

# PRÄKLIMA

## SACHBERICHT

Kurztitel: PRÄKLIMA

Förderprogramm: Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)

Projektträger: AiF Projekt GmbH

Stand: 30.06.22

Förderkennzeichen: ZF4705801GM9 – Die Netz-Werker, Systemmanagement und Datennetze AG  
ZF4706701GM9 – Priedemann Facade-Lab GmbH  
ZF4706501GM9 – Sommer Fassadensysteme - Stahlbau - Sicherheitstechnik GmbH & Co. KG  
ZF4706601GM9 – TU Dresden, Institut für Technische Informatik  
ZF4123723GM9 – TU Dresden, Institut für Baukonstruktion

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## INHALTSVERZEICHNIS

1	Berichtsstruktur .....	3
2	Zusammenfassung des Projekts .....	3
3	Arbeitspakete Gemäß Anlage 5 des Antrags.....	4
4	Ergebnisse des Projekts.....	8
4.1	AP 1 – Grundlagen .....	8
4.2	AP 2 – Entwicklung Steuerung .....	9
4.3	AP 3 – Entwicklung Sensorik .....	10
4.4	AP 4 – Dimensionierung Anlagentechnik.....	14
4.5	AP 5 – Konstruktive Entwicklung .....	15
4.6	Meilenstein 1 – Fassadenelement.....	16
4.7	Meilenstein 2 – Steuerung.....	16
4.8	AP 6 – Thermische Simulation Fassadenelement.....	17
4.9	AP 7 – Prototyp und Demonstrator .....	37
4.10	Meilenstein 3 – Leistungsfähigkeit.....	57

## 1 BERICHTSSTRUKTUR

Die PRÄKLIMA-Projektberichte sind inhaltlich entsprechend der Abarbeitung der Arbeitspakete strukturiert. Der erste Zwischenbericht von Juli 2020 fokussiert AP 1, AP 4 und AP 5 und damit den Entwurf des Fassadensystems. Der zweite Zwischenbericht von Juli 2021 beschreibt mit AP 2 und AP 3 die Sensorik und die Regelung des Systems. Im vorliegenden Endbericht werden AP 6 und AP 7 und damit die Simulationsstudien und Messergebnisse des Teststands sowie die erfolgten Veröffentlichungen beschrieben. Zusätzlich wird ein Gesamtüberblick über die vorherigen Arbeitspakete gegeben. Detailliertere Informationen zu AP 1 bis AP 5 sind in den Zwischenberichten enthalten.

Folgende Abkürzungen der Projektpartner werden im Bericht verwendet:

- NETZ: Die Netz-Werker, Systemmanagement und Datennetze AG
- PFL: Priedemann Facade-Lab GmbH
- SOM: Sommer Fassadensysteme - Stahlbau - Sicherheitstechnik GmbH & Co. KG
- TUD-INF: TU Dresden, Institut für Technische Informatik
- TUD-BK: TU Dresden, Institut für Baukonstruktion

## 2 ZUSAMMENFASSUNG DES PROJEKTS

Im PRÄKLIMA-Projekt wurde **ein modulares, autarkes und energierzeugendes Elementfassadensystem** entwickelt. Dieses besteht aus den folgenden beiden Elementen:

1. Fensterelement mit regelbarer Fensteröffnung und Verschattung.
2. Technikelement mit integriertem Photovoltaik(PV)-Hybrid-Luftkollektor mit mechanischer Lüftung und Wärmerückgewinnung und Stromspeicher.

**Sämtliche technische Komponenten zur Raumkonditionierung sind in die Elemente integriert**, was durch einen ausgesparten Bereich im wärmegeämmten opaken Technikelement erreicht wird. Die individuelle Einflussnahme auf das Raumklima ist möglich.

Weiterhin wurde **ein prädiktiver selbstlernender Algorithmus** zur Steuerung der fassadenintegrierten Aktoren **zur Raumkonditionierung unter Berücksichtigung des aktuellen Wetters** entwickelt.

---



Durch die Implementierung des Algorithmus auf ein *field-programmable gate array (FPGA)-Board*<sup>1</sup> erfolgt eine **rechnerleichte** intelligente Fassadensteuerung. Ein mehrmonatiges Monitoring an einem Prototyp belegte die Funktionstüchtigkeit des PRÄKLIMA-Fassadensystems. Simulationsstudien zum selbstlernenden Algorithmus bestätigen außerdem die Lernfähigkeit und Funktionstüchtigkeit des Algorithmus.

### 3 ARBEITSPAKETE GEMÄß ANLAGE 5 DES ANTRAGS

Das Projekt gliedert sich in acht Arbeitspakete (AP) und drei Meilensteine (MS). Die ursprüngliche Zeitplanung wurde durch die kostenneutrale Projektverlängerung um 11 Monate bis zum 30.06.2022 aktualisiert. Nachträgliche Systemänderungen sowie Betriebseinschränkungen und Lieferschwierigkeiten durch Covid-19 führten zu Abweichungen vom aktualisierten Zeitplan (siehe Bild 1 und Bild 2).

**AP 1** wurde zeitlich und inhaltlich entsprechend der Planung bearbeitet.

In **AP 2** wurden AP 2.1 und AP 2.2 zeitlich und inhaltlich entsprechend der Planung bearbeitet. AP 2.3 musste aufgrund des geänderten Fenstertyps nochmal überarbeitet werden und wurde 11/21 abgeschlossen. AP 2.4 wurde aufgrund inhaltlicher Abhängigkeit von AP 3.2 verzögert und 11/21 abgeschlossen.

In **AP 3** wurde AP 3.1 zeitlich und inhaltlich entsprechend der Planung bearbeitet. Nach erfolgter Sensorauswahl in AP 3.2 mussten aufgrund mangelnder Verfügbarkeit mehrerer Sensoren im Frühjahr 2021 neue kompatible Sensoren recherchiert werden. Anschluss und Installation der meisten Aktoren und Sensoren erfolgten bis 07/21. Während der Funktionsprüfungen wurde noch eine Vielzahl an Sensoränderungen und -ergänzungen notwendig, wodurch die finale Sensorik erst 05/22 in der Steuereinheit implementiert war. AP 3.3 und **MS 2** wurde 05/22 abgeschlossen bzw. erreicht.

---

<sup>1</sup> Ein *FPGA* ist ein digitaler Chip, der während des Betriebs in der Hardware konfiguriert werden kann, um einen stromsparenden Betrieb und eine hohe Leistung zu erreichen.

---



**AP 4, AP 5 und MS 1** wurden größtenteils zeitlich und inhaltlich gemäß der Planung bearbeitet. AP 4.3 musste aufgrund mangelnder Kompatibilität der ursprünglich geplanten Komponenten 08-09/21 nochmal überarbeitet werden.

Die konstruktiven Systemänderungen erforderten in **AP 6** ein zweimaliges Bearbeiten von AP 6.2. Aufgrund unvorhergesehener personeller Engpässe bei TUD BK und erheblichen Mehraufwänden in AP 2, AP 3 und AP 7 wurden AP 6.1 und AP 6.2 mit Einschränkungen innerhalb der Projektlaufzeit fertiggestellt. AP 6.3 und AP 6.4 wurden bis 03/22 fertiggestellt.

In **AP 7** verzögerte sich AP 7.1 aufgrund Covid-19-bedingter Betriebseinschränkungen bei SOM um drei Monate und aufgrund von Systemanpassungen und Lieferverzögerungen bei den daran anknüpfenden Funktionsprüfungen um weitere drei Monate. AP 7.1 wurde 10/21 abgeschlossen. AP 7.2 und AP 7.3 wurden bis 06/22, AP 7.4 und AP 7.5 bis Projektende abgeschlossen.

**MS 3** – die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Systems – konnte innerhalb der Projektlaufzeit größtenteils, jedoch mit Einschränkungen erreicht werden. Die Partner haben einvernehmlich beschlossen, das Monitoring am Prototyp auch nach Projektlaufzeit fortzuführen und das entwickelte RL-basierte *EnergyPlus*-Simulationsmodell weiter auszuwerten, um umfassendere Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit des PRÄKLIMA-Systems zu gewinnen.

**AP 8** liegt mit der Einreichung des vorliegenden Endberichts und mehreren internationalen Veröffentlichungen im Zeitplan.

---





## 4 ERGEBNISSE DES PROJEKTS

### 4.1 AP 1 – GRUNDLAGEN

Die entwickelte PRÄKLIMA Fassade besteht aus zwei Elementen. Das Fensterelement dient der natürlichen Belüftung, Belichtung, der passiven Solarnutzung, dem visuellen Außenbezug und beinhaltet ein Drehfenster mit Prallscheibe und ein Lichtlenkungs- sowie Verschattungssystem. Im Technikelement befinden sich ein dezentrales Lüftungsgerät mit Enthalpie-Tauscher, ein Photovoltaik(PV)-modul, das mit einem Hinterlüftungsraum als Photovoltaik-Thermie(PVT)-Luftkollektor fungiert und die Zuluft des Lüftungsgeräts vorkonditioniert, ein Batteriespeicher und betriebstechnische Komponenten. Bild 3 zeigt den Prototyp des PRÄKLIMA-Fassadensystems.



Bild 3 – PRÄKLIMA-Fassadensystem.

Sichtelement links mit

- Prallscheibe
- Lichtlenkungs- sowie Verschattungssystem
- Drehfenster

Technikelement rechts mit

- PV-Modul mit Hinterlüftung als PVT-Luftkollektor
- dahinterliegendes Lüftungsgerät
- Batteriespeicher und betriebstechnische Komponenten im Fassadenelement

Alle Komponenten werden durch Sensoren und Regelung zu einer autark arbeitenden Fassade vereint. Komponenten, die nicht bereits im Fassadenquerschnitt verbaut sind, werden in einer Aussparung im Technikelement untergebracht. Bei der Entwicklung des Fassadensystems wurden die normativen Richtlinien zum Fassaden- und Glasbau sowie zu PV-, Strom-, Lüftungsanlagen und Regelungssystemen berücksichtigt, um die baurechtlichen, bauphysikalischen, konstruktiven und sicherheitsrelevanten sowie steuerungs- und anlagentechnischen Anforderungen zu erfüllen.



## 4.2 AP 2 – ENTWICKLUNG STEUERUNG

Die Steuereinheit, die selbstlernende RL-Algorithmen (RL *engl.: reinforcement learning* – bestärkendes Lernen) implementieren kann, beinhaltet u. a. einen 16 GB *Raspberry Pi*<sup>2</sup> und ein kleines *field-programmable gate array (FPGA)-Board*<sup>3</sup>. Die Steuerungsalgorithmen werden zuerst auf ein großes, externes *FPGA-Board* programmiert und dann auf das kleine *FPGA-Board* übertragen, um eine geringe Rechenleistung zu erreichen. Die Steuerungssprache des gesamten Fassadensystems ist in *c-language* programmiert und in *hardware description language* (HDL) umgewandelt. Die Einbindung der Sensoren und Aktoren erfolgt über die *OpenHAB* Plattform, über die auch ein Fernzugriff auf alle Daten möglich ist und Steuerbefehle und Regelungsszenarien implementiert werden. Um Speicherplatz zu sparen, werden Messwerte nur registriert, wenn sie sich ändern. Ein post-processing-Algorithmus bildet daraus identische Messintervalle für die unterschiedlichen Sensoren sowie automatisch generierte Diagramme. Manuelle Eingriffe durch Nutzer:innen sind über *OpenHAB* möglich, werden erkannt und durch das selbstlernende Regelungssystem in der zukünftigen Steuerung berücksichtigt.

Im Rahmen des Projekts wurde ein neuer mehrstufiger Ansatz für die Entwicklung von hardwarebasierten RL-Architekturen entwickelt. Teil davon ist eine sogenannte Look-Ahead-Funktion. Mithilfe dieser Look-Ahead-Funktion wurde eine Steigerung der Leistung um bis zu 34 % gegenüber dem Stand der Technik erreicht. In ähnlicher Weise führen die Optimierungen auf Ebene der lookup tables (LUT) und die daraus resultierenden benutzerdefinierten Operationen zu einer Verringerung der Ressourcennutzung und des Energieverbrauchs um bis zu 27 % gegenüber dem Stand der Technik bzw. 48 % im Vergleich zu anderen optimierten Designs von RL-Architekturen. Außerdem wurde eine Annäherungsmethode auf Algorithmenebene vorgestellt, mit der die Ressourcennutzung um das 12-fache und die Leistungsverluste um das 10-fache im Vergleich zum Design mit hoher Rechenrate gesenkt werden kann, wenn auch geringfügige Einbußen bei der Genauigkeit der Ergebnisse auftraten. Solche Annäherungen können den Einsatz von RL in ressourcenbeschränkten eingebetteten Systemen ermöglichen. Hierzu erfolgte eine Veröffentlichung durch TUD-INF im Fachmagazin *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*.

Die Umsetzung und Effektivität des Selbstlernerneffekts wurden durch die Kombination des Gebäudesimulationstools *EnergyPlus* mit der *Python*-basierten Algorithmusentwicklung

---

<sup>2</sup> *Raspberry Pi* ist ein Einplatinencomputer, der von der britischen *Raspberry Pi* Foundation entwickelt wurde. Der Rechner enthält ein Ein-Chip-System (SoC) und hat ein kleines Format, ähnlich einer Kreditkarte.

<sup>3</sup> Ein *FPGA* ist ein digitaler Chip, der während des Betriebs in der Hardware konfiguriert werden kann, um einen stromsparenden Betrieb und eine hohe Leistung zu erreichen.

---



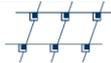
des *Open-AI-Gym* geprüft und bewertet. Dabei zeigte sich, dass ein RL-Algorithmus die Nutzerzufriedenheit über einen Gesamtzeitraum von 6500 Stunden von anfangs 2600 Stunden auf bis zu 6400 Stunden steigern konnte. Zusätzlich zur steigenden Nutzerzufriedenheit, definiert über die Behaglichkeit, zeigte sich, dass die selbstlernende Steuerung auch versucht, den Energieverbrauch zu reduzieren.

Die Online-Einbindung aller Aktoren und Sensoren in die *OpenHAB*-Plattform erfolgte größtenteils mit der Fertigstellung des Teststands im Juli 2021. Die Funktionstüchtigkeit der Aktoren wurde im November 2021 erreicht.

Im Zuge der Funktionsprüfungen (AP 7.3) wurde jedoch noch eine Vielzahl an Nacharbeiten erforderlich, um die komplexen Anlagen-, Monitoring-, Betriebs- und Steuerungstechniken aufeinander abzustimmen und störungsfrei zu betreiben. Die volle Funktionstüchtigkeit des Gesamtsystems mit allen Sensoren und Aktoren am Prototyp und damit die finale Einbindung der Anlagentechnik in die Steuerung wurden bis Juni 2022 erreicht.

### 4.3 AP 3 – ENTWICKLUNG SENSORIK

Es wurden mehrere Sensorik-Konzepte entwickelt. Da für die sensorbasierte Steuerung im Gebäudebereich keine hochpräzisen, sondern programmierbare, günstige und dauerhafte Sensoren benötigt werden, wurde letztlich ein günstiges, offenes Sensorik-Konzept gegenüber hochpräziser Messtechnik bevorzugt. Dabei können Sensoren unterschiedlicher Hersteller eingebunden und die Datenspeicherung entsprechend programmiert werden. Für die Steuerung des finalen Systems mittels RL-Algorithmus werden Sensoren auf der Innen- und Außenseite des Fassadenelements sowie an einem Ort, der gut den Umwelteinflüssen ausgesetzt ist, verbaut. Für die messtechnische Untersuchung und die Bauteil- und Funktionsprüfungen wurde eine Vielzahl weiterer Sensoren und Komponenten am Prototyp installiert. Bild 4, Bild 5 und Bild 6 zeigen die Dokumentation der verbauten Sensoren am Prototyp.



DIE NETZ-WERKER  
 Systemmanagement und Datenetze AG



TECHNISCHE  
 UNIVERSITÄT  
 DRESDEN

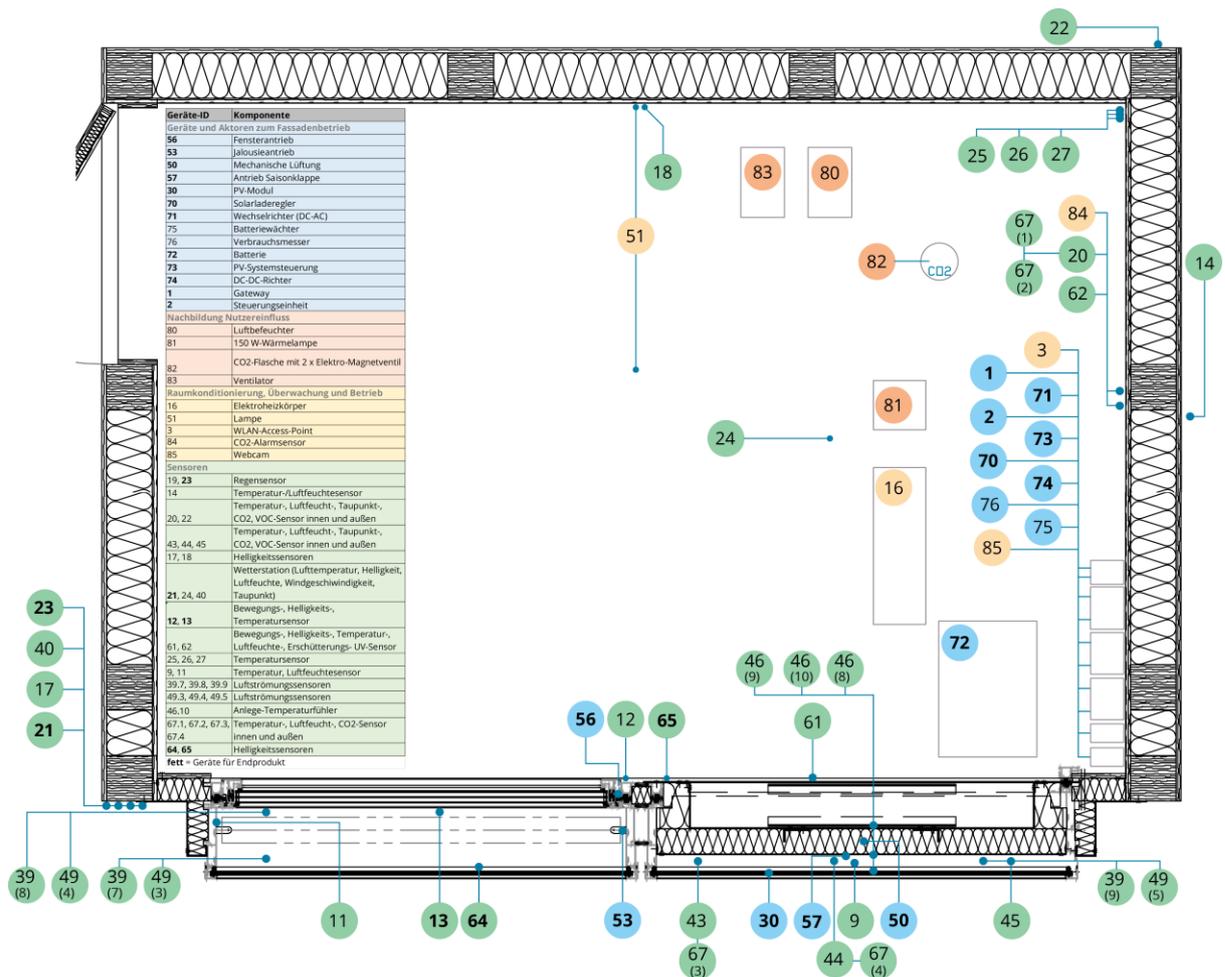


Bild 4 – Horizontalschnitt durch den Prototyp mit Positionen der Sensoren, Aktoren und der Betriebstechnik. **Fett** hervorgehobene IDs sind für das Endsystem erforderlich.

Geräte-ID	Komponente
<b>Geräte und Aktoren zum Fassadenbetrieb</b>	
56	Fensterantrieb
53	Jalousieantrieb
50	Mechanische Lüftung
57	Antrieb Saisonklappe
30	PV-Modul
70	Solarladeregler
71	Wechselrichter (DC-AC)
75	Batteriewächter
76	Verbrauchsmesser
72	Batterie
73	PV-Systemsteuerung
74	DC-DC-Richter
1	Gateway
2	Steuerungseinheit
<b>Nachbildung Nutzereinfluss</b>	
80	Luftbefeuchter
81	150 W-Warmleuchte
82	CO <sub>2</sub> -Flasche mit 2 x Elektro-Magnetventil
83	Ventilator
<b>Raumkonditionierung, Überwachung und Betrieb</b>	
16	Elektroheizkörper
51	Lampe
3	WiFi-Access-Point
84	CO <sub>2</sub> -Alarmsensor
85	Webcam
<b>Sensoren</b>	
19, 23	Regensensor
14	Temperatur-/Luftfeuchtesensor
20, 22	Temperatur-, Luftfeucht-, Taupunkt-, CO <sub>2</sub> , VOC-Sensor innen und außen
43, 44, 45	Temperatur-, Luftfeucht-, Taupunkt-, CO <sub>2</sub> , VOC-Sensor innen und außen
17, 18	Helligkeitssensoren
	Wetterstation (Lufttemperatur, Helligkeit, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Taupunkt)
21, 24, 40	Bewegungs-, Helligkeits-, Temperatursensoren
12, 13	Bewegungs-, Helligkeits-, Temperatur-, Luftfeuchte-, Erschütterungs-, UV-Sensor
61, 62	Temperatursensor
25, 26, 27	Temperatursensor
9, 11	Temperatur-, Luftfeuchtesensor
39, 7, 39, 8, 39, 9	Luftströmungssensoren
49, 3, 49, 4, 49, 5	Luftströmungssensoren
46, 10	Anlage-Temperaturfühler
67, 1, 67, 2, 67, 3	Temperatur-, Luftfeucht-, CO <sub>2</sub> -Sensor innen und außen
67, 4	Helligkeitssensoren
<b>64, 65</b>	Helligkeitssensoren

**fett** - Geräte für Endprodukt

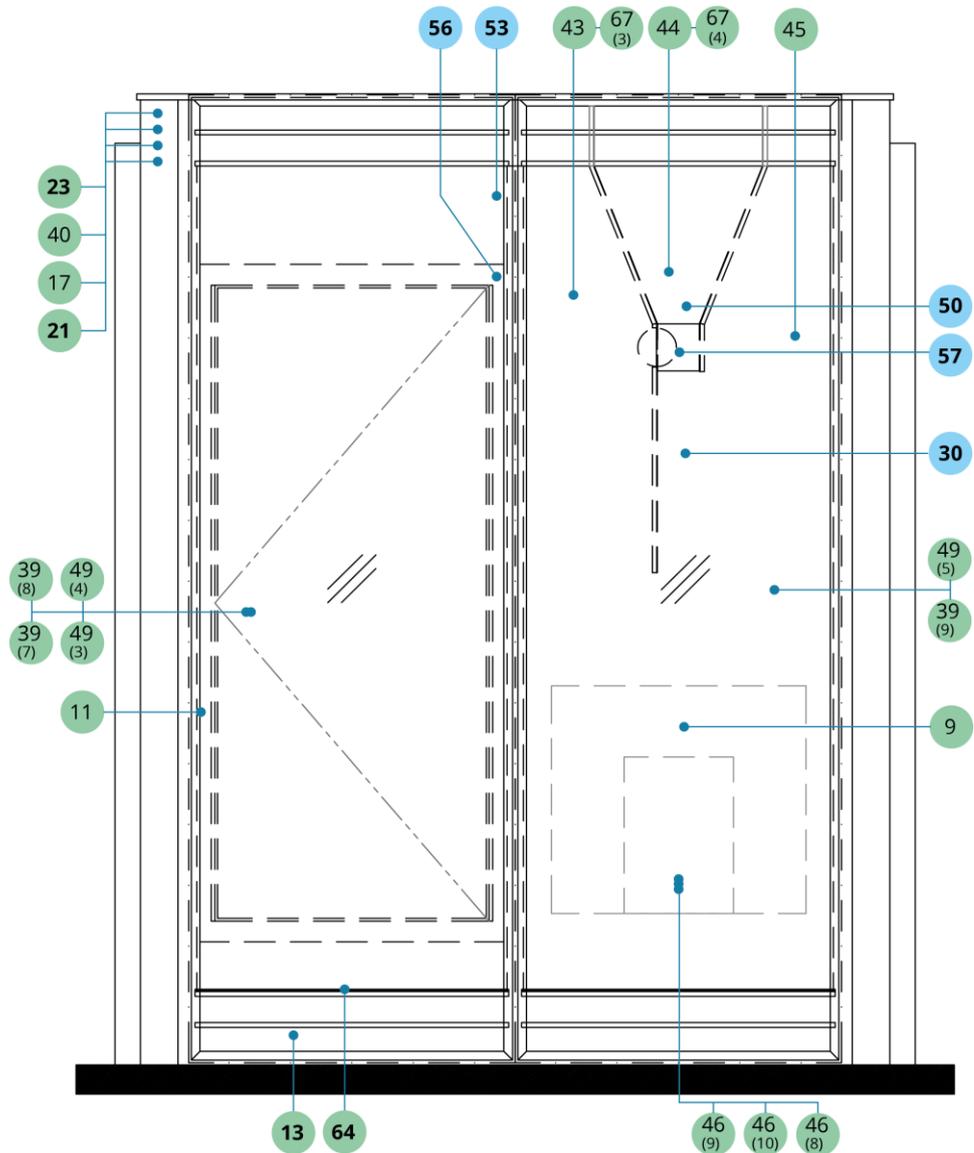


Bild 5 – Ansicht des Prototyps mit Position der Sensoren und Aktoren an und in den Fassadenelementen. **Fett** hervorgehobene IDs sind für das Endsystem erforderlich.

