

Photovoltaisch-Thermische Module (PVT) als alleinige Quelle für Sole-/Wasser-Wärmepumpen

Dipl.-Ing. Friedrich Ohrt, Dr. Jiri Springer, Dr. Wilhelm Stein; Sunmaxx PVT GmbH

M. Sc. Simon Büttgenbach; PVT-Experte

Dr. Andreas Bohren; SPF Institut für Solartechnik

Kurzfassung

Photovoltaisch-thermische (PVT) Module ermöglichen die Nutzung von Dach- und Freiflächen zur gleichzeitigen Strom- und Wärmebereitstellung. Sie steigern so die flächenbezogene Energieausbeute deutlich. Anhand von Felddaten realer Anlagen und begleitender Simulationen wird der Betrieb von PVT-Kollektoren als alleinige Wärmequelle für Sole-/Wasser-Wärmepumpen sowohl im Winter als auch in Sommerperioden dargestellt.

Im Fokus stehen unabgedeckte und ungedämmte PVT-Kollektoren (*WISC, wind and infrared sensitive collectors*) mit flachem, vollflächig an das PV-Laminat angebundenem Absorber, wie beispielsweise das Modell PX-1 des Herstellers Sunmaxx. Dieses basiert auf hocheffizienter Thermomanagement-Technologie aus der Automobil-Industrie. Dadurch werden ein hoher Gesamtwirkungsgrad und eine effektive Kühlung der Solarzellen ermöglicht. Zudem gewinnt das Modul Wärme aus solarer und langwelliger Einstrahlung sowie aus der Umgebungsluft. Die Kollektoren zeichnen sich auch durch einen konstruktiv einfachen Modulaufbau aus, welcher eine leichte und zuverlässige Installation auf gängigen PV-Unterkonstruktionen erlaubt und so die Systemkomplexität sowie Kosten reduziert.

Die Messungen zeigen, dass auch im Winter stabile Quelltemperaturen für die Wärmepumpe, auch im monovalenten Betrieb, erreicht werden können. Bei Sonneneinstrahlung liegen die Quelltemperaturen häufig deutlich über der Umgebungstemperatur und ohne Einstrahlung nur wenige Kelvin darunter. Die untersuchten Anlagen weisen dabei eine Dimensionierung der PVT-Anlage zwischen 2,0 und 4,5 m²/kW Heizleistung der Wärmepumpe (bei B0/W35) auf. Selbst in der kalten Heizperiode 2025/26 wurden Arbeitszahlen größer 4,5 im monovalenten Betrieb bei einer Dimensionierung von 2,8 m²/kW erreicht.

Einleitung

Photovoltaisch-thermische Kollektoren (PVT) ermöglichen die Nutzung von Dach- und Freiflächen zur gleichzeitigen Stromerzeugung, Wärmebereitstellung und Kühlung. Damit steigern sie die Energieausbeute pro Quadratmeter deutlich und leisten einen wichtigen Beitrag zur Sektorenkopplung im Gebäudebereich. Bei PVT-Modulen wie vom Typ Sunmaxx PX-1 ist der unabgedeckte und ungedämmte thermische Absorber (WISC, *wind and infrared sensitive collector*) vollflächig und direkt mit dem PV-Laminat verbunden. Diese Bauweise erreicht einen optischen Wirkungsgrad von etwa 60 %. Damit ist das Modul Sunmaxx PX-1 aktuell der PVT-WISC mit dem höchsten optischen Wirkungsgrad und einem Gesamtwirkungsgrad (thermisch und elektrisch) von über 80 % (siehe Abbildung 1).

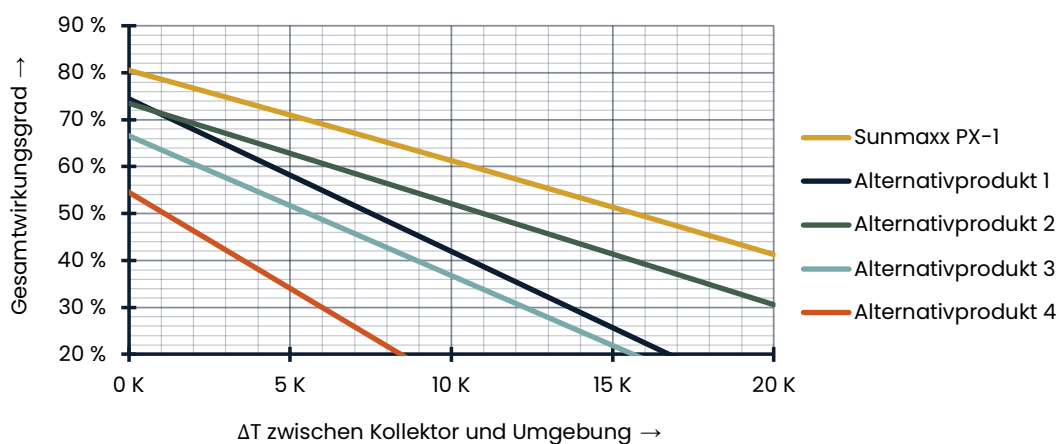


Abbildung 1: Wirkungsgradkennlinien von PVT-WISC

Gleichzeitig sorgt der vollflächige Absorber für eine effektive Kühlung der Solarzellen. Aufgrund der temperaturabhängigen Leistungskennlinie von PV-Modulen sind dadurch elektrische Mehrerträge von bis zu 10 % gegenüber konventionellen PV-Systemen möglich. Abbildung 2 zeigt den über die gesamte Modulfläche gleichmäßigen Wärmeentzug.

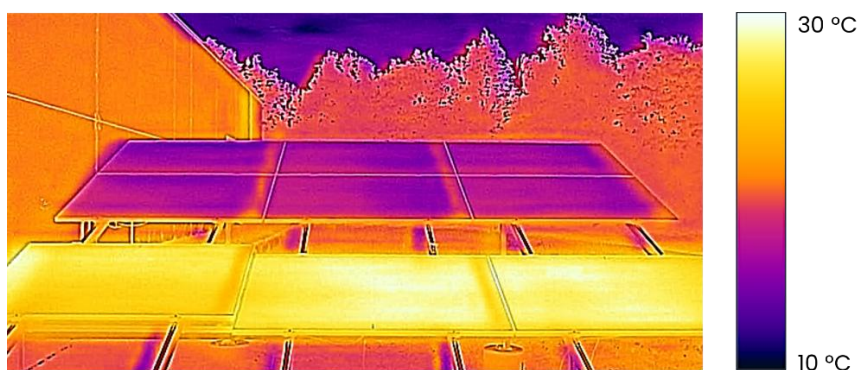


Abbildung 2: Thermografische Aufnahme im Heizbetrieb.

