

Schlussbericht, 31. März 2017

PVT Wrap-Up

Energiesysteme mit Photovoltaisch- Thermischen Solarkollektoren



energieschweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Auftraggeber

EnergieSchweiz, 3003 Bern

Auftragnehmer

Institut für Solartechnik SPF
HSR Hochschule für Technik Rapperswil
8640 Rapperswil

Autoren

Dr. Daniel Zenhäusern
Evelyn Bamberger
Aleksis Baggenstos

daniel.zenhaeusern@spf.ch
evelyn.bamberger@spf.ch
aleksis.baggenstos@spf.ch

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung.....	5
Résumé.....	7
1 Einleitung.....	9
1.1 Motivation für PVT	9
1.2 Ausgangslage	11
1.3 Vorhaben	11
1.4 Vorgehen	11
1.5 Struktur des Berichts	12
2 PVT-Kollektoren.....	13
2.1 Marktübersicht.....	13
2.2 Kollektorbauarten	15
2.3 Prüfnormen und Produktzertifizierung	23
2.4 Leistung und Erträge	24
2.5 Förderung	33
3 Systemeinbindung von PVT-Kollektoren	34
3.1 Systeme mit flüssiggekühlten nicht-abgedeckten PVT-Kollektoren	34
3.2 Systeme mit flüssiggekühlten abgedeckten PVT-Kollektoren.....	39
3.3 Systeme mit Luftkollektoren	39
3.4 Werkzeuge zur Auslegung von PVT-Systemen	41
4 Fallstudien	42
4.1 Einfamilienhaus Wettswil am Albis	42
4.2 Wohnbaugenossenschaft Oberfeld, Ostermundigen.....	45
4.3 Reka-Feriendorf Blatten bei Naters.....	49
4.4 Areal Suurstoffi Rotkreuz	52
4.5 Sport- und Freizeitzentrum linth-arena sgu Näfels	55
4.6 Minergie-A MFH Überbauung Sotchà Scuol.....	58
4.7 Geschäfts- und Wohngebäude Uster	60
4.8 PVT-Testanlage SPF Rapperswil.....	62
4.9 Überbauung Sentmatt Obfelden	66
4.10 Weitere Beispielanlagen.....	67
5 Umfrageergebnisse	71
5.1 PVT im Einsatz	72
5.2 Firmen ohne PVT-Erfahrung.....	79

Literatur.....	81
Anhang.....	85
Marktübersicht PVT-Kollektoren.....	85

ZUSAMMENFASSUNG

Die Solarstrahlung, welche auf eine Photovoltaikzelle trifft, wird nur teilweise in elektrischen Strom umgewandelt, während ein grosser Anteil der einfallenden Solarenergie in Wärme umgewandelt wird. PhotoVoltaisch-Thermische (PVT) Solarkollektoren, manchmal auch „Hybridkollektoren“ genannt, ermöglichen die gezielte Abführung und damit die Nutzung dieser Wärme. PVT-Kollektoren erzeugen also Solarstrom und Solarwärme auf derselben Fläche und erreichen dadurch hohe flächenspezifische Solarerträge.

Es existieren verschiedene Bauarten von PVT-Kollektoren. Unterschieden wird insbesondere zwischen Kollektoren mit und ohne vorderseitiger transparenter Abdeckung zur Reduktion der Wärmeverluste (abgedeckt / nicht-abgedeckt). Weiter kann unterschieden werden zwischen Kollektoren, bei denen die Wärme mit einem flüssigen Wärmeträger abgeführt wird und solchen, bei denen Luft als Wärmeträger dient.

Die im Rahmen dieser Studie erstellte Marktübersicht ergab 53 Produkte, wovon der grosse Anteil (38) nicht-abgedeckte flüssiggekühlte PVT-Kollektoren sind. Die 5 Schweizer Hersteller produzieren ausschliesslich diese Art von PVT-Kollektoren. Abgedeckte Kollektoren sind aktuell am Markt wenig vertreten. Zunehmende Verbreitung finden nicht-abgedeckte Luft-PVT-Kollektoren.

In der Schweiz sind zurzeit rund 300 PVT-Anlagen in Betrieb, mit einer geschätzten Gesamtfläche von zirka 15'000 m², wobei in diesen Anlagen fast ausschliesslich nicht-abgedeckte flüssiggekühlte Kollektoren eingesetzt werden. Aktuell werden in der Schweiz pro Jahr etwa 3'000 m² PVT-Kollektorfläche installiert. Im Vergleich dazu werden jährlich ca. 100'000 m² rein thermische Solarkollektoren und ca. 2'200'000 m² photovoltaische Module installiert.

Anwendung finden PVT-Kollektoren zum einen in den bekannten Einsatzbereichen der Solarthermie wie Brauchwarmwasser(vor)erwärmung (~ 30 % der Anlagen in CH) und Brauchwarmwassererwärmung mit Heizungsunterstützung (~ 15 % der Anlagen in CH). Nicht-abgedeckte flüssiggekühlte PVT-Kollektoren werden jedoch speziell auch in Wärmepumpensystemen eingesetzt, wo deren Niedertemperaturwärme vorwiegend auf der Quellenseite der Wärmepumpe genutzt wird. Insbesondere zu erwähnen ist dabei der Einsatz zur Regeneration von Erdwärmesonden (EWS) (~ 30 % der Anlagen in CH).

Sieben grössere PVT-Anlagen mit Kollektorflächen zwischen 50 m² und rund 3500 m² entstanden als Teil von oder im Zusammenhang mit Leuchtturm- bzw. Pilot- und Demonstrationsprojekten (P&D), welche durch das Bundesamt für Energie gefördert wurden. Untersucht wird bei diesen Anlagen insbesondere der Einsatz der Kollektoren zur Erdsondenregeneration, zur Vorwärmung von Grundwasser in Kombination mit Wärmepumpen oder der Einsatz in Kombination mit einem Energienetz. Bei all diesen Projekten findet ein detailliertes Monitoring statt.

Die Grössenordnung der jährlichen Solarerträge nicht-abgedeckter PVT-Kollektoren (mit geringem Anstellwinkel ~ 10°) liegt im Schweizer Mittelland bei 160 kWh/(m²a) Stromertrag plus einem thermischen Ertrag von ~ 150 kWh/(m²a) (Brauchwarmwassererwärmung), ~ 250 kWh/(m²a) (Brauchwarmwasser-Vorwärmung) und 300-400 kWh/(m²a) (Erdsondenregeneration oder Vorwärmung von Grundwasser). Bei Systemen zur Brauchwarmwasser-Vorwärmung und Systemen zur Erdsondenregeneration kann aufgrund der Modulkühlung mit einem elektrischen Mehrertrag im Bereich von 5 % gegenüber reinen PV-Modulen gerechnet werden.

Von rund 600 angeschriebenen Solartechnik-Firmen haben gut 20 % an der Umfrage zum Thema PVT teilgenommen. Etwa 80 % davon haben bisher keine PVT-Anlagen realisiert, ca. 20 % waren bereits an der Realisierung einer oder mehrerer Anlagen beteiligt. Die meisten Firmen sind an PVT interessiert und der Technologie gegenüber grundsätzlich positiv eingestellt. Herausforderungen und Verbesserungspotenzial hinsichtlich einem vermehrten Einsatz von PVT sehen die Firmen insbesondere im Bereich der Wirtschaftlichkeit, beim Knowhow, bei der Bekanntheit von PVT sowie im Produktdesign.

Als Fazit werden folgende Punkte hervorgehoben:

- Ausgereifte Produkte im Bereich nicht-abgedeckter flüssiggekühlter PVT-Kollektoren sind vorhanden und können erfolgreich eingesetzt werden.
- Andere Kollektortypen wie abgedeckte PVT-Kollektoren oder Luft-PVT-Kollektoren sind noch wenig verbreitet und benötigen teilweise weitere technische Entwicklungen.
- Eine gut durchdachte Systemintegration und Steuerung ist insbesondere bei nicht-abgedeckten Kollektoren unabdingbar damit die Kollektoren bei niedrigen Temperaturen und damit effizient betrieben werden können.
- Knowhow zum Einsatz von PVT-Kollektoren existiert, müsste aber noch besser verbreitet werden.
- Die Realisierung von PVT-Anlagen erfordert die Zusammenarbeit verschiedener Gewerke (PV-Spezialisten, Solarthermie-Spezialisten, Dachdecker u.a.). Damit dies kein Hindernis bildet, sollten diese Kollaborationen gezielt gefördert werden.
- Gesetzliche Vorgaben für einen Mindestanteil an erneuerbaren Energien im Gebäudebereich bilden eine Chance für PVT.

RÉSUMÉ

Le rayonnement solaire reçu par une cellule photovoltaïque n'est que partiellement converti en électricité, le reste de l'énergie se transforme en chaleur. Les panneaux Photovoltaïques-Thermiques (PVT), appelés aussi « hybrides » ou « mixtes », permettent de capter cette chaleur en vue de son utilisation. Ces panneaux produisent à la fois du courant électrique solaire et de la chaleur solaire sur la même surface, ce qui permet des rendements au mètre carré élevés.

Il existe différents types de capteurs PVT. On distingue notamment les capteurs avec ou sans couverture transparente sur la face avant qui vise à réduire les pertes de chaleur (vitrés / non vitrés). De plus, une distinction est faite entre les systèmes utilisant un liquide et ceux utilisant l'air comme fluide caloporteur.

L'étude de marché effectuée dans le cadre de la présente étude a permis d'identifier 53 produits dont plus de la moitié (38) sont des capteurs PVT non vitrés refroidis par liquide. Les 5 fabricants suisses identifiés produisent exclusivement ce type de capteur. Les capteurs vitrés sont actuellement peu représentés sur le marché. Les capteurs PVT à air non vitrés ont en revanche le vent en poupe.

On compte à l'heure actuelle environ 300 installations PVT en exploitation en Suisse. Ces installations couvrent une surface globale de quelque 15 000 m², presque exclusivement avec des capteurs non vitrés refroidis par liquide. La superficie nouvellement installée chaque année avoisine les 3000 m² alors qu'elle est d'environ 100 000 m² pour les capteurs solaires purement thermiques et 2 200 000 m² pour les panneaux photovoltaïques.

Les capteurs PVT sont utilisés dans les principaux domaines d'application de l'énergie solaire thermique que sont le (pré)chauffage de l'eau sanitaire (environ 30% des installations suisses) et la production d'eau chaude sanitaire avec appoint de chauffage (environ 15 % des installations suisses). En outre, Les capteurs PVT non vitrés refroidis par liquide sont fréquemment utilisés dans les systèmes de pompes à chaleur, où la chaleur solaire à basse température est utilisée du côté source de la pompe à chaleur. En particulier, une forte proportion des installations concerne la régénération des sondes géothermiques (EWS) (environ 30 % des installations en Suisse).

Sept grandes installations PVT d'une surface de captage de 50 à 3500 m² environ ont été réalisées dans le cadre de projets phares ou de projet pilotes et de démonstration (P&D) soutenus par l'Office fédéral de l'énergie ou en relation avec ces projets. Ces installations ont notamment été examinées sous l'angle de l'utilisation des capteurs PVT pour la régénération de sondes géothermiques, le préchauffage des eaux souterraines en combinaison avec des pompes à chaleur ou l'utilisation en combinaison avec un réseau d'énergie. Tous ces projets ont fait l'objet d'un monitoring détaillé.

En Suisse, dans la région du Plateau, le rendement électrique annuel des capteurs PVT non vitrés (avec un faible angle d'inclinaison de 10°) est d'environ 160 kWh/(m²a) ; s'y ajoute un rendement thermique d'environ 150 kWh/(m²a) pour le chauffage de l'eau sanitaire, d'environ 250 kWh/(m²a) pour le préchauffage de l'eau sanitaire ou de 300 à 400 kWh/(m²a) pour la régénération de sondes géothermiques ou le préchauffage des eaux souterraines. Dans les systèmes de préchauffage de l'eau sanitaire et les systèmes de régénération des sondes géothermiques, on peut s'attendre à un rendement électrique supplémentaire de l'ordre de 5% par rapport aux modules purement photovoltaïques en raison du refroidissement du module.

Plus de 20% des quelques 600 entreprises de produits solaires sollicitées ont participé au sondage sur les capteurs PVT. Environ 80% d'entre elles n'avaient pas encore réalisé d'installation PVT alors

qu'environ 20% avaient déjà participé à la réalisation d'une ou de plusieurs installations. La plupart des entreprises s'intéressent aux capteurs PVT et sont en principe favorables à cette technologie. De leur point de vue, c'est notamment dans les domaines de la rentabilité, du savoir-faire, de la notoriété de cette technologie et du design du produit que résident les défis et le potentiel d'amélioration pour accroître le recours à ce type de capteurs.

La présente étude souligne notamment les points suivants :

- On trouve sur le marché des produits aboutis dans le domaine des capteurs PVT non vitrés refroidis par liquide qui peuvent être utilisés avec succès.
- Les autres types de capteurs tels que les capteurs PVT vitrés ou à air sont peu répandus sur le marché et nécessitent encore, pour certains d'entre eux, des améliorations techniques.
- Concernant les capteurs non vitrés, il est indispensable d'accorder une attention particulière à l'intégration et au pilotage du système afin que les capteurs puissent être exploités à basse température ou ils présentent des hauts rendements.
- Le savoir-faire concernant l'utilisation des capteurs PVT existe, mais il doit être mieux diffusé.
- La réalisation d'installations PVT nécessite la collaboration de divers corps de métier (spécialistes du photovoltaïque, spécialistes de l'énergie solaire thermique, couvreurs, etc.). Pour éviter que cette situation devienne un obstacle, il convient d'encourager la collaboration de manière ciblée.
- Les dispositions légales concernant la part minimale d'énergies renouvelables dans le domaine du bâtiment constituent un atout pour la technologie PVT.

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION FÜR PVT

Photovoltaisch-Thermische (PVT) Solarkollektoren kombinieren die photovoltaische und thermische Solarenergienutzung in einem Bauteil. Sie produzieren also gleichzeitig nutzbaren Solarstrom und nutzbare Solarwärme. Die Grundidee dieser kombinierten Solarenergienutzung kann anhand der optischen Eigenschaften einer typischen, aus kristallinem Silizium gefertigten, PV-Zelle erläutert werden (Abbildung 1).

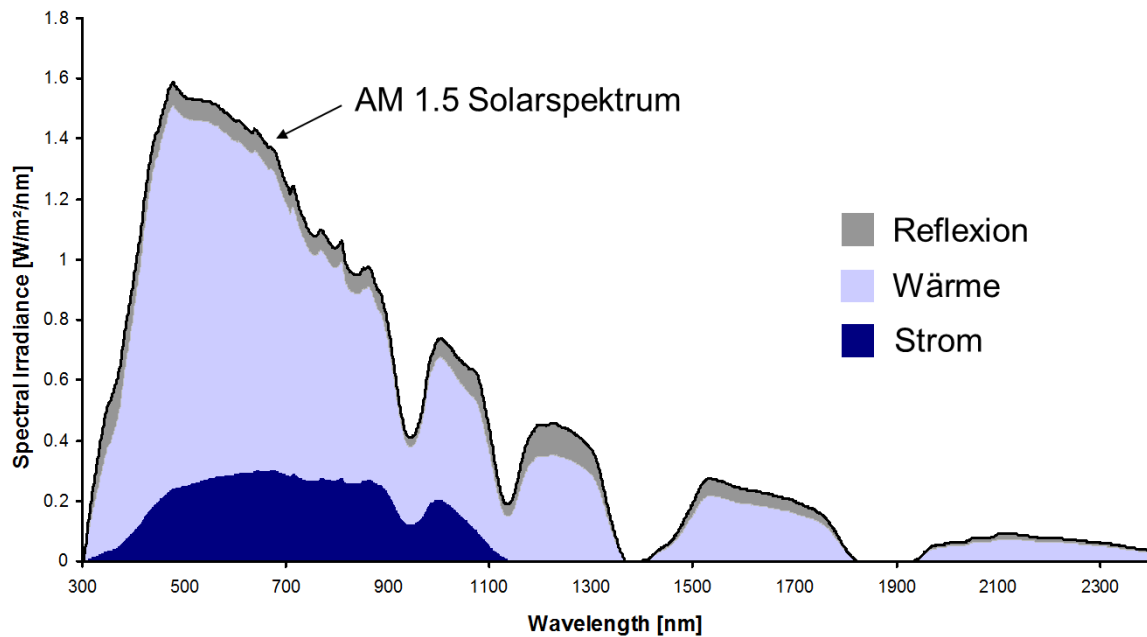


Abbildung 1: Spektrale Eigenschaften einer kristallinen Silizium-PV-Zelle (Quelle: P. Dupeyrat [1]).

Von der auf eine kristalline PV-Zelle eintreffenden solaren Einstrahlungsleistung werden rund 10 % zurückreflektiert und können nicht genutzt werden. Die insgesamt 90 % der Einstrahlungsleistung, welche von der Zelle absorbiert werden, teilen sich auf in rund 17 %, die in elektrische Leistung umgewandelt werden, und 73 %, die in thermische Leistung umgewandelt werden.¹ Diese thermische Leistung bleibt in einem PV-Modul ungenutzt. Sie erhöht die Temperatur der Zelle und hat damit sogar einen negativen Einfluss auf die elektrische Effizienz des Moduls. Konkret führt bei gängigen Silizium-Solarzellen eine Erhöhung der Zelltemperatur zu einer Abnahme der Leerlaufspannung und einer weniger starken Zunahme des Kurzschlussstroms (Abbildung 2). Insgesamt resultiert eine Abnahme der elektrischen Effizienz beim optimalen Betriebspunkt (Maximum Power Point, MPP). Die entsprechenden Temperaturkoeffizienten² von PV-Modulen liegen zwischen -0.37 %/°C und -0.52 %/°C für kristalline Siliziummodule und zwischen -0.25 %/°C und -0.29 %/°C für Hochleistungsmodule (HIT, SunPower) [2].

¹ Aktuell beträgt die durchschnittliche Effizienz von kommerziellen auf Silizium-Wafer basierenden Zellen 17 % [37]. Abbildung 1 gilt für eine Zelle mit 15 % Effizienz.

² Relative Abnahme (bzw. Zunahme) der elektrischen Leistung bei MPP-Betrieb und einer Einstrahlung von 1000 W/m² für eine Erhöhung (bzw. Absenkung) der Modultemperatur gegenüber 25 °C.

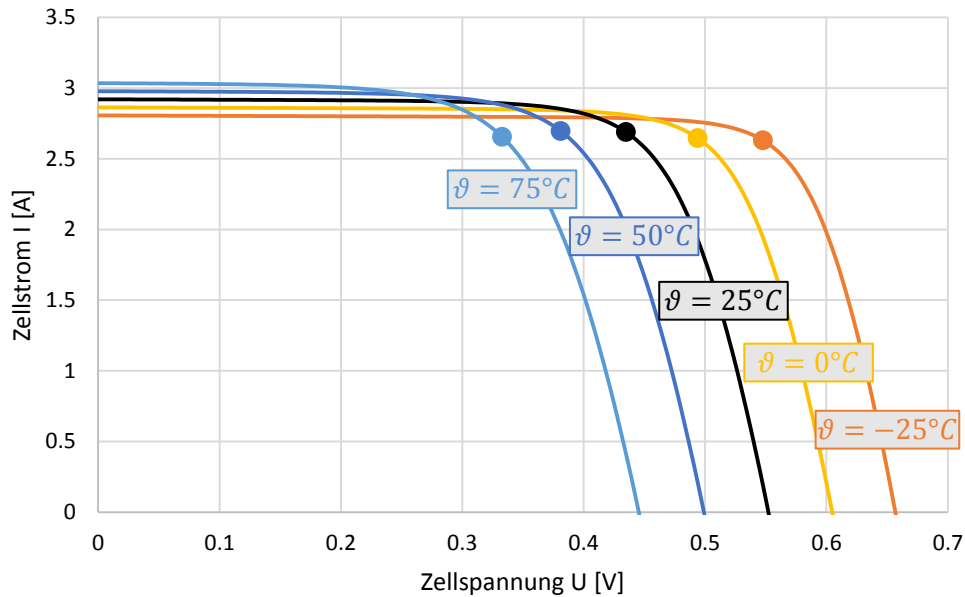


Abbildung 2: Kennlinien einer kristallinen Silizium-Solarzelle bei unterschiedlichen Zelltemperaturen und konstanter Einstrahlung von 1000 W/m^2 . Die Punkte markieren jeweils den Betriebspunkt mit der höchsten Leistung (MPP).

Die Grundidee von PVT-Kollektoren liegt nun darin, die in PV-Zellen entstehende Solarwärme nutzbar zu machen. Eine einfache Variante um dies zu realisieren ist das Anbringen eines fluiddurchströmten Wärmeabnehmerblechs auf der Rückseite eines PV-Moduls. Anstatt dass die Wärme an die Umgebung abgegeben wird, führt das Wärmeträgerfluid diese gezielt zu einer Wärmesenke. Auf diese Weise kann ein grösserer Teil der auf die Solarzelle eintreffenden Solarenergie genutzt werden, womit PVT-Kollektoren gegenüber reinen PV-Modulen höhere flächenspezifische Erträge erreichen können.

PVT-Kollektor

Motivation:

- In PV-Zelle generierte Wärme wird nutzbar gemacht.
- Abführung der Wärme erhöht elektrische Effizienz der PV-Zelle.

Nutzen:

- Erzeugung von Solarstrom und Solarwärme auf gleicher Fläche
- Hohe flächenspezifische Effizienz

Durch die Abführung der in der Zelle entstehenden Wärme wird gleichzeitig der elektrische Ertrag der PV-Zellen erhöht und damit ein Synergieeffekt erzielt. In der simplen Konfiguration eines nicht wärmedämmten PV-Moduls mit rückseitigem Wärmeabnehmer führt die Kühlung der PV-Zellen zu einer Erhöhung des Stromertrags gegenüber einem reinen PV-Modul.

1.2 AUSGANGSLAGE

Die angewandte Forschung beschäftigt sich seit rund 40 Jahren mit verschiedenen Konzepten von PVT-Kollektoren. Für umfangreiche Übersichten zum Thema und einen Zugang zur entsprechenden wissenschaftlichen Literatur sei auf die Artikel in Ref. [3] und Ref. [4] verwiesen.

Auch sind seit einiger Zeit PVT-Produkte am Markt erhältlich. Viele Hersteller haben sich mit dem Thema beschäftigt. Während regelmässig neue Produkte auf den Markt kommen, haben sich jedoch auch immer wieder Hersteller aus dem PVT-Bereich zurückgezogen. Frühere marktbezogene Übersichtsstudien und weiterführende Referenzen sind in Ref. [5], [6] und [7] zu finden.

In den letzten Jahren hat der PVT-Markt an Dynamik gewonnen. Wichtige Gründe hierfür sind sicherlich bei den stark abnehmenden Preisen und der zunehmenden Verbreitung der Photovoltaik zu suchen. So sind denn auch diejenigen PVT-Produkte, welche vom Aufbau her einer Erweiterung von Standard-PV-Modulen entsprechen, am Markt klar am stärksten vertreten. In der Schweiz haben PVT-Kollektoren speziell auch im Zusammenhang mit dem vermehrten Bedarf für Erdsreichregeneration bei auf Geothermie basierten Wärmepumpensystemen an Interesse gewonnen.

Gegenüber rein thermischen Solaranlagen und reinen PV-Anlagen ist im Bereich von PVT-Kollektoren noch wenig Erfahrung vorhanden, bzw. ist diese stark „verstreut“. Das Interesse von Bauherren, Planern und Installateuren am Einsatz dieser Technologie nimmt jedoch zu und damit auch die Nachfrage nach Knowhow und Erfahrungswerten bezüglich deren Einsatzmöglichkeiten und Leistung. Dies insbesondere, weil sich PVT-Anlagen doch in wesentlichen Punkten von reinen Thermie- oder PV-Anlagen unterscheiden.

1.3 VORHABEN

Aus der beschriebenen Ausgangslage entstand der Bedarf, ein aktuelles, übersichtliches Bild der PVT-Technologie zu vermitteln. Diese Studie konzentriert sich dabei auf drei Themenschwerpunkte:

1. PVT-Technologie: unterschiedliche Bauarten von PVT-Kollektoren, verschiedene System-einbindungen, Energieerträge für unterschiedliche Systemkonfigurationen
2. Marktübersicht: verfügbare Produkte, wichtigste Einsatzbereiche, aktuelle Grösse und Struktur des PVT-Marktes
3. Erfahrungen aus realisierten PVT-Projekten: sieben öffentlich unterstützte Pilot- und Demonstrationsprojekte, weitere realisierte Anlagen, Einschätzungen der involvierten Akteure (Hersteller, Fachplaner, Installateure).

Auf Fragen zur Wirtschaftlichkeit von PVT-Anlagen wird in dieser Studie nicht eingegangen. Im Weiteren legt die Studie im Zusammenhang mit Einsatzmöglichkeiten von PVT-Kollektoren und Erfahrungen mit PVT-Anlagen einen starken Fokus auf die Situation in der Schweiz.

1.4 VORGEHEN

Ausgehend von früheren Marktübersichten ([5] und [6]), wurde hauptsächlich durch Internet-recherchen eine aktualisierte Produktübersicht erstellt. Zusätzliche Informationen stammen vom Solar Energy Application Center (SEAC) in Eindhoven (NL), wo aktuell ebenfalls eine Marktstudie zu PVT-Kollektoren durchgeführt wird.

Zur Erfassung des Schweizer PVT-Sektors wurden gezielte Interviews sowie eine breit gestreute schriftliche Umfrage unter Herstellern, Planern, Installateuren und Systemanbietern aus der Solarbranche durchgeführt. Im Segment der Hersteller wurden auch Firmen aus den benachbarten Ländern befragt.

Informationen zu den verschiedenen Pilot- und Demonstrationsprojekten stammen hauptsächlich aus den entsprechenden Veröffentlichungen der Projektkonsortien sowie aus direkten Befragungen der involvierten Akteure. Teilweise wurden die Resultate durch eigene weiterführende Auswertungen ergänzt.

Allgemeine Informationen zur PVT-Technologie stammen aus einer Literaturrecherche sowie aus der Erfahrung der Autoren.

Zur Ermittlung typischer Wärme- und Stromerträge, sowie teilweise für die Extrapolation von Messdaten, wurden Simulationen mit der Software Polysun³ durchgeführt.

1.5 STRUKTUR DES BERICHTS

Kapitel 2 ist dem PVT-Kollektor gewidmet. Es werden die Resultate der Marktübersicht präsentiert (2.1) und die verschiedenen Bauarten beschrieben (2.2). In Abschnitt 2.3 wird die Situation betreffend Prüfnormen und Zertifizierung kurz erläutert. Abschnitt 2.4 behandelt Leistungskennzahlen für PVT-Kollektoren sowie Wärme- und Stromerträge, welche von unterschiedlichen Kollektortypen erwartet werden können. Abschnitt 2.5 enthält Informationen zur Förderung von PVT-Kollektoren.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit den verschiedenen Möglichkeiten, wie die unterschiedlichen PVT-Kollektortypen in Energiesysteme eingebunden werden können.

In Kapitel 4 werden die verschiedenen Pilot- und Demonstrationsprojekte sowie zwei weitere PVT-Anlagen einzeln vorgestellt und die wichtigsten Resultate und Betriebserfahrungen erläutert. Zudem werden weitere Beispiele von realisierten Anlagen gegeben.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Umfrage präsentiert.

Eine detaillierte Liste der in der Marktübersicht erfassten Produkte ist im Anhang zu finden.

³ Polysun Simulation Software, www.velasolaris.com

2 PVT-KOLLEKTOREN

2.1 MARKTÜBERSICHT

Im Vergleich zu den Märkten für Photovoltaik und Solarthermie ist der Markt für PVT-Kollektoren sehr klein. So wurden in der Schweiz in den Jahren 2015 und 2016 pro Jahr jeweils rund 3000 m² PVT-Kollektorfläche installiert.⁴ Demgegenüber stehen rund 100'000 m² jährlich installierte thermische Solarkollektoren und 2'200'000 m² Photovoltaik [8]. Basierend auf die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Recherchen kann die Anzahl installierter PVT-Anlagen in der Schweiz rund 300 geschätzt werden.

Relativ gering sind auch die Anzahl Hersteller für PVT-Kollektoren, sowie die Produktionsmenge je Hersteller. Eine Marktrecherche hat 53 Hersteller für PVT-Kollektoren aus 17 Ländern ergeben. Dabei gibt es keine marktdominierenden Hersteller und auch keinen dominierenden Markt. Die Marktrecherche wurde mit Schwerpunkt auf Schweiz und Europa durchgeführt und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es wird entsprechend weitere Hersteller, insbesondere kleinere und solche aus dem Bereich „Rest of the World“ (RoW) geben, die hier nicht aufgeführt sind. Von den Herstellern in der Marktübersicht kommen mit 10 Herstellern die meisten aus Deutschland, gefolgt von Italien mit 8 und Frankreich mit 5 Herstellern. Die Schweiz liegt mit 5 Herstellern mit an dritter Position. Diese fünf Hersteller sind Meyer Burger, Poly Solar Solutions, Caotec, Soltop und Max Roth M&M Energie. Zusammen mit zwei österreichischen Herstellern kommen damit etwa 60 % der Hersteller aus der Schweiz oder einem ihrer Nachbarländer (Abbildung 3).

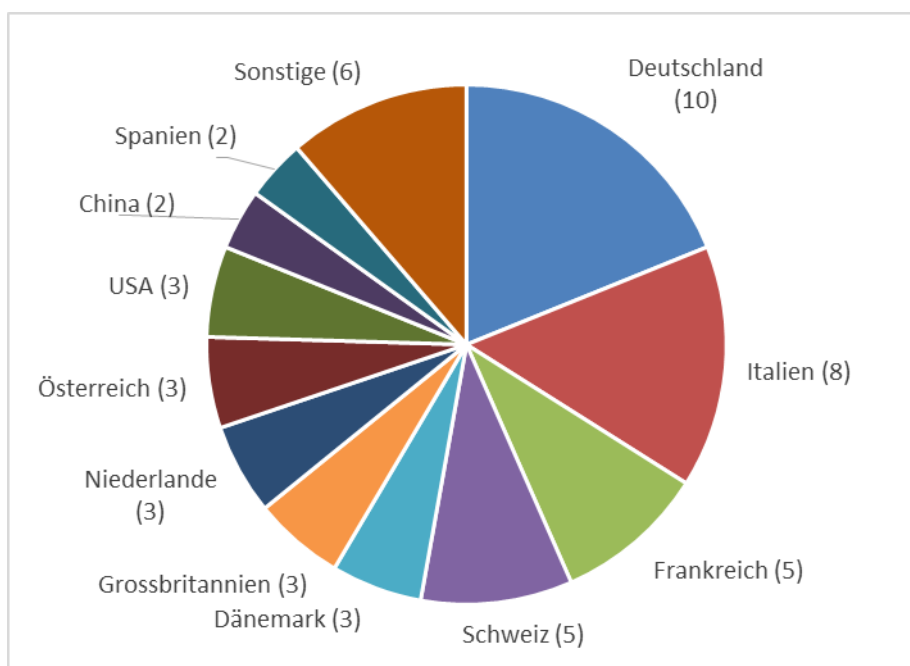


Abbildung 3: Marktaufteilung nach Herstellern pro Land

⁴ Schätzung basierend auf im Rahmen dieser Studie erhobenen Zahlen zu 2016, auf unveröffentlichten Zahlen, welche im Rahmen der „Markterhebung Sonnenenergie 2015“ [8] ermittelt wurden und auf provisorischen Zahlen der „Markterhebung Sonnenenergie 2016“.

Von diesen Herstellern hat etwa die Hälfte eine Zertifizierung nach Solar Keymark für mindestens einen Typ ihrer PVT-Kollektoren. Bei den restlichen Herstellern ist eine Solar Keymark Zertifizierung wesentlich unüblicher. Hier sind es nur drei von insgesamt 22. Die vollständige Marktübersicht ist im Anhang aufgeführt.⁵ Die Daten wurden den Datenblättern, dem Internetauftritt der Hersteller und, soweit vorhanden, den Solar Keymark Zertifikaten entnommen, sowie bei einigen Herstellern aufgrund telefonischer Auskunft eingefügt. Deutliche Unterschiede lassen sich im Professionalisierungsgrad der Hersteller erkennen. Praktisch alle Hersteller haben ein Datenblatt ihres Produktes, die Güte und Vollständigkeit der aufgeführten Daten ist aber sehr unterschiedlich. Viele Hersteller bieten auch reine thermische Solarkollektoren oder PV-Module an und haben PVT-Kollektoren als Ergänzung im Programm. Es gibt aber auch Unternehmen aus anderen Bereichen sowie Hersteller, die ausschliesslich PVT-Kollektoren herstellen. Die meisten Unternehmen haben neben den reinen Kollektoren auch weitere Systemkomponenten wie Montagesysteme, Warmwasserspeicher sowie Zubehör für die Systemintegration im Programm.

Gegenüber früheren Markterhebungen ([5] und [6]) sind Marktveränderungen zu erkennen. Teilweise haben Hersteller ihre PVT-Produkte eingestellt, wurden von anderen Herstellern übernommen oder sind insolvent. Auch neue Marktteilnehmer sind in den letzten Jahren dazugekommen. Insgesamt hat die Zahl der Hersteller leicht zugenommen. Grössere Marktverschiebungen oder Tendenzen bei den eingesetzten Technologien lassen sich nicht erkennen. Die Verteilung auf die verschiedenen Kollektortypen ist in etwa gleich geblieben.

Die verschiedenen Bauarten von PVT-Kollektoren werden in Abschnitt 2.2 genauer erläutert, und Produkte der jeweiligen Bauart werden aufgelistet. In Bezug auf die gesamte Marktübersicht kann hier bereits festgehalten werden, dass die überwiegende Mehrheit der in der Marktübersicht erfassten Hersteller Kollektoren für flüssige Wärmeträger anbietet. Nur 9 Hersteller nutzen Luft als Wärmeträger. In einem Fall können Wasser und Luft als Wärmeträger kombiniert werden, zusätzlich zu einem Wasserabsorber sind Luftkanäle vorhanden (Millennium, Israel). Von den flüssiggekühlten Kollektoren sind 38 ohne zusätzliche konvektionshindernde Abdeckung, dagegen sind es nur 6 mit Abdeckung. Nur ein Hersteller bietet sowohl einen abgedeckten als auch einen nicht-abgedeckten Kollektor an (Solimpeks, Türkei). Die Schweizer Hersteller bewegen sich ausschliesslich im Bereich der nicht-abgedeckten Kollektoren (Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht Hersteller von PVT-Kollektoren nach Land und Kollektortyp

	Anzahl Hersteller	Flüssiggekühlte nicht-abgedeckte Kollektoren, ohne Rückseiten-dämmung	Flüssiggekühlte nicht-abgedeckte Kollektoren, mit Rückseiten-dämmung	Flüssiggekühlte abgedeckte Kollektoren	Luftkollektoren
Schweiz	5	4	1	0	0
Nachbarländer	26	10	9	2	5
Restl. Europa	13	4	3	2	3
RoW	9	3	4	2	1
Summe	53	21	17	6	9

⁵ In der Liste im Anhang werden flüssiggekühlte Kollektoren als „Flachkollektoren“ aufgeführt.

2.2 KOLLEKTORBAUARTEN

Der Ansatz der kombinierten Erzeugung von Solarstrom und Solarwärme kann auf verschiedene Weisen umgesetzt werden. Zu den Unterscheidungsmerkmalen der verschiedenen Bauarten von PVT-Kollektoren gehören das eingesetzte Wärmeträgermedium, Massnahmen zur Reduktion von Wärmeverlusten an die Umgebung, sowie die Verbindung zwischen PV-Zellen und Wärmeabnehmer. Die in diesem Bericht betrachteten PVT-Kollektoren können in drei Kategorien eingeteilt werden, welche in den nachfolgenden Abschnitten genauer beschrieben werden:

- Typ 1: Flüssiggekühlte nicht-abgedeckte PVT-Flachkollektoren
- Typ 2: Flüssiggekühlte abgedeckte PVT-Flachkollektoren
- Typ 3: Luftgekühlte PVT-Flachkollektoren

Weitere Bauarten von PVT-Kollektoren werden in Abschnitt 2.2.4 kurz vorgestellt.

2.2.1 Typ 1: Flüssiggekühlte nicht-abgedeckte PVT-Flachkollektoren

2.2.1.1 Aufbau

Dies ist die gängigste Bauart von PVT-Kollektoren. Sie ist einerseits dadurch charakterisiert, dass ein flüssiges Wärmeträgerfluid eingesetzt wird. Zudem sind diese PVT-Kollektoren „nicht-abgedeckt“. Dies bedeutet, dass sie an der Vorderseite keine transparente oder transluzente Abdeckung besitzen, welche einen Luftspalt zwischen Zellen und Umgebung schaffen und damit die konvektiven Wärmeverluste reduzieren würde. Ein typischer Aufbau eines PVT-Kollektors dieser Bauart ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Aufbau des PV-Teils gleicht in der Regel dem eines PV-Moduls. PV-Zellen sind zwischen einem Frontglas und einer Rückseitenfolie einlaminiert. An der Rückseite des Moduls ist ein fluiddurchströmter Wärmeabnehmer (Absorber) aus Metall oder Kunststoff angebracht (z.B. geklebt). Für den Wärmeabnehmer kommen, wie bei solarthermischen Absorbern, verschiedene Ausführungen in Frage (z.B. Roll-Bond, Mäander, Harfe, extrudierte Stegdoppelplatte). Im Falle eines metallischen Wärmeabnehmers müssen die zwischen diesem und den PV-Zellen eingesetzten Materialschichten neben der thermischen Anbindung auch die Funktion der elektrischen Isolation erfüllen. Die Rückseite des PVT-Kollektors kann zusätzlich mit einer Wärmedämmung versehen sein.

