

Photovoltaik Eigenverbrauch für Warmwasser – Optimierung heisst nicht Maximierung



Source: AdobeStock

Autor: Michel Y. Haller

Kontaktperson: Michel Y. Haller, SPF Institut für Solartechnik, OST - Ostschweizer Fachhochschule, Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil, michel.haller@ost.ch, www.spf.ch, www.ost.ch

Zusammenfassung

Résumé

Abstract

Wird Warmwasser solar erwärmt über Photovoltaik (PV) in Kombination mit Wärmepumpe (WP), so stellt sich die Frage, welche Kombinationen und Ansteuerungen der Wärmepumpe und eventuell vorhandener Elektroheizstäbe (EH) sinnvoll sind, und inwiefern der Netzstrombezug dadurch reduziert werden kann. Durch eine WP-Speicherladung bis auf die erforderliche Hygientemperatur kurz nach Mittag kann der Netzstrombezug effizient und ökonomisch reduziert werden. Von einem zusätzlichen Einsatz von EH muss jedoch selbst dann abgeraten werden, wenn diese ausschliesslich mit PV-Strom betrieben würden. Diese Betriebsweise wäre nur dann von ökonomischem Vorteil für den Besitzer der Anlage, wenn der PV-Einspeisetarif um mindestens einen Faktor 5 tiefer liegen würde als der Tarif für den Netzstrombezug. Bei einem Netzstrombezugstarif von 20 Rp/kWh müsste also der Einspeisetarif geringer sein als 4 Rp/kWh.

If hot water is heated by photovoltaics (PV) in combination with a heat pump (HP), the question arises which combinations and controls of the heat pump and possibly existing electric heating rods (EH) make sense, and to what extent the power consumption from the grid can be reduced. By charging the storage with the HP to the required hygienic temperature level shortly after noon, the grid power consumption can be reduced efficiently and economically. However, the additional use of EH must be discouraged even if these are operated exclusively with PV electricity. This mode of operation would only be economically advantageous for the owner of the system if the PV feed-in tariff is at least a factor of 5 lower than the tariff for purchasing electricity from the grid. Thus, with a grid electricity purchase tariff of 20 cts/kWh, the feed-in tariff would have to be lower than 4 cts/kWh.

1. Ausgangslage

1.1 Allgemeine Situation

Die Förderung der Photovoltaik (PV) auf Wohngebäuden hat sich in der Schweiz verschoben von der „Kostendeckenden Einspeisevergütung“ hin zu Einmalvergütungen, respektive einem Zuschuss an die Investitionskosten. Die Netzbetreiber sind jedoch verpflichtet, den eingespeisten Strom abzunehmen und zu vergüten. Im Mittel liegen die Einspeisetarife 2022 bei etwa 10 Rp/kWh. Gleichzeitig liegen die Strombezugskosten meist bei 21 Rp/kWh. Damit lohnt es sich für die Besitzer von PV-Anlagen, den selbst produzierten Strom auch selbst zu verbrauchen, wenn sie damit ihren Netzstrombezug entsprechend reduzieren können. In der Praxis führt jedoch eine Erhöhung des Eigenverbrauchs (und damit Reduktion der Netzeinspeisung) nicht zu einer Reduktion des Netzstrombezugs in gleicher Höhe. Die Differenz ist ein Resultat von Ineffizienzen und Verlusten bei den Eigenverbrauchsmassnahmen. Dies hat zur Folge, dass eine Maximierung des Eigenverbrauchs nicht nur zu energetischer Verschwendung, sondern auch zu finanziellem Verlust für den Eigner der Anlage führen kann.

1.2 Warmwasser über Wärmepumpe und Photovoltaik

Vermeehrt wird Warmwasser solar erwärmt über Photovoltaik in Kombination mit Wärmepumpen (WP). Dabei stellt sich die Frage, welche Kombinationen und Ansteuerungen der Wärmepumpe und eventuell vorhandener Elektroheizstäbe sinnvoll sind, und inwiefern der Netzstrombezug dadurch effektiv reduziert werden kann. Im Auftrag von EnergieSchweiz wurden diese Zusammenhänge mit Hilfe von Simulationsstudien als Grundlagen von Factsheets zu PV-Eigenverbrauch untersucht. In diesem Beitrag werden diese Resultate zusammengefasst.