Alle für das Endsystem genutzten Sensoren und Aktoren sind per *Z-Wave*- oder *enOcean*-Funk mit einem in der Fassade befindlichen Gateway verbunden, welches die Daten vereinheitlicht und über eine verschlüsselte Mobilfunk-Verbindung per MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) (mit TLS (Transport Layer Security)) an einen Backend-Server sendet, der eine Datensicherung vornimmt. Wiederum verschlüsselt besteht am Backend eine weitere MQTT-Schnittstelle, welche einen authentifizierten Zugriff zur Übertragung zum *OpenHAB*-Portal ermöglicht.

Mehrfache Aktualisierungen des Sensorik-Konzepts und Lieferprobleme führten zu einem zeitlichen Mehraufwand bei der Entwicklung und vor allem bei der Funktionsprüfung und Überarbeitung der Steuerung, der Dokumentation des Teststands und der Projektkoordination. Zusätzlich ergaben sich aus dem innovativen Sensorik-Konzept mit automatisiertem post-processing-Algorithmus Mehraufwände.

Geräte-ID	Komponente
Geräte und Aktoren zum Fassadenbetrieb	
56	Fensterantrieb
53	Jalousieantrieb
50	Mechanische Lüftung
57	Antrieb Saisonklappe
30	PV-Modul
70	Solarladeregler
71	Wechselrichter (DC-AC)
75	Batteriewächter
76	Verbrauchsmesser
72	Batterie
73	PV-Systemsteuerung
74	DC-DC-Richter
1	Gateway
2	Steuerungseinheit
Nachbildung Nutzereinfluss	
80	Luftbefeuchter
81	150 W-Wärmelampe
82	CO <sub>2</sub> -Flasche mit 2 x Elektro-Magnetventil
83	Ventilator
Raumkonditionierung, Überwachung und Betrieb	
16	Elektroheizkörper
51	Lampe
3	WLAN-Access-Point
84	CO <sub>2</sub> -Alarmsensor
85	Webcam
Sensoren	
19, 23	Regensensor
14	Temperatur-/Luftfeuchtesensor
20, 22	Temperatur-, Luftfeucht-, Taupunkt-, CO <sub>2</sub> , VOC-Sensor innen und außen
43, 44, 45	Temperatur-, Luftfeucht-, Taupunkt-, CO <sub>2</sub> , VOC-Sensor innen und außen
17, 18	Helligkeitssensoren
21, 24, 40	Wetterstation (Lufttemperatur, Helligkeit, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Taupunkt)
12, 13	Bewegungs-, Helligkeits-, Temperatursensor
61, 62	Bewegungs-, Helligkeits-, Temperatur-, Luftfeuchte-, Erschütterungs- UV-Sensor
25, 26, 27	Temperatursensor
9, 11	Temperatur, Luftfeuchtesensor
39.7, 39.8, 39.9	Luftströmungssensoren
49.3, 49.4, 49.5	Luftströmungssensoren
46, 10	Anlege-Temperaturfühler
67.1, 67.2, 67.3	Temperatur-, Luftfeucht-, CO <sub>2</sub> -Sensor innen und außen
67.4	Temperatur-, Luftfeucht-, CO <sub>2</sub> -Sensor innen und außen
64, 65	Helligkeitssensoren

fett = Geräte für Endprodukt

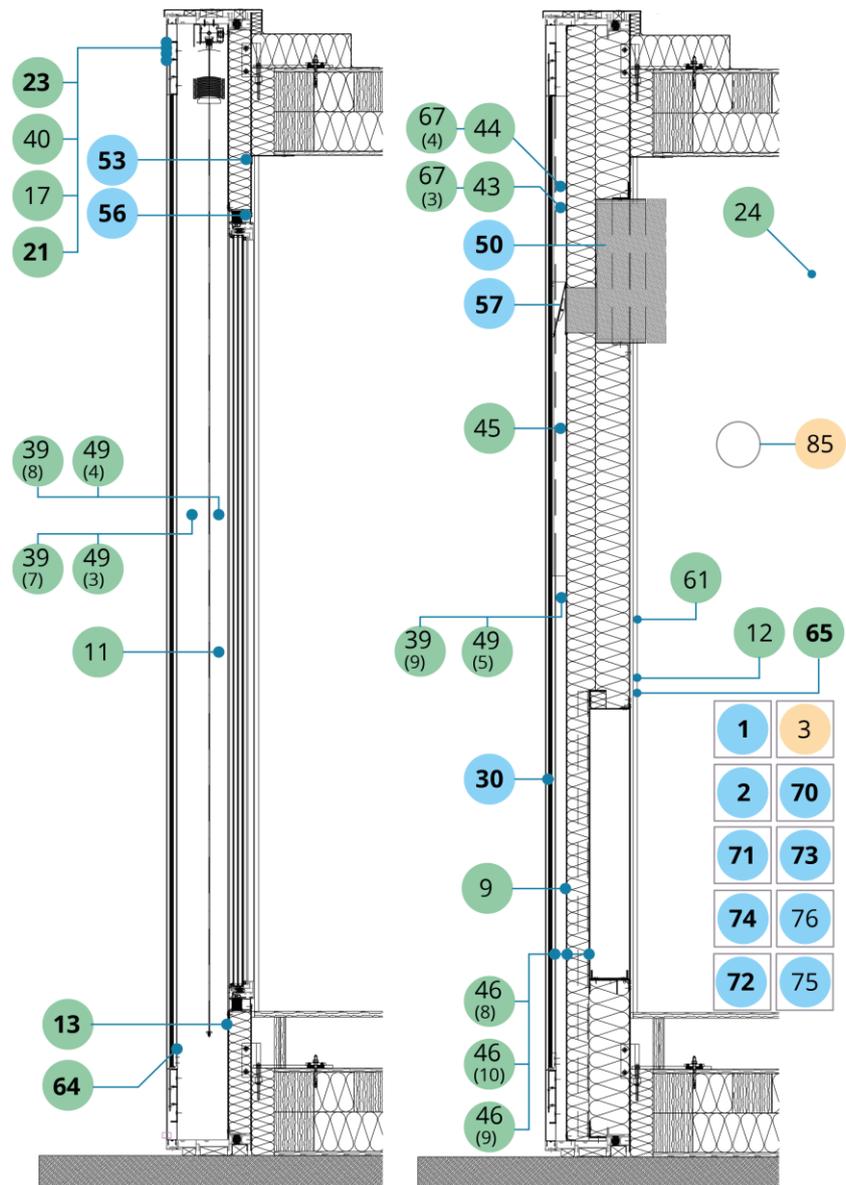


Bild 6 – Vertikalschnitte durch die Elemente des Prototyps mit Position der Sensoren, Aktoren und installierter Betriebstechnik in und an den Fassadenelementen. **Fett** hervorgehobene IDs sind für das Endsystem erforderlich.

#### 4.4 AP 4 – DIMENSIONIERUNG ANLAGENTECHNIK

Der Stand sowie die Winkel der Jalousien der Fa. Warema können theoretisch flexibel geregelt werden. Das Fenster wird durch einen im Fensterrahmen eingebauten Motor inklusive Steuerung der Fa. Aumüller geöffnet und geschlossen. Zur dezentralen, mechanischen Lüftung mit Enthalpie-Wärmetauscher wurde das LUNOS Nexxt Lüftungsgerät hinter dem PV-Modul integriert. Damit ist eine bedarfsgerechte Frischluft- und Feuchtezufuhr in den Raum möglich, was Heizenergie und Transportverluste reduziert und eine höhere Nutzerzufriedenheit ermöglicht.

Das dezentrale Lüftungsgerät kann die geforderte Luftmenge sowie Feuchte- und Wärmerückgewinnung (WRG) bereitstellen und ist für den Einbau in der 300 mm tiefen Elementfassade geeignet. Das Gerät ist hinter dem PV-Modul verbaut und erhält Zuluft, die durch definierte Lüftungsquerschnitte oberhalb und unterhalb des PV-Moduls in den Hinterlüftungsraum gelangt. So wird ein PVT-Luftkollektor gebildet und die Zuluft des Lüftungsgeräts vorkonditioniert. Um einen Wechsel der Ansaugrichtung der Zuluft im Hinterlüftungsraum entweder von oben (kurzer Weg – Sommerbetrieb) oder von unten (langer Weg – Winterbetrieb) zu ermöglichen, wurden eine schaltbare Saison-Klappe und Flossen mithilfe von CFD-Simulationen entwickelt und integriert.

Das Drehfenster kann über die Regelung automatisch geöffnet werden, um eine natürliche Lüftung und sommerliche Nachtkühlung zu gewährleisten. Außerdem kann über den Bypass des Lüftungsgeräts kühle Nachtluft ohne eine Temperaturanpassung durch den Wärmetauscher eingeleitet werden.

Aufgrund der begrenzten Elementtiefe und der erforderlichen Mindestdämmung und Hinterlüftungstiefe bleibt für den Batteriespeicher eine maximale Tiefe von 120 mm. Der ursprünglich favorisierte LG Chem Resu 6.5 Batteriespeicher musste aufgrund eingeschränkter Systemkompatibilität verworfen werden. Stattdessen wurde ein 2,4 kWh Pylontech US 2000 Speicher verbaut, der mit 89 mm ausreichend schmal ist. Mit diesem Speicher und abgestimmter Systemtechnik kann das PV-System als vom Netz entkoppeltes Inselsystem betrieben werden. Mehrere Speicher gleichen Typs können in Reihe geschaltet werden, um die Speicherkapazität zu erhöhen. Um das Lüftungsgerät netzautark mit 230 V AC betreiben zu können, wurde ein zusätzlicher DC-AC-Wechselrichter installiert. Da es sich beim Batteriespeicher um ein nicht geregeltes Bauprodukt handelt, ist für das System ein Verwendbarkeitsnachweis erforderlich.

Bild 7 zeigt einen Übersichtsplan über das PV-Inselsystem und die Versorgung der elektrischen Komponenten. Zur Betriebssicherheit wurden das Gateway und die Steuereinheit am Prototyp über das Stromnetz versorgt. Im Endsystem können beide aber

auch netzautark über den Wechselrichter (ID 71) betrieben werden.

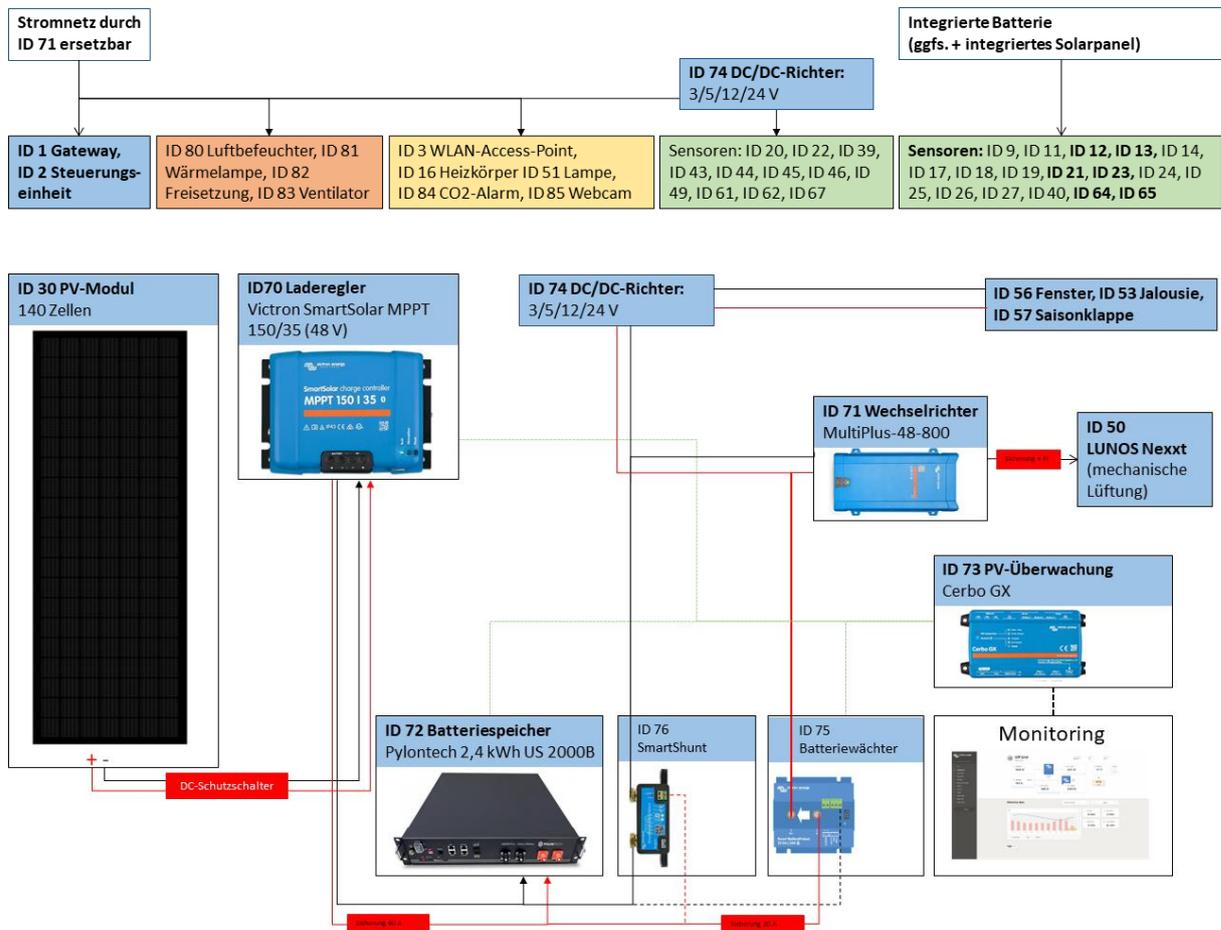


Bild 7 – Elektrische Versorgung und Kabelplan. **Fett** hervorgehobene IDs sind für das Endsystem erforderlich.

#### 4.5 AP 5 – KONSTRUKTIVE ENTWICKLUNG

Die beiden 300 mm tiefen Fassadenelemente wurden konstruktiv bis ins Detail ausgebildet und dokumentiert. Dies beinhaltet Übersichtpläne, Ansichten, Anschlussdetails, Einbauzeichnungen der Geräte, Werkstattzeichnungen mit allen Fertigungsdetails und Bauteilbezeichnungen sowie Komponenten- und Bestelllisten. Die Fertigungsunterlagen von SOM sind damit bereit für eine zukünftige Markteinführung des PRÄKLIMA Fassadensystems.

Für eine homogene Ansicht können die Anlagenkomponenten weitestgehend verdeckt (v. a. im Batteriekasten im Technikelement) integriert werden. Die Prallscheibe reduziert die Lärmbelastung von Nutzer:innen und die Windbelastung des Sonnenschutzes. Das



fassadenintegrierte PV-System erfüllt die Anforderungen nach DIN VDE 0100-712 (Niederspannungsrichtlinie). Das monokristalline PV-Modul der ertex GmbH ist IEC 61215, IEC 61730 und Schutzklasse II zertifiziert. Die Prallscheibe und das PV-Modul sind aus Verbundsicherheitsglas und entsprechen den Sicherheitsanforderungen für geschoss-hohe absturzsichernde Verglasungen nach DIN 18008.

Das Fassadeninnenblech an der Aussparung des Technikkastens ist gelocht ausgeführt, damit Wärme der technischen Komponenten abgeführt werden kann. Die Lage des Batteriespeichers ist gegen Durchbiegung gesichert. Während des Transportes der Elementfassade sollte die Batterie außerhalb gelagert und erst nach der Montage der Elemente eingesetzt werden.

Alle verwendeten Materialien außer dem Batteriespeicher, dem PV-Modul des Luftkollektors und der Steuerungshardware können als nicht brennbar (A1+A2) klassifiziert werden. Für eine Produkteinführung, speziell bei Einbausituationen von über 22 m, muss das Fassadensystem nach den Brandschutzprüfungen in DIN 13823 getestet und klassifiziert werden.

#### **4.6 MEILENSTEIN 1 – FASSADENELEMENT**

Es wurden zwei Fassadenelemente entwickelt, welche sämtliche Funktion der ursprünglich drei geplanten Elemente beinhalten und nach Belieben in unterschiedlicher Anzahl und Anordnung eingesetzt werden können. Das transparente Sichtelement vereint Transparenz, Blend- und Sonnenschutz und die Möglichkeit zur natürlichen Belüftung. Das gedämmte Technikelement beinhaltet den PVT-Luftkollektor mit mechanischer Lüftung, den Batteriespeicher, die Steuerungseinheit sowie betriebstechnische Komponenten. Der erste Meilenstein wurde gemäß ursprünglichem Zeitplan im 11. Projektmonat erreicht.

#### **4.7 MEILENSTEIN 2 – STEUERUNG**

Steuereinheit und selbstlernende Algorithmen, Aktoren, Sensorik-Konzept, Kommunikation und Datenspeicherung wurden entwickelt. Um die Funktion des Systems zu prüfen, erfolgte die Entwicklung und Errichtung des Prototypen. Aufgrund einer Reihe an Nacharbeiten während der Funktionsprüfungen (AP 7.1) wurde der Meilenstein 2 bis Juni 2022 – 11 Monate gegenüber der aktuellen Zeitplanung verzögert – erreicht.

## 4.8 AP 6 – THERMISCHE SIMULATION FASSADENELEMENT

### AP 6.1 Nutzereinfluss und Wettervorhersage | AP 6.2 Erfüllung Komfortkriterien

Für die thermische Simulation des Fassadenelements wurde in einem innovativen Ansatz die Simulationsplattform zur thermischen und energetischen Gebäudesimulation *EnergyPlus* mit einem komplexen *Python*-Skript gekoppelt.

Durch diese Kopplung soll es ermöglicht werden, mit dem RL-Algorithmus sämtliche Steuerungsfunktionen am virtuellen *EnergyPlus*-Modell umzusetzen. Der Detailgrad dieses Simulationsansatzes geht weit über die in AP 2 beschriebene Kombination von *EnergyPlus* mit dem *Open-AI-Gym* hinaus und soll die Anwendung, Überprüfung und Effizienzermittlung des RL-Algorithmus in unterschiedlichen Situationen (Nutzereinfluss, Wetter-/Klimaverhältnisse, Büro-/Gebäudevarianten etc.) ermöglichen. Darüber hinaus können hiermit die Lernszenarien des RL-Algorithmus diversifiziert werden, was den Lernprozess beschleunigt und zu einem robusteren Algorithmus führt.

Um diese besonders detaillierte Abbildung des thermischen Gebäudemodells mit selbstlernender Regelung zu generieren, müssen in dem *Python*-Skript alle Elemente (Akteure, anlagentechnische Komponenten und Steuerfunktionen) implementiert werden. Hierfür müssen für jedes Element individuelle Algorithmen in *Python* entwickelt werden.

Naturgemäß stellt bereits eine thermische Gebäudesimulation für sich einen aufwändigen Prozess dar, da alle Parameter und Einflussfaktoren zu Gebäude, Konstruktion, Anlagentechnik und Nutzung im virtuellen Modell adäquat erfasst und die Validität des Modells und der Berechnungsergebnisse aufwändig geprüft werden müssen.

Bei der Einbindung der selbstlernenden Steuerung in *EnergyPlus* mittels *Python* können weder vordefinierte Regelungsstrategien aus *EnergyPlus* genutzt noch selbst entworfene Regelungsstrategien durch *Energy Management System*(EMS)-Skripte eingebunden werden. Hinzu kommt, dass sich nur eine sehr begrenzte Anzahl der in *EnergyPlus* vorhandenen Bausteine durch *Python* überschreiben lässt. In *EnergyPlus* funktionierende und geprüfte Simulationen zeigen sich erst beim Überschreiben der Regelungen durch *Python* als fehlerhaft, was die Modellierung erschwert und zeitaufwändig macht. Bisher gibt es nur wenige Veröffentlichungen und einen begrenzten Kenntnisstand zur Einbindung von *Python* in *EnergyPlus*.

Diese beschriebenen Herausforderungen und hinzukommende Schnittstellenprobleme bei der Kommunikation der unterschiedlichen Softwarepakete machten die Fehlersuche und Modellentwicklung sehr aufwändig. Somit war eine iterative Vorgehensweise erforderlich, um bei der Umsetzung jedes einzelnen Elements die Ergebnisse und die Validität



des Modells zu prüfen, Fehler aufwändig zu ermitteln und zu beseitigen bzw. neue Lösungswege zu entwickeln. Dieser hohe Simulationsaufwand und unvorhergesehene Mehraufwände bei der Errichtung und Inbetriebnahme des Teststands (siehe AP 7.1) führten dazu, dass die thermischen Simulationen mittels Kopplung von *EnergyPlus* und *Python* erst gegen Projektende fehlerfrei durchgeführt werden konnten. Nachfolgende Tabelle 1 listet einige der größten Probleme bei der Umsetzung der selbstlernenden Regelung mittels *EnergyPlus* und *Python* auf.

Problem	Status
Die Grundlage des selbstlernenden (reinforced learning – RL) Algorithmus bildet eine Grenzwertsteuerung (rule based control – RBC) aller Anlagenkomponenten, für die es keine allgemein anerkannte Grundlage gibt. Für jede Komponente und jeden möglichen Fall mussten praktikable RBC-Strategien definiert werden, wobei Referenzen oft unterschiedliche Software verwenden und nur fallspezifische Teillösungen bieten. Insbesondere bei kombinierten Anforderungen wie z. B. der Beleuchtungssteuerung und dem Blendschutz durch die Jalousie stellte sich die RBC-Entwicklung als zeitaufwändiger Prozess vor dem RL-Algorithmus dar. ➔ RBC-Steuerung wurde erarbeitet.	✓
Die Standard-Regelungsstrategie der natürlichen Belüftung kann wegen fehlender Aktoren nicht mittels <i>Python</i> umgesetzt werden. ➔ Umsetzung mittels komplexen Modell mit Druckkoeffizienten.	✓
Bei Ausgabe des Blendungsindex funktioniert die Jalousiesteuerung mit <i>Python</i> mit den gewünschten Eigenschaften nicht mehr. ➔ Alternative Einstellungen wurden gefunden.	✓
Steuerung der Durchflussmenge der mechanischen Lüftung mit <i>Python</i> nicht möglich. ➔ Alternative Steuerung wurde entwickelt.	✓
<i>Python</i> funktioniert nicht, wenn EMS-Skript aktiv ist. ➔ EMS-Skript wird nur in <i>Python</i> aktiviert.	✓
Der Bypass der mechanischen Lüftung (keine WRG aktiv) wird in Abhängigkeit verschiedener Bedingungen (Luftfeuchtigkeit, Außentemperatur etc.) ausgelöst. Der direkte Zugriff durch <i>Python</i> funktioniert in der aktuellen Konfiguration nicht. ➔ Zugriff indirekt auf die Verfügbarkeit, nicht auf direktes an-/ausschalten.	✓
Die Steuerung der WRG der mechanischen Lüftung über <i>Python</i> führt dazu, dass der Bypass nicht mehr in <i>EnergyPlus</i> über EMS, sondern nur noch direkt in <i>Python</i> geprüft werden kann, da der Bypass eine Funktion der Wärmerückgewinnung ist. Dies erschwert eine schnelle Überprüfung der Ergebnisse und der Funktionstüchtigkeit des Modells. ➔ Funktionstüchtigkeit wurde geprüft.	✓
Das Modell der mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung erlaubt keine Kombination mit dem PVT-Luftkollektor. ➔ Als Alternative wurde ein detailliertes Modell zum PVT-Luftkollektor mit mechanischer Lüftung und Wärmerückgewinnung implementiert.	✓

Tabelle 1 – Problemstellungen bei der Einbindung von *Python* in *EnergyPlus*.

