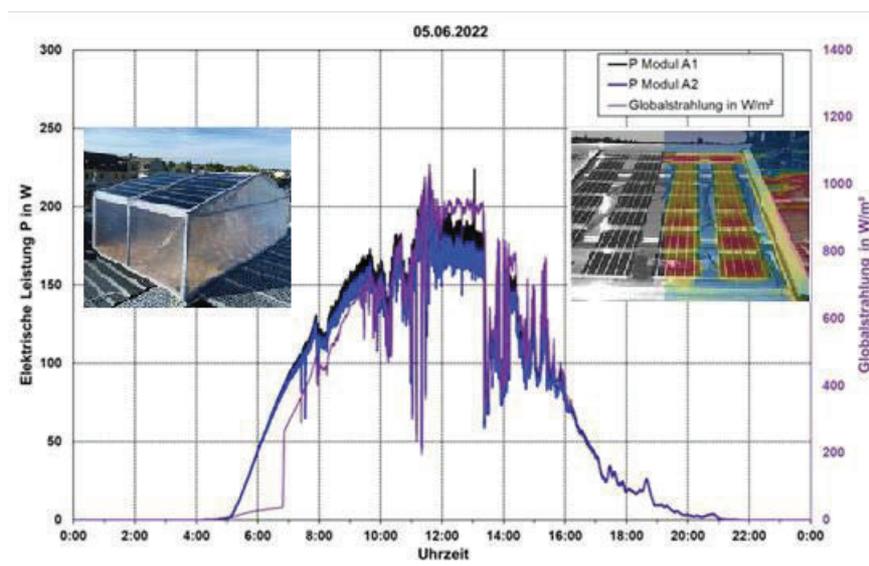


Abb. 9: Elektrische Leistungs-Zeitverläufe für PV-Modul Typ M48 mit und ohne rückseitige Kühlung

4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden Konzeptlösungen für energieeffiziente Solargewächshäuser für den energieautarken Fruchtanbau mittels regenerativ erzeugter Energieströme und intelligenter Verwertungstechnologie entwickelt. Zentrale Bestandteile der bisherigen Entwicklungen waren dabei die Entwicklung innovativer semi-transparenter PVT-Kollekturlösungen für die Nutzung solar-

elektrischer und solar-thermischer Erträge, die Entwicklung eines intelligenten Energiemanagementsystems für den energieeffizienten und nahezu energieautarken Betrieb. Die bisher erreichten Entwicklungsergebnisse des FuE-Vorhabens bieten damit Lösungsansätze für einen kontrollierten, nachhaltigen Gewächshausanbau unter Nutzung Erneuerbarer Energien. Für die Untersuchung der entwickelten Solargewächshauslösungen wurde ein Großdemonstrator-Gewächshaus entwickelt, an welchem in der verbleibenden Projektlaufzeit die Durchführung von Monitoringuntersuchungen vorgesehen ist.

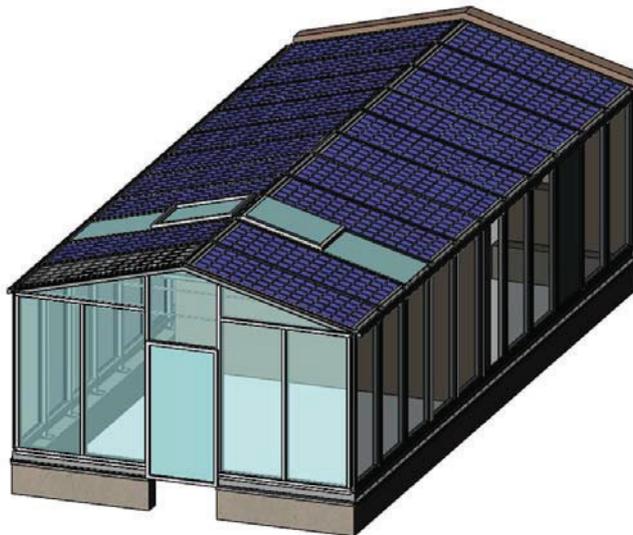


Abb. 10: Großdemonstrator-Gewächshaus für die Durchführung von Monitoringuntersuchungen

6. 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.
- [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.
- [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, „CO₂-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.
- [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] Elsner, B. von, Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., Zabeltitz, C. von, Graud, J., Russo, G., Suay-Cortes, R.: Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries, Part II: Typical Designs. *Journal of Agricultural Engineering Research* 75 (2000), S. 111–126.
- [25] T.i.G. Gewächshausbau: Venloblock. <https://www.tig-nazem.de/venloblock.html>, 12.04.2022.
- [26] LfL, Redaktion: Dr. Gerald Lattauschke: Ökonomische Betrachtungen zum Anbau von Gemüse im Gewächshaus.
- [27] Growking.de, „Das optimale Pflanzenlicht,“ [Online]. Available: <https://www.growking.de/ratgeber/das-optimale-pflanzenlicht/>.
- [28] UPRtek, „LICHT UND LANDWIRTSCHAFT,“ [Online]. Available: <https://www.uprtek.com/de/application/light-and-agriculture>.
- [29] R. Zintl, „Pflanzen brauchen Licht – Aber wie viel?“, (2018). [Online]. Available: <https://www.velanga.de/pflanzen-brauchen-licht-aber-wie-viel/>.
- [30] Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, „Energieeinsparung und Effizienzsteigerung in der gärtnerischen Produktion durch LED-Belichtungssysteme,“ (2017).
- [31] J. Balasus und T. Q. Khanh, „Auswirkung von spektral moduliertem Licht auf die Photosynthese von Pflanzen,“ in 14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, Dörnfeld/Ilm, (2019).
- [32] Bornwaßer und T., „Belichtung im Gemüsebau,“ *Landinfo*, Bd. 4, (2018).
- [33] M. Dallmann, „Optimierung des Einsatzes von Zusatzbelichtung im Zierpflanzenbau durch neue Leuchtmittel und Steuerungsstrategien,“ *LfULG*, Dresden, (2019).