Benutzerdokumentation, Oktober 2022

Simulation von Energiesystemen

mit dem Tachion-Simulation-Framework

energieschweiz

Inhaltsverzeichnis

1 System- und Parameterbeschreibung 3

1.1 PV-Schemata: Stromverbrauch, Verbrauchsprofile und Solaroptimierung 6

1.1.1 Eigenverbrauch 6

1.1.2 Stromverbrauch 6

1.1.3 Option «Solaroptimiert» 7

1.1.4 Stromprofile 7

1.2 Batterie 7

2 Erläuterungen zur Simulation 8

2.1 Wetterdaten 8

2.2 Gebäude- und Haustechniksimulation 9

2.3 Weitere Energieverbraucher 10

2.3.1 Warmwasserverbrauch 10

2.3.2 Stromverbrauch 11

2.4 Energietechnik 12

2.5 Energiebilanzierung 12

3 Solarertrag und die übrigen Energiequellen 13

3.1 Photovoltaik 13

3.2 Solarwärme 13

3.3 Zusatzheizung (nicht-solare Heizung) 14

4 Ablauf der Simulation 15

5 Der Tachion-Assistent 16

5.1 Manuelle und automatische Auslegung 17

6 Benutzerdokumentation «Wirtschaftlichkeitsberechnung» 18

6.1 Hauptresultate in der Ergebnisübersicht 18

6.2 Wirtschaftlichkeitsresultate im Dialog «Renditerechner» 19

6.3 Langzeiteffekte 22

6.4 Berechnung der Investitionskosten und Förderbeiträge 23

6.5 Weitere Berechnungsgrundlagen 24

6.6 Steuerrechtliche Aspekte 25

7 Benutzerdokumentation «Monatsdaten» 26

7.1 Ertragsüberprüfung 26

7.2 Upload von Ertragsdaten 27

7.3 Kalibrierung der Simulation 27

Die vorliegende Dokumentation erläutert auf den ersten beiden Seiten die verfügbaren Solarsystemvarianten sowie die Inputparameter des Solarrechners. Im zweiten Teil werden zahlreiche Hintergrundinformationen zu Simulation erörtert. Es geht um die zugrundegelegten Wetterdaten, die berücksichtigten physikalischen Phänomene, den Detaillierungsgrad der Simulation, die in den Systemen angewandten Regelkonzepte und die Methodik zur Analyse der Ergebnisse.

1 System- und Parameterbeschreibung

Solaranlagen kommen in vielen Systemvarianten vor. Der Solarrechner von EnergieSchweiz konzentriert sich auf die vier wichtigsten, welche so oder ähnlich in ca. 90% aller Solaranlagen zum Einsatz kommen. Die folgenden Grafiken erläutern zwei Photovoltaik- sowie zwei Solarwärmeanlagen, die mithilfe des Solarrechners geplant, simuliert und analysiert werden können.

Abb. 1: Photovoltaik: Solare Stromversorgung mit Eigenverbrauch: Solarstrom kann entweder ans lokale Netz abgegeben oder direkt im Haushalt genutzt werden, sogenannter Eigenverbrauch. (Der Wechselrichter zur Umwandlung des Photovoltaik-Gleichstroms in Wechselstrom ist in der Grafik durch den im Zähler angedeuteten Chip symbolisiert.) Pro Person und Tag wird ein Stromverbrauch von 2.5 kWh angenommen. Solarstrom wird prioritär im Haushalt verbraucht, falls mehr Strom produziert wird, wird dieser ans Netz abgegeben, bei zu geringer Produktion wird Netzstrom bezogen.

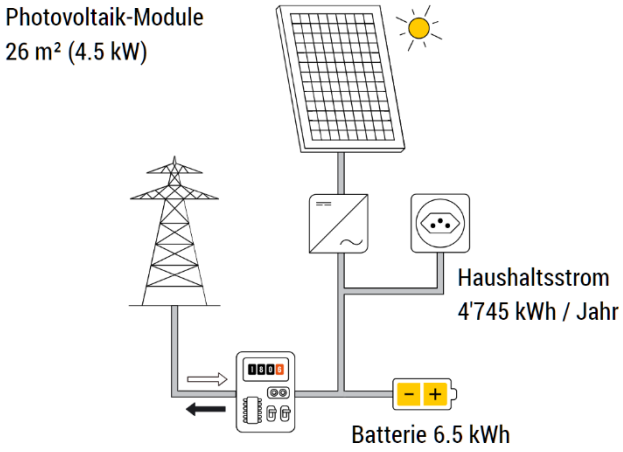


Abb. 2: Photovoltaik: Haushaltstrom und Warmwassererzeugung: Solarstrom kann entweder ans lokale Netz abgegeben oder im Gebäude als Haushaltstrom oder für die Warmwassererzeugung (mittels einer Wärmepumpe oder einem Elektroheizstab) verwendet werden, sogenannter Eigenverbrauch. (Der Wechselrichter zur Umwandlung des Photovoltaik-Gleichstroms in Wechselstrom und der Stromverbrauch im Haushalt wurden in der Grafik weggelassen.) Pro Person und Tag werden ein Stromverbrauch von 2.5 kWh und ein Warmwasserverbrauch von 50 Liter bei 55°C angenommen. Solarstrom wird prioritär im Haushalt verbraucht, mit zweiter Priorität in der Wärmepumpe. Falls noch mehr Strom produziert wird, wird dieser ans Netz abgegeben, bei zu geringer Produktion wird Netzstrom bezogen.

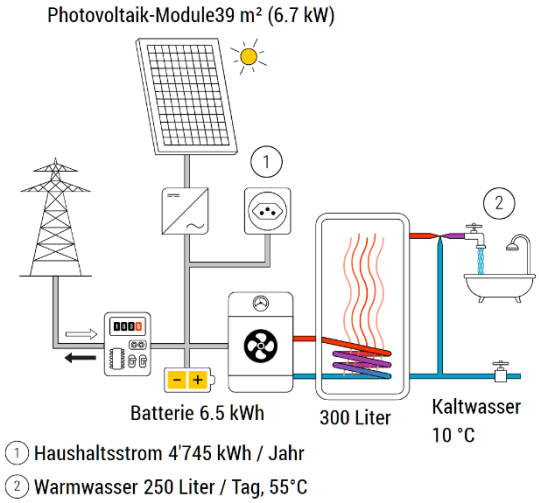


Abb. 3: Photovoltaik: Haushaltstrom, Warmwasser- und Heizenergieversorgung: Solarstrom kann entweder ans lokale Netz abgegeben oder im Eigenverbrauch als Haushaltstrom, für die Warmwassererzeugung (mittels einer Wärmepumpe oder eines Elektroheizstabs) oder die Gebäudeheizung verwendet werden. Pro Person und Tag werden ein Stromverbrauch von 2.5 kWh und ein Warmwasserverbrauch von 50 Liter bei 55°C angenommen. Solarstrom wird prioritär im Haushalt verbraucht, mit zweiter Priorität für das Warmwasser, danach für das Gebäude. Falls noch mehr Strom produziert wird, wird damit zuerst die Batterie geladen, der Rest dann ans Netz abgegeben. Bei Strombedarf wird zuerst Strom aus der Batterie, danach Netzstrom bezogen.

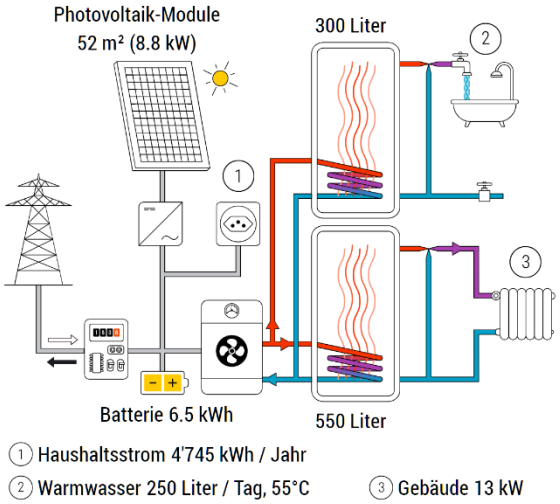


Abb. 4: Solarwärme: Solare Warmwasseranlage: Der Solarkreis, betrieben mit einem Wasser-Glykol-Gemisch, heizt den Speicher über einen Wendelwärmetauscher von unten her auf (die entsprechende Umwälzpumpe wurde zur grafischen Vereinfachung weggelassen). Bei unzureichender Temperatur im oberen Speicherbereich wird die fehlende Energie durch eine wählbare Zusatzheizung nachgeliefert. Pro Person und Tag wird ein Warmwasserverbrauch von 50 Liter bei 55°C angenommen. Ein Mischventil (Verbrühungsschutz) beim Speicheraustritt stellt sicher, dass nicht zu heisses Warmwasser ins Verteilnetz gelangt.

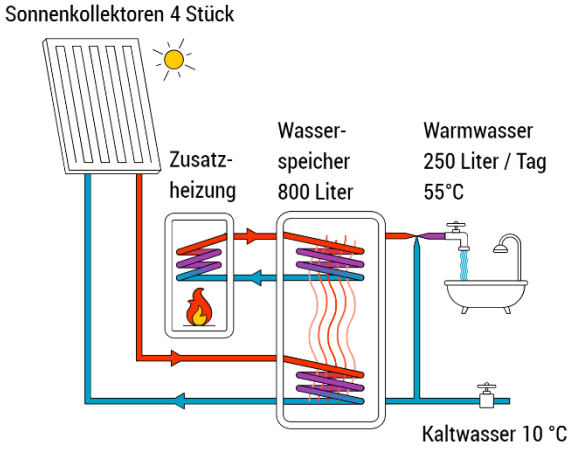
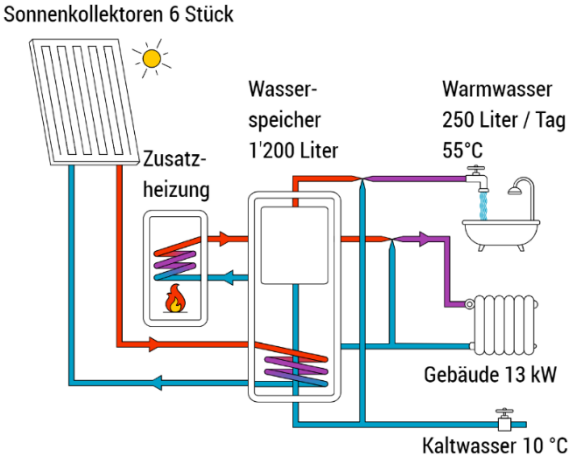


Abb. 5: Solarwärme: Solare Heizungs- und Warmwasseranlage: Der Solarkreis, betrieben mit einem Wasser-Glykol-Gemisch, heizt den Speicher über einen Wendelwärmetauscher von unten her auf (die entsprechende Umwälzpumpe wurde zur grafischen Vereinfachung weggelassen). Bei unzureichender Temperatur im oberen Bereich des Kombispeichers wird die fehlende Energie durch eine Zusatzheizung nachgeliefert. Die Energie für das Gebäude wird aus dem mittleren Speicherbereich entnommen, das Warmwasser aus einem internen Tank im oberen Speicherbereich. Pro Person und Tag wird ein Warmwasserverbrauch von 50 Liter bei 55°C angenommen. Ein Mischventil (Verbrühungsschutz) beim Speicheraustritt stellt sicher, dass nicht zu heisses Warmwasser ins Verteilnetz gelangt. Ein weiteres Mischventil reguliert im Heizkreislauf die Heizvorlauftemperatur. Je nach Gebäudetyp wird eine Radiatoren- oder Fussbodenheizung angenommen und simuliert.



