

Publizierbarer Zwischenbericht/Endbericht

Gilt für das Programm „Muster- und Leuchtturmprojekte Photovoltaik“

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Projekttitel:	Klimafreundliche Trocknung landwirtschaftlicher Erzeugnisse
Programm:	Muster- und Leuchtturmprojekte Photovoltaik
Projektdauer:	14.05.2021 bis 31.12.2023
KoordinatorIn/ ProjekteintreicherIn	Tanja und Franz-Peter Göschl
Kontaktperson Name:	Franz-Peter Göschl
Kontaktperson Adresse:	Kneippstraße 4a 4595 Waldneukirchen
Kontaktperson Telefon:	+43 676 9302500
Kontaktperson E-Mail:	vulgo.eggmair@gmx.at
Projekt- und Kooperationspartner (inkl. Bundesland):	
Adresse:	
Projektwebseite:	
Schlagwörter:	
Projektgesamtkosten:	€ 740.593,51
Fördersumme:	€ 400.000,-
Klimafonds-Nr.:	C197998
Erstellt am:	Juni 2024

B) Projektübersicht

1 Kurzzusammenfassung

Errichtung eines Energiedaches in Kombination mit einer Trocknungsanlage.

2 Hintergrund und Zielsetzung

Landwirtschaftsbetrieb mit folgenden Schwerpunkten:

- Blattkräuter
- Korngewürze
- Saatgutvermehrung

Die Trocknung dieser Erzeugnisse ist fundamental und wird mit einem energieaufwendigen Unterdach-Trocknungsprozess sichergestellt.

Die Zielsetzung sind folgende Faktoren:

- ✓ Größtmögliche Nutzung der erzeugten elektrischen Energie
- ✓ Erhöhung der Lebensdauer und der durchschnittlichen Leistungen der Module durch Kühlung
- ✓ Reduzierung des Heizenergieverbrauchs durch die Nutzung der vorgewärmten Luft
- ✓ CO₂ Einsparung aufgrund des verminderten Einsatzes von fossilen Brennstoffen

3 Projekinhalt

Der Trocknungsprozess am derzeitigen Stand ist mit einem sehr hohen Energieeinsatz verbunden: einerseits durch die Lüfterleistungen, andererseits durch die Erwärmung der Trockenluft mittels fossilen Brennstoffs und elektrischem Strom.

Um diesen Trocknungsprozess ökologischer zu gestalten, wurde ein Photovoltaik – Energiedach in Kombination mit einer neuen Trocknungsanlage bzw. auch die Einbindung der bestehenden Trocknungsanlage installiert. Zusätzlich wurde ein neues Betriebsgebäude für diese Anlagen errichtet.

Die Anlage besteht aus:

- Neuem Zubau
- Stromspeicher
- Photovoltaik Anlage
- Energiedach
- Trocknungsanlage

Das Energiedach ist mit Indach – PV Glass-Glass Modulen und einer Unterdachluftabsaugung aufgebaut.

Der von der Photovoltaik-Anlage produzierte Strom wird für die Belüftungsgebläse der Trocknungsanlage, die Luftentfeuchtung und für die restlichen prozessbedingten Anlagen benötigt. Ein Teil des überschüssig produzierten Stroms wird automatisch über das Energiemanagement entweder

- für die Aufladung von E-Fahrzeugen verwendet
- in einem Stromspeicher geladen
- zur Warmwasseraufbereitung verwendet

Der Unterbau der Photovoltaik Anlage ist mit einer Hinterlüftungsebene ausgestattet, um als Wärmekollektor zu dienen. Die Hinterlüftungskanäle sind als Holzriegelkonstruktion und mit anthrazit beschichteten PU-Schaumpaneelen ausgeführt.

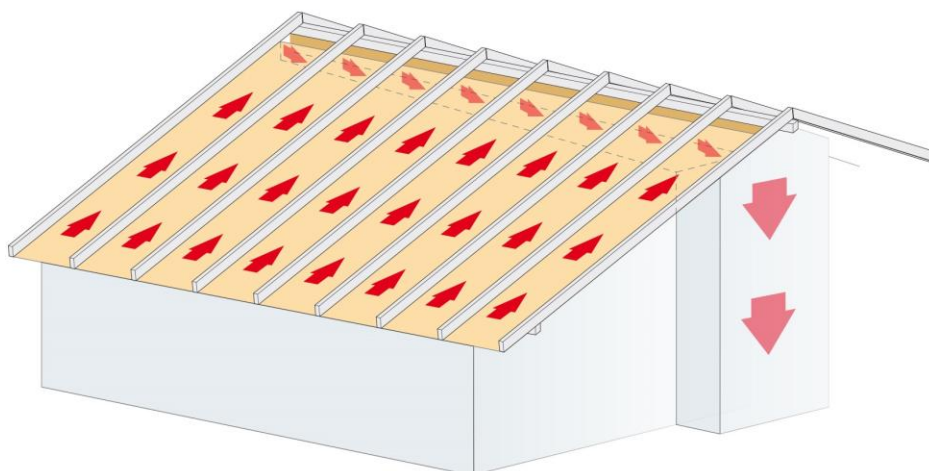


Abbildung 1

Quellenangabe: <https://endorado.at/download/>

So wird die Luft in turbulenter Strömung hinter dem Photovoltaik Glass-Glass Modul vorbeigezogen. Das Energiemodul fängt nicht nur Licht zur Stromproduktion ein, sondern auch Strahlungswärme zur Aufwärmung der Trocknungsluft. Dabei wird gleichzeitig das Modul gekühlt. Die in der Hinterlüftungsebene erwärmte Luft wird gesammelt und der Trocknungsanlage über einen Lüftungskanal zugeführt.



Indach-PV Projekt Göschl

Somit kann in den Erntemonaten die Feldproduktion mittels der neuen Trocknungsanlagen lagerfähig getrocknet werden.

4 Projektergebnisse

Die durchgeführten Messungen und Auswertungen zeigen eindeutig, dass die aktive Absaugung der Dachzwischenebene bei der untersuchten PV-Indachanlage einen signifikanten thermischen Kühlungseffekt bewirkt. Über alle betrachteten Versuchstage hinweg konnte eine deutliche Reduktion der modulnahen Unterdachtemperaturen festgestellt werden. Die mittlere Temperaturabsenkung liegt je nach Randbedingung im Bereich von rund 9–11 K, mit maximalen Kühlungseffekten von bis zu 15 K bei hoher solarer Einstrahlung.