Oben: angeschlossene Module im Betrieb. Unten: nicht angeschlossene Module als Referenz

Über den Absorber auf der Rückseite des PV-Laminats (WISC) lässt sich auch ohne solare Einstrahlung Wärme aus der Umgebung gewinnen. Damit kann dieser

Kollektortyp als alleinige Quelle für Wärmepumpen (WP) dienen [1, 2, 3, 4]. Eine solche Betriebsart wird *monovalenter Betrieb* (bzw. *monoenergetischer Betrieb* unter Einsatz eines Backup-Heizstabs) genannt. Im Gegensatz dazu werden in *bivalenten* Systemen weitere Wärmequellen oder Saisonspeicher wie Erdwärmesonden genutzt [5, 6, 7, 8, 9]. Die hier dargestellten Daten zeigen, dass PVT auch ohne diese zusätzlichen Quellen einen effizienten Wärmepumpenbetrieb erlaubt. Entscheidend hierfür ist auch die Nutzung der konvektiven Gewinne sowie der langwelligen Einstrahlung über die Vorderseite. Ermöglicht wird dies durch die flächige und thermisch gut leitende Verbindung von Absorber zur Moduloberfläche. Ohne eine solche Anbindung (wenn der thermische Absorber nicht direkt mit dem Laminat verbunden ist) sind diese Gewinne nicht nutzbar. Für die effektive Nutzung des konvektiven Wärmeaustauschs ist die Anbindung des Wärmetauschers an die Sole entscheidend. Bei flachen Absorbern ist die Umgebungsluft über ein dünnes Blech unmittelbar an die Sole angebunden. Ist die Wärmetauscher-Fläche bezüglich der Kollektor-Bruttofläche vergrößert (beispielsweise durch Lamellen), wird der Wärmetauscher nicht direkt von der Sole durchflossen. So entstehen zusätzliche thermische Widerstände bei der Wärmeübertragung von der Umgebungsluft auf das Wärmeträgerfluid. Weiterhin ist die vergrößerte Wärmetauscherfläche nicht direkt vergleichbar mit der Wärmetauscherfläche flacher Absorber. Der konvektive Wärmeaustausch skaliert beispielsweise bei Lamellenstruktur nicht linear mit der konstruktiven Wärmetauscherfläche, sondern deutlich darunter.

Im Kühlbetrieb wird über die Rückseite Wärme konvektiv an die Umgebung abgegeben. Zusätzlich erfolgt eine Wärme-Abstrahlung von der Modul-Vorderseite gegen den kalten Nachthimmel. Somit können diese PVT-Module auch als Wärmesenke beim passiven wie aktiven Kühlen dienen [10, 11].

Der leichte Modulaufbau, bei dem der Absorber nicht über den Rahmen hinausragt, erlaubt eine einfache Montage auf gängigen PV-Unterkonstruktionen und hält die Dachlast gering. Durch die einfache Installation mittels Steckverbindern liegen die Montagezeiten darüber hinaus nur wenig über denen von reinen PV-Anlagen. Eine skalierbare Massenfertigung ermöglicht zudem niedrige Herstellungskosten, während standardisierte Qualitätskontrollen eine konstant hohe Produktqualität sicherstellen. Durch den niedrigen Druckabfall von nur 29 mbar im Modul können bis zu 24 Module parallel an eine Sammelleitung angeschlossen werden. Dies trägt ebenfalls zur Reduktion von Installationszeit und Systemkomplexität bei.

Weiterhin ist der flache Absorber-Aufbau unempfindlich gegen Vereisung und bedarf keiner spezifischen Anströmung der Luftmassen hinter den Modulen. Je nach der Exposition der Module und dem Aufbau von Absorber und Montagesystem kann diese in der Realität signifikant behindert werden [12]. Die konvektiven Gewinne bei alternativen Modultypen mit vergrößerter Wärmetauscher-Fläche auf der Rückseite (beispielsweise durch Lamellen) werden dann ebenfalls beschränkt. Im Folgenden werden daher exemplarische Felddaten der bereits zahlreich

installierten Anlagen gezeigt, um reale Betriebsbedingungen abzubilden. Für jede Anlage werden dabei der Standort, die Installationsart und die Auslegung des PVT-Systems bezüglich der Heizleistung der verbauten Wärmepumpe bei B0/W35 in m^2/kW angegeben.

Dieser Dimensionierungs-Kennwert ist entscheidend für die Qualität der Wärmequelle, welche sich in der Temperatur niederschlägt [13]. Die Wärmepumpe gibt über ihre Kennlinie die Leistungsanforderung an die PVT-Anlage vor. Je nach Umgebungsbedingungen und verfügbarer PVT-Fläche stellt sich dadurch eine Quelltemperatur ein. Hierbei ergibt sich durch die Wärmepumpen-Kennlinie ein stabilisierendes Moment: Sinkt die Quelltemperatur durch eine erhöhte Leistungsanforderung der Wärmepumpe, sinkt eben diese durch einen reduzierten COP und die Quelltemperatur stabilisiert sich (siehe Abbildung 3).

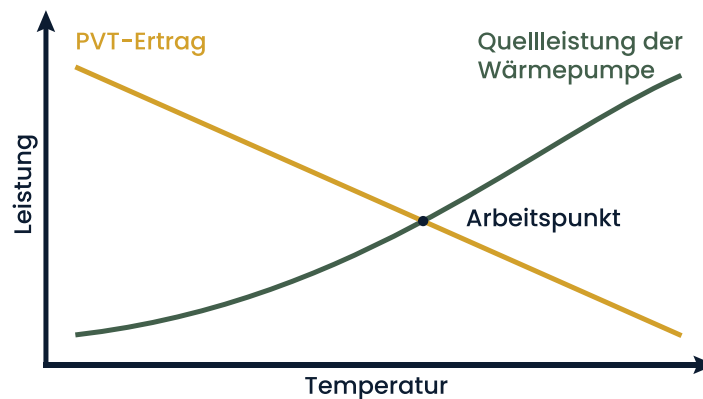


Abbildung 3: Schematische Kennlinien von Wärmepumpe und PVT

Der entscheidende Grenzwert ist dabei die von der Wärmepumpe erlaubte minimale Verdampfer-Eintrittstemperatur. Wird diese in der Quelle unterschritten, muss die Wärmepumpe abschalten. Für typisch mitteleuropäisches Klima werden Wärmepumpen empfohlen, die -15 °C oder weniger erlauben [13]. Bei größerem PVT-Feld können sowohl eine größere Fläche für Strahlungsgewinne als auch eine größere wirksame Wärmetauscher-Fläche zur konvektiven Wärmegewinnung genutzt werden. Dadurch liegt die Quelltemperatur entsprechend höher und die Effizienz der Wärmepumpe steigt. Als Richtwert für die Dimensionierung gilt bei flachem Absorber eine PVT-Fläche von etwa 4 m^2 pro kW Heizleistung der Wärmepumpe bei B0/W35. Bei öffentlich zugänglichen Referenz-Anlagen wurde dieser Wert sowohl bei Kollektoren mit vergrößerter Wärmetauscher-Fläche als auch für Kollektoren mit vollflächigem Absorber umgesetzt.

Nutzung solarer Direktstrahlung

Bei solarer Einstrahlung steigen die Sole-Temperaturen im PVT-Modul durch den hohen optischen Wirkungsgrad deutlich über die Umgebungstemperatur. Durch den flachen Aufbau des Absorbers und den damit verbundenen geringen Volumeninhalt ist das System dynamisch und übersetzt solare Einstrahlung direkt in hohe Quelltemperaturen. Damit liegen an sonnigen Wintertagen die Wärmepumpen-Effizienzen (COP) deutlich über denen vergleichbarer Luft-/Wasser-Wärmepumpen (Luft-WP). Ebenfalls ist so eine effektive (Zwischen-)Regeneration (saisonaler) Speicher möglich. Über beide Mechanismen wird der Strombedarf zum Heizen und somit auch der Winterstrombedarf insgesamt deutlich reduziert.