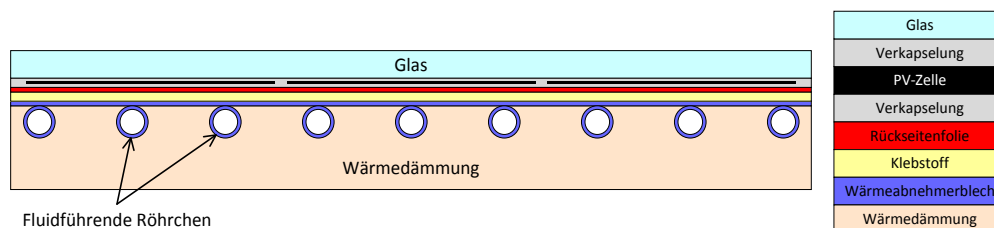


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines typischen flüssiggekühlten nicht-abgedeckten PVT-Flachkollektors

2.2.1.2 Vor- und Nachteile

Die Stagnationstemperaturen (maximal erreichbare Temperatur) von Kollektoren dieser Bauart liegen im Bereich der Temperaturen, welche in ungekühlten PV-Modulen erreicht werden. In der Regel liegen sie unter 90 °C (ohne Rückseitendämmung) bzw. unter 120 °C (mit Rückseitendämmung).⁶ Dies hat den Vorteil (gegenüber konventionellen solarthermischen Flachkollektoren bzw. PVT-Kollektoren des Typs 2), dass im Stagnationszustand keine Dampfbildung erfolgt und damit die Materialbeanspruchung im Kollektorkreis gering ist. Dies reduziert die Systemkomplexität und ermöglicht Kosteneinsparungen

⁶ Die effektiven Werte hängen vom gewählten Produkt, sowie von Standort und Einbausituation ab.

bei den hydraulischen Komponenten. So können beispielsweise für die Verrohrung kostengünstige Kunststoffe eingesetzt werden und Membranausgleichsgefässe kleiner dimensioniert werden.

Die geringe Abschirmung gegen Wärmeverluste führt gleichzeitig zum Nachteil, dass dieser Kollektortyp nur bei relativ niedrigen Temperaturen effizient Wärme liefern kann, womit der Einsatzbereich auf Niedertemperatur-Anwendungen beschränkt ist.

Dieser Kollektortyp ähnelt einem PV-Modul. Viele Produkte werden basierend auf einem Standard-PV-Modul gefertigt. Es kann also vom hohen Standardisierungsgrad der PV-Modulproduktion profitiert werden, wodurch relativ preisgünstige Produkte möglich sind.

2.2.1.3 Markt

Die meisten am Markt verfügbaren Produkte gehören diesem Kollektortyp an (38). Von den erfassten Produkten hat die Mehrzahl keine Rückseitendämmung (21), wobei zwei Modelle optional auch mit Rückseitendämmung angeboten werden (Tabelle 2 und Tabelle 3). In der Schweiz fabrizieren 5 Hersteller diese Art von PVT-Kollektoren.

Die Herstellung nicht-abgedeckter PVT-Kollektoren basiert fast immer auf einem Standard-PV-Modul mit Glas-Folien Aufbau, welches anschliessend um einen Absorber auf der Rückseite erweitert wird (Abbildung 5). Der Verbund erfolgt in der Regel durch Laminierung, Klebung oder Klemmung.

Einige Hersteller bieten optional oder ausschliesslich (jeweils 4 Hersteller) einen thermischen Absorber als Hybridaufsatz für PV-Module an.

Die erfassten Hersteller setzen fast ausschliesslich Solarzellen auf Basis kristallinen Siliziums ein, wobei monokristallines Silizium häufiger als polykristallines Silizium vorkommt. Einige Hersteller führen auch beides im Programm. Ausserdem bieten die meisten verschiedene elektrische Leistungsklassen an. Amorphes Silizium wird nur von einem Hersteller verwendet.

Als Absorbermaterialien kommen Aluminium, Kupfer, Edelstahl oder Kunststoffe (Polyurethan, Polypropylen) zum Einsatz. Die Absorberbauformen entsprechen denen von solarthermischen Kollektoren, d.h. es werden Rollbond-, Harfen-, Mäander- und vollflächig durchströmte Absorber verwendet. Bei einigen Produkten ist die Bauform nicht spezifiziert.

Die Kollektorbreiten reichen von 0.40 m bis 1.24 m, die Längen von 1.20 m bis 2.20 m. Dabei sind beispielsweise auch zwei Kollektoren berücksichtigt, die zur Dachintegration gedacht sind und von der Erscheinung her einem Dachziegel nahe kommen (Energyntegration, Italien, PA-ID, Deutschland, siehe Abbildung 6). Die meisten nicht-abgedeckten PVT-Kollektoren haben das Standardmass eines 60-zelligen PV-Moduls von ca. 1.00 m x 1.65 m. Die Tiefe liegt bei den meisten Systemen bei höchstens 50 mm und das Leergewicht variiert stark zwischen 9.5 kg und 40 kg.



Abbildung 5: Beispiele von flüssiggekühlten nicht-abgedeckten PVT-Kollektoren; links: PIK® Kombi-Solar-Kollektor von Poly Solar Solutions (Schweiz); rechts: Meyer Burger Hybrid (Schweiz). (Bilder: Poly Solar Solutions AG, Meyer Burger AG)



Abbildung 6: Nicht-abgedeckte Kollektoren als Dachziegel; links: Produkt MS 5 2Power der Firma PA-ID (Deutschland), (Bild: Bedachungshandel Tritschler AG); rechts: EY-Hybrid von Energyntegration (Italien), (Bild: Energyntegration S. r. l.)

Tabelle 2: Übersicht Hersteller flüssiggekühlter, nicht-abgedeckter PVT-Flachkollektoren ohne Rückseitendämmung

Hersteller	Land	Modell
Meyer Burger AG	Schweiz	Hybrid
Poly Solar Solutions AG	Schweiz	PIK® Kombi-Solar-Kollektor / PIK® thermischer Kollektor K1
CAOTEC	Schweiz	Hybrid Kollektor
Max Roth M&M Energie	Schweiz	
Building Energy	Belgien	HYBRIDE PV/T
Easy Solar ApS	Dänemark	Black Line 250 – 400 W BIPV Hybrid / alt. Aluminiumsabsorber-Hybrid
Solarzentrum Allgäu KG	Deutschland	WIOSUN Kombimodul PV-Therm monokristallin / polykristallin
VALVO GmbH	Deutschland	PVT 60P
GeoClimaDesign AG	Deutschland	Sunbag (Hybridaufsatz für PV-Module)
Splus2 GmbH	Deutschland	Splus2 (Hybridaufsatz für PV-Module)
POWER KOMBI MODULE GmbH	Deutschland	PKM 96M (BK)
Solaire2G/DualSun	Frankreich	DualSun Wave
Pegoraro Energia Srl	Italien	H-NRG
F.D.E. Solar S.r.l.	Italien	FDE-HYBRID
Triple Solar BV	Niederlande	Triple Solar hybrid panel
solator C.Bösch GmbH	Österreich	PVTHERMAU280 / 300, PVTHERMIN190EU / CN, Hybridaufsatz für PV-Module
KIOTO Photovoltaics GmbH	Österreich	PVT Hybrid 900Wp
Energetyka Solarna ENSOL Sp. z o.o.	Polen	E-PVT 2,0
Millennium Electric	Israel	MSS – MIL-PVT-340W-MO3 / 320W-MO2 / 190W-MO2 / 195W-MO3
ecoTec Energy AG, Inc.	USA	coolPv CPV288
TES Group Limited	China	TESZEUS PV-T

Tabelle 3: Übersicht Hersteller flüssiggekühlter, nicht-abgedeckter PVT-Flachkollektoren mit Rückseitendämmung

Hersteller	Land	Modell
SOLTOP Schuppisser AG	Schweiz	Soltop Alpha hybrid ID
PA-ID GmbH	Deutschland	2Power HM 1000 Mono Black / Nelskamp MS 5 2Power
res – regenerative energietechnik	Deutschland	res-PV++ / res-PV++ 300 / res-PV++ Projekt
Nieberle Solar	Deutschland	ISIEtherm WRS 200-ST48F / 250-ST60F / R 200 M / ISIEtherm (Hybridaufsatz)
Natural Technology Developments	Grossbritannien	Solar Angel DG-01
Minimise Generation	Grossbritannien	PowerHybrid 240
FOTOTHERM S.r.l.	Italien	Serie Cs / Serie AL
BRANDONI SOLARE S.p.a.	Italien	HYBRID SOLAR PANEL SBP-XXX
Energysntegration S.r.l.	Italien	EY-Hybrid
MAS srl	Italien	MAS roof Conditioned Photovoltaic
CGA Technologies Srl	Italien	inside Hybrid Solar Thermal (Hybridaufsatz für PV-Module)
SUNERG Solar s.r.l.	Italien	TESP-P60
SolarTech International B.V.	Niederlande	Energiedach®-Plus
Solimpeks Solar Energy Corp	Türkei	Volther PowerVolt
SunDrum Solar	USA	SDM 100 (Hybridaufsatz für PV-Module)
ChinaLand	China	CHN-72M(PVT)
Tractile Pty Ltd.	Australien	Eclipse Solar Tile - TR-EC-ST1001-PV76M

2.2.2 Typ 2: Flüssiggekühlte abgedeckte PVT-Flachkollektoren

2.2.2.1 Aufbau

Der Aufbau dieses PVT-Kollektortyps (Abbildung 7) entspricht vom Prinzip her dem eines solarthermischen Flachkollektors. Anstelle einer spektral selektiven Absorberbeschichtung treten die PV-Zellen. Der Verbund von PV-Zellen und Wärmeabnehmer ist ähnlich wie bei Typ 1). Ein „mechanischer“ Schutz der Zellen (z.B. auflaminierte Glasscheibe) ist hier nicht notwendig. Jedoch ist dieser Kollektortyp, wie ein thermischer Flachkollektor, mit einer zusätzlichen transparenten (oder transluzenten) Abdeckung versehen, welche die konvektiven Wärmeverluste an der Vorderseite des Kollektors reduziert. Durch die gute thermische Abschirmung des Absorbers gegenüber der Umgebung können mit diesem Kollektortyp höhere Temperaturen erreicht werden. Gleichzeitig sind die Stagnationstemperaturen deutlich höher und erreichen typischerweise Werte im Bereich von 150 °C.⁷ Dies hat eine erhöhte thermische Belastung der verwendeten Materialien im Falle der Stagnation zur Folge. Aus diesem Grund kann als PV-Teil nicht ohne weiteres ein Standard PV-Modul verwendet werden. Das dort typischerweise als Verkapselungsmaterial eingesetzte EVA würde bei den erwähnten Temperaturen sehr rasch degradieren. Weiter müssen auch verwendete Klebstoffe eine entsprechend hohe Temperaturbeständigkeit aufweisen. Die Alternative zur Verwendung von Materialien mit hoher Temperaturbeständigkeit sind Stagnationsschutzmassnahmen, welche jedoch die Komplexität des Kollektors bzw. des Systems erhöhen.

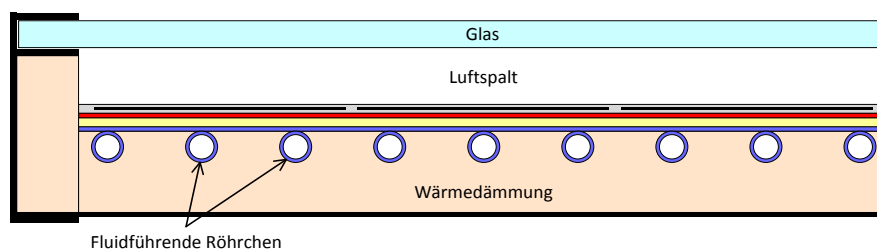


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines typischen flüssiggekühlten abgedeckten PVT-Flachkollektors

⁷ Die Stagnationstemperaturen liegen jedoch tiefer als bei rein thermischen Flachkollektoren, da die PV-Zellen gegenüber einem spektral selektiven Absorber grössere Wärmestrahlungsverluste aufweisen.

Neben dem beschriebenen Aufbau existiert der Ansatz, die PV-Zellen auf die Unterseite der Glasabdeckung zu laminieren und einen beschichteten Absorber, wie bei einem solarthermischen Kollektor, einzusetzen. In diesem Fall besteht eine sehr geringe thermische Kopplung zwischen PV-Zellen und Absorber. Die in den PV-Zellen generierte Wärme trägt nur in geringem Masse zur Nutzwärmeleistung bei und die Zellen werden nicht gekühlt. Nutzwärme wird bei diesem Konzept im Wesentlichen aus der zwischen den Zellen durchdringenden, auf den Absorber treffenden Solarstrahlung generiert. Dabei sind die Zellabstände, bzw. nicht von Zellen belegten Flächen in der Regel grösser als im Fall von PV-Modulen.

2.2.2.2 Vor- und Nachteile

Dieser Kollektortyp kann gegenüber Typ 1 Nutzwärme auf höherem Temperaturniveau liefern. Damit hat er einen grösseren Anwendungsbereich und kann ähnlich wie ein solarthermischer Flachkollektor eingesetzt werden.

Das Produkt ist jedoch komplexer und die Anforderungen an die verwendeten Materialien sind höher. So kann bei der Herstellung weniger vom hohen Standardisierungsgrad des PV-Sektors profitiert werden, womit die wirtschaftliche Kompetitivität von Produkten tendenziell schwieriger zu erreichen ist.

2.2.2.3 Markt

In der Schweiz gibt es keine Hersteller für abgedeckte PVT-Kollektoren und auch in den Nachbarländern nur einen Hersteller aus Deutschland (Hörmann, siehe auch Abbildung 8 und Tabelle 4) sowie einen aus Österreich (3F Solar Technologies). Von den sechs erfassten Herstellern für abgedeckte PVT-Kollektoren hat mit Solimpeks nur einer eine Zertifizierung nach Solar Keymark für sein PVT-Produkt.

Es gibt sowohl Produkte bei denen die PV-Zellen auf dem Absorber angebracht sind, als auch Produkte bei denen die PV-Zellen auf der Unterseite der Glasabdeckung befestigt sind.

Auch hier kommen mono- oder polykristalline Siliziumzellen zum Einsatz. Als Absorbermaterialien werden Aluminium oder Kupfer verwendet. Ein Hersteller setzt einen Harfen- einer einen Vollflächenabsorber ein, bei den anderen ist die Bauart nicht weiter spezifiziert.

Abgedeckte Kollektoren werden im Schnitt etwas grösser gebaut als nicht-abgedeckte. Die Grösse liegt in einem Bereich von 0.72 m bis 1.66 m Breite und 1.38 m bis 2.46 m Länge. Aufgrund der Bauart sind sie tiefer, zwischen 85 und 111 mm und das Leergewicht liegt tendenziell höher, zwischen 17 kg und 95 kg.

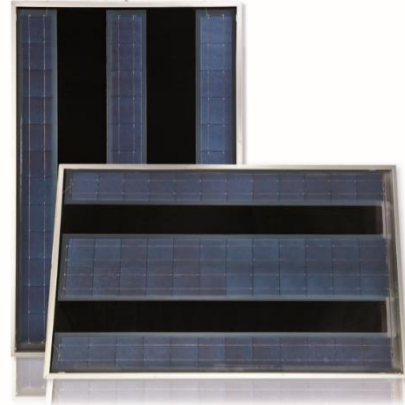


Abbildung 8: Beispiele von flüssiggekühlten abgedeckten PVT-Kollektoren: links Volther PowerTherm von Solimpeks (Türkei), rechts Solarhybrid von Hörmann (Deutschland) bei diesem Produkt ist nur ein Teil der Kollektorfläche mit PV-Zellen bedeckt. (Bilder: Solimpeks Solar Energy Corp. und Hörmann-Barkas Metallbau GmbH)

Tabelle 4: Übersicht Hersteller flüssiggekühlter, abgedeckter Flachkollektoren

Hersteller	Land	Modell
Hörmann-Barkas Metallbau GmbH	Deutschland	PT-U 250/145 / PT-U 250/193
3F Solar Technologies GmbH	Österreich	Solar One Hybridkollektor
SELA SOLAR, S.L.	Spanien	SELA SOLAR M-240PVT
EndeF Engineering S.L.	Spanien	Ecomesh
Solimpeks Solar Energy Corp	Türkei	Volther PowerTherm
Power Panel Inc.	USA	PVT1

2.2.3 Typ 3: Luftgekühlte PVT-Flachkollektoren

2.2.3.1 Aufbau und Markt

Bei diesem Kollektortyp wird anstelle eines flüssigen Wärmeträgers Luft verwendet. Ähnlich wie bei flüssiggekühlten PVT-Kollektoren können prinzipiell abgedeckte und nicht-abgedeckte Varianten realisiert werden, analog zu rein solarthermischen Luftkollektoren.

Weiter muss unterschieden werden zwischen Kollektoren bzw. Systemen, welche Aussenluft ansaugen und erwärmen und solchen, die Luft als zirkulierendes Wärmeträgermedium verwenden.

Die Markterhebung hat in diesem Segment neun Hersteller ergeben (siehe Tabelle 5), wovon fünf ein Solar Keymark Zertifikat für ihren PVT-Luftkollektor besitzen. Die Produkte werden nachfolgend einzeln beschrieben.

Alle Produkte basieren auf dem Ansatz, Standard-PV-Module einzusetzen und einen Teil der in den PV-Zellen entstehenden Wärme durch Kühlung der Modulrückseite nutzbar zu machen. Keines der Produkte verfügt über eine zusätzliche Abdeckung an der Vorderseite zur Reduktion der Wärmeverluste. Somit sind diese PVT-Kollektoren, ähnlich wie nicht-abgedeckte Kollektoren mit flüssigem Wärmeträger, für Niedertemperatur-Anwendungen geeignet und erreichen Stagnationstemperaturen, welche nicht wesentlich über den maximalen Betriebstemperaturen von ungekühlten PV-Modulen liegen.

Die Firma Base (F) bietet Luft-PVT-Kollektoren an, die als fertiges Bauteil installiert werden (Abbildung 9). Mit diesem Produkt können prinzipiell sowohl offene Systeme (Frischluftherwärmung) als auch geschlossene Systeme (Luft als zirkulierendes Wärmeträgerfluid) realisiert werden.

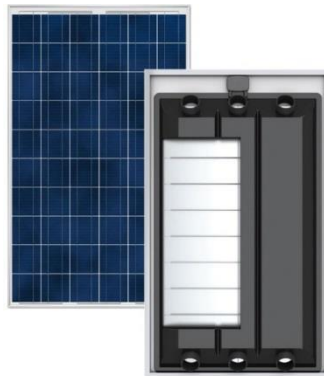


Abbildung 9: Luftgekühlter PVT-Flachkollektor als fertiges Bauteil: Produkt Cogen'air der Firma Base (Bild: BASE/Sellande)

Bei den Produkten R-Volt der Firma Systovi (F) und GSE Air'System der Groupe Solution Energie (Abbildung 10) erfolgt die Kombination der Luftführung und des PV-Modules erst bei der Montage auf dem Dach. Eine Kunststoffhalbschale dient als Unterkonstruktion für ein PV-Modul. Die Luft, welche die Wärme abführt, strömt zwischen der Modulrückseite und der Kunststoffhalbschale.



Abbildung 10: Luft PVT-Systeme R-Volt der Firma Systovi (links) und GSE Air'System der Firma Groupe Solution Energie. (Bilder: Systovi und Groupe Solution Energie)

Die Firma IRFTS (F) bietet unter dem Namen Easy Roof Boost'R als Erweiterung zu ihrem PV-Indach-Montagesystem Easy Roof eine Lösung an für die aktive gleichmässige Hinterlüftung der Module und Sammlung der auf diese Weise erwärmten Abluft.

Die kanadische Firma Conserval Engineering Inc. bietet mit SolarWall (für Fassade) und SolarDuct (für Flachdach) zwei solarthermische Luftkollektorsysteme für die Erwärmung von Frischluft an (Abbildung 11). Die der Sonne exponierte Seite ist ein perforiertes schwarzes Trapezblech. Beide Systeme können als Unterkonstruktion für PV-Module verwendet werden und somit als PVT-Systeme ausgeführt werden.



Abbildung 11: Luft-PVT-Systeme „SolarDuct PV/T®“ (links) und „SolarWall PV/T®“ (rechts) der Firma Conserval Engineering (Bilder: Conserval Engineering)

Die Systeme von Systovi, Groupe Solution Energie, IRFTS und Conserval Engineering Inc. sind alles offene Systeme. Sie werden für die Erwärmung von einströmender Frischluft eingesetzt.

Neben den beschriebenen Luft-PVT-Systemen existieren solarthermische Luftkollektoren, bei denen lediglich ein kleiner Teil der Kollektorfläche mit PV-Zellen belegt ist, deren elektrische Leistung dem Betrieb des Ventilators dient (siehe Abbildung 12). Diese Kollektoren bieten den Vorteil eines komplett autonomen Betriebs und werden oft zur Belüftung und teilweisen Beheizung von Ferienhäusern eingesetzt. Im Unterschied zu den anderen Produkten, liefern sie neben dem Ventilatorantrieb keine nutzbare elektrische Leistung und sind somit keine „PVT-Kollektoren“ im eigentlichen Sinne. Sie wurden deshalb in dieser Studie nicht vertieft betrachtet.



Abbildung 12: Solar-Luft-Kollektor Twinsolar von GRAMMER Solar mit PVT-Zellen für den Ventilatorantrieb. (Bild: GRAMMER Solar)

2.2.3.2 Vor- und Nachteile

Der Einsatz von Luft als Wärmeträgermedium hat gewisse Vorteile. Insbesondere gibt es im Stagnationsfall, anders als bei flüssigkeitsbasierten Systemen, keine Dampfbildung und hohen Systemdrücke. Ebenso besteht keine Frostgefahr. Die Anforderungen an die eingesetzten Materialien und die Systemkomplexität sind demnach geringer. Es fallen zudem keine Kosten für das Wärmeträgerfluid an. In Systemen wo die erwärmte Luft direkt für Heizzwecke eingesetzt wird, ist gegebenenfalls auch kein zusätzlicher Wärmetauscher nötig, wodurch sowohl Kosten gespart werden, als auch die Kollektoreffizienz (dank tieferen Betriebstemperaturen) erhöht wird.

Es sind also technisch einfache und damit kostengünstige Lösungen für die kombinierte Solarwärme- und Solarstromproduktion möglich.

Der wesentliche Nachteil liegt in der geringen Wärmekapazität der Luft. Bezogen auf das Volumen ist diese um einen Faktor 3400 kleiner als bei Wasser. Dies hat zur Folge, dass deutlich höhere Volumenströme und damit Leitungsquerschnitte als beim Einsatz eines flüssigen Wärmeträgers nötig sind.

Tabelle 5: Übersicht Hersteller luftgekühlter PVT-Flachkollektoren

Hersteller	Land	Modell
Scanheat A/S	Dänemark	Scansun XL 250 / XL 400 / XL 400 LD / XL 900
Solar Venti A/S	Dänemark	Standard SV3 / SV7 / SV14 / SV14K / SV20 / SV20K / SV30 / SV30K
Grammer Solar GmbH	Deutschland	TWINSOLAR compact 2.0 / 4.0 / 4.5 / 6.0
Systovi	Frankreich	R-VOLT
GROUPE SOLUTION ENERGIE	Frankreich	GSE AIR'SYSTEM
BASE / SELLANDE	Frankreich	Cogen'Air
IRFTS	Frankreich	EASY ROOF Boost'R
SCX Solar B.V.	Niederlande	SCX Soleroof® Home Edition
Conserval Engineering Inc.	Kanada	SolarWall PV/T / SolarDuct PV/T

2.2.4 Konzentrierende PVT-Systeme und neue Entwicklungen

Neben den beschriebenen PVT-Flachkollektoren existieren auch konzentrierende PVT-Systeme. Bei diesen werden (hocheffizienz-)PV-Zellen auf den Receiver eines konzentrierenden Systems, wie beispielsweise Parabolrinnen oder Heliostaten, verbaut (Abbildung 13).⁸ Dies erfordert eine ein- oder zweiachsige Nachführung nach dem Sonnenstand. Konzentrierende Systeme liefern Wärme auf hohem Temperaturniveau, welche beispielsweise für industrielle Prozesse genutzt werden kann. Diese Systeme werden, auch aufgrund der höheren Systemkomplexität, in der Regel nicht für die Energieversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern eingesetzt. Ausserdem nutzen sie nur die direkte Solarstrahlung, weshalb sie eher in einstrahlungsreichen, südlichen Regionen Verwendung finden.

Einige Produkte befinden sich in der Entwicklung oder liegen als Prototyp vor, wie etwa ein abgedeckter Kollektor von SolVar systems (Armenien). Einen bisher nicht vorhandenen Ansatz verfolgt die britische Firma Naked Energy. Das Startup verbaut PV-Zellen auf dem Wärmetauscher (Absorber) im Inneren von Vakuumröhrenkollektoren. Ebenfalls einen Röhrenkollektor verwendet die Firma Photonomi (UK) mit ihrem Produkt Hone 501 Thermal/Electric. Hinter den Röhren wird ein Dünnschicht-PV-Modul verlegt. Damit wird zwar Strom und Wärme in einem Produkt erzeugt, die beiden Technologien sind aber nicht direkt verbunden.



Abbildung 13: Konzentrierendes PVT-System Z10 CHP der Firma Suncore (links) und PVT-Vakuumröhrenkollektor „virtu“ der Firma Naked Energy. (Bilder: Suncore US und Naked Energy)

2.3 PRÜFNORMEN UND PRODUKTZERTIFIZIERUNG

Die Beurteilung und der Vergleich von Qualität und Leistungsfähigkeit unterschiedlicher PVT-Produkte erfordert deren Prüfung unter klar und einheitlich definierten Bedingungen. PVT-Kollektoren gelten immer noch als PV-Module und müssen demnach alle dafür geltenden Sicherheitsanforderungen erfüllen. Zusätzlich können sie als thermische Kollektoren geprüft und nach Solar Keymark zertifiziert werden. Eine Prüfnorm für PVT-Kollektoren, welche PVT-spezifische Aspekte wie etwa die

⁸ Konzentrierende Photovoltaik-Anlagen (CPV) erfordern immer eine aktive Kühlung der Zellen. Es handelt sich dann also um konzentrierende PVT-Systeme.

unterschiedliche thermische Belastung oder die gegenseitige Beeinflussung der thermischen und elektrischen Leistung mit einbeziehen müsste, ist aktuell nicht vorhanden. Dies erschwert die Beurteilung der Qualität der Produkte und kann damit auch ein Hemmnis für deren Verbreitung darstellen. Gewisse Bestrebungen zur Erstellung einer solchen Norm sind jedoch im Gang (siehe dazu Projekt PVT-Norm [9] und Referenzen darin). Bereits heute sind für die Zertifizierung nach Solar Keymark (einem international anerkannten Qualitätslabel für solarthermische Kollektoren) gewisse spezifische Regeln für das Vorgehen im Fall von PVT-Kollektoren definiert.

2.4 LEISTUNG UND ERTRÄGE

2.4.1 Leistungskennwerte für PVT-Kollektoren

2.4.1.1 Elektrische Leistungskennwerte

Die meisten PVT-Kollektoren, respektive die dafür verwendeten PV-Module, sind nach IEC 61215 für kristalline Silizium-PV-Module und der Sicherheitsqualifikation IEC 61730 zertifiziert. Damit ist auch die Angabe der elektrischen Leistung genormt. Sie wird in W_p (Watt-peak) bei den sogenannten Standard-Test Bedingungen (STC - Standard Test Conditions) angegeben. Die Angabe entspricht der elektrischen Leistung des Kollektors bei 1000 Watt solarer Einstrahlung, 25 °C Kollektortemperatur und Betrieb am optimalen elektrischen Betriebspunkt (Maximum Power Point - MPP). Im Weiteren wird von den Herstellern in der Regel der Temperaturkoeffizient, d.h. die Temperaturabhängigkeit der Leistung beim MPP und STC angegeben.

2.4.1.2 Thermische Leistungskennwerte

Die Angaben zur thermischen Leistung von PVT-Kollektoren sind weniger einheitlich. Viele Hersteller geben Werte zur thermischen Leistung ihrer Produkte, jedoch sind die Bedingungen, für welche diese Werte gelten, oftmals ungenügend spezifiziert. Eine gute Vergleichbarkeit ist bei Produkten gegeben, deren Leistung gemäss der Norm ISO 9806 (bzw. dem Vorgängerdokument EN 12975-2) für thermische Solarkollektoren geprüft wurde. Dies gilt insbesondere für alle Produkte mit Solar Keymark Zertifizierung.

Nach ISO 9806 wird die thermische Leistung je nach Kollektortyp und je nach gewähltem Prüfverfahren durch ein unterschiedliches Kennlinienmodell (Set von Kennwerten) angegeben (Tabelle 6 und Tabelle 7).

Tabelle 6: Thermische Leistungskennwerte für die verschiedenen thermischen Kennlinienmodelle.

Kennlinienmodell	PVT-Kollektortyp	Prüfverfahren	Kennwert	Einheit	Beschreibung
1	Nicht-abgedeckt (flüssiggekühlt oder luftgekühlt mit geschlossenem Luftkreislauf)	Stationär	η_0	-	Optischer (maximaler) thermischer Wirkungsgrad
			b_u	s/m	Windabhängigkeit des optischen Wirkungsgrades
			b_1	W/(m ² K)	Wärmeverlustkoeffizient
			b_2	Ws/(m ³ K)	Windabhängigkeit des Wärmeverlustkoeffizienten
2	Abgedeckt (flüssiggekühlt oder luftgekühlt mit geschlossenem Luftkreislauf)	Stationär	η_0	-	Optischer (maximaler) thermischer Wirkungsgrad
			a_1	W/(m ² K)	Linearer Wärmeverlustkoeffizient
			a_2	W/(m ² K ²)	Quadratischer Wärmeverlustkoeffizient
3	Alle Kollektoren mit geschlossenem Kreislauf	Quasi-dynamisch	$\eta_{0,b}$	-	Optischer (maximaler) thermischer Wirkungsgrad bezogen auf die Direktstrahlung
			c_1	W/(m ² K)	Linearer Wärmeverlustkoeffizient
			c_2	W/(m ² K ²)	Quadratischer Wärmeverlustkoeffizient
			c_3	Ws/(m ³ K)	Windabhängigkeit des Wärmeverlustkoeffizienten
			c_4	-	Einfluss langwelliger Strahlungsaustauschs
			c_5	Ws/(m ² K)	Effektive Wärmekapazität des Kollektors
			c_6	s/m	Windabhängigkeit des optischen Wirkungsgrades
			$K_b(\theta_L, \theta_T)$	-	Einfallswinkel-Korrekturfaktor (IAM) für direkte Strahlung
			K_d	-	Einfallswinkel-Korrekturfaktor (IAM) für diffuse Strahlung
4	Luftkollektor (nicht-abgedeckt) mit Aussenluftansaugung (Kennwerte werden jeweils für mehrere Volumenströme angegeben)	Stationär	η_0	-	Optischer (maximaler) thermischer Wirkungsgrad
			b_u	s/m	Windabhängigkeit des optischen Wirkungsgrades

Die thermische Leistung eines PVT-Kollektors \dot{Q} hängt stark von den Betriebs- und Umgebungsbedingungen ab. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind (je nach Kollektortyp) die solare Einstrahlung pro Kollektorfläche G , die langwellige Einstrahlung pro Kollektorfläche E_L , die Windgeschwindigkeit über dem Kollektorfeld u , die Umgebungstemperatur ϑ_a und die mittlere Fluidtemperatur im Kollektor ϑ_m .

Die Modellierung der Kollektorleistung erfolgt anhand der nachfolgenden Kennlinienmodelle. Dabei steht A für die angenommene Bezugsfläche, in der Regel die Bruttofläche des Kollektors.

Tabelle 7: Verschiedene mathematische Kennlinienmodelle zur Beschreibung der thermischen Kollektorleistung.

Kennlinienmodell 1	$\frac{\dot{Q}}{A} = G'' \cdot \eta_0 \cdot (1 - b_u \cdot u) - (b_1 + b_2 \cdot u) \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a),$
Kennlinienmodell 2	$\frac{\dot{Q}}{A} = G \cdot \eta_0 - a_1 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) - a_2 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a)^2$
Kennlinienmodell 3	$\begin{aligned} \frac{\dot{Q}}{A} = & \eta_{0,b} \cdot K_{\theta,b}(\theta_L, \theta_T) \cdot G_b + \eta_{0,b} \cdot K_{\theta,d} \cdot G_d - c_6 \cdot u \cdot G \\ & - c_1 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) - c_2 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - c_3 \cdot u \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) + c_4 \\ & \cdot (E_L - \sigma \cdot T_a^4) - c_5 \cdot \frac{d\vartheta_m}{dt} \end{aligned}$
Kennlinienmodell 4	$\frac{\dot{Q}}{A} = G'' \cdot (\eta_0 - b_u \cdot u)$

Bei den Kennlinienmodellen 1 und 4 (nicht-abgedeckte Kollektoren, Prüfmethode mit stationären Bedingungen) wird anstelle der solaren Einstrahlung G die Nettobestrahlungsstärke G'' verwendet. Diese beinhaltet einen Zusatzterm für den Wärmestrahlungsaustausch zwischen Kollektor und Umgebung. Sie ist definiert durch $G'' = G + \frac{\varepsilon}{\alpha} \cdot (E_L - \sigma \cdot T_a^4)$, mit der langwelligen Emissivität ε , der solaren Absorption α , der Stefan-Boltzmann Konstante σ und der Umgebungstemperatur in Kelvin T_a . In der Regel liegen für ε und α keine Herstellerangaben vor und es wird der Wert $\frac{\varepsilon}{\alpha} = 0.85$ eingesetzt. E_L steht für die auf den Kollektor eintreffende Wärmestrahlung. Der Term $(E_L - \sigma \cdot T_a^4)$ ist in der Regel negativ. Bei klarem Himmel und einer Umgebungstemperatur von 20 °C liegt sein Wert typischerweise im Bereich von - 100 W/m². Derselbe Term ist im Kennlinienmodell 3 enthalten.

Die Parameter für das Kennlinienmodell 2 werden gemäss Norm bei einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s bestimmt. Bei diesem Kollektortyp ist η_0 kaum windabhängig.

Beim Kennlinienmodell 3 wird zwischen direkter Solarstrahlung G_b und diffuser Solarstrahlung G_d unterschieden.

Das Produkt $A \cdot G'' \cdot \eta_0$ (bei den Modellen 1 und 4) bzw. $A \cdot G \cdot \eta_0$ (bei Modell 2) wird für $G = 1000 \text{ W/m}^2$ auch als thermische Peakleistung bezeichnet.

Gemäss den Regeln von Solar Keymark werden die thermischen Kennwerte bei elektrischer Stromabnahme im MPP-Betrieb ermittelt. Diese Regel wurde jedoch erst Ende 2015 festgelegt. Wenn Kennwerte vorliegen, welche ohne Stromabnahme ermittelt wurden, so kann die thermische Leistung für den Fall mit Stromabnahme näherungsweise ebenfalls mit den obigen Formeln modelliert werden,

indem G durch $G - P_{el}^{DC} / ((\tau\alpha) \cdot A)$ ersetzt wird, wo P_{el}^{DC} für die DC-seitige elektrische Leistung des Kollektors steht und $(\tau\alpha)$ für das Transmissions-Absorptions-Produkt des Kollektors.⁹

Als Basis für die leistungsabhängige Bemessung der Förderbeiträge im harmonisierten Fördermodell der Kantone 2015 (siehe Abschnitt 2.5) wurde mit der „Thermischen Kollektor-Nennleistung“ (TKN) eine zusätzliche Kenngrösse eingeführt. Diese ist definiert als

$$TKN = \frac{\dot{Q}(\Delta T = 10K) + \dot{Q}(\Delta T = 30K) + \dot{Q}(\Delta T = 50K) + \dot{Q}(\Delta T = 70K)}{4} \cdot \sqrt{K_{\theta}^L(50^{\circ}) \cdot K_{\theta}^T(50^{\circ})} \cdot 0.9,$$

wo \dot{Q} jeweils bei einer Einstrahlung von $G = 1000 \text{ W/m}^2$, respektive $G'' = 863 \text{ W/m}^2$, und mit $\Delta T = \vartheta_m - \vartheta_a$ berechnet wird. $K_{\theta}^L(50^{\circ})$ bzw. $K_{\theta}^T(50^{\circ})$ sind die Winkelkorrekturfaktoren in longitudinaler und transversaler Richtung. Weiterführende Informationen sind in Ref. [10] zu finden.

2.4.2 Thermische Leistung unterschiedlicher PVT-Kollektortypen

2.4.2.1 Flüssiggekühlte PVT-Kollektoren

Die thermische Leistung flüssiggekühlter PVT-Flachkollektoren unterschiedlicher Bauarten, bei einer solaren Einstrahlung von 1000 W/m^2 , wird in Abbildung 14 dargestellt. Die Leistungen gelten für den Betrieb bei gleichzeitiger Stromabnahme am MPP. Die entsprechenden thermischen Kennwertewerte sind in Tabelle 8 aufgelistet. Die Werte für den nicht-abgedeckten Kollektor ohne Dämmung sind repräsentativ für gute am Markt verfügbare Produkte. Diejenigen für die nicht-abgedeckte Variante mit Rückseitendämmung wurden mit Hilfe eines Modells berechnet und gelten für ein baugleiches Produkt, welches zusätzlich an der Rückseite wärmedämmt ist. Die thermischen Kennwerte für den abgedeckten PVT-Kollektor sind typisch für am Markt verfügbare Produkte.