Die thermische Entlastung der Module führt grundsätzlich zu einer Verbesserung der elektrischen Leistungsfähigkeit, deren Ausprägung jedoch stark von den thermischen Randbedingungen abhängt. Auf der Ostseite konnte an allen Vergleichstagen ein stabiler positiver elektrischer Mehrertrag nachgewiesen werden. Unter sehr hohen Außentemperaturen liegt dieser bei etwa +2,8 bis +2,9 %, während an Tagen mit moderaterem Temperaturniveau ebenfalls positive, jedoch geringere Zugewinne auftreten.

Auf der Westseite zeigt sich ein differenzierteres Bild. An thermisch sehr heißen Tagen führt die Belüftung trotz ausgeprägter Temperaturreduktion nicht zu einem elektrischen Mehrertrag, sondern zu einem temporären Minderertrag. Ergänzende Vergleichsmessungen unter moderaten Außentemperaturen belegen jedoch eindeutig, dass dieser Effekt nicht grundsätzlich ist: Unter kühleren Randbedingungen konnte auch auf der Westseite ein klar positiver elektrischer Mehrwert von bis zu +3,6 % erzielt werden. Damit wird bestätigt, dass der elektrische Nutzen der Modulbelüftung maßgeblich vom absoluten Temperaturniveau der Module abhängt.

Der Vergleich unterschiedlicher Luftmengen zeigt zudem einen Sättigungseffekt. Bereits bei einer Luftmenge von 32.000 m³/h wird ein Großteil des elektrisch nutzbaren Kühlungseffekts realisiert. Eine weitere Erhöhung auf 60.000 m³/h führt zwar zu einer geringfügig höheren thermischen Reserve, jedoch nur zu einem marginalen zusätzlichen elektrischen Mehrertrag von unter 0,1 Prozentpunkten. Für den betrachteten Anwendungsfall stellt die Luftmenge von 32.000 m³/h somit einen energetisch effizienten und praxisgerechten Betriebspunkt dar.

Zusammenfassend belegt das Projekt, dass die untersuchte Modulbelüftung einen nachweisbaren funktionalen Zusatznutzen bietet. Sie verbessert das thermische Betriebsverhalten der PV-Module signifikant und kann – insbesondere unter geeigneten Randbedingungen – zu einem messbaren elektrischen Mehrertrag beitragen. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse klar die Grenzen und Abhängigkeiten des Systems auf, wodurch eine realistische und belastbare Bewertung der Maßnahme unter Praxisbedingungen möglich wird.

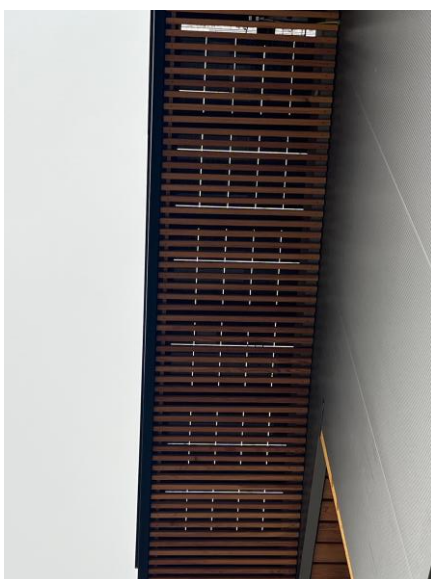
C) Projektdetails

5 Technische Details des Projektes

Bei dem errichteten Energiedach wurden 682 Stück Sonnenstrom Fabrik Glass/Glass Module mit einer Leistung von 325 Wp verbaut. Die Module sind bifazial und haben die Eigenschaft, sowohl direkte Einstrahlung auf der Vorderseite als auch indirektes Licht auf der Rückseite zur Stromerzeugung zu nutzen. Die gesamte neu errichtete PV-Anlage hat eine Leistung von 221,65 kWp. Als Wechselrichter wurden 2 Stück HUAWEI SUN 2000-100KTL verwendet.

Als Stromspeicher wurde ein BLOKK NEA 60 kW/199 kWh (50Hz-400V 3ph) von der Firma NEOOM in einem eigens dafür gebauten Raum installiert. Dadurch kann der Eigenverbrauchsanteil der PV Anlage gesteigert werden.

Die Hinterlüftungsebene, die als Wärmekollektor arbeitet, wurde als Holzriegelkonstruktion und mit anthrazit beschichteten PU-Schaumpaneelen ausgeführt. Die Luft wird in turbulenter Strömung hinter dem PV Glass-Glass Modul vorbeigezogen, welches dabei auf sehr effiziente Art und Weise gekühlt wird. Das Energiemodul fängt nicht nur Licht zur Stromproduktion, sondern auch Strahlungswärme zur Anwärmung der Trocknungsluft. Durch das aktive Absaugen der Wärme hinter den Modulen wird die elektrische Leistung der Anlage gesteigert. Die in der Hinterlüftungsebene erwärmte Luft wird von Hochdruck Radiallüftern 3 Stück HRE 1102 (27.000 m³/h) und einem Stück HRE 1502 (33.000 m³/h) von der Fa. Techserv, über einem aus Holz (KVH Kantholz)/OSB Platten -> geringer Wärmeverlust bis zur Trocknungsanlage) gebauten Lüftungskanal abgesaugt und bei der Trocknungsanlage als Trockenluft verwendet.



Frischlufiansaugung



Hinterlüftungsebene



Luftkanal



Luftklappen

Für das Steuer- und Energiemanagementsystem wurden am Markt leicht erhältliche Systemkomponenten der Fa. Loxone verwendet. Mit dem Steuersystem werden einerseits die gesamten Aggregate der Trockenanlage gesteuert und überwacht, andererseits alle notwendigen Parameter erfasst und aufgezeichnet, um die Energie optimal einzusetzen.