Die folgende Tabelle zeigt und erläutert die Einstellparameter des Solarrechners:

Thema	**Beschreibung**
Postleitzahl	Schweizer Postleitzahl, anhand dieser wird der Ortsname angezeigt
Technologie	Photovoltaik oder Solarwärme
Auslegungsmodus	automatisch (die Anlagegrösse wird anhand der Anzahl Bewohner, der Systemwahl, der Orientierung und Neigung festgelegt) oder manuell (die Anlagengrösse wird durch den Benutzer definiert)
Bewohner im Haus	Photovoltaik: 1…100, Solarwärme: 1...20
Dachneigung	0° bis 90°, 0° bedeutet horizontal, 90° vertikal (Fassade)
Dachorientierung	-180° bis +180°, 0° bedeutet Süden, -90° Osten, +90° Westen, 180° Norden
Wahl des Systems	Photovoltaik: Eigenverbrauch Haushalt, Eigenverbrauch Haushalt + Warmwasser (via Wärmepumpe oder Elektroheizstab) oder Haushalt + Warmwasser + Heizung Solarwärme: nur Warmwasser oder Warmwasser und Heizung mit Kombispeicher
Modulfläche	Dach und/oder Fassade mit jeweils 2 bis 150 kW
Kollektoranzahl	1 bis 20 Module, was einer Bruttofläche von 2 bis 40 m^2 entspricht
Speichergrösse	Für Warmwasser: 400 bis 2000 Liter, Kombispeicher: 1000 bis 4000 Liter
	«Weitere Einstellungen»
Modul-Wirkungsgrad	PV-Modul- Wirkungsgrad 13, 17, **19**, 20, 21, 23 % (gemäss Standardbedingungen)
Warmwasser-Erwärmung	Für Anlagentyp «Haushalt + Warmwasser»: Luft-Wasser-Wärmepumpe oder Elektroheizung
Kollektortyp	Für die Simulation können alle auf «Kollektorliste.ch» aufgeführten Komponenten, d.h. alle in der Schweiz geförderten Kollektoren, eingesetzt werden. Dazu ist zuerst ein Hersteller und dann ein Kollektor-Modell dieses Herstellers zu selektieren. In der Grundeinstellung stehen in der Kategorie «Standardkollektoren» ein Flach- und ein Röhrenkollektor zur Verfügung. Für die Preiskalkulation wird nur zwischen Flach- und Röhrenkollektor unterschieden. Die «Kosten der schlüsselfertigen Anlage» entsprechen einem Mittelwert und können im Einzelfall von den effektiven Kosten einer Anlage klar abweichen.
Bestehendes Heizsystem	Öl/Gas-Standard-/Brennwert-Kessel, Pellets-, Stückholz-Kessel, Luft-Wasser-/Sole-Wasser-Wärmepumpe, Elektroheizung
Gebäudetyp	Baujahr: vor 1950, 1950 - 1979, 1980 - 1999, 2000 - 2019, oder Baustandard Neubau, Minergie, Minergie-P
Wohnfläche	100 bis 1000 m^2 (bzw. bis 5000 m^2 bei PV + Heizung), Definiert die Gebäudegrösse (Energiebezugsfläche)

Tab. 1: Übersicht der Input-Parameter auf der Benutzeroberfläche und im Fenster «Weitere Einstellungen».

1.1 PV-Schemata: Stromverbrauch, Verbrauchsprofile und Solaroptimierung

1.1.1 Eigenverbrauch

Der produzierte Solarstrom wird nach folgenden Prioritäten verwendet und bilanziert:

a) direkt im Haushalt verbrauchter Strom
b) Strom für die Warmwassererzeugung
c) Strom für die Heizung
d) Strom in die Batterie (solange noch nicht vollgeladen)
e) Einspeisung ins Netz

Wird Strom benötigt, wird nach folgenden Prioritäten bezogen:

f) Strom von der Batterie (solange noch vorhanden)
g) Strom vom Netz

Zum Eigenverbrauch werden dann die Verbräuche von a) – c) und f) gerechnet.
Durch das Laden und Entladen der Batterie entstehen in den Wandlern und der Batterie selbst Verluste. Diese werden nicht direkt angezeigt, können aber rechnerisch als Differenz zwischen Gesamtstromproduktion, selbst verbrauchtem Strom und ins Netz eingespeistem Strom berechnet werden.

1.1.2 Stromverbrauch

Im Solarrechner sind drei Stromverbrauchsgruppen hinterlegt:

Haushaltsstrom	Ermittelt anhand der Anzahl Personen oder definiert durch den «Haushaltstrom pro Jahr» in den weiteren Einstellungen. Zeitlicher Verlauf gemäss Stromprofil (s. 1.1.3)
Warmwasser	Ermittelt anhand des WW-Bedarfs, welcher auf der Anzahl Personen basiert. Simuliert wird ein Elektro- oder Wärmepumpenboiler mit Freigabezeiten zwischen 1:00 und 7:00 Uhr. Ist die Option «Solaroptimiert» (standardmässig aktiv) gewählt, so kann der Boiler ohne Einschränkung mit Solarstrom nachgeladen werden.
Heizung	Der Verbrauch wird aus dem eingestellten Gebäudetyp und der Energiebezugsfläche ermittelt, tägliche Sperrzeiten für Netzstrom von 12:00 bis 14:00 h – ist die Option «Solaroptimiert» gewählt, so kann der Pufferspeicher auch innerhalb der Sperrzeit mit Solarstrom nachgeladen werden.

1.1.3 Option «Solaroptimiert»

Diese befindet sich in den erweiterten Einstellungen und ist für die Schemata Haushalt + WW und Haushalt + WW + Heizung gültig. Standardmässig ist diese aktiviert.

Wird die Anlage solaroptimiert betrieben, erhöht sich der Eigenverbrauchsanteil: in diesem Modus kann Solarstrom (aber kein Netzstrom) auch während der Sperrzeiten den Boiler und/oder Pufferspeicher nachladen.

1.1.4 Stromprofile

Für den zeitlichen Verlauf des Stromverbrauchs kann in den «weiteren Einstellungen» aus vier Profilen gewählt werden:

Haushalt	Das standardmässig gewählte Profil, geeignet für ein EFH oder MFH
Gewerbe 5 Tage	Profil eines KMUs: 90% Stromverbrauch tagsüber von Montag bis Freitag, 10% Stromverbrauch zu den übrigen Tagen/Zeiten («Ruhestromverbrauch»)
Gewerbe 6 Tage	Wie Gewerbe 5 Tage, aber mit Samstag
Gewerbe 7 Tage	Stromverbrauch an 7 Tagen, 24 h

Für einen detaillierten Beschrieb der Profile siehe Kapitel 2.3.2.

1.2 Batterie

Bei allen PV-Schemata kann optional eine Batterie zugeschaltet werden. Diese ermöglicht einen zeitversetzten Eigenverbrauch, indem z.B. der tagsüber gespeicherte Solarstrom abends verbraucht werden kann. Die Auslegung erfolgt dabei durch den Tachion-Assistenten automatisch gemäss folgender Regel:

a) nutzbare Batteriespeicherkapazität in kWh = 50% des durchschnittlichen, täglichen Haushaltsstromverbrauchs

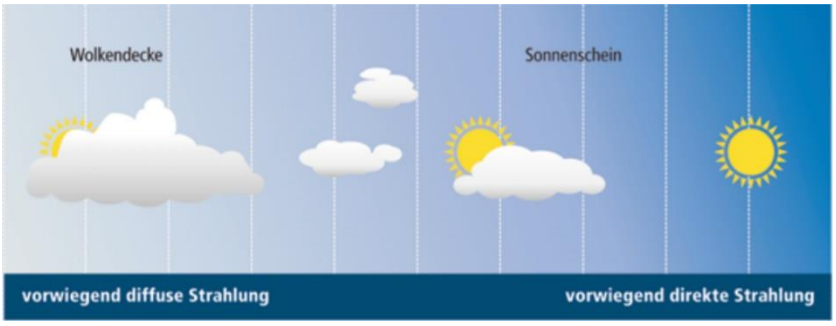
b) nutzbare Batteriespeicherkapazität = 1.5 × Leistung des PV-Feldes

Die für die Simulation verwendete Speicherkapazität ist dann der kleinere Wert aus a) und b)

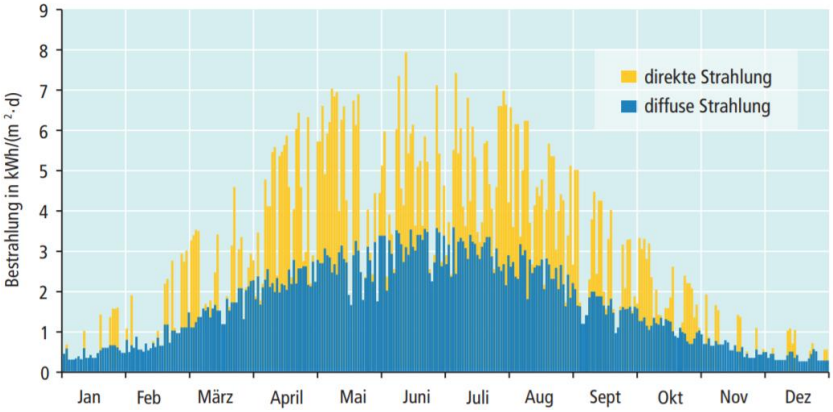
2 Erläuterungen zur Simulation

Der Energieverbrauch von Gebäuden und Haushalten ist nicht nur von den eingesetzten Geräten und energietechnischen Lösungen abhängig, sondern von verschiedenen externen Faktoren wie dem Wetter und internen Faktoren wie dem Verhalten der Bewohner. Diese beiden Einflussfaktoren sind nur beschränkt prognostizierbar und zeichnen sich durch ein hohes Mass an Variabilität und Zufälligkeit aus. Dieses facettenreiche Zusammenspiel zahlreicher Faktoren lässt sich nur mithilfe feinauflösender Zeitschrittsimulationen modellieren. Entsprechende der Periodizität des Wetters von einem Jahr, muss für eine aussagekräftige Langzeitprognose ein volles Jahr durch-simuliert werden. Die Tachion-Simulations-Engine durchläuft typischerweise 100‘000 Zeitschritte für eine Jahresberechnung und benötigt hierzu nur wenige Millisekunden.