2. Vorgehen

2.3 System und Simulationstool

Abbildung 1 zeigt die relevanten Komponenten und den hydraulischen Aufbau des betrachteten Systems. Dieses enthält einen Warmwasserspeicher, der über einen Wärmetauscher geladen und direkt wieder entladen wird, eine Luft-Wasser WP, eine PV-Anlage, den Haushaltsverbrauch und einen Anschluss an das Stromnetz. Zusätzlich zur Wärmepumpe besteht die Möglichkeit, das Wasser des Speichers über einen internen Elektroheizstab zu erwärmen.

Für die PV-Anlage wurde angenommen, dass diese verschieden gross sein kann, jedoch immer nach Süden mit einer Neigung von 45° ausgerichtet ist. Der PV-Ertrag (AC) wurde in Viertelstundenschritten ermittelt unter folgenden Annahmen:

- Wirkungsgrad von 17% für die PV-Module
- Verlusten für Kabel, Verschmutzung usw. von 7%
- Wechselrichterwirkungsgrad von 94%

Die Simulationen erfolgten über einen selbst entwickelten, in Python geschriebenen Code. Dieser berechnet die Energietransfers und Temperaturen der relevanten Systemkomponenten auf Grundlage viertelstündlicher Zeitschritte für ein Jahr, basierend auf vereinfachten Effizienzannahmen, die eine schnelle Berechnung eines ganzen Jahres innerhalb weniger Sekunden ermöglichen. Der PV-Ertrag wurde dabei auf Grundlage der oben dargestellten Annahmen berechnet. Die Effizienz der Wärmepumpe wurde in Abhängigkeit der Quellen- und Senktemperaturen, d.h. in Abhängigkeit der Temperatur der Aussenluft sowie der Temperatur des Warmwasserspeichers, bestimmt. Details zur Berechnung einzelner Komponenten werden publiziert in [1].

2.4 Randbedingungen

Das für die Simulation verwendete Klima basiert auf Wetterdaten aus Zürich, einem vom SPF entwickelten Testreferenzjahr (CCT-Klimadaten beschrieben in [2]), mit einem Jahresmittel der Außentemperatur von 9.1 °C und einer Sonneneinstrahlung von 1111 kWh/(m²a) auf der Horizontalen.

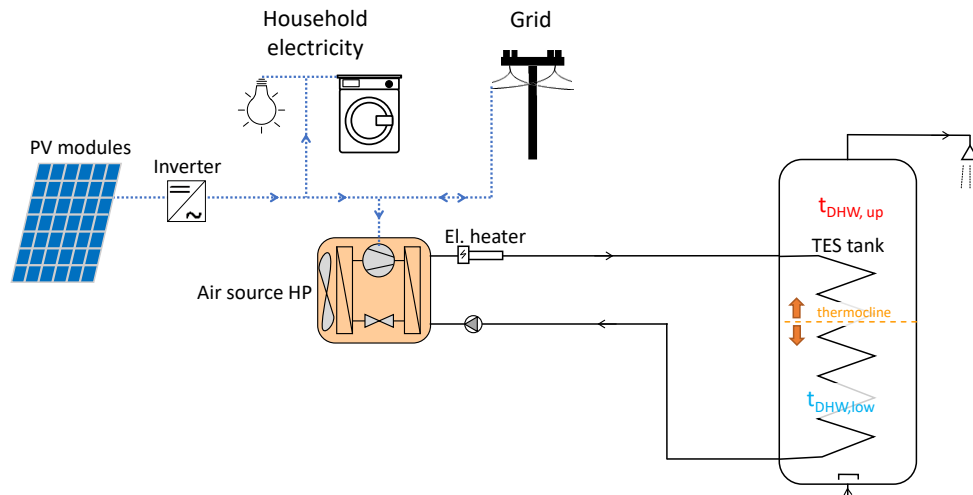


Abbildung 1 Vereinfachtes Schema des simulierten Systems, Haller und Heinz [1].