Die einzelnen Problemstellungen konnten während der Projektlaufzeit behoben werden, erforderten jedoch einen hohen Aufwand. Alle Aktoren des *EnergyPlus*-Modells können nun über *Python* gesteuert werden. Damit sind eine virtuelle Analyse des RL-Algorithmus und eine Bewertung dessen Effizienz möglich. Aufgrund der fortgeschrittenen Projektlaufzeit ist der Detailgrad der Analysen und Auswertungen für diesen Endbericht beschränkt. Dennoch können vielversprechende Ergebnisse dargestellt werden.

Die Leistung der intelligenten Steuerung auf Grundlage des *reinforced learning* (RL) kann mit der Leistung der entwickelten regelbasierten Steuerung (RBC) anhand der Zufriedenheitsstunden der Raumkomfortkriterien während der Belegung und des Energieverbrauchs verglichen werden. Bild 8 zeigt das Lernverhalten der intelligenten Steuerung am Beispiel des Anstiegs der Zufriedenheitsstunden während des Lernprozesses. Es zeigt sich, dass das Modell mit der Zeit lernt: Die Zahl der Zufriedenheitsstunden steigen und der Selbstlernereffekt funktioniert.

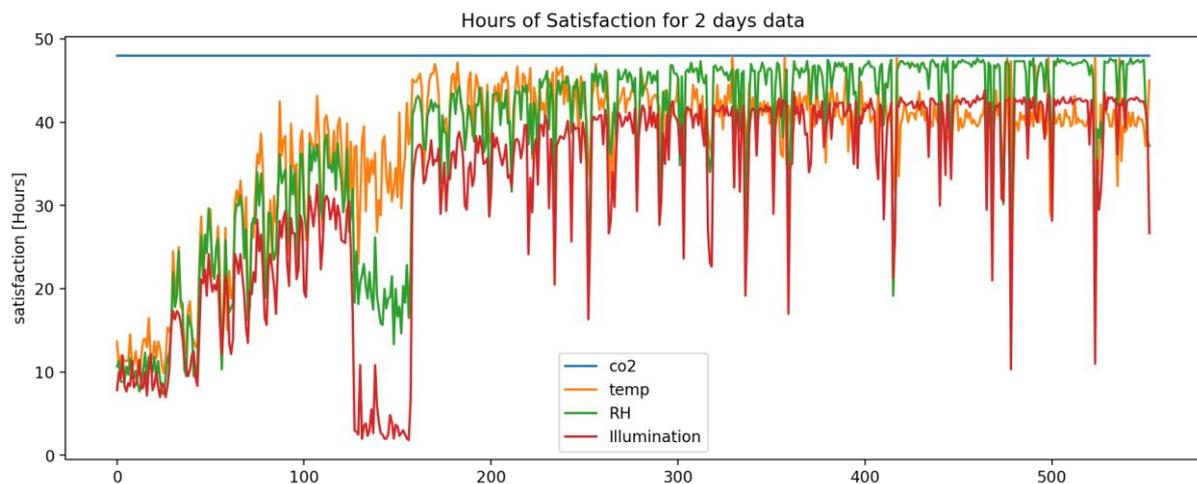


Bild 8 – Anstieg der Zufriedenheitsstunden während des Trainingsprozesses des RL-*EnergyPlus*-Modells.

Bild 9 zeigt anhand der Innen- und Außentemperaturen, dass während eines einwöchigen Lernprozesses des RL-Algorithmus die Behaglichkeitsgrenzwerte der Innenraumtemperatur zunehmend eingehalten werden.

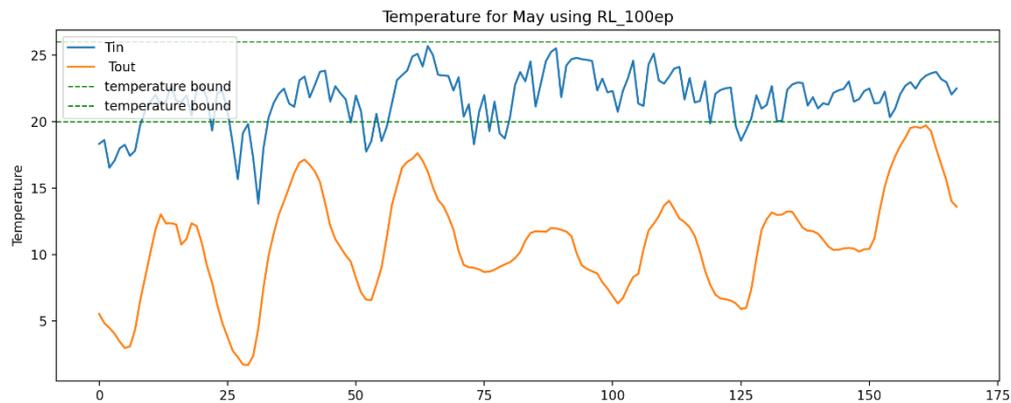


Bild 9 – Temperaturverlauf des RL-EnergyPlus-Modells nach 100 Lernepisoden.

Bei der Referenzregelungsmethode handelt es sich um eine fortschrittliche regelbasierte Steuerung (RBC), die auf der Grundlage von Regelungsstrategien auf dem neuesten Stand der Forschung zur Maximierung von Komfort und Energieeinsparung entwickelt wurde. Diese fortschrittliche regelbasierte Steuerung, die eine Verbesserung konventioneller regelbasierter Steuerungsstrategien für Gebäude darstellt, bietet eine gute Referenzmethode. Bild 10 zeigt die Temperaturverläufe für die gleiche Zeit mit RBC. Die RBC-Steuerung erreicht durchgehend die Konformität der Innenraumtemperatur mit den Behaglichkeitsgrenzwerten.

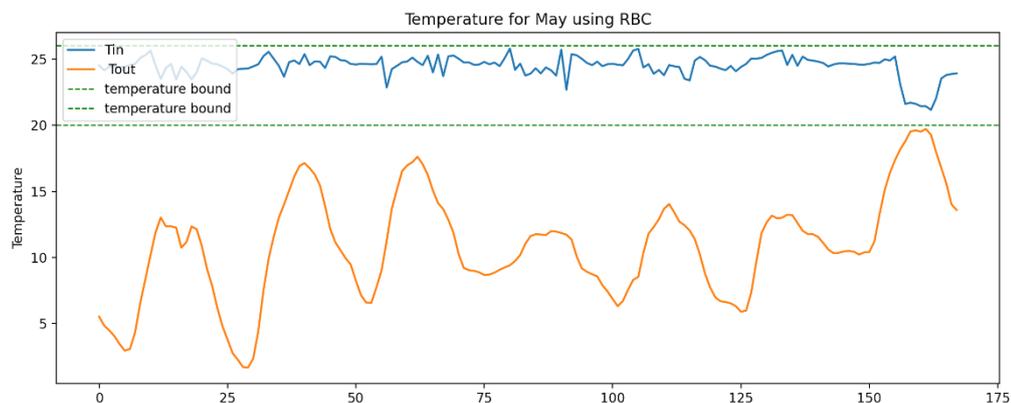


Bild 10 – Temperaturverlauf des EnergyPlus-Modells mit RBC.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sowohl die intelligente Steuerung als auch die regelbasierte Steuerung für den Testzeitraum zufriedenstellende Ergebnisse liefern können (Bild 9 und Bild 10). Bei der RL-Steuerung ist jedoch zunächst eine Lernphase notwendig, während der noch von den Behaglichkeitszielwerten abgewichen wird. Außerdem zeigen sie, dass der Lernprozess des RL-Algorithmus funktioniert und mit der Zeit



zu einer höheren Nutzerzufriedenheit führt (Bild 8). Da die Feinabstimmung der Funktionen und weitere Analysen in diesem Bereich noch viel Raum für ausführlichere Ergebnisse besitzen, wird die detaillierte Auswertung des Modells nach der Projektlaufzeit weiterverfolgt.

Ähnlich wie beim Testen der Aktoren im Simulationsmodell wurden auch alle Aktoren des Prototyps auf ihre Fernsteuerbarkeit durch Skripte getestet. Obwohl die Daten der relevanten Sensoren des Prototyps seit Oktober 2021 größtenteils für die Fernsteuerung zur Verfügung standen, kam es in der Folge zu einer Vielzahl verschiedener Gerätedefekte, Kommunikationsstörungen und Unsicherheiten (siehe AP 7.2 und AP 7.3). Eine längere unterbrechungsfreie Funktion des Prototyps wurde somit erst gegen Ende der Projektlaufzeit erreicht. Ohne diese vollständigen und zuverlässigen Messdaten und Aktoren ist eine Lernkonvergenz des RL-Algorithmus am Prototyp unwahrscheinlich. Um den Lernprozess am Prototyp unter den oben genannten Umständen zu beschleunigen, wird daher ein "Lerntransfer" unter Verwendung eines "digitalen Zwillings" vorgeschlagen. Diese Methode ermöglicht ein schnelleres Lernen des RL-Algorithmus am Simulationsmodell und dessen Übertragung auf den Prototyp. Diese Methode beginnt mit mehrmaligen Lernphasen des mit *Python* gesteuerten *EnergyPlus*-Modells, bei denen das Erlernte wieder in das Modell einfließt. Diese Phase wurde bereits erfolgreich abgeschlossen und die Ergebnisse zeigen, dass im Modell, das für den Monat Dezember trainiert wurde, ein Lernprozess analog zu Bild 8 erfolgte. Dieser kann auf andere Monate des Jahres angewandt werden, sodass es schneller genauere Ergebnisse liefert und eine Wiederholung der ersten Lernphasen entfällt. Letztlich kann das Modell auf den funktionstüchtigen Prototyp übertragen werden. Auch wenn die Umsetzung dieser Methode den Zeitrahmen des Projekts sprengt, ermöglicht sie ein schnelleres Lernen am Simulationsmodell und dessen darauffolgende Übertragung auf den funktionstüchtigen Prototyp, was nach der Projektlaufzeit weiterverfolgt werden soll.

Zwar konnten die Energieeinsparung durch den RL-Algorithmus und die prädiktive Regelung aufgrund des komplexen und zeitaufwändigen Simulationsansatzes und mangelnder RL-Lernphasen am Prototyp nur im beschränkten Maße innerhalb der Projektlaufzeit analysiert werden, dennoch wurden zusätzlich Erkenntnisse zur Effizienzsteigerung durch den RL-Algorithmus in weniger komplexen Simulationen gewonnen (AP 2). Hierzu erfolgten internationale Veröffentlichungen durch TUD-INF beim *Great Lakes Symposium on VLSI*, *Association for Computing Machinery* und dem *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

Weitere Untersuchungen zu optimierten Regelungsstrategien und den Energieeinsparungen der einzelnen Aktoren und Komponenten des Fassadensystems erfolgten mit



dem Gebäudesimulationsprogramm *IDA ICE* durch TUD-BK. Hierfür wurde ein einfacher Büroraum, der die energetischen Mindestanforderungen erfüllt, jedoch keine anlagentechnischen Komponenten zur Luftvorerwärmung sowie zur geregelten Lüftung, Belichtung und Verschattung besitzt, modelliert. In diesem wurden in separaten Simulationen einzelne, intelligent geregelte anlagentechnische Komponenten ergänzt.

Hierdurch wurden die möglichen Effizienzsteigerungen durch die einzelnen, intelligent geregelten Komponenten ermittelt. Es zeigte sich, dass gegenüber dem rudimentär ausgeführten Büroraum erhebliche Energieeinsparungen durch die Ergänzung einzelner, intelligent geregelter Anlagenkomponenten möglich sind, wie in Tabelle 2 für die einzelnen Komponenten und ein südwärts orientiertes Büro in Potsdam mit einer Doppelfassade dargestellt ist. Hierbei wird ebenfalls deutlich, dass eine sinnvolle Kombination der einzelnen Regelungen erforderlich ist, um jeweils nur die positive Auswirkung dieser Regelung zu erhalten.

Anlagensystem		Auswirkung auf Energiebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> a)]			
		Heizung	Kühlung	Beleuchtung	Gesamt
Einfaches Referenzbüro ohne anlagentechnische Regelung		14,28	28,96	2,85	46,09
Ergänzt durch	Luftkollektor und Lüftungsgerät mit 80 % Wärmerückgewinnung (konstanter Betrieb)	3,11	37,19	2,85	43,16
		- 78,2 %	+ 28,4 %	+/- 0 %	- 6,4 %
	Fensterlüftung (nachts) und während Nutzung wenn $T_{\text{Raum}} > 23^{\circ}\text{C}$ und $T_{\text{Raum}} > T_{\text{Außen}}$	14,98	7,78	2,85	25,61
		+ 4,9 %	- 73,1 %	+/- 0 %	- 44,4 %
	Jalousie in Abhängigkeit der Globalstrahlung	16,9	14,36	2,98	34,24
		+ 18,3 %	- 50,4 %	+ 4,6 %	- 25,7 %

Tabelle 2 - Energieeinsparungen gegenüber rudimentär konditionierten Büroraum durch einzelne, intelligent geregelte Anlagenkomponenten.

Die Ergebnisse können nicht die Gesamtheit aller Funktionen und die reale Effizienzsteigerung des intelligenten Algorithmus abbilden, da zum einen die einzelnen anlagentechnischen Komponenten isoliert betrachtet wurden und zum anderen das Basisbüro eine energetisch rudimentäre Ausführung besitzt. Eine intelligente Kopplung der einzelnen



anlagentechnischen Komponenten ist erforderlich, da einzelne Zielstellungen (z. B. natürliche Belichtung, Vermeidung von Blendung und thermische Raumkonditionierung) gegensätzlich wirken können.

Die Untersuchungen zeigen jedoch das Potential der intelligenten Regelung und lieferten außerdem Erkenntnisse zu geeigneten Regelstrategien als Grundlage des Lernprozesses des RL-Algorithmus.

### AP 6.3 Leistungsfähigkeit, Deckungsanteile und Autarkiegrad

Im Rahmen der Untersuchungen zu AP 6.3 (Leistungsfähigkeit, Deckungsanteile und Autarkiegrad) wurden Simulationen zur prädiktiven Regelung des Fassadensystems durchgeführt und Erkenntnisse zu möglichen Einsparungen der Batteriekapazität durch den prädiktiven Algorithmus gewonnen.

Die Leistungsfähigkeit und der Autarkiegrad des Systems wurden in einer Simulationsstudie mit dem PV-Simulationsprogramm PV\*SOL bewertet. Zusätzlich wurden die elektrischen Verbraucher, der PV-Ertrag und die Lade- und Entladevorgänge der Batterie am Teststand aufgezeichnet und in AP 7 ausgewertet.

Die Basisvariante der Untersuchung bildet das PV-Inselsystem, das im Technikelement der PRÄKLIMA Fassaden am Teststand verbaut wurde. Es besteht aus einem 585 Wp-PV-Modul mit 140 monokristallinen Zellen, einer 2,4 kWh-LiFePO<sub>4</sub>-Batterie (Pylontech US 2000 B), einem DC/DC-PV-Laderegler, einem Batteriewechselrichter und den installierten Verbrauchern. Eine genauere Beschreibung des Systemaufbaus ist in AP 7 enthalten. Diese Basisvariante kann um bis zu drei weitere Batterien des identischen Batterietyps ergänzt werden, die in der Aussparung im Technikelement Platz finden. Damit können Batteriekapazitäten von 2,4 kWh, 4,8 kWh, 7,2 kWh oder 9,6 kWh umgesetzt werden.

Die Verbraucher des Systems können in kurzzeitige Verbraucher (Fensterantrieb, Jalousiemotor, Magnetöffner der Klappe im Luftkollektor) und permanente Verbraucher (mechanische Lüftung und *Raspberry Pi* (Steuereinheit)) unterteilt werden. Da ein *Raspberry Pi* nach Einschätzung von TUD-INF sechs Büros und Fassadenelemente steuern kann, wurde dessen Energiebedarf auf sechs Fassadenelemente aufgeteilt. Die Sensorik wird mit integrierten Batterien betrieben, weshalb sie aus dem Verbrauchsprofil ausgeklammert wurde. Der Magnetöffner benötigt rund 50 W für einen Schaltvorgang. Da dieser aber sehr kurz ist (< 1 Sek., entspricht 0,014 Wh/d) und die Saisonklappe nur während der Jahresübergangsphasen (Frühjahr/Herbst) betrieben wird, wurde dieser marginale



Verbraucher vernachlässigt. Es wurden drei Betriebsszenarien gebildet, die sich in ihrer Verbrauchsstruktur und den Lastprofilen unterscheiden:

- Szenario A – reine mechanische Lüftung (95 kWh/a)
- Szenario B – reine natürliche Fensterlüftung (6 kWh/a)
- Szenario C – intelligent und prädiktiv gesteuerte hybride Lüftung (54-60 kWh/a)

Die Annahmen der Szenarien wurden so gewählt, dass die Behaglichkeit im Innenraum eingehalten wird.

Für **Szenario A mit rein mechanischer Lüftung (95 kWh/a)** muss daher die Mindestluftwechselrate nach DIN 15251 während und außerhalb der Belegungszeiten nach DIN V 18599 eingehalten werden. Tabelle 3 beschreibt die Annahmen, Verbraucher und den Energiebedarf pro Belegungstag bzw. pro Jahr von Szenario A.

Verbraucher	Leistung [W]	Zeitplan	Energiebedarf an Belegungstag [Wh]	Energiebedarf pro Jahr [kWh]
Mindestluftwechsel mech. Lüftung während Belegung: 65 m <sup>3</sup> /h	16	Wochentags 07.00-18.00 Uhr	176	44
Mindestluftwechsel nach DIN 15251 für 27,1 m <sup>2</sup> Büro während Belegung Verbrauch LUNOS aus Monitoring am Teststand (69 m <sup>3</sup> /h): 16 W Belegungszeitplan nach DIN 18599				
Mindestluftwechsel mech. Lüftung außerhalb Belegung: 9,8 m <sup>3</sup> /h	8	Wochentags 18.00-07.00 Uhr Wochenenden 00:00-24.00 Uhr Feiertage 00:00-24.00 Uhr	104	46
Mindestluftwechsel nach DIN 15251 für 27,1 m <sup>2</sup> Büro ohne Belegung Verbrauch LUNOS aus Monitoring am Teststand (15 m <sup>3</sup> /h): 8 W Belegungszeitplan nach DIN 18599				
Raspberry Pi	0,5	Permanent	12	4,6
Verbrauch Raspberry Pi aus Monitoring am Teststand: 3 W Ann.: Eine Steuereinheit für sechs Büros (3 W/6 = 0,5 W) Dauerbetrieb				
Jalousie	36	4 x 1 Minute/Tag	2,4	< 1
Verbrauch lt. Datenblatt: 36 W Ann.: Vier Jalousiefahrten/Tag zu je 1 Minute				
Summe			294,4	95

Tabelle 3 – Verbraucher am PRÄKLIMA Fassadensystem für Szenario A.

Da es für **Szenario B mit der rein natürlichen Lüftung (6 kWh/a)** keine normativen Anforderungen zur Zahl der Mindestfensteröffnungen gibt, wurden Erkenntnisse aus einer Simulationsstudie einer Dissertation bei TUD-BK genutzt, die im Juni 2022 verteidigt wird. Demnach werden für eine energieeffiziente natürliche Lüftung eines Standard-Bürraums in Mitteldeutschland mit 32 m<sup>2</sup> und vier Personen im Durchschnitt 21 Fensteröffnungen mit zwei Minuten Öffnungsdauer in den Wintermonaten und 15 Fensteröff-



nungen mit mindestens zehn Minuten Öffnungsdauer bei einer Außentemperatur zwischen 19 °C und 25 °C in den Sommermonaten benötigt, um die Behaglichkeit im Büroraum zu gewährleisten. Deshalb wurden bei der natürlichen Fensterlüftung ganzjährig, auf der sicheren Seite liegend, 21 Fensterfahrten zu je einer Minute während der Belegungszeiten nach DIN V 18599 angenommen. Die eine Minute ermöglicht die Öffnungs- und Schließfahrt des Fensters für eine Fensteröffnung von etwa 25 %, was aufgrund des raumhohen Fensters und der Drehöffnungsfunktion eine ausreichende Öffnungsfläche bereitstellt. Tabelle 4 beschreibt die Annahmen, Verbraucher und den Energiebedarf pro Belegungstag bzw. pro Jahr von Szenario B.

Verbraucher	Leistung [W]	Zeitplan	Energiebedarf an Belegungstag [Wh]	Energiebedarf pro Jahr [kWh]
Fensteröffner	15	Wochentags 07.00-18.00 Uhr 21 x pro Tag für 1 Min.	2,75	< 1
Verbrauch lt. Datenblatt: 15 W Ann.: 21 x Fensterfahrt für 1 Min. (Öffnen + Schließen) während Belegung Belegungszeitplan nach DIN 18599				
Raspberry Pi	0,5	Permanent	12	4,6
Verbrauch Raspberry Pi aus Monitoring am Teststand: 3 W Ann.: Eine Steuereinheit für sechs Büros (3 W/6 = 0,5 W) Dauerbetrieb				
Jalousie	36	4 x 1 Minute/Tag	2,4	< 1
Verbrauch lt. Datenblatt: 36 W Ann.: Vier Jalousiefahrten/Tag zu je 1 Minute				
Summe			17,2	6

Tabelle 4 – Verbraucher am PRÄKLIMA Fassadensystem für Szenario B.

In **Szenario C mit intelligent und prädiktiv gesteuerter hybrider Lüftung (54-60 kWh/a)** wurde ein Betriebsmodus mit intelligenter Steuerung der Belüftungselemente unter Berücksichtigung der Einstrahlung auf die Fassadenebene angenommen, der die Vorteile beider Lüftungssysteme vereint. Hierfür wurden unterschiedliche Tageseinstrahlungsgrenzwerte untersucht, die erreicht werden müssen, damit die Lüftung über die mechanische Lüftungseinheit erfolgt. Dadurch wird gewährleistet, dass ausreichend Vorerwärmung der Außenluft durch die Solarstrahlung erreicht wird und zeitgleich genug PV-Ertrag gewonnen wird, um den erhöhten Stromverbrauch durch die mechanische Lüftung zu decken. Wenn die Einstrahlung unter den Grenzwerten liegt, erfolgt die natürliche Lüftung durch den Fensteröffner, der weniger Energie verbraucht. Bei der natürlichen Fensterlüftung wurden wieder 21 Fensteröffnungen pro Tag während der Belegungszeiten zur Gewährleistung der Behaglichkeit angenommen. Als Einstrahlungsgrenzwerte wurden Tageseinstrahlungen zwischen 0,25 kWh/(m<sup>2</sup>d) und 2,5 kWh/(m<sup>2</sup>d) in 0,25 kWh/(m<sup>2</sup>d)-Schritten untersucht. Tabelle 5 beschreibt die Annahmen, Verbraucher und den Energiebedarf pro Belegungstag bzw. pro Jahr von Szenario C für ein südwärts orientiertes Büro am Standort Potsdam. In Abhängigkeit des Einstrahlungsgrenzwerts



(hier 0,25, 0,5 und 0,75 kWh/(m<sup>2</sup>d)) ergibt sich auch ein unterschiedlicher absoluter Jahresenergiebedarf, da die mechanische Lüftung häufiger bzw. weniger häufig aktiv ist. Außerdem ändert sich das Stromlastprofil und nähert sich in seiner Verlaufsform dem PV-Ertragsprofil an.

Verbraucher	Leistung [W]	Zeitplan	Energiebedarf an Belegungstag [Wh]	Energiebedarf pro Jahr [kWh] bei Grenzwert X [kWh/(m <sup>2</sup> d)]		
				X = 0,25	X = 0,5	X = 0,75
Lunos Lüfter mit 65 m <sup>3</sup> /h	16	Wochentags 07.00-18.00 Uhr Wenn Einstrahlung > Grenzwert X	176	55	50	48
Aktiv, während Belegung wenn Einstrahlung > Grenzwert Mindestluftwechsel nach DIN 15251 für 27,1 m <sup>2</sup> Büro während Belegung Verbrauch LUNOS aus Monitoring am Teststand (69 m <sup>3</sup> /h): 16 W + 3 W Stand-by Belegungszeitplan nach DIN 18599						
Fensteröffner	15	Wochentags 07.00-18.00 Uhr Wenn Einstrahlung < Grenzwert X 21 x pro Tag für 1 Min.	5,25	< 1	< 1	< 1
Aktiv, während Belegung wenn Einstrahlung < Grenzwert Verbrauch lt. Datenblatt: 15 W Ann.: 21 x Fensterfahrt für 1 Min. (Öffnen + Schließen) während Belegung Belegungszeitplan nach DIN 18599						
Raspberry Pi	0,5	Permanent	12	4,6	4,6	4,6
Verbrauch Raspberry Pi aus Monitoring am Teststand: 3 W Ann.: Eine Steuereinheit für sechs Büros (3 W/6 = 0,5 W) Dauerbetrieb						
Jalousie	36	4 x 1 Minute/Tag	2,4	< 1	< 1	< 1
Verbrauch lt. Datenblatt: 36 W Ann.: Vier Jalousiefahrten/Tag zu je 1 Minute						
Summe			195,65	61	56	54

Tabelle 5 – Verbraucher am PRÄKLIMA Fassadensystem für Szenario C.