Tabelle 8: Typische thermische Kennwerte für flüssiggekühlte PVT-Kollektoren

Kollektortyp	Kennlinienmodell	Typische Kennwerte
Nicht-abgedeckt ungedämmt	1	$\eta_0 = 0.58, b_u = 0.05 \text{ s/m}, b_1 = 12.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}, b_2 = 1.5 \text{ Ws/(m}^3\text{K)},$
Nicht-abgedeckt Rückseite gedämmt	1	$\eta_0 = 0.60, b_u = 0.05 \text{ s/m}, b_1 = 9 \text{ W/(m}^2\text{K)}, b_2 = 1.5 \text{ Ws/(m}^3\text{K)}$
Abgedeckt	2	$\eta_0 = 0.50, a_1 = 5 \text{ W/(m}^2\text{K)}, a_2 = 0.02 \text{ W/(m}^2\text{K}^2)$

Wie bei rein thermischen Solarkollektoren hat der Wind bei nicht-abgedeckten Varianten grossen Einfluss auf die thermischen Verluste und damit die thermische Leistung, während die Windabhängigkeit bei abgedeckten Varianten nur sehr gering ist.

Die Kennwerte der verschiedenen am Markt erhältlichen Produkte sind teilweise sehr unterschiedlich. So muss die Hierarchie zwischen Kollektoren verschiedener Bauart nicht zwingendermassen derjenigen von Abbildung 14 entsprechen. Bei nicht-abgedeckten PVT-Kollektoren kann beispielweise ein Modell ohne Rückseitendämmung eines Herstellers bessere Kennwerte aufweisen als ein Modell mit Rückseitendämmung eines anderen Herstellers. In diesem Zusammenhang muss auch erwähnt

⁹ Typische Werte sind $(\tau\alpha)=0.9$ für nicht-abgedeckte und $(\tau\alpha) = 0.85$ für abgedeckte Kollektoren.

werden, dass in einer realen Anlage die Wärmeverluste der Kollektoren stark von der Einbausituation abhängen. Eine stark eingeschränkte Hinterlüftung etwa kann bei ungedämmten Kollektoren wie eine Rückseitendämmung wirken.

Die Anzahl verfügbarer Produkte im Bereich der abgedeckten PVT-Flachkollektoren ist aktuell sehr klein und die Produkte sind sehr heterogen. Bei diesem Kollektortyp scheint auch noch ein relativ grosses Potenzial für technische Weiterentwicklung und Erhöhung der Leistungsfähigkeit zu bestehen. So wurden beispielsweise im Forschungsprojekt PVTMax Prototypen gebaut, deren Kennwerte diejenigen der aktuell verfügbaren Produkte deutlich übertreffen [11].

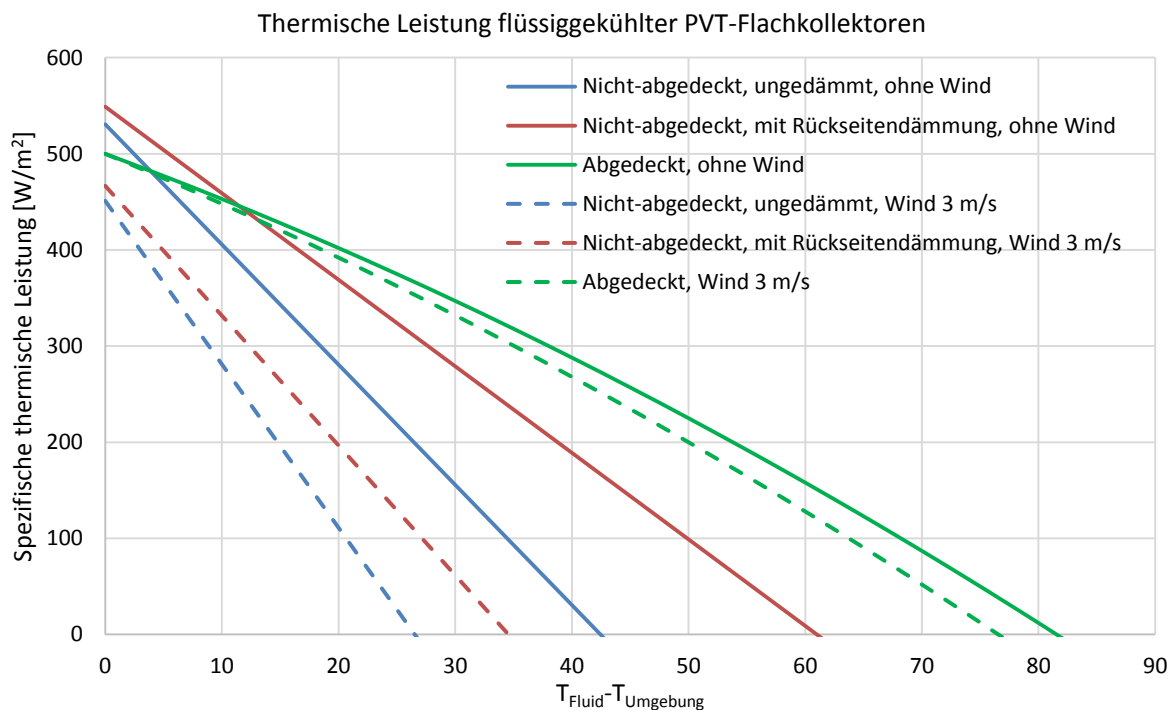


Abbildung 14: Thermische Leistung typischer flüssiggekühlter PVT-Flachkollektoren im MPP-Betrieb, bezogen auf die Bruttokollektorfläche, bei solarer Einstrahlung von $G=1000 \text{ W/m}^2$, $(E_L - \sigma \cdot T_a^4) = -100 \text{ W/m}^2$, $\varepsilon/\alpha = 0.85$ und somit $G'' = 915 \text{ W/m}^2$. Beim abgedeckten Kollektor ohne Wind wurde, basierend auf Erfahrungswerten, α_1 um 10 % reduziert.

2.4.2.2 Luftkollektoren

Bei den meisten verfügbaren Luft-PVT-Kollektoren handelt es sich um offene Kollektoren. Diese Kollektoren saugen Aussenluft an, womit die Eintrittstemperatur der Luft immer der Umgebungstemperatur entspricht. Aus diesem Grund können nicht wie bei geschlossenen Kollektoren Kennlinien in Funktion von $T_{\text{Fluid}} - T_{\text{Umgebung}}$ angegeben werden. Da die thermische Effizienz dieses Kollektortyps relativ stark vom Luftmassenstrom abhängt, wird die thermische Leistung in der Regel als Funktion des spezifischen Massenstroms dargestellt (Abbildung 15).

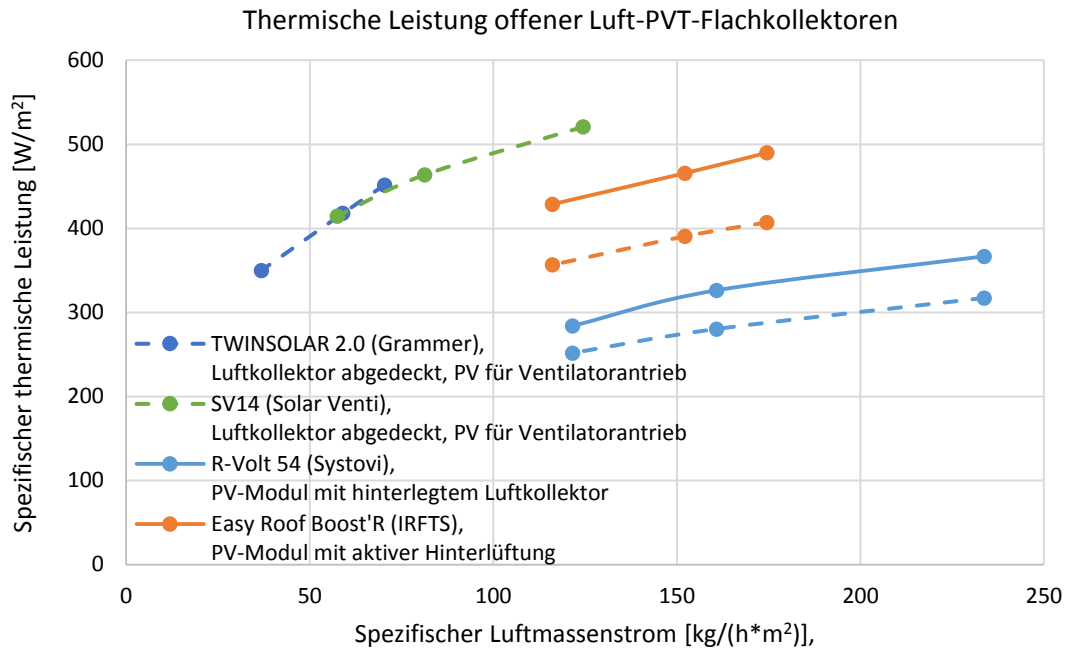


Abbildung 15: Thermische Leistung offener Luft-PVT-Flachkollektoren im MPP-Betrieb, bezogen auf die Bruttokollektorfläche, bei solarer Einstrahlung von $G=1000 \text{ W/m}^2$, $(E_L - \sigma \cdot T_a^4) = -100 \text{ W/m}^2$, $\varepsilon/\alpha = 0.85$ und somit $G'' = 915 \text{ W/m}^2$. Durchgezogene Linien für die Situation ohne Wind, gestrichelte Linien für Windgeschwindigkeit von 3 m/s. (Bei Umgebungsdruck und 20 °C entspricht ein Luftmassenstrom von 1 kg/h einem Luftvolumenstrom von rund 0.85 m³/h.)

Die thermische Leistung von geschlossenen Luft-PVT-Kollektoren kann in gleicher Weise dargestellt werden wie diejenige von flüssigkeitsgekühlten Modellen. Bei den erfassten Produkten waren jedoch keine Werte für diese Betriebsart vorhanden.

2.4.3 Elektrische Leistung

Der elektrische Wirkungsgrad (DC) hängt im Wesentlichen von der Technologie und Qualität der eingesetzten PV-Zellen ab. Alle erhältlichen PVT-Kollektoren setzen auf mono- oder polykristalline Siliziumzellen. Der Wirkungsgrad von nicht-abgedeckten Kollektoren liegt also bei Standardbedingungen ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ und $T = 25 \text{ °C}$) im Bereich von 16 %, wie derjenige von Standard-PV-Modulen. Bei abgedeckten PVT-Kollektoren reduziert sich der Wirkungsgrad aufgrund von zusätzlichen Reflexionen an der transparenten Glasabdeckung. Bei senkrechter Einstrahlung beträgt diese Reduktion etwa zwischen 4 % (Glas mit beidseitiger Antireflexbeschichtung) und 8 % (Standard-Solarglas).

Die Abhängigkeit der elektrischen Effizienz von der Einstrahlung und der Modultemperatur ist gleich wie bei PV-Modulen. Bei PVT-Kollektoren mit einer guten thermischen Kopplung zwischen PV-Zellen und Wärmeträgerfluid kann die Modultemperatur näherungsweise mit der mittleren Fluidtemperatur gleichgesetzt werden.

Der elektrische Wirkungsgrad bei einer bestimmten solaren Einstrahlung G und Modultemperatur (bzw. Fluidtemperatur) ϑ_m kann vereinfacht mit der folgenden Formel bestimmt werden [2]

$$\eta_{el}^{MPP} = \eta_{STC}^{MPP} \cdot \left(1 - 0.04 \cdot \ln \left(\frac{G}{1000 \text{ W/m}^2} \right) + \gamma_{MPP}^{STC} \cdot (\vartheta_m - 25 \text{ °C}) \right),$$

wo η_{STC}^{MPP} den Wirkungsgrad und γ_{MPP}^{STC} den Leistungstemperaturkoeffizienten bei MPP und STC bezeichnen, welche in der Regel dem Produktdatenblatt entnommen werden können.

Mit der entsprechenden Bezugsfläche A kann die elektrische Leistung eines PVT-Kollektors demnach wie folgt bestimmt werden:

$$P_{el}^{MPP} = \eta_{el}^{MPP} \cdot G \cdot A .$$

2.4.4 Bruttowärme- und Bruttostromerträge

Im Fall von flüssiggekühlten Kollektoren (und geschlossenen Luftkollektoren) bieten solare Bruttoerträge ein gutes Werkzeug für eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Kollektorerträge für unterschiedliche Kollektoren, Standorte und Temperaturniveaus der Wärmenutzung.

Beim Bruttowärmeertrag handelt es sich um den thermischen Ertrag eines Kollektors (an den Kollektorstutzen), für eine bestimmte Kollektormitteltemperatur und eine bestimmte Zeitdauer (z.B. Monat, Jahr). Er ist abhängig von den Kennwerten des Kollektors, dem Standort (Einstrahlung, Klima) sowie von der Ausrichtung und Neigung des Kollektors und kann mit Hilfe des entsprechenden Kennlinienmodells ermittelt werden. Der jährliche Bruttowärmeertrag eines Kollektors für eine Kollektormitteltemperatur von $\vartheta_m = 30 \text{ °C}$ beispielsweise ist der hypothetische Wärmeertrag, den ein Kollektor an einem gegebenen Standort und mit gegebener Ausrichtung erzielen würde, wenn man ihn an jedem Moment des Jahres an dem der Wirkungsgrad bei $\vartheta_m = 30 \text{ °C}$ positiv ist mit genau dieser Temperatur betreiben würde. Dynamische Effekte wie Aufheiz- und Abkühlphasen werden dabei vernachlässigt.

Ähnlich dem thermischen Bruttoertrag wird hier im Zusammenhang mit PVT-Kollektoren ein elektrischer Bruttoertrag definiert. Er entspricht dem elektrischen DC-Ertrag, den ein PVT-Kollektor erzielen würde, wenn dieser aus thermischer Sicht betrieben würde wie oben beschrieben. Als Modultemperatur während den thermischen Betriebszeiten (Zeitintervalle mit positivem thermischem Wirkungsgrad) wird vereinfacht die mittlere Fluidtemperatur angenommen. Ausserhalb der thermischen Betriebszeiten wird die Modultemperatur aus der Kennliniengleichung mit $\dot{Q} = 0$ bestimmt.

In den folgenden Abbildungen sind Bruttowärme- und Bruttostromerträge für verschiedene Kollektortypen und Standorte dargestellt. Die Werte wurden mit der Software Polysun bestimmt. Es wurde angenommen, dass die Windgeschwindigkeit beim Kollektorfeld 50 % der in den Wetterdaten hinterlegten Windgeschwindigkeit beträgt, welche für ein offenes Gelände gilt. Es wurden die gleichen thermischen Kennwerte wie für die Kennlinien in Abbildung 14 verwendet (Tabelle 8). Für die nicht-abgedeckten Kollektoren wurde ein elektrischer Wirkungsgrad STC von 16.5 % angenommen. Beim abgedeckten Kollektor wurde, um den zusätzlichen Reflexionen Rechnung zu tragen, ein um 6 % geringerer elektrischer Wirkungsgrad von 15.5 % angenommen. Als Temperaturkoeffizient wurde bei allen Kollektoren der Wert -0.37 %/°C eingesetzt.

Abbildung 16 zeigt die jährlichen Bruttowärme- und Bruttostromerträge für verschiedene flüssiggekühlte PVT-Kollektortypen am Standort Zürich. Für die tiefen Betriebstemperaturen beinhalten die Wärmeerträge sowohl in Nutzwärme umgewandelte Solarenergie als auch Umgebungswärme, welche geerntet wird, wenn die Kollektortemperatur unter der Umgebungstemperatur liegt. Bei niedrigen Betriebstemperaturen sind demnach nicht-abgedeckte und ungedämmte Kollektoren im Vorteil. Für höhere Betriebstemperaturen, welche übers Jahr gesehen mehrheitlich über Umgebungstemperatur liegen, sind Rückseitendämmung und vorderseitige Abdeckung dem Wärmeertrag förderlich. In einem System, wo der Kollektor immer bei 50 °C betrieben wird, kann nur ein abgedeckter Kollektor einen nennenswerten Wärmeertrag liefern.

Die elektrischen Erträge sind umso höher, je tiefer die Betriebstemperaturen. Die Prozentzahlen in den folgenden Abbildungen beziffern den elektrischen Mehr- bzw. Minderertrag gegenüber einem durchschnittlich hinterlüfteten reinen PV-Modul.

Nicht-abgedeckte ungedämmte PVT-Kollektoren erreichen durch die Modulkühlung die grössten elektrischen Ertragssteigerungen. Die maximal erreichbaren Temperaturen entsprechen denen von reinen PV-Modulen. Wenn keine Wärme abgenommen wird, liefern sie also gleich viel elektrischen Ertrag wie diese.

Nicht-abgedeckte PVT-Kollektoren mit Rückseitendämmung erzielen bei niedrigen Betriebstemperaturen ähnliche Mehrerträge wie solche ohne Dämmung. Da sie aufgrund der Dämmung höhere Temperaturen als PV-Module erreichen können, treten bei höheren Betriebstemperaturen leichte Mindererträge auf.

Abgedeckte PVT-Kollektoren erreichen (beim Einsatz gleichwertiger Zellen) etwas geringere elektrische Erträge als nicht-abgedeckten Kollektoren. Gründe hierfür sind einerseits die grösseren Reflexionen durch die zusätzliche Glasscheibe (höher bei senkrechter Einstrahlung und stärker zunehmend bei schrägem Lichteinfallswinkel) und andererseits die längeren Betriebsdauern bei höheren Temperaturen. Im Vergleich mit PV-Modulen resultiert bei niedrigen Betriebstemperaturen, trotz der grösseren Reflexionsverluste, ein leichter elektrischer Mehrertrag durch die Modulkühlung. Bei höheren Betriebstemperaturen liefern diese Kollektoren jedoch weniger elektrischen Ertrag als PV-Module. Bei abgedeckten Kollektoren ist also speziell darauf zu achten, längere Stagnationsphasen (Phasen ohne Wärmenutzung) zu vermeiden, da solche eine deutliche Reduktion der elektrischen Erträge zur Folge haben.

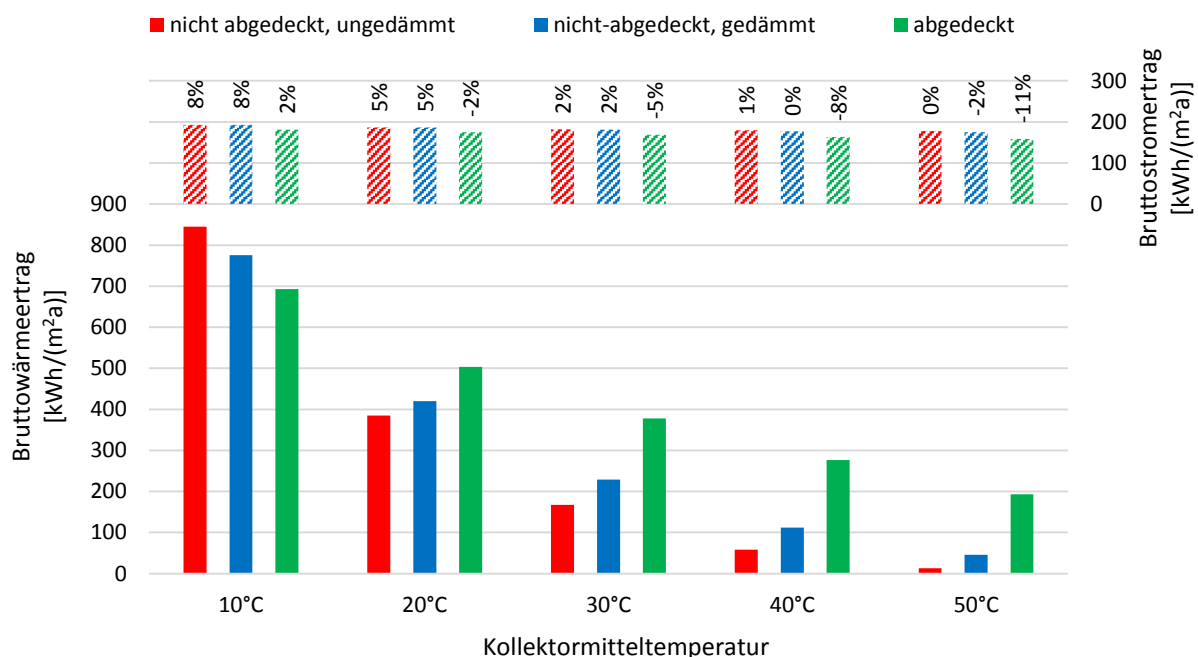


Abbildung 16: Jährliche Bruttowärmeerträge (gefüllte Balken) und Bruttostromerträge DC (schraffierte Balken) für verschiedene flüssiggekühlte PVT-Kollektortypen bezogen auf die Kollektorbruttofläche (Standort: Zürich, Ausrichtung: Süden, Neigung: 45°). Die Prozentzahlen beziffern den elektrischen Mehr- bzw. Minderertrag gegenüber einem durchschnittlich hinterlüfteten reinen PV-Modul.

Zum Vergleich sind in Abbildung 17 die Bruttowärmeerträge von rein thermischen Solarkollektoren für denselben Standort und dieselbe Ausrichtung dargestellt.

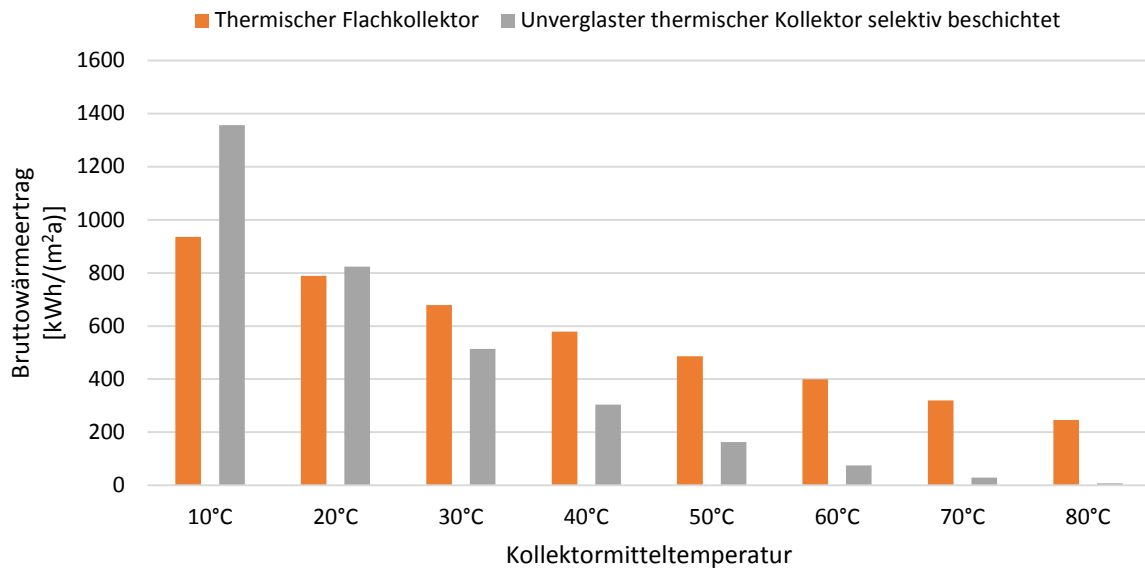


Abbildung 17: Jährliche Bruttowärmeerträge für rein thermische Solarkollektoren, bezogen auf die Kollektorbruttofläche (Standort: Zürich, Ausrichtung: Süden, Neigung: 45°).

Abbildung 18 zeigt die Bruttoerträge für einen typischen nicht-abgedeckten ungedämmten Kollektor an verschiedenen Standorten. Für die Betriebstemperatur von 10 °C ist der Wärmeertrag stark durch die Umgebungstemperatur beeinflusst, weshalb in Zürich trotz des kleineren Strahlungsangebots ein höherer Ertrag als in Davos resultiert. Bei höheren Betriebstemperatur steigt der Einfluss des Strahlungsangebots. Dieses ist auch der Haupteinflussfaktor für den elektrischen Ertrag. In Abbildung 19 ist die monatliche Verteilung der Bruttoerträge für denselben Kollektortyp am Standort Zürich dargestellt.

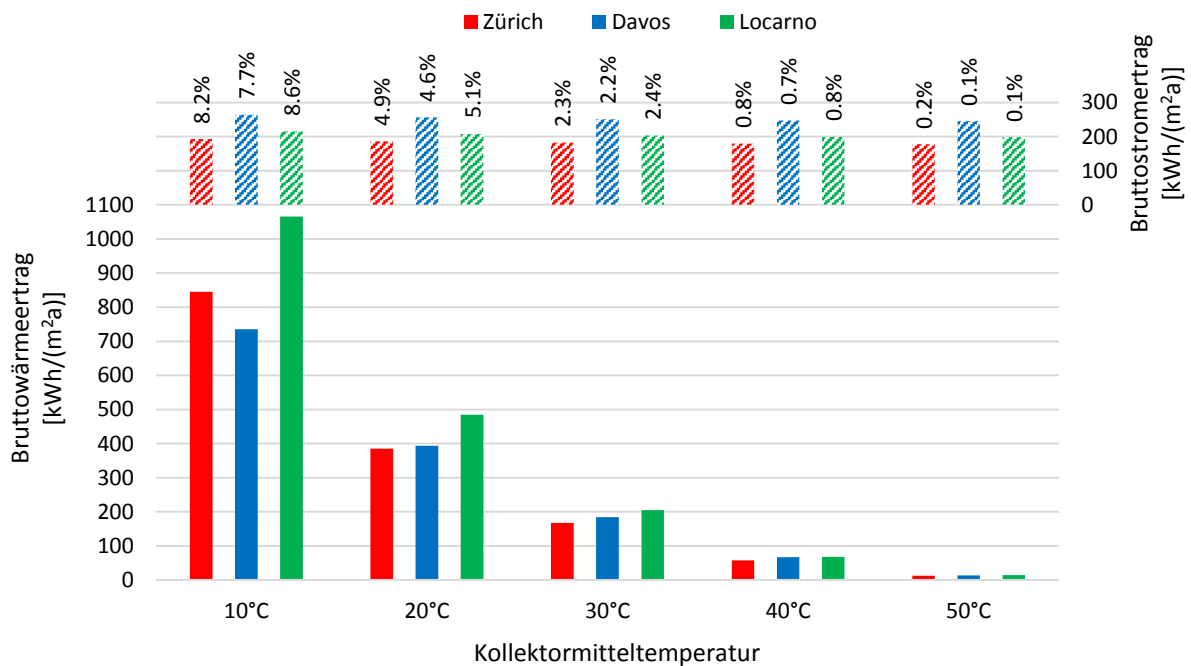


Abbildung 18: Jährliche Bruttowärmeerträge (gefüllte Balken) und Bruttostromerträge DC (schraffierte Balken) bezogen auf die Kollektorbruttofläche für flüssiggekühlte nicht-abgedeckte PVT-Kollektoren ohne Rückseitendämmung an verschiedenen Standorten (Ausrichtung: Süden, Neigung: 45°). Die Prozentzahlen beziffern den elektrischen Mehr- bzw. Minderertrag gegenüber einem durchschnittlich hinterlüfteten reinen PV-Modul.

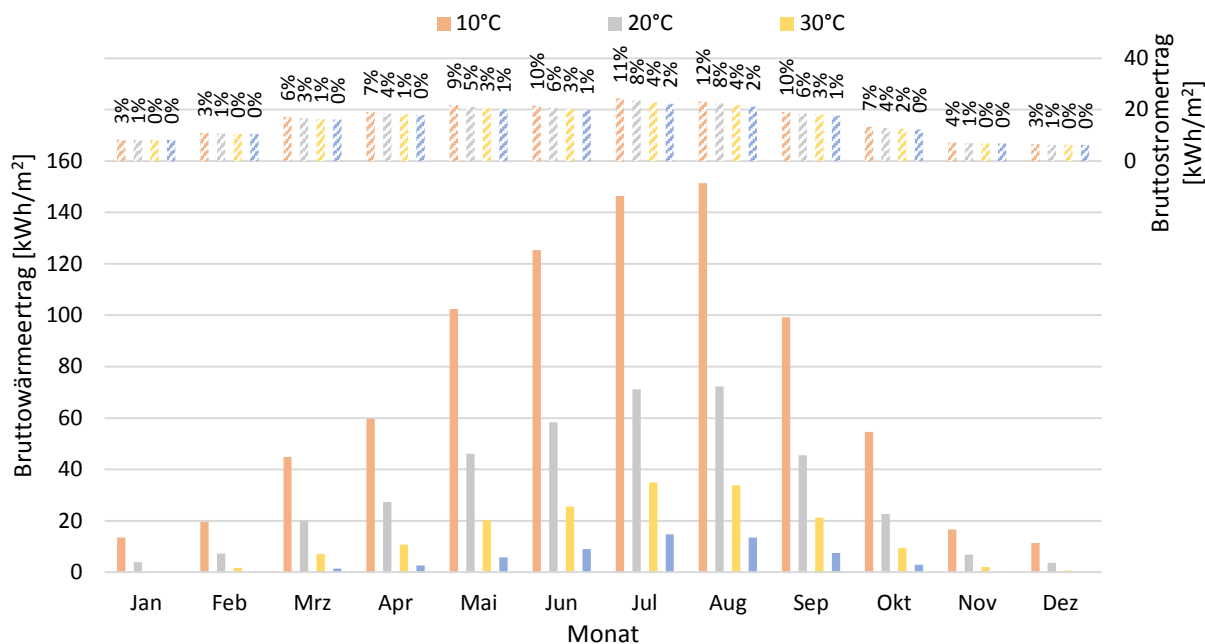


Abbildung 19: Monatliche Bruttowärmeerträge (gefüllte Balken) und Bruttostromerträge DC (schraffierte Balken) bezogen auf die Kollektorbruttofläche für flüssiggekühlte nicht-abgedeckte PVT-Kollektoren ohne Rückseitendämmung am Standort Zürich (Ausrichtung: Süden, Neigung: 45°). In Prozent die Mehrerträge gegenüber mittel hinterlüfteten PV-Modulen.

2.5 FÖRDERUNG

PVT-Anlagen können in der Schweiz prinzipiell als Photovoltaikanlage und als thermische Solaranlage Fördergelder erhalten.

Photovoltaikanlagen werden auf Bundesebene mit der Einmalvergütung bzw. der kostendeckenden Einspeisevergütung unterstützt. Zudem gewähren einige Kantone und Gemeinden zusätzliche Förderbeiträge.

Die Erstellung von solarthermischen Anlagen wird von den meisten Kantonen und vielen Gemeinden finanziell gefördert. Richtlinien für die kantonale Förderung sind im Harmonisierten Fördermodell (HFM) der Kantone [12] definiert. Diese sehen eine Förderung vor, welche sich an der sogenannten thermischen Kollektornennleistung orientiert (siehe Definition in Abschnitt 2.4.1.2). Aktuelle Förderbeiträge für solarthermische Anlagen (inklusive PVT) in den verschiedenen Kantonen können mit dem „Fördergeldrechner“ (<http://kollektorliste.ch/>) bestimmt werden.

Der Minimalfördersatz nach HFM 2015 liegt bei CHF 1'200 Grundbeitrag zuzüglich CHF 500 pro kW installierte thermische Kollektornennleistung. Um eine Förderung zu erhalten muss mindestens eine Kollektornennleistung von 2 kW installiert werden.

Der typische nicht abgedeckte PVT-Kollektor ohne Rückseitendämmung aus Abschnitt 2.4.2.1 hat eine thermische Kollektornennleistung von 92 W/m² (Tabelle 9). Um die für eine Förderung notwendige Mindestleistung zu erreichen, müssen somit mindestens 22 m² Kollektorfläche installiert werden. Dies entspricht bei einer üblichen Kollektorgrösse von 1.60 m² mindestens 14 Kollektoren. PVT-Kollektoren mit Rückseitendämmung erreichen typischerweise etwas höhere Nennleistungen. Deutlich höher ist der Wert für abgedeckte PVT-Kollektoren. Zum Vergleich ist ebenfalls ein typischer rein thermischer abgedeckter Flachkollektor aufgeführt. Die Kollektornennleistung liegt mit 465 W/m² mehr als doppelt so hoch wie beim abgedeckten PVT-Kollektor und entspricht etwa der fünffachen Nennleistung des nicht-abgedeckten und ungedämmten PVT-Kollektors. Bei einer Installation der Mindestgrösse entsprechend 2 kW Nennleistung beträgt die Förderung nach HFM 2015 jeweils CHF 2'200.

Tabelle 9: Thermische Kollektornennleistung und Mindestgrösse für Förderung nach HFM 2015 für verschiedene Kollektortypen

Kollektortyp	Thermische Kollektornennleistung	Mindestgrösse
PVT nicht-abgedeckt, ungedämmt	92 W/m ²	21.7 m ²
PVT nicht-abgedeckt, mit Rückseitendämmung	129 W/m ²	15.5 m ²
PVT abgedeckt	211 W/m ²	9.5 m ²
Thermischer Flachkollektor	465 W/m ²	4.3 m ²

Darüber hinaus können die Kantone individuell zusätzliche Förderungen gewähren. Dazu sind im HFM 2015 verschiedene Optionen zur Erhöhung des Fördersatzes angegeben.

Zusätzliche aktuelle Informationen zur Fördersituation von Solarstrom und Solarwärme sind über die Internetseite des Branchenverbandes Swissolar zugänglich (<http://www.swissolar.ch/fuerbauerherren/foerderung/>).

3 SYSTEMEINBINDUNG VON PVT-KOLLEKTOREN

Wie im vorangehenden Abschnitt dargestellt, haben die verschiedenen PVT-Kollektortypen ihre Stärken bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen und damit in unterschiedlichen Anwendungen. Für die energetische Ausbeute einer PVT-Anlage ist es also entscheidend, wie diese in ein Wärmeversorgungssystem integriert ist. Im Folgenden werden die wichtigsten Einsatzbereiche und Systemeinbindungen der verschiedenen Kollektortypen beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf die in der Schweiz am stärksten verbreiteten flüssiggekühlten nicht-abgedeckten PVT-Kollektoren gelegt wird.

3.1 SYSTEME MIT FLÜSSIGGEKÜHLTEN NICHT-ABGEDECKTEN PVT-KOLLEKTOREN

Dieser am häufigsten eingesetzte Kollektortyp ist insbesondere für Niedertemperaturanwendungen geeignet, da er hier die höchsten thermischen Erträge und die grösste Steigerung des elektrischen Ertrags durch Modulkühlung erreicht. Ein wichtiges Anwendungsfeld ist der Einsatz in Kombination mit Wärmepumpen, bei welchen die Solarwärme auf der Quellenseite genutzt wird. Dieser Kollektortyp wird aber auch in klassischen Solarthermieanwendungen wie Brauchwarmwasser-(Vor)erwärmung, Heizungsunterstützung oder Schwimmbadbeheizung eingesetzt.¹⁰

3.1.1 Wärmepumpensysteme

Die wichtigsten Varianten der Solarwärmenutzung in WP-Systemen sind:

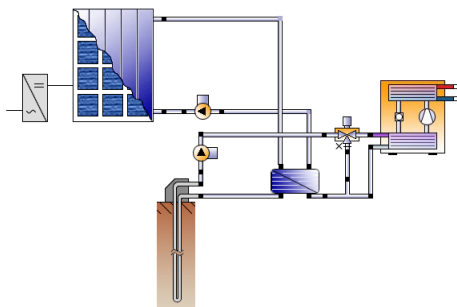
- Regeneration von Erdwärmesonden(feldern) (EWS-Reg)
- Regeneration eines Eisspeichers (Eis-Reg)
- Regeneration eines Solespeichers (Sole-Reg)
- Vorwärmung eines Grundwassertanks (GW-VW)
- Als direkte Wärmequelle für die Wärmepumpe (WP-Direkt)

¹⁰ Nicht-abgedeckte Kollektoren können prinzipiell auch für Kühlanwendungen (nächtliche Strahlungskühlung) eingesetzt werden.

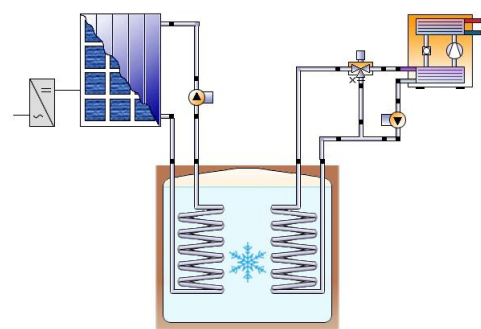
Bei allen ausser der letzten Variante handelt es sich grundsätzlich um eine Bewirtschaftung eines Wärmespeichers auf der Quellenseite der Wärmepumpe durch Solarwärme. In Abbildung 20 sind Möglichkeiten für die hydraulische Einbindung der PVT-Kollektoren für diese Varianten vereinfacht dargestellt. Die Variante, PVT-Kollektoren direkt als Quelle für die WP zu nutzen, kann einzeln realisiert werden, kann aber auch mit Hilfe einer entsprechenden hydraulischen Schaltung mit den anderen Varianten kombiniert werden.

Höhere Quellentemperaturen haben einen positiven Einfluss auf die Arbeitszahl der Wärmepumpe (rund 2.5 % weniger Stromverbrauch pro °C). Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die maximale von der WP akzeptierte Quellentemperatur nicht überschritten wird. Je nach Systemvariante und Dimensionierung der Komponenten muss aktiv für die Einhaltung dieser Grenze gesorgt werden. Dies kann beispielsweise durch die Rücklaufbeimischung bei der Wärmepumpe erfolgen, wie in den Schemata in Abbildung 20 dargestellt. Allerdings sollten solche Regelungseingriffe nur punktuell bei Leistungsspitzen zur Anwendung kommen. Sind die Temperaturen dauerhaft zu hoch, sollte eine weitere Wärmesenke eingeplant werden.