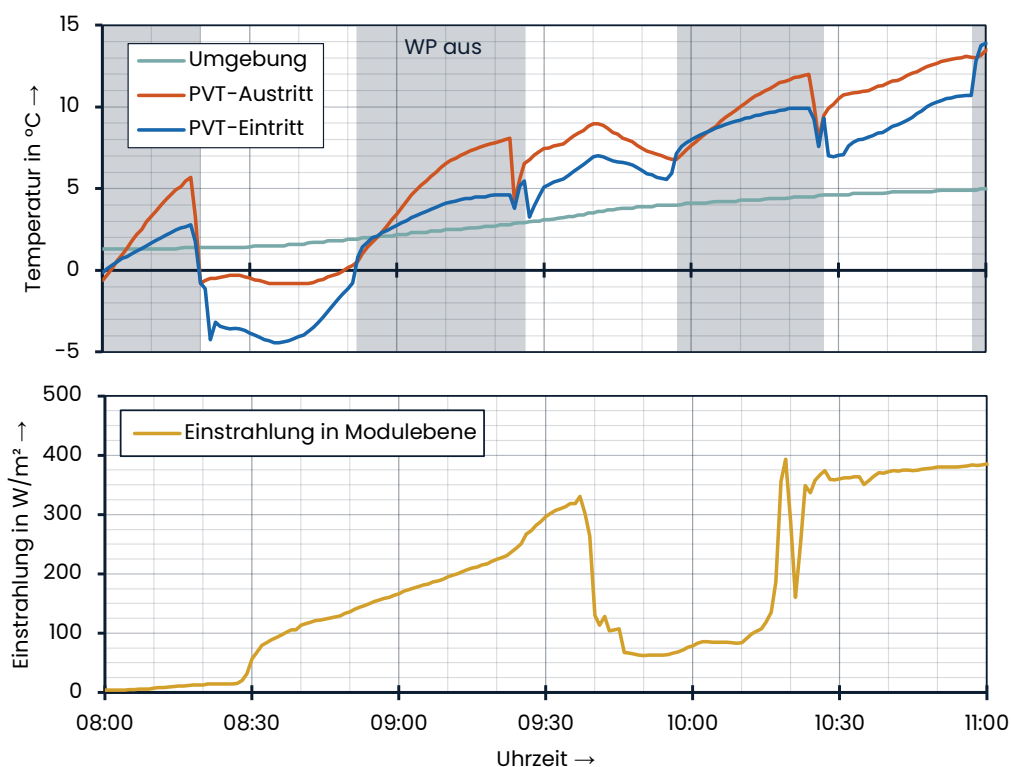


Abbildung 4: Beispielhafter Wintertag mit Sonne (18.12.25 | Ottendorf-Okrilla | Freifläche | 4 m²/kW)

Abbildung 4 zeigt beispielhaft einen sonnigen Vormittag an einer Freiflächen-Anlage im Winter 2025/26. Mit Sonnenaufgang (8:30 Uhr) nähert sich die Quelltemperatur der Umgebungstemperatur (etwa 1 °C) an. Danach übersteigt sie diese und liegt bei knapp 400 W/m² Einstrahlung etwa 8 K über der Umgebung (13 °C Quelltemperatur bei 5 °C Außentemperatur um 10:50 Uhr). Bei zwischenzeitlicher Bewölkung (9:40 Uhr bis 10:20 Uhr) sinkt die Quelltemperatur leicht, unterschreitet aber durch die thermische Trägheit nicht die Umgebungstemperatur. Dieses Verhalten unterstreicht den Vorteil der vollflächigen direkten Anbindung des thermischen Absorbers an das PV-Laminat.

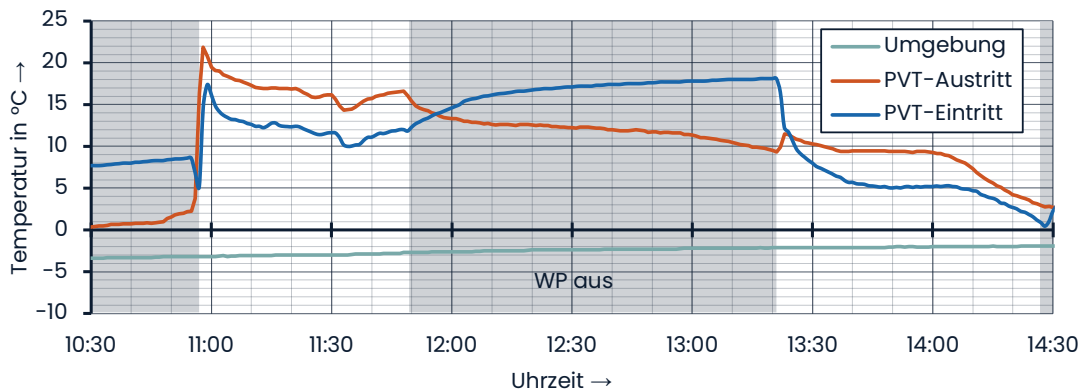


Abbildung 5: Sonniger Wintertag (13.01.25 | Regensburg | Schrägdach | 4,5 m²/kW)

Abbildung 5 zeigt diesen Vorteil an einer PVT-Anlage auf einem Schrägdach bei einer Außentemperatur von -1 °C im Winter 2024/25. Am Vormittag (gute Einstrahlung auf die Modulebene) liegt die Quelltemperatur mit 17 °C (11:20 Uhr) sogar 18 K über Umgebung. Am Nachmittag liegt sie mit 10 °C zunächst 11 K über Umgebung (13:20 Uhr). Bei Verschattung durch niedrigen Sonnenstand nähert sich die Quelltemperatur dann der Umgebungstemperatur an (14:30 Uhr).

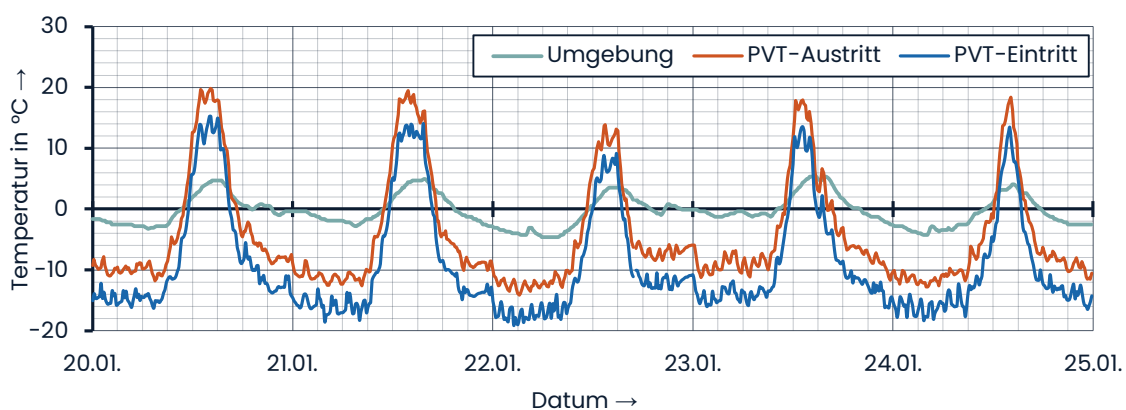


Abbildung 6: Winterwoche mit Sonnenschein (2026 | Stuttgart | Schrägdach | 3 m²/kW)

Abbildung 6 zeigt ein ähnliches Verhalten in einer sonnigen Winterwoche Anfang 2026. Tagsüber werden Quelltemperaturen von 15 bis 20 °C bei Umgebungstemperaturen von etwa 5 °C erreicht. Wird der Wärmepumpenbetrieb, ähnlich wie bei einer PV-Eigenverbrauchsoptimierung, in diese Zeiten gelegt, lassen sich Effizienzen über denen einer Erdsonden-Wärmepumpe erreichen. Zudem kann die

Wärmepumpe in diesen sonnigen Stunden ihre Antriebsenergie aus den Stromerträgen der PVT-Anlage beziehen. Das System ist damit nicht nur hocheffizient, sondern auch (teil-)autark. Dies wirkt sich positiv auf den Winterstromverbrauch des gesamten Gebäudes aus.