Die el. Energieproduktion der PV-Anlage wird direkt von den Wechselrichtern ausgelesen. Der Energieverbrauch der Trocknungsanlage wird mit einem eigenen Sub-Zähler erfasst. Die Drehzahl der Lüftermotoren wird über Frequenzumrichter bedarfsgerecht geregelt.

Die einzelnen Boxen bei der Trocknungsanlage sind mit Temperatur- und Feuchtefühlern ausgestattet, um die Anlage auf die notwendigen Trockengrade zu regeln.

Die Trocknungsboxen werden alternierend mit Luft bedient, je nachdem welches Trockengut gerade am meisten Feuchtigkeit abgibt - „Gentle Drying“. Während dessen lässt man andere Kulturen „rasten“, um den Wassernachtransport aus den Zellen zu optimieren. All das funktioniert in einem sehr weit automatisierten Prozess.

Über die PV Anlage sind Temperaturfühler verteilt, welche die Temperaturen unten bei der Lufteinlassöffnung, oben an der Absaugstelle, und im Lüftungskanal erfassen. Zusätzlich gibt es noch eine Vergleichsmessung, welche die theoretische Temperatur ohne Luftkühlung der Module erfasst (eigener Aufbau im Dachbereich). Im Luftkanal ist ein Strömungssensor installiert. Mit dem Strömungssensor lässt sich die abgesaugte Luftmenge ermitteln und im Zusammenhang mit der Temperatur dann die thermische Energie, welche dem Trocknungsprozess zugeführt wurde.

6 Kaufmännische Details des Projektes

Investitionskosten		
neoom international GmbH - Stromspeicher	€	122.096,56
ENdorado GmbH - Photovoltaik	€	196.135,30
Söllradl GmbH – Unterkonstruktion Indach PV-Anlage	€	40.655,51
Söllradl GmbH – Energiedach	€	148.658,28
Rent Power GmbH – Elektro für PV Anlage	€	53.099,47
Rent Power GmbH – Elektro für Trocknungsanlage	€	39.948,54
Thür GmbH – Blitzschutzanlage	€	2.337,00
Techserv GmbH - Trocknungsanlage	€	110.500,00
Devendo GmbH – Erstellung der Förderunterlagen	€	1.200,00
Irnberger Elektro GmbH – Luftsteuerung, Modulkühlung, Monitoring	€	19.876,10
Frankstahl GmbH – Steher für Trocknungswände	€	6.086,75
Gesamtkosten	€	740.593,51

Die Plankosten in der Höhe von € 942.205,74 konnten unter anderem durch folgende Punkte reduziert werden:

- Reduktion der Arbeitszeitkosten durch Eigenleistungen
- Zusätzliche Preisnachlässe konnten erzielt werden
- Weglassen von Systemkomponenten, welche zur Zielerreichung nicht unbedingt notwendig waren

7 Monitoring

Einleitung - Anlagenaufbau und Messkonzept

Im Rahmen dieses Projektes wurde das im Förderantrag dargestellte Photovoltaik-Vorhaben umgesetzt und begleitend überwacht. Ziel der Untersuchung war es, sowohl den elektrischen Betrieb der Anlage als auch den Kühlungseffekt der PV-Module unter realen Betriebsbedingungen systematisch zu erfassen und auszuwerten.

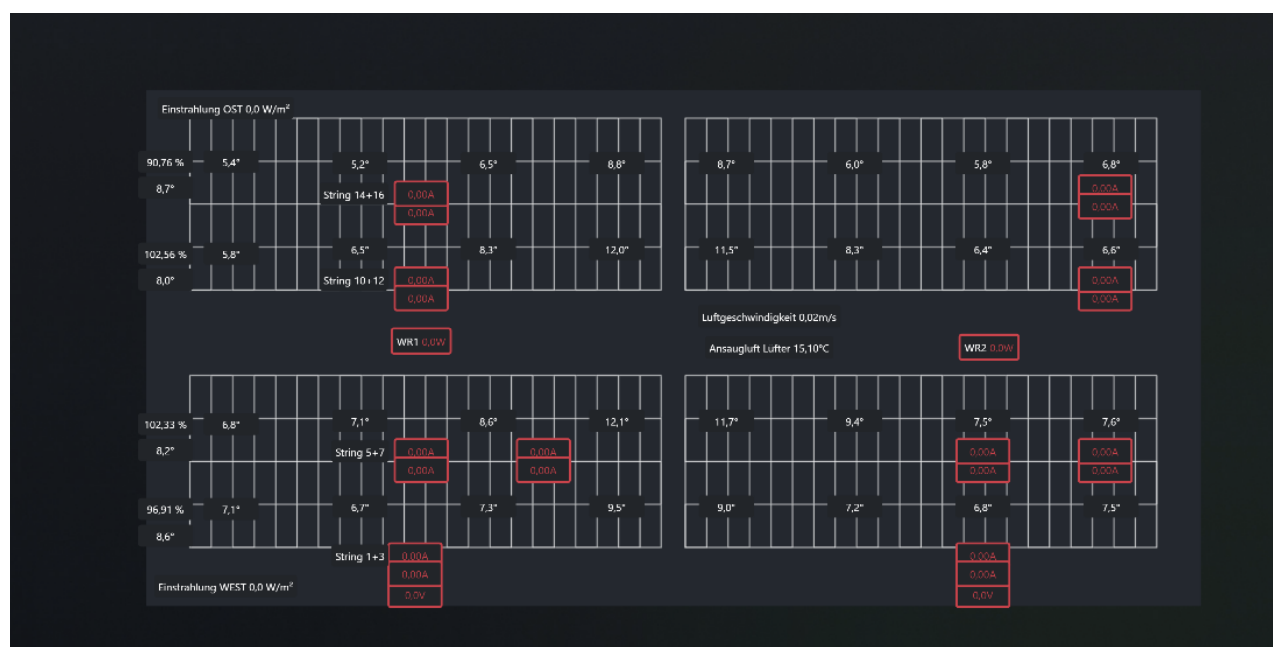
Ein Schwerpunkt des Projektes liegt auf dem Monitoring des Strombedarfs und der Strombereitstellung. Hierzu werden die jährlichen Energieflüsse sowie die auftretenden Maximalleistungen (kW) analysiert. Die Strombereitstellung aus Photovoltaikanlage, Speicheranlage und öffentlichem Stromnetz wird quantifiziert, sodass der Strom-Eigendeckungsgrad der Anlage abgeleitet und dargestellt werden kann.