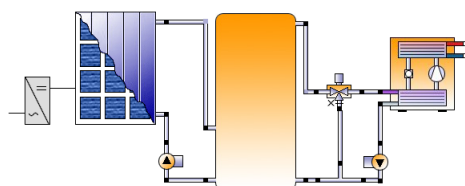
a) EWS-Reg



b) Eis-Reg



c) Sole-Reg



d) GW-VW

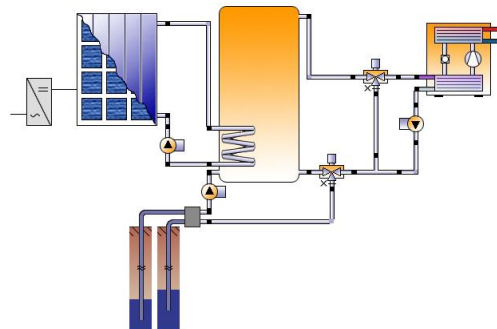


Abbildung 20: Schematische Darstellung verschiedener Varianten für die Einbindung von PVT-Kollektoren auf der Quellenseite einer Sole/Wasser- bzw. Wasser/Wasser-Wärmepumpe. Die Wärmesenken wären jeweils auf der rechten Seite der Wärmepumpe, sind aber hier nicht dargestellt. (Schemata erstellt mit der Software Polysun)

Bei allen Varianten besteht die Möglichkeit, Solarwärme zusätzlich auch auf der Sekundärseite der Wärmepumpe einzubinden, so dass diese zum Beispiel in einen Warmwasser- oder Heizungsspeicher eingespeist werden kann. Aus Sicht der Systemeffizienz ist diese Zusatzoption von Vorteil. Der effektive Nutzen hängt jedoch stark von den Speichertemperaturen bzw. -volumina ab. Zudem steigen Systemaufwand und -komplexität. Ob sich die Einbindung in Primär- und Sekundärkreis lohnt, muss im Einzelfall abgewogen werden.

3.1.1.1 Erdwärmesonden-Regeneration (EWS-Reg)

Bei erdsondengekoppelten Wärmepumpensystemen muss eine zu starke längerfristige Auskühlung des Erdreiches vermieden werden. Konkret darf gemäss SIA Norm 384/6 die mittlere Soletemperatur der Sonde auch nach 50 Betriebsjahren den Wert von -1.5 °C zu keiner Jahreszeit unterschreiten. Zur Einhaltung dieses Kriteriums kann die Einspeisung von Wärme ins Erdreich nötig sein, bzw. es kann durch aktive Regeneration des Erdreichs auf den Bau längerer oder zusätzlicher Sonden zur Einhaltung dieses Kriteriums verzichtet werden.¹¹ Die aktive Regeneration des Erdreichs ist insbesondere bei Erdsondenfeldern, in Zonen mit hoher Erdwärmenutzung (z.B. städtischer Kontext) oder bei tiefen Erdsonden in Betracht zu ziehen (siehe dazu auch Ref. [13] und Ref. [14]).

Zu diesem Zweck können ungedeckte PVT-Kollektoren als Niedertemperatur-Wärmequelle eingesetzt werden.¹² Eine einfache Variante für die hydraulische Einbindung von PVT-Kollektoren zur Erdsondenregeneration ist in Abbildung 20 a) dargestellt. Sowohl die hydraulische Trennung des Solarkreises und des Erdsondenkreises (wie in Abbildung 20 a)) als auch die Zusammenlegung der beiden Fluidkreise sind möglich. Bei Zusammenlegung der Kreisläufe entfällt der Temperaturhub am Wärmetauscher, wodurch die Kollektoren auf tieferer Temperatur und damit effizienter betrieben werden können. Zudem werden die Kosten für den Wärmetauscher eingespart. Nachteilig ist, dass auf Grund der im Kollektor möglicherweise auftretenden tiefen Temperaturen im Winter im ganzen Kreislauf (anstatt nur im Solarkreislauf) ein Wasser/Glykol-Gemisch mit höherer Glykolkonzentration eingesetzt werden muss, was den Druckverlust auch im Erdsondenkreislauf erhöht und deshalb eine höhere Leistung der Umwälzpumpe erfordert.

Bei Erdwärmesonden ist die Sondeneintrittstemperatur meist auf Grund der limitierten Temperaturbeständigkeit des Sondenmaterials (Herstellerfreigabe) oder (kantonal geregelten) gesetzlichen Vorgaben zu begrenzen. Mit einem durch Simulation ermittelten Häufigkeitsprofil der erwarteten Sonden Temperaturen kann bei gewissen Sondenherstellern die entsprechende Lebensdauer des Materials abgefragt werden. Je nachdem kann ein Material mit höherer Temperaturbeständigkeit eingesetzt werden. Wo nötig, kann eine Temperaturbegrenzung mit einer Rücklaufbeimischung bei der Erdsonde oder beim Kollektorfeld implementiert werden. Dies kann jedoch eine deutliche Reduktion des Solarertrages zur Folge haben. Aus energetischer Sicht kann hier der Einbau eines Zwischenspeichers sinnvoll sein.

Bei der Planung und der Anlagensteuerung sollte der für die Regeneration benötigte Stromverbrauch der Umwälzpumpen berücksichtigt werden. Es ist wichtig, effiziente und allenfalls regelbare Pumpen einzusetzen. Je nach Dimensionierung der Solaranlage bzw. Solarstrahlungsangebot kann im Erdsondenkreis für den Regenerationsbetrieb ein deutlich geringerer Volumenstrom gefahren werden als für den Wärmeentzug. Mit regelbaren Pumpen kann im Teillastbetrieb die Pumpleistung deutlich reduziert werden, indem das Verhältnis von thermischer Leistung zu Volumenstrom über das gesamte Leistungsband beibehalten wird.

¹¹ Es ist zu beachten, dass tiefe Erdwärmesonden (450 m etc.) besonders im Sommer ein höheres Temperaturniveau ($25\text{ °C} +$) aufweisen als herkömmliche Erdwärmesonden, die Betriebsbedingungen also evtl. nicht optimal sind für PVT. Daher kann hier auch speziell eine Kombination von Kollektortechnologien erwogen werden (z.B. unverglaste thermischen Kollektoren zusammen mit PVT).

¹² Das Erdreich auch gezielt überregeneriert werden, um eine längerfristige Anhebung der Sondenvorlauf-temperaturen und damit eine höhere Arbeitszahl der Wärmepumpe zu erreichen.

3.1.1.2 *Eisspeicher-Regeneration (Eis-Reg) und Solespeicher-Regeneration (Sole-Reg)*

Als Alternative zu Erdsonden- oder Luft-Wasser-Wärmepumpensystemen bezieht die Wärmepumpe bei diesen Varianten Wärme aus einem mit Fluid gefüllten Niedertemperatur-Speicher (Abbildung 20 b) und c)). Die beiden Varianten sind einander ähnlich, mit dem Unterschied, dass beim Solespeicher nur sensible Wärme gespeichert wird, während bei einem Eisspeicher auch die latente Wärme, also die „Speicherkapazität“ des Aggregatzustandswechsels zwischen Eis und Wasser genutzt wird. Damit haben Eisspeicher im Bereich um 0 °C deutlich höhere Wärmespeicherdichten. Die im Zustandswechsel gespeicherte Energie entspricht in etwa der Energie, welche benötigt wird, um dieselbe Wassermenge von 0 °C auf 80 °C zu erwärmen. Folglich sind bei einem Solespeicher deutlich grössere Speichervolumina und eine grosse Menge an Wasser/Glykol-Gemisch nötig, um die gleiche Energiemenge speichern zu können. Vorteile eines Solespeichers können hingegen die geringere Systemkomplexität sein, da keine Vereisung stattfindet, sowie keine Temperaturverluste auf Grund der Wärmeübertragung von Sole auf Wasser/Eis und wieder zurück. Beim System mit Solespeicher muss, ähnlich wie im Fall der solaren Erdsondenregeneration, fallspezifisch abgewogen werden, ob eine hydraulische Trennung zwischen dem Solarkreislauf und dem Fluidkreislauf, welcher die Wärme zur Wärmepumpe führt, sinnvoll ist.

3.1.1.3 *Grundwasser-Vorwärmung (GW-VW)*

An Standorten wo diese Möglichkeit besteht, kann eine Wärmepumpe Wärme aus dem Grundwasser beziehen. Das Grundwasser wird dabei entweder direkt, oder (häufiger) indirekt über einen Zwischenkreislauf (Wasser/Glykol-Gemisch) zur Wärmepumpe geführt. Niedertemperaturwärme, wie sie von einem unabgedeckten PVT-Kollektor effizient geliefert wird, kann dazu genutzt werden, die Quelltemperatur in einem solchen System anzuheben und damit den Stromverbrauch der Wärmepumpe zu reduzieren (Abbildung 20 d)). Dazu kann die Solarwärme entweder über einen Wärmetauscher in einen Grundwasserspeicher, oder in einen Speicher, welcher in den Zwischenkreislauf eingebunden ist, eingespeist werden. Dieser zweite Fall kann als Erweiterung der Systemvariante Sole-Reg gesehen werden.

Bei dieser Systemvariante besteht die Möglichkeit, überschüssige Solarwärme ans Grundwasser abzugeben, und damit die PVT-Kollektoren zu kühlen und deren elektrische Leistung zu erhöhen. Ob dieser Betriebszustand energetisch sinnvoll ist, hängt insbesondere von der elektrischen Leistungsaufnahme der Umwälzpumpen ab.

Wie bei der energetischen Nutzung des Grundwassers ohne Solarunterstützung ist darauf zu achten, dass die Rückgabetemperatur des Grundwassers die gesetzlichen Grenzen respektiert. In der Regel darf die Abkühlung bzw. Erwärmung des Grundwassers in 100 m Entfernung der Rückgabeeinrichtung maximal 3 °C gegenüber der natürlichen saisonalen Temperatur des Grundwassers betragen [15].

3.1.2 *Direkte Bereitstellung von Nutzwärme*

Neben der Einbindung auf der Quellenseite von Wärmepumpen werden nicht-abgedeckte PVT-Kollektoren auch für die direkte Bereitstellung von Nutzwärme eingesetzt. Die Anwendungen entsprechen grundsätzlich den klassischen Einsatzbereichen der Solarthermie, insbesondere:

- Brauchwarmwasser-(Vor)erwärmung (BWW, BWW-VW)
- Brauchwarmwassererwärmung plus Heizungsunterstützung (BWW & HZ)
- Freibadbeheizung (Pool)

Entsprechende hydraulische Einbindungen sind vereinfacht in Abbildung 21 dargestellt.

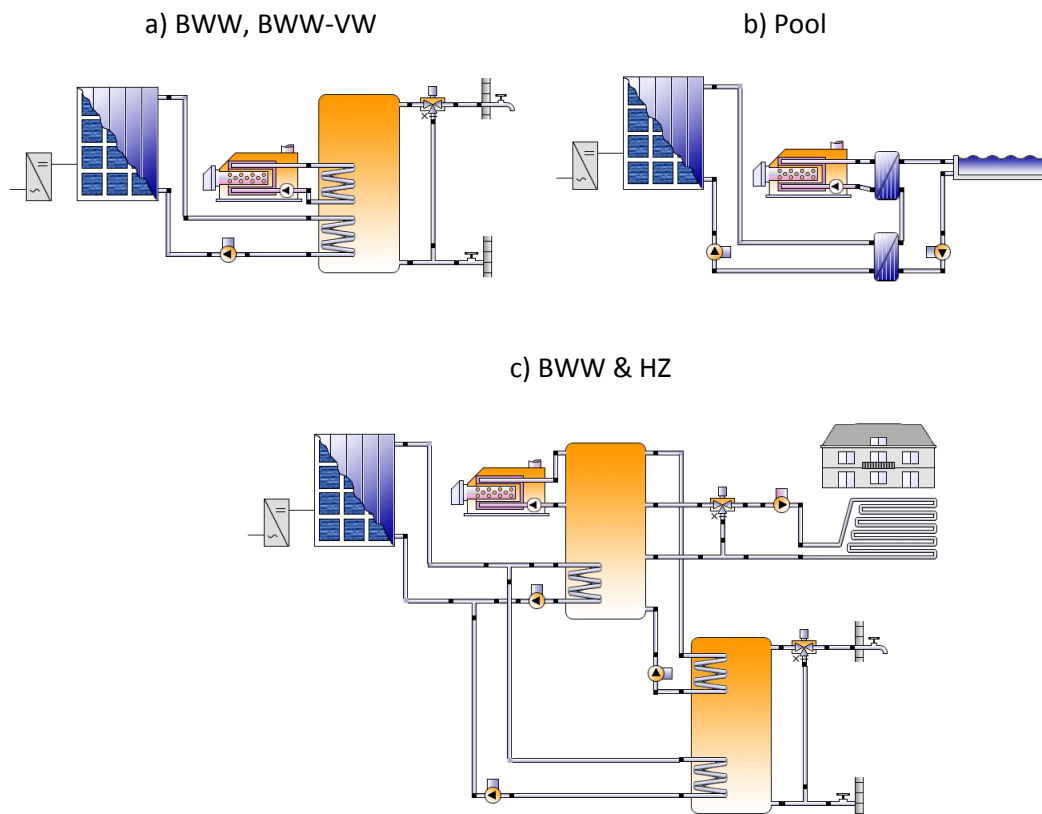


Abbildung 21: Varianten für die hydraulische Einbindung von PVT-Kollektoren zur direkten Bereitstellung von Nutzwärme. (Schemata erstellt mit der Software Polysun)

3.1.2.1 Brauchwarmwasser-(Vor)erwärmung (BWW-VW)

Bei dieser Variante (Abbildung 21 a) wird die Solarwärme über einen Wendelwärmetauscher oder einen externen Plattenwärmetauscher in einen Brauchwarmwasserspeicher gespeist. Ein Speicherbereich von der Grösse des Warmwasser-Bereitschaftsvolumens kann über einen konventionellen Wärmeerzeuger (Verbrennungskessel, Wärmepumpe oder Elektroheizstab) nachbeheizt werden. Je nach Anlagengrösse kann eine Lösung mit einem Vorwärmerspeicher und einem Bereitschaftsspeicher oder eine Lösung mit nur einem Speicher (wie in der Abbildung) vorteilhaft sein. Je nachdem, wie hoch der solare Energieanteil an der Warmwasserbereitung ist, spricht man von Brauchwarmwasser-Vorerwärmung (Solaranteil typischerweise im Bereich von 25 %) oder Brauchwarmwasser-Erwärmung (Solaranteil typischerweise höher als 50 %). Von der flächenspezifischen Energieausbeute her sind nicht-abgedeckte Kollektoren (analog zu unverglasten thermischen Kollektoren) insbesondere für Systeme mit geringem Solaranteil geeignet, weil die Kollektoren in diesen Systemen auf niedrigerem Temperaturniveau betrieben werden. Solche Vorerwärmssysteme kommen vor allem für Objekte mit hohem Warmwasserbedarf, wie etwa Mehrfamilienhäuser oder Sportstätten in Frage.

3.1.2.2 Brauchwarmwassererwärmung plus Heizungsunterstützung (BWW & HZ)

Bei dieser Variante (Abbildung 21 c) handelt es sich um eine grosszügig dimensionierte Anlage für die solare Warmwassererwärmung, bei der die Solarwärme alternativ auch zur Beladung des Heizungsspeichers genutzt werden kann. Diese Option kommt nur in Kombination mit einem Niedertemperatur-Heizverteilsystem in Frage. Vereinzelt existieren auch Anlagen, bei denen die Solarwärme nur zur Beladung eines Heizungsspeichers genutzt wird.

3.1.2.3 Schwimmbadbeheizung

Aufgrund der niedrigen benötigten Temperaturen sind unbedeckte PVT-Kollektoren für die Freibadbeheizung, insbesondere für Freibäder ohne zusätzliche Nachheizung, gut geeignet (Abbildung 21 b). Auch die Beheizung von Hallenbädern ist möglich, wobei die konstant benötigten höheren Temperaturen einen niedrigeren thermischen Solarertrag zur Folge haben. PVT-Kollektoren, deren fluidführende Komponente aus Metall (insbesondere Aluminium) gefertigt ist, müssen auf Grund der korrosiven Natur des Chlors in der Regel über einen Wärmetauscher an den Schwimmbadwasserkreis gekoppelt werden. Bei PVT-Kollektoren mit Wärmeabnehmer aus Kunststoff besteht die Möglichkeit das Schwimmbadwasser direkt durch den PVT-Kollektor zu führen. Dies hat den doppelten Vorteil, dass der zusätzliche Wärmetauscher eingespart werden kann, und dass die Kollektoren auf tieferer Temperatur und damit effizienter betrieben werden können.

3.2 SYSTEME MIT FLÜSSIGGEKÜHLTEN ABGEDECKTEN PVT-KOLLEKTOREN

Die Einsatzbereiche von abgedeckten PVT-Kollektoren entsprechen im Wesentlichen denjenigen von verglasten solarthermischen Flachkollektoren. Die wichtigsten Anwendungen sind also Systeme zur solaren Brauchwarmwassererwärmung ohne oder mit solarer Heizungsunterstützung. Die Möglichkeiten der hydraulischen Einbindung entsprechen denen von Abbildung 21. Aufgrund der etwas geringeren thermischen Leistung gegenüber Flachkollektoren muss die Dimensionierung zur Erreichung gleicher solarer Deckungsgrade etwas grösser gewählt werden.

Ein wesentlicher Unterschied zu Anlagen mit thermischen Flachkollektoren besteht im Umgang mit Stagnationszuständen. Mehrere der am Markt verfügbaren abgedeckten PVT-Kollektoren dürfen auf Grund der eingesetzten Materialien nicht über längere Zeit Stagnationstemperaturen ausgesetzt werden. Dies bedeutet, dass bei diesen Produkten ein Mechanismus zur Temperaturbegrenzung, in der Regel ein in den Kollektorkreis eingebundener Rückkühler, und eine entsprechend angepasste Steuerung notwendig sind.¹³

3.3 SYSTEME MIT LUFTKOLLEKTOREN

PVT-Luftkollektoren werden in der Praxis hauptsächlich in offenen Systemen eingesetzt. Mit Hilfe von Ventilatoren wird Aussenluft angesaugt und hinter den PV-Zellen durchgeführt. Häufig wird die erwärmte Luft direkt zur Gebäudeheizung bzw. Belüftung verwendet (Abbildung 22). Dieselbe Systemkonfiguration kann im Sommer zur nächtlichen Gebäudekühlung eingesetzt werden. Eine weitere Variante bildet die Nutzung der vorgewärmten Aussenluft als Quelle für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe (Wärmepumpenboiler) zur Brauchwarmwassererwärmung und/oder Raumheizung (Abbildung 23). Dies erlaubt eine Erhöhung der WP-Arbeitszahl gegenüber der Nutzung der nicht-vorgewärmten Aussenluft.

Eine Anlagenausführung mit der Option des Umluftbetriebs (geschlossener Luftkreislauf) ist sinnvoll, wenn überschüssige Solarwärme zur direkten Beladung eines Brauchwarmwasserspeichers eingesetzt werden kann.

Weitere interessante Einsatzbereiche für diesen Kollektortyp sind Trocknungsanlagen, beispielsweise für Landwirtschaftsprodukte oder Holz (Abbildung 24), oder auch die Belüftung von Hallenbädern oder Lackierhallen.

¹³ Auch in Systemen mit nicht-abgedeckten Kollektoren werden teilweise Kühler in den Kollektorkreis eingebaut, um in Phasen ohne Wärmebedarf die PV-Zellen zu kühlen und damit den elektrischen Ertrag zu steigern.

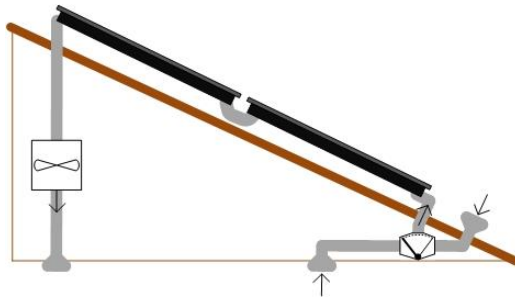


Abbildung 22: Schematische Darstellung eines Luft-PVT-Systems zur direkten Beheizung respektive Kühlung von Innenräumen.

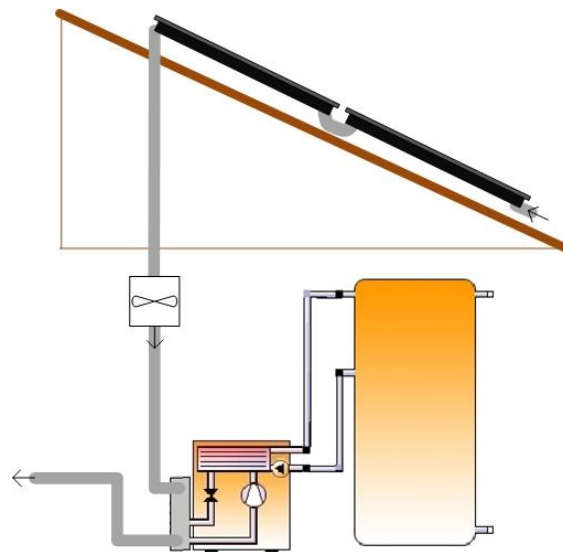


Abbildung 23: Schematische Darstellung eines Luft-PVT-Systems zur Beheizung eines Pufferspeichers (für Brauchwarmwasser oder Heizung) über eine Luft/Wasser-Wärmepumpe.



Abbildung 24: Luft PVT-Anlage zur Heutrocknung in der französischen Provinz Béarn. Produkt Cogen'air der Firma BASE. (Quelle: BASE Innovation)

Mit wenig technischem Zusatzaufwand kann bei Luft-PVT-Anlagen die Option realisiert werden, dass die PVT-Kollektoren in Perioden ohne Wärmebedarf durch das Ventilationssystem aktiv gekühlt werden und so der elektrische Ertrag gesteigert wird.

Für weiterführende Informationen im Zusammenhang mit solarthermischen Luftkollektoranlagen sei hier auf Ref. [16] verwiesen.

3.4 WERKZEUGE ZUR AUSLEGUNG VON PVT-SYSTEMEN

Wie für solarthermische Anlagen und Photovoltaikanlagen können detaillierte Systemauslegungen mit Hilfe verschiedener Simulationstools erfolgen. Spezielle Berechnungsmodelle für flüssiggekühlte PVT-Kollektoren und Beispielsysteme sind etwa in den Programmen Polysun und Tachion enthalten.¹⁴ Zum Teil stellen Hersteller auch eigene, an ihr Produkt angepasste Simulationstools zur Verfügung.

Solarthermische Luftkollektorsysteme (nicht spezifisch PVT) können beispielsweise mit den Simulationsprogrammen T*SOL und RETScreen berechnet werden.¹⁵

Während für kleine und einfache Systeme (etwa zur Brauchwarmwassererwärmung) teilweise mit von Herstellern angegebenen Faustformeln gearbeitet werden kann, sind für grössere und komplexere Systeme, wie etwa Systemen zur Regenerierung von Erdsondenfeldern, detaillierte dynamische Systemsimulationen unabdingbar.

¹⁴ Polysun Simulation Software, www.velasolaris.com; Simulations-Framework Tachion, www.solarcampus.ch.

¹⁵ Simulationsprogramm T*SOL, www.valentin-software.com; RETScreen Clean Energy Management Software, Natural Resources Canada, <http://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465>.

4 FALLSTUDIEN

4.1 EINFAMILIENHAUS WETTSWIL AM ALBIS

Projektart	BFE P&D-Projekt
Projekttitel	Einbindung von PVT Kollektoren in erdsondengekoppelte Wärmepumpen-Systeme Wegbereitung zur Praxistauglichkeit sowie Verifizierung des Potentials von Niedertemperatur- PV/T-Kollektoren und Einbindung in die Gebäudetechnik mit Wärmepumpe und Erdsonde
Projektkonsortium	Meyer Burger AG NTB Interstaatliche Hochschule für Technik, Buchs
Projektzeitraum	2013 - 2015
Dokumentation / Quellen	Jahresbericht 2012 [17], Schlussbericht [18], Messdaten

4.1.1 Objekt

Bei diesem Objekt handelt es sich um ein Einfamilienhaus mit beheiztem Aussenschwimmbad, wo ein bestehendes Wärmeversorgungssystem, basierend auf einer erdsondengekoppelten Wärmepumpe, im Jahr 2012 durch eine PVT-Anlage erweitert wurde. Begründet wurde die Einbindung der PVT-Anlage mit einer beobachteten Abkühlung der Erdsonden.



Abbildung 25: Dachansicht der PVT-Anlage auf dem EFH in Wettswil.

4.1.2 Solaranlage

Auf dem Flachdach des Gebäudes wurden 28 PVT-Kollektoren des Typs Meyer Burger Hybrid 240/900 installiert (insgesamt 45.9 m² bzw. 6.72 kWp elektrisch). Die Module haben einem Neigungswinkel von 10° und sind nach Südost (30°) orientiert. Zusätzlich ist mit gleicher Ausrichtung eine reine PV-Anlage mit 10 Modulen gleicher Bauart, jedoch ohne Wärmeabnehmer, installiert (16.4 m², 2.4 kWp elektrisch).

4.1.4.1 Thermische Erträge

Der (hochgerechnete) thermische Solarertrag für die Jahresperiode September 2014 bis August 2015, lag bei 267 kWh/m² (insgesamt 12.3 MWh) bei einer spezifischen Einstrahlung in Kollektorebene von 1179 kWh/m². 37 % des Solarwärmeertrags dienten der Schwimmbadbeheizung und die restlichen 63 % der Erdsondenregeneration. Die Anlage ist so geregelt, dass die Solarwärme in den Sommermonaten prioritär das Schwimmbad beheizt, wodurch die Erdsondenregeneration jeweils erst im Juli einsetzt.

Die Wärmepumpe entzog dem Erdreich übers Jahr 17.3 MWh Wärme. Durch die 7.7 MWh Solarwärme konnte das Erdreich zu 45 % regeneriert werden. Das Erdreich wurde zusätzlich durch Abwärme der Weinkellerkühlung (rund 2 MWh) und Free Cooling (nicht gemessen) regeneriert.

Die tiefsten Monatsmittel der Erdsonden-Vorlauftemperatur wurden jeweils im Februar erreicht. Diese lagen (für den Heizbetrieb) im Bereich von 5 °C (Februar 2013 und 2015) und 6 °C (Februar 2014). Die Vorlauftemperaturen sind also relativ stabil, wobei für eine abschliessende Bewertung der längerfristigen Temperaturentwicklung im Erdreich eine längere Zeitperiode nötig wäre. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe war ebenfalls stabil und lag für alle drei Jahre im Bereich von 3.2.

4.1.4.2 Elektrische Erträge

Der elektrische Ertrag (DC) der PVT-Anlage, ebenfalls für die Periode September 2014 bis August 2015 betrug 121 kWh/m², also insgesamt 5.5 MWh.

Der spezifische elektrische Ertrag der 10 reinen PV-Module lag mit 131 kWh/m² höher als derjenige der PVT-Anlage. Der Grund für den Unterschied liegt insbesondere bei der stärkeren Verschattung des PVT-Feldes durch Pflanzenbewuchs des Flachdaches. Damit überwiegt dieser Effekt gegenüber dem positiven Effekt der Modulkühlung, welcher entsprechend auch nicht quantifiziert werden konnte.

4.1.4.3 Weitere Erfahrungen

Es hat sich in diesem Projekt gezeigt, dass im Fall einer solch komplexen Anlage (Heizung, Warmwasser, Schwimmbad, Gebäudekühlung) eine detaillierte Überwachung und Optimierung während der ersten Betriebsjahre sinnvoll oder gar notwendig ist.

Gemäss Jahresbericht 2012 gab es während der Anlagenplanung und -installation einige Unklarheiten bezüglich der Verantwortlichkeiten. Im Schlussbericht wurde in der Folge festgehalten, dass die Regelung der Zuständigkeiten und der Schnittstellen zwischen den involvierten Parteien, sowohl für diese frühen Projektphasen, als auch für die Betriebsphase (Überwachung, Optimierung, Unterhalt) sehr wichtig ist.

4.2 WOHNBAUGENOSSENSCHAFT OBERFELD, OSTERMUNDIGEN

Projektart	BFE P&D-Projekt
Projekttitel	Einbindung von PV/T Kollektoren in erdsondengekoppelte Wärmepumpen-Systeme Potentialevaluation der Kombination Solar & Wärmepumpe und Betriebsoptimierung mittels Monitoring einer Grossanlage solar regenerierter Erdsondenfelder
Projektkonsortium	Meyer Burger AG Energie Wasser Bern (EWB) SPF Institut für Solartechnik
Projektzeitraum	Januar 2014 - April 2019
Dokumentation	Jahresberichte 2014 – 2016 ([19], [20], [21])

4.2.1 Objekt

Die nachhaltige und autofreie Siedlung Oberfeld in Ostermundigen ist ein Bauprojekt nach Minergie-P-Standard, welches im Rahmen des Programms nachhaltige Quartiere entwickelt wurde (www.wohnen-im-oberfeld.ch). Es besteht aus drei Gebäuden mit insgesamt rund 100 Wohnungen. Jedes der drei Gebäude besitzt sein separates Heizungssystem, bestehend aus Wärmepumpe, Erdsondenfeld und PVT-Solaranlage. Die Niedertemperaturwärme aus den PVT-Kollektoren wird im Sommer zur Regeneration der Erdsondenfelder eingesetzt.

Das Haus C mit einer Anlage von 265 PVT-Kollektoren und 9 Erdsonden wurde im Sommer 2013 als erstes von insgesamt drei Gebäuden realisiert. Im Frühling 2014 wurden die verbleibenden beiden Häuser, B (welches Bestandteil dieses Projektes ist) und A, in Betrieb genommen. Insgesamt wurden 799 (1320 m²) PVT-Kollektoren installiert.

Im Rahmen des P&D Projekts sind das Heizungssystem, die Solardachanlage (379 PVT-Kollektoren) und das Erdsondenfeld (14 Sonden à 200m) von Haus B (5345 m² EBF) mit einem Messsystem ausgestattet worden und werden während fünf Jahren vermessen.

4.2.2 Solaranlage

Die Solaranlage ist auf die verschiedenen Flachdächer der drei Gebäude verteilt und hat insgesamt eine elektrische Leistung von 207.7 kWp. Es sind PVT Kollektoren des Typs Meyer Burger Hybrid 260/900 verbaut, welche mit einem Montagesystem der Firma K2 mittels Laminatklammern in einer horizontalen Ebene (Modulneigung 0°) ausgerichtet sind.



Abbildung 27: PVT Kollektorfelder auf Gebäude C



Abbildung 28: Ansicht von Gebäude B mit Einzeldächer 1-3



Abbildung 29: Übersicht der Überbauung Oberfeld, im Vordergrund Gebäude B, im linken Bereich Gebäude C

4.2.3 Wärmeversorgungskonzept und Einbindung der PVT-Kollektoren

Im Zentrum dieses P&D Projekts steht die Untersuchung der Wärmeversorgung der Überbauung. Dabei werden zwei Anlagenbereiche der Wärmeversorgung detailliert betrachtet - die PVT Anlage und das Erdsondenfeld. Ein weiterer Aspekt betrifft die regelungstechnische Optimierung der Gesamtanlage.

Das Prinzipschema der Anlage ist in Abbildung 30 dargestellt. Die Wärmeversorgung wird pro Gebäude jeweils mit 2 Wärmepumpen (Warmwasser & Heizung) sichergestellt. Die Wärmepumpen beziehen die Wärme aus dem dazugehörigen Erdsondenfeld und/oder der Solaranlage, welche in Serie mit dem EWS-Feld geschaltet ist. Die Niedertemperaturwärme aus den PVT-Kollektorfeldern wird im Sommer hauptsächlich zur Regeneration des Erdsondenfeldes eingesetzt. Die Solaranlage kann aber auch als direkte Quelle für die Wärmepumpe benutzt werden.

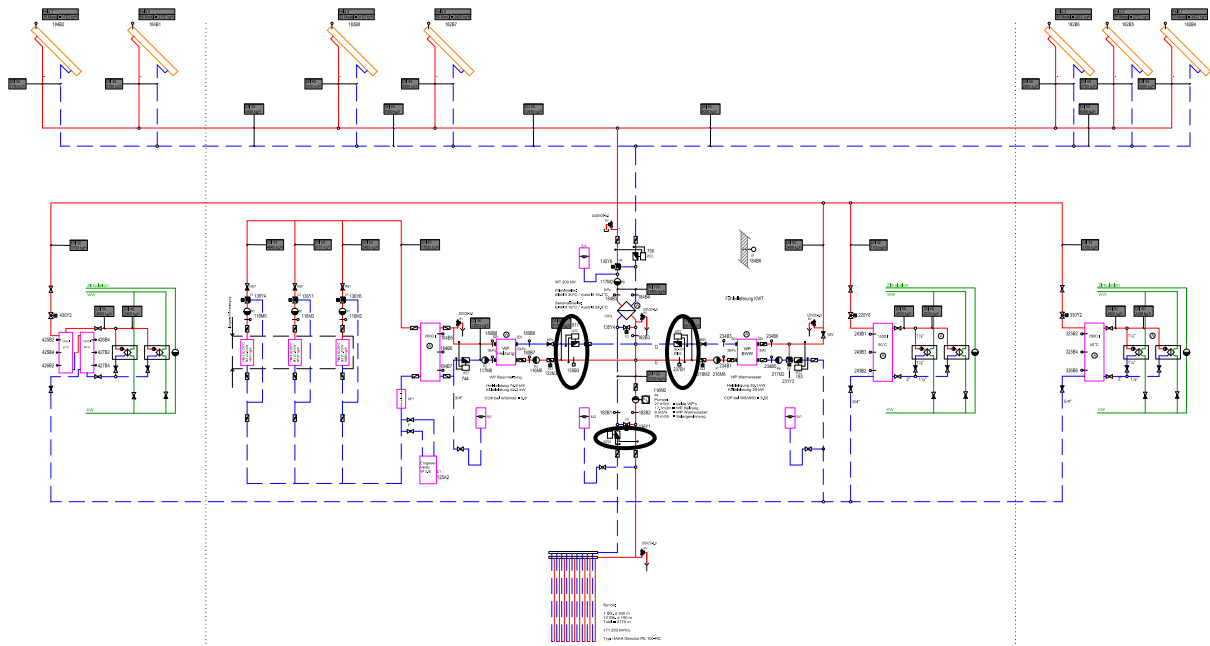


Abbildung 30: Prinzipschema der Wärmeversorgungsanlage von Gebäude B der Wohnbaugenossenschaft Oberfeld, eingekreist sind die erfassten Wärmemengen-Messstellen für das Monitoring im P&D Projekt

4.2.4 Ergebnisse und Erfahrungen des Betriebs der PVT-Anlage

4.2.4.1 Thermisch

Im Betriebsjahr 2015 lag der thermische Solarertrag bei $330 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, im zweiten Betriebsjahr bei $300 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, wobei im 2016 die globale Solarstrahlung mit $1184 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ auch um 8 % tiefer lag als im Vorjahr, und man deshalb nicht von einem Minderertrag sprechen kann. Die thermische Effizienz der Solaranlage liegt im Durchschnitt bei 34 %. Die gewichtete, mittlere Kollektortemperatur lag bei $20.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (2015) und $19.6 \text{ }^\circ\text{C}$ (2016).

In beiden Betriebsjahren wurde das Erdsondenfeld sogar mit einem Überschuss regeneriert (120 % in 2015 und 109 % in 2016). In allen Heizperioden lag die Vorlauftemperatur der Erdsonden im Bereich von $7 - 9 \text{ }^\circ\text{C}$. In der zweiten (2015) und dritten Heizsaison (2016) waren die Vorlauftemperaturen tendenziell leicht höher als in der ersten Heizsaison (2014), trotz eines höheren Heizwärmebedarfs in den beiden späteren Jahren. Dies deutet darauf hin, dass die Regeneration des Erdsondenfeldes wirkungsvoll ist.

Bei dieser Anlagenauslegung ergibt sich eine spezifische Kollektorfläche von 3.7 m^2 pro MWh jährlicher Entzugsenergie der Erdsonden. Die spezifische Regenerationsleistung bei den Erdsonden liegt in der Spitze bei etwa 75 W pro Sondenmeter, die Entzugsleistung liegt im Maximum bei 27 W pro Sondenmeter.

Die thermischen Solarerträge liegen im Bereich der in der Vorprojektphase ermittelten Planungswerte. Eine wesentliche Optimierung des Anlagenbetriebs wurde bei der Erdsondeneintrittstemperatur vorgenommen. Die maximale Rücklauftemperatur ins Erdsondenfeld wurde in zwei Schritten von $21 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $30 \text{ }^\circ\text{C}$ angehoben. Die Aufnahmeleistung des Erdsondenfeldes konnte damit von 80 kW auf über 200 kW erhöht werden. In diesem Zusammenhang musste jedoch auch die Wärmepumpenregelung angepasst werden, da während intensiven Regenerationsphasen die Rücklauftemperatur zur Wärmepumpe häufig über $20 \text{ }^\circ\text{C}$ lag. Dies führte in der Anfangsphase zu Druckstörungen bei der Warmwasserwärmepumpe. Dieses Problem konnte regelungstechnisch gelöst werden.

Eine Erkenntnis aus der Praxis ist, dass bei der Inbetriebnahme solcher grossen Solaranlagenfelder speziell auf eine korrekte Befüllung, Spülung und Entlüftung geachtet werden muss. Idealerweise werden grosse Felder segmentweise befüllt, gespült und in Betrieb genommen. Die Durchflussleistung von Füllpumpen reicht in der Regel etwa für ein Solarfeld von 100 m².