2.1 Wetterdaten



Zuverlässige Wetterdaten («Meteodaten») sind die Voraussetzung für eine aussagekräftige Gebäudeenergiesimulation. Tachion verwendet hierzu Meteonorm, einen weitverbreiteten Standard für Meteodaten. Dabei wird aus einer 15-jährigen Messperiode ein Referenzjahr erstellt, das bezüglich monatlichen Einstrahlungen und Aussentemperaturen den Durchschnitt der Messperiode repräsentiert. Gleichzeitig besitzt das Wetter die für den gewählten Standort typische Variabilität, d.h. Wettervariationen im Stunden-, Tages-, Wochen-Verlauf entsprechen den realen Gegebenheiten. Je nach «Frequenzspektrum» der Wetterverlaufs reagiert ein Energiesystem mit bestimmten «Verbrauchsfrequenzen» und Speicherkapazitäten anders. Die Wettereigenschaften Einstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Bedeckungsgrad und Bodenalbedo sind zudem alle physikalisch miteinander verknüpft. Ebenso hängen die Wirkungsgrade von Solarsystemen, Wärmepumpen, Gebäuden oder die Beleuchtungszeiten in Gebäuden von diesen Wetterdaten ab und müssen in konsistenter Weise in der Simulation berücksichtigt werden.



Wenn es um die Simulation mit gemessenen Daten geht (siehe hierzu auch die Erläuterungen im Abschnitt «Monatsdaten») ist die Koppelung der Meteodaten bereits durch das «reale Wetter» sichergestellt. Und auch die Energieverbräuche lassen sich so sehr präzise nachbilden. Die entsprechenden Meteodaten stammen von MeteoSchweiz und besitzen eine zeitliche Auflösung von einer Stunde

sowie eine räumliche Auflösung von 2 x 2 km. Aufgrund des Horizontes bei den exakten Koordinaten des Standortes und der Gebäudehöhe wird der präzise Zeitpunkt des Sonnenauf- und -untergangs berechnet und die Sonnenposition in Minutenschritten berücksichtigt. Auf diese Weise können auch lokal wirksame Verschattungen eines Gebäudes berücksichtigt werden.

2.2 Gebäude- und Haustechniksimulation

Etwa zwei Drittel des Energieverbrauchs von Bestandswohnbauten entfällt auf Heizenergie. Anders als der Haushaltsstrom- und Warmwasserverbrauch ist der Heizenergieverbrauch sehr direkt von zahlreichen Umwelteinflüssen abhängig: Sonneneinstrahlung, Aussentemperatur, Windgeschwindigkeit, etc. Alle diese Einflussfaktoren sowie die thermische Trägheit des Gebäudes müssen für eine realitätsnahe Wiedergabe berücksichtigt werden. Die Tachion-Simulations-Engine bildet den Wärmeaustausch über die Gebäudehülle, Lüftung und Infiltration, Abwärme von internen Wärmequellen und Passivgewinnen durch Sonneneinstrahlung ab (siehe Tabelle 2). Letztere liefern bei älteren Wohnhäusern etwa 30%, bei Passivhäusern bis zu 80% der nutzbaren Heizenergie. Haustechnische Installationen, die die Einstrahlung beeinträchtigen (z.B. Jalousien) oder stark auf diese reagieren (z.B. Thermostatregler) werden je nach Gebäudetyp entsprechend detailliert abgebildet. Vom älteren Wohnhaus bis zum Passivhaus wird so zeitdynamisch hoch aufgelöst der präzise Heizenergiebedarf errechnet. Die Simulationsmethodik sowie die verfeinerten Strahlungsmodelle erfüllen die Schweizer Gebäudenorm SIA 380/1.
Bei der Gebäudesimulation werden u.a. folgende Aspekte berücksichtigt:

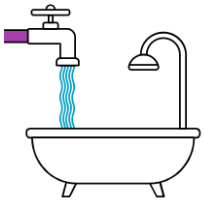
Thema	**Beschreibung**
Gebäudegeometrie	Länge, Breite, Höhe, Satteldach, Gebäudeorientierung, Gebäudehüllziffer, Energiebezugsfläche, Anteil beheizter Dach- und Kellerstock, Fensteranteile Nord/Ost/Süd/West
Wärmetransmission	Wände, Dächer, Fenster, Türen und Boden
Passivgewinne	Direkt- und Diffusstrahlung, Fenster g- und IAM-Wert, Nischentiefe, temperaturgeführte Jalousien mit Windsensor
Lüftung	manuelle oder automatische, kontrollierte Lüftung (mit Wärmerückgewinnung), Infiltration, Überhitzungskühlung (im Sommer)
Thermische Trägheit	Wärmekapazitäten des Gebäudes, der Fussbodenheizung, bzw. Radiatoren, des Fundamentes sowie grösserer Anlagekomponenten
Interne Lasten	anwesende Personen, Geräte, Beleuchtung, Warmwasserabwärme
Komforttemperatur	wird anhand der Luft- und Oberflächentemperatur ermittelt
Wärmeabgabe an das Gebäude	Radiatoren, Fussbodenheizung oder Luftheizung
Heizkurve	Auslegungs-/Grenz-/Vorlauf-/Rücklauftemperatur, Heizkörperexponent, Thermostatregler, automatisches, adaptives Einregulieren der Heizkurve
Solltemperatur	Tag / Nacht, allfällige Nachabsenkung

Tab. 2: Geometrische, haus- und gebäudetechnische Faktoren, die u.a. bei der Gebäudesimulation berücksichtigt werden.

Der Benutzer definiert sein Gebäude alleine aufgrund des Gebäudetyps und der Energiebezugsfläche. Wenn die Energiebezugsfläche nicht explizit angegeben wird, wird sie aufgrund statistischer Daten rekonstruiert. Auch alle weiteren Gebäudeparameter werden aufgrund von Normvorgaben, Erfahrungsdaten, Datenbanken und technischen Plausibilisierungen rekonstruiert. So kann mit einem Minimum an technischen Fragen eine höchst wahrscheinliche Rekonstruktion der Situation und hohe Zuverlässigkeit der Simulation erzielt werden.

2.3 Weitere Energieverbraucher

Die Warmwassererzeugung und der Haushaltstrom sind weitere Energieverbraucher im Gebäude. Der Warmwasserverbrauch variiert über den Tag hinweg recht stark: morgens, mittags und abends treten Verbrauchsspitzen auf, tagsüber bis am Abend liegt der Verbrauch auf moderatem Niveau. Da die Warmwasserversorgung über einen Wasserspeicher («Boiler») erfolgt, kann die Nachheizung zeitverzögert erfolgen. Warmwasseranlagen in Mehrfamilienhäusern beinhalten typischerweise eine Warmwasser-Zirkulation. Die dadurch entstehenden Wärmeverluste und die Durchmischung des Speichers beeinträchtigen Umfang und Zeitpunkt der Wassernacherwärmung. Alle diese Effekte werden in Tachion für eine möglichst realistische Simulation berücksichtigt.



2.3.1 Warmwasserverbrauch

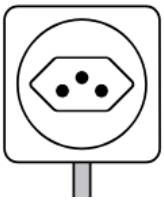
Bei der Warmwasser-Simulation werden u.a. folgende Aspekte berücksichtigt:

Thema	Beschreibung
Verbrauchsprofil	Menge und zeitliche Variation des Wasserverbrauchs über den Tag
Systemhydraulik	Systemkonstellation je nach Verbrauchern, Verbrauchsmenge und Art der Zusatzheizung
Speichergrösse, Dämmung	Je nach System und Zweck der Speicher wird deren Volumen gemäss der Norm SIA 384/385 und abgestuft nach marktgängigen Grössen dimensioniert und gedämmt.
Position der Wendel und Anschlüsse	Position und Grösse Wendelwärmetauscher, der direkten Speicheranschlüsse, und Position der Ein-/Ausschaltfühler werden dimensioniert
Zirkulation	Länge des Zirkulationsnetzes, Rohrleitung, Dämmung und Freigabezeiten werden je nach Objektgrösse dimensioniert und festgelegt
Wärmeverluste	Speicher-, Anschluss-, Zirkulation- und Ausstossverluste
Thermodynamische Phänomene	Vertikale Wärmeleitung in der Speicherwand und der Wasserschichtung, einseitig freie Konvektion bei den Wendeln, Thermozirkulation in Rohren

Tab. 3: Geometrische und heiztechnische Faktoren, die bei der Warmwassersimulation berücksichtigt werden.

In der Warmwasseranlage wie im Heizkreis ist für eine einwandfreie Bereitstellung von Wärmeenergie ein Einjustieren der Anlage erforderlich. In der Praxis führt der Heizungstechniker einen hydraulischen Abgleich und eine Einregulierung der Heizkurve durch. In der Simulation wird dies durch einen Onsite-Assistenten erledigt.