Es wird deutlich, dass die permanent laufende mechanische Lüftungsanlage den höchsten Energiebedarf besitzt, während die Kurzzeitverbraucher (Fensteröffner und Jalousie) nur einen geringen Anteil des Verbrauchs ausmachen.

Für die drei Betriebsszenarien (A, B, C) wurde per Simulationsstudie geprüft, welche Systemkombinationen erforderlich sind, um einen Autarkiegrad von 100 % zu erreichen. Da es sich bei der Simulation von Lade- und Entladevorgängen von PV-Speichersystemen um hochdynamische Prozesse handelt, wurde mit einem minütigen Zeitschritt simuliert. Dies erfolgte für die Standorte Potsdam, Helsinki, Athen, um unterschiedliche Einstrahlungssituationen zu berücksichtigen. Aufgrund des geringen Energiebedarfs von Szenario B (reine natürliche Lüftung) erreicht dieses an südorientierten Fassaden in Potsdam und Athen bereits mit der Basiskonfiguration (1 x 585 Wp-PV-Modul und 1 x 2,4 kWh-

Speicher) 100 % Autarkie. In Helsinki ist an einer Südfassade aufgrund der geringeren Einstrahlung ein zusätzlicher Batteriespeicher notwendig.

Die Ergebnisse für Szenario A sind für den Standort Potsdam (Referenzklimaregion für Deutschland nach DIN V 18599) für ein südorientiertes Büro nachfolgend in Bild 11 dargestellt.

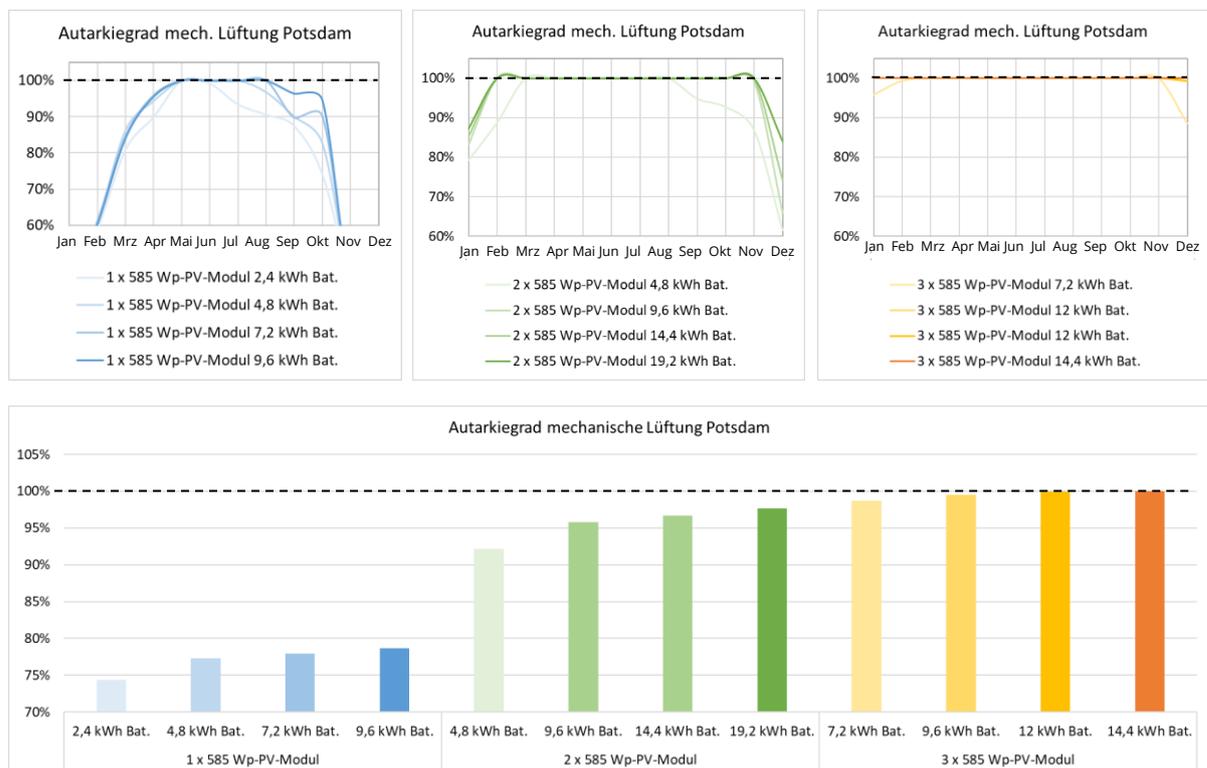


Bild 11 – Autarkiegrade bei Szenario A (mechanische Lüftung) für unterschiedliche Systemkonfigurationen an südorientiertem Büro in Potsdam.

Die rein mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung führt zu Einsparungen beim Heizenergiebedarf des Büros. Allerdings ist für einen permanent autarken Betrieb dieser Variante über die Wintermonate eine enorme PV- und Batteriekapazität erforderlich. So werden 3 x 585 Wp-PV-Modul und 6 x 2,4 kWh-Speicher benötigt, um die mechanische Lüftung eines Büroraums in Potsdam komplett autark zu betreiben. Dies ist mit den zur Verfügung stehenden Fassadenflächen nicht für ein Büro umsetzbar, da zur natürlichen Belichtung und zum Sichtbezug ein Flächenverhältnis von 1/3 Technischelement und 2/3 transparentem Fensterelement angestrebt wird. Hier müssten zusätzlich PV-Systeme unterstützend eingebunden oder ein Netzanschluss vorgesehen werden.

Die intelligent gesteuerte hybride Lüftung besitzt einen bedeutend geringeren absoluten Strombedarf als die reine mechanische Lüftung und orientiert diesen Bedarf an der zur Verfügung stehenden Solarstrahlung. Die verfügbare Solarstrahlung und die installierten



PV- und Batteriekapazitäten werden somit besser ausgenutzt. Deshalb kann – in Abhängigkeit der Einstrahlungsverhältnisse – mit der intelligent gesteuerten hybriden Lüftung auch mit den an einem Büro verfügbaren Platz- und Flächenkapazitäten der gewünschte Autarkiegrad von 100 % erreicht werden. So werden in Potsdam bei einem Einstrahlungsgrenzwert von 0,75 kWh/(m<sup>2</sup>d) bereits mit 1 x 585 Wp-PV-Modul und 2 x 2,4 kWh-Batteriespeichern 100 % Autarkie erreicht. Liegt der Einstrahlungsgrenzwert bei 0,5 kWh/(m<sup>2</sup>d), erreicht ein Technischelement mit 1 x 585 Wp-PV-Modul je nach Batteriekapazität Autarkiegrade zwischen 97,7 % (1 x 2,4 kWh-Speicher) und 99,5 % (4 x 2,4 kWh-Speicher). 100 % Autarkie werden beim Grenzwert von 0,5 kWh/(m<sup>2</sup>d) erst mit einer sechsten Batterie erreicht. Hier zeigt sich wieder, dass zur Überbrückung der winterlichen einstrahlungsarmen Phase hohe PV- bzw. Batteriekapazitäten notwendig sind. Die Ergebnisse für Szenario C sind für den Standort Potsdam (Referenzklimaregion für Deutschland nach DIN V 18599) für ein südorientiertes Büro nachfolgend in Bild 12 dargestellt.

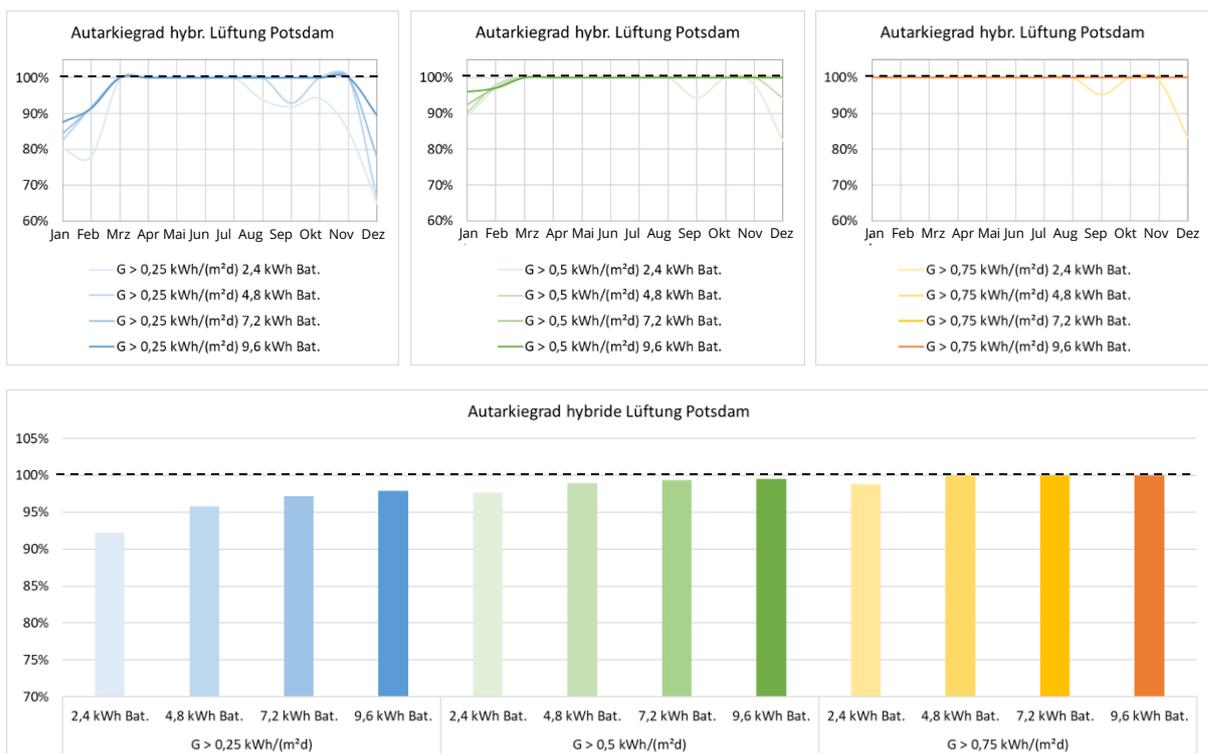


Bild 12 – Autarkiegrade bei Szenario C (hybride Lüftung) für unterschiedliche Systemkonfigurationen an südorientiertem Büro in Potsdam. Wechsel von mechanischer zu natürlicher Lüftung bei Einstrahlungsgrenzwerten von 0,25 kWh/(m<sup>2</sup>d), 0,5 kWh/(m<sup>2</sup> d), 0,75 kWh/(m<sup>2</sup> d).

Eine intelligente und die Einstrahlungssituation berücksichtigende Steuerung der Lüftungselemente führt folglich zu einem höheren Autarkiegrad. Gleichmaßen kann durch



eine Anpassung des Einstrahlungsgrenzwerts, ab dem von der mechanischen Lüftung zur natürlichen Lüftung gewechselt wird, die Batteriekapazität bei Wahrung der Autarkie reduziert werden.

In Helsinki wird ein Autarkiegrad von 100 % an einem südorientierten Büro aufgrund der geringen Einstrahlung erst mit einem Grenzwert von 1,0 kWh/(m<sup>2</sup>d) und der vollen Belegung des Technikelements (1 x 585 Wp-PV-Modul und 4 x 2,4 kWh-Speicher) erreicht. An einer Südfassade in Athen wirkt sich erst ein Grenzwert von 0,75 kWh/(m<sup>2</sup>d) auf den Autarkiegrad aus, da ganzjährig hohe Einstrahlungswerte vorliegen. Die Autarkie wird bei der hybriden Lüftung bei einem Grenzwert von 1,0 kWh/(m<sup>2</sup>d) und einem halb belegten Technikelement (1 x 585 Wp-PV-Modul und 2 x 2,4 kWh-Batteriespeicher) erreicht.

## AP 6.4 Auslegungsstandard

### Energetischer Auslegungsstandard

Auf Grundlage der Simulationsstudie in AP 6.3 wurden die benötigten PV- und Batteriekapazitäten ermittelt, die einen autarken Betrieb des Systems ermöglichen. Hierbei wurden die drei Szenarien mechanische, natürliche und hybride Lüftung an den Standorten Helsinki, Potsdam und Athen mit den Orientierungen Ost, Süd und West untersucht. Der Einsatz in einem nordorientierten Büro wurde aufgrund der geringen Sonneneinstrahlung ausgeschlossen. Für die hybride Lüftung, die das prädiktiv und intelligent geregelte klima-adaptive Fassadensystem darstellt, wurden je nach Standort unterschiedliche Einstrahlungsgrenzwerte untersucht. Tabelle 6 listet die benötigten Systemkomponenten (PV-Module und Batteriespeicher) auf, die in Helsinki, Potsdam und Athen bei Ost-, Süd- und West-Orientierungen einen Autarkiegrad von 100 % erreichen. Es werden die drei Lüftungsszenarien und unterschiedliche Einstrahlungsgrenzwerte bei der hybriden Lüftung dargestellt. Da die möglichen PV-Erträge im Sommer weit über dem durch die netzautarken Systeme abnehmbaren Bedarf liegen, nutzen die Systeme nur einen Teil der potentiellen Erträge. Deshalb ist auch der Nutzungsgrad der möglichen PV-Erträge in der Tabelle enthalten. Aufgrund des Flächenanteils von Technikelement zu Gesamtfläche (1:3) und der Platzverhältnisse nicht realisierbare Varianten sind rot, umsetzbare Varianten grün dargestellt.



Standort	Lüftungsart	Grenzwert kWh/(m²d)	Orientierung		
			Ost	Süd	West
<b>Helsinki</b> Durchschnittliche jährliche Globalstrahlung auf Horizontale 2005-2016: 925,6 kWh/(m²a) (PVGIS © European Union, 2001-2022)	mechanisch	-	-	5   12 23 %	-
	hybrid mit Grenzwert	0,75	2   7 33 %	2   2 27 %	2   7 35 %
		1,0	2   7 32 %	1   4 54 %	2   7 34 %
		1,5	2   7 29 %	1   2 45 %	2   7 27 %
		2,5	2   7 26 %	1   2 37 %	2   7 25 %
	natürlich	-	2   7 13 %	1   2 20 %	2   7 13,5 %
<b>Potsdam</b> Durchschnittliche jährliche Globalstrahlung auf Horizontale 2005-2016: 1080 kWh/(m²a) (PVGIS © European Union, 2001-2022)	mechanisch	-	-	3   6 38 %	6   18 22 %
	hybrid mit Grenzwert	0,5	3   5 27 %	1   6 68 %	3   2 25 %
		0,75	2   2 33 %	1   2 61 %	2   1 35 %
		1,5	1   3 54 %	1   1 (99,9%) 51 %	1   5 61 %
		1,75	1   3 (99,8%) 51 %	1   1 46,5 %	1   3 52 %
	natürlich	-	1   3 (99,2%) 30 %	1   1 19 %	1   3 31 %
<b>Athen</b> Durchschnittliche jährliche Globalstrahlung auf Horizontale 2005-2016: 1818 kWh/(m²a) (PVGIS © European Union, 2001-2022)	mechanisch	-	3   4 33,5 %	2   3 41 %	2   10 52 %
	hybrid mit Grenzwert	0,75	2   1 32 %	1   4 (99,9%) 51 %	2   1 32 %
		1,0	2   1 29 %	1   2 61 %	1   10 69,5 %
		1,25	1   3 62 %	1   1 51 %	1   3 61,5 %
	natürlich	-	1   1 17 %	1   1 14 %	1   1 18 %

Legende: 

A   B (C %)
D %

  
 A = Anzahl benötigter 585 Wp-PV-Module  
 B = Anzahl benötigter Speicher (2,4 kWh-LiFePO4-Batterie)  
 (C %) = Autarkiegrad, falls nahezu 100 %  
 D % = Ausnutzungsgrad der maximal möglichen PV-Erträge  
 Kein Autarkiegrad für Büroraum mit einem Technikmodul (1 x PV und max. 4 x Speicher) erreichbar  
 Autarkiegrad zu nahezu 100 % erreichbar  
 Autarkiegrad erreichbar

Tabelle 6 – Benötigte Systemkomponenten in Abhängigkeit der Einstrahlungsgrenzwerte, um in Helsinki, Potsdam und Athen bei Ost-, Süd- und West-Orientierungen einen Autarkiegrad von 100 % zu erreichen.

Es zeigte sich, dass in Abhängigkeit der lokalen Einstrahlungssituation und der Flächen- und Platzverhältnisse des Technikmoduls komplette Netzautarkie nur unter bestimmten



Randbedingungen erreicht werden kann. Bei geringerer solarer Jahreseinstrahlung (Helsinki: 925,6 kWh/(m<sup>2</sup>a)) lässt sich nur an Südfassaden und bei rein natürlicher Lüftung oder einer hybriden Lüftung mit Einstrahlungsgrenzwert ab 1,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) 100 % Autarkie erreichen. Liegt eine höhere Einstrahlung vor (Potsdam: 1080 kWh/(m<sup>2</sup>a)) kann an allen Fassadenorientierungen 100 % Autarkie bei der natürlichen und bei der hybriden Lüftung erreicht werden. Bei mediterraner Einstrahlungssituation (Athen: 1818 kWh/(m<sup>2</sup>a)) sind ebenfalls alle untersuchten Orientierungen als natürliche und hybride Lüftung möglich. Aufgrund der hohen Einstrahlung erreichen hier bereits geringere Grenzwerte 100 % Autarkie.

Durch die Wahl geeigneter Einstrahlungsgrenzwerte wird die Anzahl der Systemkomponenten, die für einen Autarkiegrad von 100 % benötigt wird, deutlich reduziert. Dennoch sollte der Grenzwert nicht zu hoch liegen, da sonst der Ausnutzungsgrad der potentiellen PV-Erträge geringer ausfällt.

Da die PV-Inselsysteme für 100 % Autarkie so ausgelegt werden, dass sie in den Wintermonaten mit geringer Solarstrahlung den Bedarf decken können, sind alle untersuchten Varianten im Sommer stark überdimensioniert. Wird bei der hybriden Variante im Sommer häufiger natürlich gelüftet, so sinkt der Energiebedarf weiter und die PV-Energie kann nicht genutzt werden. Daher ist bereits angedacht, den überschüssigen Strom in den Sommermonaten für Gebäudenutzer:innen bereitzustellen, damit die in der Batterie gespeicherte Energie im Sommer als Nutzerstrom verbraucht werden kann.

### Konstruktiver Auslegungsstandard

Die Entwurfsvarianten werden auf der Grundlage der in Tabelle 6 dargestellten Ergebnisse entwickelt. Das Hauptziel besteht darin, bestehende Randbedingungen zu ermitteln, die verschiedenen Entwurfsmöglichkeiten zu visualisieren und alternative, erweiterte Lösungsansätze vorzuschlagen. Die Ergebnisse werden anhand der drei, bereits im energetischen Auslegungsstandard definierten Standorte Helsinki, Potsdam und Athen dargestellt.

Die Elementtypen der Fassade werden entsprechend der im Projekt getroffenen Gliederung in Fenster- und Technikelemente unterteilt. Jedes Technikelement besteht aus einem mechanischen Lüftungsgerät, einem Photovoltaik-Paneel und maximal vier Batteriespeichern. Der vom PV-Paneel erzeugte Strom wird direkt zum Betrieb mechanischer Lüftungseinheiten, der Jalousien, der Fenstermotoren und der Steuerung in Form eines *Raspberry Pi* Microcomputers verwendet. Das Verhältnis der Technikelemente zu den gesamten Fassadenelementen beträgt 1/3.

Als Untersuchungsszenario wird ein Büroraum mit den Maßen 4050(B) x 6700(T) x 3200(H) mm definiert, um ein System aus drei PRÄKLIMA Fassadenelementen unterzubringen. Die Gesamtfläche des Raumes beträgt 27,1 m<sup>2</sup>, das Raumvolumen 86,832 m<sup>3</sup> (86.832 l).

Als mechanische Lüftung ist der Einsatz eines Lunos Nexxt mit einer Lüftungsleistung von 15-110 m<sup>3</sup>/h geplant.<sup>4</sup> Bezogen auf das definierte Raumvolumen kann die Luft über das System innerhalb einer Stunde komplett ausgetauscht werden. Außerdem benötigt ein Büroraum für zwei Personen nach DIN 15251 einen Luftaustausch von 28,46 l/s (102,456 m<sup>3</sup>/h), der mit dem Lunos Nexxt Lüftungsgerät abgedeckt werden kann.

Der im Szenario definierte Büroraum mit 86,832 m<sup>3</sup> benötigt ein einzelnes Lunos Nexxt Gerät und kann damit maximal zwei Personen beherbergen. Bei der Entwicklung der Entwurfsvariante wurde berücksichtigt, die mechanische Lüftungsanlage hinter dem PV-Paneel zu positionieren, da sie mit der vorgewärmten Luft aus dem Hohlraum hinter dem PV-Paneel arbeitet (Bild 13 und Bild 14).

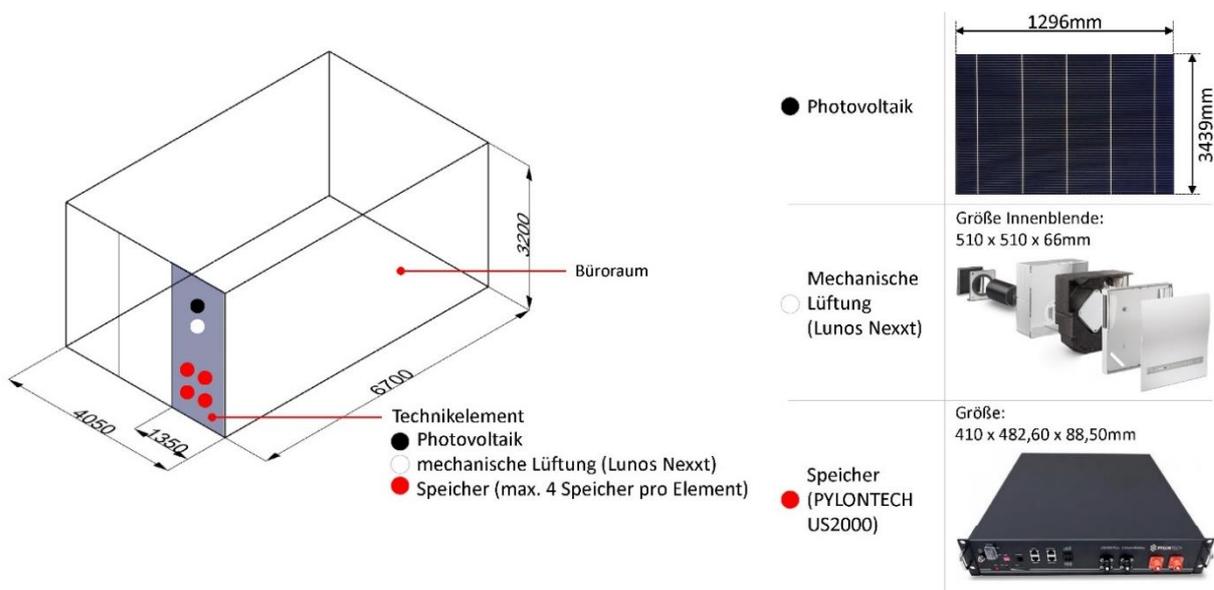


Bild 13 – Links: Büroraum mit drei Fassadenelementen, bestehend aus zwei Fensterelementen und einem Technikelement. Das Technikelement besteht aus einem PV-Paneel, einer mechanischen Lüftungsanlage und maximal vier Batterien. Rechts: Darstellung und Größen der zugehörigen Komponenten.

<sup>4</sup> <https://www.lunos.de/products-from-lunos/nexxt>.

