



Leitfaden Wärmepumpe

Kombination von Wärmepumpe und Photovoltaik



Inhalt

1	Einleitung	4
2	Funktionsweise einer Wärmepumpe	5
2.1	Jahresarbeitszahl und Leistungszahl	6
2.2	Inverter-Technik	6
3	Die Photovoltaikanlage: Stromgenerator für die Wärmepumpe	8
3.1	Größe	8
3.2	Ausrichtung	8
3.3	Neigungswinkel	9
3.4	Modularten	9
3.5	Wechselrichter und Zähler	10
4	Kommunikation zwischen Photovoltaikanlage und Wärmepumpe	11
5	Optimierung der Wärmepumpenanlage für hohe Autarkie und hohen Eigenverbrauch	12
5.1	Wärmeverteilsystem und Speichersystem	12
5.1.1	Vorlauftemperatur	12
5.1.2	Pufferspeicher	13
5.1.3	Warmwasserspeicher und -temperatur	13
5.1.4	Raumtemperatur	14
5.2	Dimensionierung der Wärmepumpe	14
5.2.1	Luft/Wasser-Wärmepumpen	15
5.2.2	Sole/Wasser-Wärmepumpen	16
5.2.3	Wasser/Wasser-Wärmepumpen	16
6	Kühlen mit Solarstrom und Wärmepumpe	17
6.1	Passiv kühlen	17
6.2	Aktiv kühlen	18
7	Warmwasser-Wärmepumpen: Einfache Eigenverbrauchssteigerung	19
8	Photovoltaik, Solarthermie, oder beides?	20
9	Solarstrom oder Wärmepumpentarif?	21
10	Hausbesitzer berichten	22
10.1	Beispiel 1	23
10.2	Beispiel 2	24
10.3	Beispiel 3	25
10.4	Beispiel 4	26

1 Einleitung

Um unabhängiger von Energieversorgern und fossilen Brennstoffen zu werden, machen sich immer mehr Menschen die Energie zunutze, die das eigene Grundstück bereitstellen kann. Umgebungsluft, Erdreich und Grundwasser, liefern selbst im tiefsten Winter genug Wärmeenergie, um ein Gebäude zu beheizen. Nutzbar wird diese Energie durch eine Wärmepumpe. Sie entzieht der Umwelt mit Hilfe elektrischer Energie Wärme und „pumpt“ sie auf ein höheres Temperaturniveau. Und ein Teil der elektrischen Energie kann wiederum auf dem eigenen Grundstück erzeugt werden: Mit einer Photovoltaikanlage.

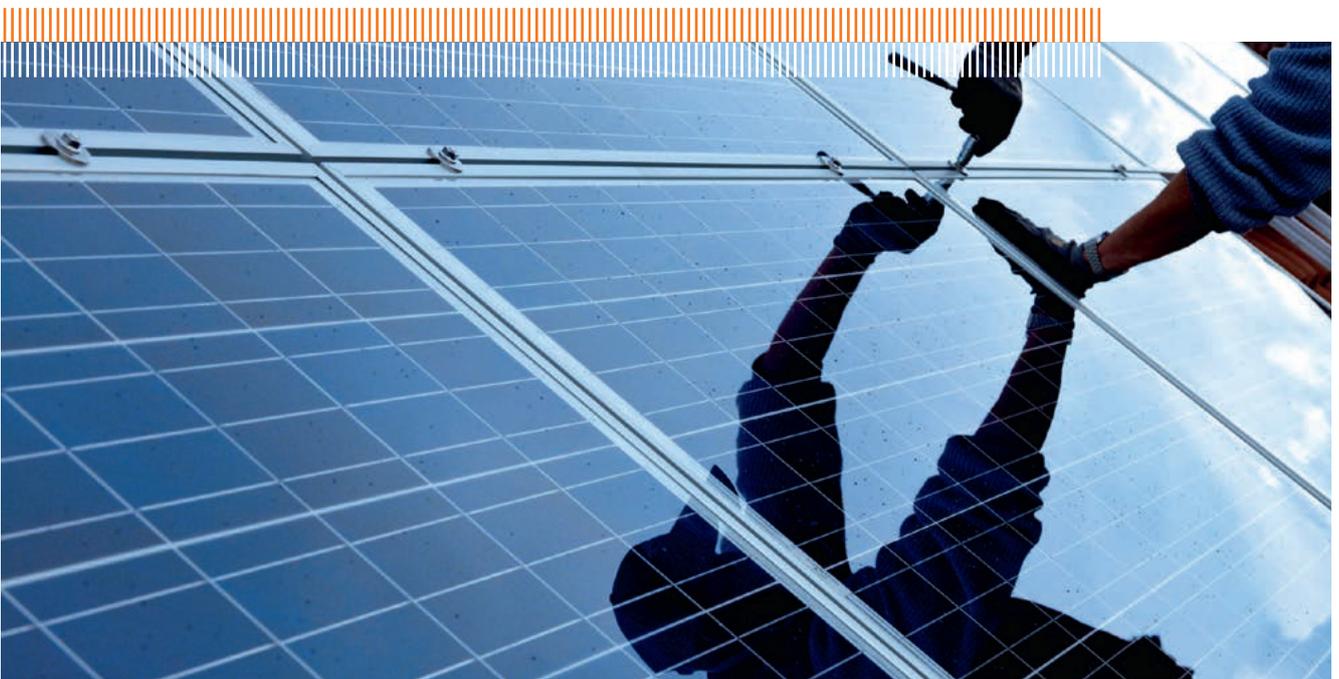
Solarstrom auf dem eigenen Dach zu erzeugen und im Haus zu verbrauchen, ist heute wirtschaftlicher, als ihn ins Netz einzuspeisen. Je mehr Strom selbst genutzt werden kann, desto besser. Und da ergänzen sich Wärmepumpe und Photovoltaikanlage hervorragend: Die Photovoltaikanlage liefert günstigen Strom für die Wärmepumpe und senkt damit die Heizkosten. Im Gegenzug steigert die Wärmepumpe durch die erhöhte Abnahme des Solarstroms die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaikanlage! Auch die Umwelt profitiert: Während der Wärmepumpenstrom aus dem Netz teils regenerativ und teils konventionell erzeugt wird, ist der eigene Solarstrom immer zu 100 % regenerativ! Natürlich kann die Wärmepumpe nicht zu 100 % mit Solarstrom betrieben werden: Zum einen sollen auch andere Geräte im Gebäude Solarstrom nutzen, zum anderen muss auch nachts geheizt werden, wenn kein Solarstrom zur Verfügung steht. Im Winter reicht auch tagsüber die Leistung der Photovoltaikanlage oft nicht aus, damit die Wärmepumpe autark mit Solarstrom laufen kann.