4.2.4.2 Elektrisch

Die elektrischen Erträge der Wechselrichter der Gesamtanlage werden in diesem Projekt nicht erfasst, jedoch sind zwei nebeneinander angeordnete Module der Anlage auf dem Dach von Gebäude B über separate Modulwechselrichter angeschlossen (ein PV Modul und ein PVT Modul). Die elektrischen



Abbildung 31: PVT Modul und PV Modul mit rückseitigen Temperatursensoren ausgestattet

Leistungen dieser zwei Module werden erfasst. Zudem sind jeweils mehrere Temperatursensoren auf der Rückseite dieser beiden Module angebracht. Durch den Einfluss von starkem Pflanzenbewuchs konnte der elektrische Ertragsunterschied von PV und PVT Kollektoren jedoch noch nicht aussagekräftig ausgewertet werden. Es zeigt sich aber, dass die rückseitigen PVT-Temperaturen an sehr sonnigen und warmen Sommertagen nur etwa 40 °C erreichen, im Vergleich zu 70 °C bei den PV Modulen.

4.3 REKA-FERIENDORF BLATTEN BEI NATERS

Projektart	BFE P&D-Leuchtturmprojekt
Projekttitlel	Solare Energieversorgung im alpinen Raum - Reka Feriendorf Blatten
Projektkonsortium	Schweizer Reisekasse (Reka) Genossenschaft ELIMES AG Lauber IWISA AG Hochschule Luzern ZIG
Projektzeitraum	März 2014 - Dezember 2016
Dokumentation	Jahresbericht 2015 [22], Schlussbericht 2016 [23]

4.3.1 Objekt

Das Reka-Feriendorf umfasst 7 Mehrfamilienhäuser mit insgesamt 50 Wohnungen, ein Empfangshaus mit Hallenbad sowie ein Gemeinschaftshaus. Nach der Eröffnung des Feriendorfs im Dezember 2014 wurde dessen Energiesystem während zwei Jahren detailliert vermessen und optimiert.



Abbildung 32: Luftansicht des Reka-Feriendorfs in Blatten bei Naters. (Bild: Schweizer Reisekasse (Reka) Genossenschaft)

4.3.2 Thermischer Energiebedarf

Die gemessenen Bezüge der verschiedenen Wärmesenken sind in der folgenden Tabelle aufgelistet

Tabelle 10: Gemessene Wärmebezüge der verschiedenen Senken.

	2015 [GWh/a]	2016 [GWh/a]
Heizen	316	205
Warmwasser	119	97
Schwimmbad (Bäder, Heizung, Lüftung)	162	167
Verluste	76	94
Total	706	562

Das Feriendorf ist ausgelegt für rund 50'000 Logiernächte pro Jahr. In den ersten beiden Betriebsjahren verzeichnete man 38'000 (2015) bzw. 42'000 (2016) Logiernächte. Durch die Betriebsoptimierung wurde eine deutliche Reduktion des Energiebedarfs vom ersten zum zweiten Betriebsjahr erreicht.

4.3.3 Solaranlage

Die Dächer der 7 Wohnhäuser haben eine Ost-West Ausrichtung und sind beidseitig mit Solaranlagen ausgerüstet. Die PVT-Anlage mit insgesamt 672 m² (102.3 kWp elektrisch) ist auf 4 dieser Häuser installiert. Es handelt sich um dachintegrierte Anlagen mit nicht-abgedeckten ungedämmten PVT-Kollektoren (202 Kollektoren des Typs Hybrid 240/900 Sky und 207 Module des Typs Hybrid 260/900 Sky des Herstellers Meyer Burger). Auf drei Häusern ist eine reine PV-Anlage installiert mit einer Gesamtfläche von 487 m² (70.6 kWp elektrisch).

4.3.4 Wärmeversorgungskonzept und Einbindung der PVT-Kollektoren

Das Konzeptschema der Wärmeversorgung ist in Abbildung 33 dargestellt. Die Wärmeversorgung basiert auf 4 Wärmepumpen und einem Erdwärmesondenfeld mit 31 Sonden à rund 150 m (insgesamt 4'535 Sondenmeter) in Abständen von ca. 5 m.

Die Wärme der PVT-Kollektoren wird hauptsächlich für die Regeneration des Erdsondenfeldes genutzt. Sie kann jedoch auch als Quellwärme für die Wärmepumpen dienen oder direkt sekundärseitig in den Niedertemperaturspeicher eingebracht werden.

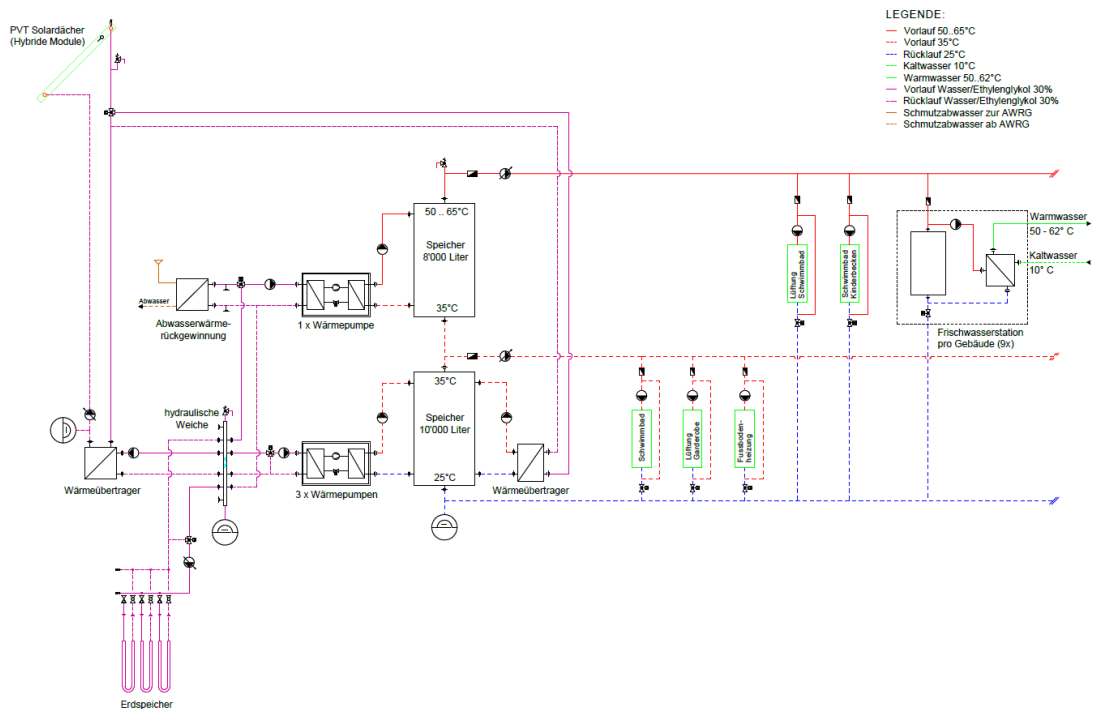


Abbildung 33: Anlagenschema der Wärmeversorgungsanlage des Reka-Feriendorfs Blatten. Quelle: Lauber IWISA AG, Naters.

4.3.5 Ergebnisse und Erfahrungen des Betriebs der PVT-Anlage

4.3.5.1 Thermisch

Der thermische Solarertrag lag im ersten Betriebsjahr bei 325 kWh/m², also insgesamt 218 MWh, und im zweiten Betriebsjahr bei 400 kWh/m² (268 MWh).

Durch die Abwasserwärmerückgewinnung wurde ein Teil der für Schwimmbad und Warmwasser benötigten Wärme wieder dem System zugeführt (55 % in 2015 bzw. 51 % in 2016). Damit betrug die gesamte dem System zugeführte Energie für die Wärmebereitstellung (Wärmebezug abzüglich rückgewonnener Wärme) 551 MWh/a (2015) und 427 MWh/a (2016).

Die jährliche Entzugsenergie des Erdsondenfeldes betrug 345 MWh (2015) bzw. 273 MWh (2016). Mit der vereinfachten Annahme, dass der gesamte thermische Solarertrag für die Erdreichregeneration genutzt wurde, betrug der Regenerationsgrad des Erdsondenfeldes 63 % (2015) bzw. 98 % (2016). Die mittlere EWS-Vorlauftemperatur lag in beiden Jahren bei 9 °C. Eine praktisch vollständige Regeneration und damit Aussicht auf langfristig konstante Erdsonden-Vorlauftemperaturen konnten also bei dieser Anlage mit rund 2.5 m² PVT-Fläche pro MWh Entzugsenergie der Erdsonde im zweiten Betriebsjahr erreicht werden. Die durchschnittliche Regenerationsleistung lag bei 60 W pro Sondenmeter und erreichte Spitzen von 140 W/m bei Eintrittstemperaturen von 23 °C. Im Vergleich dazu beträgt die Entzugsleistung bei Betrieb aller Wärmepumpen 55 W/m.

Die thermischen Solarerträge lagen im ersten Jahr deutlich unter dem projektierten Wert von 450 kWh/(m²a). Zwei mögliche Gründe für die tiefen Erträge wurden identifiziert.

Zum einen konnten durch Wärmebildaufnahmen drei schlecht gekühlte Zonen in den PVT-Feldern gefunden werden (siehe Bilder in Ref. [23]). Im Projektbericht wird dieses Phänomen der schlechten Durchströmung zugeschrieben. Einen ähnlichen Einfluss würde jedoch auch ein mangelhafter Kontakt zwischen Wärmeabnehmer und PV-Modul haben. Zur Verbesserung der Durchströmung wurden alle Felder gespült und entlüftet. In wie fern dadurch eine Verbesserung erzielt werden konnte ist nicht dokumentiert.

Weiteres Optimierungspotenzial wurde in der Anlagenregelung erkannt. In der ersten Betriebsphase war die Einschaltbedingung der Anlage eine Kollektortemperatur von 30 °C. Zudem dauerte die kontinuierliche Öffnung des relevanten Schaltventils mit rund einer Stunde sehr lange. Dies wurde optimiert und die Einschaltbedingung auf 20 °C gesetzt. Die tiefere Einschaltbedingung resultierte gemäss Projektbericht in tieferen Leistungsspitzen und in vermehrtem Anlagenbetrieb bei tieferen Umgebungstemperaturen. Dies ist sicher ein Hauptgrund für die Steigerung des Solarertrages im zweiten Betriebsjahr. Eine weitere Absenkung des Einschaltkriteriums soll geprüft werden.

4.3.5.2 Elektrisch

Die elektrischen Erträge (DC) der PVT- und der PV-Anlage sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Eines der PV-Felder lieferte in beiden Jahren ausserordentlich tiefe Erträge. Die Werte in Klammern entsprechen dem durchschnittlichen PV-Ertrag ohne Berücksichtigung dieses Feldes. Auch die elektrischen Erträge der anderen PV- und PVT-Felder wiesen teilweise relativ starke Unterschiede auf, welche zudem zwischen den beiden Jahren variierten (siehe Details im Projektbericht).

Die elektrischen Erträge pro kWp der PVT-Anlage lagen 2016 höher als diejenigen der PV-Anlage. Die grossen Unterschiede und Schwankungen zwischen den Erträgen der verschiedenen Felder weisen jedoch auf Einflüsse hin, welche unabhängig sind von der Modulkühlung und gegenüber der Modulkühlung dominieren. Es konnte deshalb auf der Basis der Messresultate keine quantitative Aussage über die Ertragssteigerung durch die Modulkühlung gemacht werden.

Tabelle 11: Elektrische Erträge (DC) der Solaranlagen.

Jahr	PVT			PV			Total		
	kWh/(m ² a)	kWh/(kWp·a)	MWh/a	kWh/(m ² a)	kWh/(kWp·a)	MWh/a	kWh/(m ² a)	kWh/(kWp·a)	MWh/a
2015	123	807	83	121 (129)	807 (861)	57	122 (126)	807 (827)	140
2016	130	854	87	116 (123)	779 (826)	55	123 (127)	823 (843)	142

4.3.6 Weitere Bemerkungen

Es war im Projekt ursprünglich geplant, den Schnee, welcher sich auf den PVT-Kollektoren festsetzt, durch Durchspülen der Kollektoren mit warmem Fluid zum Abrutschen zu bringen. Von dieser Option wurde schliesslich aus Sicherheitsgründen abgesehen. Damit waren die Kollektoren jeweils während rund 3.5 Monaten pro Jahr schneebedeckt und lieferten während dieser Zeit weder einen elektrischen noch einen thermischen Ertrag.

4.4 AREAL SUURSTOFFI ROTKREUZ

Projektart	BFE-Projekt
Projekttitel	Monitoring einer thermischen Arealvernetzung in Kombination mit einem Erdsondenfeld
Projektkonsortium	Zug Estates AG Hochschule Luzern ZIG
Projektzeitraum	2012 - 2016
Dokumentation	Jahresbericht 2012 [24], Schlussbericht 2017 [25]

4.4.1 Objekt

Im Suurstoffi Areal in Rotkreuz entsteht seit 2012 eine Überbauung mit gemischter Nutzung. Neben der Wohnnutzung (Hauptanteil) sind Flächen für Gewerbe, Verwaltung und Schule vorgesehen. Die Bebauung des Areals erfolgt in mehreren Etappen und soll bis 2021 abgeschlossen werden. Die Energiebezugsfläche beträgt aktuell 69'646 m² und soll beim fertigen Ausbau des Areals 172'421 m² betragen.

Im Rahmen eines BFE-Projekts wurde die Energieversorgung der ersten Bauetappe (Baufelder 2 und 5) des Areals, von der Planung bis zur Anlagenüberwachung und Optimierung, wissenschaftlich begleitet. Die PVT-Anlage entstand erst in der zweiten Bauetappe (Baufelder 3 und S41), weshalb ein detailliertes Monitoring dieser Anlage im erwähnten Projekt nicht stattfinden konnte.



Abbildung 34: Ein Teil der mit PVT-Kollektoren belegten Mehrfamilienhäuser im Baufeld 3 des Suurstoffi Areals in Rotkreuz. (Bild: Zug Estates AG)



Abbildung 35: Übersichtsschema des Areals Suurstoffi mit den für die solare Energienutzung genutzten bzw. vorgesehenen Dachflächen. Die Gebäude mit blauen und roten Dachflächen sind bereits gebaut und in Betrieb, wobei die blauen Dächer mit PV-Modulen und die roten mit PVT-Kollektoren bedeckt sind. Die Gebäude mit gelben Dachflächen wurden noch nicht gebaut und sollen gemäss aktueller Planung mit PVT-Kollektoren ausgestattet werden. (Bild: Abgeändert aus Ref. [26]).

4.4.2 Solaranlage

Aktuell sind insgesamt 10 Gebäude (9 Mehrfamilienhäuser und 1 Schul- und Bürogebäude) mit PVT-Kollektoren mit einer Gesamtfläche von 3487 m² bedeckt. Die Kollektoren sind vom Typ Meyer Burger Hybrid 260/900 Sky. Weitere 8 Dächer sind mit einer reinen PV-Anlage von insgesamt 2651 m² ausgestattet. Alle Kollektoren und Module sind horizontal installiert.

4.4.3 Wärmeversorgungskonzept und Einbindung der PVT-Kollektoren

Die Wärme- und Kälteversorgung im Suurstoffi-Areal basiert auf einem Anergienetz, welches an einen saisonalen Erdwärmespeicher gekoppelt ist (siehe Schema in Abbildung 36). Aktuell sind 215 Erdsonden à 150 m verbaut. Für die Zukunft sind weitere 180 Sonden à 300 m geplant. Die Wärme für Heizung und Warmwasser wird dezentral über Wärmepumpen in den einzelnen Gebäuden bereitgestellt. Über Free Cooling werden die Gebäude im Sommer gekühlt und wird Wärme ins Anergienetz, bzw. in den Erdspeicher eingespeist.

Das Monitoring der ersten Teile der Areals (Baufelder 2 und 5) ergab, dass der Wärmebezug aus dem Anergienetz mit rund 1.5 GWh/Jahr den Wärmeeintrag durch Free Cooling von ca. 0.6 GWh/Jahr deutlich übertraf und damit übers Jahr keine ausgeglichene Bilanz erreicht werden konnte. Zwischenzeitlich wurden deshalb als Massnahmen gegen das Auskühlen des Erdspeichers Pelletheizungen für die Erwärmung des Anergienetzes und elektrische Stützheizungen für die Warmwasserbereitstellung eingesetzt. Als Teil einer langfristigen Lösung wurde dann bei den Baufeldern 3 und S41 die PVT-Anlage erstellt und im Herbst 2014 in Betrieb genommen.

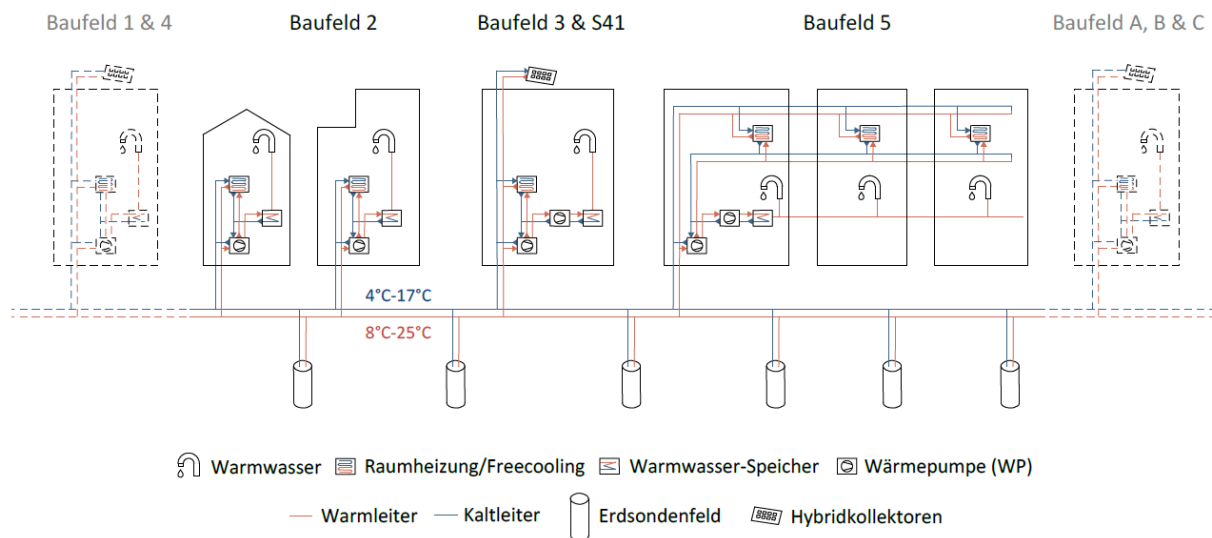


Abbildung 36: Schematische Darstellung des Anergienetzes im Suurstoffi Areal. Die noch nicht realisierten Teile der Überbauung sind gestrichelt abgebildet. Quelle: Schlussbericht [25]. Anders als im Schema dargestellt, sind zwischen den Solaranlagen und dem Anergienetz auch Wärmetauscher eingebaut.

4.4.4 Ergebnisse und Erfahrungen des Betriebs der PVT-Anlage

Wie bereits erwähnt, ist noch keine detaillierte Auswertung der Funktion der PVT-Anlage erfolgt. Angelehnt an die Ergebnisse der P&D-Projekte Oberfeld und Blatten, sollte bei optimiertem Anlagebetrieb ein spezifischer thermischer Ertrag $\geq 300 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und damit ein gesamter solarthermischer Ertrag $\geq 1 \text{ GWh/a}$ erreicht werden können.

Nachdem die übers Jahr gemittelte Temperatur des Anergienetzes vom ersten Betriebsjahr ($12.4 \text{ }^\circ\text{C}$) zum zweiten Betriebsjahr ($11.6 \text{ }^\circ\text{C}$) deutlich gesunken ist, betrug sie im dritten Betriebsjahr $11.5 \text{ }^\circ\text{C}$ und scheint sich somit stabilisiert zu haben. Dies wird im Projektbericht als Indiz dafür angegeben, dass die PVT-Anlage erfolgreich zum Ausgleich der Wärmebilanz des Netzes beitragen konnte. Abschliessende Aussagen wurden jedoch aufgrund fehlender Messdaten noch nicht gemacht.

Gemäss einer Information des Bauherrn könne es im Sommer zeitweise zu einem Konflikt zwischen der solaren Beladung des Erdspeichers und dem Free Cooling kommen. Konkret darf im Anergienetz eine Maximaltemperatur von $17 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht überschritten werden, damit weiterhin Free Cooling betrieben werden kann. Bei hoher solarer Wärmeeinspeiseleistung könne es deshalb nötig sein, dass die PVT-Anlage ausgeschaltet werden muss, um dieses Kriterium nicht zu verletzen. In dieser Hinsicht weist das System also sicherlich noch Optimierungspotenzial auf.

4.5 SPORT- UND FREIZEITZENTRUM LINTH-ARENA SGU NÄFELS

Projektart	BFE P&D-Projekt
Projekttitlel	PVT-Solarkraftwerk Lintharena-sgu: Strom und Wärme vom Dach
Projektkonsortium	ZHAW Wädenswil Energieallianz Linth
Projektzeitraum	September 2014 - Dezember 2019
Dokumentation	Jahresberichte 2014 - 2016 ([27], [28], [29])

4.5.1 Objekt

Bei der linth-arena in Näfels handelt es sich um ein Mehrzweckgebäude, in welchem unter anderem ein Sportzentrum sowie ein Hotel und ein Restaurant untergebracht sind. Die Solaranlage auf dem Dach des Gebäudes wurde im März 2015 in Betrieb genommen.



Abbildung 37: PVT-Anlage von 292 m² auf dem Dach der linth-arena. Quelle: ZHAW Wädenswil.

4.5.2 Solaranlage

Auf dem Dach der linth-arena ist eine PVT-Anlage mit 178 nicht-abgedeckten PVT-Kollektoren des Typs Meyer Burger Hybrid 270/900 (insgesamt 292 m², 48 kWp elektrisch) installiert (Abbildung 37). Zusätzlich ist eine reine PV-Anlage mit 699 Modulen des Typs Meyer Burger Sky 270 installiert (insgesamt 1'146 m², 189 kWp elektrisch). Die Anordnung der verschiedenen Felder ist in Abbildung 38 dargestellt. Die eingesetzten PVT-Kollektoren und PV-Module haben dieselben elektrischen Spezifikationen, was die Bestimmung des durch die Modulkühlung erreichten Mehrertrags der PVT-Kollektoren vereinfacht. Die Ausrichtung aller Module und Kollektoren ist Südost (-24°), bei einem Anstellwinkel von 10°.

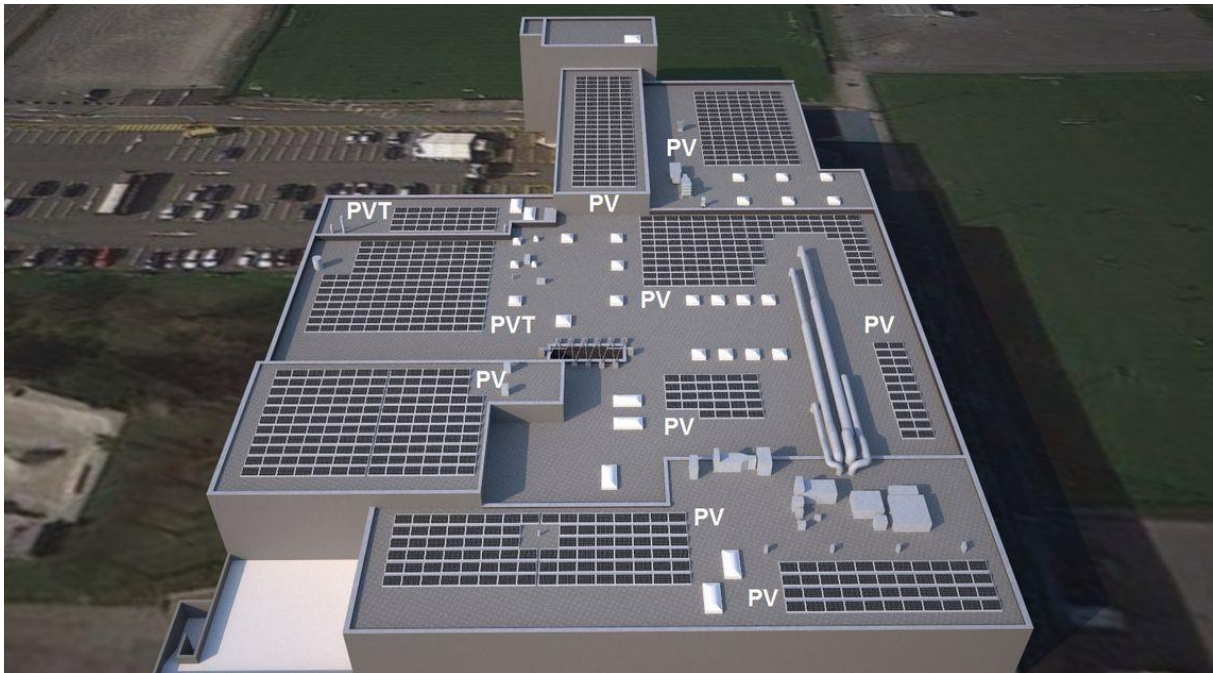


Abbildung 38: Luftansicht der linth-arena im 3D-Modell der Fachgruppe Solartechnik der ZHAW, Quelle: ZHAW Wädenswil. Dargestellt sind die verschiedenen PV-Felder (insgesamt 1'146 m², 189 kWp elektrisch) und das PVT-Feld (292 m², 48 kWp elektrisch).

4.5.3 Einbindung der PVT-Kollektoren

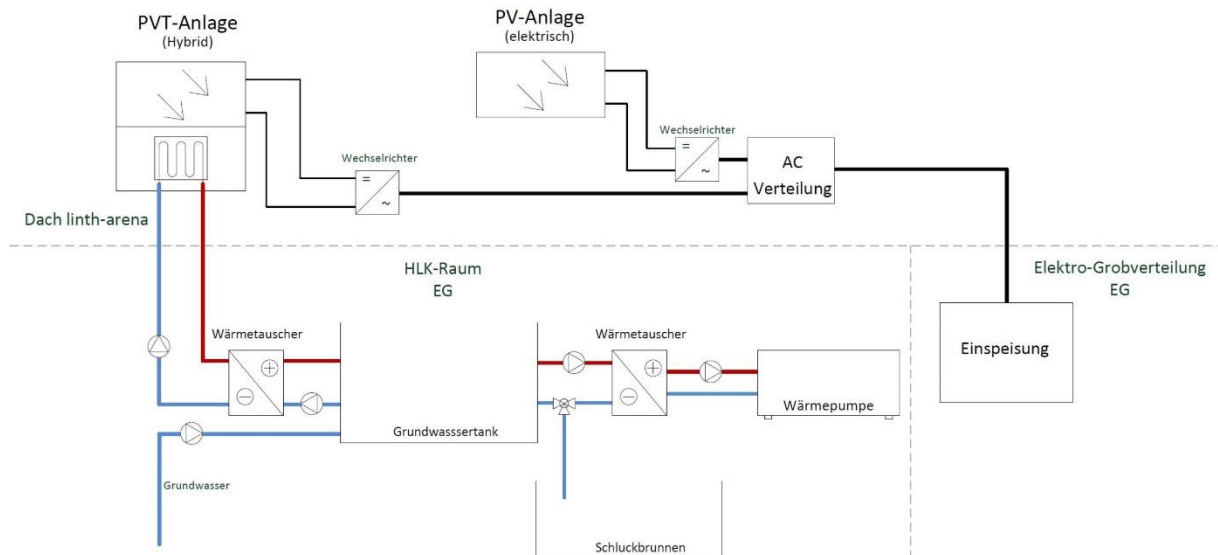


Abbildung 39: Schematische Darstellung der Systemeinkbindung der PVT- und PV-Anlagen der linth-arena. Quelle: ZHAW Wädenswil.

Die Einbindung der PVT-Kollektoren ist in Abbildung 39 schematisch dargestellt. Das in der linth-arena benötigte Warmwasser wird mit Hilfe von zwei Wärmepumpen bereitgestellt. Die Wasser/Wasser-Wärmepumpen beziehen die Wärme aus einem Grundwassertank. Dieser wird von den PVT-Kollektoren über einen Wärmetauscher beheizt. Auf diese Weise erhöht die PVT-Anlage die Quelltemperatur der Wärmepumpen und senkt damit deren Stromverbrauch.

4.5.4 Ergebnisse und Erfahrungen des Betriebs der PVT-Anlage

4.5.4.1 Elektrische und thermische Erträge

Infolge fehlerhafter Komponenten mussten alle Wechselrichter ausgetauscht werden und konnten erst ab April 2016 zuverlässig Messdaten erhoben werden. Aktuell stehen Messresultate der Erträge der Zeitperiode April 2016 - November 2016 (8 Monate) zur Verfügung.

Der thermische Ertrag für diese 8 Monate liegt bei 122'340 kWh bzw. 419 kWh/m². Der Stromertrag der PVT-Anlage für dieselbe Zeitperiode betrug 39'618 kWh bzw. 136 kWh/m². Der elektrische Mehrertrag der PVT-Anlage gegenüber der PV-Anlage (Erträge mit Anlagengrösse normiert) betrug 4.5 %, was einem zusätzlichen Stromertrag von 1'721 kWh dank der Modulkühlung entspricht.

Bruttoertragsberechnungen für denselben Standort ergeben, dass in einem typischen Jahr etwa 20 % des Stromertrags auf die Monate Dezember bis März fallen. Bei einer Kollektormitteltemperatur von 15 °C fallen rund 5 % des Wärmeertrags auf diese Monate. Damit kann aus den gemessenen Erträgen überschlagsmässig auf einen elektrischen Jahresertrag von 170 kWh/(m²a) und einen thermischen Jahresertrag von 440 kWh/(m²a) extrapoliert werden. Der elektrische Mehrertrag gegenüber der PV-Anlage wird übers ganze Jahr betrachtet ungefähr 4 % betragen.

Erwartungsgemäss sind die Einsparungen beim Stromverbrauch der Wärmepumpen gemäss Jahresbericht wesentlich grösser als der durch die Modulkühlung erreichte elektrische Mehrertrag. Dazu wurden jedoch, aufgrund der bisher zu kurzen Messdauer, noch keine Werte veröffentlicht.

4.5.4.2 Weitere Erfahrungen

Mit dem Ziel, die Stromerträge in den Wintermonaten zu erhöhen, wurden Versuche durchgeführt um die PVT-Module von einer Schneebedeckung zu befreien, indem die Module mit Grundwasser beheizt wurden [28]. Dies hat sich als schwierig erwiesen, da sich der Schnee unten bei den Modulen anstaute. Als alternativer Ansatz ist vorgesehen, die Steuerung so anzupassen, dass die Beheizung der Module zukünftig während dem Schneefall erfolgt, so dass sich keine Schneedecke bilden kann.

Die Grundwassertemperatur lag bei 10 - 12 °C und damit im Durchschnitt höher als die bei der Planung angenommenen 5 - 13 °C. Bei tieferen Grundwassertemperaturen würden die Solarerträge noch etwas höher ausfallen.

4.5.4.3 Ausblick

Die wissenschaftliche Betreuung und Auswertung von Messdaten dieser Anlage wird noch während 3 weiteren Jahren bis Ende 2019 erfolgen. Es können hier, insbesondere hinsichtlich der erzielten Stromeinsparung der Wärmepumpen, weitere wertvolle Resultate erwartet werden.

4.6 MINERGIE-A MFH ÜBERBAUUNG SOTCHÀ SCUOL

Projektart	BFE P&D-Projekt
Projekttitel	Drei unterschiedliche, innovative solarunterstützte Wärmeerzeugungssysteme für drei identische Minergie-A-Gebäude
Projektkonsortium	Vassella Energie GmbH Fanzun AG, dipl. Architekten + Ingenieure Caotec, Haustechnik und Solartechnik Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik HSR, Rapperswil
Projektzeitraum	Januar 2015 - Oktober 2018
Dokumentation	Jahresbericht 2015 [30]

4.6.1 Objekt

In der Gemeinde Scuol im Unterengadin ist eine der ersten Minergie-A Überbauungen im alpinen Raum gebaut worden (Abbildung 40). In dieser Überbauung, welche einen Teil des neuen Wohnquartiers Monolith bildet, wurden drei unterschiedliche solarunterstützte Heizsysteme in drei identischen Mehrfamilienhäusern realisiert. Die drei Gebäude (A, B, C) sind baugleich, gleich ausgerichtet und beinhalten je 8 Wohnungen. Ein detailliertes Monitoringsystem wurde installiert und wird einen Vergleich der drei Systeme ermöglichen.

Die alpine Lage stellt wegen der tiefen Aussentemperaturen eine spezielle Herausforderung dar. Sie bietet wegen der hohen Sonneneinstrahlung aber auch Vorteile für das Erreichen des anspruchsvollen Minergie-A Labels.

4.6.2 Wärmeversorgungssysteme und Einbindung der Solaranlagen

Alle drei Häuser verfügen über eine modulierende Sole/Wasser-Wärmepumpe (30 kW Heizleistung), die jeweils an ein eigenes Erdsondenfeld (je 5 Sonden à 170 m) gekoppelt ist. Die weiteren Eigenschaften der drei Wärmeversorgungssysteme sind wie folgt:

Haus A: PV-Anlage (130 m², 21.8kWp elektrisch) mit Stromspeicher (28 kWh). Dieses Gebäude ohne Erdsondenregeneration dient als Referenzsystem.

Haus B: Von der Firma Caotec entwickelte Indach-PVT-Anlage (130 m², 21.8kWp elektrisch) mit nicht-abgedeckten rückseitengedämmten PVT-Kollektoren. Neben der Erdsondenregeneration über einen Sole-Pufferspeicher wird die Solarwärme auch als direkte Quelle für die Wärmepumpe und zur direkten Warmwasservorwärmung genutzt.

Haus C: Thermische Solaranlage (40 m²) mit Flachkollektoren des Typs Alpsun Indach der Firma Caotec. Die restliche Fläche dieses Daches wurde mit PV (90 m²) bedeckt. Die Solarwärme wird primär genutzt zur direkten Brauchwarmwassererwärmung, in zweiter Priorität zur Heizungsunterstützung und an dritter Stelle für die Erdsondenregeneration über einen Sole-Pufferspeicher.

Die PV-Module bei den Häusern A und C sind vom Typ Capillary G/G 280W der Firma Sunage. Alle Solaranlagen sind nach Süden ausgerichtet.

Das Prinzipschema der Einbindung der PVT-Kollektoren (Haus B) bzw. thermischen Solarkollektoren (Haus C) ist in Abbildung 41 dargestellt. Das Volumen der Solespeicher beträgt jeweils 1000 Liter. Das Volumen der Pufferspeicher für Warmwasser und Heizung, in welche die Solarwärme eingespeist wird, beträgt 2000 Liter.



Abbildung 40: Überbauung Sotchà in Scuol, Ansicht auf Gebäude B (PVT) mitte; rechts das Gebäude D mit PV, welches nicht baugleich und daher nicht Bestandteil des Pilot- und Demonstrationsprojektes ist.

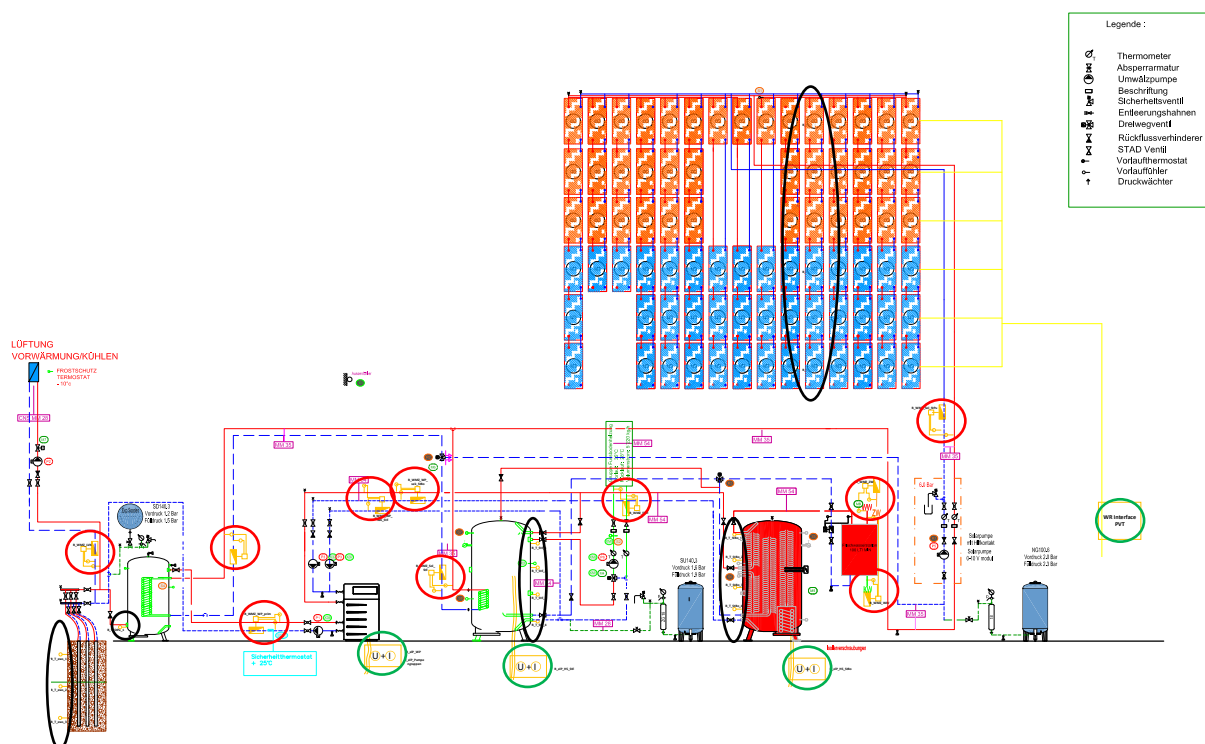


Abbildung 41: Prinzipschema Haus B (PVT), gilt von der Einbindung her auch für Haus C (thermisch), mit eingezeichneten Messstellen für das Monitoring (schwarz = Temperaturmessstellen, rot = Wärmemengen, grün = elektrische Verbraucher)

4.6.3 Ergebnisse und Erfahrungen des Betriebs der PVT-Anlage

Die Wärmesysteme der Gebäude sind Ende 2016 in Betrieb gegangen. Erste Ergebnisse aus der Heizperiode 2016/2017 sind im Frühsommer 2017 zu erwarten und werden in den BFE-Jahresberichten veröffentlicht.