Betrieb ohne direkte solare Einstrahlung (Nachtbetrieb)

Ohne direkte Einstrahlung gewinnt das PVT-Modul Wärme hauptsächlich konvektiv aus der Umgebungsluft. Dabei sinkt die Quelltemperatur wenige Kelvin unter die Umgebungstemperatur. Im Vergleich mit einer Luft-/Wasser-Wärmepumpe ist dabei zu beachten, dass der Wärmeübergang zwischen Sole und Kältemittel deutlich besser ist als zwischen Luft und Kältemittel. Damit können die Verdampfungstemperaturen der PVT-Systeme auch bei leicht geringeren Quelltemperaturen höher liegen. Die Temperatur-Differenz zwischen PVT und Umgebung wird dabei durch zwei Faktoren bestimmt: Einerseits verbessert wirksamer Wind den Wärmeübergang und erhöht somit die PVT-Temperatur. Andererseits ist der vollflächige Absorber auch empfindlich für diffuse kurzwellige sowie langwellige (Infrarot-)Strahlung. Entsprechende Ein- oder Abstrahlungen verändern somit ebenfalls die Quelltemperatur (windunabhängig).

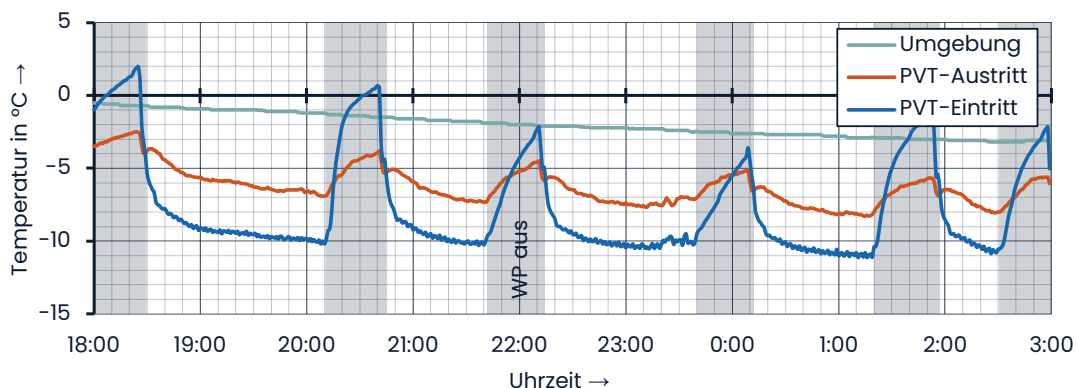


Abbildung 7: Windarme Nacht (18.-19.01.25 | Regensburg | Schrägdach | 4,5 m²/kW)

Abbildung 7 zeigt nächtliche Daten ohne diese begünstigenden Faktoren. Die Windgeschwindigkeit (gemäß einer naheliegenden Wetterstation) lag unter 1 m/s, zudem gab es im gesamten Zeitraum kein Tageslicht und somit auch keine Diffusstrahlung. Diese Konditionen entsprechen dem „worst case“ und damit dem Auslegungspunkt der PVT-Anlage. Die Quelltemperatur liegt etwa 4 K unter der Umgebungstemperatur. Die Wärmepumpe regelt den Durchfluss auf eine Spreizung von 3 K im Sole-Kreis.

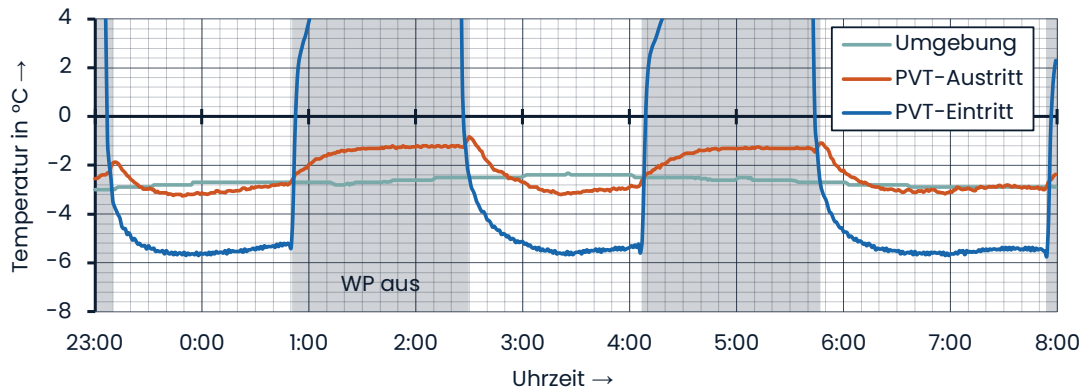


Abbildung 8: Windige Nacht (11.-12.01.25 | Regensburg | Schrägdach | 4,5 m²/kW)

Abbildung 8 stellt die Quelltemperaturen derselben Anlage in einer windigen Nacht dar. Die Windgeschwindigkeit lag im Durchschnitt bei 4 m/s, in Böen über 10 m/s. Die PVT-Austrittstemperatur erreicht mit -3,0 °C nahezu die Umgebungstemperatur von -2,7 °C (0:30 Uhr). Mit 3 m/s Windgeschwindigkeit liegt die Temperaturdifferenz ebenfalls unter 1 K (3:30 Uhr). Zum Ende der Nacht nimmt die Quelltemperatur die Umgebungstemperatur von -2,9 °C an (7:30 Uhr). Zu dieser Zeit ist einerseits die Windgeschwindigkeit wieder auf über 4 m/s angestiegen, andererseits wirken hier auch bereits die diffuse und langwellige Einstrahlung durch den nahenden Sonnenaufgang.

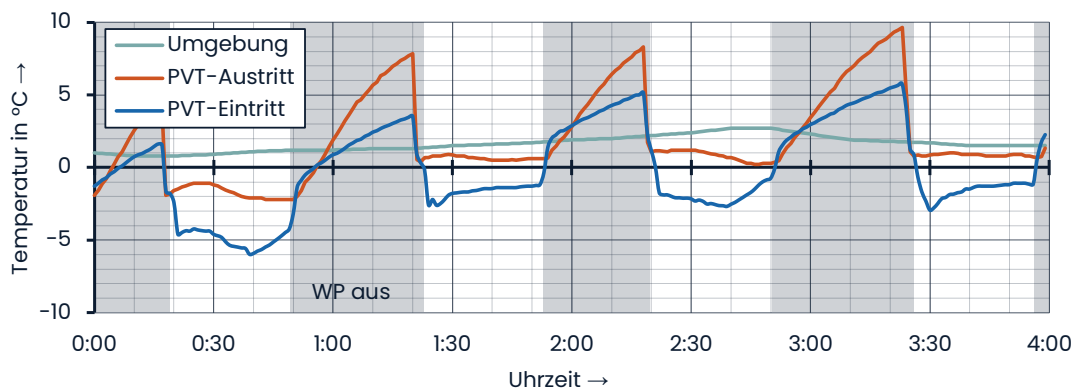


Abbildung 9: Nächtlicher Betrieb (18.12.25 | Ottendorf-Okrilla | Freifläche | 4 m²/kW)

Abbildung 9 zeigt den nächtlichen Betrieb einer Freiflächen-Anlage im Dezember 2025. Die Quelltemperaturen liegen dabei zwischen 1 und 3 K unter der Umgebungstemperatur.