Das Zapfprofil für die Warmwasserbereitung sowie der Haushaltsstrombedarf basieren auf den von Mojic u.a. beschriebenen Referenzprofilen für Mehrfamilienhäuser [3], die mit der Software LoadProfileGenerator V.8 ([4], <https://www.loadprofilegenerator.de>) generiert wurden. Für einen einzelnen Haushalt des Mehrfamilienhauses wurden für Warmwasserverbrauch und Haushaltsstrom jeweils ein Sechstel des Wertes des 6-Parteien-Mehrfamilienhauses angenommen, was zu einem jährlichen Verbrauch von 2'935 kWh/a für Warmwasser (Wärme) und von 3'288 kWh/a für Haushaltsstrom führt.

2.5 Regelungskonzept

Die Wärmepumpe wurde so eingestellt, dass sie den Speicher nach der Mittagszeit von 12 bis 14 Uhr auf 55 °C auflädt, damit sie möglicherweise vorhandenen PV-Strom bereits ausnützen kann. Damit die Deckung des viertelstündlichen Warmwasser-Bedarfs zu jeder Zeit gewährleistet ist, schaltete die Wärmepumpe jeweils auch Speicherladungen ausserhalb der mittäglichen Freigabezeiten, sobald das Speicher-Volumen oberhalb der Temperatur-Sprungschicht nicht mehr ausreichte, um den maximalen viertelstündlichen Bedarf des Jahres zu decken. In diesem Falle wurde jedoch nicht der ganze Speicher aufgeheizt, sondern nur die erforderliche Energiemenge und Temperatur für die Deckung dieser Viertelstundenspitze eingebracht. Der **Elektroheizstab** wurde:

- ausschließlich mit PV-Strom betrieben
- nur nach 14:00 Uhr, d. h. nach dem Zeitfenster der Wärmepumpenladung, eingesetzt
- nur bis zu einer Temperatur von 60 °C betrieben.

Andere Maximaltemperaturen für die Ladung des Elektroheizstabs wurden getestet, führten aber nicht zu signifikant anderen Ergebnissen, respektive nur zu Ergebnissen, die aus wirtschaftlicher Sicht nachteiliger sind als die dargestellten. Aus diesem Grund werden hier keine Ergebnisse mit anderen Endtemperaturen für die Elektroheizstabheizung dargestellt.

3. Resultate

3.6 Ökonomische Betrachtung des Eigenverbrauchs

So lange keine Leistungstarife verrechnet werden und die Einspeiseleistung nicht durch Abregelung begrenzt wird, steht bei der ökonomischen Optimierung die Reduktion der Netto-Stromkosten im Vordergrund:

$$\text{Gl. 1: Netto-Stromkosten} = \text{Netzbezug} \times \text{Bezugstarif} - \text{Netzeinspeisung} \times \text{Einspeisetarif}$$

Tabelle 1 vergleicht zwei hypothetische Fälle der Eigenverbrauchserhöhung unter der Annahme, dass für den Netzstrombezug 0.2 CHF/kWh bezahlt und für die Einspeisung von Solarstrom 0.1 CHF/kWh vergütet werden. Im Fall 1 führt die Zunahme des Eigenverbrauchs zu einer Reduktion des Netzstrombezugs in annähernd gleicher Höhe. In der Folge sind die jährlichen Netto-Stromkosten des Eigners um 90 CHF geringer als ohne die Eigenverbrauchsoptimierung. Im Fall 2 jedoch wird der Netzstrombezug deutlich weniger reduziert als die Einspeisung von Solarstrom, und es resultieren jährliche Netto-Stromkosten welche 20 CHF höher sind also ohne die – in diesem Fall ineffiziente – Eigenverbrauchserhöhung.

Generell können die Netto-Stromkosten auf Grund von Gleichung 1 nur dann gesenkt werden, wenn das Verhältnis von Bezugstarif zu Einspeisetarif höher ist als das Verhältnis der Reduktion der Netzeinspeisung zur Reduktion des Netzbezugs. Abbildung 2 zeigt die jeweiligen Bereiche, welche ökonomisch vorteilhaft oder nachteilhaft sind, sowie die beiden hypothetischen Fälle 1 und 2.