2.3.2 Stromverbrauch



Dadurch, dass die Speicherung von Strom sehr viel teurer ist als die Speicherung von Wärme, wird das zeitliche Zusammentreffen von Stromproduktion und -verbrauch zum entscheidenden Faktor für die Energie- und Ertragsbilanzierung. Aktuell werden in den Solarrechnern von EnergieSchweiz/Swissolar keine Batterien eingesetzt, was dem Normalfall heutiger Solaranlagen entspricht. Wenn Solarstrom nicht im Haushalt oder zur Warmwassererzeugung eingesetzt werden kann, muss er zu relativ tiefen Preis ins Netz eingespeist werden.
Der Stromverbrauch im Haushalt kann rasch variieren: Geräte können in kurzer Abfolge ein- und ausgeschaltet werden oder in der Leistung variieren. Daneben gibt es konstante und Interwall-Stromverbräuche für Standby, Kühlgeräte oder die Haustechnik. Der Stromverbrauch variiert (sub)-stündlich, täglich, wöchentlich und jahreszeitlich nach bestimmten Mustern (siehe Tabelle 3). Nebst der Verbrauchsmenge hat der Bewohnertyp, z.B. eine Familien mit Kindern, ein arbeitendes Ehepaar, Rentner, eine WG oder Einzelpersonen, einen grossen Einfluss auf den Anteil des eigenverbrauchten Solarstroms. Bezogen auf die Lebensdauer einer Solaranlage von 30 – 40 Jahren ergibt sich normalerweise eine bunte Mischung von Bewohnertypen. Tachion berücksichtigt dies durch ein für die Simulation generiertes Mischprofil, welches sich sehr gut für eine langfristige Prognose eignet. Auch wird der über die Jahre leicht sinkende Ertrag von Solarmodulen (die sogenannte «Degradation»), simulationstechnisch nachgebildet.
Bei der Haushalts-Stromverbrauchs-Simulation werden u.a. folgende Aspekte berücksichtigt:

Thema	**Beschreibung**
Anzahl Bewohner	Bestimmt die Menge und Häufigkeit der Strombezüge über den Tag. Bei mehr Bewohnern ergibt sich ein gleichmässigeres Stromverbrauchsprofil.
Stromverbraucher Haushalt	Im Verbrauch enthalten: Geräte in Küche und Bad, Beleuchtung, Unterhaltungselektronik, Standby-Verluste, Anteil am Haustechnikstrom. Nicht enthalten: elektrisch betriebene Wärmeerzeuger (Wärmepumpe, Heizstab), gewerblicher Stromverbrauch, Elektromobilität.
Tagesprofile	Die verwendeten Tagesprofile repräsentieren den durchschnittlichen Stromverbrauch der Bevölkerung. Bei der Profilerzeugung hat dieser Wert die Bedeutung einer «Wahrscheinlichkeit für einen Strombezug».
Wochenzyklus	Spezifische Tagesprofile für Wochentage / Samstag / Sonntag
Jahreszyklus	Spezifische Tagesprofile für Winter / Übergangsjahreszeit / Sommer und jahreszyklisch variierende Verbrauchsmengen.
Zeitauflösung	Quasi im «Zeitkontinuum»
Gewerbe-Profile	Alternativ zum Haushaltprofil kann ein gewerbliches 5-,6- oder 7-Tagesprofil gewählt werden. Dabei handelt es sich um statische Wochenprofile, welche zyklisch über das ganze Jahr wiederholt werden. Der Verbrauch wird so skaliert, dass er die gewünschte Jahressumme ergibt.

Tab. 4: Erzeugung des Verbrauchsprofils, das bei der Haushaltstromsimulation berücksichtigt wird.

Die vom Tachion-Generator erzeugten Stromprofile weisen auf kleiner Zeitskala ein stochastisches (zufälliges) Verhalten[1] auf, Wochen- und Monatsverläufe entsprechen sie den statistischen Verbrauchszahlen.

In Kombination mit einem elektrischen Wärmeerzeuger wird der verfügbare Solarstrom prioritär für den Haushalt und in zweiter Linie für die Warmwassererzeugung genutzt. Dazu wird für die Solarbeladung eine allfällige Tagsperre (z.B. des Boilers) ausgesetzt, der Tachion-Regler ist so konfiguriert, dass keine Temperaturüberhöhung im Speicher stattfindet. Diese angewendeten Regelungen entsprechen der gängigen Praxis.

2.4 Energietechnik

Zur Energietechnik gehören alle Komponenten und Systemteile, welche für die Umwandlung, Übertragung, Speicherung und Verteilung von Energie (in Form von Strom oder Wärme) genutzt werden. Je nach zeitlicher Verfügbarkeit von Energiequellen sind bei konventionellen Systemen grössere oder kleinere Speicher erforderlich (z.B. Wärmepumpen, die nachts mit Niedertarifstrom betrieben werden, oder Stückholzkessel, die täglich nur einmal befeuert werden). Kombiniert mit Solarwärme wird das Speichervolumen so vergrössert, dass eine Warmwasserspeicherung für 1 – 2 Tage, bei Kombispeichern sogar für eine Woche möglich ist. Um das Verhalten solarer Speicher korrekt wiedergeben zu können, müssen zahlreiche Wärmeübertragungs- und Mischphänomene modelliert werden. Tachion bildet in seinem Speichermodell eine beliebig feine Schichtung («Temperaturabstufung») ab. Dadurch kann der Zeitpunkt für das Ein- und Ausschalten der Zusatzheizung präzise nachgebildet werden. Selbst spezielle Regel- und Prioritätsalgorithmen, wie sie im Zusammenhang mit Photovoltaik und Wärmepumpen eingesetzt werden, können so fehlerfrei simuliert werden.
Weitere Verluste treten beim Energietransport über Leitungen auf. Dazu werden Abschätzungen zur Länge der Solar-, Haustechnik-, Zirkulationsleitungen vorgenommen und simuliert. Speicher wie auch wärmeführende Leitungen werden gemäss SIA-Norm 384/385 gedämmt.

2.5 Energiebilanzierung

Der Anteil der Solar- und Zusatzenergie, der beim Verbraucher ankommt, hängt von der Effizienz der Systeme und dem Zusammenspiel zwischen den beiden Energieformen ab. Die Optimierung von Solarsystemen setzt eine möglichst «unbestechliche» Methodik und eine klar und sachgerecht definierte Bilanzgrenze voraus.

Zur Bilanzierung wird in Tachion das sogenannte Energie-Paket-Tracking eingesetzt: jedem «Energie-Paket», das an das System abgegeben wird, wird ein «Absender-Label» zugeteilt. Bei Energieübertragungen, -verlusten oder -Schichtmischungen wird die Zusammensetzung der Pakete neu berechnet und diese bis zur Konsumation durch das ganze System hindurch verfolgt. Beim Bezug einer Energiedienstleitung erfolgt dann die Bilanzierung. So setzen sich die Strom-, Wasser- und Wärmebezüge über das Jahr aus Tausenden kleinen Energiepaketen zusammen. Indem die Bilanz für ein System mit und ohne Solaranlage gerechnet wird, kann die effektive solare Einsparung ausgewiesen werden. Die Methode ist auch gegen starke Eingriffe in das Systemdesign sehr robust, und erlaubt so eine objektive Gesamtbeurteilung.

[1] Da für die einzelnen Strombezüge deterministische Zufallsreihen verwendet werden, ergibt sich bei Wiederholung der Simulation immer dasselbe Ergebnis.

3 Solarertrag und die übrigen Energiequellen

Die Berechnung des Solarertrages steht am Anfang der gesamten Energieberechnung und ist ein Kernstück für eine präzise Solarsimulation. Entsprechend wichtig ist die detaillierte Berücksichtigung aller relevanten Umweltfaktoren. Dabei erfolgt z.B. die Berechnung der Sonnenposition minutengenau.

3.1 Photovoltaik

Tachion errechnet den Ertrag der Photovoltaik-Module auf Basis folgender Einflussfaktoren:

Thema	Beschreibung
Meteodaten	Berücksichtigte Daten: Sonnenposition, Direktstrahlung, Intensität und hemisphärische Verteilung der Diffusstrahlung, Schneebedeckungsgrad (Albedo), Himmels- und Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit
Wirkungsgrad	Modulwirkungsgrad nach STC (Standard Test Conditions)
Einfluss Temperatur	Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrad nach STC, Berechnung der Modultemperatur aufgrund der Einstrahlung, Windgeschwindigkeit Himmels- und Umgebungstemperatur
Einfluss Strahlung	Schwachlichtkorrektur
Einfluss Geometrie	Wirkungsgradkorrektur aufgrund des Winkelfaktors
Degradation	Wirkungsgradabnahme aufgrund der Modulalterung
Verschmutzung	Leistungseinbusse aufgrund der Modulverschmutzung
Schwachlichteffekt	Einstrahlungsabhängiger, elektrischer Wirkungsgrad der Module
Mismatch	Leistungseinbusse aufgrund von Leistungsvarianzen zwischen Modulen
Leitungsverluste	Leistungsabhängige Verluste der DC-Leitungen
Wechselrichter	Berücksichtigung der Wechselrichterkennlinie

Tab. 5: Einflussfaktoren auf den Ertrag der Photovoltaik-Anlage.

3.2 Solarwärme

Tachion errechnet den solarthermischen Ertrag auf Basis folgender Einflussfaktoren:

Thema	Beschreibung
Meteodaten	Berücksichtigte Daten: Sonnenposition, Direktstrahlung, Intensität und hemisphärische Verteilung der Diffusstrahlung, Schneebedeckungsgrad (Albedo), Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit
Wirkungsgrad	Optischer Wirkungsgrad nach ISO-9806
Einfluss Temperatur	Lineare und quadratische Verlustkoeffizienten nach ISO-9806
Einfluss Geometrie	Longitudinaler / transversaler Winkelfaktor
Wärmekapazität	Thermische Trägheit der Kollektoren
Leitungsverluste	Wärmeverluste je nach Länge und Dämmung der Leitungen
Wärmeübertragung	Wärmeübertragung anhand der Wärmetauschergeometrie

Tab. 6: Einflussfaktoren auf den Ertrag der Solarwärme-Anlage.

Die Leistungskenndaten von Kollektoren werden anhand eines international standardisierten Prüfverfahrens bestimmt und zertifiziert. In der Schweiz führt das Institut für Solartechnik SPF in Rapperswil solche Tests durch und führt eine Datenbank aller geförderter Kollektoren. Kurze Zeit nach deren Publikation auf «Kollektorliste» sind die Daten auch im Solarrechner verfügbar.
Der solarthermische Ertrag hängt wesentlich von der Temperatur und Schichtung des Speichers ab. Die Aktivität der Solarpumpe ist über den Solarregler direkt an die Temperatursituation im Speicher gekoppelt. Tachion berücksichtigt alle diese Wechselwirkungen. Eine Degradation wie bei der Photovoltaik existiert so bei Solarwärme nicht und wird daher auch nicht modelliert.