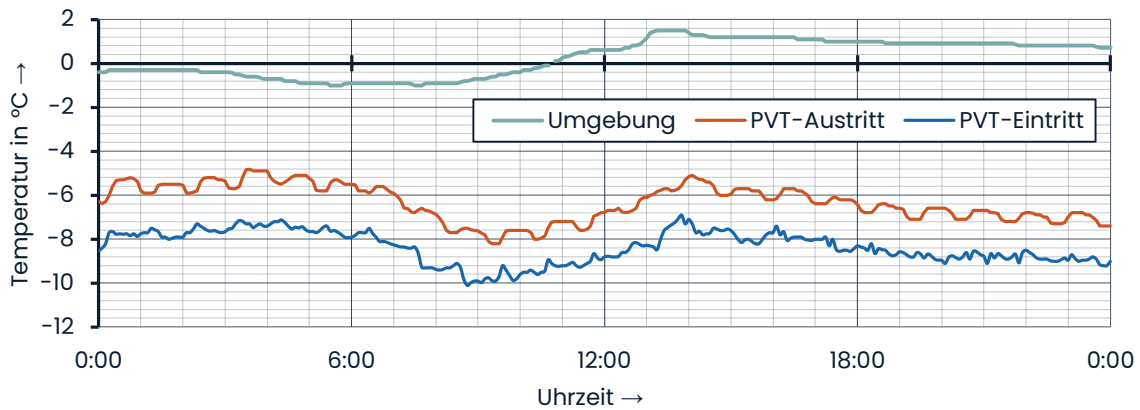


Abbildung 10: Wintertag ohne Sonnenschein (26.01.26 | Essen | Schrägdach | 2,8 m²/kW)

In Abbildung 10 werden die Temperaturverläufe an einer klein dimensionierten Anlage (2,8 m²/kW) dargestellt. Die modulierende Wärmepumpe läuft dabei bei Außentemperaturen um 0 °C im Dauerbetrieb. Die Quelltemperatur liegt zwischen -5 und -7 °C und damit etwa 4 bis 7 K unter Umgebungstemperatur. Bei der kleinen Dimensionierung ist dennoch ein stabiler und effizienter Anlagenbetrieb gewährleistet, da die gewählte Wärmepumpe Quelltemperaturen bis -25 °C erlaubt.

Winterbetrieb mit Schnee

In der Heizperiode ist insbesondere ein stabiler und effizienter Betrieb auch bei Schneefall und Vereisung wichtig. Eine Vereisung des rückseitigen Absorbers kann dann eintreten, wenn die Sole-Temperatur unter 0 °C und unter die Taupunkttemperatur der Umgebung sinkt. Liegt eine entsprechende Luftfeuchte vor, bildet sich Kondensat am Absorber, welches gefrieren kann. Insbesondere bei Schnee oder Schneeregen kann es bei Kollektor-Konstruktionen mit vergrößerter Oberfläche zur Bildung und Anhaftung eines Eispanzers kommen. Dieser muss zum weiteren Betrieb abgetaut werden, was nicht nur energetisch, sondern auch technisch aufwändig ist.

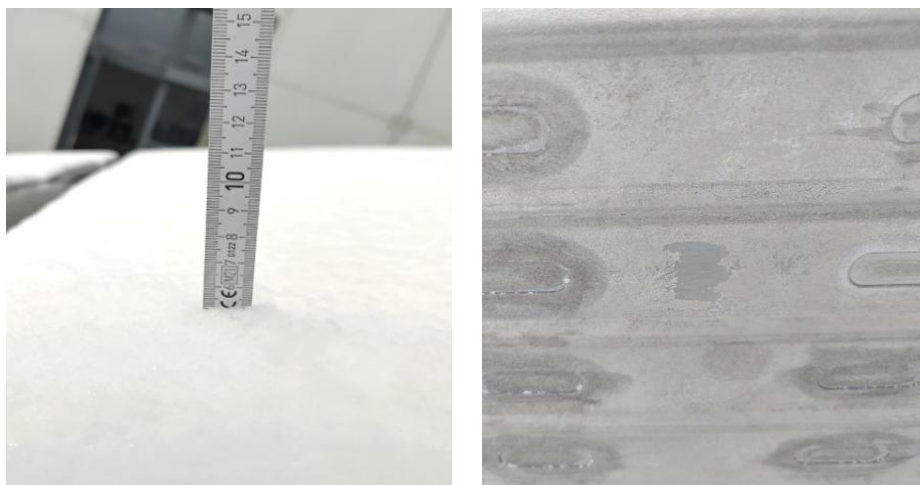


Abbildung 11: Eisschicht bei Schneedecke und durchgehendem Betrieb (03.01.25 | Ottendorf-Okrilla)

Bei flachen Absorbern wie beim Typ Sunmaxx PX-1 ergibt sich kaum Potential zur Bildung eines solchen Eispanzers. Die sich bildende Eisschicht ist nur wenige Zehntel Millimeter dick und hat kaum Einfluss auf den Wärmeübergang und den Betrieb der PVT-Anlage. Abbildung 11 zeigt diese Eisschicht, entstanden bei vollständiger Schneedecke (> 5 cm) und durchgehendem Wärmepumpen-Betrieb. Aufwändige Enteisungs-Vorgänge wie bei Luft-/Wasser-Wärmepumpen sind daher hier in der Regel nicht notwendig.

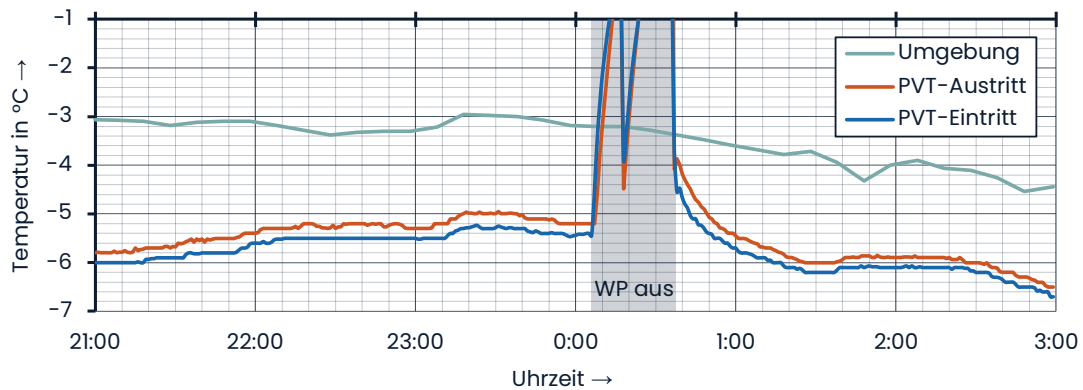


Abbildung 12: Schneebedeckte Nacht (13.-14.01.25 | Ottendorf-Okrilla | Freifläche | 4 m²/kW)

In Abbildung 12 ist ein nächtlicher Temperaturverlauf mit Schneedecke dargestellt. Es handelt sich um dieselbe Anlage wie in Abbildung 9. Die Schneedecke betrug in dieser Nacht mehrere cm auf den Modulen. Die Quelltemperatur liegt dabei 2 bis 3 K unter der Umgebungstemperatur und damit in einem ähnlichen Bereich wie ohne Schnee und Eis.

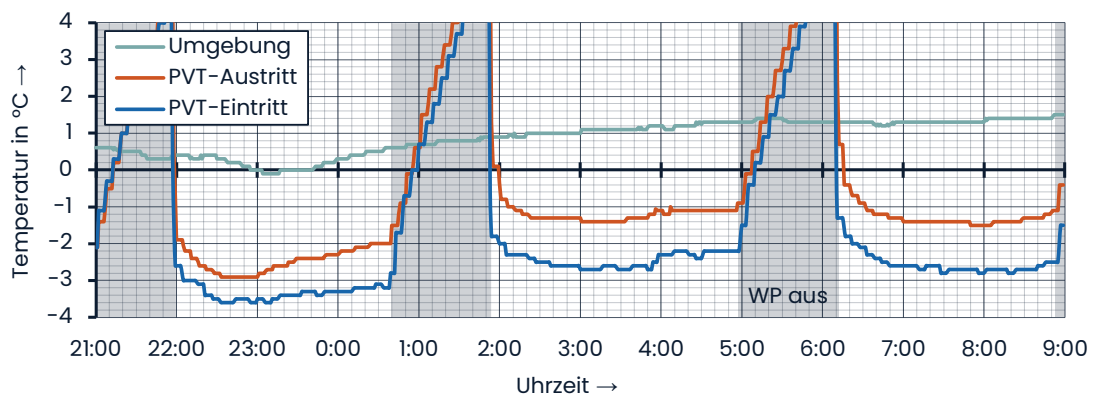


Abbildung 13: Verschneite Nacht (30.-31.01.26 | Regensburg | Schrägdach | 4,5 m²/kW)

Abbildung 13 zeigt eine verschneite Nacht an der Anlage aus Abbildung 7 und Abbildung 8. Die Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und PVT-Austritt beträgt dabei ebenfalls 2 bis 3 K und liegt somit in dem Bereich ohne Schneedecke. Der Betrieb als Wärmequelle für eine Wärmepumpe wird also weder durch eine Schneedecke auf den Modulen noch durch eine sich bildende minimale Eisschicht am rückseitigen Absorber beeinträchtigt.