	Einheit	Fall 1	Fall 2
Veränderung in Bezug auf...			
Eigenverbrauch	kWh	+1000	+1000
Netzeinspeisung	kWh	-1000	-1000
Netzbezug	kWh	-950	-400
Einspeisevergütung	CHF	-1000 * 0.1	-1000 * 0.1
Netzbezugskosten	CHF	950 * 0.2	400 * 0.2
Netto-Stromkosten	CHF	-90	+20

Tabelle 1 Veränderung der Netto-Stromkosten: Fall 1: geringe Effizienzverluste bei Eigenverbrauch und Fall 2: unter Berücksichtigung relativ hoher Effizienzverluste.

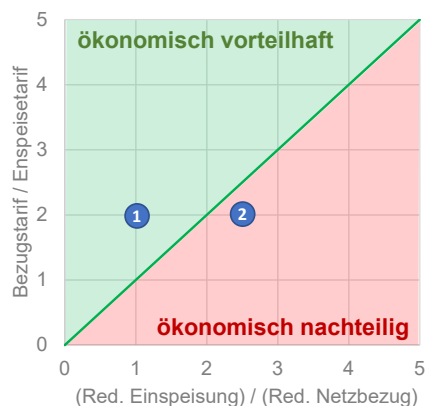


Abbildung 2 Darstellung der ökonomisch vorteilhaften und nachteiligen Konstellationsbereiche, eingezeichnet die im Text erläuterten Fälle 1 und 2.

3.7 Erhöhung des Eigenverbrauchs über Warmwasser-Erwärmung mit Wärmepumpe

Abbildung 3 zeigt für einen typischen Vier-Personen-Haushalt mit Wassererwärmung über Wärmepumpe, wie weit der Anteil Netzstrombezug mit verschiedenen grossen PV-Anlagen und verschieden hohem Warmwasserbedarf reduziert werden kann durch forcierte Warmwasserladungen ausschliesslich über die Wärmepumpe kurz nach Mittag (12:00 – 14:00 Uhr). Dabei ist die Grösse der PV-Anlage als PV-Produktionsverhältnis dargestellt, welches auf Grund der jährlichen PV-Produktion sowie des jährlichen Stromverbrauchs des Haushalts berechnet wird:

$$Gl. 2: PV\text{-Produktionsverhältnis} = PV\text{-Produktion} / \text{Stromverbrauch}$$

Die oberste Kurve in Abbildung 3 gilt sowohl für Haushalte ohne Wärmepumpe als auch für Haushalte, welche Warmwasser zufällig zu irgendwelchen Tageszeiten über eine Wärmepumpe erwärmen. Andere Wärmeanwendungen oder eMobilität sind in diesem Beispiel nicht berücksichtigt. Die Abbildung zeigt, dass bei einem mittleren Warmwasserbedarf und einem PV-Produktionsverhältnis von 2.0 alleine durch eine Abstimmung der WP-Wassererwärmung mit dem PV-Ertrag der Netzstrombezug von 60% auf 50% gesenkt werden kann. Voraussetzung dafür, dass dieser Effekt erreicht werden kann, ist eine ausreichende Wärmespeichergrosse sowie eine ausreichend grosse PV-Anlage.

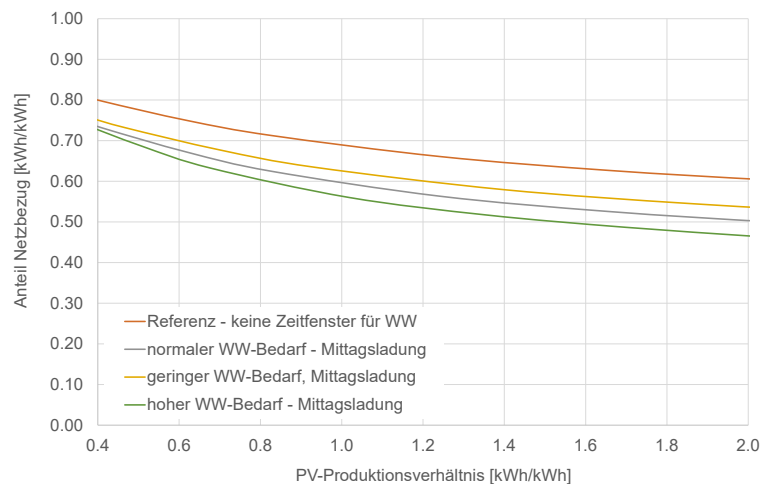


Abbildung 3 Reduktion des Netzstrombezugs in Abhängigkeit der Grösse der Photovoltaikanlage für Anlagen mit und ohne Warmwasser über Wärmepumpe.