3.3 Zusatzheizung (nicht-solare Heizung)

Nebst der solaren Energiequelle ist auch die Zusatzenergiequelle (für Solarwärme oder Photovoltaik mit Wärmepumpe) detailliert zu modellieren und dynamisch zu simulieren. Bei häufigem Ein- und Ausschaltzyklen wie z.B. im Sommer zum Nachheizen von Warmwasser kann dies dazu führen, dass der Wirkungsgrad eines Kessels unter Umständen auf die Hälfte absinken kann. Auf der anderen Seite können kondensierende Kessel die Energieressourcen um einige Prozente besser ausnutzen. So wird eine Reihe von Einflussfaktoren bei der Simulation berücksichtigt.
Tachion errechnet die angegebene Energie der Zusatzheizung u.a. aufgrund folgender Einflussfaktoren:

Thema	**Beschreibung**
Wirkungsgrad	Nutzbare Teil der Endenergie, der in Form von Wärme an das System abgegeben wird.
Nennleistung	Maximale Leistungsaufnahme eines Gerätes. Bei Wärmepumpen ist diese zudem von der Quell- und Vorlauftemperatur abhängig.
Minimalleistung	Minimal Leistungsaufnahme im Fall von modulierenden Geräten (z.B. die Wärmepumpe in Kombination mit Photovoltaikanlagen).
Thermische Masse	Thermische Energie, die beim Anfahren von Kesseln und Wärmepumpen erforderlich ist.
Gütefaktor	Bei Wärmepumpen: Datenkennfeld der Input- und Output-Leistungen je nach Quell- und Vorlauftemperatur gemäss Norm-Messungen (EN 14511).
Umwelteinflüsse	Luft-Wasser-Wärmepumpen: Aussentemperatur, Sole-Wasser-Wärmepumpen: Dynamische Bodentemperatur, Kessel: mittlerer Sauerstoffpartialdruck (Höhe über Meer)

Tab. 7: Einflussfaktoren auf die abgegebene Energie der Zusatzheizung.

Für die ökologische Beurteilung der Energieversorgungssystems ist nebst dem Wirkungsgrad der Energieumwandlung die CO_2-Bilanz eines Energieträgers der ausschlaggebende Faktor. Die beim Rechner von EnergieSchweiz verwendeten CO_2-Faktoren beruhen auf Untersuchungen des WWF Schweiz.

4 Ablauf der Simulation

Aufgrund der Parametervorgaben durch den Benutzer und den durch den Tachion-Assistenten ermittelten Werten wird die gesamte Anlage unter Anwendung anerkannter Planungsgrundsätze sowie der geltenden Normen im Detail durchgeplant. Bei Photovoltaikanlagen werden bis zu 500, bei Solarwärmeanlagen bis zu 1000 Parameter durch den Planungs-Assistenten ermittelt und für die Jahressimulation an die Tachion-Simulations-Engine übergeben.

Während der Simulation werden folgende Abschnitte durchlaufen:

- Horizontlinie anhand der Standortkoordinaten berechnen
- Meteodaten des Standortes unter Berücksichtigung des Horizonts ermitteln
- Einstrahlung auf die Modul-/Kollektorflächen berechnen
- Berechnung Haushaltsstromprofile
- Berechnung Warmwasserbedarfsprofile
- Wärmebedarf des Gebäudes simulieren
- Dynamische Jahressimulation: Energieumwandlung und -transporte von Energiequellen via Speicher (oder direkt) zu den Energieverbrauchern, Energieverluste, etc. in hoher Zeitauflösung simulieren. Zustandsabhängige Wirkungsgrade und Energietransporte werden dynamisch eingebunden und simuliert.

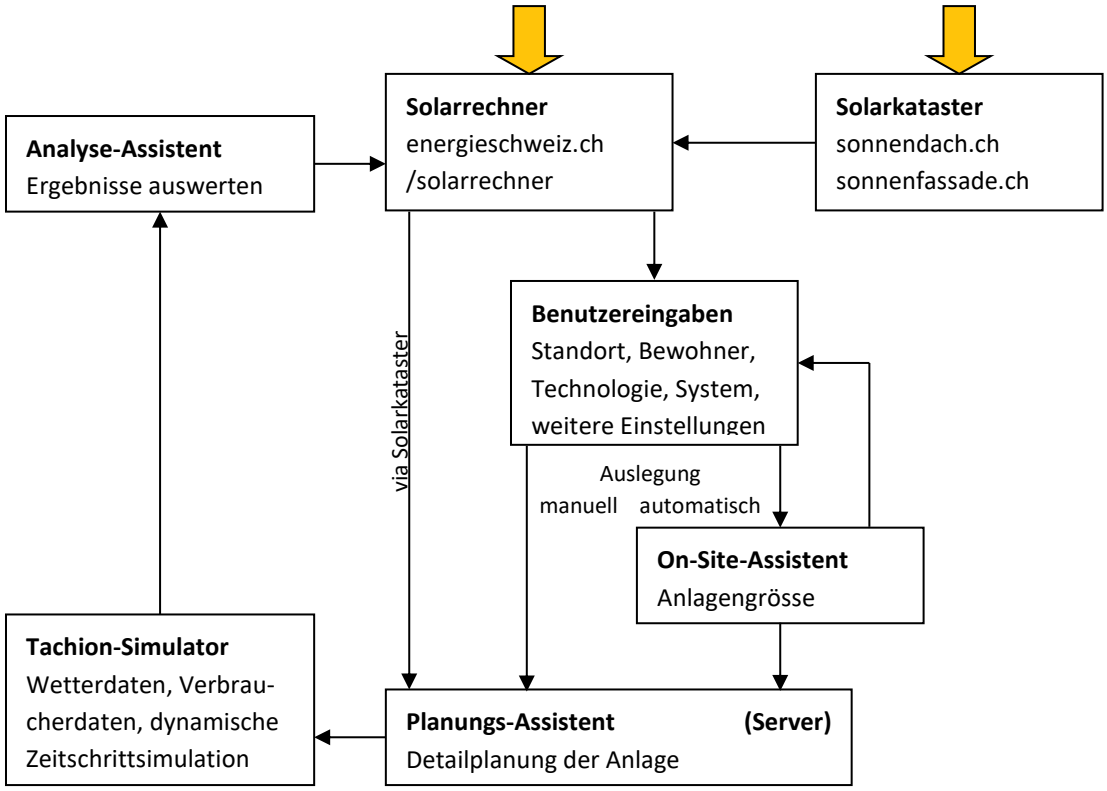
Für die Auswertung der Simulation stehen Dutzende von Kenngrössen in unterschiedlicher Zeitauflösung (als Stunden-, Tages-, Monats- und Jahreswerte), wie auch diverse Systemparameter zur Verfügung. Der Assistent aggregiert diese Daten zu den für die Anzeige erforderlichen Kennwerten und übermittelt sie der Benutzerschnittstelle. Die Daten werden dann als Tabelle, Grafik, etc. dargestellt.

5 Der Tachion-Assistent

Der Benutzer des Solarrechners muss über die Dimensionierung und den Aufbau von Solaranlagen nichts wissen. Dies übernimmt der sogenannte Tachion-Assistent. Die folgende Tabelle zeigt, welche Parameter durch das Solarkataster (www.sonnendach.ch und www.sonnenfassade.ch), durch den Benutzer im Hauptfenster oder über «weitere Einstellungen» definiert werden können und welche durch den Online-Assistenten (Teil des Assistenten in der Userinterface) vorgeschlagen werden:

Parameter	**Solarkataster**	**Hauptfenster**	**weitere Einstellungen**	**Online-Assistent**	**Beschreibung**
Standort (Postleitzahl)	X	X			Basis für die Meteodaten der Simulation
Standortkoordinaten	X				Basis für die Meteodaten und die Beschattung durch Horizont (Berge, Hügel)
Technologie	X	X			Photovoltaik (Strom) oder Solarwärme (Heizen)
Auslegung	X	X			Manuelle oder automatische Planung (Assistent)
Anzahl Bewohner	X	X			Definiert die Anlagengrösse
System		X			Photovoltaik: Haushaltstrom, Strom + Warmwasser Solarwärme: nur Warmwasser, WW + Heizung
Orientierung / Neigung	X	X			Orientierung und Neigung der Module (des Daches)
Modul-Wirkungsgrad			X		Photovoltaik: 13, 17, 19, 20, 21, 23 %
Warmwasser-Erwärmung			X		Photovoltaik: Luft-Wasser-WP, Elektroheizung
Hersteller/Kollektortyp			X		Solarwärme: Flach-, Röhrenkollektor / Kollektorliste.ch
Bestehendes Heizsystem			X		Öl/Gas-Standard-/Brennwert-Kessel, Pellets, Holz, Luft/Sole-Wasser-Wärmepumpe, Elektroheizung
Gebäudetyp			X		Baujahr: vor 1950, 1950-1979, 1980-1999, 2000-14, oder Baustandard Neubau, Minergie, Minergie-P
Wohnfläche	X		X	X	Definiert die Gebäudegrösse
Belegte Dachfläche	X	X		X	Photovoltaik: installierte PV-Fläche auf dem Dach
Belegte Fassadenfläche	X	X		X	Photovoltaik: installierte PV-Fläche in der Fassade
Kollektorfläche		X		X	Solarwärme: installierte Bruttokollektorfläche
Grösse Wasserspeicher		X		X	Solarwärme: installierter Wärmespeicher
Kopplung Fläche/Speicher		X			Solarwärme: Verhältnis Kollektorfläche zu Speicher wird automatisch abgestimmt

Für alle Inputparameter werden möglichst plausible Voreinstellungen angezeigt bzw. vorberechnet. Die Werte können vom Benutzer übernommen oder angepasst werden. So wird die Anlageplanung schrittweise präziser und konkreter.
Anhand der Parameter, die das Solarkataster dem Solarrechner übergibt (sobald der Button «Was kostet meine Photovoltaik-Anlage?» oder «Was kostet meine Solarwärme-Anlage?» gedrückt wird) werden alle zusätzlichen, für die Simulation erforderlichen Inputparameter ermittelt. Die Detailplanung und Simulation werden durchgeführt und die energetische und finanzielle Auswertung angezeigt. Das nachfolgende Schema zeigt die verschiedenen Informationsflüsse:



5.1 Manuelle und automatische Auslegung

Alle durch den Online-Assistenten vorgeschlagenen Parameter können vom Benutzer bearbeitet werden. Parameterabhängigkeiten, welche für ein konsistentes Anlagedesign nötig sind, werden vom Assistenten weiterhin berücksichtigt. Wer auch diesen Automatismus vermeiden möchte, kann die Auslegung auf «manuell» schalten. Damit lassen sich auch nicht-konforme Anlagen definieren und simulieren. Bei der Solarwärme kann zudem eine Kopplung von Speichergrösse und Kollektorfeld ein- oder ausgeschaltet werden. Damit lassen sich weitere manuelle Optimierungsschritte durchführen. Um im Fall der Solarwärme festzustellen, ob eine solche Konstellation noch die Kriterien für Förderung erfüllt, können die Angaben im Solarrechner www.qm-solar.ch eingeben und das Anlagendesign mit einem Klick analysiert werden. Im QM-Solarrechner kann zudem das ganze Spektrum der förderungsberechtigten Kollektoren in die Simulation eingesetzt und ausgewertet werden. Der Rechner berechnet zudem für jede Anlagekonfiguration die kantonalen Förderbeiträge.