Darüber hinaus wird der Kühlungseffekt der PV-Module untersucht. Die betrachtete Anlage ist als PV-Indachanlage ausgeführt, bei der die Module integraler Bestandteil der Dachkonstruktion sind. Die Modulrückseiten befinden sich innerhalb der Dachzwischenenebene, welche aktiv abgesaugt wird.

Diese ist in 8 gleiche Zonen unterteilt. Durch diese Absaugung entsteht ein Luftstrom entlang der Modulrückseiten, der eine gezielte Beeinflussung der Modultemperaturen ermöglicht. Die Untersuchung des Kühlungseffekts erfolgt in Abhängigkeit von der eingestellten Luftmenge, der Außen- und Modultemperatur sowie der solaren Einstrahlung.

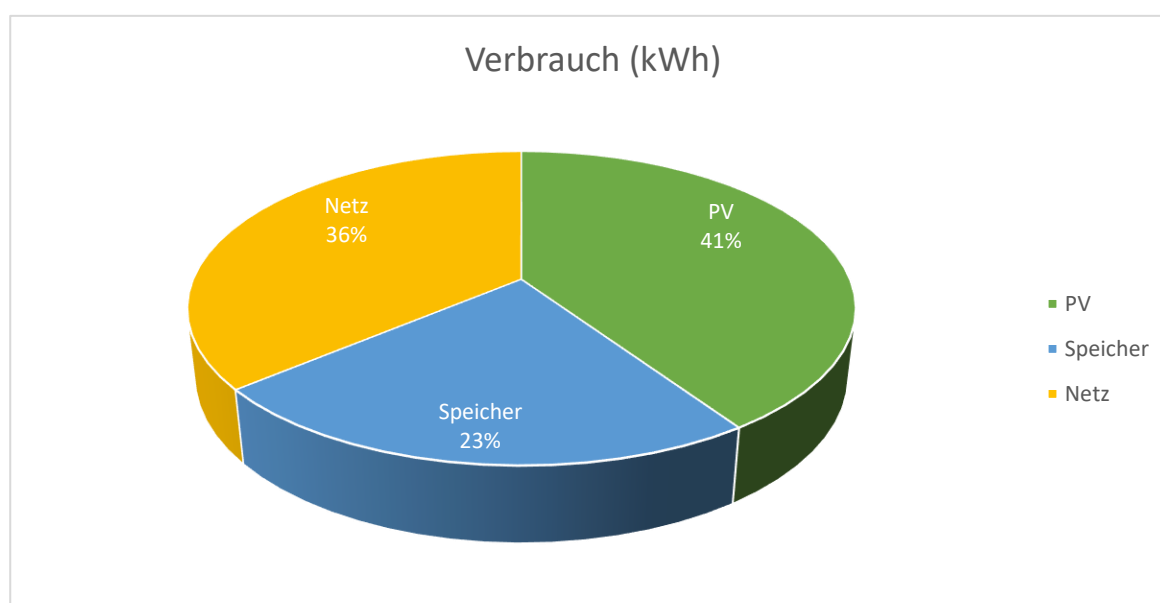
Die PV-Indachanlage ist als Ost-/West-System ausgeführt. Die unterschiedliche Ausrichtung führt zu variierenden Einstrahlungs- und Temperaturverläufen im Tagesverlauf, welche bei der Bewertung des Kühlungseffekts und der elektrischen Betriebsdaten berücksichtigt werden.

Die Anlage besteht aus 682 PV-Modulen mit einer jeweiligen Modulfläche von $1,68 \text{ m}^2$, was einer gesamten aktiven Modulfläche von rund 1.146 m^2 entspricht. Zur Analyse des Kühlungseffekts wurden unterschiedliche Luftmengen eingestellt und an mehreren Versuchstagen ausgewertet. Dabei kamen sowohl räumliche Vergleiche zwischen belüftetem und unbelüftetem Betrieb (4 Zonen geöffnet & 4 Zonen geschlossen) als auch zeitliche Untersuchungen mit variabler Aktivierung der Belüftung zum Einsatz.



Die Datengrundlage bilden elektrische Messwerte der Wechselrichter sowie Temperatur- und Einstrahlungsdaten aus der installierten Sensorik. Auf dieser Basis werden die thermischen Auswirkungen der Belüftung dargestellt und deren Einfluss auf das elektrische Betriebsverhalten der Anlage eingeordnet. Der Endbericht fasst die Ergebnisse zusammen und bewertet die Wirksamkeit der Modulbelüftung unter den untersuchten Randbedingungen.

Monitoring des Strombedarfs & Strombereitstellung aus PV, Speicher & E-Netz 2025



Kategorie	Strombedarf	Einheit	Anteil	Maximalleistungen
PV - Direktverbrauch	43.440	kWh	41%	197,95 kW
Speicher – Entladung	25.030	kWh	23%	60 kW
E-Netz - Bezug	38.700	kWh	36%	71,15 kW
Gesamt Verbrauch	107.220	kWh	100%	

Im Rahmen des Projektes wurde der elektrische Betrieb der Photovoltaikanlage umfassend überwacht. Dabei erfolgte ein Monitoring des jährlichen Strombedarfs, der auftretenden Maximalleistungen sowie der Strombereitstellung aus Photovoltaikanlage, Speicheranlage und öffentlichem Stromnetz.

Die Auswertung zeigt einen jährlichen Gesamtstromverbrauch von 107.220 kWh, der zu 41 % durch direkten PV-Eigenverbrauch und zu 23 % durch die Entladung des Speichers gedeckt wird. Der verbleibende Anteil von 36 % wird aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen. Daraus ergibt sich ein Strom-Eigendeckungsgrad von 64 %.

Zusätzlich wurden die Maximalleistungen der einzelnen Stromquellen erfasst. Die maximale PV-Leistung beträgt 197,95 kW, die maximale Speicherleistung 60 kW und die maximale Netzbezugsleistung $\sim 71,15$ kW. Die Ergebnisse belegen eine hohe Eigenversorgung durch die Kombination aus Photovoltaik und Speicher und erfüllen die im Förderprogramm geforderten Anforderungen an das Monitoring des Strombedarfs und der Strombereitstellung.