4.7 GESCHÄFTS- UND WOHNGEBÄUDE USTER

Projektart	Privates Bauprojekt; Forschungsprojekt IET HSR Rapperswil
Projekttitel	Monitoring Minergie-A Büronutzung
Projektkonsortium	Bauherr: Hässig Sustech GmbH Auswertung Monitoring: Institut IET HSR Rapperswil
Projektzeitraum	Mai 2014 - April 2016
Dokumentation	Projektbericht R. Schwarz [31] und Brenet Tagungsbeitrag [32]

4.7.1 Objekt

Bei diesem Objekt handelt es sich um ein Büro- und Wohngebäude, welches 2014 in Uster als eines der ersten Minergie-A-Gebäude mit Büronutzung in Betrieb gegangen ist (Abbildung 42). Neben anderen innovativen Gebäudetechnikkomponenten wird eine PVT-Anlage zur Vorerwärmung des Brauchwarmwassers eingesetzt.



Abbildung 42: Büro- und Wohngebäude der Hässig Sustech GmbH in Uster (Bild: Hässig Sustech GmbH)

4.7.2 Thermischer Energiebedarf Warmwasser

Die Monatswerte des Nutzwärmeverbrauchs in Form von Warmwasser sind in Abbildung 43 dargestellt. Unter der Annahme einer Warmwasserentnahmetemperatur von 55 °C und den in Polysun hinterlegten Werten für die Kaltwassertemperatur am Standort Uster entsprechen diese Messwerte einem durchschnittlichen täglichen Warmwasserverbrauch von rund 500 Liter. Die Schwankungen im Warmwasserbedarf sind jedoch relativ gross.

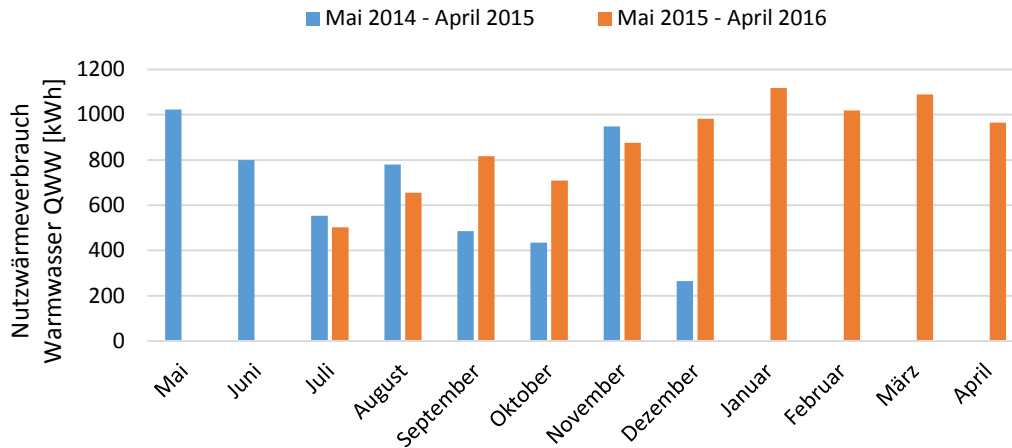


Abbildung 43: Vorhandene gemessene Monatswerte des Nutzwärmeverbrauchs Warmwasser (Werte aus dem Projektbericht [31]; Die Messwerte für Juli, Oktober und November 2015 wurden hier aufskaliert um Datenlücken zu kompensieren.)

4.7.3 Solaranlage

Auf dem nach Südost ausgerichteten und 35° geneigten Dach sind nicht-abgedeckte PVT-Kollektoren des Typs Powervolt der Firma Solimpeks mit einer Gesamtfläche von 7.1 m² (1 kWp elektrisch) installiert. Auf dem Südwest-Dach ist zusätzlich eine PV-Anlage mit einer elektrischen Leistung von 23.7 kWp verbaut.

4.7.4 Einbindung der PVT-Kollektoren

Das Wärmeversorgungssystem des Gebäudes basiert auf einer erdsondengekoppelten Wärmepumpe. Die Wärme der PVT-Anlage wird ausschliesslich zur Vorwärmung des Brauchwarmwassers eingesetzt (Abbildung 44). Die Anlage belädt über einen Wendelwärmetauscher einen Vorwärmerspeicher mit einem Volumen von 500 Liter. Ein zusätzlicher Bereitschafts-Warmwasserspeicher mit einem (relativ grossen) Volumen von 1000 Liter wird von der Wärmepumpe auf 53 °C nachgeheizt. Zwecks Legionellenprävention wird der Bereitschaftsspeicher einmal wöchentlich durch einen Elektroheizstab auf 60 °C erwärmt.

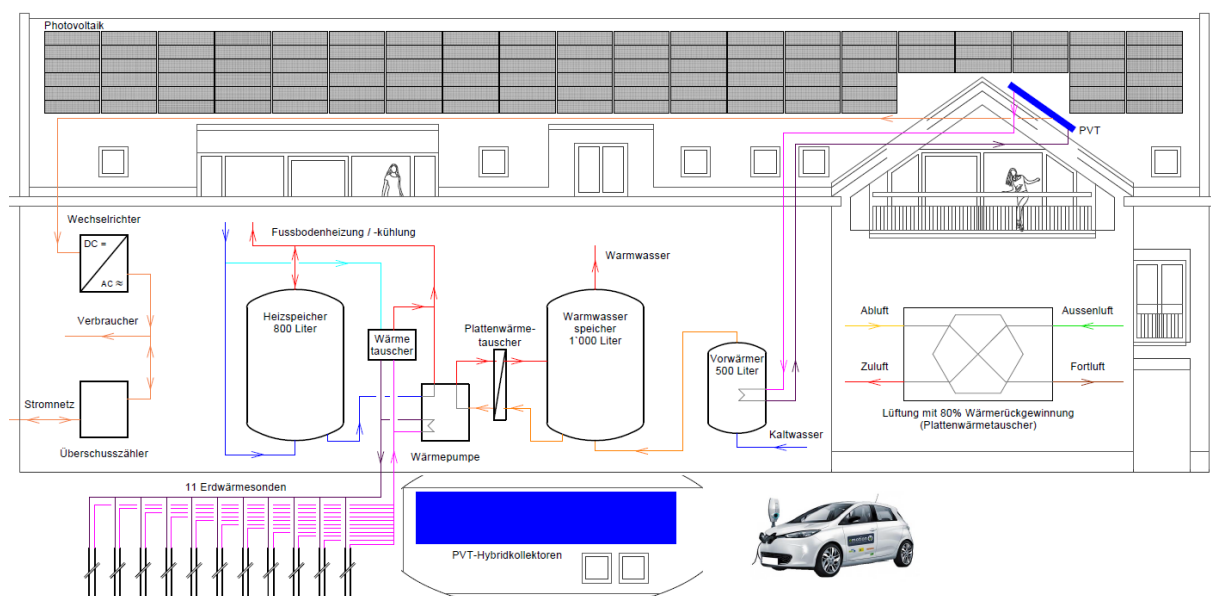


Abbildung 44: Schematische Darstellung des Energiesystems des Gebäudes der Hässig Sustech GmbH [31].

4.7.5 Ergebnisse und Erfahrungen des Betriebs der PVT-Anlage

Gemittelt über die beiden ersten Betriebsjahre betrug die solare Einstrahlung in der PVT-Kollektorebene 1192 kWh/(m²a). Die PVT-Anlage lieferte einen elektrischen AC-Ertrag von 125 kWh/(m²a). Der thermische Solarertrag Q_{Sol} , gemessen am Speichereingang, betrug im Schnitt rund 210 kWh/(m²a).

Hier ist zu erwähnen, dass der eingesetzte PVT-Kollektor im Vergleich mit den in den anderen vorgestellten Anlagen eingesetzten Produkten tiefere elektrische und thermische Leistungskennwerte aufweist (siehe Anhang).

Um den Beitrag der Solarwärme zum gesamten Energieaufwand für die Warmwasserbereitung zu beziffern wird hier der solare Deckungsgrad definiert als

$$DG_{WW} = \frac{Q_{Sol}}{Q_{Sol} + Q_{WP,WW} + Q_{HS}},$$

wo $Q_{WP,WW}$ die von der Wärmepumpe und Q_{HS} die vom Heizstab an den Bereitschaftsspeicher abgegebenen Wärmemengen bezeichnen. Mit den Messwerten aus dem Projektbericht [31] ergibt sich für die zwei Messjahre ein Wert für den Deckungsgrad von $SDG_{WW} = 13.2\%$.¹⁶ In den Sommermonaten erreicht der Deckungsgrad Werte um 30%. Wenn der Energieaufwand der elektrischen Begleitheizbänder (nach Betriebsoptimierung), welche im Warmwasser-Verteilssystem eingesetzt werden, miteinbezogen wird, so reduziert sich der Jahreswert des solaren Deckungsgrads auf 10.5%.

Die Dimensionierung der PVT-Anlage in diesem System ist relativ klein, mit rund 0.7 m² Kollektorfläche pro 50 Liter Warmwasserverbrauch bei 55 °C.

4.8 PVT-TESTANLAGE SPF RAPPERSWIL

Projektart	Forschungsprojekt SPF HSR Rapperswil
Projektzeitraum	Mai 2013 - April 2014
Dokumentation	Brenet Tagungsbeitrag [33]

4.8.1 Objekt

Die Anlage wurde auf dem Testdach des Instituts für Solartechnik SPF an der Hochschule Rapperswil installiert. Während einem kompletten Jahr (Mai 2013 bis April 2014) wurde die Anlage wie eine Warmwasser-Vorwärmanlage betrieben und detailliert vermessen, und es wurde der durch die Modulkühlung erzielte elektrische Mehrertrag ermittelt.

¹⁶ Für die fehlenden Monatswerte in den Messdaten wurde jeweils der Wert des entsprechenden Monats des anderen Jahres eingesetzt.



Abbildung 45: Testanlage am SPF. 2 PV-Module am linken Feldrand und 6 PVT-Module mit gleichen elektrischen Spezifikationen.

4.8.2 Solaranlage

Auf dem nach Süden ausgerichteten und 45° geneigten Dach sind 6 nicht-abgedeckte PVT-Kollektoren des Typs Meyer Burger Hybrid 240/900 installiert (9.9 m², 1.44 kWp elektrisch). Zusätzlich sind 2 PV-Module mit gleichen elektrischen Spezifikationen installiert (3.3 m², 0,48 kWp elektrisch). Die elektrische Leistung der Module wurde über individuelle Modulwechselrichter und MPP-Tracker ins Stromnetz eingespeist.

4.8.3 Einbindung der PVT-Kollektoren und thermischer Energiebedarf

Die Wärme der PVT-Kollektoren wird über einen Wendelwärmetauscher an einen 500 Liter Vorwärmespeicher abgegeben. Dem Vorwärmespeicher wurden täglich 600 Liter Wasser entnommen, mit einem typischen Zapfprofil für ein Mehrfamilienhaus. Ein System zur Nachheizung des Wassers auf die Gebrauchstemperatur wurde nicht installiert. Der Warmwasser-Nutzwärmeverbrauch für eine angenommene WW-Temperatur von 55 °C, wurde basierend auf den gemessenen Kaltwassertemperaturen und den dem Speicher entnommenen Wassermengen berechnet und ist in der folgenden Abbildung dargestellt.¹⁷

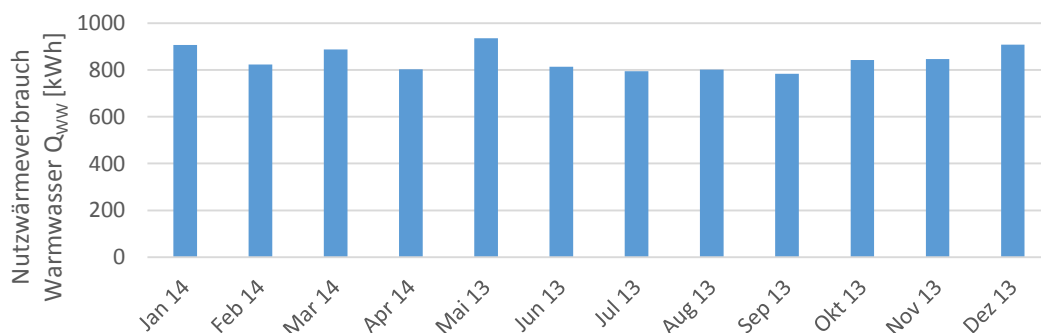


Abbildung 46: Nutzwärmebedarf Warmwasser für eine WW-Temperatur von 55 °C.

¹⁷ Es handelt sich hierbei um den Nutzwärmeverbrauch eines fiktiven Systems, bestehend aus dem System der Testanlage erweitert um einen Warmwasser-Bereitschaftsspeicher mit Nachheizung.

4.8.4 Ergebnisse und Erfahrungen des Betriebs der PVT-Anlage

4.8.4.1 Solarerträge

Die Solarstrahlung in der Kollektorebene lag im Messjahr bei 1425 kWh/m^2 und damit rund 15 % über einem typischen Wert für den Standort Rapperswil, wie er von der Software Meteonorm¹⁸ ausgegeben wird. Die PVT-Anlage erzielte einen thermischen Ertrag von 279 kWh/m^2 (gemessen am Kollektorfeld) und einen elektrischen Ertrag DC von 176 kWh/m^2 . Die entsprechenden Monatswerte sind in Abbildung 47 dargestellt. Die PV-Anlage erreichte mit 169 kWh/m^2 einen um rund 4 % geringeren Stromertrag als die PVT-Anlage.

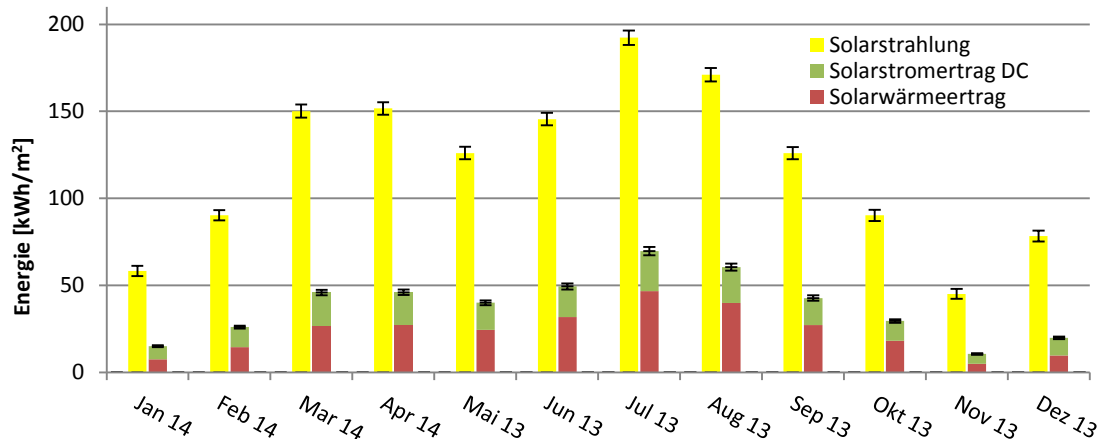


Abbildung 47: Monatswerte für die Solarstrahlung und der Erträge der PVT-Anlage auf dem SPF-Testdach.

In gleicher Weise wie in Abschnitt 4.7.5 kann hier der solare Deckungsgrad für die Warmwassererwärmung angegeben werden¹⁹. Übers Jahr gerechnet betrug der solare Deckungsgrad rund 24 %. In den Sommermonaten wurden Deckungsgrade im Bereich von 50 % erreicht (siehe Abbildung 48).

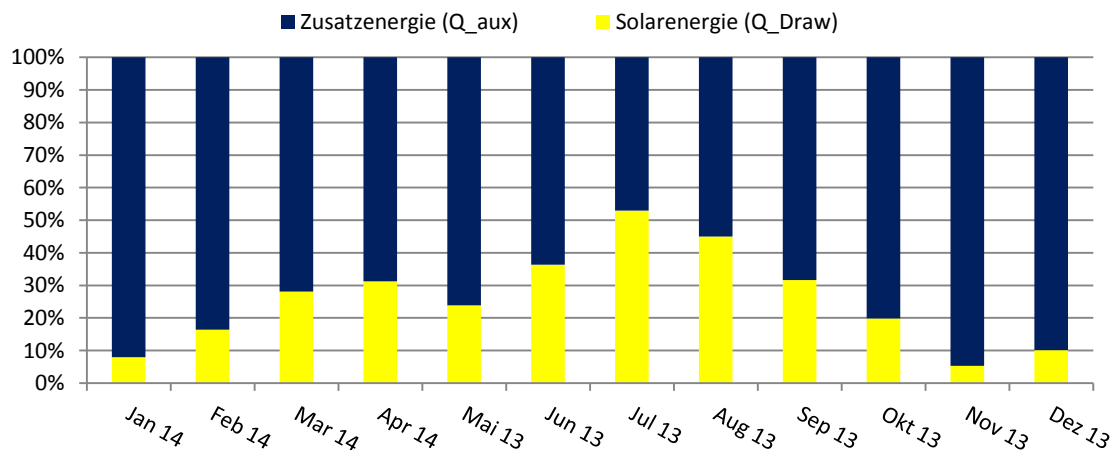


Abbildung 48: Anteile der Brauchwarmwasser-Nutzenergie, welche durch die solare Vorwärmung, respektive die (fiktive) konventionelle Nachheizung abgedeckt wurden. Es wurde eine Warmwasser-Entnahmetemperatur von $55 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen.

¹⁸ www.meteonorm.com

¹⁹ Vereinfachend wird die Annahme gemacht, dass in einem Nachheizspeicher, wie er in einer realen Anlage vorhanden wäre, prozentual gleich grosse Wärmeverluste auftreten würden wie beim Vorwärmespeicher.

4.8.4.2 Elektrischer Mehrertrag PVT gegenüber PV

Zusätzlich zur elektrischen Leistungsmessung an PVT- und PV-Modulen wurden die Rückseitentemperaturen beider Modultypen gemessen. An einem schönen Sommertag (2.8.2013) erreichte der Temperaturunterschied zwischen PVT- und PV-Rückseiten ein Maximum von 22 °C (Abbildung 49). In diesem Moment generierten die PVT-Kollektoren 17 % mehr elektrische Leistung pro m² als die PV-Anlage. Über den Tag summiert betrug der elektrische Mehrertrag 8.2 %.

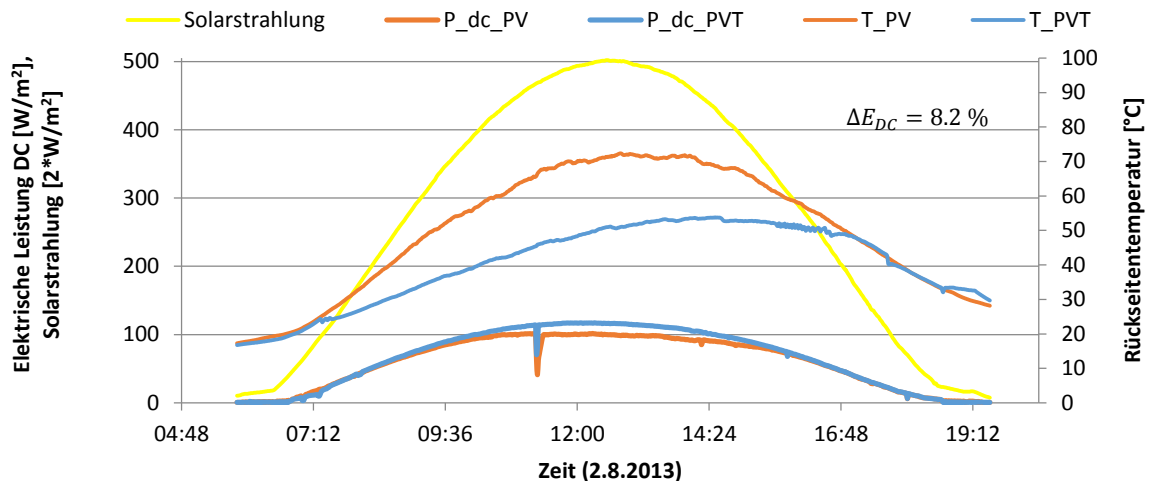


Abbildung 49: Solarstrahlung sowie elektrische Leistung und Rückseitentemperaturen der PVT-Kollektoren und PV-Module an einem schönen Sommertag.

Die elektrischen Mehrerträge für die verschiedenen Monate sowie die mit der elektrischen Leistung gewichteten Modulrückseitentemperaturen sind in Abbildung 50 dargestellt. Die Mehrerträge der Monate November 2013 bis Februar 2014 können nicht allein als Konsequenz der Modulkühlung interpretiert werden, da in diesen Monaten zeitweise Verschattungen auftraten. In der Jahressumme betrug der elektrische Mehrertrag $(4.1 \pm 1.8) \%$.

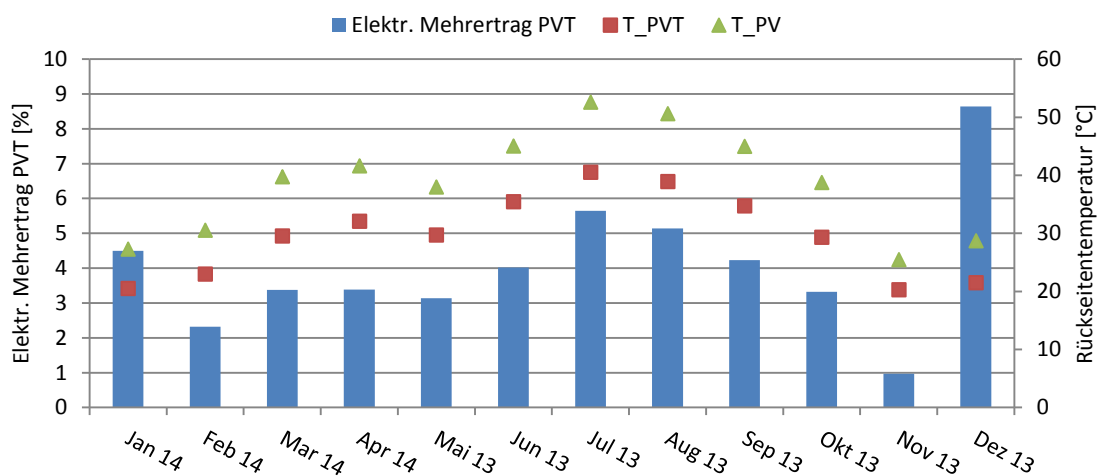


Abbildung 50: Monatliche elektrische Mehrerträge der PVT-Kollektoren gegenüber den PV-Modulen sowie die mit der elektrischen Leistung gewichteten Mittelwerte der Rückseitentemperaturen.

4.8.4.3 Weitere Bemerkungen

In den Wintermonaten kam es zu Verschattungen bei einem Teil des PVT- und des PV-Feldes, was eine leichte Reduktion der Erträge verursachte.

Die thermische Effizienz ist stark abhängig von der Kaltwassertemperatur. Diese war bei der Testanlage mit einem Mittelwert von 15.7 °C über den Messzeitraum, und insbesondere in den Sommermonaten, überdurchschnittlich hoch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das verwendete Kaltwasser zwischen dem Kaltwassernetz und dem Speicher der Testanlage eine relativ grosse Strecke im Gebäude zurückzulegen hatte. Simulationen ergeben, dass der thermische Ertrag bei um 2 °C tiefer liegenden Kaltwassertemperaturen rund 7 % höher und für die von Polysun berechneten Kaltwassertemperaturen sogar 17 % höher ausfallen würde. Tiefere Kaltwassertemperaturen hätten auch einen positiven Einfluss auf die Modulkühlung und damit auf den elektrischen Mehrertrag der PVT-Module gegenüber den PV-Modulen.

Die Dimensionierung der PVT-Anlage in diesem System betrug 0.83 m² Kollektorfläche pro 50 Liter Warmwasserverbrauch bei 55 °C. Damit ist die Anlage etwas grösser dimensioniert als die Anlage von Abschnitt 4.7. Beim Vergleich der Resultate ist jedoch zu beachten, dass sowohl die eingesetzten PVT-Kollektoren als auch die Randbedingungen wie Solarstrahlung und Kaltwassertemperaturen unterschiedlich waren.

4.9 ÜBERBAUUNG SENTMATT OBFELDEN

Projektart	BFE P&D-Projekt
Projekttitel	Emissionsfreie Wärmezeugung mit tiefer Erdwärmesonde, effizienter Niederhub-Wärmepumpe und optimierter Wärmeverteilung
Projektkonsortium	Allianz 2Sol Halter Immobilien AG SPF Institut für Solartechnik
Projektzeitraum	Dezember 2015 - Dezember 2020

Im Pilot- und Demonstrationsprojekt Obfelden wird eine emissionsfreie Wärmeversorgung von drei Gebäuden mit neuen Technologien erprobt. Zudem werden ein zentraler und ein dezentraler Systemansatz verglichen.

Das Wärmeversorgungssystem ist in zwei Teilbereiche (A und B) gegliedert:

Im ersten und grösseren Teilbereich (A) wird für 108 Wohnungen eine Anlage mit konventionellen Doppel-U-Rohr Erdwärmesonden realisiert, welche mit einer Kombination von 294 m² nicht-abgedeckten PVT-Kollektoren, 113 m² nicht-abgedeckten thermischen Kollektoren und einem Luft/Wasser-WT regeneriert werden. An das Erdwärmesondenfeld ist eine zentrale Ammoniak-Wärmepumpe (300 kW) angeschlossen.

Im zweiten Teilbereich (B) werden 2 Wohnzonen (je 5 Wohnungen) mit je einer Niederhub-Wärmepumpe der Leistungsklasse 17 kW und einer Membran-Erdwärmesonde à 450 m Länge ausgestattet. Die dazugehörige Solaranlage wird aus jeweils etwa 50 m² nicht-abgedeckten PVT-Kollektoren und 20 m² nicht-abgedeckten thermischen Kollektoren bestehen.

Im Zusammenhang mit PVT-Kollektoren wird in diesem Projekt insbesondere deren Eignung zur Regeneration von tiefen Erdwärmesonden untersucht.

Das zentrale Heizsystem wird im Frühsommer 2017 in Betrieb gehen. Die Inbetriebnahme der dezentralen Systeme ist für Sommer 2017 vorgesehen.

4.10 WEITERE BEISPIELANLAGEN

Vier weitere typische oder speziell interessante Anlagebeispiele werden in diesem Abschnitt mit Eckdaten aufgeführt. Detaillierte Betriebserfahrungen und/oder Messdaten standen bei diesen Anlagen nicht bzw. noch nicht zur Verfügung.

4.10.1 Einfamilienhaus Saxon

Objekt, Ort	Einfamilienhaus, Saxon (VS)
Solaranlage, Typ, Fläche	6 nicht-abgedeckte flüssiggekühlte PVT-Kollektoren (DualSun Wave), 10 m ² 6 PV-Module (DualSun Flash), 10 m ²
Einbindung der PVT-Kollektoren	Solare Warmwassererwärmung: 400 Liter Warmwasserspeicher mit elektrischer Nachheizung (6 kW)
Informationsquelle	www.dualsun.fr

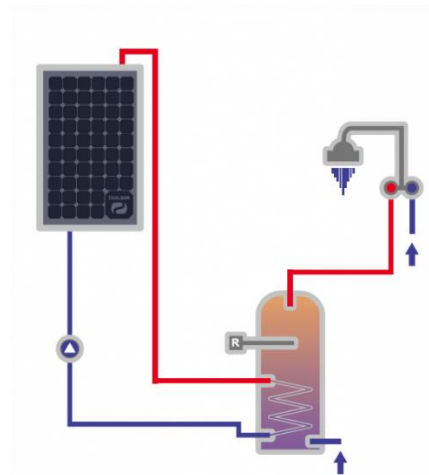


Abbildung 51: Anlage in Saxon zur solaren Brauchwarmwassererwärmung und entsprechendes Prinzipschema (Bilder: DualSun).

4.10.2 Aussenbad Saint-Livres

Objekt, Ort	Privates Freibad, Saint-Livres (VD)
Solaranlage, Typ, Fläche	8 nicht-abgedeckte flüssiggekühlte PVT-Kollektoren (DualSun Wave), 13.3 m ² 6 thermische Kollektoren (Agena mit Absorber von Energie Solaire) Abgedeckte Hybridkollektoren (Hörmann, ehemals Solarhybrid AG), 12 m ² PV-Anlage 5 kWp
Einbindung der PVT-Kollektoren	Solare Beheizung eines Aussenbades und eines 200 Liter Speichers für die Schwimmbad-Dusche
Informationsquelle	www.dualsun.fr

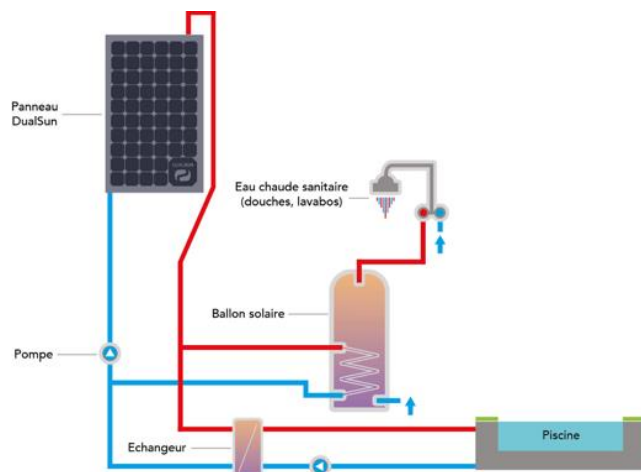


Abbildung 52: Anlage in Saint-Livres zur solaren Freibadbeheizung und entsprechendes Prinzipschema (Bilder: DualSun).

4.10.3 Überbauung „Wohnen zur Post“ Watt-Regensdorf

Objekt, Ort	Überbauung „Wohnen zur Post“, 4 Mehrfamilienhäuser, Watt-Regensdorf (ZH)
Solaranlage, Typ, Fläche	4 x 62 nicht-abgedeckte flüssiggekühlte PVT-Kollektoren (Poly Solar Solutions PIK), total 413 m ²
Einbindung der PVT-Kollektoren	Erdsondengekoppeltes Wärmepumpen-Heizsystem (Bion Bauhaus AG), PVT-Kollektoren als direkte Wärmequelle der WP, zur direkten Versorgung der Fussbodenheizung und zur Erdsondenregeneration bzw. Kühlung der PVT-Kollektoren
Informationsquellen	www.pss-ag.com www.bionbauhaus.ch



Abbildung 53: Komplett- und Dachansicht eines der Mehrfamilienhäuser der Überbauung „Wohnen zur Post“ in Watt-Regensdorf (Bilder: Poly Solar Solutions AG).

4.10.4 Überbauung „MFH Freihof“ Andwil

Objekt, Ort	Überbauung „Freihof“, 2 Mehrfamilienhäuser à 6 Wohneinheiten, Andwil (SG)
Solaranlage, Typ, Fläche	2 x 90 nicht-abgedeckte flüssiggekühlte PVT-Kollektoren (Poly Solar Solutions PIK), total 296 m ²
Einbindung der PVT-Kollektoren	Eisspeicher-Wärmepumpen Heiz- und Kühlsystem (Bion Bauhaus AG), jeweils 148 m ² PVT-Kollektoren zur Regeneration eines 80 m ³ Eisspeichers, als direkte Wärmequelle der WP und zur direkten Versorgung der Fussbodenheizung
Informationsquellen	www.pss-ag.com www.bionbauhaus.ch Zeitungsartikel Ostschweizerrundschau [34] Fachartikel HK-Gebäudetechnik [35]



Abbildung 54: Ansicht eines der Mehrfamilienhäuser der Überbauung „MFH Freihof“ in Andwil mit schematischer Darstellung des Wärmeversorgungssystems (Bilder: Bion Bauhaus AG, Poly Solar Solutions AG).

4.10.5 Weitere Hinweise

Ein paar Anlagen, welche mit abgedeckten PVT-Kollektoren (hauptsächlich in Grossbritannien) realisiert wurden, sind in Ref. [36] beschrieben. Anlagenbeispiele mit abgedeckten Kollektoren der Firma EndeF (Ecomesh) werden auf der Firmenhomepage präsentiert (<http://ecomesh.es/>).

Einige interessante Beispiele von realisierten Luft-PVT-Anlagen für die Trocknung von Holz und Landwirtschaftsprodukten werden auf der Webseite der Firma BASE Innovation vorgestellt (www.base-innovation.com).

5 UMFRAGEERGEBNISSE

Mit Planung, Montage oder Betrieb von PVT-Anlagen haben in der Schweiz bereits einige Firmen Erfahrungen machen können. Um diese Erfahrungen zu sammeln und auszuwerten wurde eine Umfrage unter Herstellern, Systemanbietern, Planern und Installateuren durchgeführt. Es wurden alle Mitglieder von Swissolar angeschrieben, sowie gezielt einige zusätzliche Unternehmen, die beispielsweise von Herstellern als Partnerfirmen genannt wurden oder in einer der aufgeführten Fallstudien bereits mit PVT gearbeitet haben.

Im Segment der Hersteller wurden insbesondere Firmen im deutschsprachigen Raum und solche die in der Schweiz aktiv sind kontaktiert und befragt. Es haben insgesamt 7 Hersteller im Bereich von nicht-abgedeckten flüssiggekühlten PVT-Kollektoren an der Umfrage teilgenommen, sowie ein Hersteller eines luftgekühlten PVT-Kollektors.

Der Fragebogen für Systemanbieter, Planer und Installateure wurde an knapp 600 Adressen per E-Mail versendet. Es kamen insgesamt 128 Rückläufe, wovon 28 der Teilnehmer direkt per Mail geantwortet haben. Diese hatten in der Regel noch keine PVT-Anlage geplant oder installiert. 100 Teilnehmer haben einen ausgefüllten Fragebogen zurückgeschickt. Mehr als 80 % der Firmen geben an, bisher kein PVT geplant oder installiert zu haben, nur knapp 20 % waren bereits bei einer oder mehreren PVT-Anlagen involviert. Es haben sich Unternehmen aus allen Regionen der Schweiz beteiligt: 81 % der Teilnehmer kommen aus der Deutschschweiz, 17 % aus der Westschweiz und 2 % aus dem Tessin (Abbildung 55).



Abbildung 55: Regionale Aufteilung der antwortenden Firmen, aufgeteilt nach Firmen, die bereits PVT-Projekte umgesetzt haben und solchen, die noch keine umgesetzt haben

Von den angeschriebenen Firmen haben bei Swissolar 24 % angegeben, dass sie im Solarbereich ausschliesslich im Wärmebereich tätig sind, 45 % im Solarstrombereich und 31 % machen sowohl Solarwärme als auch Solarstrom. Bei den antwortenden Firmen, die bisher weder eine PVT-Anlage vertrieben noch geplant oder gebaut haben, ist die Verteilung ähnlich. Anders sieht es dagegen bei den Firmen aus, die bereits im PVT-Bereich tätig sind, hier ist der Anteil Firmen, die sowohl Solarwärme als auch PV machen, mit 60 % etwa doppelt so hoch (Abbildung 56). Bei ihnen passt PVT wesentlich besser ins Firmenprofil (vgl. Abbildung 64: Gründe der befragten Firmen kein PVT einzusetzen).

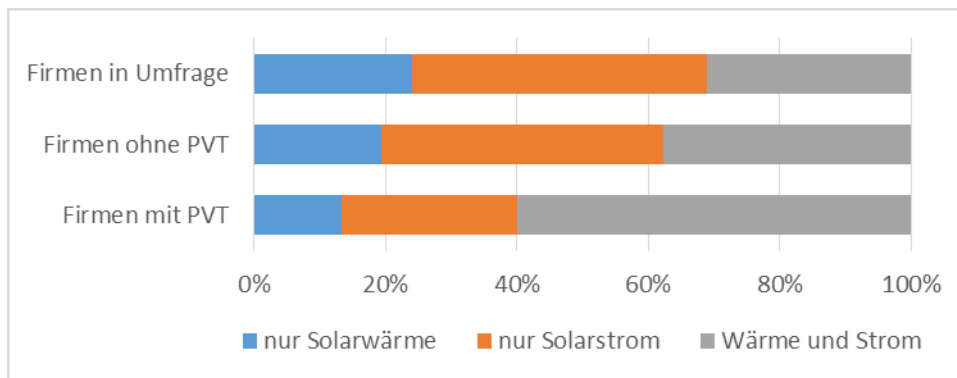


Abbildung 56: Anteil der Firmen, die nur Solarwärme, nur Solarstrom oder beides machen für alle angeschriebenen Firmen sowie die Rückläufer, die noch kein PVT gemacht haben und die bereits PVT einsetzen

Zwei Drittel der Teilnehmer sind Installateure, ein Viertel Systemanbieter und gut die Hälfte sind als Planer tätig, wobei viele mehrere Bereiche abdecken. Etwa jeder Achte gibt an zusätzlich oder ausschliesslich in einem anderen Bereich wie zum Beispiel Projektentwicklung, Energieberatung oder Contracting tätig zu sein.