6 Benutzerdokumentation «Wirtschaftlichkeitsberechnung»

Dieses Kapitel erläutert die Methoden zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Solaranlagen. Dazu gehören die ökonomischen Rahmenbedingungen, Preismodelle für Investitions-, Betriebs- und Unterhaltskosten, sowie die Förderbeiträge.
Im Solarrechner werden die drei Hauptergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung in der Übersichtstabelle angezeigt. Die detaillierte Auswertung sowie die grundlegenden Basisparameter sind im Dialog «Renditerechner» zu finden.

6.1 Hauptresultate in der Ergebnisübersicht

Photovoltaik

Ergebnisse Simulation	Erläuterungen
Kosten schlüsselfertige Anlage	Die vollständigen Investitionskosten für eine Aufdachanlagen umfassen Planung, Material, Installation, sowie Anmeldung und Inbetriebnahme der Anlage. Nicht enthalten sind der allfällige spätere Ersatz von Komponenten (z.B. Wechselrichter), Steuerabzüge oder Förderbeiträge. Im Tooltip sind die Kosten für eine Indachanlage angegeben. Die angezeigten Beträge sind für die Schweiz typische Erfahrungswerte.
Kleine Einmalvergütung KLEIV	Einmalvergütung für eine Aufdachanlage. Diese richtet sich alleine nach der installierten Leistung der Anlage. Für Anlagen kleiner 100 kW wird die KLEIV («kleine Einmalvergütung») angegeben, für grössere Anlagen die GREIV («grosse Einmalvergütung»). Im Tooltip ist die Einmalvergütung für eine Indachanlage angegeben.
Amortisationsdauer der Anlage	Zur Berechnung der Amortisationszeit der Anlage werden die Nettoinvestitionskosten der Anlage (siehe unten), die Unterhaltskosten (inkl. dem Ersatz von Komponenten, die statistisch gesehen eine kürzere Lebensdauer haben), die Einsparungen und die Rückliefervergütung berücksichtigt.

Solarwärme

Ergebnisse Simulation	Erläuterungen
Kosten schlüsselfertige Anlage	Die vollständigen Investitionskosten für eine Solarwärmeanlage inkl. Speicher umfassen Planung, Material, Installation, sowie Anmeldung und Inbetriebnahme der Anlage. Nicht enthalten sind der spätere Ersatz von Komponenten (z.B. Pumpe, Wärmeträger), Steuerabzüge oder Förderbeiträge. Die Kosten «ohne Solaranlage» werden hier mit Null angegeben. Genau betrachtet fallen aber Kosten für einen ohnehin notwendigen Boiler an.

	Diese «Ohnehin-Kosten» werden bei der Berechnung der Förderung und der Amortisation eingerechnet. Die angezeigten Beträge sind für die Schweiz typische Erfahrungswerte.
Kantonale Förderung	Die kantonale Förderung hängt von drei Faktoren ab: Standortkanton (Stand 2019: keine Förderung in AG, ZG und ZH), verbauter Kollektortyp und der Anzahl der Kollektoren (für Details siehe kollektorliste.ch und qm-solar.ch). Gemäss Harmonisiertem Fördermodell HFM deckt die Förderung 20% der Mehrkosten der Solaranlage. Allfällige lokale Förderprogramme sind nicht berücksichtigt.
Amortisationsdauer der Anlage	Zur Berechnung der Amortisationszeit der Anlage werden die Nettokosten der Anlage (siehe unten), die Unterhaltskosten (inkl. Ersatz von Komponenten), und die Einsparungen berücksichtigt.

6.2 Wirtschaftlichkeitsresultate im Dialog «Renditerechner»

Im «Renditerechner» werden weitere Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit angezeigt und die Rahmenbedingungen können hier modifiziert werden. Die Strompreise (Hoch-/Niedertarif und Einspeisetarif) werden anhand von öffentlich verfügbaren Daten ermittelt. Bei mehreren Stromanbietern in einer Gemeinde hat der Benutzer das zuständige EW zu selektieren. Die Preise können aber auch von Hand definiert werden:

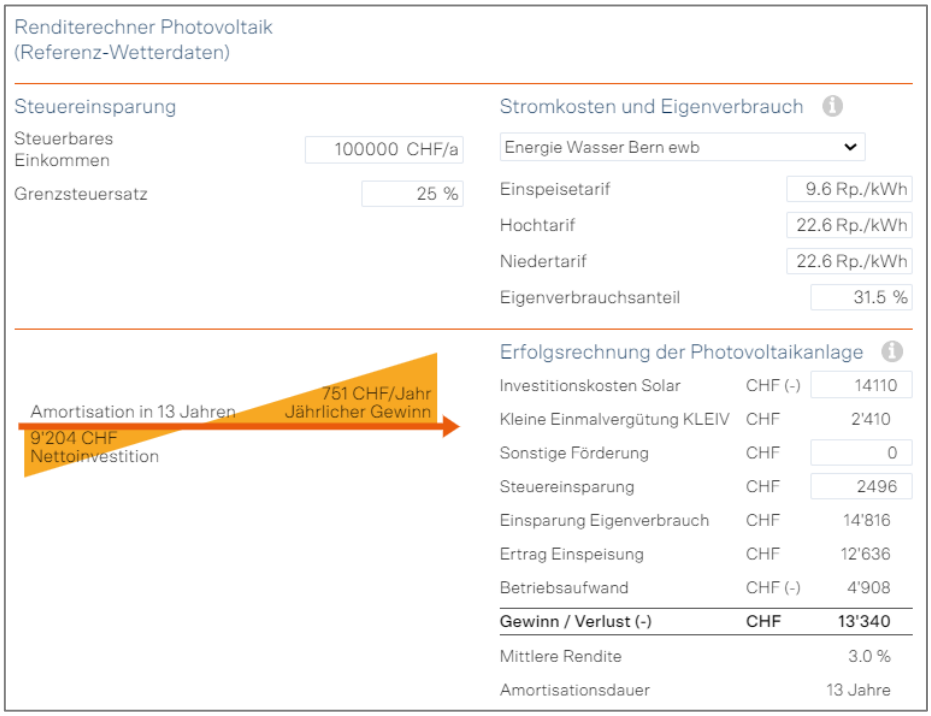


Abb. 11: Benutzerdialog für die Basisparameter und die Detailergebnisse des Renditerechner. Der Standort ist Ittigen, wo BKW und ewb Stromanbieter sind.

Benutzerschnittstelle	Erläuterungen
Vergütungsmodell* (Werte: Ohne Förderung, KLEIV, GREIV)	Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit können verschiedenen Fördermodelle gewählt werden. Für Anlagen über 100 kW kann statt der GREIV auch die KLEIV gewählt werden.
Bauherrschaft: Firma* (Werte: ja / nein)	Für Firmen werden die Preise ohne MwSt. gerechnet (sowohl für die Investition wie für die Energiekosten, dafür ist die Einmalvergütung mehrwertsteuerpflichtig) und der Grenzsteuersatz wird fix auf 20% gesetzt.
Steuerbares Einkommen (Werte: 0 – 250'000 CHF)	Da die Investitionskosten einer Solaranlage in fast allen Kantonen abzugsfähig sind, ist für die Berechnung der Nettokosten und der Amortisation die Angabe des Grenzsteuersatzes erforderlich. Je höher das Einkommen, umso tiefer die Nettokosten und umso kürzer die Amortisationszeit.
Grenzsteuersatz (Werte: 0 – 60 %)	Dieser wird anhand des Steuerbaren Einkommens generisch gerechnet. Der effektive Grenzsteuersatz hängt von Ihrer Wohngemeinde sowie weiteren Eckdaten ab (wie Zivilstand, Konfession, …). Der abgeschätzte Grenzsteuersatz kann deshalb hier geändert werden.
Einspeisetarif (Werte: 0 – 30 Rp/kWh)	Tarif, zu welchem Ihr Elektrizitätswerk den von Ihrer Anlage erzeugten und ins Netz eingespeisten Strom vergütet. Ihren lokal gültigen Einspeisetarif können Sie unter pvtarif.ch nachprüfen.
Hoch-/Niedertarif (Werte: 0 – 30 Rp/kWh)	Tarife, zu welchen Sie den Strom von Ihrem Elektrizitätswerk aus dem Netz beziehen. Sie finden diese Werte auf Ihrer Stromrechnung (bei einem Einheitstarif setzen Sie diesen Wert für beide Tarife ein).
Eigenverbrauchsanteil (Werte: 0 – 100%)	Der Eigenverbrauchsanteil gibt an, wie viel Prozent des produzierten Solarstroms im eigenen Haushalt verbraucht werden. Ohne Batteriespeicher müssen für den Eigenverbrauch Solarstromproduktion und Verbrauch genau gleichzeitig erfolgen. Es lohnt sich also, Tätigkeiten mit hohem Stromverbrauch wie Kochen, Backen, Wäschewaschen, Geschirrspülen, … dann auszuführen (oder den Timer entsprechend zu programmieren), wenn die Sonne (voraussichtlich) auf die Photovoltaikanlage scheint. Je nach Lebensgewohnheiten der Bewohner variiert der Eigenverbrauchsanteil um etwa ±10 %. Die Simulation geht von einem «durchmischten Verbraucherverhalten» aus. Bei viel Personenanwesenheit tagsüber kann der von der Simulation ermittelte Wert um 10 % erhöht werden, bei wenig Anwesenheit tagsüber und am Wochenende sollte der Wert um 10 % reduziert werden. Zu bedenken ist, dass die PV-Anlage über 30 Jahre in Betrieb sein wird und das Benutzerverhalten über diese Zeitspanne abzuschätzen ist. Das «durchmischte Verbraucherprofil» ist daher wohl in der Regel die beste Annäherung an die Realität.