Die Randbedingungen sind im Folgenden aufgeführt:

- Das Verhältnis zwischen Technischelement und Gesamtfassade beträgt maximal 1/3.
- Es gibt mindestens ein mechanisches Lüftungsgerät pro Raum mit maximal zwei Nutzer:innen.
- Die mechanische Lüftungseinheit befindet sich immer im Technischelement.
- Maximal vier Batterien können in einer technischen Einheit installiert werden.

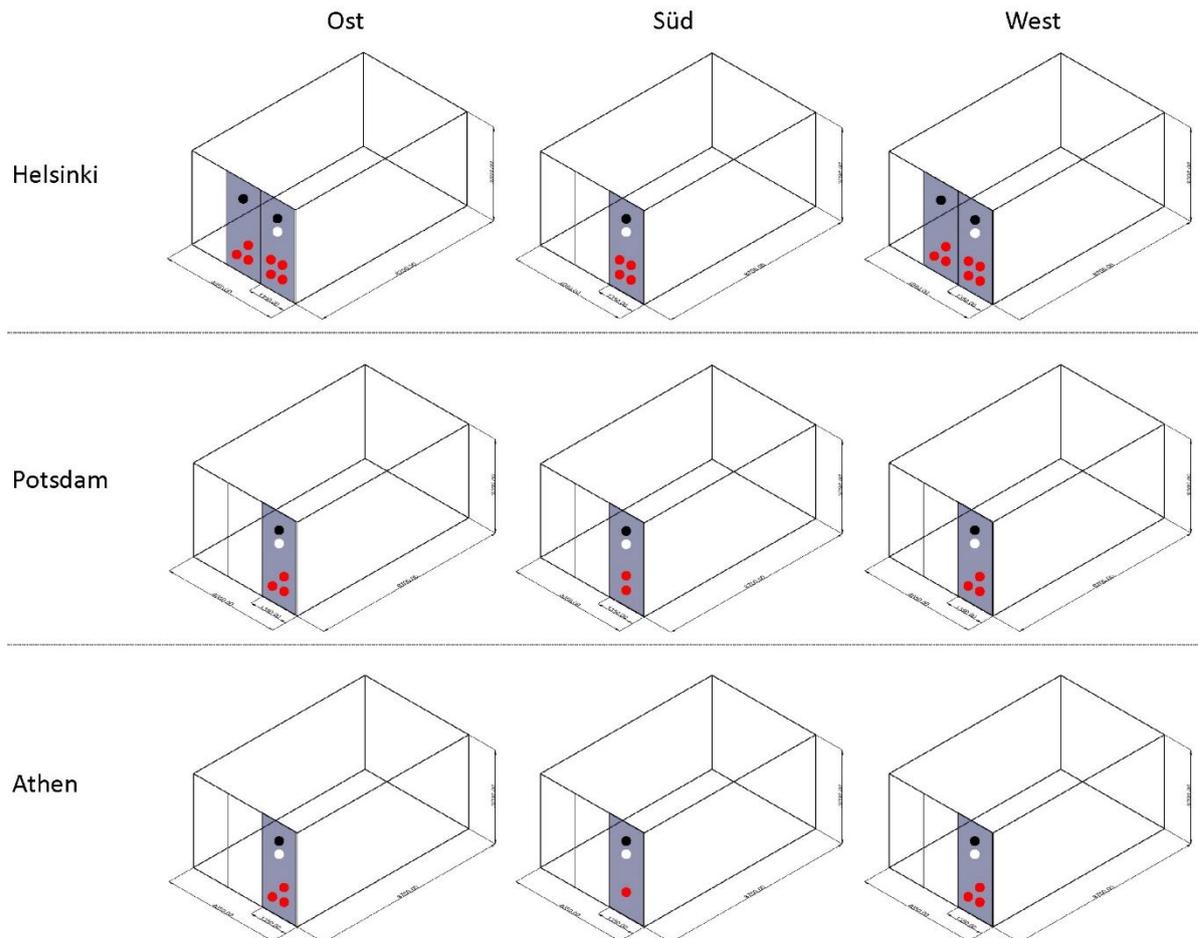


Bild 14 – Ausgewählte Entwurfsvarianten gemäß Tabelle 6. Jede Variante zeigt die höchstmögliche Transparenz unter den gegebenen Randbedingungen.

Anhand Tabelle 6 werden die Varianten entsprechend der formulierten Randbedingungen ausgewählt. Alle dargestellten Optionen erfüllen den Tatbestand völliger Autarkie. Die Untersuchungen der Ost- und Westfassaden in Helsinki werden als Sonderfälle betrachtet, da sie das angestrebte Verhältnis zwischen Technischelement und Gesamtfassade von 1/3 nicht erreichen. Diese Varianten wurden aufgrund ihrer höchsten Transparenz ausgewählt und stellen eine weiterführende Entwicklung gegenüber den anderen Standorten dar.

### Helsinki Ost- und Westfassade Konzept 1

Bei diesem Konzept wird die Photovoltaik auf die Flächen der Fensterelemente erweitert, die keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Sicht der Bewohner nach außen haben. Ein Fensterelement könnte bei diesem Konzept ein PV-Panel aufnehmen, das maximal halb so groß ist wie ein vollformatiges PV-Panel auf einem Technikelement (Bild 15 und Bild 16).

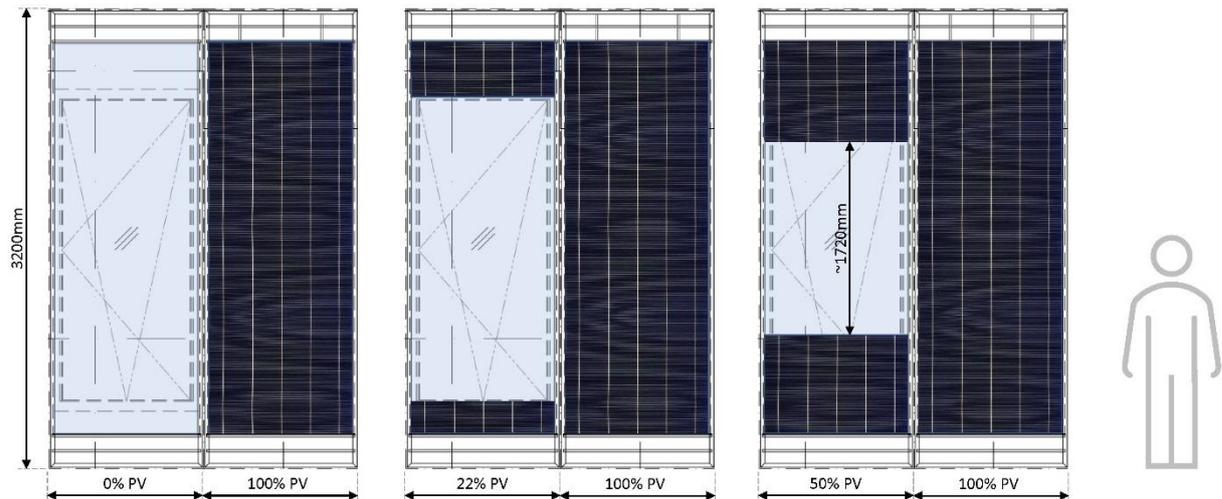


Bild 15 – Nutzung von Flächen ohne Unterbrechung der Sicht auf das Fensterelement zur Energiegewinnung mit Photovoltaik. Links: ursprünglicher Entwurf ohne PV auf dem Fensterelement (0 % Energieerzeugung auf dem Fensterelement). Mitte: Fensterelement mit zusätzlich 22 % PV im Vergleich zum Technikelement. Rechts: Fensterelement mit zusätzlich 50 % PV im Vergleich zum Technikelement.

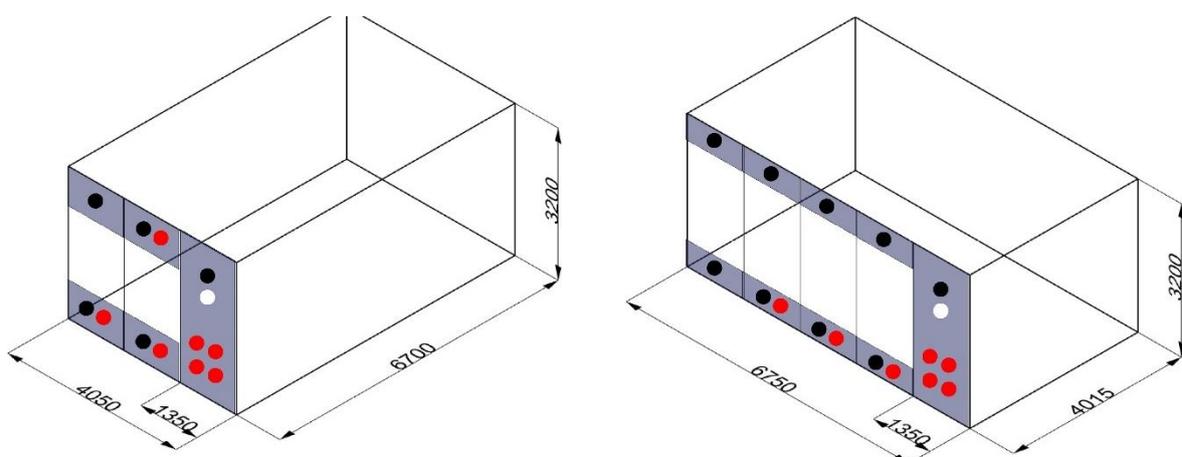


Bild 16 – Mögliche Fassadenanordnung gemäß Konzept 1 für die Ost- und Westfassade in Helsinki. Dabei wird ein vollständig autarkes System bei einem Fassadenverhältnis von 1/3 erzielt. Links: drei Fassadenelemente (ein Technik- und zwei Fensterelemente

mit je 50 % PV). Rechts: Fünf Fassadenelemente (ein Technik- und vier Fensterelemente mit je 22 % PV)

### Helsinki Ost- und Westfassadenkonzept 2

Bei diesem Konzept wird die erforderliche zusätzliche PV-Fläche an der Fassade eines technischen Bereichs des Gebäudes angebracht, z. B. im Sanitärbereich, dem Raum für Gebäudetechnik oder dem Aufzugskern. In diesem Fall hat der Büroraum immer noch zwei Fensterelemente und ein Technikelement, das aufgrund der Notwendigkeit einer mechanischen Lüftungsanlage an der Bürofassade zwingend erforderlich ist (Bild 17).

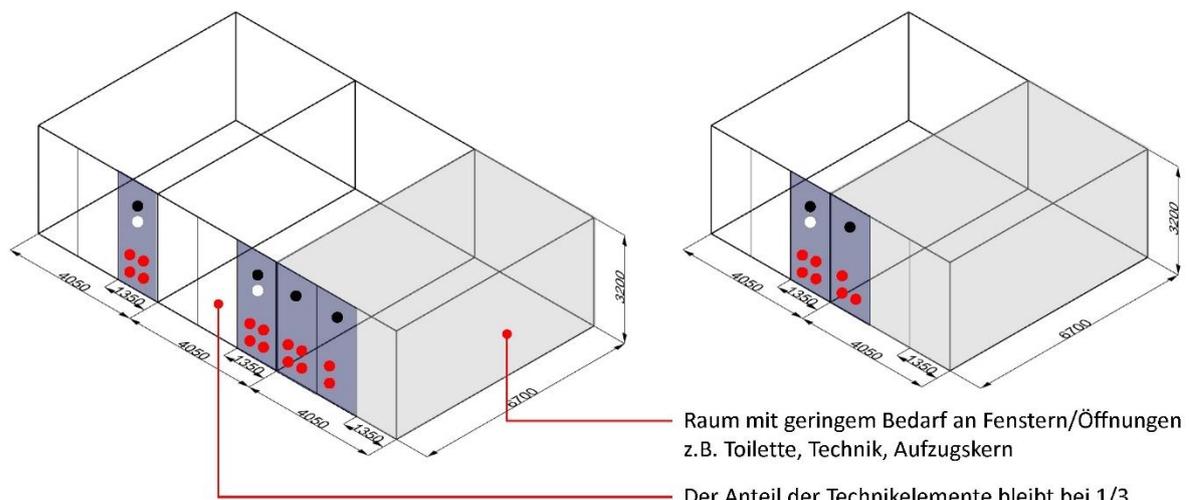


Bild 17 – Mögliche Anordnung der Fassade nach Konzept 2 für die Ost- und Westfassade in Helsinki. Dabei können ein vollständig autarkes System und ein Fassadenverhältnis von 1/3 beibehalten werden.

### Zusammenfassung

In Bild 14 sind die Entwurfsvarianten visualisiert. In Helsinki kann nur die Südfassade mit einem Verhältnis von 1/3 des Technikelements beibehalten werden, während die Ost- und Westfassade zwei PV-Paneele erfordern, für die in Bild 15, Bild 16 und Bild 17 Konzepte als Lösungen für diese Ausrichtungen vorgeschlagen werden. Die Konfigurationen für Potsdam und Athen können mit einem 1/3-Verhältnis zwischen Technikelement und Gesamtfassade mit unterschiedlichen Anforderungen an die Batterien realisiert werden. Wie in den Sonderfällen in AP 6.3 für Potsdam und Athen gezeigt, kann ein Technikelement mehrere Fensterelemente (für Jalousien und Fenstermotoren) mit Energie versorgen, die im Vergleich zum mechanischen Lüftungssystem einen geringen Energieverbrauch haben. Die Einschränkung besteht im Raumvolumen, das nicht größer als der vorgesehene Büroraum sein sollte. Die Raumgeometrie ist in diesem Fall irrelevant.

Wenn das Raumvolumen dennoch größer ist, werden zwei oder mehr mechanische Lüftungseinheiten benötigt, was zu zusätzlich erforderlichen Technikelementen führt. Bild 18 stellt alle Gestaltungsvarianten für die drei Standorte dar.

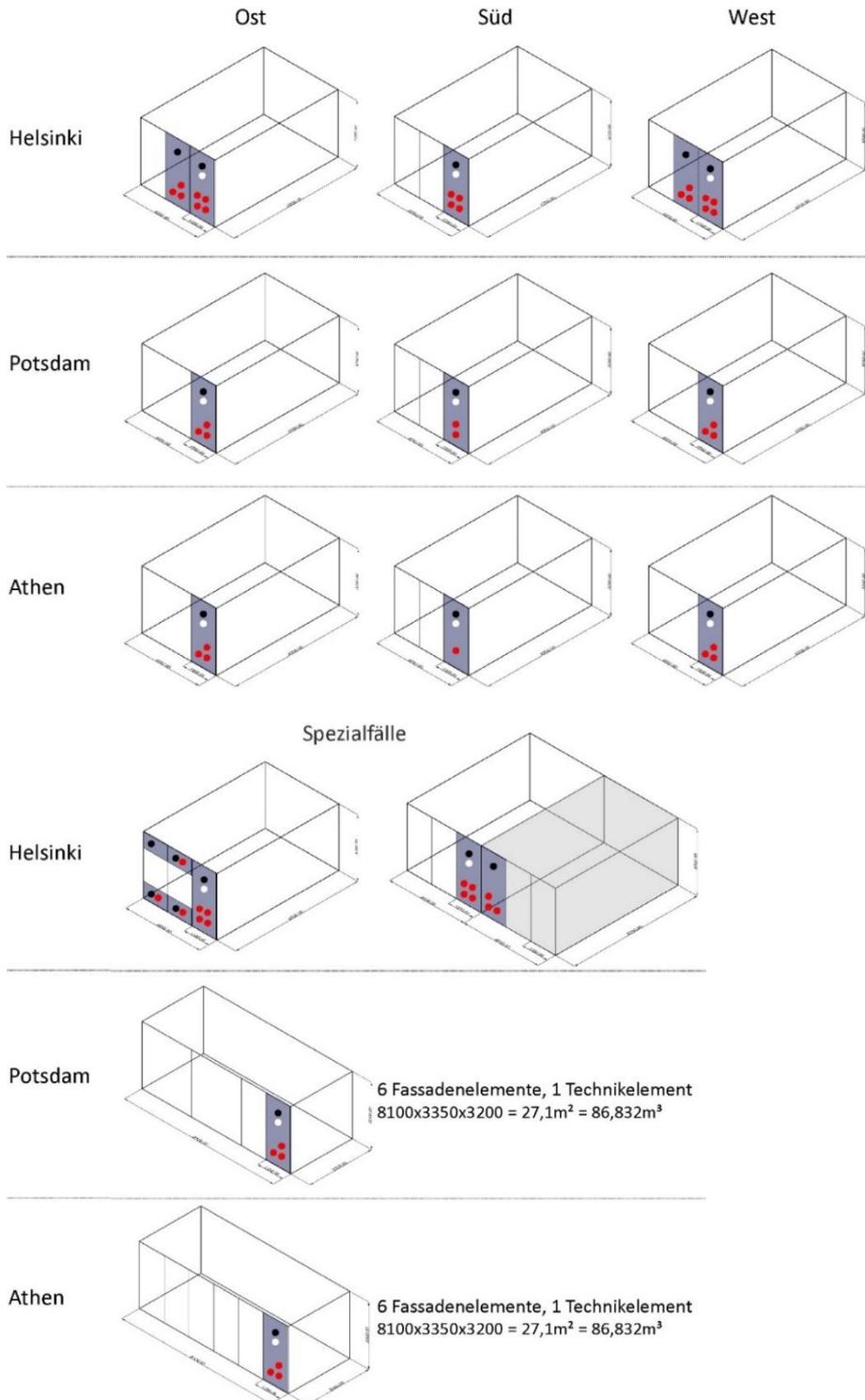


Bild 18 – Gestaltungsvariante der PRÄKLIMA Fassaden anhand von drei Standorten (Helsinki, Potsdam und Athen)



## 4.9 AP 7 – PROTOTYP UND DEMONSTRATOR

### AP 7.1 Planung und Herstellung Prototyp

Der Prototyp wurde entsprechend der vorhergehenden Entwicklungen und Ausführungen in AP 3, AP 4 und AP 5 geplant und gefertigt. Hierfür wurde eine Einhausung aus einer gedämmten und mit OSB-Platten beplankten Holzständerkonstruktion bei SOM gefertigt. Das Dach der Einhausung wurde mit Dachpappe und Bitumendachbahn abgedichtet und die offene Südseite wurde mit den beiden PRÄKLIMA Fassadenelementen, dem transparenten Sichtelement und dem opaken Technikelement geschlossen. Die Fertigung der Fassadenelemente erfolgte auf Grundlage der umfangreichen Planungsunterlagen von SOM (AP 5). Im Zuge der Funktionsprüfungen wurden die Stoßfugen der OSB-Platten auf der Rauminnenseite mit Dichtband abgeklebt und die Fugen der Tür mit Komprimierband abgedichtet, um die Luftdichtigkeit des Teststands zu erhöhen.

Die konstruktive Fertigstellung des Prototyps, bei der auch die fassadenintegrierten Aktoren (Fenstermotor, Jalousieantrieb, Saisonklappe und mechanisches Lüftungsgerät) und einzelne Sensoren (u. a. Strömungssensoren, Temperatursensoren) installiert wurden, erfolgte im Juli 2021. Da der Zugriff auf die Steuerplatine des mechanischen Lüftungsgeräts nur mit separater Steckkarte des Herstellers möglich ist, musste diese noch nachträglich geliefert werden, was im September 2021 erfolgte. Damit war der Zugriff auf das Gerät und dessen Einbindung in die Steuerung möglich.

Aufgrund von Kompatibilitätsproblemen mussten für das geplante und im zweiten Zwischenbericht beschriebene PV-System ein neues Anlagenkonzept entwickelt und die dafür benötigten Komponenten beschafft werden. Die Installation dieses neu entwickelten PV-Systems erfolgte aufgrund längerer Lieferzeiten der elektrischen Bauteile im Oktober 2021, womit der Prototyp des PRÄKLIMA Fassadensystems fertiggestellt wurde. Mit der integrierten PV-Inselanlage kann das Fassadensystem, bei entsprechend dimensionierten Batterien und einstrahlungsbasierter Steuerung (siehe AP 6.3 und AP 6.4), autark vom Netz betrieben werden. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen wurde nur eine 2,4 kWh Py-lontech US 2000 Batterie installiert. Deshalb musste das System im Winter regelmäßig ans Stromnetz gekoppelt werden. Bei vermehrter Einstrahlung im Frühjahr 2022 funktionierte das System dann 100 % autark ohne Netzanschluss.

Der Prototyp zeichnet sich durch eine Vielzahl an Sensoren aus, die die Witterungsbedingungen der Umwelt, die klimatischen Verhältnisse, die Belichtungssituation im Innenraum, die elektrischen Erträge der PV-Anlage, die Speicher- und Ladevorgänge der Batterie und die Vorerwärmung durch Luftkollektor und Lüftungsgerät aufzeichnen. Außer-

dem werden dort die Aktoren des Fassadensystems mit dem Gateway und der Steuerungseinheit verknüpft. Zur Nachbildung des Einflusses von Nutzer:innen wurden ein Luftbefeuchter, eine 150 W-Wärmelampe, eine CO<sub>2</sub>-Flasche mit Elektro-Magnetventilen und ein Bodenventilator installiert. Diese Geräte setzen die Luftfeuchte-, Wärme- und CO<sub>2</sub>-Abgabe potentieller Nutzer:innen im Prototyp frei und werden per Funksteckdosen über die Steuerungsplattform *OpenHAB* bzw. per Zeitschaltuhr gemäß DIN 18599-Nutzungsprofil aktiviert. Aufgrund der CO<sub>2</sub>-Freisetzung wurde ein Sicherheitskonzept mit zusätzlichen akustischen Warnsensoren und einer Online-Kontrollmöglichkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Teststand entwickelt und mit den Sicherheitsbeauftragten bei SOM abgestimmt.

Geräte-ID	Komponente
Geräte und Aktoren zum Fassadenbetrieb	
56	Fensterantrieb
53	Jalousieantrieb
50	Mechanische Lüftung
57	Antrieb Saisonklappe
30	PV-Modul
70	Solarladeregler
71	Wechselrichter (DC-AC)
75	Batteriewächter
76	Verbrauchsmesser
72	Batterie
73	PV-Systemsteuerung
74	DC-DC-Richter
1	Gateway
2	Steuerungseinheit
Nachbildung Nutzereinfluss	
80	Luftbefeuchter
81	150 W-Wärmelampe
82	CO <sub>2</sub> -Flasche mit 2 x Elektro-Magnetventil
83	Ventilator
Raumkonditionierung, Überwachung und Betrieb	
16	Elektroheizkörper
51	Lampe
3	WLAN-Access-Point
84	CO <sub>2</sub> -Alarmsensor
85	Webcam
Sensoren	
19, 23	Regensensor
14	Temperatur-/Luftfeuchtesensor
20, 22	Temperatur, Luftfeucht-, Taupunkt-, CO <sub>2</sub> , VOC-Sensor innen und außen
43, 44, 45	Temperatur, Luftfeucht-, Taupunkt-, CO <sub>2</sub> , VOC-Sensor innen und außen
17, 18	Helligkeitssensoren
	Wetterstation (Lufttemperatur, Helligkeit, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Taupunkt)
21, 24, 40	Bewegungs-, Helligkeits-, Temperatursensor
12, 13	Bewegungs-, Helligkeits-, Temperatur-, Luftfeuchte-, Erschütterungs-UV-Sensor
61, 62	Bewegungs-, Helligkeits-, Temperatur-, Luftfeuchte-, CO <sub>2</sub> -Sensor innen und außen
25, 26, 27	Temperatursensor
9, 11	Temperatur, Luftfeuchtesensor
39.7, 39.8, 39.9	Luftströmungssensoren
49.3, 49.4, 49.5	Luftströmungssensoren
46.10	Anlege-Temperaturfühler
	Temperatur, Luftfühler, CO <sub>2</sub> -Sensor innen und außen
64, 65	Helligkeitssensoren

**fett** = Geräte für Endprodukt

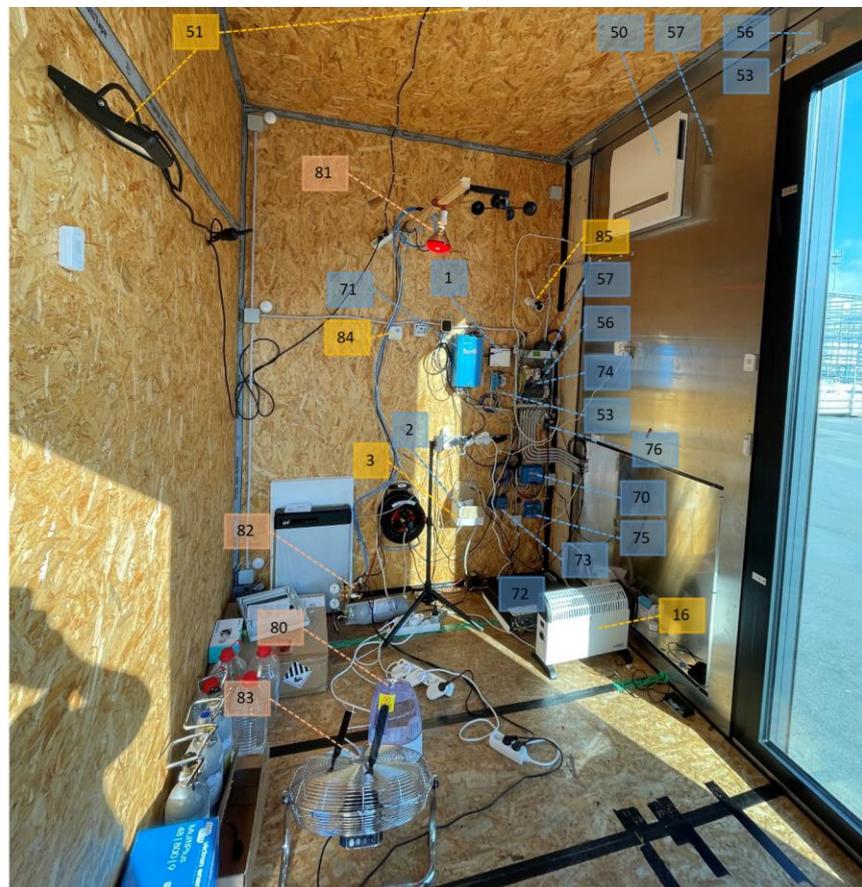


Bild 19 – Geräte und Betriebstechnik am Prototyp. **Fett** hervorgehobene IDs sind für das Endsystem erforderlich.