Unter den Herstellern von PVT-Kollektoren haben acht an der Umfrage teilgenommen, davon drei aus Deutschland, zwei Schweizer Unternehmen, ein österreichisches und zwei französische. Bis auf einen stellen alle Hersteller flüssiggekühlte Kollektoren her. Als Wärmeträgermedium dient ein Wasser-Glykol-Gemisch, bei zwei Herstellern ist alternativ auch reines Wasser möglich. Alle Systeme sind nicht abgedeckt und basieren auf Standard PV-Modulen.

5.1 PVT IM EINSATZ

5.1.1 Angebot und Preise

Wer unter den Installateuren, Planern und Systemanbietern bereits mit PVT zu tun hatte, hat zu über 90 % flüssiggekühlte nicht-abgedeckte Flachkollektoren eingesetzt. Luftgekühlte Flachkollektoren sind dagegen die Ausnahme. Diese werden nur von zwei Teilnehmern verwendet welche als Distributor und Installateur zusammen arbeiten. Ein weiterer Teilnehmer setzt beide Kollektortypen ein. Die meisten Unternehmen verwenden genau einen Kollektortyp, einige haben aber auch zwei Kollektorhersteller im Programm. Insgesamt kommen Produkte von neun verschiedenen Herstellern aus der Schweiz, Österreich, Deutschland, Italien und der Türkei zum Einsatz.

Die meisten Teilnehmer vertreiben oder verbauen neben dem reinen PVT-Kollektor weitere Systemkomponenten. Am häufigsten werden Montagesystem, Verrohrung für das Kollektorfeld und Wechselrichter genannt, gefolgt von Steuerung, weiteren Hydraulikkomponenten (MAG, Pumpen, Wärmetauscher) und Wärmespeicher (Abbildung 57). Knapp die Hälfte führen alle der genannten Komponenten. Auch alle teilnehmenden Hersteller bieten neben dem PVT-Kollektor weitere Systemkomponenten an. Dies kann entweder ein bestimmtes Kit für Einfamilienhäuser sein oder auch nur das Montagesystem bis hin zum gesamten Spektrum der aufgeführten Komponenten.

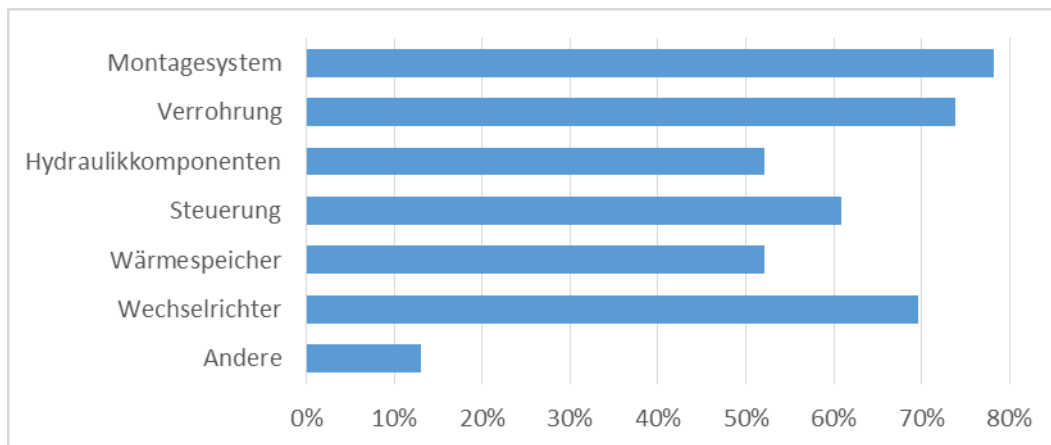


Abbildung 57: Neben PVT-Kollektoren installieren oder vertreiben die meisten Teilnehmer weitere Systemkomponenten

Gut die Hälfte der Firmen macht Angaben zum Preis des PVT-Kollektors mit oder ohne Montage für den Endkunden. Bei Anlagen kleiner 50 m² reicht die Preisspanne pro Kollektor von 400 bis 1'050 CHF, bei grösseren Mengen beginnt sie bei 350 CHF. Die eingesetzten Kollektoren haben eine Fläche von 1.5-1.7 m², der Quadratmeterpreis liegt damit zwischen 210 und 650 CHF. Der Endkundenpreis für ein Kollektorfeld fertig montiert mit Systemgrenze Dachrand liegt zwischen 400 und 2'000 CHF pro m². Bei Anlagen grösser 50 m² beginnt die Spanne bei 300 CHF pro m².

5.1.2 PVT-Systemeinbindung

PVT-Kollektoren wurden laut eigenen Angaben von den Teilnehmern bereits in allen im Kapitel Systemeinbindung beschriebenen Varianten für flüssiggekühlte nicht-abgedeckte Kollektoren eingesetzt. Die Verteilungsangaben sind bei Herstellern einerseits und Systemanbietern, Planern und Installateuren andererseits sehr ähnlich. Knapp die Hälfte der Anlagen wird in Verbindung mit Wärmepumpensystemen verbaut, wobei die Wärme am häufigsten zur Erdsondenregeneration eingesetzt wird. Aber auch Eispeicher- und Solespeicherbeladung sowie Grundwasservorwärmung kommen vor. Bei einer ähnlich grossen Anzahl Anlagen dienen PVT-Kollektoren der Brauchwassererwärmung oder -Vorwärmung, wobei ein kleinerer Teil zusätzlich auch zur Heizungsunterstützung eingesetzt wird. Die Schwimmbadbeheizung macht etwa 7-9 % der Anlagen aus (Abbildung 58). Bei vielen Wärmepumpensystemen kann die Wärme zusätzlich auch auf der Sekundärseite eingespeist werden, zur Warmwasser- oder Pufferspeicherbeladung. Darüber hinaus werden luftgekühlte PVT-Kollektoren auch zur Vorwärmung von Luft eingesetzt, welche als Wärmequelle für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe dient.

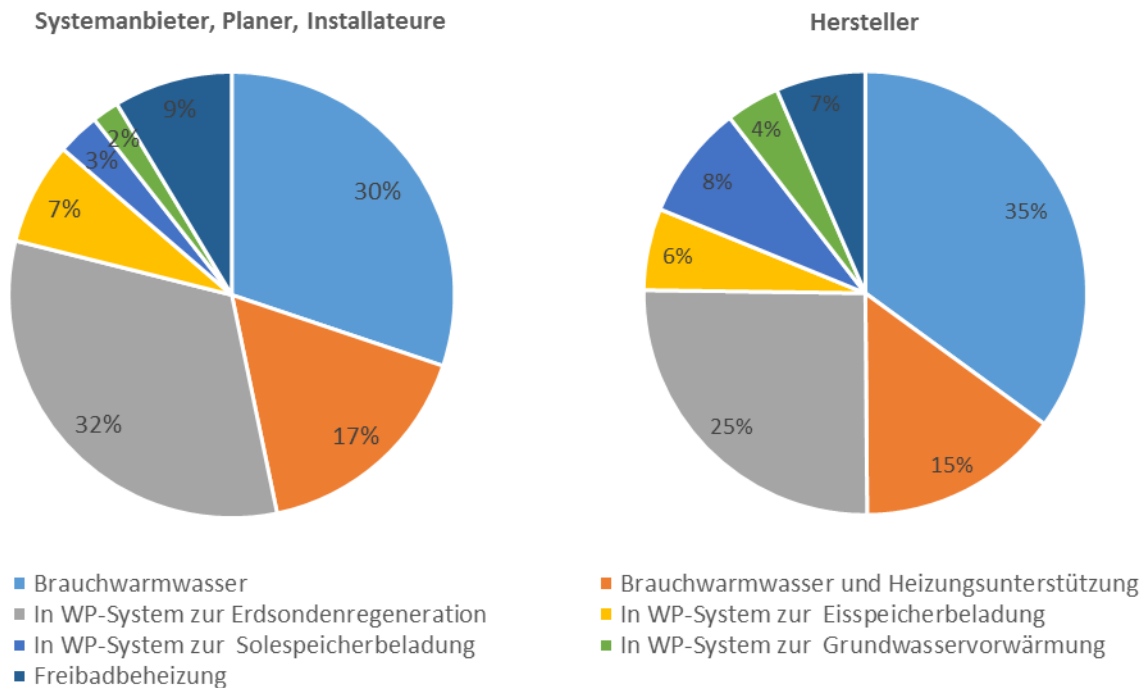


Abbildung 58: Verteilung der Anzahl von PVT-Anlagen in Betrieb in der Schweiz nach Systemeinsbindung laut Angaben der Systemanbieter, Planer und Installateure sowie der Hersteller

5.1.3 Dimensionierung und Erträge

Für die Dimensionierung der Anlagen verwenden viele Planer und Installateure entsprechende Simulationssoftware oder dimensionieren nach Herstellerangaben. Auch die zur Verfügung stehende Dachfläche und das Budget des Endkunden spielen häufig eine wichtige Rolle. Unter den Herstellern machen manche grundsätzlich eine individuelle Auslegung, beispielsweise nach Dachgegebenheiten, zu beheizender Fläche, Isolation des Gebäudes und Warmwasserverbrauch. Andere geben für bestimmte Einbindungen auch allgemeingültige Richtlinien heraus. Für eine Brauchwassererwärmung sind dies in der Regel 1.5 bis 2 Module pro Person, was etwa 2.5 bis 3.3 m² Kollektorfläche pro Person entspricht. Dazu kommen 50 l Speichervolumen pro Person als Empfehlung bei einem Hersteller, bei einem anderen 70 l pro PVT-Modul. Zur Freibaderwärmung wird von einem Hersteller ein PVT-Feld in der Grösse der halben Oberfläche des Bades empfohlen. Bei der Erdsondenregeneration wird auf eine ausgeglichene Jahresbilanz in Bezug auf Energieentnahme und Energieeinspeisung geachtet.

Die mit nicht-abgedeckten PVT-Kollektoren erzielbaren thermischen Jahreserträge variieren aufgrund des unterschiedlichen Temperaturniveaus je nach Anwendung stark. Typische Jahreserträge liegen laut Herstellern wie auch Planern und Installateuren bei:

- Brauchwarmwassererwärmung EFH: ca. 150 kWh/(m²a)
- Brauchwarmwasservorwärmung MFH: 180-250 kWh/(m²a)
- Erdsondenregeneration: 330-450 kWh/(m²a)

Der elektrische Mehrertrag gegenüber einer reinen PV-Anlage wird mit ca. 5-10 %, teilweise auch mit bis zu 30 % angegeben, wobei nicht eindeutig ist, ob sich die Zahl tatsächlich auf den Jahresertrag oder nur bestimmte Situationen wie beispielsweise einen schönen Sommertag bezieht. Der Mehrertrag hängt ebenfalls stark von der Systemeinsbindung ab. Ein Teilnehmer gibt an, Mindererträge gemessen zu haben.

Im Vergleich zu Standard-Solarwärmeanlagen können PVT-Anlagen an einigen Stellen abweichend ausgeführt werden. Als häufigste Änderung wird von Herstellern wie auch Planern und Installateuren angegeben, dass aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus die Verrohrung aus Kunststoff- oder Verbundrohr ausgeführt werden kann. Ausserdem wird in der Regel das Membranausdehnungsgefäss kleiner dimensioniert, und es werden andere Montagesysteme eingesetzt. Als weitere Abweichungen werden eine grössere Kollektorfläche genannt, die Notwendigkeit einer Zugänglichkeit für Wartung, dass bei bestimmten Anwendungen (insbesondere Erdsondenregeneration) auf eine Dämmung der Rohre auf dem Dach verzichtet werden kann, dass Steckverbinder eingesetzt werden oder die hydraulische Einbindung abweichend ausgeführt wird. Ein Teilnehmer setzt einen zusätzlichen Kühler im Kollektorkreis ein. Knapp jeder fünfte Installateur oder Planer gibt an, die Ausführung identisch zu einer Standard-Solarwärmeanlage zu machen (Abbildung 59). Einzelne Hersteller empfehlen dies auch, andere heben die Flexibilität für den Installateur hervor, der frei ist Standardkomponenten aus dem Solarthermie-Bereich oder auch beispielsweise Kunststoffrohre zu verwenden.

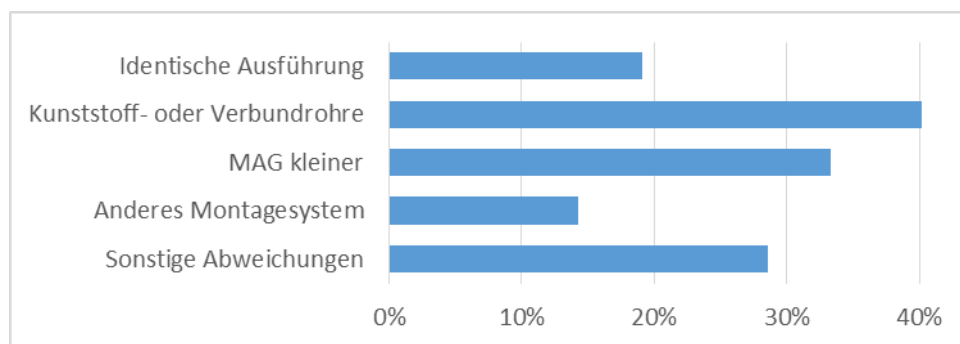


Abbildung 59: Abweichende Ausführung von PVT-Anlagen im Vergleich zu Standard-Solarwärmeanlagen

5.1.4 Planung, Ausführung und Betrieb

Alle befragten Hersteller übernehmen neben dem reinen Vertrieb von PVT-Komponenten manchmal oder immer weitere Aufgaben im Projekt. Diese liegen am häufigsten im Bereich der Planung, aber auch Ausführung und Betrieb werden teilweise angeboten. Im Bereich der Planung übernehmen fast alle Hersteller immer oder manchmal die Konzeptplanung, die Auslegung der Hydraulik und die elektrische Auslegung des Kollektorfeldes. Die Auslegung des Montagesystems sowie die thermische und elektrische Auslegung innerhalb des Gebäudes werden dagegen seltener übernommen. Dach- bzw. Fassadenstatik sowie die Gesamtprojektleitung werden überwiegend nicht vom Hersteller gemacht. Zwei Drittel der Hersteller montieren selbst keine Anlagen, zum Teil wird aber die Koordination übernommen. Im Betrieb der Anlage werden von der Hälfte der Hersteller manchmal Aufgaben wahrgenommen, Systemüberwachung oder Betriebsführung häufiger als Befüllung/Inbetriebnahme und Anlagenwartung (Abbildung 60).

Unter den Planern und Installateuren haben sich einige Firmen auf bestimmte Bereiche spezialisiert, andere decken fast das gesamte Spektrum von Planung, Ausführung und Betrieb der Anlagen ab.

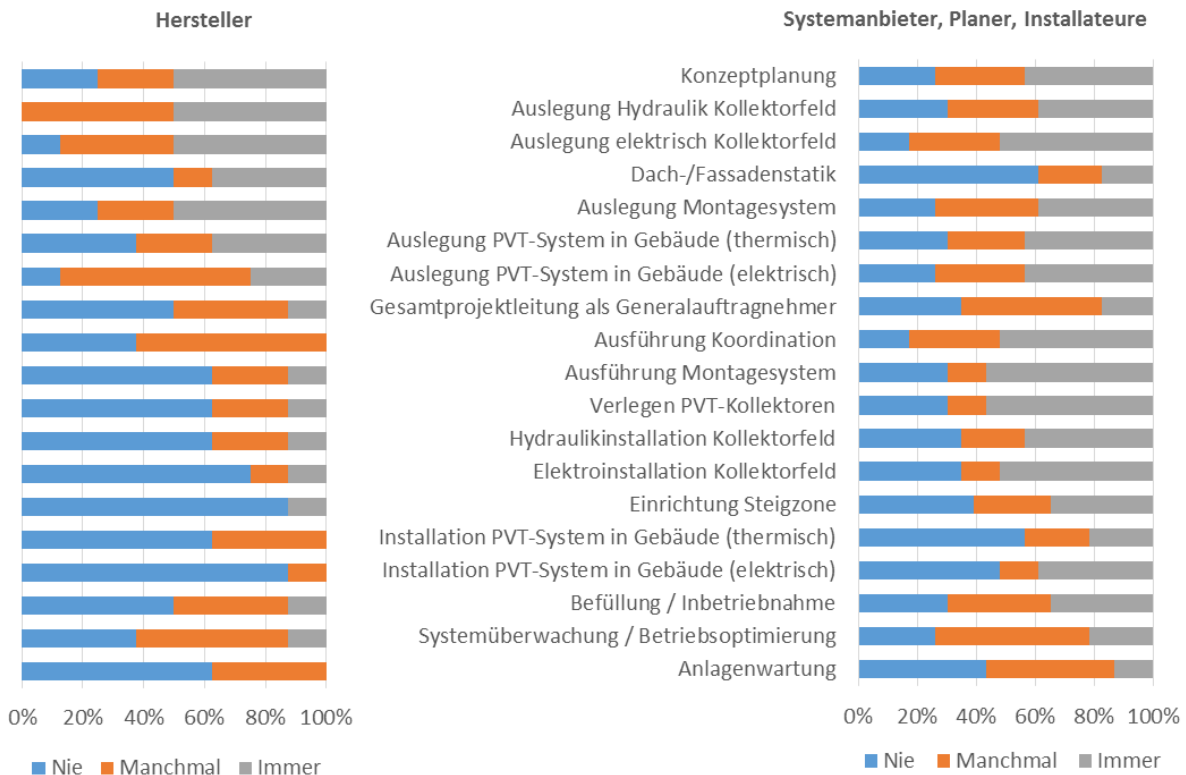


Abbildung 60: Übernahme von Aufgaben im Projekt durch Hersteller, Systemanbieter, Planer und Installateure

Als Herausforderung bei Planung und Installation der Anlagen wird von einigen Befragten die Akzeptanz der Technologie etwa bei Installateuren oder Bauverwaltungen genannt, zum Teil auch fehlende Fachkompetenz. Ein Problem dabei sei, dass kein Lernprozess stattfindet, es keine Rückkopplung vom Betrieb zur Planung. Ein weiterer Punkt ist die Zusammenarbeit von Firmen aus dem Elektro- und Heizungsbereich sowohl bei der Planung als auch bei der Installation. Dabei ist auch die Definition der Schnittstellen zwischen den Gewerken wichtig. Teilweise werden aber auch ganz konkrete Punkte der Planung und Ausführung genannt, wie etwa die Dimensionierung von Leitungen, die Schwierigkeit der Leitungsführung bei Sanierungen, kurze Verbindungen bei einem bestimmten PVT-Kollektor, die Optimierung der Anlagen, oder dass man bei einer Anlage eine undichte Stelle hatte und Reparaturen oder Austausch aufwändig seien. Mit bestimmten PVT-Kollektoren muss vorsichtiger umgegangen werden als mit PV-Modulen, auch liessen sie sich zum Teil nicht wie PV-Module stapeln.

5.1.5 Markt

Die teilnehmenden Systemanbieter, Planer und Installateure waren bisher an etwa 90 – 100 Anlagen beteiligt die in der Schweiz in Betrieb sind. Dabei kann es vorkommen, dass die gleiche Anlage von mehreren Firmen aufgeführt wird, wobei die eine die Planung und die andere die Montage übernommen hat. In 2016 haben die Teilnehmer gut 2'000 m² geplant oder installiert. Von dieser Fläche gingen etwa ein Sechstel in Anlagen kleiner 20 m², über die Hälfte in Anlagen zwischen 20 und 50 m² und ein gutes Viertel in Anlagen grösser 50 m².

Die befragten Hersteller haben bisher PVT-Kollektoren für knapp 300 Anlagen in der Schweiz geliefert. In 2016 haben sie etwa 2'200 m² in der Schweiz abgesetzt. Drei der Hersteller haben bisher noch keine Kollektoren in die Schweiz verkauft.

Für einige Hersteller ist PVT das Kerngeschäft oder auch das einzige Geschäftsfeld, bei anderen Unternehmen ist PVT nur ein kleiner Teil oder gar nur ein Nischenprodukt. Für die meisten der Installateure, Planer und Systemanbieter, die bereits PVT eingesetzt haben, ist Solartechnik das Kerngeschäft. Es gibt aber auch einige Firmen, für die PVT eine Ergänzung zum Beispiel zu Bedachungen, Sanierungen oder zur Installation von Wärmepumpenanlagen ist.

5.1.6 Motivation und Herausforderungen für PVT

Die Motivation von Bauherren, PVT-Kollektoren einzusetzen, liegt einerseits im Produkt begründet, insbesondere in der Abgrenzung zu reinen Solarthermie- und Photovoltaikanlagen. Hier sind die Effizienz und der Doppelnutzen mit Strom- und Wärmeerzeugung in einem Modul besonders wichtig, häufig in Verbindung mit einer begrenzten Dachfläche. In engem Zusammenhang dazu steht eine weitere wichtige Motivation: Vorschriften zum Einsatz von erneuerbaren Energien, wie sie aktuell z. B. im Kanton Waadt gelten, oder der Wunsch ein Minergie-Label erreichen zu wollen, führen in einigen Fällen zum Einsatz von PVT-Kollektoren, wenn die Dachfläche bei getrennten Solarstrom- und Solarwärmanlagen nicht ausreicht. Häufige Motivation bei Bauherren ist zudem ein neues Produkt einzusetzen, etwas anders machen zu wollen oder Technikinteresse. Auch wird zum Teil aufgeführt, dass eine PVT-Anlage wirtschaftlicher sei als zwei getrennte Systeme. Weitere Gründe sind eine einfache Installation und niedrigere Systemtemperaturen, respektive keine Gefahr einer Überhitzung, sowie ein einheitlicheres und damit ästhetischeres Erscheinungsbild im Vergleich zu getrennten Solarthermie- und PV-Anlagen. Des Weiteren werden Argumente angeführt, die auch für andere Arten der Solarenergienutzung gelten. Dazu gehören ökologische Gründe, sowie der Wunsch die Autarkie zu erhöhen oder laufende Kosten zu reduzieren. Diese werden besonders häufig von den Herstellern genannt (Abbildung 61). Vereinzelt werden auch Motive genannt, die grundsätzlich auch mit anderen Technologien erreicht werden können und daher nicht weiter aufgeführt werden (wie etwa ein Schwimmbad zu heizen).

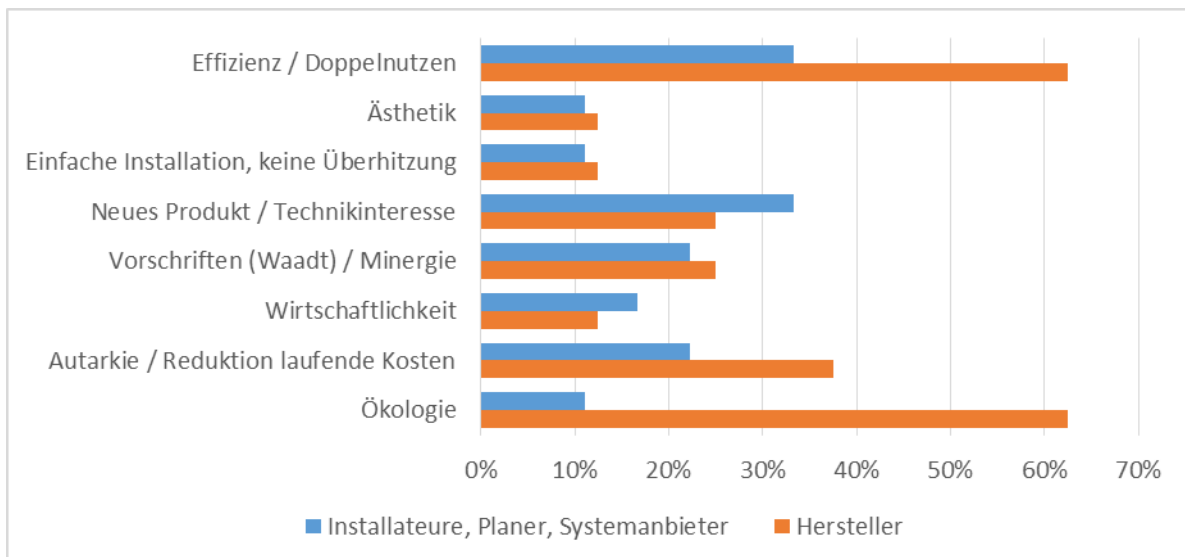


Abbildung 61: Motivation von Bauherren für PVT-Anlagen aus der Sicht von Installateuren, Planern und Systemanbietern einerseits und PVT-Kollektorherstellern andererseits

Von den Herstellern wird die Zukunft der PVT eher positiv eingeschätzt, insbesondere im Zusammenhang mit Wärmepumpensystemen oder auch für Freibäder. Teilweise wird deutlich steigende Nachfrage registriert oder die Hoffnung auf ein neues Produkt mit grossem Potenzial gesetzt. Andere schätzen, dass PVT ein Nischenmarkt bleiben wird, jedenfalls solange die Kostendifferenz zur Photovoltaik nicht deutlich sinkt. Noch weiter gehen die Einschätzungen bei Installateuren, Planern und Systemanbietern auseinander. Die einen sehen einen deutlichen Anstieg und ein grosses Potenzial, andere weiter einen Nischenmarkt für wenige, spezifische Anwendungen, bis hin zu gar keinem Markt für PVT mit heutigen Technologien. Drei Firmen, die bereits PVT eingesetzt haben, wollen dies in Zukunft eher nicht mehr tun, zum einen aufgrund schlechter Erfahrung, zum anderen aus der grundsätzlichen Überlegung, dass getrennte Systeme besser seien. Alle anderen Firmen sind grundsätzlich weiter positiv gegenüber PVT eingestellt, auch wenn teilweise noch deutliches Verbesserungspotenzial gesehen wird. Die Zukunft wird vor allem im Zusammenhang mit Wärmepumpensystemen, insbesondere für Erdsondenregeneration, teils auch Eisspeicher, gesehen, sowie bei Objekten mit begrenztem Platz, wo eine hohe Flächeneffizienz wichtig ist.

Auf die Frage, was sich ändern müsste, damit PVT vermehrt eingesetzt würde, antworten über 40 % der Installateure, Planer und Systemanbieter sowie 50 % der Hersteller, dass die Kosten für PVT-Systeme sinken bzw. die Wirtschaftlichkeit steigen müsste. Über die Hälfte der Teilnehmer sieht Verbesserungspotenzial beim Knowhow, bei der Zusammenarbeit zwischen Elektro- und Heizungsfachkräften oder bei der Bekanntheit von PVT-Lösungen, sowohl bei den Bauherren als auch im Bereich der Planer und Installateure. Beispielsweise sei es schwierig, als Planer einen kompetenten Installateur zu finden. Es solle insbesondere auch von unabhängiger Stelle mehr über die Möglichkeiten von PVT informiert, Auskünfte und Erfahrungswerte zum Beispiel zu erreichbaren Erträgen zur Verfügung gestellt und Best-Practice Beispiele gezeigt werden. Ein Wunsch wäre, ein einfaches Hilfsmittel zu haben, für eine zuverlässige und schnelle Dimensionierung von PVT-Anlagen ohne aufwändige Simulation. Die Forderung nach einer verbesserten Förderung wird besonders häufig von den Westschweizer Teilnehmern gestellt. Dort heisst es, es solle eine höhere Förderung für nicht-abgedeckte Kollektoren generell geben bzw. PVT der Solarthermie gleichgestellt werden. Ein Teil der Hersteller schlägt vor, PVT stärker in Vorschriften und Labels zu verankern. Von Seiten der Planer und Installateure kommen auch Änderungsvorschläge in Bezug auf das Produktdesign. Beispiele sind eine einfachere Verrohrung, eine Standardisierung der Steuerung, Indach-Montagesysteme, robustere Produkte oder allgemein eine grössere Produktvielfalt auf dem Markt. Etwa ein Viertel meint, dass der Wirkungsgrad bzw. der Ertrag der Systeme steigen müsste. Auffällig ist, dass die beiden letztgenannten Bereiche, Produktdesign und Wirkungsgrad, von den Herstellern gar nicht aufgeführt werden (Abbildung 62).

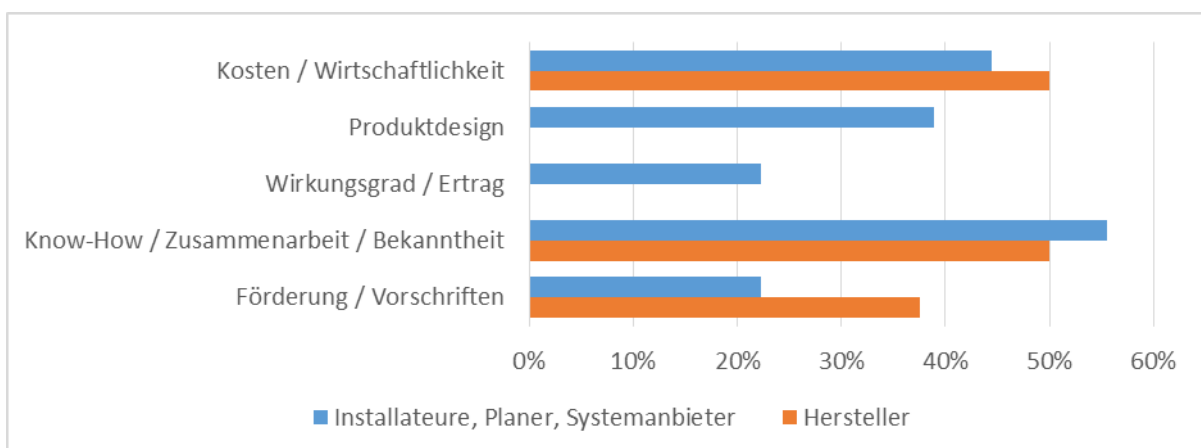


Abbildung 62: Bereiche mit Änderungsnotwendigkeit für einen vermehrten Einsatz von PVT-Kollektoren

5.2 FIRMEN OHNE PVT-ERFAHRUNG

Von den Firmen, die bisher noch keine PVT-Anlage realisiert haben, gibt ein gutes Drittel an, dass bei ihren Kunden auch kein Interesse an PVT besteht. Etwa die Hälfte registrieren ein geringes Interesse, 14 % sogar ein grosses bis sehr grosses. Wer bisher kein PVT eingesetzt hat ist der Technologie gegenüber zu gut 40 % auch eher negativ eingestellt. Dagegen sehen sie immerhin fast 60 % grundsätzlich positiv und würden bei entsprechender Nachfrage und passendem Objekt PVT-Kollektoren verwenden (Abbildung 63).

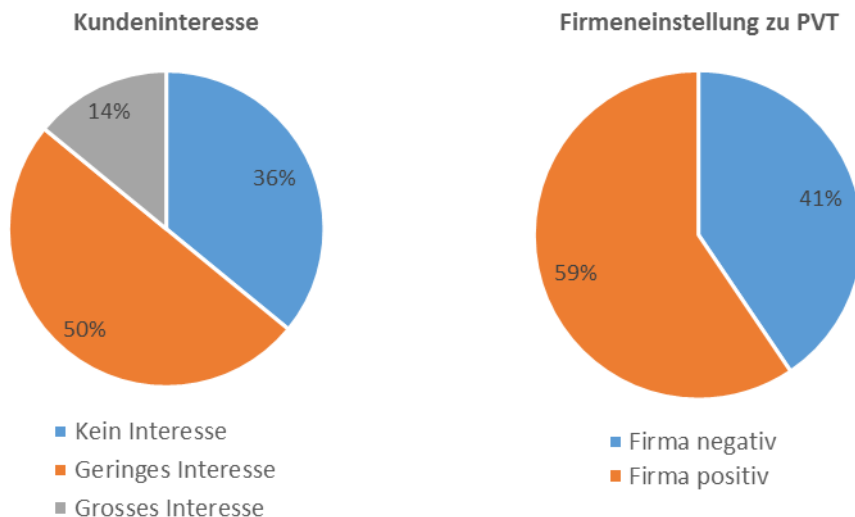


Abbildung 63: Interesse der Endkunden an PVT und Einstellung der befragten Firmen zu PVT

Die Gründe der Unternehmen, warum sie bisher kein PVT eingesetzt haben, sind vielfältig (siehe Abbildung 64). Mit Abstand am häufigsten werden zu hohe Kosten bzw. fehlende Wirtschaftlichkeit aufgeführt. Über ein Viertel der Firmen hält grundsätzlich eine Trennung von Photovoltaik und Solarthermie für sinnvoller oder hält das Temperaturniveau bei PVT generell für zu gering. Gut jeder fünften Firma sind PVT-Systeme zu komplex und der Aufwand für die Installation zu gross. Ähnlich viele geben an, dass es zu wenige PVT-Kollektoren und Systemkomponenten auf dem Markt gebe, oder diese bisher nicht oder ungenügend ausgereift seien. Fehlende Kundenanfragen und keine passenden Objekte für den Einsatz von PVT sind ein weiterer grosser Block, wobei die Einschätzung, welche Objekte und Systemeinstellungen für PVT geeignet sind, sehr weit auseinander gehen. Für manche Kunden ist die Gesamtinvestitionssumme zu gross. Sie investieren lieber getrennt bei einer Heizungssanierung in eine Solarwärmanlage und zu einem anderen Zeitpunkt in eine PV-Anlage.

Für viele der Firmen ist PVT kein Geschäftsfeld. Sie haben sich beispielsweise auf Elektroinstallationen und Photovoltaik spezialisiert oder auf Heizungsinstallationen zusammen mit Solarthermie. In eine ähnliche Richtung geht die Angabe, dass das erforderliche Knowhow in der Firma fehle, entweder für den elektrischen oder den thermischen Bereich. Zum Teil besteht bei den Firmen oder ihren Kunden Unsicherheit bezüglich der Technologie. Es werden unabhängige Daten und Nachweise der Funktionstauglichkeit und Qualität vermisst.

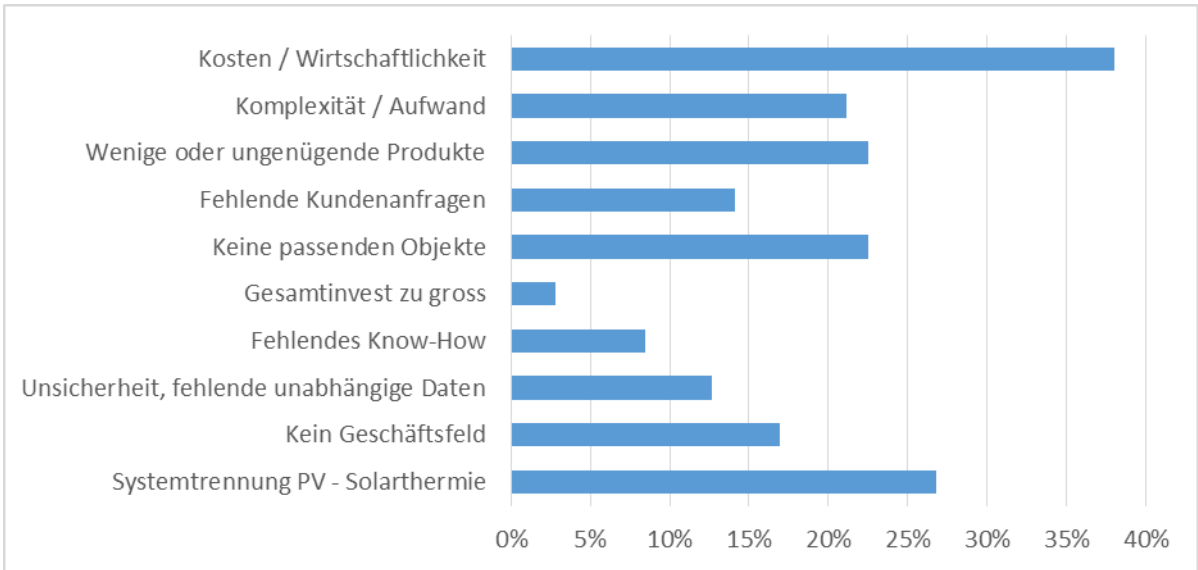


Abbildung 64: Gründe der befragten Firmen kein PVT einzusetzen

LITERATUR

- [1] P. Dupeyrat, «Experimental development and simulation investigation of a Photovoltaic-Thermal hybrid solar collector,» Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, 2011.
- [2] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V., «Leitfaden Photovoltaische Anlagen, 4. Auflage,» DGS, Berlin, 2012.
- [3] H. A. Zondag, «Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 12, 2008.
- [4] J. J. Michael, S. Iniyar und R. Goic, «Flat plate solar photovoltaic–thermal (PV/T) systems: A reference guide,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 51, 2015.
- [5] M. Adam, H. P. Wirth und R. Radosavljevic, «Verbundprojekt: Standardisierung und Normung von multifunktionalen PVT Solarkollektoren (PVT-Norm), Teilvorhaben: PVT-Systemanwendungen und Simulationen,» Düsseldorf, 2014.
- [6] J. Cremers, U. Eicker, N. Palla, X. Jobard, F. Klotz und I. Mitina, «Multivalente photovoltaisch-thermische Kollektoren zur Kälte-, Wärme- und Stromerzeugung und Szenarien für die Gebäudeintegration [PVTintegral],» Stuttgart, 2015.
- [7] UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy, «Evidence Gathering - Low Carbon Heating Technologies, Hybrid Solar Photovoltaic Thermal Panels,» London, 2016.
- [8] T. Hostettler, «Markterhebung Sonnenenergie 2015,» ausgearbeitet durch Swissolar, Bundesamt für Energie, Bern, 2016.
- [9] M. Adam, H. P. Wirth, R. Radosavljevic, K. Kramer, U. Fritzsche und S. Hamberger, «Verbundprojekt: Standardisierung und Normung von multifunktionalen PVT Solarkollektoren (PVT-Norm), Teilvorhaben Betrachtung Normentwurf und Systemintegration aus Herstellersicht, Information über Notwendigkeit der Norm,» 2014.
- [10] SPF, Institut für Solartechnik, «Erläuterungen zur kollektorliste.ch, V1.3,» 2016.
- [11] K. Wenker, H. Jäger, A. Dolezal, G. Stryi-Hipp, S. Fortuin, I. Hädrich, M. Wiese, J. Greulich, W. Graf und T. Kroyer, «PVTmax Photovoltaisch-thermische Kollektorsysteme mit maximiertem Gesamtertrag,» Braunschweig u. Freiburg, 2012.
- [12] INFRAS, D. Sigrist und S. Kessler, «Harmonisiertes Fördermodell der Kantone (2015), Schlussbericht, Revidierte Fassung vom September 2016,» Bundesamt für Energie, Bern, 2016.
- [13] R. Wagner und T. Weisskopf, «Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich,» Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Zürich, 2014.
- [14] P. Persdorf, F. Ruesch und M. Y. Haller, «RegenOpt Optionen zur Vermeidung nachbarschaftlicher Beeinflussung von Erdwärmesonden: energetische und ökonomische Analysen,» Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Zürich, 2015.