	Für Elektro- oder Wärmepumpenboiler wird in der Simulation angenommen, dass ein Aufheizen tagsüber möglich ist. Die Regelung des Boilers muss dazu in der Lage und entsprechend eingestellt sein.
Investitionskosten	Die angezeigten Kosten entsprechen dem Mittelwert aus zahlreichen realisierten Projekten. In den Kosten enthalten sind die Planung, Material, Installation, Inbetriebnahme sowie der administrative Aufwand. Teilweise enthalten sind Kosten für das Baugerüst oder den Anschluss an den Blitzschutz. Diese Mehrkosten fallen bei einem Teil der PV-Anlagen an, bei anderen nicht. Bezüglich des Aufwandes für die Kabelführung oder der Qualität der Komponenten wurden preislich durchschnittliche Lösungen zugrunde gelegt. Einsparungen durch Substitutionseffekte (für eingesparte «konventionelle» Dachziegel, Fassade, …) werden nicht berücksichtigt.
Einmalvergütung (Photovoltaik)	KLEIV: Anlagen von 2 bis 99,9 kW erhalten die «kleine Einmalvergütung». Die Vergütung für Neuanmeldungen wird nach einer Wartezeit von ca. 1,5 Jahren ausbezahlt. GREIV: Für Anlagen von 100 bis 50'000 kW kann die «grosse Einmalvergütung» beantragt werden. Die Vergütung für Neuanmeldungen wird nach einer Wartezeit von ca. 3 Jahren ausbezahlt.
Kantonale Förderung (Solarwärme)	Alle Kantone, ausser ZG und ZH (Stand 2021), und viele Gemeinden unterstützen Solarwärme-Anlagen (bitte fragen Sie bei Ihren Kantons- und Gemeindebehörden nach). Der angegebene Wert entspricht 20 % der Mehrkosten einer Solaranlage. Diese Vorgabe entspricht dem Harmonisierten Fördermodell (HFM) der Kantone. Erkundigen Sie sich über allfällige zusätzliche Förderprogramm an Ihrem Wohnort.
Steuereinsparung	Die gemäss dem Grenzsteuersatz eingesparten Steuerabgaben. Von der Investition ist die Einmalvergütung zu subtrahieren. Der automatisch berechnete Wert kann von Hand überschrieben werden, wenn die Steuereinsparung genau bekannt ist (oder z.B. mit dem Steuerrechner der Eidgenössischen Steuerverwaltung EStV, Link: https://swisstaxcalculator.estv.admin.ch/#/calculator/income-wealth-taxermittelt wurde)
Nettoinvestitionskosten (Hilfsgrösse)	Dies sind die Investitionskosten abzüglich der Subvention (Einmalvergütung bzw. Kantonale Förderung) und der Steuereinsparung.
Einsparung Eigenverbrauch	Indexierte Einsparung dank Eigenverbrauch über die gesamte Lebensdauer der Anlage: Solarstrom, der zeitgleich im Haushalt verbraucht wird, spart den entsprechenden Strombezug aus dem Netz und ermöglicht nennenswerte finanzielle Einsparungen.
Ertrag Einspeisung (Photovoltaik)	Indexierter Ertrag der Stromeinspeisung über die gesamte Lebensdauer der Anlage: Solarstrom, der nicht im Haushalt verbraucht wird, wird gemäss Konditionen des örtlichen Elektrizitätswerkes ins Netz eingespeist. Die Tarife dafür liegen heute bei etwa 5 – 12 Rp/kWh, sie können aber jährlich variieren.

Synergieeffekte (Solarwärme)	In den Investitionskosten der Solarwärme-Anlage sind auch die Kosten für den Wasserspeicher enthalten. Ein Boiler wird aber auch ohne Solaranlage benötigt. Diese «Ohnehin-Kosten» werden rechnerisch ermittelt (siehe unten). Ferner wird dank der Solaranlage die Zusatzheizung (Kessel oder Wärmepumpe) geschont, was deren Lebensdauer erhöht. Und schliesslich kann die Wartung für beide Installationen in einem erledigt werden. Gesamthaft ist mit einem Synergieeffekt von etwa 30 % der Investitionskosten zu rechnen.
Betriebsaufwand	Indexierte Betriebskosten über die gesamte Lebensdauer der Anlage: Die Unterhaltskosten einer Solaranlage sind sehr gering. Im Wesentlichen geht es um den Ersatz von Komponenten, welche statistisch nicht die gleiche Lebenserwartung wie der der Module bzw. Kollektoren aufweisen (z.B. PV: Wechselrichter, Solarwärme: Pumpen, Wärmeträger (Glykol)). Als jährliche Betriebs- und Unterhaltskosten werden in dieser Berechnung bei der Photovoltaik 1% und bei der Solarwärme 0.5% der Investitionskosten angesetzt.
Gewinn / Verlust (-)	Bilanz aller Ausgaben und Einnahmen/Einsparungen über die gesamte Lebensdauer (gerechnet auf 30 Jahre) der Anlage. Bei einer positiven Zahl («Gewinn») übertreffen die Einsparungen und Erträge die Investitions- und Betriebskosten der Anlage.
Mittlere Rendite	Mittlere jährliche Rendite der Solaranlage, bezogen auf die Nettoinvestitionskosten.
Amortisationsdauer	Nach dieser Zeit übertreffen die kumulierten mittleren Nettoerträge die Nettoinvestitionskosten. Danach besitzt die Anlage eine positive finanzielle Bilanz.

*) Diese Einstellungsmöglichkeiten stehen nur im Solarrechner von Swissolar (swissolar.ch/solardachrechner) zur Verfügung.

6.3 Langzeiteffekte

Prognosen über mehrere Jahrzehnte sind naturgemäss mit Unsicherheiten behaftet. Die Lebensdauer einer Solaranlage liegt statistisch bei 30 – 40 Jahren, folglich müssen über diesen Zeitraum Annahmen über die technische und ökonomische Entwicklung getroffen werden. Folgende Parameter werden den Wirtschaftlichkeitsberechnungen zugrunde gelegt:

Parameter: Wert	**Erläuterungen**
Lebensdauer: 30 Jahre	Bei der Photovoltaik und der Solarwärme wird mit einer Lebenserwartung von 30 Jahren gerechnet. Es gibt zahlreiche Anlagen, die schon weit über 30 Jahre in Betrieb sind. Im konkreten Fall muss aber abgeschätzt werden, ob die baulichen Voraussetzungen (Dacherneuerung, Heizsystem, Nutzung des Gebäudes, etc.) voraussichtlich ebenfalls diese Lebenserwartung aufweisen werden.

Inflation: 1%	Durchschnittliche Geldentwertung über die kommenden 30 Jahre. Die Inflation wird auf die Energiepreise und den Unterhalt der Anlage angewendet.
Realpreissteigerung: 0 bis 2%	Aufgrund der wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen ist je nach Art des Energieträgers mit unterschiedlichen Preissteigerungen zu rechnen: Bei fossilen Energieträgern wird eine Realpreissteigerung von 2% angenommen, für Strom 1% und für Holz 0%.
Degradation: 0.34%	Der Ertrag von Photovoltaik-Modulen nimmt aufgrund der Alterung mit ca. 0.4% pro Jahr ab. Nach 30 Jahren liegt der Ertrag noch etwa bei 90% des ersten Jahres. Der degressive Verlauf des Stromertrag steht der progressiven Preisentwicklung gegenüber.

6.4 Berechnung der Investitionskosten und Förderbeiträge

Photovoltaik (ohne Zusatzkomponenten für Warmwasser- oder Heizungsunterstützung)

Die Kostenberechnung für Photovoltaikanlagen basiert auf zahlreichen Offertvergleichen, die durch EnergieSchweiz über ein breites Spektrum von Anlagegrössen durchgeführt wurden. Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick der Kosten (inkl. MwSt.) für verschiedene Leistungsklassen:

Installierte Leistung	Schlüsselfertige Aufdachanlage	Spezifische Kosten (Aufdach)	Schlüsselfertige Indachanlage	Spezifische Kosten (Indach)
2 kW	9’272 CHF	4’636 CHF/kW	11’126 CHF	5’563 CHF/kW
3 kW	11’952 CHF	3’984 CHF/kW	14’342 CHF	4’781 CHF/kW
5 kW	16’863 CHF	3’373 CHF/kW	20’236 CHF	4’047 CHF/kW
10 kW	27’353 CHF	2’735 CHF/kW	32’824 CHF	3’282 CHF/kW
15 kW	36’304 CHF	2’420 CHF/kW	43’565 CHF	2’904 CHF/kW
20 kW	44’370 CHF	2’219 CHF/kW	53’244 CHF	2’662 CHF/kW
30 kW	59’009 CHF	1’967 CHF/kW	70’811 CHF	2’360 CHF/kW
50 kW	85’478 CHF	1’710 CHF/kW	102’574 CHF	2’051 CHF/kW
75 kW	116’420 CHF	1’552 CHF/kW	139’704 CHF	1’863 CHF/kW
100 kW	146’349 CHF	1’463 CHF/kW	175’619 CHF	1’756 CHF/kW
125 kW	175’748 CHF	1’406 CHF/kW	210’898 CHF	1’687 CHF/kW
150 kW	204’816 CHF	1’365 CHF/kW	245’779 CHF	1’639 CHF/kW

Photovoltaik mit Warmwasser

Zu den oben ermittelten Kosten werden noch die Mehrkosten für einen allfälligen Umbau der Warmwasserversorgung gerechnet. Diese werden mit CHF 500 + CHF 1.- * Boiler-Nennvolumen gerechnet.

Photovoltaik mit Warmwasser und Heizung

Da die Heizungseinbindung von Fall zu Fall sehr unterschiedlich sein kann, werden für eine heizungsunterstützende PV-Anlage nur die Mehrkosten für die Steuerung gerechnet. Diese werden pauschal mit CHF 1000.-, zusätzlich zu den Kosten einer PV-Anlage mit Warmwasser, gerechnet.

Batterie

Die Investitionskosten für die Batterie werden mit CHF 1400.- / kWh eingerechnet. Ist der genaue Preis bekannt, so kann dieser auch von Hand im «Renditerechner» eingetragen werden.