Monitoring des Kühleffekt der PV-Module

Ausführliche Tagesauswertung – Kühlungseffekt der PV-Module (09:00–19:00 Uhr)

Am betrachteten Untersuchungstag wurde der Kühlungseffekt der Photovoltaikmodule in Abhängigkeit von Luftmenge, Lufttemperatur sowie Solarstrahlung im Zeitraum von 09:00 bis 19:00 Uhr detailliert ausgewertet. Grundlage der Analyse bildeten stündlich erfasste Messwerte der Außentemperatur, der solaren Einstrahlung auf Ost- und Westseite sowie der Temperaturen im modulnahen Bereich bei unterschiedlichen Luftmengen ($0 \text{ m}^3/\text{h}$ und $32.000 \text{ m}^3/\text{h}$).

Bereits in den Vormittagsstunden zeigte sich mit zunehmender Solarstrahlung ein deutlicher Anstieg der Modul- und Unterdachtemperaturen. Auf der Ostseite stieg die solare Einstrahlung bis gegen Mittag auf Werte von über $800 \text{ W}/\text{m}^2$, wodurch sich bei fehlender Luftzirkulation ($0 \text{ m}^3/\text{h}$) modulnahe Temperaturen von bis zu über 60°C einstellten. Im Vergleich dazu lagen die Temperaturen bei einer Luftmenge von $32.000 \text{ m}^3/\text{h}$ im gleichen Zeitraum um 10 bis 14 K niedriger, was auf einen signifikanten konvektiven Kühlungseffekt durch die Luftbewegung zurückzuführen ist. Der maximale Kühlungseffekt auf der Ostseite wurde um 12:00 Uhr mit einer Temperaturreduktion von 13,6 K festgestellt.

Im weiteren Tagesverlauf verlagerte sich der Schwerpunkt der solaren Einstrahlung zunehmend auf die Westseite. Ab den frühen Nachmittagsstunden traten dort hohe Einstrahlungswerte von bis zu rund $780 \text{ W}/\text{m}^2$ auf, während gleichzeitig die Außentemperatur auf Werte von über 30°C anstieg. Unter diesen thermisch anspruchsvollen Bedingungen wurden auf der Westseite bei $0 \text{ m}^3/\text{h}$ Luftmenge modulnahe Temperaturen von über 60°C gemessen. Durch den Einsatz einer Luftmenge von $32.000 \text{ m}^3/\text{h}$ konnte dieser Temperaturanstieg deutlich reduziert werden. Der Kühlungseffekt erreichte auf der Westseite in den Nachmittagsstunden zwischen 15:00 und 16:00 Uhr sein Maximum mit einer Temperaturdifferenz von jeweils 15,3 K zwischen den beiden Betriebszuständen.

Über den gesamten betrachteten Zeitraum hinweg lag der mittlere Kühlungseffekt bei etwa 9,3 K auf der Ostseite und 10,8 K auf der Westseite. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Kühlungseffekt mit zunehmender Solarstrahlung und steigender Modultemperatur an Intensität gewinnt. Während die Lufttemperatur das absolute Temperaturniveau der Module beeinflusst, ist die Luftmenge entscheidend für die Effizienz der Wärmeabfuhr im modulnahen Bereich.

Zusammenfassend bestätigt die stündliche Auswertung, dass eine erhöhte Luftzirkulation einen nachweislich positiven Einfluss auf das thermische Verhalten der PV-Module hat. Insbesondere in

Phasen hoher solarer Einstrahlung und erhöhter Außentemperaturen führt die verbesserte Wärmeabfuhr zu einer deutlichen Reduzierung der Modultemperaturen. Da der elektrische Wirkungsgrad von Photovoltaikmodulen temperaturabhängig ist, trägt der beobachtete Kühlungseffekt zur Stabilisierung und Verbesserung der elektrischen Leistungsfähigkeit der Anlage bei. Damit wird der funktionale Zusatznutzen der untersuchten PV-Konfiguration unter realen Betriebsbedingungen eindeutig belegt.

Uhrzeit	T _{außen} [°C]	G _{ost} [W/m ²]	G _{west} [W/m ²]	T _{ud} ost 0 [°C]	T _{ud} ost 32k [°C]	ΔT ost (0- 32k) [K]	T _{ud} west 0 [°C]	T _{ud} west 32k [°C]	ΔT west (0- 32k) [K]	T _{zelle} ost [°C]	T _{zelle} west [°C]
09:00	24.10	695.00	276.50	42.69	34.06	8.62	25.38	24.56	0.81	50.5	33.5
10:00	25.15	804.75	435.50	50.75	39.38	11.38	35.50	30.81	4.69	55.2	41.3
11:00	26.80	850.75	571.50	56.50	43.56	12.94	44.62	36.56	8.06	58.8	48.5
12:00	27.55	846.50	682.50	60.00	46.44	13.56	52.50	41.44	11.06	59.6	54.3
13:00	29.90	783.25	752.75	60.88	47.38	13.50	58.38	45.06	13.31	61.0	59.5
14:00	31.70	674.50	778.25	59.75	47.25	12.50	62.06	47.38	14.69	59.3	62.3
15:00	32.85	523.00	752.00	56.25	45.31	10.94	63.69	48.38	15.31	53.3	61.8
16:00	31.40	353.75	682.75	50.81	42.25	8.56	62.75	47.44	15.31	47.0	58.6
17:00	34.60	173.25	558.00	43.56	37.62	5.94	59.25	44.81	14.44	40.3	55.8
18:00	32.00	52.50	384.75	35.81	32.69	3.12	52.44	40.12	12.31	31.8	44.9
19:00	30.25	31.00	168.50	30.56	29.56	1.00	43.50	34.56	8.94	28.6	36.7

☐ **T_{ud}** = Unterdach-/Modulnaher Temperaturbereich (Mittelwert aus den jeweiligen Fühlergruppen)

☐ **ΔT (0-32)** = Kühlungseffekt durch Luftmenge 32.000 m³/h gegenüber 0 m³/h (positiv = 32.000 m³/h ist kühler)

☐ **G** = Solarstrahlung (Einstrahlung)