Der Großteil der Betriebstechnik wurde an der Ostwand des Teststands montiert, um freien Zugriff auf die Komponenten während der Funktionsprüfungen zu haben. Außerdem wurde ein Elektroheizkörper zur Raumkonditionierung installiert und temperaturgesteuert betrieben. Bild 19 zeigt die installierten Geräte und die Betriebstechnik am Prototyp. Die Sensorik ist zur Wahrung der Übersichtlichkeit ausgespart. Sie wird in Bild



4, Bild 5 und Bild 6 (AP 3) dargestellt. Tabelle 7 listet alle am Teststand installierten Komponenten, deren Funktionen und Kommunikation mit der Steuereinheit, den Installationszeitraum sowie Anpassungen im Zuge der Funktionsprüfungen auf.

Fkt.	Geräte-ID	Komponente	Bezeichnung	Funktion	Steuerung	Installation	Anpassung bei Funktionsprüfungen
Geräte und Aktoren zum Fassadenbetrieb	56	Fensterantrieb	Aumüller KS4 S12 24V DC	Öffnen/Schließen Fenster	Qubino Flush Shutter DC über OpenHAB gesteuert.	Montage: 07/21	09/21: Steuerung + Kalibrierung
		Jalousieantrieb	Warema Type 2.25/35.17	Öffnen/Schließen Jalousie Ändern Winkelstellung	Fibaro RGB-Controller angesteuert über OpenHAB gesteuert.	Montage: 07/21	Leistung der ursprünglichen Steuerung (Qubino Flush Shutter DC) nicht ausreichend für Antrieb 11/21: neue Steuerung + Kalibrierung 12/21 Re-Kalibrierung nach Stromausfall
	53	Mechanische Lüftung	LUNOS Nexxt	Luftvolumenstrom stufenweise regelbar: 0 - 110 m³/h Wärmerückgewinnung aktivierbar Aufzeichnen Lufttemperatur und Luftfeuchte der Zu- und Abluft	Zugriff auf Steuerung mittels Steckkarte. Über OpenHAB gesteuert.	Montage: 09/21	10/21: Steuerung via OpenHAB möglich.
	50	Antrieb Saisonklappe	Bidirektionaler Hubmagnet		Qubino Flush Shutter DC über OpenHAB gesteuert.	07/21	11/21: Hubmagnet defekt 02/22: Austausch Hubmagnet
	30	PV-Modul	Maßanfertigung Ertex Solar (140 Zellen)		-	07/21	-
	70	Solarladeregler	Victron SmartSolar MPPT 150/35 (48 V)			10/21	
	71	Wechselrichter (DC-AC)	Victron-MultiPlus-48-800			10/21	
	75	Batteriewächter	Batterie-Wächter BP 48/100			10/21	
	76	Verbrauchsmesser	SmartShunt 500 A/50mV			10/21	
	72	Batterie	Pylontech 2,4 kWh US 2000B			10/21	
	73	PV-Systemsteuerung	Cerbo GX	Überwachung PV-System und Ladezustand Batterie Monitoring von Ertrag und Verbrauch	Durch Cerbo GX und über VRM-Portal gesteuert.	10/21	07/21: Anlagenkonzept und Komponenten erfüllen Anforderungen nicht 08/21: Entwicklung neues Anlagenkonzept 09/21: Beschaffung neuer Komponenten 10/21: Installation neues PV-System
	74	DC-DC-Richter	Meanwell		Spannungswandler für Verbraucher		-
	1	Gateway		Verbindung Sensoren und Aktoren mit Casenio-Portal	-	07/21	-
2	Steuereinheit	Raspberry-Pi-4 bzw. FPGA-Board	Steuerung der Aktoren		07/21	-	
Nachbildung Nutzerinfluss	80	Luftbefeuchter			Funksteckdose (Philio Wall Plug, ID 15) über OpenHAB gesteuert. Aktiv während Nutzungszeiten.	07/21	-
	81	150 W-Wärmelampe		Wärmefreisetzung – 150 W für interne Wärmelasten: Nutzer = 67,5 W (Recknagel: 125 W/Person, bei 1 Person/10 m²) Geräte = 86,4 W (Ashrae 90.1: 16 W/m² * 5,4 m²)	Zeitschaltuhr. Aktiv während Nutzungszeiten.	12/21	-
	82	CO2-Flasche mit 2 x Elektro-Magnetventil		Freisetzung CO2 äquivalent zu imitierten Personenanzahl wählbar (0,5 - 50 Personen).	Elektro-Magnetventile mit Funksteckdosen (Philio Wall Plug, ID 35 und ID 36) über OpenHAB gesteuert. Aktiv während Nutzungszeiten. Freisetzung anhand Personenanzahl wählbar (0,5 - 50 Personen).	09/21	10/21: Ablichten des Teststands 11/21 - 03/22: Kalibrierversuche CO2-Freisetzungsrate – Personenanzahl 03/22: Prüfung CO2-Monitoringsensoren -> Messgenauigkeit unzureichend 05/22: neue CO2-Sensoren innen
	83	Ventilator		Luftdurchmischung im Teststand.	Funksteckdose (Philio Wall Plug, ID 35) über OpenHAB gesteuert. Aktiv während Nutzungszeiten.	09/21	-
Raumkonditionierung, Überwachung, Betrieb	16	Elektroheizkörper	Vintec Konvector	Beheizung	Funksteckdose (Philio Wall Plug) über OpenHAB gesteuert. Aktiv, wenn mittlere Raumtemperatur < 20 °C.	07/21	-
	51	Lampe	LED-Strahler	Beleuchtung Innenraum	Funksteckdose (Philio Wall Plug) über OpenHAB gesteuert.	10/21	12/21: zweite Lichtquelle ergänzt
	3	WLAN-Access-Point		Kommunikation, Datenübertragung	-	07/21	02/22 austausch WLAN-Access-Point
	84	CO2-AlarmSensor		Alarmsignal für Personen im Teststand bei erhöhter CO2-Konzentration	-	07/21	11/21 unzureichende Genauigkeit -> neue Kontrollsensoren
	85	Webcam	Netvue	Fernüberwachung	Zugriff über Netvue-Portal	09/21	-
Sensoren	19, 23	Regensensor	Popp Z-rain	Regen		07/21	-
	14	Temperatur-/Luftfeuchtesensor	Eltako	Temperatur/Luftfeuchte		07/21	-
	20, 22	Temperatur-, Luftfeucht-, Taupunkt-, CO2, VOC-Sensor innen und außen	Eurotronic Air Quality Sensor (Luftgütesensor)	Luftqualität innen und außen		07/21	11/21 - 03/22: Kalibrierversuche CO2-Freisetzung 03/22: Prüfung CO2-Monitoringsensoren -> Messgenauigkeit unzureichend
	43, 44, 45	Temperatur-, Luftfeucht-, Taupunkt-, CO2, VOC-Sensor innen und außen	Eurotronic Air Quality Sensor (Luftgütesensor)	Luftqualität (CO2 und Temps) 3 x im Luftkollektor (Zuluft, Abluft, Bypass)		09/21	
	17, 18	Helligkeitssensoren (Lufttemperatur, Helligkeit, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Temperatur)	Climax Cocon Light Sensor	Helligkeit innen und außen		07/21	11/21: ID 17 defekt. Ersatz: ID 64
	21, 24, 40	Temperatur-, Helligkeit-, Bewegungs-, Helligkeits-, Temperatur-/Luftfeuchte-, Windgeschwindigkeit, Temperatur	Popp Z-Weather	Witterungsbedingungen (1 x innen + 2 x außen)	Kabellose Datenübertragung über Gateway an Casenio-Portal und OpenHAB.	07/21	ID 21, 24, 40: Alle Messintervalle zu groß für diff. Auswertung. Messgröße Helligkeit nicht verwendbar.
	12, 13	Bewegungs-, Helligkeits-, Temperatur-/Luftfeuchte-, Erschütterungs- UV-Sensor	Philio PST02-B PIR/Motion 3 in 1 Sensor	Anwesenheit und Temperaturerfassung		07/21	ID 12, 13: Messgröße Helligkeit nicht verwendbar.
	61, 62	Bewegungs-, Helligkeits-, Temperatur-, Luftfeuchte-, Erschütterungs- UV-Sensor	Aeon Labs Multisensor 6	Helligkeit im Innenraum		03/22	03/22: Ergänzung Beleuchtungssituation innen
	25, 26, 27	Temperatursensor	Fibaro Flood Sensor			07/21	-
	9, 11	Temperatur-, Luftfeuchtesensor	Philio PAT02-A 3 in 1 Flood Multisensor			07/21	-
	39, 39, 39, 39, 39	Luftströmungssensoren	Schmidt Strömungssensor	Strömungsgeschwindigkeit 1 x in Luftkollektor und 2 x hinter Prallscheibe		Montage: 07/21 Monitoring: 09/21	-
	49, 3, 49, 4, 49, 5	Luftströmungssensoren		Temperatur 1 x in Luftkollektor und 2 x hinter Prallscheibe	Kabelgeendene Datenübertragung über Gateway an Casenio-Portal und OpenHAB.	Montage: 07/21 Monitoring: 09/21	-
	46, 8, 46, 9, 46, 10	Anlege-Temperaturfühler		Oberflächentemperaturen PV-Modul, Blech im Luftkollektor, Blech im Batteriekasten		09/21	-
	67, 1, 67, 2, 67, 3, 67, 4	Temperatur-, Luftfeucht-, CO2-Sensor innen und außen	Raumfühler zur Messung von CO2, Temperatur und Feuchte	Luftqualität innen und außen	Kabelgeendene Datenübertragung über Gateway an Casenio-Portal und OpenHAB.	05/22	05/22: Ersatz für CO2-Monitoringsensoren mit unzureichender Messgenauigkeit (ID 20, 22, 43, 44, 45)
	64, 65	Helligkeitssensoren	Climax Cocon Light Sensor	Helligkeit innen und außen	Kabellose Datenübertragung über Gateway an Casenio-Portal und OpenHAB.	03/22	03/22: Ergänzung Beleuchtungssituation innen (ID 65) + Ersatz für Beleuchtung außen (ID 64)

Tabelle 7 – Auflistung der am Prototyp installierten Komponenten. **Fett** hervorgehobene IDs sind für das Endsystem erforderlich.



Parallel zur Montage und Installation wurden die Geräte, Sensoren und Aktoren über ein Gateway in dem Casenio-Portal und von dort per MQTT in der Steuerungseinheit eingebunden. Als webbasierte Steuerungsplattform wurde *OpenHAB* gewählt. Die sich anschließenden Funktionsprüfungen sowie einzelne Störfälle und Gerätedefekte führten zu mehrfachen Änderungen und weiteren Installationsarbeiten, die in Tabelle 7 und in Kapitel AP 7.3 Funktionsprüfungen beschrieben sind.

## AP 7.2 Bauteilprüfungen

Zur Bewertung des Fassadensystems konnte auf ein Fassadenprüfzeugnis (Nr. 13/02-A042-Z1) nach DIN EN 14351-1 der Pfb GmbH & Co. Prüfzentrum für Bauelemente KG zurückgegriffen werden, das die Grundkomponenten des PRÄKLIMA Fassadensystems geprüft und bezüglich Luftdurchlässigkeit, Schlagregendichtheit, Widerstand gegen Windlast, aufzubringender Bedienkräfte und Tragfähigkeit der Sicherheitsvorrichtungen positiv bewertet. Der Aufbau der Elementfassade entspricht den Einbruchsicherheitsanforderungen nach DIN EN 1627.

Eine bauphysikalische Untersuchung des Fassadensystems zu Wärmebrücken, potentiell Tauwasserausfall, Schimmelpilzrisiko und den Wärmedämmwerten (

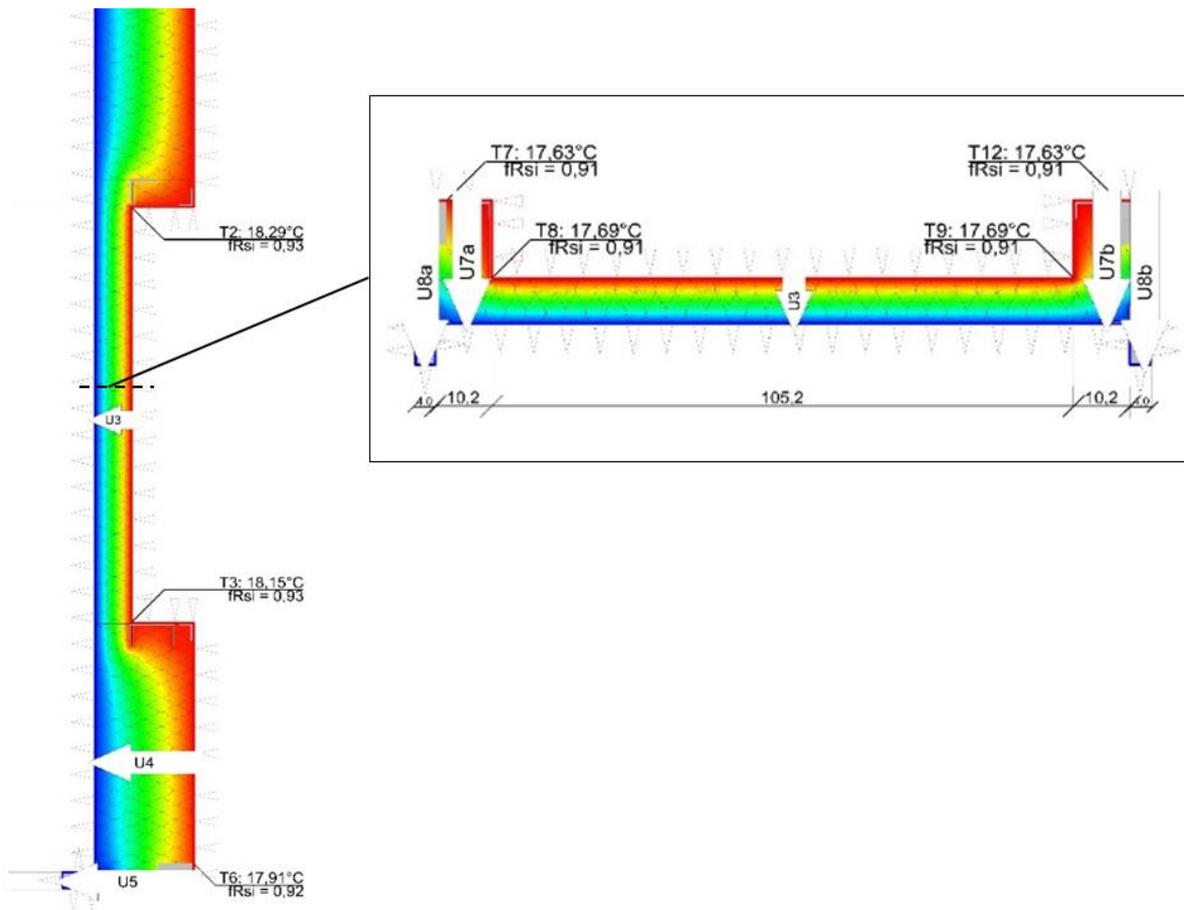


Bild 20) ergab, dass die  $f_{RSI}$ -Werte in allen Bereichen größer als 0,7 sind und somit kein Risiko für Tauwasser- und Schimmelbildung besteht.

Die mittels 2D-FEM-Wärmebrückensimulation ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) des Systems betragen beim opaken Element  $U_{cw,opak} = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$  und beim Fensterelement  $U_{cw,transparent} = 0,99 \text{ W/m}^2\text{K}$ , womit beide Elemente die Grenzwerte ( $U_{cw,opak,max.} = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  und  $U_{cw,transparent,max.} = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) mit ausreichend Sicherheit einhalten. Da das Lüftungsgerät in der Untersuchung nicht abgebildet werden konnte, wurde dieses im Monitoring bewertet. Hier zeigte sich, dass auch in der Winterphase kein Tauwasserausfall auftrat.

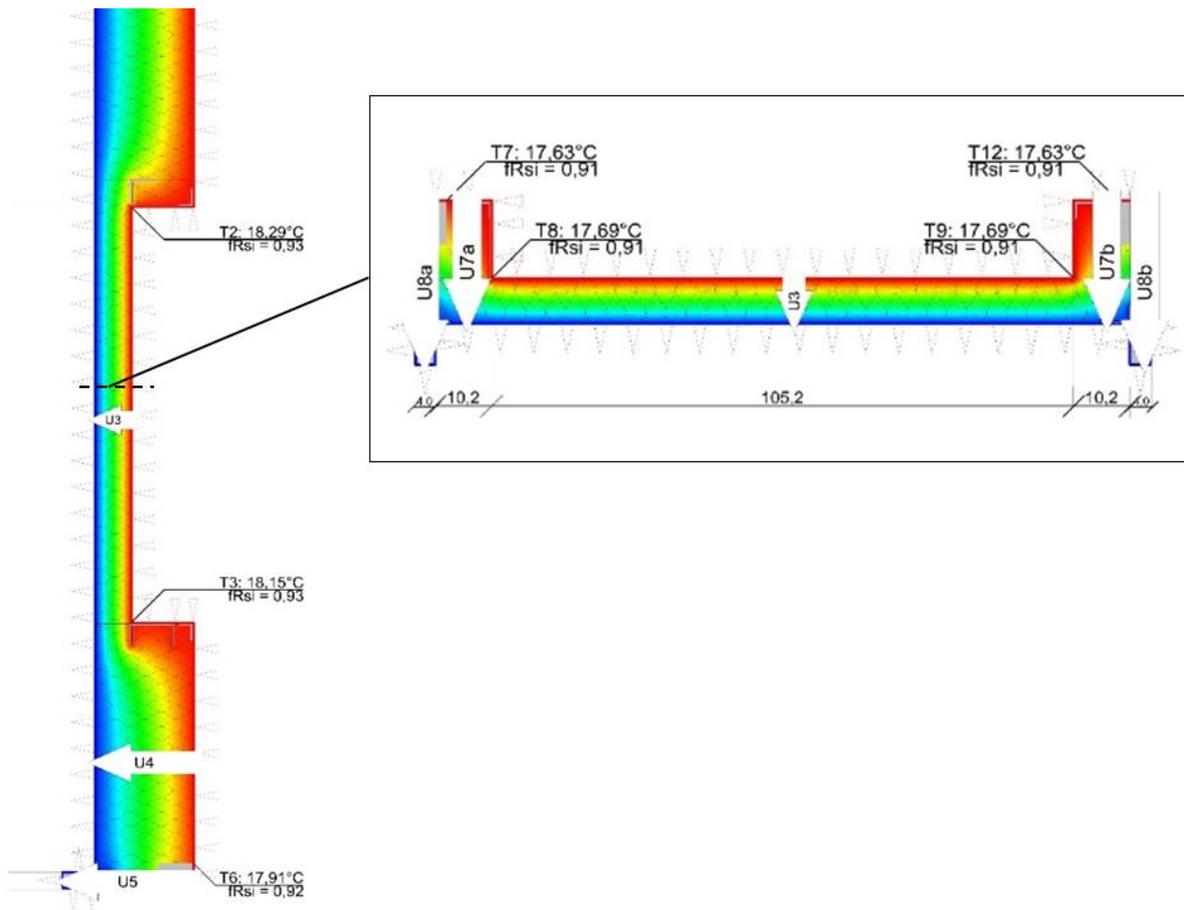


Bild 20 – Ausschnitt des Batteriekastens bei der 2D-Wärmebrückensimulation des PRÄKLIMA-Fassadensystems.

### AP 7.3 Funktionsprüfungen

Simultan zur Installation der Aktoren und Sensoren am Teststand erfolgte deren Einbindung in das Casenio-Portal und die *OpenHAB*-Plattform. Damit wurde die Möglichkeit der Fernüberwachung und -steuerung des Fassadensystems implementiert. Zunächst erfolgte eine Prüfung der aufgezeichneten Messdaten, um die Messdatenverläufe, die Sensitivität der Sensoren und die Messzyklen auf Plausibilität und Verwendbarkeit für die Steuerung zu bewerten. Hierbei zeigte sich, dass einzelne Sensoren eine sehr unregelmäßige Messdatenaufzeichnung aufweisen und über längere Zeiträume von teils über zehn Stunden keine Messwertänderung aufgezeichnet wurde. Daher wurden – insofern die Möglichkeit bestand – die Sensitivität der Sensoren erhöht bzw. Sensoren als unbrauchbar für die Steuerung deklariert und Ersatz gesucht.

Außerdem wurden die Aktoren und deren Steuerung über die *OpenHAB*-Plattform geprüft und bewertet. Zur Prüfung und Bewertung der Funktionstüchtigkeit und Robustheit des Systems wurde eine grenzwertbasierte Steuerung implementiert, die beim Erreichen definierter Messwerte mit einer Reaktion des Fassadensystems antwortet. Bild 21 zeigt dies exemplarisch an der Jalousiesteuerung. Dort fährt die Jalousie auf 0 %, wenn die durch ID 17 aufgezeichnete Helligkeit außerhalb des Teststands über 3000 LUX liegt. Liegt sie unterhalb von 3000 LUX, so fährt die Jalousie auf 100 %.

Dadurch konnten die grundsätzliche Funktionstüchtigkeit des PRÄKLIMA Fassadensystems und die Funktion der Kommunikationsschnittstellen (Messgrößenerfassung durch Sensoren – Übertragung an Server und Steuerung – Messdatenverarbeitung durch Steuerung – Reaktion auf Messgröße durch Steuerung – Ansteuern Aktor durch Steuerung – Aktion des Aktors) belegt werden.

Darüber hinaus wurden im Zuge der Funktionsprüfungen verschiedene Beeinträchtigungen des Systems ermittelt und Lösungen dafür entwickelt, um den Betrieb fortsetzen und die Überwachung und Steuerung verbessern zu können. Dadurch entwickelte sich eine repetitive Arbeitsweise von Messdatenauswertung, Problemanalyse, Lösungsentwicklung und konstruktiver bzw. steuerungstechnischer Umsetzung. Eine Übersicht über relevante ermittelte Systembeeinträchtigungen, für die Lösungen entwickelt und umgesetzt wurden, ist nachfolgend aufgelistet. Tabelle 7 enthält ebenfalls Informationen zu den Anpassungen während der Funktionsprüfungen.