Einmalvergütung EIV

Die Anpassung der Tarife im Solarrechner erfolgt in der Regel ein Monat vor dem offiziellen Tarifwechsel.

Die Förderbeiträge für Photovoltaikanlagen, Formulare, Konditionen und Modalitäten finden Sie hier:

https://pronovo.ch/de/foerderung/einmalverguetung-eiv/foerderbeitrag-berechen/

Solarwärme

Die Kostenberechnung für Solarwärmeanlagen ist aufgrund der sehr variablen baulichen Voraussetzungen bei Warmwasser- und Heizsystemen weniger scharf definierbar als bei der Photovoltaik. Die Kosten für Solarwärme basieren unter anderem auf Feldstudien von Basler & Partner. Aus den Daten wurde ein Modell abgeleitet, bei dem die Hauptkomponenten «Speicher» und «Kollektorfeld» (und der Kollektortyp) unabhängig definiert werden können. Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick der Kosten (inkl. MwSt.) für verschiedene Anlagegrössen:

Grösse Kollektorfeld	Warmwasser Flachkollektor	Warmwasser Röhrenkollektor	Heizung + WW Flachkollektor	Heizung + WW Röhrenkollektor
4 m^2	12’280 CHF	12’600 CHF	15’280 CHF	15’600 CHF
8 m^2	17’560 CHF	18’200 CHF	18’560 CHF	19’200 CHF
12 m^2	23’090 CHF	24’050 CHF	23’090 CHF	24’050 CHF
16 m^2	28’870 CHF	30’150 CHF	28’870 CHF	30’150 CHF
20 m^2	33’400 CHF	35’000 CHF	33’400 CHF	35’000 CHF
24 m^2	36’680 CHF	38’600 CHF	39’180 CHF	41’100 CHF
28 m^2	39’960 CHF	42’200 CHF	44’960 CHF	47’200 CHF
32 m^2	43’240 CHF	45’800 CHF	50’740 CHF	53’300 CHF
36 m^2	46’520 CHF	49’400 CHF	56’520 CHF	59’400 CHF
40 m^2	49’800 CHF	53’000 CHF	59’800 CHF	63’000 CHF

Die Förderbeiträge für Solarwärmeanlagen finden Sie hier: kollektorliste.ch

6.5 Weitere Berechnungsgrundlagen

Die Anteile an Hoch- und Niedertarifstrom, die substituiert, eingespeist bzw. verbraucht werden, hängen von den örtlichen Tarifzeiten (inkl. Wochenendregelung) und verschiedenen weiteren Faktoren ab. Im Rechner wird folgende Aufteilung der Tarifzeiten verwendet:

Stromanteil	Anteil Hochtarif	Anteil Niedertarif
Eigenverbrauch	85 %	15 %
Einspeisung	65 %	35 %
Netzbezug	50 %	50 %

Der Eigenverbrauch wird mit dem Ertrag der Photovoltaikanlage des 15. Jahres, also der Hälfte der Lebensdauer gerechnet. Dies stimmt mit der Einsparung über die gesamten 30 Jahre am besten überein.

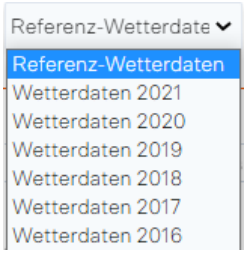
6.6 Steuerrechtliche Aspekte

- Als Steuereinsparung bzgl. Einkommen wird die Differenz aus Investitionskosten und Einmalvergütung, bzw. kantonaler Förderung gerechnet. Auftretende Progressionseffekte wegen einer allfälligen Verrechnung in unterschiedlichen Jahren wurden nicht berücksichtigt.
- Wenn der Ertrag aus der Einspeisung die Kosten des Stromverbrauchs übertrifft, wird der entsprechende Differenzbetrag als zusätzliches Einkommen taxiert. Es wird über die gesamte Lebensdauer der Anlage ein konstanter Grenzsteuersatz angenommen.
- Ein allfälliger Mehrwert der Liegenschaft aufgrund einer Photovoltaik- oder Solarwärmeanlage bzgl. Vermögen oder Eigenmietwert wird nicht berücksichtigt.

Es wird empfohlen, dass Sie Ihre steuerliche Situation vorher mit den örtlichen Behörden klären.

7 Benutzerdokumentation «Monatsdaten»

Mithilfe dieser Anzeige können die monatlichen Simulationsergebnisse numerisch analysiert werden. Sie können entweder für eine genauere Untersuchung des zu erwartenden Solarertrags (wählen Sie das «Referenz-Wetterjahr») oder zur Überprüfung der Erträge einer bestehenden Solaranlage (wählen Sie das gewünschte Wetterdaten-Jahr) verwendet werden:

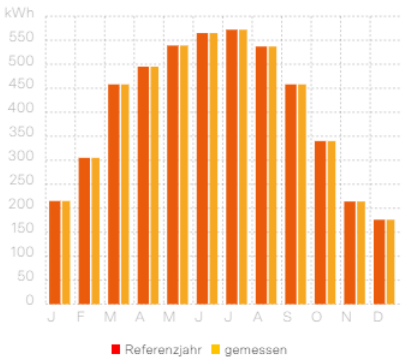


a) **Referenz-Wetterdaten** basieren auf Meteonorm und stellen ein repräsentativ gemitteltes Wetterdaten-Jahr dar. Diese Werte sind für Langzeitprognosen geeignet, da jährlich unterschiedliche Wetterverläufe «ausgemittelt» sind.

b) **Gemessene Wetterdaten** basieren auf gemessenen, räumlich wie zeitlich hochaufgelösten Daten von MeteoSchweiz für ein bestimmtes Jahr. Anhand dieser Daten können die Erträge bestehender Solaranlagen überprüft und Erträge unterschiedlicher Jahre verglichen werden.

c) **Performance-Ratio (PR):** Der Performance Ratio zeigt den Nutzungs- und Effizienzgrad einer Photovoltaikanlage auf (Qualitätsindikator). Anhand einer Zahl zwischen 0 und 100 % wird das Verhältnis zwischen dem effektiven Ertrag und dem potenziellen Referenzertrag angegeben. Als guter Performance Ratio gilt beispielsweise ein Wert zwischen 65 und 80%. Für seine Berechnung sind nicht nur die tatsächlichen Stromproduktionsdaten, sondern auch die Angaben zur standortspezifischen Solareinstrahlung in Modulebene notwendig. Die Performance Ratio bewertet also unter Berücksichtigung der effektiven Sonneneinstrahlung, wie effizient die PV-Anlage als Gesamtsystem Strom erzeugt.

	Gh	Solarertrag		PR
	Referenzjahr	simuliert	gemessen	
Monat	kWh/m²	kWh	kWh	%
Jan	33	215	215	81.3
Feb	54	305	305	80.7
Mrz	99	458	458	79.2
Apr	129	495	495	76.1
Mai	159	539	539	74.6
Jun	178	565	565	73.1
Jul	178	572	572	72.7
Aug	152	537	537	73.2
Sep	110	458	458	75.5
Okt	68	340	340	77.5
Nov	37	214	214	79.6
Dez	27	176	176	80.9
Summe	1'224	4'874	4'874	Ø 77.0
Δ-Referenz	0.0 %	0.0 %		



7.1 Ertragsüberprüfung

1) Einstellen der Anlageparameter im Hauptfenster des Solarrechners
2) Drücken des Buttons «Monatsdaten»:

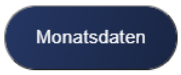
3) Auswahl eines Wetter-Datenjahres

4) Simulierte Monatserträge anzeigen und in die Zwischenablage kopieren (können z.B. in Excel für weitere Auswertungen eingefügt werden).
5) Interaktiver Vergleich: Geben Sie in Spalte 4 («gemessene Daten») die gemessenen Erträge ein. Diese werden zusammen mit den simulierten Erträgen im Diagramm visualisiert.

7.2 Upload von Ertragsdaten

Anstatt die Ertragswerte einzeln einzutragen und mit den simulierten Werten zu vergleichen, können die Monatsdaten auch über ein definiertes Excel-Format in den Solarrechner hochgeladen und dort grafisch dargestellt werden. Gehen Sie dazu folgendermassen vor:

1) Einstellen der Anlageparameter im Hauptfenster des Solarrechners
2) Drücken des Buttons «Monatsdaten»:

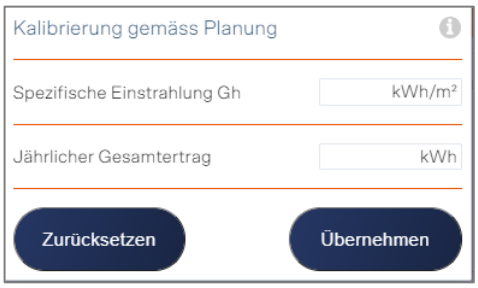


3) Auswahl eines Wetter-Datenjahres
4) Drücken Sie auf den Button «Excel-Upload»
5) Laden Sie das «Excel-Beispiel» herunter und tragen Sie ihre eigenen Messdaten in das vorgegebene Excel-Format. Sie können dabei mehrere Jahre in einer Datei erfassen. Der Solarrechner wertet hierzu in allen Registerblättern die Abschnitte zwischen «TachionStart» und «TachionEnd» aus.
6) Laden Sie die Excel-Datei mit Ihren Daten hoch. Geben Sie dazu den gewünschten Dateinamen an oder ziehen Sie die Datei auf die entsprechend markierte Fläche.
7) Beim Wechseln des Messdatenjahr werden automatisch die entsprechenden Jahreswerte aus dem Excel genommen, sofern vorhanden.

7.3 Kalibrierung der Simulation

Allfällige Unterschiede der im Solarrechner konfigurierten und der effektiv ausgeführten Anlage lassen sich mithilfe der Eingaben in der „Kalibrierung gemäss Planung“ ausgleichen.

Dort kann für die zugrundeliegende, spezifische Einstrahlung («Spezifische Einstrahlung Gh») der erwartete Solarertrag («Jährlicher Gesamtertrag») eingegeben werden:



Diese beiden Werte werden für die Referenz-Wetterdaten ermittelt. Daraus wird ein Kalibrierungsfaktor für die Anlage berechnet, der dann auf alle simulierten Sollwerte angewendet wird.

Die Kalibrierung kann auch über den «Excel-Upload» erfolgen (nur für PV-Anlagen).

Diese Dokumentation 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