Theoretische Leistungsverbesserung lt. Temperaturkoeffizienten

inkl. prozentualer Verbesserung der Modulleistung durch Kühlung (32.000 m³ gegenüber 0 m³)

Uhrzeit	ΔT Ost (K)	Leistungsverbesserung Ost (%)	ΔT West (K)	Leistungsverbesserung West (%)
09:00	8.62	3.36 %	0.81	0.32 %
10:00	11.38	4.44 %	4.69	1.83 %
11:00	12.94	5.05 %	8.06	3.14 %
12:00	13.56	5.29 %	11.06	4.31 %
13:00	13.50	5.27 %	13.31	5.19 %
14:00	12.50	4.88 %	14.69	5.73 %
15:00	10.94	4.27 %	15.31	5.97 %
16:00	8.56	3.34 %	15.31	5.97 %
17:00	5.94	2.32 %	14.44	5.63 %
18:00	3.12	1.22 %	12.31	4.80 %
19:00	1.00	0.39 %	8.94	3.49 %

Die angegebenen prozentualen Leistungsverbesserungen basieren auf einem Modulspezifischen Temperaturkoeffizienten laut Datenblatt von ca. $-0,39 \text{ \%}/\text{K}$ und dienen der theoretischen Einordnung.

Zusammenfassung

Über den untersuchten Zeitraum von 09:00 bis 19:00 Uhr führte die erhöhte Luftmenge von 32.000 m³ zu einer temperaturbedingten Leistungsverbesserung der PV-Module.

Auf der Ostseite wurde zur Mittagszeit eine maximale theoretische Leistungssteigerung von ca. 5,3 % erreicht, während auf der Westseite in den Nachmittagsstunden eine theoretische Leistungsverbesserung von bis zu $\sim 6,0 \text{ \%}$ festgestellt wurde.

Im Tagesmittel ergibt sich eine signifikante theoretische Leistungssteigerung durch den Kühlungseffekt, die insbesondere in Phasen hoher Solarstrahlung und erhöhter Modultemperaturen wirksam wird. Die Ergebnisse bestätigen, dass die verbesserte Wärmeabfuhr nicht nur thermisch relevant ist, sondern sich direkt messbar positiv auf die elektrische Modulleistung auswirkt.

Elektrischer Mehrertrag OST Seite 0 m³/h zu 32.000m³/h

Stunde	Energie 0 m ³ (kWh)	Energie 32k m ³ (kWh)	Mehrertrag (kWh)	Elektrischer Mehrwert (%)
09:00	15,556	15,933	0,377	2.42
10:00	18,008	18,427	0,419	2.33
11:00	18,808	19,442	0,634	3.37
12:00	18,826	19,502	0,676	3.59
13:00	17,598	18,273	0,675	3.83
14:00	15,534	15,824	0,290	1.87
15:00	12,337	12,540	0,203	1.65
16:00	8,578	8,533	-0,045	-0.52
17:00	3,790	4,044	0,254	6.70
18:00	1,613	1,730	0,116	7.21
19:00	0,999	1,148	0,149	14.93
Summe 09–19	131,647	135,396	3,749	2,85

Über den Zeitraum von 09:00 bis 19:00 Uhr ergibt sich für die belüftete Ostseite ein elektrischer Mehrwert von +2,85 % gegenüber dem unbelüfteten Referenzzustand. Die stündlichen Werte zeigen, dass der Mehrwert insbesondere in Phasen hoher Einstrahlung (z. B. 11:00–13:00 Uhr) stabil im Bereich von rund 3–4 % liegt, was die temperaturbedingte Verbesserung der PV-Leistungsfähigkeit durch Luftzirkulation bestätigt.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass am betrachteten Tag sehr hohe Außentemperaturen vorlagen (im Tagesverlauf >30 °C). Dadurch ist das absolute Temperaturniveau der PV-Module in beiden Betriebszuständen insgesamt erhöht. Unter solchen Bedingungen kann der Kühlungseffekt zwar weiterhin eine messbare Temperaturreduktion bewirken, jedoch wird das elektrische Potenzial der Kühlung teilweise begrenzt, weil:

- das Modul trotz Belüftung auf einem hohen Temperaturniveau bleibt und damit weiterhin in einem Bereich arbeitet, in dem temperaturbedingte Wirkungsgradverluste auftreten,
- gleichzeitig die Wechselrichter-/Betriebsführung bei sehr warmen Bedingungen (je nach System) tendenziell eher in Betriebsbereiche geraten kann, in denen zusätzliche elektrische Zugewinne nicht vollständig linear in Mehrertrag umgesetzt werden.

Damit ist die gemessene elektrische Verbesserung als konservatives Ergebnis unter thermisch ungünstigen Randbedingungen zu bewerten. An Tagen mit niedrigerer Außentemperatur (bei vergleichbarer Einstrahlung) ist zu erwarten, dass die Belüftung den Modulen eine stärkere Annäherung an günstigere Betriebstemperaturen ermöglicht und der elektrische Mehrwert entsprechend höher ausfallen kann.

Elektrischer Mehrertrag Westseite 0m³/h zu 32.000m³/h (Ertragsminderung)

Stunde	Energie 0 m³ (kWh)	Energie 32k m³ (kWh)	Mehrertrag (kWh)	Elektrischer Mehrwert (%)
09:00	5,645	5,240	-0.404	-7.16
10:00	9,875	9,693	-0.182	-1.84
11:00	13,347	13,198	-0.149	-1.12
12:00	16,018	15,574	-0.445	-2.78
13:00	17,582	16,972	-0.610	-3.47
14:00	18,034	17,272	-0.762	-4.23
15:00	17,638	16,872	-0.766	-4.34
16:00	16,195	15,467	-0.728	-4.49
17:00	13,462	13,019	-0.443	-3.29
18:00	9,749	9,442	-0.307	-3.15
19:00	4,672	4,545	-0.127	-2.72
Summe 09–19	142,217	137,294	-4.923	-3.46

Im Gegensatz zur Ostseite zeigt die Westseite am betrachteten Tag keinen positiven elektrischen Mehrwert durch die Modulbelüftung. Über den Zeitraum von 09:00 bis 19:00 Uhr ergibt sich vielmehr ein elektrischer Minderertrag von –3,46 % für den belüfteten Betriebszustand.