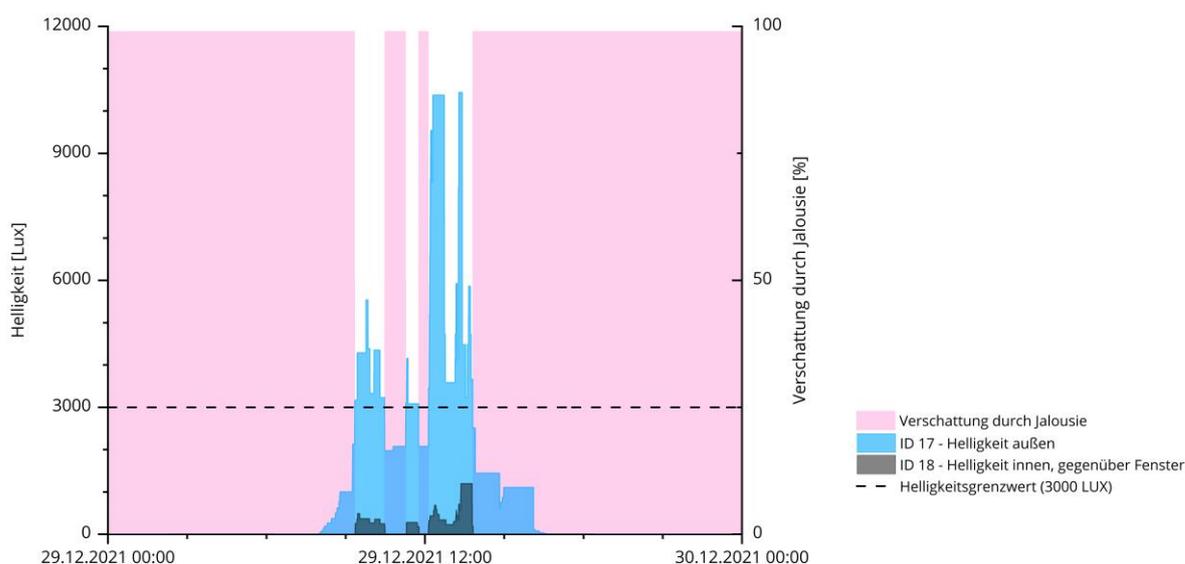


Bild 21 – Öffnungs- und Schließvorgänge der Jalousie in Abhängigkeit der Belichtungssituation außerhalb des Teststands.

## CO<sub>2</sub>-Kalibrierung

Um den Einfluss von Nutzer:innen abzubilden, wurde CO<sub>2</sub> aus einer Gasflasche über einen Schlauch mit einer definierten Freisetzungsrate in den Raum gegeben und durch einen Bodenventilator mit der Raumluft vermischt. Um Infiltration durch die Fassade zu begrenzen, wurden sämtliche Fugen des Teststands mit Dichtband abgedichtet. Trotz mehrmonatigem Betrieb und mehrmaligen Kalibrierversuchen spiegelte sich die CO<sub>2</sub>-Freisetzung jedoch nicht verlässlich in den Messdaten wider, weshalb die verwendeten CO<sub>2</sub>-Sensoren mit neuen Kontrollsensoren abgeglichen wurden (Bild 22). Hierbei zeigte sich, dass die Messgenauigkeit der CO<sub>2</sub>-Sensoren unzureichend und unstetig ist und diese für die vorgesehene Steuerung nicht verwendet werden können. Daraufhin wurden neue CO<sub>2</sub>-Sensoren mit einer höheren Sensitivität installiert.

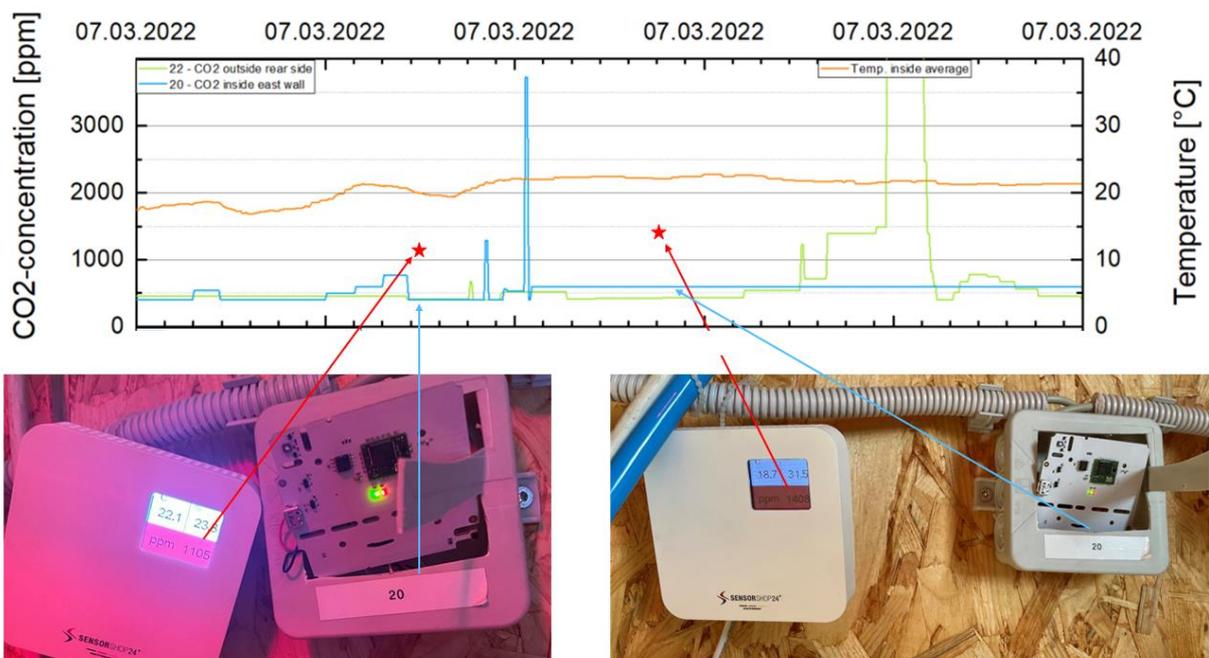


Bild 22 – Kontrolle der installierten CO<sub>2</sub>-Sensoren (ID 20 und ID 22) durch zusätzliche Kontrollsensoren, um unzureichende Messgenauigkeit zu belegen.

## Verbindung und Kommunikation

Der Defekt des WLAN-Access-Points im Februar 2022 führte dazu, dass das PV-Überwachungssystem über zwei Wochen offline war und keine Daten aufgezeichnet wurden. Hier wurde ein neuer WLAN-Access-Point installiert.



Aufgrund der großen Datenmengen, die per LTE übertragen werden, besteht bei der Kommunikation zwischen Sensoren, Steuereinheit und Aktoren eine Verzögerung. Dies führt zu einem stark verlangsamten Lernprozess des RL-Algorithmus.

Außerdem ereigneten sich vereinzelt Abstürze und Kommunikationsfehler von und zwischen dem WLAN-Access-Point, dem Gateway des Teststands, dem Relay-Server, dem *Python*-Skript und dem *OpenHAB*-Server, die zu Messdatenverlusten und temporären Störungen in der Steuerung führten. Diese Störungen konnten in aller Regel durch einen Systemneustart behoben werden. Zusätzlich war die Signaldichte des z-Wave-Funks am Teststand aufgrund der großen Menge an Sensoren und Aktoren stark ausgelastet, was ebenfalls zu Verlusten und Verzögerungen der Funktelegramme führte.

### Steuerung Fenster und Jalousie

Das Ansteuern des Fensterantriebs erfolgt zeitbasiert über einen Qubino Flush Shutter DC. Damit dieser die online eingestellte Fensteröffnung auch am Teststand genau anfährt, erfolgte eine Kalibrierung des Systems, bei der die Fahrzeiten für unterschiedliche Öffnungsgrade ermittelt und hinterlegt wurden.

Für die Jalousie wurde das identische Steuerungsprinzip gewählt, wobei hier aufgrund der Drehfunktion der Lamellen eine weitere Stellgröße zu berücksichtigen war. Außerdem zeigten sich Probleme beim Ansteuern des Jalousieantriebs mittels Qubino Flush Shutter DC, da dieser keine ausreichende Leistung für komplette Jalousiefahrten bereitstellen konnte. Deshalb wurde ein neues Steuerungskonzept mittels Fibaro RGW-Controller und Relais entwickelt, das komplette und fehlerfreie Jalousiefahrten ermöglicht. Auch hier erfolgte eine Kalibrierung der Fahrwege. Aufgrund der zeitbasierten Steuerung und der Schnelligkeit des Antriebs lässt sich der Jalousiewinkel nur auf  $0^\circ$  (offen) und  $90^\circ$  (geschlossen) einstellen. Winkelstellungen dazwischen können nicht eingestellt werden. Dies musste nachträglich in der Steuerung berücksichtigt werden.

Da der Jalousiefahrweg nicht identisch mit der Fensterhöhe ist, entstand eine leichte Verschiebung zwischen Steuersignal der Jalousie und tatsächlichem Jalousiestand am Teststand (Bild 23), welcher in der Steuerung zu berücksichtigen war. Ein Stromausfall Ende November 2021 erforderte zudem eine erneute Kalibrierung des Systems.



Öffnungsgrad nach OpenHAB:

50 %

75 %

80 %

90%

Öffnungsgrad am Teststand ca. 10 % weiter als in OpenHAB.

Bild 23 – Unterschied zwischen dem online in der Steuerung eingestellten Öffnungsgrad und dem realen am Prototypen eingestellten Öffnungsgrad.

### Defekte Saisonklappe

Ein Defekt des Hubmagneten, dem Motor der Saisonklappe, führte dazu, dass diese über einen längeren Zeitraum (11/21-02/22) nicht genutzt werden konnte, da ein großes Hebewerkzeug notwendig war, um das PV-Modul entfernen und den Magneten austauschen zu können. Für das finale System wird daher eine Revisionsöffnung beim Lüftungsgerät eingeplant, die Austausch- und Reparaturarbeiten ermöglicht.

### Belichtungssituation

Bei der Prüfung der Helligkeit im Teststand, zeigte sich, dass eine Mehrzahl an Sensoren notwendig ist, um die reale Belichtungssituation im Raum zu erfassen. Die Messungen einzelner Sensoren können lagebedingt durch direkte Sonneneinstrahlung oder aufgrund von Beschattung keine repräsentative Aussage zur Belichtungssituation des Raumes liefern. Daher wurden weitere Belichtungssensoren (ID 61, 61, 65) ergänzt, damit ein mittlerer repräsentativer Wert der Belichtung im Raum gebildet werden kann. Außerdem wurde nach dem Defekt eines außen angebrachten Belichtungssensors (ID 17) ein Ersatzsensor (ID 64) hinter der Prallscheibe installiert, der die äußere Belichtungssituation aufzeichnet und vor der direkten Witterung geschützt ist.

Energieversorgung und netzautarkes PV-System

Das neu installierte PV-System wurde ab November 2021 bis zum Projektende im Juli 2022 per Monitoring überwacht, wobei u. a. die PV-Erträge, die Lade- und Entladevorgänge der Batterie und der Stromverbrauch aufgezeichnet wurden (Bild 24).

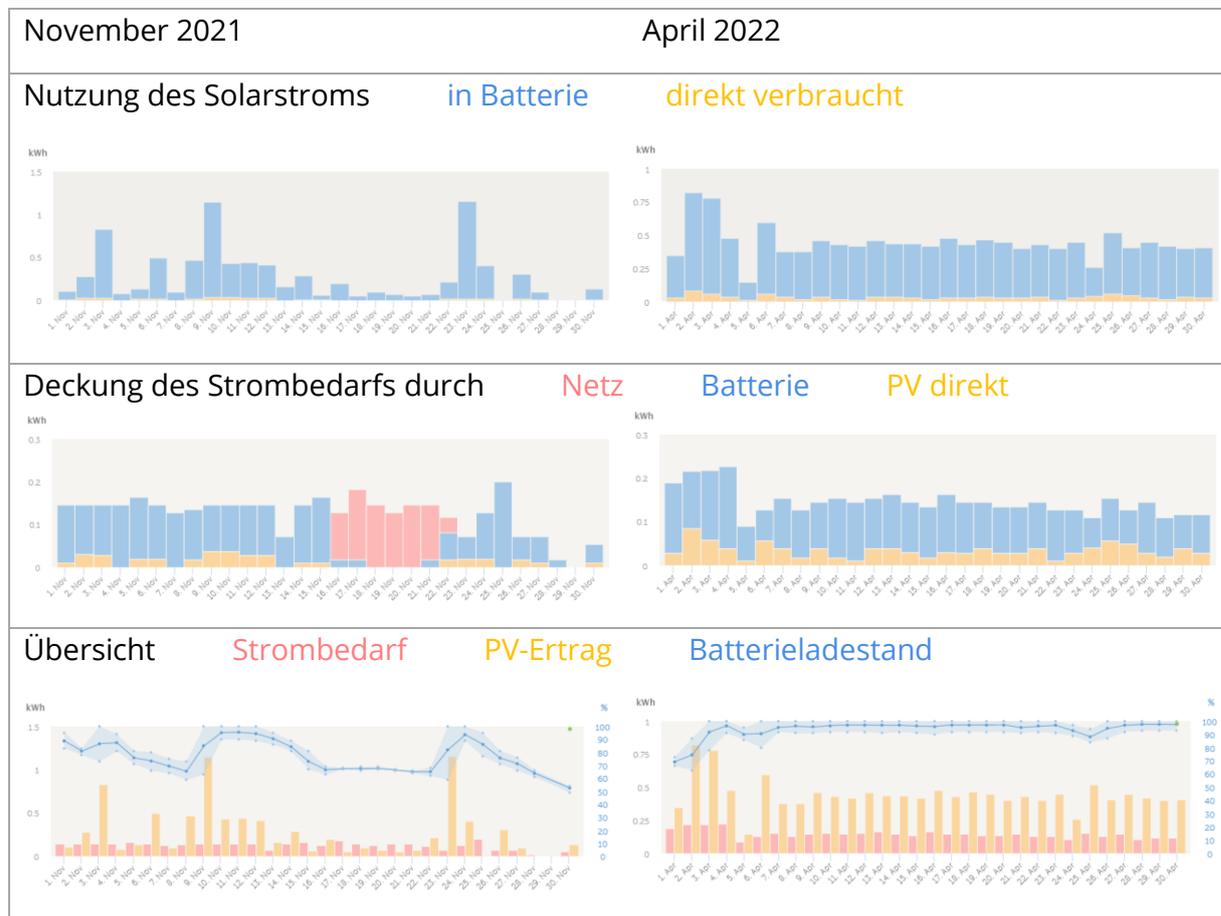


Bild 24 – Nutzung des PV-Ertrags (oben), Bedarfsdeckung (Mitte) und Übersicht zu Strombedarf, PV-Ertrag und Batterieladezustand (unten) des PV-Systems im November 2021 (links) und April 2022 (rechts). Tageweise aufgeschlüsselt.

Es wird ersichtlich, dass in der Novemberphase mit geringerer Einstrahlung und fallendem Batterieladezustand der Netzstrom aktiviert wurde, um den Strombedarf decken zu können. Im April wird der Strombedarf durchgehend durch die Batterie oder direkt durch das PV-System gedeckt. Das System funktioniert netzautark und die Batterie ist dauerhaft geladen. Außerdem zeigt sich, dass nur ein geringer Anteil des Solarertrags direkt genutzt werden kann und der Großteil erst nach Zwischenspeicherung in der Batterie nutzbar ist. Dies stellte die Eignungsprüfung des autark betriebenen Fassadensys-

tems dar. Durch die in Reihe erweiterbaren Batteriespeicher lässt sich die für 100 % Autarkie benötigte Speicherkapazität realisieren. Außerdem lässt sich die dafür benötigte Speicherkapazität durch die einstrahlungsbasierte Steuerung (AP 6.3) reduzieren.

### Luftkollektor

Die Funktionsprüfung des Luftkollektors erfolgte zum einen durch die Messung der Temperaturen und CO<sub>2</sub>-Konzentration im Hinterlüftungsspalt und zum anderen im Prototyp. Ergebnisse hierzu sind in AP 7.4 enthalten.



Bewertung:

- Nebel strömt an den Seiten oben aus.
- Kein Nebel im mittleren Bereich.
- LUNOS zieht die Luft (wie im Winterbetrieb vorgesehen) unten ein.
- Klappe schließt Bereich relativ gut ab.

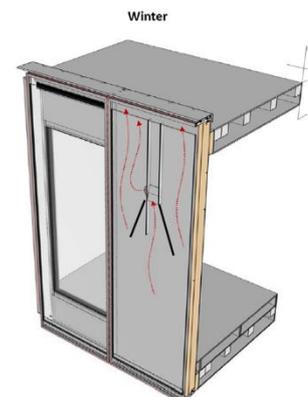


Bild 25 – Einblasen von Nebel in den Luftkollektor zur Bewertung der Luftströmung.

Außerdem wurde beim Einblasen von Nebel (Bild 25) im unteren Bereich des Luftkollektors deutlich, dass die Trennung der Strömungsbereiche des Luftkollektors (Zuluft kurz, Zuluft lang, Abluft) funktioniert und die Zuluft im Winterbetrieb über den langen Weg von unten angesaugt wird. Somit konnte gezeigt werden, dass es im Luftkollektor nicht zu einem Kurzschluss kommt und es nicht zur einer Vermischung von Zuluft und Abluft kommt.



## Fazit

Die Vielzahl an Störungen, Defekten und Anpassungen während der Funktionsprüfungen erstreckten sich von Oktober 2021 bis Mai 2022. Da der RL-Algorithmus eine störungsfreie Kommunikation und eine fehlerfreie Funktion sämtlicher Sensoren und Aktoren für den Lernprozess benötigt, konnte der RL-Lernprozess in dieser Zeit nur in kurzen Phasen und isoliert auf einzelne Komponenten getestet werden. Bild 26 stellt die Temperatur im Inneren des Teststands und der Umgebung, die Aktionen des RL-Algorithmus am Fassadenelement zur Belüftung des Raums (oben), die Art der Steuerung am Prototyp (Mitte) und den Strombedarf zur Fensteröffnung und mechanischen Lüftung sowie den Batterieladestand (unten) für den Zeitraum vom 09.03.22 bis 17.03.22 dar. Aufgrund einer Störung des WLANs war das PV-Monitoring zwischen 11.03. und 15.03. offline und zeichnete keine Daten auf. Die Unterschiede im Strombedarf für die natürliche Fensterlüftung und die mechanische Lüftung werden jedoch auch mit den darstellbaren Bereichen ausreichend veranschaulicht. Die Fensterlüftung benötigt bedeutend weniger Energie als die mechanische Lüftung, wobei der Energieverbrauch mit dem Luftvolumenstrom ansteigt. Es zeigt sich außerdem, dass die RL-basierte Steuerung unterschiedliche Resultate bezüglich der Raumtemperatur erzielt und im Zeitraum vom 15.03. bis 17.03. die Raumtemperatur nahezu innerhalb der Sollwerte hält.

Der dauerhaft störungsfreie Betrieb des Prototyps und die Verfügbarkeit aller benötigter Messdaten wurden erst zum Juni 2022 erreicht. Erkenntnisse zu Effizienzsteigerung durch den RL-Algorithmus können aufgrund des langen Lernprozesses nicht mehr in diesen Schlussbericht einfließen. In Abstimmung mit den Projektpartnern soll der Teststand jedoch über das Projektende hinaus bis zum Herbst 2022 bei SOM weiter betrieben werden, damit diese fehlenden Erkenntnisse noch gewonnen werden können.

Innerhalb der Projektlaufzeit konnten mithilfe des Prototyps die Funktion der Aktoren, Sensorik, die Kommunikation mit der Steuereinheit, die Steuerung durch den RL-Algorithmus, die autarke Energieversorgung sowie die Funktion des Luftkollektors erarbeitet, verbessert und belegt werden.

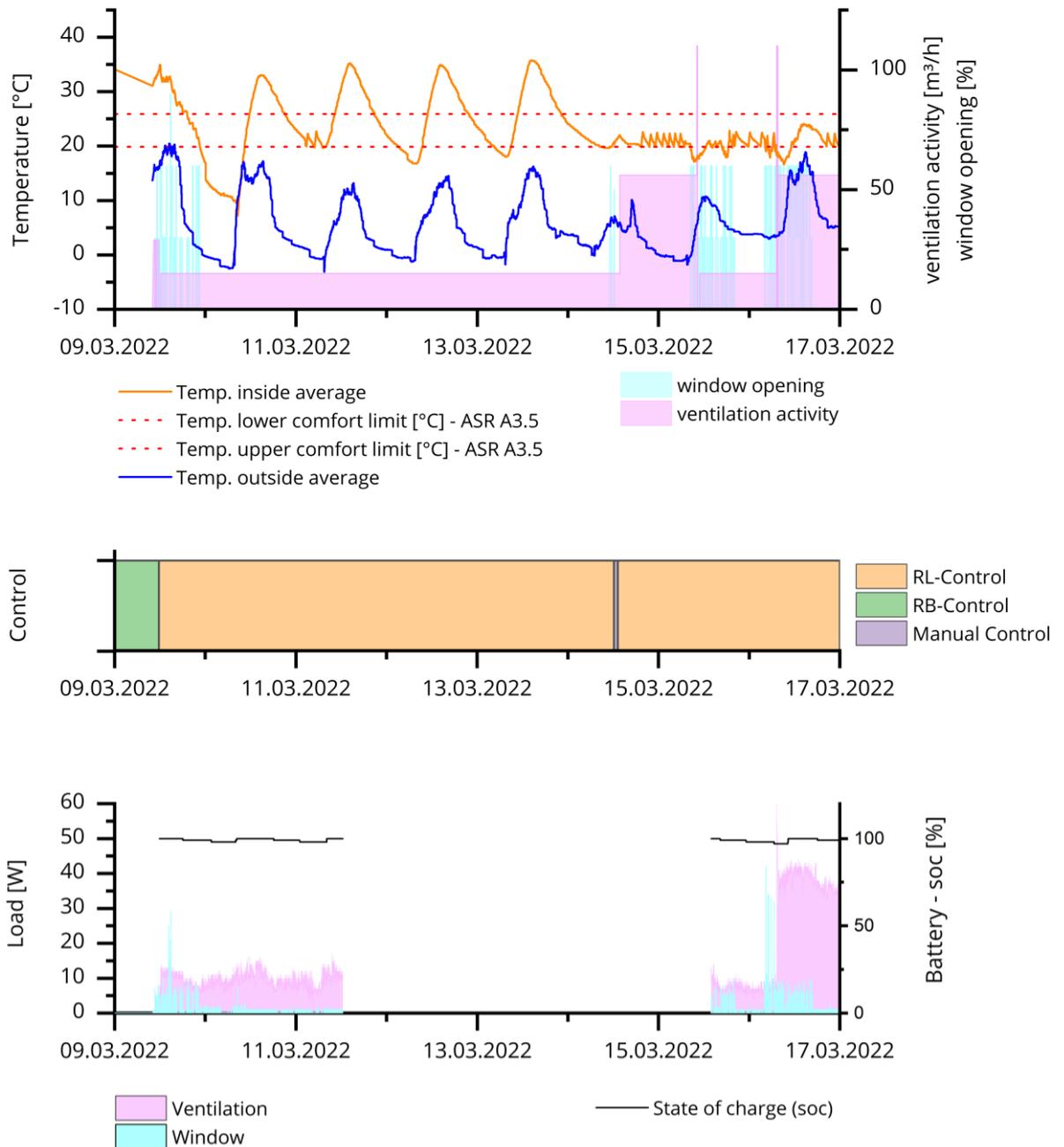


Bild 26 – Mittlere Temperaturen innen und außen sowie Aktionen des RL-Algorithmus am Prototyp.

## AP 7.4 Messdatenauswertung:

Um die Effektivität der Lüftungsaktoren des PRÄKLIMA Fassadensystems zu prüfen, wurde CO<sub>2</sub> im Teststand freigesetzt und ermittelt, wie dieses durch die natürliche und die mechanische Lüftung abgeführt wird, um eine behagliche Raumluftqualität zu erreichen. Die Effektivität des PVT-Kollektors wurde anhand von Messdaten, die zwischen 11/21 und 06/22 aufgezeichnet wurden, bewertet. So wurden Winter, Frühling und Frühsommer erfasst.

### Effektivität der natürlichen Lüftung:

In Bild 27 zeigt sich, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Teststand (oben) etwas zeitverzögert zur CO<sub>2</sub>-Freisetzung (Mitte) ansteigt. Erfolgt die CO<sub>2</sub>-Freisetzung nachdem der Raum nachts gut durchlüftet wurde bei geschlossenem Fenster und ohne mechanische Lüftung, so steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration von der Außenluftkonzentration (400-500 ppm) auf Werte über 4000 ppm, wie am 18. und 19.05.2022. Sie liegt damit oberhalb der Grenzwerte von 1000 ppm (hygienische auffällig) und 2000 ppm (hygienische inakzeptabel). Es liegt ein unbehagliches Raumklima vor. Bei natürlicher Lüftung am 20.05.2022 durch das geöffnete Fenster sinkt die CO<sub>2</sub>-Konzentration wieder schlagartig auf das Niveau der Außenluft ab. Bereits 1,5 min Fensterlüftung bei einer Temperaturdifferenz von 15,4 K zwischen Innen- und Außenluft führen zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Konzentration von 2600 ppm auf 1200 ppm. Die natürliche Fensterlüftung bietet beim PRÄKLIMA-System somit eine effektive Form, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu senken und die Raumluftqualität zu wahren.