Abbildung 14: Schneeabschmelzen (untere Module nicht angeschlossen | 14.02.25 | Ottendorf-Okrilla)

Eine Schneedecke kann jedoch insbesondere in schneereichen Gegenden den elektrischen Ertrag von PV-Anlagen signifikant reduzieren. Bei PVT-Modulen mit vollflächiger thermischer Anbindung des Wärmetauschers an das PV-Laminat lässt sich diese Schneedecke effizient abschmelzen (siehe Abbildung 14). Im Anschluss steht die Modulfläche wieder zur Stromerzeugung zur Verfügung – ein großer Vorteil, insbesondere in den Wintermonaten mit geringem erneuerbarem Stromangebot. Dazu wird, ähnlich wie im Kühlbetrieb, über die Sole Wärme auf das Modul gebracht. Dies kann durch eine hydraulische Umkehr oder bei Wärmepumpen mit Umkehrbetrieb durch eine Kältekreisumkehr erfolgen. Infolgedessen rutscht die Schneedecke ab oder schmilzt. Die technische und wirtschaftliche Machbarkeit wurde u. A. in der preisgekrönten Arbeit „Winterstrom maximieren mit schneefreien PVT-Modulen“ [14] bestätigt. Der elektrische Mehrertrag durch das Abschmelzen liegt demnach in schneereichen Regionen im Mittel bei 34 %, je nach Standort sogar bei bis zu 61 %. Der thermische Aufwand beträgt etwa 1,1 kWh/m² bei einer Schneedecke von 10 cm. Der elektrische Aufwand bei Nutzung einer Wärmepumpe im Umkehrbetrieb mit einer Arbeitszahl von 5,5 liegt hierfür bei nur etwa 0,2 kWh/m². Wird die zum Abschmelzen benötigte Quellenergie aus einem Pufferspeicher bezogen, muss diese entsprechend nach dem Abschmelzen wieder erzeugt und eingespeichert werden.

Auslegung und Systemeffizienz

Die bisher gezeigten Anlagendaten entstammen unterschiedlich ausgelegten PVT-Wärmepumpen-Systemen. Die Dimensionierung der PVT-Fläche variierte dabei zwischen 2,8 und 4,5 m²/kW Heizleistung der Wärmepumpe im Nennbetriebspunkt B0/W35. Der empfohlene grobe Richtwert beträgt ca. 4 m²/kW, wobei die optimale Dimensionierung immer projektspezifisch ist. Die Dimensionierung der PVT-Anlage stellt einen Freiheitsgrad in der Auslegung des Gesamtsystems dar [15]. Wie in Abbildung 3 gezeigt, ergibt sich die Quelltemperatur als Arbeitspunkt aus der Wärmepumpen- und der PVT-Kennlinie. Die thermische Leistung des PVT-Feldes skaliert dabei annähernd linear mit der PVT-Fläche. Dementsprechend ermöglicht

ein größeres PVT-Feld eine höhere Quelltemperatur und damit einen effizienteren Wärmepumpen-Betrieb. Da Wärmepumpen bei höheren Quelltemperaturen auch eine höhere Heizleistung zur Verfügung stellen, kann der Deckungsgrad der Wärmepumpe mit größerer PVT-Anlage ebenfalls steigen. Je nach erlaubter minimaler Verdampfer-Eintrittstemperatur der Wärmepumpe lassen sich zudem Sperrzeiten durch eine zu kalte Quelle bei richtiger Dimensionierung vermeiden. Somit können die Einsatzzeiten eines Zusatzwärmeerzeugers (beispielsweise eines Heizstabs) minimiert werden. Insgesamt erhöht eine größere Dimensionierung der PVT-Anlage somit die Systemeffizienz.

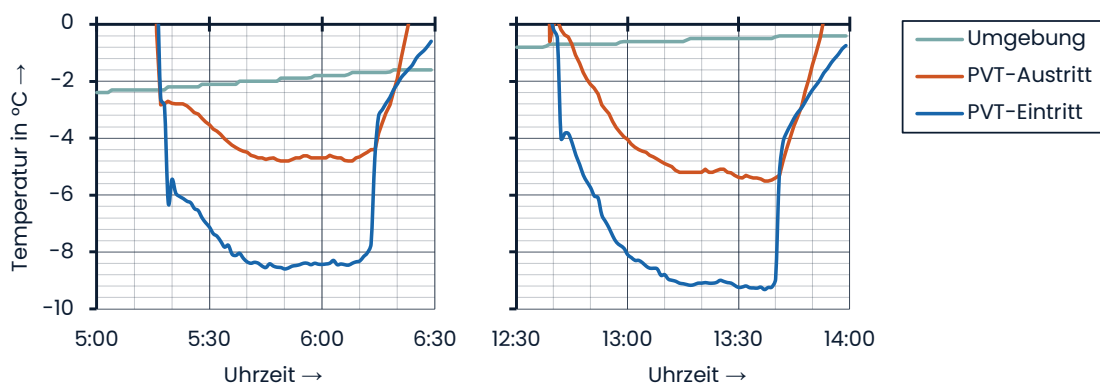


Abbildung 15: Variation der PVT-Dimensionierung (09.01.26 | Ottendorf-Okrilla | Freifläche).
Links: 4 m²/kW, Rechts: 2 m²/kW

Um die Auswirkungen der Dimensionierung sichtbar zu machen, wurde an einer Anlage im Betrieb das Modulfeld (an einem bewölkten Tag) zeitweise halbiert. Abbildung 15 zeigt die gemessenen Temperaturkurven. Am Morgen (5:20 Uhr bis 6:15 Uhr) lief die Anlage in der Standard-Dimensionierung von 4 m²/kW. Die Quelltemperatur lag dabei im stationären Betrieb 2 bis 3 K unter der Umgebungstemperatur. Nach der Umschaltung auf 2 m²/kW betrug diese Temperatur-Differenz dann 4 bis 5 K (12:40 Uhr bis 13:40 Uhr). Eine Halbierung der Modulfläche ergab also erwartungsgemäß etwa eine Verdopplung der Temperatur-Differenz zwischen Quelle und Umgebung.

Der Einfluss der Dimensionierung auf die Systemeffizienz wurde auch simulationsgestützt untersucht. Dazu wurden Simulationen in der Software Polysun mit variierender PVT-Feldgröße durchgeführt. Berechnet wurde ein Zweifamilienhaus (ZFH) in Dresden mit Fußbodenheizung (35/30 °C) und Warmwasserbedarf für 8 Personen (50 °C, tägliche thermische Desinfektion mit 60 °C). Abbildung 16 zeigt das zugehörige Polysun-Schema. Die Dimensionierung des PVT-Feldes wurde zwischen 2 und 6 m²/kW variiert, während alle anderen Parameter gleichblieben.