Dieser Effekt ist im Kontext der sehr hohen Außentemperaturen sowie der nachmittäglichen Hauptbelastung der Westmodule zu bewerten. Am Nachmittag treffen auf der Westseite gleichzeitig:

- hohe solare Einstrahlung,
- hohe Außentemperaturen,
- und ein bereits stark aufgeheiztes Modul- und Umgebungsniveau

zusammen. Unter diesen Randbedingungen kann die zusätzliche Luftbewegung keine ausreichende Absenkung der Modultemperatur mehr bewirken, um den temperaturbedingten Leistungsverlust elektrisch zu kompensieren. Stattdessen kann die Belüftung zu einer Verschiebung des Arbeitspunktes führen, bei der der potenzielle Kühlungsvorteil elektrisch nicht wirksam wird.

Damit zeigt die Westseite, dass der Kühlungseffekt stark von den thermischen Randbedingungen abhängt. Während auf der Ostseite ein klar positiver elektrischer Mehrwert nachgewiesen werden konnte, stellt der untersuchte West-Tag ein Beispiel für thermisch ungünstige Bedingungen dar, unter denen das elektrische Potenzial der Belüftung nicht ausgeschöpft werden kann. Ein ausgeprägter thermischer Kühlungseffekt führt nicht zwangsläufig zu einem proportionalen elektrischen Mehrertrag, insbesondere bei sehr hohen absoluten Modultemperaturen.

Ergänzender Vergleich unter moderaten thermischen Randbedingungen OST & West 0 m³/h zu 32.000m³/h

Zur weiteren Einordnung der zuvor beobachteten negativen elektrischen Effekte auf der Westseite wurde ein zusätzlicher Vergleichstag ausgewertet. Am 07.08.2025 wurden sowohl auf der Ost- als auch auf der Westseite jeweils belüftete und unbelüftete Zonen gleichzeitig betrieben. Die Luftmenge betrug 32.000 m³/h, der betrachtete Zeitraum 09:00 bis 19:00 Uhr.

Im Unterschied zu den zuvor betrachteten Hitzetagen lagen an diesem Tag deutlich kühlere Außentemperaturen vor. Dadurch konnten identische Randbedingungen für Ost und West hergestellt werden, ohne dass thermische Grenzbereiche erreicht wurden.

Die Auswertung zeigt, dass unter diesen moderaten Bedingungen sowohl auf der Ost- als auch auf der Westseite ein positiver elektrischer Mehrertrag durch die Modulbelüftung erzielt wird. Damit wird deutlich, dass die zuvor beobachteten negativen Effekte auf der Westseite nicht grundsätzlich, sondern stark von den thermischen Randbedingungen abhängig sind. Auf der Ostseite ist der Effekt geringer, jedoch ebenfalls überwiegend positiv. Die höchsten relativen Zugewinne treten in den Randstunden auf, während sich zur Mittagszeit ein stabiler Mehrwert einstellt.

Stunde	Ost unbelüftet (kWh)	Ost belüftet (kWh)	Ost Δ (%)	West unbelüftet (kWh)	West belüftet (kWh)	West Δ (%)
09:00	16,01	15,96	-0,31%	5,83	6,37	+9,26%
10:00	18,20	18,45	+1,37%	10,22	10,20	-0,20%
11:00	19,47	19,94	+2,41%	13,63	13,81	+1,32%
12:00	19,51	19,91	+2,05%	16,10	16,51	+2,55%
13:00	18,19	18,83	+3,52%	17,46	18,19	+4,18%
14:00	15,36	15,66	+1,95%	17,14	17,91	+4,49%
15:00	12,86	12,90	+0,31%	17,36	18,11	+4,32%
16:00	9,31	9,20	-1,18%	16,13	16,81	+4,21%
17:00	4,15	4,28	+3,13%	13,63	14,12	+3,59%
18:00	1,84	1,91	+3,8%	8,17	8,53	+4,41%
19:00	0,38	0,40	+5,26	1,72	1,77	+2,91%

Tagesgesamt (09:00–19:00)

- Ost:
 - 135,27 → 137,44 kWh Mehrwert: +1,61 %
- West:
 - 137,39 → 142,32 kWh Mehrwert: +3,59 %

Nachstehend eine Tabelle der Messwerte in Stündlicher Auswertung.

Thermischer Effekt & Elektrischer Mehrertrag der OST & West 0 m³/h zu 32.000m³/h bei kühlerer Außentemperatur

Stunde	Einstrahlung Ost (W/m²)	Einstrahlung West (W/m²)	Unterdach Ost unbel. (°C)	Unterdach Ost bel. (°C)	ΔT Ost (K)	Unterdach West unbel. (°C)	Unterdach West bel. (°C)	ΔT West (K)	Ost unbelüftet (kWh)	Ost belüftet (kWh)	West unbelüftet (kWh)	West belüftet (kWh)
09:00	688	290	38,06	30,88	-7,19	20,00	19,38	-0,62	16,01	15,96	5,83	6,37
10:00	796	438	44,69	33,25	-11,44	29,44	24,75	-4,69	18,20	18,45	10,22	10,20
11:00	852	581	50,81	37,56	-13,25	39,12	30,88	-8,25	19,47	19,94	13,63	13,81
12:00	846	687	54,12	40,44	-13,69	47,31	35,88	-11,44	19,51	19,91	16,10	16,51
13:00	789	763	55,56	42,25	-13,31	53,25	40,06	-13,19	18,19	18,83	17,46	18,19
14:00	632	717	53,50	41,12	-12,38	56,12	41,38	-14,75	15,36	15,66	17,14	17,91
15:00	490	671	48,75	38,38	-10,38	55,31	40,56	-14,75	12,86	12,90	17,36	18,11
16:00	360	688	45,00	36,62	-8,38	56,88	41,75	-15,12	9,31	9,20	16,13	16,81
17:00	183	569	38,50	32,81	-5,69	53,56	39,94	-13,62	4,15	4,28	13,63	14,12
18:00	67	313	31,31	28,50	-2,81	45,69	34,88	-10,81	1,84	1,91	8,17	8,53
19:00	57	255	28,50	28,50	0,00	41,25	34,00	-7,25	0,38	0,40	1,72	1,77
Mittel/Σ	524	543	44,44	35,48	-8,95	45,27	34,86	-10,41	135,27	137,44	137,39	142,32