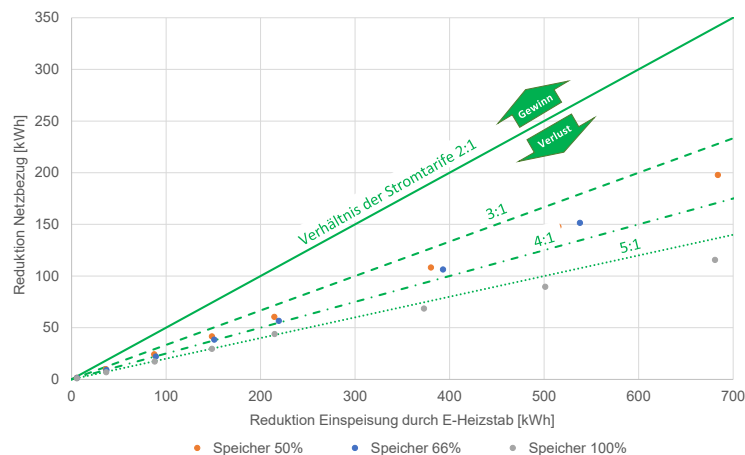


Abbildung 4 Reduktion Netzbezug und Reduktion Einspeisung durch den Einsatz eines Elektroheizstabes mit PV-Strom jeweils NACH der WP-Ladung am Mittag, sowie die Grenzen für finanziellen Gewinn oder Verlust durch diese Eigenverbrauchsmassnahme bei verschiedenen Verhältnissen der Stromtarife, für Speicher welche 50% - 100% des Tagesbedarfs decken können nach einer Beladung.

Abbildung 4 zeigt die Reduktion des Netzstrombezuges in Abhängigkeit der Reduktion der Einspeisung von PV-Strom, wie sie sich durch den Einsatz eines Elektroheizstabes ergibt. Dieser wird jeweils NACH der Beladung des Speichers durch die Wärmepumpe am Mittag eingesetzt, um die Speichertemperatur von ca. 55 °C auf 60 °C zu erhöhen. Dabei wird der Heizstab ausschliesslich mit lokal produziertem PV-Strom betrieben. Es zeigt sich, dass bis zu einem Verhältnis von Netzstrombezug zu Einspeisetarif von 3:1 keine Fälle zu sehen sind, in welchen der Einsatz des PV-Heizstabes NICHT zu finanziellen Verlusten führt. Ist der Warmwasserspeicher so dimensioniert, dass er nach Beladung durch die Wärmepumpe 100% des täglichen Bedarfs decken kann, so zeigen sich finanziell attraktive Varianten erst bei einem Verhältnis von 5:1 und höher. Dies bedeutet, dass bei Netzbezugstarif von 20 Rp/kWh der Besitzer der Anlage mit dem PV-Heizstab nur dann seine Netto-Stromkosten reduzieren kann, wenn der Einspeisetarif unter 4 Rp/kWh liegt.