- [15] AWEL Amt für Abfall, Wasser Energie und Luft, «Energienutzung aus Untergrund und Grundwasser, Planungshilfe,» Baudirektion Kanton Zürich, Zürich, 2010.
- [16] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. und Swissolar, «Leitfaden Solarthermische Anlagen, 9. Auflage (ergänzte Auflage für die Schweiz),» DGS und Swissolar, Berlin und Zürich, 2013.
- [17] M. Bättschmann, «Einbindung von PV/T Kollektoren in erdsondenggekoppelte Wärmepumpen-Systeme,» Projekt Nr. SI/500735-01, Jahresbericht 2012 an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2012.
- [18] F. Hug und R. Gysel, «Einbindung von PV/T Kollektoren in erdsondenggekoppelte Wärmepumpen-Systeme,» Projekt Nr. SI/500735-01, Schlussbericht an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2016.
- [19] F. Hug und A. Baggenstos, «Einbindung von PV/T Kollektoren in erdsondenggekoppelte Wärmepumpen-Systeme,» Projekt Nr. SI/501010, Jahresbericht 2014 an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2014.
- [20] F. Hug und A. Baggenstos, «Einbindung von PV/T Kollektoren in erdsondenggekoppelte Wärmepumpen-Systeme,» Projekt Nr. SI/501010, Jahresbericht 2015 an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2016.
- [21] F. Hug und A. Baggenstos, «Einbindung von PV/T Kollektoren in erdsondenggekoppelte Wärmepumpen-Systeme,» Projekt Nr. SI/501010, Jahresbericht 2016 an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2017.
- [22] M. Sulzer und S. Summermatter, «Solare Energieversorgung im alpinen Raum, Reka-Feriendorf Blatten-Belalp,» Projekt Nr. SI/501045, Jahresbericht 2015 an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2015.
- [23] M. Sulzer und S. Summermatter, «Solare Energieversorgung im alpinen Raum, Reka-Feriendorf Blatten-Belalp,» Projekt Nr. SI/501045, Schlussbericht an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2016.
- [24] D. Lüthi und U.-P. Menti, «Monitoring Suurstoffi: Monitoring einer thermischen Arealvernetzung in Kombination mit einem Erdsondenfeld,» Projekt Nr. SI/500836-01, Jahresbericht 2012 an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2013.
- [25] N. Vetterli, E. Thaler, M. Sulzer und P. Ryser, «Monitoring Suurstoffi: Monitoring einer thermischen Arealvernetzung in Kombination mit einem Erdsondenfeld,» Projekt Nr. SI/500836-01, Schlussbericht an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2017.
- [26] E. Fischer, «Energiekonzept Suurstoffi Rotkreuz,» Vortrag bei Energie Aperro Schwyz, Hans Abicht AG, Zug, 2016.
- [27] J. Rohrer, «PVT-Solarkraftwerk linth-arena sgu: Strom und Wärme vom Dach,» Projekt Nr. SI/501095, Jahresbericht 2014 an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2014.
- [28] J. Rohrer, «PVT-Solarkraftwerk linth-arena sgu: Strom und Wärme vom Dach,» Projekt Nr. SI/501095, Jahresbericht 2015 an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2015.

- [29] J. Rohrer, «PVT-Solarkraftwerk linth-arena sgu: Strom und Wärme vom Dach,» Projekt Nr. SI/501095, Jahresbericht 2016 an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2016.
- [30] C. Vassella und A. Baggenstos, «Drei unterschiedliche innovative solarunterstützte Wärmeerzeugungssysteme für drei identische Minergie-A-Gebäude,» Projekt Nr. SI/501244-01, Jahresbericht 2015 an BFE, Bundesamt für Energie, Bern, 2015.
- [31] R. Schwarz, «Monitoring Minergie-A Büronutzung,» Studienarbeit HSR Rapperswil IET, Rapperswil, 2016.
- [32] R. Schwarz, J. Staubli, W. Hässig und C. Wemhöner, «Erkenntnisse der Optimierung eines Minergie-A Büro-/Wohn-Gebäudes,» in *19. Brenet Status-Seminar "Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt"*, Zürich, 2016.
- [33] D. Zenhäusern, A. Baggenstos, O. Türk, S. Brunold und M. Rommel, «PVT-Kollektoren für die Brauchwarmwasser-Vorwärmung – Mess- und Simulationsresultate einer Testanlage,» in *18. Brenet Status-Seminar "Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt"*, Zürich, 2014.
- [34] R. Huber und K. Vogt, «Eine Überbauung mit besonderer Gebäudetechnik,» *Ostschweizer Rundschau*, Bd. März, 2014.
- [35] C. Wild, «Ein Maximum an nachhaltiger Energie-Nutzung,» *HK-Gebäudetechnik*, Nr. 1, 2017.
- [36] Solimpeks Energy Corp, «Case studies of Volther hybrid collector,» http://www.soleol.ch/documents/installations-hybrides/hybrid_case.PDF.
- [37] Fraunhofer ISE, «Photovoltaics Report, updated 17 November 2016,» Freiburg (D), 2016.

ANHANG

MARKTÜBERSICHT PVT-KOLLEKTOREN

Nr	Klassifizierung				Bauart					Kennwerte allgemein		Kennwerte PV			
	Typ	Hersteller	Land	Modell	PV-Zelltyp	PV-Aufbau	Absorbermaterial	Bauart thermisch	Verbindung PV-Absorber	Abmessungen	Gewicht	Leistung STC	Temp. koeff P		
1	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	Solarzentrum Allgäu KG Kreener Straße 12 87640 Biessenhofen-Altendorf Tel +49 8342-8969-0 info@solarzentrum-wiosun.de www.solarzentrum-wiosun.de	Deutschland	WIOSUN Kombimodul PV-Therm monokristallin	mono Si	Glas-Folie	Polyurethan	Vollflächenabsorber	Fluid direkt hinter PV-Modul	1315 x 1012 x 40 mm	40 kg	195-205 Wp	-0.46%/K	
						poly Si								190-200 Wp	-0.48%/K
2	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	solator C.Bösch GmbH Dornbirnerstrasse 8 A-6922 Wolfurt Tel: +43 - 5577 - 82571 office@solator.cc www.solator.cc	Österreich	solator PV + THERM PVTHERMAU280 PVTHERMAU300	mono Si	Glas-Folie				1650 x 990 x 35 mm	28 kg	280 Wp	-0.43%/K	
						mono Si					1640 x 1000 x 40 mm	28 kg	300 Wp	-0.41%/K	
						mono Si	Glas-Folie				836 x 1580 x 36 mm	22 kg	190 Wp		
											836 x 1580 x 36 mm	22 kg	190 Wp		
3	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	Nachtstütz-Nachrüst-satz, Klemmung einlaminiert	USA	coolPv CPV288	mono Si	Glas-Folie	Edelmetall	Ovkapillarrohre		1945 x 975 x 5 mm	31.5 kg	288 Wp	-0.51%/K	
4	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	Meyer Burger AG Schorenstrasse 39 CH-3645 Gwatt (Thun) Tel +41 33 221 21 21 info.pvsystems@meyerburger.com www.meyerburger.com	Schweiz	Hybrid	mono Si	Glas-Folie	Aluminium	Mäanderabsorber		991 x 1656 x 17 mm	29 kg	290 Wp	-0.391%/K	
5	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	mit Rückseiten-dämmung	Frankreich	DualSun Wave	mono Si	Glas-Folie	Edelstahl			1677 x 990 x 40 mm	30 kg	250 Wp	-0.44%/K	
														31.7 kg	
6	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	(optional mit)	Italien	H-NRG	poly Si	Glas-Folie	Aluminium			1652 x 1000 x 45 mm	34 kg	230 Wp	-0.45%/K	
7	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	Millennium Electric 11 Hasadna St. P.O. Box 2646 Ra'anana North Industrial Zone 43650 Tel: +972 9 7439490 info@millenniumsolar.com www.millenniumsolar.com	Israel	MSS – MIL-PVT-340W-MO3/ MSS – MIL-PVT-MSS – MIL-PVT-190W-MO2 / MSS – MIL-PVT-195W-MO3	mono Si	Glas-Folie (4	Kupfer	Finnenabsorber mit Luftkanälen	Wärmeleitpaste	2199 x 1238 x 71 mm	38 kg	320 / 340 Wp		
						mono Si	Glas-Folie							1580 x 808 x 45 mm	25 kg
8	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	Poly Solar Solutions AG Feldriestrasse 5/PF CH-9204 Andwil Tel. +41 71 388 23 23 info@pss-ag.com www.pss-ag.com	Schweiz	PIK* Kombi-Solar-Kollektor	mono Si	Glas-Folie	Aluminium		geklebt	1666 x 992 x 33 mm	35 kg	255 Wp	-0.37%/K	
														ca. 1600 x 900 x 40	
9	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	VALVO GmbH Rothenseer Straße 27 39124 Magdeburg Tel: +49 391 733 478 82 info@valvo-deutschland.de http://valvo-deutschland.de QuattroSolarPlus GmbH http://www.qsp-system.de	Deutschland	PVT 60P	poly Si	Glas-Folie	Aluminium	Rohrregister, parallele Fluidkanäle		1623 x 986 x 35 mm	23.8 kg	250-260 Wp	-0.4%/K	
10	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	Easy Solar ApS Nørretorv 2 4100 Ringsted Tel +45 26 74 50 49 post@easysolar.dk http://easysolar.dk	Dänemark	Black Line 250 – 400 W BIPV Hybrid Aluminiumsabsorber / Hybrid	mono Si	Glas-Folie	Aluminium	Mäanderabsorber		1675 x 1025 x 37.5 mm		250 Wp		
11	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung?	TES Group Limited tes@tessolarwater.com http://www.tessolarwater.com	China	TESZEUS PV-T	poly Si	Glas-Folie	Kupfer-Aluminium			1650 x 992 x 50 mm		240 Wp	-0.4%/K	
						mono Si							1650 x 992 x 50 mm	250 Wp	-0.4%/K
						poly Si							1956 x 992 x 50 mm	280 Wp	-0.4%/K
12	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	Triple Solar BV New Energy Docks Distelweg 451 1031 HD Amsterdam Tel: +31 20 435 75 55 info@triplesolar.eu http://www.triplesolar.eu	Niederlande	Triple Solar hybrid panel	mono Si	Glas-Folie?	Aluminium			1735 x 1007 x 30 mm	39 kg	300 Wp	-0.4%/K	
														255 Wp	

Kennwerte thermisch																	Zertifizierung								
Nr	Bruttofläche	Aperturfläche	Absorberfläche	Kennlinienmodell	Bezugsfläche	El. Betriebspunkt bei therm. Messung	Quelle Kennwerte	eta0	abgedeckt		nicht-abgedeckt			quasi-dynamisch						Offener Luftkollektor			Stillstands-temp	IEC	Solar Key-mark
									a1 [W/(m ² *K)]	a2 [W/(m ² *K ²)]	bu	b1	b2	c1	c2	c3	c4	c6	K_thet a_d	mdot [kg/h]	eta0	bu			
1	1.33m ²	1.31m ²		nicht-abgedeckt	Aperturfläche	OC	Keymark	0.715			0.031	7.98	6.64									75°C	i.V.	ja	
2		1.62m ² 1.64m ² 1.20m ² 1.32m ²		quasi-dynamisch	Aperturfläche	MPP	Keymark (Datenblatt)	0.274 (0.56)						7.684	0.115	0.944	0	0.013	0.908			66°C	IEC 61215 ja IEC 61730 nein		
3	1.90m ²						Datenblatt															nein	nein		
4	1.64m ²	1.64m ²		nicht-abgedeckt	Aperturfläche	MPP	Keymark	0.578			0.06	12.55	1.3859									69°C	IEC 61215 ja IEC 61730		
5	1.64m ²	1.58m ²		nicht-abgedeckt	Aperturfläche	MPP	Keymark	0.578			0.028	12.08	1.842									74.7°C	IEC 61215 ja IEC 61730		
6	1.65m ²	1.52m ²	1.46m ²	abgedeckt	Absorberfläche	nicht spezifiziert	Datenblatt	0.513	7.68	0.014												80°C (Maximaltemp)	IEC 61215 nein IEC 61730 (Ja laut Datenblatt)		
7							Datenblatt	0.7															IEC 61215 nein		
8	1.65m ²	1.57m ²		nicht-abgedeckt	Aperturfläche	MPP	Keymark	0.596			0.068	12.88	1.11									85°C	IEC 61215 ja IEC 61730		
9	1.60m ²																						IEC 61215 nein IEC 61730		
10	1.72m ²																						IEC 61215 nein IEC 61730		
11	1.64m ²																						IEC 61215 nein IEC 61730		
12	1.75m ²																						?	nein	

Klassifizierung					Bauart				Kennwerte allgemein		Kennwerte PV		
Nr	Typ	Hersteller	Land	Modell	PV-Zelltyp	PV-Aufbau	Absorbermaterial	Bauart thermisch	Verbindung PV-Absorber	Abmessungen	Gewicht	Leistung STC	Temp. Koeff P
13	Flachkollektor ohne Abdeckung - Nachrüstsatz	ohne Rückseiten-dämmung	GeoClimaDesign AG Mühlenbrücken 3 - 5 15517 Fürstenwalde / Spree Tel +49 3361 - 376 42 0 info@geoclimadesign.com www.geoclimadesign.com	Deutschland	Sunbag		Kunststoff				3 kg/m2		
14	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	KIOTO Photovoltaics GmbH Industriepark, Solarstraße 1 9300 St. Veit/Glan Tel +43 4212 28 300 499 office@kioto.com www.kiotosolar.com	Österreich	PVT Hybrid 900Wp	mono Si	Glas-Folie?	Kupfer	Harfe	1666 x 992 x 40 mm	27.5 kg	280 Wp	-0.37%/K
15	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	CAOTEC La Pergola 241 CH-7743 Brusio Tel +41 81 8465552 info@caotec.ch www.caotec.ch	Schweiz	Hybrid Kollektor								
16	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	Energetyka Solarna ENSOL Sp. z o.o. Ul. Piaskowa 11 47-400 Racibórz Tel +48 32415-00-80 sekretariat@ensol.pl www.ensol.pl	Polen	E-PVT 2,0	poly Si		Aluminium	Rollbond	1006 x 2007 x 85 mm	37 kg	300 Wp	
17	Flachkollektor ohne Abdeckung		POWER KOMBI MODULE GmbH Heerstr. 47 D-52538 Selfkant Tel 49 151 11640960 info@powerkombimodule.com http://powerkombimodule.com/	Deutschland	PKM 96M (BK)	mono Si	Glas-Folie			1580 x 1062 x 50 mm	22 kg	250 - 285 Wp	
18	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	Building Energy Herlegemstraat 14, 9771 Nokere (Kruishoutem) Tel +32 (0) 56 62 62 40 info@buildingenergy.be www.buildingenergy.be	Belgien	HYBRIDE PV/T 2-in-1	poly Si	Glas-Folie	Aluminium		1640 x 992 x 40 mm	27.4 kg	250 Wp	
19	Flachkollektor ohne Abdeckung	ohne Rückseiten-dämmung	Max Roth M&M Energie Forschung/Entwicklung Rationen 2 7310 Bad Ragaz	Schweiz									
20	Flachkollektor ohne Abdeckung - Nachrüstsatz		Splus2 GmbH Breite Str. 160-166 41238 Mönchengladbach Tel +49 2166 99886 43 info@splus2.de www.splus2.de	Deutschland	Splus2								
21	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	FOTOTHERM S.r.l. via Olmi 1 33050 Gonars (Udine) Tel +39 0432 931595 info@fototherm.com www.fototherm.com	Italien	Serie Cs Serie AL	poly Si mono Si	Glas-Folie? Glas-Folie?			1638 x 982 x 41 mm 1660 x 990 x 51 mm	27 kg 32 kg	220-250 Wp 275-285 Wp	-0.43%/K -0.43%/K
22	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	PA-ID GmbH Bruchtanenstraße 9 D-63801 Kleinostheim info@pa-id.de www.2power.de	Deutschland	2Power HM 1000 Mono Black	mono Si	Glas-Folie?			1640 x 992 x 45 mm	21 kg	260 Wp	-0.45%/K
	Flachkollektor ohne Abdeckung als Dachziegel		auch unter: Dachziegelwerke Nelskamp GmbH		Nelskamp MS 5 2Power	mono Si				1965 x 400 x 25 mm	9.54 kg	100 Wp	-0.43%/K
23	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	res-regenerative energietechnik und -systeme GmbH Wolfertsbronn 5 D-91550 Dinkelsbühl Tel +49 9851 89900 0 info.de@res-energie.eu www.res-energie.eu	Deutschland	res-PV++ res-PV++ 300 res-PV++ Projekt	mono Si mono Si	Glas-Folie	Kupfer	Kapillarrohre	1655 x 995 x 40 mm 1655 x 995 x 40 mm	22.5 kg 22.5 kg	265-275 Wp 300 Wp	-0.46%/K -0.43%/K
24	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	BRANDONI SOLARE S.p.a. Via O. Pignini, 8 60022 Castelfidardo (AN) Tel. +39 071 78563 info@brandonisolare.com www.brandonisolare.com	Italien	HYBRID SOLAR PANEL SBP-XXX	poly Si poly Si	Glas-Folie	Aluminium	Rollbond	1640 x 992 x 40 mm 1661 x 997 x 42 mm	22.5 kg 32 kg	250 Wp 230-255 Wp	-0.46%/K -0.44%/K
25	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	ChinaLand +86 18096606899 chn123@chnland.com	China	CHN-72M(PVT)	mono Si	Glas-Folie?			1580 x 808 x 40 mm	25 kg	200-210 Wp	-0.44%/K
26	Flachkollektor ohne Abdeckung - Nachrüstsatz	mit Rückseiten-dämmung (nicht komplett)	SunDrum Solar 469 River Road Hudson, MA 01749 Tel +1 508 740 6256 info@sundrumsolar.com www.sundrumsolar.com	USA	SDM 100								
27	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	Nieberle Solar Pfarrer-Wilhelm-Weg 5 87640 Biessenhofen Tel +49 8342 965830 info@nieberle-solar.com www.nieberle-solar.com	Deutschland	ISIEtherm WRS 200-ST48F ISIEtherm WRS 250-ST60F ISIEtherm R 200 M ISIEtherm	poly Si poly Si poly Si	Glas-Folie Glas-Folie Glas-Folie		Klick-System Klick-System Klick-System	1320 x 992 x 45 mm 1650 x 992 x 38 mm 1580 x 808 x 35 mm	32.5 kg 39.5 kg 32.5 kg	200 Wp 250 Wp 200 Wp	
	Flachkollektor ohne Abdeckung - Nachrüstsatz	mit Rückseiten-dämmung								je nach PV-Modul			

Kennwerte thermisch											Zertifizierung					
Nr	Brutto- fläche	Apertur- fläche	Absor- ber- fläche	Kennlinien- modell	Bezugs- fläche	El. Betriebs- pkt bei therm. Messung	Quelle Kennwerte	eta0	abgedeckt a1 [W/(m 2*K)]	a2 [W/(m 2*K2)]	nicht-abgedeckt bu b1 b2	quasi-dynamisch c1 c2 c3 c4 c6 K_thet a_d	Offener Luftkolektor mdot eta0 bu	Still- stands- temp	IEC	Solar Key- mark
13																nein
14		1.51 m2					Datenblatt	0.4-0.5						60°C	IEC 61215 IEC 61730	nein
15																nein
16	2.02 m2	1.86 m2		nicht- abgedeckt	Apertur- fläche	nicht spezifiziert	Datenblatt	0.555			0.051 9.547 1.389			80°C		nein (nicht für PVT)
17	1.70 m2			nicht- abgedeckt	Brutto- fläche	MPP	Keymark	0.404			0.05 7.918 0.379			90°C	IEC 61215 IEC 61730	ja
18																nein
19																nein
20																nein
21	1.61 m2	1.59 m2		abgedeckt	Apertur- fläche	MPP	Keymark	0.559	9.123	0				84.5°C	IEC 61215 IEC 61730	ja
		1.58 m2													IEC 61215 IEC 61730	nur für IEC 61730 Serie Cs
22	1.63 m2	1.57 m2		quasi- dynamisch	Brutto- fläche	MPP	Keymark	0.471				5.999 0 1.299 0.486 0.06 0.811		83°C	?	ja
		0.64 m2												80°C	?	ja
23	1.65 m2														?	nein
24	1.66 m2	1.44 m2		abgedeckt	Apertur- fläche	nicht spezifiziert	Datenblatt	0.538	15.529	0.01				83°C (Daten- blatt)	IEC 61215 IEC 61730	? Ja laut Daten- blatt
25	1.28 m2														?	nein
26																nein
27	1.29 m2													90°C	IEC 61215 IEC 61730	i.V.
	1.59 m2													90°C	IEC 61215 IEC 61730	i.V.
	1.29 m2													90°C	IEC 61215 IEC 61730	i.V.

Klassifizierung					Bauart				Kennwerte allgemein		Kennwerte PV		
Nr	Typ	Hersteller	Land	Modell	PV-Zelltyp	PV-Aufbau	Absorbermaterial	Bauart thermisch	Verbindung PV-Absorber	Abmessungen	Gewicht	Leistung	STC Temp. koeff P
28	Flachkollektor ohne Abdeckung als Dachziegel	mit Rückseiten-dämmung	Energyntegration S.r.l. Via Giosuè Carducci 8 20123 Milano (MI) +39 0342 687218 info@energyntegration.com www.energyntegration.com	Italien	EY-Hybrid	mono Si	Glas-Folie	Kupfer-Aluminium	Mäander-absorber	2000 x 500 x 28 mm	18 kg	80 Wp	-0.4%/K
29	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	MAS srl Via dell' Artigianato 3 31020 San Polo di Piave (TV) Tel +39 0422802311 info@roofmas.com www.roofmas.com	Italien	MAS roof Conditioned Photovoltaic	poly Si	Glas-Folie?	Aluminium	Rollbond	1860 x 930 x 212 mm		215 Wp	
30	Flachkollektor ohne Abdeckung - Nachrüstsatz	mit Rückseiten-dämmung	CGA Technologies Srl Via dell'Industria, 22 33043 Cividale del Friuli (UD) Tel +39 0432 705111 info@cgatech.it www.cgatech.it	Italien	inside Hybrid Solar Thermal		Glas-Folie	Aluminium	Rollbond	1652 x 1000 x 45 mm	34 kg		
31	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	F.D.E. Solar S.r.l. Viale del Lavoro 39 37044 Cologna Veneta (VR) Tel +39 0442 84807 info@fdesolar.com www.fdesolar.com	Italien	FDE-HYBRID	poly Si	Glas-Folie	Kupfer-Aluminium	Harfe	1666 x 992 x 40 mm	22 kg	250 Wp	-0.37%/K
32	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	SUNERG Solar s.r.l. Via Donnini, 51 - Loc. Cinquemiglia Città di Castello (PG) Tel +39 075.8540018 info@sunergsolar.com www.sunergsolar.com	Italien	TESP-P60	poly Si	Glas-Folie?	Aluminium	Rollbond	1645 x 990 x 46 mm	32 kg	250 - 280 Wp	-0.42%/K
33	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	Natural Technology Developments Ltd Office 59, Viewpoint Building Derwentside Business Centre Consett Co. Durham, DH8 6BN Tel +44 191 6450407 contactus@solarangel.com www.solarangel.com	Grossbritannien	Solar Angel DG-01	mono Si	Glas-Folie	Aluminium	Harfe	1630 x 986 x 35 mm	25 kg	250 Wp	
34	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	SOLTOP Schuppisser AG St. Gallerstrasse 3 + 5a CH-8353 Elgg Tel +41 52 397 77 77 www.soltop.ch	Schweiz	Soltop Alpha hybrid ID	mono Si	Glas-Folie	Kupfer	Mäander-absorber	laminiert	1660 x 985	23 kg	
35	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	Minimise Generation 6 Stirling Park, Laker Road, Rochester Airport Estate, Rochester, Kent ME1 3QR +44 (0) 330 313 3220 info@minimisegeneration.com	Grossbritannien	PowerHybrid 240	mono Si	Glas-Folie	Kupfer-Aluminium		1582 x 800 x 50 mm	26 kg	240 Wp	
36	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	SolarTech International B.V. Postbus 576 5600 AN Eindhoven Tel +31(0)40 - 888 2992 info@energiedak.nl www.energiedak.nl	Niederlande	Energiedach®-Plus	amorph Si	Dachfolie	Kunststoff-Blech			8.66 kg/m2	63 Wp/m2	
37	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	Tractile Pty Ltd. 9 Lawson Street Southport QLD 4215 T: 1300 00TRAC (1300 008 722) info@tractile.com.au http://tractile.com.au	Australien	Eclipse Solar Tile - TR-EC-ST1001-PV76M	mono Si	Glas-Folie			1105 x 690 x 71 mm	19.56 kg	76 Wp	-0.37%/K
38	Flachkollektor ohne Abdeckung	mit Rückseiten-dämmung	Solimpeks Solar Energy Corp Fevzi Çakmak Mah. 10753. Sk. No:3-3A Konya Tel +90 444 06 02 info@solimpeks.com www.solimpeks.com	Türkei	Volther PowerVolt	mono Si	Glas-Folie?	Kupfer		828 x 1601 x 90 mm	24.4 kg	200 Wp	-0,471%/K
	Flachkollektor mit Abdeckung	PV auf Absorber			Volther PowerTherm	mono Si	Glas-Folie?	Kupfer		870 x 1640 x 105 mm	34.4 kg	180 Wp	
39	Flachkollektor mit Abdeckung	PV auf Absorber	Power Panel Inc. 13881 West Chicago Street Detroit, MI 48228 info@powerpanel.com www.powerpanel.com	USA	PVT1	mono Si	Glas-Zellen direkt auf Absorber	Aluminium	Zellen direkt auf Absorber befestigt	1384 x 718 x 111 mm	16.8 kg	115 Wp	
40	Flachkollektor mit Abdeckung	PV unter Glas	SELA SOLAR, S.L. C/ Pitera, 16 03700 Dénia (Alicante) Tel +34 966 420 309 info@selasolar.com www.selasolar.com	Spanien	SELA SOLAR M-240PVT	poly Si	Glas-Folie	Kupfer	Harfe	2350 x 960 x 85 mm	69 kg	240 Wp	
41	Flachkollektor mit Abdeckung	PV unter Glas?	Hörmann-Barkas Metallbau GmbH Bereich solarhybrid Jochen-Köhler-Str. 3 09669 Frankenberg Tel +49 37206 56 809 0 info@hoermann-solarhybrid.de www.hoermann-solarhybrid.de	Deutschland	PT-U 250/145 PT-U 250/193	poly Si		Aluminium	Vollflächen-absorber	2064 x 1155 x 98 mm	42 kg	144.9 Wp	
						poly Si		Aluminium	Vollflächen-absorber	2064 x 1155 x 98 mm	42 kg	192.8 Wp	
42	Flachkollektor mit Abdeckung	PV auf Absorber	EndeF Engineering S.L. Poligono Ciudad del Transporte. C/PA nº11 50820 San Juan de Mozarrifar, Zaragoza info@endef.com www.endef.com	Spanien	Ecomesh	poly Si		Kupfer	(mit Edelgasfüllung)	1653 x 998 x 104 mm	45 kg	240 Wp	

Kennwerte thermisch											Zertifizierung					
Nr	Brutto- fläche	Apertur- fläche	Absor- ber- fläche	Kennlinien- modell	Bezugs- fläche	El. Betriebs- pkt bei therm. Messung	Quelle Kennwerte	eta0	abgedeckt a1 [W/(m 2*K)]	a2 [W/(m 2*K2)]	nicht-abgedeckt bu b1 b2	quasi-dynamisch c1 c2 c3 c4 c6 K_thet a_d	Offener Luftkollektor mdot eta0 bu [kg/h]	Still- stands- temp	IEC	Solar Key- mark
28		ca. 0.5 m2												60°C (max. Temp)		nein
29															?	nein
30	1.63m2	1.57 m2		nicht- abgedeckt	Apertur- fläche	MPP	Keymark	0.486			0.017 13.035 1.057			80°C		ja
31	1.63m2	1.48 m2		nicht- abgedeckt	Apertur- fläche	MPP	Keymark	0.536			0.035 8.23 1.55			90.3°C	IEC 61215 ja IEC 61730	
32		1.45 m2		abgedeckt	Apertur- fläche	nicht spezifiziert	Datenblatt	0.538	15.529	0.01				83°C	IEC 61215 nein IEC 61730	
33		1.55 m2		abgedeckt	Apertur- fläche	MPP	Keymark	0.417	12.488	0.008				79°C	IEC 61215 ja IEC 61730	
34	1.64m2			nicht- abgedeckt	Brutto- fläche	MPP	Datenblatt	0.638			0.054 10.66 1.1868					nein nein
35							Datenblatt	0.534	8.37	0.586				93°C		nein
36															IEC 61646 nein IEC 61730	
37																nein
38		1.36 m2		abgedeckt	Apertur- fläche	nicht spezifiziert	Keymark	0.476	8.4	0.588				101°C	?	ja
		1.42 m2		abgedeckt	Apertur- fläche	MPP	Keymark	0.486	4.028	0.067				135°C	?	ja
39															nein (UL)	nein
40	2.26m2	2.00 m2		abgedeckt	nicht spezifiziert	nicht spezifiziert	Datenblatt	0.715	3.176	0.023				75°C		
41	2.38m2	1.34 m2 1.05 m2		abgedeckt	Apertur- fläche	nicht- spezifiziert	Datenblatt	0.815 0.832	5.00 5.44	0.024 0.033				153.7°C 137.7°C		nein (nicht für
42							Datenblatt	0.69	2.59	0.012						nein

Klassifizierung					Bauart					Kennwerte allgemein		Kennwerte PV	
Nr	Typ	Hersteller	Land	Modell	PV-Zelltyp	PV-Aufbau	Absorbermaterial	Bauart thermisch	Verbindung PV-Absorber	Abmessungen	Gewicht	Leistung STC	Temp. koeff P
43	Flachkollektor mit Abdeckung	PV auf Absorber 3F Solar Technologies GmbH Vorarlberger Allee 38 A – 1230 Wien Tel +43 1 585 01 78 office@3f-solar.at www.3f-solar.at	Österreich	Solar One Hybridkollektor	mono Si	Glas-Folie	Kupfer	Ultraschallgeschweißter Streifenabsorber, gelötete Rohrhäfen		1676 x 1008 x 63 mm	42 kg	265 Wp	
44	Luftkollektor	PV-Modul mit hinterlegtem Luftkollektor Systovi 5 rue du Chêne Lassé – CP 1008 44 806 Saint-Herblain Cedex Tel +33 2 40 92 44 20 contact@systovi.com www.systovi.com	Frankreich	R-VOLT	mono Si	Glas-Folie	Polypropylen			1518 x 1011 x 43 mm	27.5 kg	250 Wp	-0.47%/K
45	Luftkollektor	PV-Modul mit hinterlegtem Luftkollektor GROUPE SOLUTION ENERGIE 155-159 rue du Docteur Bauer 93400 SAINT OUEEN Tel +33(0)1 70 32 08 00 contact@segrou.fr www.segroup.fr	Frankreich	GSE AIR' SYSTEM	Standardmodul	Glas-Folie	Polypropylen			Standardmodul, bei Solar Keymark mit Bosch c-Si M60S: 1660 x 990 x 50 mm			
46	Luftkollektor	PV-Modul mit hinterlegtem Luftkollektor BASE / SELLANDE Espace Le Trèfle 35 rue Thomas Edison 33610 CANEJAN Tel +33 5 35 54 49 59 contact@base-innovation.com www.base-innovation.com	Frankreich	Cogen'Air	Standardmodul	Glas-Folie			geklebt	Standardmodul		250 Wp	
47	Luftkollektor	Luftkollektor + Nutzung Luft unter PV-Feld IRFTS 26, rue du 35ème Régiment d'Aviation 69500 BRON + 33 4 78 38 83 10 info@irfts.com www.irfts.com	Frankreich	EASY ROOF Boost'R	Standardmodul (restliches Modulfeld)					1650 x 990 x 73 mm	26 kg		
48	Luftkollektor	SCX Solar B.V. Zaanstraat 2 5712 SN Someren Tel +31 (0)40 744 02 02 info@scx-solar.eu www.scx-solar.eu	Niederlande	SCX Soloroof® Home Edition								17-21 kg/m²	
49	Luftkollektor	Luftkollektor als Gestell für PV-Modul Conserval Engineering Inc. 200 Wildcat Rd. Toronto, ON M3J2N5 Tel +1 416 661 7057 info@solarwall.com www.solarwall.com	Kanada	SolarWall PV/T SolarDuct PV/T	Standardmodul	Glas-Folie	Stahl	Vollflächenabsorber	Montage PV auf Trapezblech			100 W/m2	
50	Luftkollektor	PV für Ventilatorantrieb Grammer Solar GmbH Oskar-von-Miller Straße 8 D-92224 Amberg Tel +49 9621 30 85 7 0 info@grammer-solar.de www.grammer-solar.de	Deutschland	TWINSOLAR compact 2.0 TWINSOLAR compact 4.0/4.5/6.0			Aluminium	Rippenabsorber		2000 x 1000 mm	47 kg		
51	Luftkollektor	PV für Ventilatorantrieb Scanheat A/S Gotlandsvej 22 8700 Horsens Tel +45 7628 4100 info@scanheat.dk www.scanheat.dk	Dänemark	Scansun XL 250 XL 400 XL 400 LD XL 900			Aluminium	Rippenabsorber		570 x 870 x 60 mm 660 x 1050 x 60 mm 550 x 1250 x 60 mm 900 x 1275 x 60 mm	13 kg 15 kg 14 kg 28 kg	6.7 W 8.2 W 8 W 11.4 W	
52	Luftkollektor	PV für Ventilatorantrieb Solar Venti A/S Fabriksvej 8 DK 8881 Thorsø Tel +45 8696 6700 info1@solarventi.dk www.solarventi.dk	Dänemark	Standard SV3/ SV7 SV14/SV14K SV20/SV20K SV30/SV30K						704 x 524 x 55 mm 1004 x 704 x 55 mm 1974 x 704 x 55 mm 1974 x 1004 x 55 mm 3000 x 1020 x 75 mm		6 W 12 W 12 W / 18 W 12 W / 18 W 18 W / 24 W	
53	Vakuümrohrenkollektor	Photonomi Global Group Citypoint Tower, 1 Ropemaker St, London, EC2Y 9HT. Tel +44 2034 115 312 sales@hone.world www.hone.world	Grossbritannien	HONE 501 Thermal/Electric	amorph Si					1608 x 1045 x 136 mm	51.5 kg	100 Wp	

Kennwerte thermisch														Zertifizierung								
Nr	Brutto- Apertur- Absorber- fläche fläche ber- fläche		Kennlinien- Bezugs- modell fläche	El. Betriebs Quelle pkt bei Kennwerte therm. Messung	eta0	abgedeckt		nicht-abgedeckt			quasi-dynamisch						Offener Luftkollektor			Still- stands- temp	IEC	Solar Key- mark
	a1	a2				bu	b1	b2	c1	c2	c3	c4	c6	K_thet a_d	mdot	eta0	bu					
43	1.69 m2	1.58 m2	Brutto- fläche	MPP	AIT Messbericht	0.487	5.881	0.006										90°C		nein		
44	1.48 m2	1.40 m2	offener Luft- kollektor	Brutto- fläche	MPP	Keymark	0.408 (345.6 kg/h)										346 0.408 0.0450 238 0.363 0.0470 180 0.316 0.0379	75.3°C	IEC 61215 ja IEC 61730			
45	1.64 m2	1.63 m2															55.72°C		ja			
46																			nein			
47	1.61 m2	1.54 m2	offener Luft- kollektor	Brutto- fläche	MPP	Keymark	0.545 (281 kg/h)										281 0.545 0.0564 245 0.518 0.0538 187 0.477 0.0561	80°C	ja			
48																			nein			
49																			nein			
50	2.01 m2	1.60 m2	offener Luft- kollektor	Apertur- fläche	Ventilator- betrieb	Keymark	0.631 (mdot =141.5 kg/h)										141.5 0.631 118.6 0.584 74.0 0.489	130°C	ja			
51																			nein			
52	1.39 m2	1.26 m2	offener Luft- kollektor	Apertur- fläche	Ventilator- betrieb	Keymark	0.639 (173 kg/h)										173 0.639 113 0.569 80 0.509		ja (für SV Profes sional)			
53	1.68 m2	0.88 m2			Datenblatt		0.75	2.368	0									254.4°C	nein			