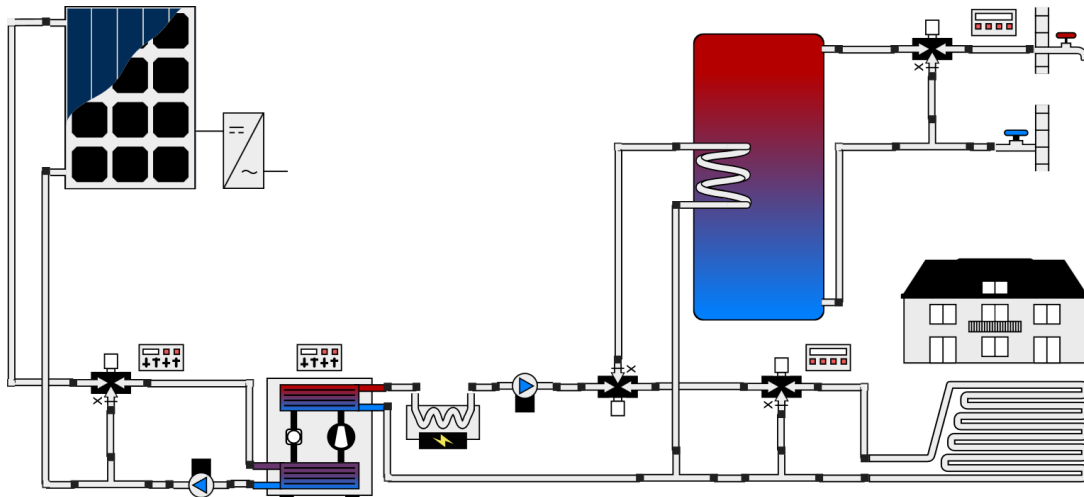


Abbildung 16: Polysun-Schema zur Berechnung der Systemeffizienz bei variierender Dimensionierung

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse dieser Simulation. In der Standard-Auslegung von $4 \text{ m}^2/\text{kW}$ wird eine Wärmepumpen-Jahresarbeitszahl von knapp 4,5 erreicht. Der Heizstabanteil beträgt lediglich 1 %. Er beschreibt den Anteil, den der Heizstab als Zusatzwärmeerzeuger an der gesamten erzeugten Wärme liefert. Die PVT-Anlage kann dabei teilweise auch die elektrische Antriebsenergie der Wärmepumpe direkt bereitstellen. Ohne Batteriespeicher liegt der Autarkiegrad bei 37 %. Wird nur der Strombezug aus dem Netz zur Wärmebereitstellung bilanziert, beträgt die System-Jahresarbeitszahl 6,8 (PV-SJAZ).

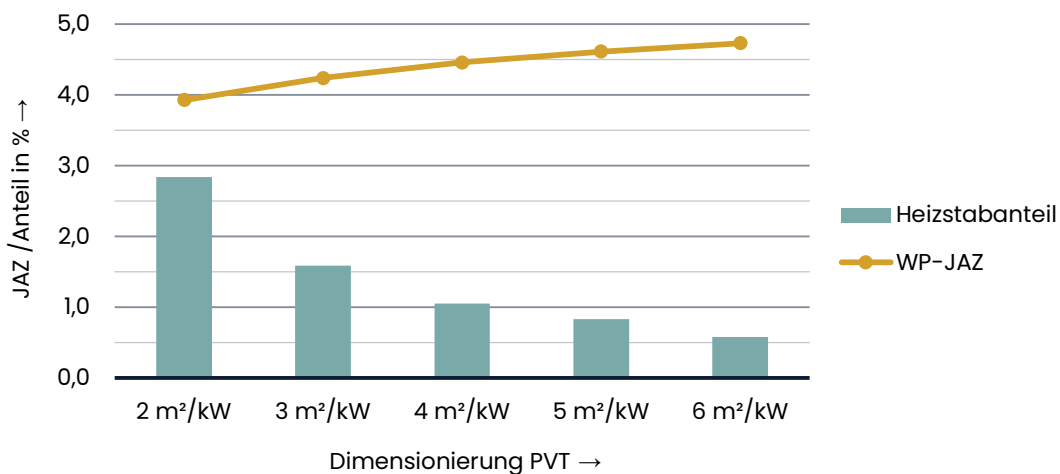


Abbildung 17: Simulationsergebnisse bei Variation der PVT-Dimensionierung (ZFH | Dresden)

Bei halbiertem PVT-Fläche ($2 \text{ m}^2/\text{kW}$) wird noch eine WP-Jahresarbeitszahl von knapp 4,0 erreicht. Der Heizstab-Anteil bleibt unter 3 %. Bei 50 % mehr PVT-Fläche ($6 \text{ m}^2/\text{kW}$) sinkt er auf 0,5 % und die WP-JAZ steigt leicht auf 4,75. Der empfohlene Richtwert von $4 \text{ m}^2/\text{kW}$ stellt somit einen guten Kompromiss zwischen Investitions- und Betriebskosten dar. Dieser kann je nach Standort, Gebäudezustand, Systemkomponenten, Komfortbedürfnis der Nutzenden und Wärmebedarf variiert werden. Hierbei sind jedes Gebäude und Bauvorhaben als Einzelprojekt zu betrachten und individuell zu beplanen. Grundsätzlich gilt: Eine größere PVT-Anlage erhöht die

Systemeffizienz. Der Minder-Strombezug durch eine ebenfalls größere Stromerzeugungskapazität ist hierbei noch nicht berücksichtigt.

Wie die Simulations- und Messdaten zeigen (siehe Abbildung 15 und Abbildung 17), ist jedoch auch ein Betrieb mit kleiner dimensionierter PVT-Anlage, selbst mit halbiertes Auslegung, möglich. Abbildung 18 zeigt monatlich gemessene Effizienzen (*Arbeitszahlen, AZ*) an einem Einfamilienhaus im kalten Winter 2025/26. Das Gebäude verfügt über eine Fußbodenheizung und einen Warmwasserbedarf mit 50 °C Vorlauftemperatur. Die Anlage zeigt einen stabilen und effizienten Betrieb, auch in den besonders kalten Monaten. In Essen lag die Umgebungsmitteltemperatur im Januar bei 2,5 °C, im Minimum sogar bei -7,5 °C. Dennoch wurde in diesem Monat eine Arbeitszahl von 3,9 erreicht. In der Übergangszeit liegen die Arbeitszahlen deutlich darüber. Im Oktober lag die Mitteltemperatur in Essen bei etwa 11 °C. Hier lag die Arbeitszahl bei 4,7.

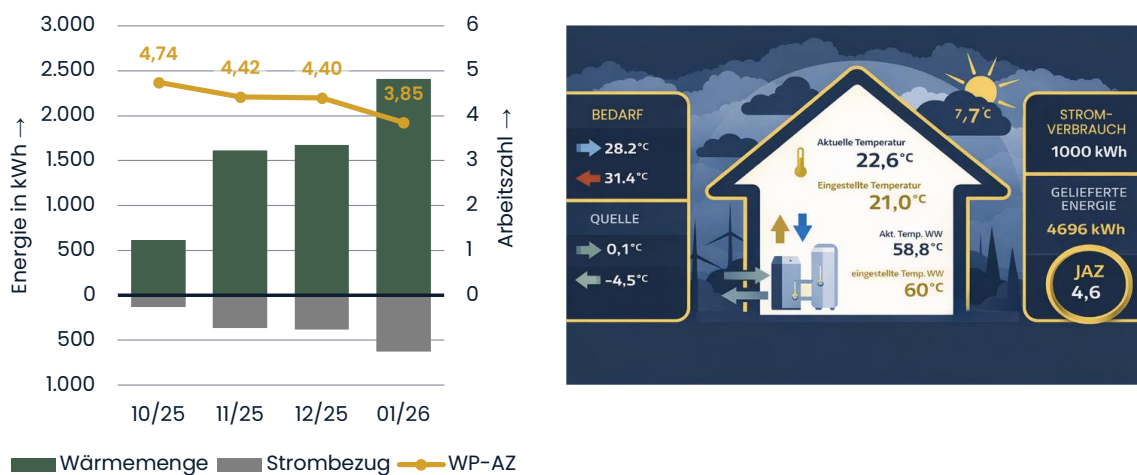


Abbildung 18: Effizienzen einer klein dimensionierten PVT-Anlage bei EFH mit FBH und Warmwasser. Essen | 2,8 m²/kW

Über das gesamte Jahr betrachtet, liegen die Arbeitszahlen deutlich höher, da in diesem Beispiel nur die ungünstigsten Monate der Heizsaison gezeigt wurden. Durch die Nutzung der solaren Einstrahlung über den vollflächigen Absorber profitieren solche Systeme besonders in den Übergangs- und Sommermonaten. Den bisherigen Daten entsprechend wird für die klein ausgelegte Anlage mit 2,8 m²/kW eine Jahresarbeitszahl nahe 5 erwartet. Eine größere Auslegung würde diesen Wert wie beschrieben noch deutlich verbessern (siehe auch Abbildung 17).