4. Diskussion

Der Netzstrombezug von PV-WP Warmwassersystemen kann durch eine Verlagerung der Wärmepumpen-Warmwasserladungen auf die Mittagszeit deutlich reduziert werden. Diese Verlagerung gelingt mit relativ geringen oder keinen Effizienzeinbussen. Im Gegenteil kann gerade im Winter meist ein Effizienzgewinn verbucht werden, wenn eine Luft-Wasser Wärmepumpe an Stelle der kalten Nachtluft die deutlich wärmere Nachmittagsluft als Wärmequelle verwendet. Ein Elektroheizstab benötigt in etwa drei Mal mehr elektrische Energie als eine Wärmepumpe, um dieselbe Menge Wärme bereit zu stellen. Selbst wenn eine Wärmepumpe ausschliesslich mit Netzstrom betrieben würde, und der PV-Heizstab ausschliesslich mit PV-Strom, müssten die Einspeise- und Netztarif um diesen Faktor drei auseinander liegen, damit theoretisch durch den Einsatz des Heizstabes die Netto-Stromkosten verringert werden könnten. Da jedoch bei einem bereits PV optimierten Betrieb der Wärmepumpe, in welchem die WP am frühen Nachmittag den Speicher belädt, auch diese zu einem grossen Teil mit PV-Strom betrieben wird, liegt das entsprechende Tarifverhältnis, welches einen ökonomischen Einsatz des PV-Heizstabes erlauben würde, deutlich höher als 3:1. Aus diesem Grund ist ein Einsatz von PV-Heizstäben in Kombination mit Wärmepumpen, welche in der Lage sind, den Speicher bis auf die erforderliche Hygientemperatur aufzuladen, unter den aktuellen Tarifverhältnissen der Schweiz finanziell nachteilig für den Eigner. Selbst wenn sich in Einzelfällen oder in Zukunft eine finanziell attraktive Variante für den Einsatz des Elektroheizstabes in Kombination mit Wärmepumpen ergeben sollte, so führt dieser immer noch zu massiven Effizienzverlusten und letztendlich zu weniger PV-Strom im Netz, da die Reduktion der Netzeinspeisung in drastischem Missverhältnis steht zur Reduktion des Netzstrombezuges. Aus Sicht der Energieziele der Schweiz ist dies nachteilig. Die Legitimität eines solch verschwenderischen Umgangs mit Strom aus PV-Anlagen, welcher auf Grund der Einmalvergütung von der Gesamtbevölkerung mitfinanziert wird, kann durchaus in Frage gestellt werden. Es sei an dieser Stelle auch konkret auf Art. 5a des Energiegesetzes (EnG, SR 730.0) verwiesen: «Jede Energie ist möglichst sparsam und effizient zu verwenden».

5. Ausblick – Perspectives – Perspectives

Die in diesem Beitrag vorgestellten Resultate werden publiziert durch EnergieSchweiz als Factsheet und Kurzbericht. Eine Publikation in Englisch erfolgt im Rahmen der Internationalen Konferenz EuroSun 2022 durch ISES – International Solar Energy Society. Die englische Version [1] enthält zusätzlich Simulationsresultate der TU Graz zu Kombi-Systemen, welche nicht nur Warmwasser, sondern auch Raumheizung zur Verfügung stellen.

6. Danksagung

Die präsentierten Resultate basieren auf Arbeiten, welche im Auftrag von EnergieSchweiz für die Erstellung von Factsheet und Merkblatt zu PV-Eigenverbrauch erarbeitet wurden.

Literatur/Referenzen

- [1] Haller MY und Heinz A, Increasing PV self-consumption with heat pumps - sense or non-sense of additional electric heaters, ISES EuroSun 2022 conference, 25-29 September, Kassel, in publication.
- [2] Haller MY, Haberl R, Persson T, Bales C, Kovacs P, Chèze D, et al. Dynamic whole system testing of combined renewable heating systems – The current state of the art. Energy and Buildings 2013;66:667–77. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.052>.
- [3] Mojic I, Cramer S, Caflisch M, Carbonell DS, Haller M. 2019. 'Reference Framework for Building and System Simulations: Multifamily Reference Building', Version: 1.1, https://www.spf.ch/fileadmin/user_upload/spf/SPF/Produkte/Referenz-MFH/Referenz-MFH_2019-12-05_Multifamily_Reference_Building_SPF_V1.1.pdf.
- [4] Pflugradt, ND. 2016. "Modellierung von Wasser- und Energieverbräuchen in Haushalten." Ph.D. Thesis, Technische Universität Chemnitz. <https://monarch.gucosa.de/api/gucosa%3A20540/attachment/ATT-0/>.
- [5] SR 730.0 Energiegesetz (EnG) vom 30. September 206 (Stand am 1. Januar 2021), <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/762/de>