Außerdem zeigt sich in Bild 27, dass trotz ausgeschalteter mechanischer Lüftung CO<sub>2</sub> im Bereich des LUNOS-Lüftungsgeräts in den PVT-Luftkollektor austritt. Hierbei zeichnet der Sensor oberhalb des Lüftungsgeräts (ID 44 – CO<sub>2</sub> PVT incoming air short) hohe CO<sub>2</sub>-Werte auf. Die Klappe war zu diesem Zeitpunkt im Sommermodus nach oben geöffnet, wodurch das CO<sub>2</sub> nach oben in den PVT-Luftkollektor eintritt. Die beiden anderen CO<sub>2</sub>-Sensoren im PVT-Luftkollektor, die unterhalb bzw. im Luftauslass montiert sind, zeichnen nur geringe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf. Das CO<sub>2</sub> wird somit nach oben hin weggeführt und stagniert nicht im Luftkollektor. Die Ursache für die CO<sub>2</sub>-Konzentration könnte in einer Undichtigkeit beim Einbau des Lüftungsgeräts zu finden sein.

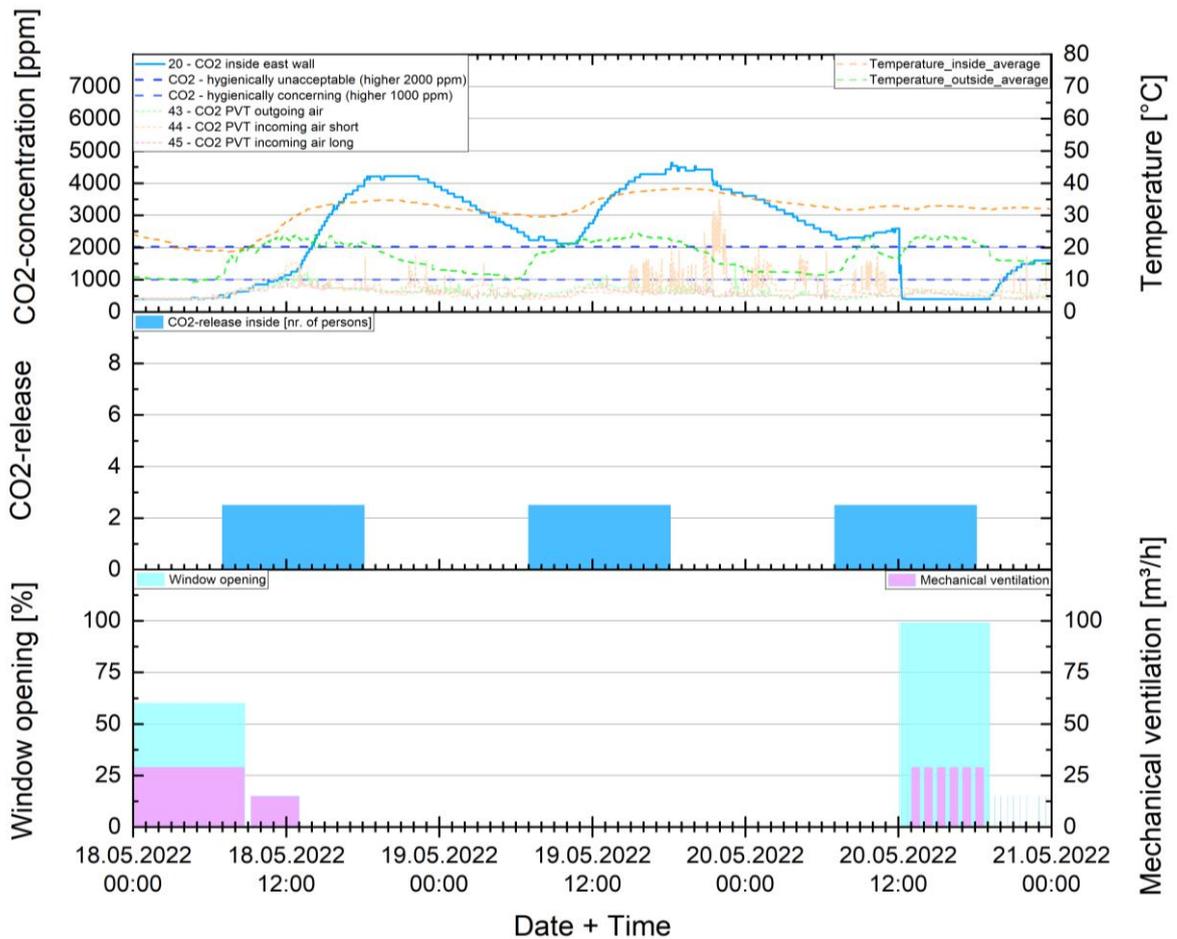


Bild 27 – CO<sub>2</sub>-Konzentration und Temperatur im Teststand in Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-Freisetzung, Fensteröffnung und Aktivität der mechanischen Lüftung.

Effektivität der mechanischen Lüftung:

Bei identischer CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrate und durchgehender mechanischer Belüftung mit einem Luftvolumenstrom von 15 m<sup>3</sup>/h zeigt sich, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum im Bereich von 400-600 ppm und damit im behaglichen Bereich gehalten wird (Bild 28). Es zeigt sich außerdem, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration oberhalb des Lüftungsgeräts im PVT-Luftkollektor (ID 44 – CO<sub>2</sub> PVT incoming air short) während der CO<sub>2</sub>-Freisetzung stark ansteigt. Die Raumluft und damit das CO<sub>2</sub> wird durch das Lüftungsgerät in den PVT-Luftkollektor und von dort an die Umgebung abgeführt. Obwohl die Saisonklappen auf Sommerbetrieb stehen und die Zuluft von oben angesaugt wird, kommt es nicht zu einer Durchmischung mit der abgeführten Luft und damit zu einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum bleibt im behaglichen Bereich.

Das LUNOS-Lüftungsgerät benötigt für den Luftwechsel von 15 m<sup>3</sup>/h etwa 6,5 W. Im Dauerbetrieb über drei Tage werden somit 468 Wh für die mechanische Lüftung benötigt.

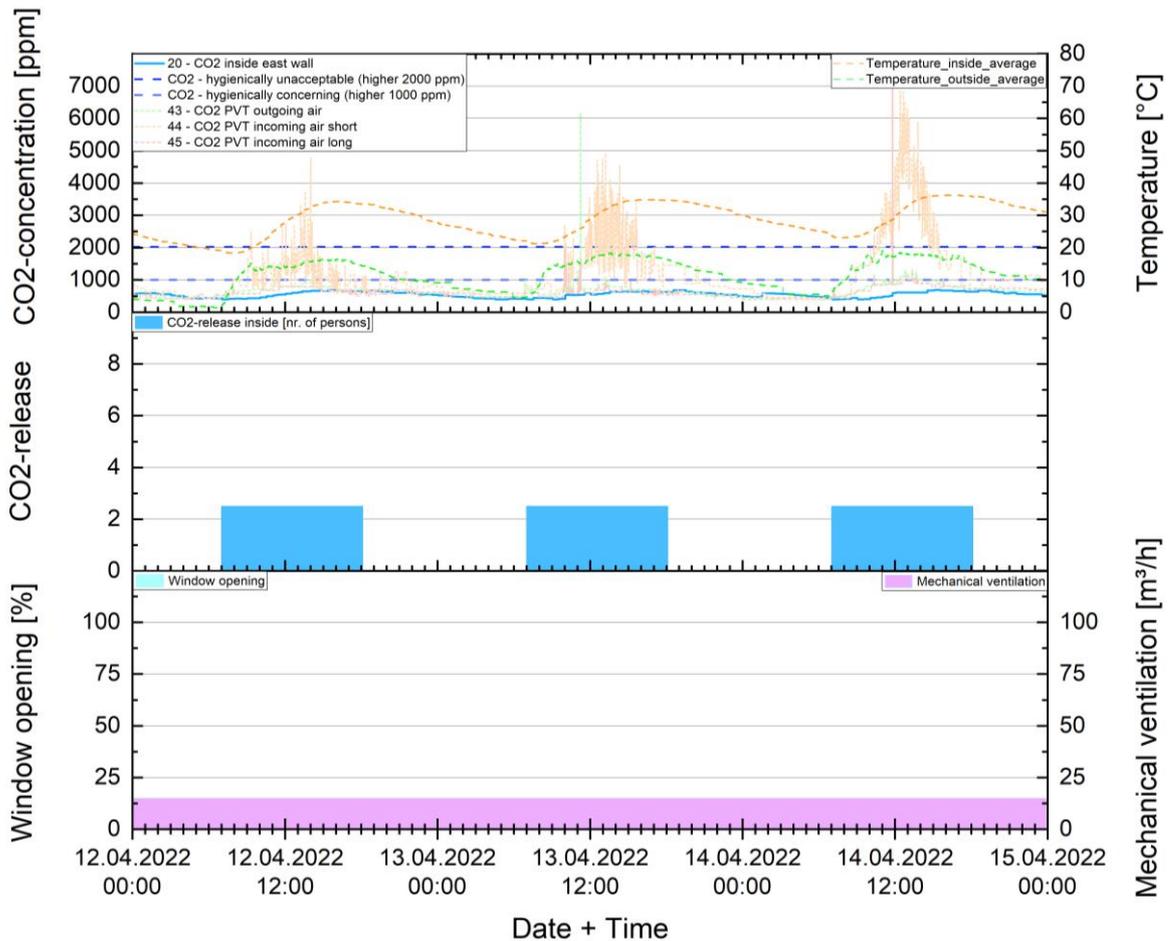


Bild 28 – CO<sub>2</sub>-Konzentration und Temperatur im Teststand in Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-Freisetzung und Aktivität der mechanischen Lüftung.

### Effektivität des PVT-Luftkollektors

Der PVT-Luftkollektor bietet die Möglichkeit, die Zuluft in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen vorzuwärmen und somit den Heizwärmebedarf des Büroraums zu reduzieren. Bild 29 zeigt die Erwärmung der Außenluft nur durch den PVT-Luftkollektor (links) und durch den PVT-Luftkollektor und das Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung (rechts) jeweils in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (Temp. outside) und der Sonnenaktivität (Brightness [LUX]). So wird dargestellt, welche Vorerwärmung theoretisch möglich ist und welche Erwärmung letztlich durch den gesamten Luftkollektor (PVT-Luftkollektor mit Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung) genutzt wird.

Da die Windgeschwindigkeit über den Luftkollektor nicht am Teststand aufgezeichnet wurde, ist deren Auswirkung auf die Messergebnisse nicht erfassbar. Einzelnen Ausreißer lassen sich hiermit und mit der Menge an Messwerten begründen.

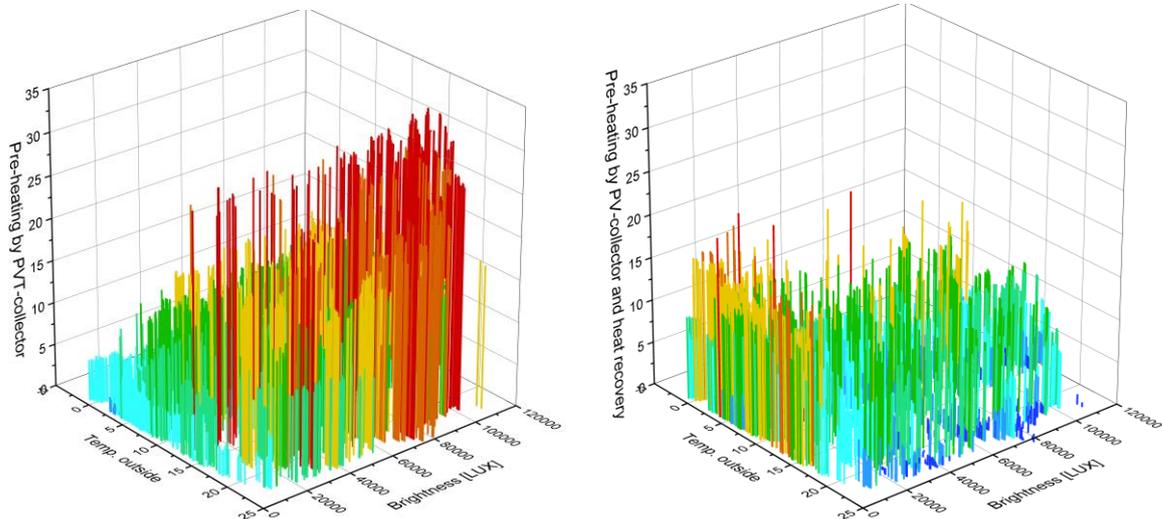


Bild 29 – Mögliche Vorerwärmung (Pre-Heating by PVT-collector) der Außenluft durch den PVT-Luftkollektor (links) und tatsächlich für den Raum genutzte Vorerwärmung der Außenluft durch den PVT-Kollektor und das mechanische Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung (rechts).

Es zeigt sich, dass mit steigender Einstrahlung und höherer Umgebungstemperatur eine steigende Vorerwärmung durch den PVT-Luftkollektor erzielt wird (links). Bis zu 30 K Vorerwärmung wurden durch den Kollektor in sonnenreichen und warmen Situationen erreicht. In kühlen und einstrahlungsarmen Situationen sind oftmals noch 5 K Vorerwärmung möglich.

Beim Gesamtsystem mit Wärmerückgewinnung durch das Lüftungsgerät (rechts) liegt – gegensätzlich zum reinen PVT-Luftkollektor – bei tiefen Temperaturen und geringer Einstrahlung eine höhere Vorerwärmung vor. Dies lässt sich damit begründen, dass das Lüftungsgerät stark vorerwärmte Zuluft des PVT-Luftkollektors über den Wärmetauscher herunterkühlt und so möglichst nahe an die Raumlufttemperatur heranbringt.

Beispielsweise wurde die Außenluft am 18.05.2022 um 12.50 Uhr von 23,75 °C durch den PVT-Luftkollektor auf 52 °C erwärmt, durch die Wärmerückgewinnung des Lüftungsgeräts mit der Raumluft abgekühlt und mit 31 °C in den Raum geleitet. Im sommerlichen Fall führt die Lüftung mittels mechanischer Lüftung und PVT-Kollektor zu einer stärkeren



Hitzebelastung im Raum als die natürliche Fensterlüftung, weshalb sie hier vermieden werden sollte.

Am 05.01.2022 um 13.00 Uhr hingegen wurde die Außenluft von  $-0,01\text{ °C}$  durch den PVT-Luftkollektor auf  $13,6\text{ °C}$  vorerwärmt und zusätzlich durch die Wärmerückgewinnung des Lüftungsgeräts auf  $21\text{ °C}$  temperiert und in den Raum geleitet. Unter Annahme der maximal möglichen Wärmerückgewinnung des LUNOS Nexxt von  $84\%$  wäre bei der vorliegenden Außenlufttemperatur ( $-0,01\text{ °C}$ ) und der Raumlufttemperatur ( $20,37\text{ °C}$ ) ohne den PVT-Luftkollektor eine maximale Zuluft-Temperatur von  $17,11\text{ °C}$  erreicht worden. Die verbleibende Temperaturerhöhung von  $3,89\text{ °C}$  müsste nachgeheizt werden.

Somit lassen sich die Funktion des PVT-Kollektors und dessen Potential, den Heizwärmebedarf im Winter stark zu reduzieren, mit den Messungen am Prototyp belegen. Die Effizienzsteigerung lässt sich damit jedoch nicht quantifizieren, da hierzu ein Referenzsystem – ohne PVT-Luftkollektor – benötigt wird. Deshalb wird in diesem Zusammenhang auf die Simulationsergebnisse in AP 6 verwiesen, bei denen ein Luftkollektor mit Lüftungsgerät eine Reduktion des Heizwärmebedarfs von  $79,2\%$  gegenüber einem rudimentär geregelten Büroraum erreichte (Tabelle 2). Gleichermaßen wird zur Bewertung des PV-Systems auf die Simulationen in AP 6.3 (Bild 11 und Bild 12) und AP 6.4 (Tabelle 6) und auf die Messdaten in AP 7.3 (Bild 24) verwiesen.

### **AP 7.5 Planung und Herstellung Demonstrator**

Für die Öffentlichkeitsarbeit und Ausstellung der Projektergebnisse, beispielsweise auf der glass technology live 2022 oder auf der BAU Messe in München, wurden visuelle Demonstratoren entwickelt. Dabei handelt es sich zum einen um ein Ausschnittmodell, das unter Verwendung tatsächlich im Prototyp eingesetzter Materialien und Komponenten im Maßstab 1:1 entwickelt wurde. Zum anderen wurde ein visuelles Modell im Maßstab 1:8 entwickelt, um einen vollständigen Überblick über das Fassadenelement zu geben. Die beiden Modelle werden durch eine Videodokumentation ergänzt, die das Projekt sowohl über 3D-Animationen des Konzepts als auch über Live-Aufnahmen aus dem Testbetrieb des Prototyps dokumentieren und erklären. Bild 30 zeigt die Zusammenstellung der beiden physischen Modelle mit entsprechendem Screen für die Ausstellung auf der glass technology live 2022.

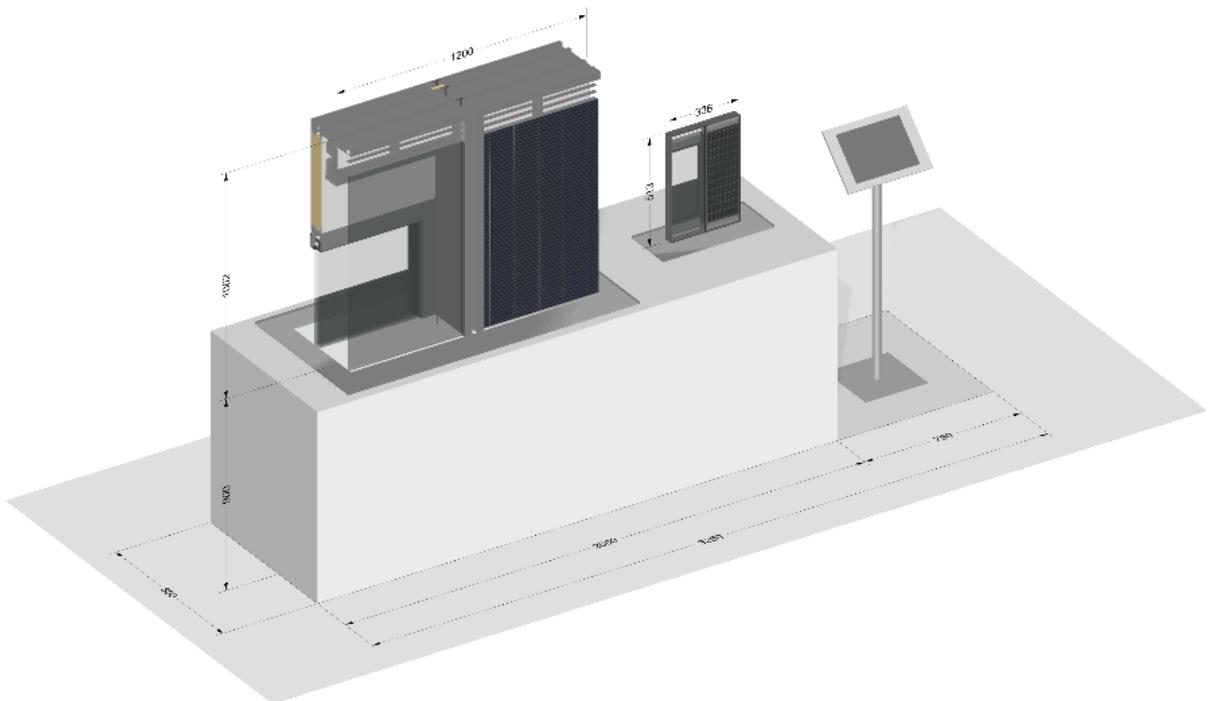


Bild 30 – 3D-Modell der Demonstratoren im Maßstab 1:1 (links) und 1:8 (Mitte), Screen mit Videodokumentation (rechts).

### 1:1-Demonstrator

Der Demonstrator ist ein Ausschnitt aus dem Prototyp. Er zeigt genau das Material und die Abmessungen des funktionierenden Prototyps, ohne dass dessen Funktionen integriert sind. Der Demonstrator ist 1200(B)x1050(H) mm groß und wurde aus dem oberen Teil des Prototyps ausgeschnitten. Er zeigt sowohl das Fensterelement mit einem Teil des Fensterrahmens, der äußeren Prallscheibe, der inneren Glasscheibe und der Jalousie, als auch das technische Element mit einem Teil der Photovoltaik, der Lüftungsklappe und dem Ausschnitt des Lüftungsgerätes Lunos Nexxt (Bild 31).

Die Aluminiumbauteile, die Gläser und die Jalousie wurden vom Projektpartner SOMMER bereitgestellt. Die Vormontage erfolgte bei SOMMER, die Integration der Photovoltaik und des Lunos Nexxt Lüfters im Hause Priedemann.

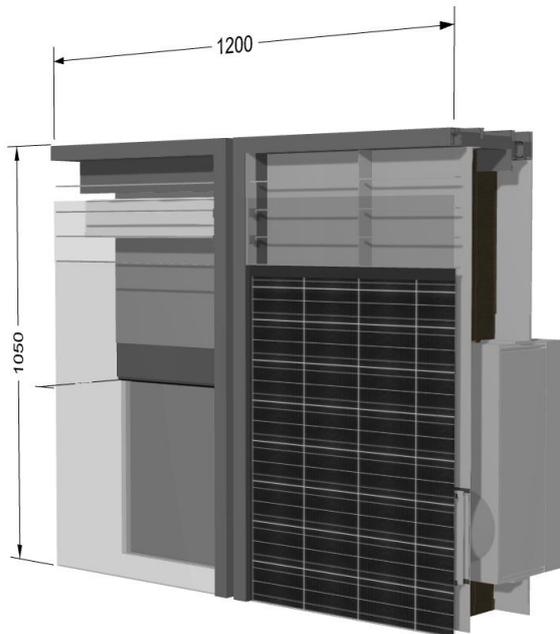


Bild 31 – 3D-planung des 1:1-Demonstrators.

### 1:8-Anschauungsmodell

Das maßstabgetreue Anschauungsmodell wurde bei Priedemann hergestellt und montiert. Das Modell ist 336(B)x504(H) mm groß. Es veranschaulicht das Aussehen des Prototyps mit den verbauten Komponenten im Sinne eines Modellbaus, ohne detailliert auf Funktionen oder mechanische Fähigkeiten wie Öffnung des Fensterflügels oder Anpassung der Sonnenschutzlamellen einzugehen. Das Modell wurde in das transparente und technische Element unterteilt und zur besseren Bearbeitbarkeit leicht vereinfacht. Die Herstellung des Profilsystems erfolgte im 3D-Druckverfahren, während die anderen Komponenten in typischer manueller Modellbauweise zugeschnitten und zusammengesetzt (geklebt) wurden (Bild 32).



Bild 32 – Produktionsprozess und endgültiges Aussehen des visuellen Modells.



#### 4.10 MEILENSTEIN 3 – LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Die Funktionstüchtigkeit des modularen, autarken und energieerzeugenden PRÄKLIMA Fassadensystems, das sämtliche technische Komponenten zur Raumkonditionierung in den Elementen integriert beinhaltet, konnte mithilfe des Prototyps erarbeitet, verbessert und letztlich belegt werden. Außerdem erfolgten eine Reihe an Simulationsstudien, um die Autarkie und Leistungsfähigkeit des Systems zu bewerten. Ein komplexes K-Modell, das die virtuelle Einbindung und das Trainieren des RL-Algorithmus ermöglicht, wurde entwickelt und geprüft. Dieses Modell und der Prototyp sollen in Abstimmung mit den Projektpartnern noch nach Projektabschluss genutzt und ausgewertet werden, um weitere Erkenntnisse zum RL-basierten Regelungssystem zu gewinnen und Anknüpfungspunkte für Folgeprojekte zu entwickeln.

Die prädiktive Regelung in Abhängigkeit des Nutzerverhaltens und der Wettervorhersage konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht detailliert untersucht werden. Diese und die Gesamtbewertung der Energieeffizienz des Systems bietet noch weitere Forschungs- und Entwicklungspotentiale. Meilenstein 3 wurde somit mit Abschluss von AP 6 und AP 7 zum Projektende größtenteils erreicht.