Die Simulationen in Abbildung 17 stützen sich auf durch Messungen bestimmte Leistungsparameter des Moduls Sunmaxx PX-1. Entsprechend der Kollektor-Norm ISO 9806 wurden diese durch das SPF Institut für Solartechnik bestimmt. Neben den Leistungsparametern wurden dabei auch Tests zur Beständigkeit des Moduls unter Extrembedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse haben dabei die Messungen des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE unabhängig bestätigt. Die Abweichungen der Leistungsparameter waren minimal (je nach Parameter unter 5 %) und beeinflussen den Betrieb des PVT-Moduls nicht signifikant.

Zusammenfassung

Die beispielhaft dargestellten Messdaten zeigen, dass bei Anlagen mit diesem Typ PVT-Kollektor ein ganzjährig effizienter Wärmepumpenbetrieb möglich ist. Insbesondere in sonnigen Stunden werden Quelltemperaturen deutlich über der Umgebungstemperatur (10 bis 15 K) erreicht, auch im Winter. Die PVT-Anlage stellt dann auch Antriebsenergie für die Wärmepumpe bereit [13]. Aber auch ohne solare Einstrahlung kann die PVT-Anlage als Quelle für eine Wärmepumpe dienen. Die Quelltemperaturen liegen dann je nach Auslegung und Umgebungsbedingungen etwa 2 bis 4 K unter der Umgebungstemperatur. Durch den besseren Wärmeübergang von Sole/Kältemittel im Vergleich zu Luft/Kältemittel können Sole-/Wasser-Wärmepumpen in diesen Betriebspunkten dabei ähnliche Effizienzen erreichen wie Luft-/Wasser-Wärmepumpen. In sonnigen Stunden liegen die Quelltemperaturen und damit die Effizienzen wesentlich höher, wodurch bessere Jahresarbeitszahlen erreicht werden [16]. Bei Kollektoren mit flachem Absorber entfallen zudem aufwändige Abtauvorgänge. Weiterhin laufen PVT-Wärmepumpenanlagen geräuscharm und eignen sich auch zur Klimatisierung und Kühlung von Gebäuden. Die für die PVT-Anlage genutzte Fläche dient damit neben der Wärmeversorgung auch der Kälte- und Stromversorgung.

Literatur

- [1] D. Sauter, M. Hunziker, M. Schubert, N. Sperr, M. Koch und J. Rohrer, „L-Sol: Heizungssystem mit PVT als Quelle für eine Wärmepumpe,“ Bundesamt für Energie BFE, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil, 2020.
- [2] S. Helmling, R. Langner und K. Geimer, „Operational analysis of 5 PVT heat pump systems based on field measurement data,“ in *Proceedings of EuroSun 2022 - ISES and IEA SHC International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry*, Kassel, 2022.
- [3] D. Zenhäusern, E. Bamberger und A. Baggenstos, „PVT Wrap-Up. Energiesysteme mit Photovoltaisch-Thermischen Solarkollektoren,“ EnergieSchweiz, Institut für Solartechnik SPF, Bern, 2017.
- [4] M. Schubert und D. Zenhäusern, „Performance Assessment of Example PVT-Systems,“ SPF Institute for Solar Technology, IEA SHC TASK 60 | PVT SYSTEMS, Rapperswil, 2020.
- [5] A. Baggenstos, S. Büttgenbach, T. Schmidt und D. Zenhäusern, „Einbindung von PVT-Kollektoren in erdsondengekoppelte Wärmepumpensysteme,“ Bundesamt für Energie BFE, 3S Solar Plus AG, SPF Institute for Solar Technology, Bern, 2020.
- [6] U. Lester, F. Rudolf und D. N. A. Tjeerd, „Erfolgskontrolle – ZeroEmission-LowExMehrfamilienhaus B35 Zürich,“ Bundesamt für Energie BFE, Hochschule Luzern Technik & Architektur, Luzern, 2014.
- [7] C. Binggeli, „Erfolgskontrolle zum Pilotprojekt 2SOL EFH Ersatzneubau, Plattenstrasse 11, Horgen,“ Kanton Zürich, AWEL.
- [8] M. Bättschmann, S. Büttgenbach, M. Caflisch und M. Willim, „Erkenntnisse über Erdwärmesonden-Regeneration am Beispiel Doppel-Mehrfamilienhaus Ländisch,“ Allianz 2SOL, Bern, 2021.
- [9] M. Bättschmann, I. Bosshard-Mojic, S. Cramer, A. Schmitt, N. Dimri und D. Zenhäusern, „Pilot- und Demonstrationsprojekt Sentmatt Emissionsfreie Wärmezeugung mit tiefer Erdwärmesonde, effizienter NiederhubWärmepumpe und optimierter Wärmeverteilung,“ Bundesamt für Energie BFE, Kanton Zürich AWEL, Allianz 2SOL, Halter Immobilien AG, SPF Institut für Solartechnik, Schlieren, 2022.
- [10] R. Eismann, C. Messmer, D. Zenhäusern, A. Bohren, F. Sidler und R. Gadola, „CoolShift+: Nächtliche Gebäudekühlung durch natürliche Konvektion und Strahlung mit zeitweiser Unterstützung durch Kältemaschine. Analyse geeigneter Systemkonfigurationen und Modellvalidierung,“ Bundesamt für Energie BFE, Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, Hochschule Luzern HSLU, Ostschweizer Fachhochschule OST, Bern, 2023.
- [11] S. Büttgenbach, *Nutzung der nächtlichen Abstrahlung zur Gebäudekühlung*, Stuttgart: HFT Stuttgart, 2010.

- [12] V. Delachaux und M. A. Jaafar, „Experimental Study on Heat Transfer from Ambient Air in Row-installed Photovoltaic-thermal (PVT) Solar Collectors on a Flat Roof,“ in *EuroSun 2024: 15th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry*, Limassol, 2024.
- [13] M. A. Jaafar und B. Chhugani, „Numerical Study of the Effect of the System Specifications on the Performance of a Brine/Water Heat Pump in Combination with Photovoltaic Thermal Solar Collectors,“ in *EuroSun 2024: 15th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry*, Limassol, 2024.
- [14] F. Maag und M. Willi, „Winterstrom maximieren mit schneefreien PVT-Modulen,“ zhaw Züricher Hochschule für angewandte Wissenschaften, Zürich, 2024.
- [15] K. Timilsina, B. Chhugani, H. Modi und P. Pärtsch, „Dimensioning Method for PVT Collectors as Heat Source of Heat Pumps for Residential Buildings,“ *International Sustainable Energy Conference - Proceedings*, 2024.
- [16] B. Chhugani, P. Pärtsch, S. Helmling und F. Giovannetti, „Comparison of PVT - heat pump systems with reference systems for the energy supply of a single-family house,“ *Solar Energy Advances*, 2023.