Gleichmäßiger Belüftungsversuch ohne zeitgleicher Referenzzone

An einen weiteren Versuchstag (28.08.2025) wurde die Modulbelüftung ab 15:00 Uhr für alle 8 zu betrachteten Zonen (Ost & West) gleichzeitig mit 10.000m³/h aktiviert. Da kein unbelüfteter Referenzbereich vorlag, erfolgte die Bewertung als zeitlicher Vergleich vor und nach Aktivierung der Belüftung. Die elektrischen Energieverläufe der West Zonen zeigen dabei ein homogenes Verhalten ohne negativen Einfluss der Belüftung auf den elektrischen Ertrag. Gleichzeitig deuten die Temperaturverläufe auf eine thermische Entlastung der Module ab dem Aktivierungszeitpunkt hin.

Zusätzliche Ost-Auswertung unter identischen Randbedingungen 0m³/h zu 60.000m³/h

Betriebszustand	Energie 09–19 (kWh)	Mehrertrag (kWh)	Elektrischer Mehrwert (%)
0 m ³ /h (unbelüftet)	129,77	-	-
60.000 m ³ /h (belüftet)	133,52	+3,75	+2,89

Zur weiteren Absicherung der Ergebnisse wurde für den 14.08.2025 zusätzlich die Ostseite unter identischen thermischen Randbedingungen ausgewertet. Der Vergleich zwischen unbelüftetem Betrieb (0 m³/h) und einer Luftmenge von 60.000 m³/h zeigt einen elektrischen Mehrwert von +2,89 % im Zeitraum von 09:00 bis 19:00 Uhr. Damit bestätigt sich der bereits am 09.08.2025 beobachtete positive Effekt der Modulbelüftung auf der Ostseite. Gleichzeitig wird deutlich, dass der elektrische Mehrwert trotz erhöhter Luftmenge nur marginal über dem Niveau von 32.000 m³/h liegt, was den zuvor beschriebenen Sättigungseffekt bestätigt.

Direkter Vergleich 32.000 m³/h vs. 60.000 m³/h – Ostseite Elektrischer Mehrertrag

Luftmenge	Energie belüftet (kWh)	Energie unbelüftet (kWh)	Mehrertrag (kWh)	Elektrischer Mehrwert (%)
32.000 m³/h	135,396	131,647	+3.749	+2.85 %
60.000 m³/h	134,482	130,636	+3.846	+2.94 %

Basis

- gleicher Standort, gleiche Ausrichtung (Ost)
- Ziel: Zusatznutzen durch erhöhte Luftbewegung

☐ zusätzlicher Mehrertrag: **+0,097 kWh**

☐ zusätzliche elektrische Verbesserung: **≈ +0.09 %-Punkte**

Der Vergleich unterschiedlicher Luftmengen auf der Ostseite zeigt, dass bereits bei einer Luftmenge von 32.000 m³/h ein Großteil des elektrisch nutzbaren Kühlungseffekts realisiert wird. Eine weitere Erhöhung der Luftbewegung auf 60.000 m³/h führt lediglich zu einer marginalen zusätzlichen Leistungssteigerung von unter 0,1 Prozentpunkten.

Dies weist auf eine Sättigung des Kühlungseffekts hin, bei der zusätzliche Luftbewegung zwar weiterhin die Wärmeabfuhr unterstützt, jedoch keinen signifikanten zusätzlichen elektrischen Mehrertrag mehr bewirkt. Für den betrachteten Anwendungsfall stellt die Luftmenge von 32.000 m³/h daher einen energetisch effizienten Betriebspunkt dar.

Vergleichstabelle – Thermische Randbedingungen & elektrischer Mehrwert (Ost)

32.000 m³/h zu 60.000m³/h

Kenngröße	09.08.2025	14.08.2025	Einordnung
Luftmenge	32.000 m ³ /h	60.000 m ³ /h	höhere Luftbewegung am 14.08
Außentemperatur T _{a,max} (°C)	~34.6	34.7	beide Tage sehr heiß
Außentemperatur T _{a,mittel} (°C, 09–19)	~30–31	~30–31	vergleichbares thermisches Niveau
Unterdach-Kühlung ΔT _{ud,mittel} (K)	≈ 9.3	9.35	praktisch identisch
Unterdach-Kühlung ΔT _{ud,max} (K)	≈ 13.6	14.19	leicht höher am 14.08
Theoretisches Potenzial aus ΔT _{ud,mittel} * (%)	≈ 3.6	≈ 3.65	aus –0,39 %/K
Gemessener elektrischer Mehrwert (%)	+2.85	+2.94	nur marginaler Zuwachs
Zusätzlicher Mehrwert ggü. 09.08 (pp)	–	+0.09	Sättigungseffekt

Beide Tage weisen sehr hohe Außentemperaturen auf und sind damit thermisch anspruchsvoll. Trotz der deutlich erhöhten Luftmenge (60.000 m³/h) am 14.08.2025 bleibt die mittlere Unterdach-Kühlung nahezu identisch zum 09.08.2025 (32.000 m³/h). Zwar wird stundenweise eine höhere maximale Kühlung erreicht, der gemessene elektrische Mehrwert steigt jedoch nur marginal von +2,85 % auf +2,94 %.

Dies zeigt, dass der elektrische Nutzen der Modulbelüftung unter sehr heißen Randbedingungen nicht linear mit der Luftmenge wächst. Ein Großteil des elektrisch nutzbaren Kühlungseffekts ist bereits bei 32.000 m³/h realisiert; zusätzliche Luftbewegung führt überwiegend zu thermischer Reserve, ohne einen proportionalen elektrischen Mehrertrag zu erzeugen (Sättigung).

8 Arbeits- und Zeitplan

- Planungsphase: 01.01.2021 – 14.05.2021
- Bewilligungsphase: 14.05.2021 – 05.11.2021
- Umsetzungsphase: 01.04.2022 – 31.12.2023

9 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Es wurden keine Publikationen und Disseminierungsaktivitäten durchgeführt.