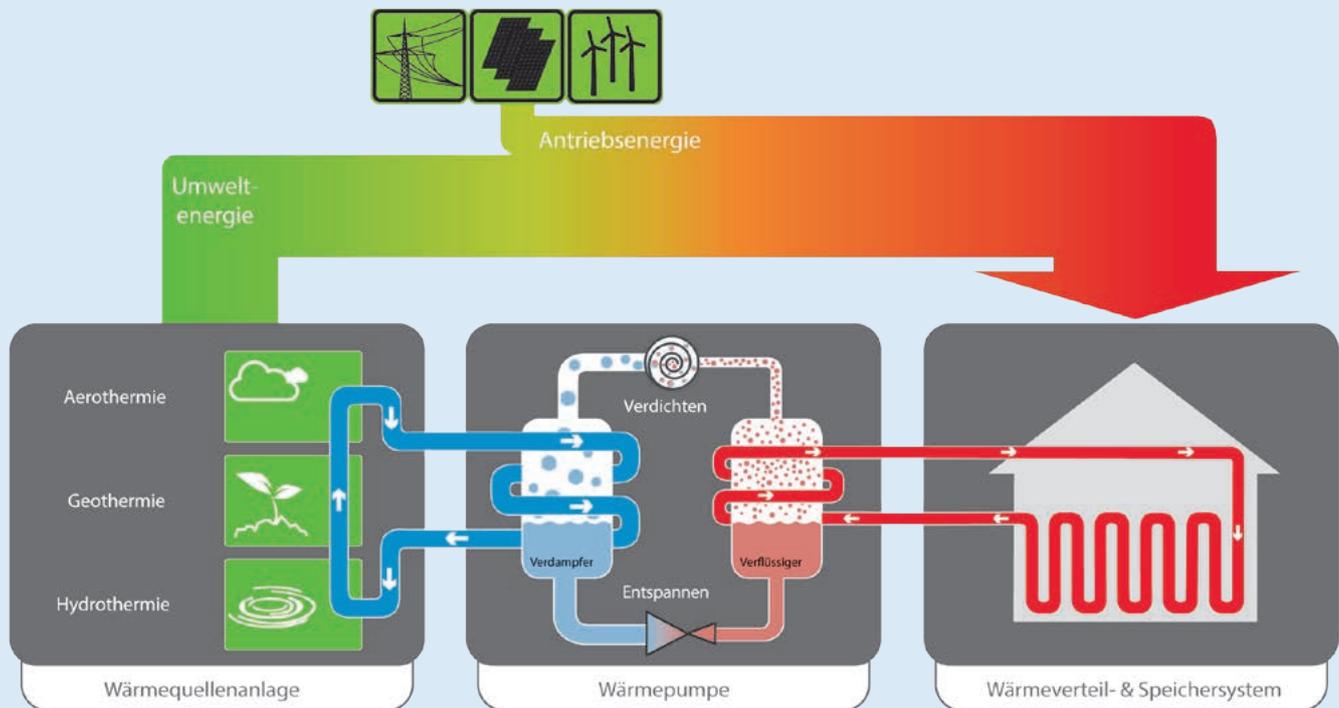
Über ein Jahr betrachtet, handelt es sich immer um einen Mix aus Netz- und Solarstrom. Wie groß der solare Anteil ist, hängt zunächst von gegebenen Größenverhältnissen ab, wie zum Beispiel vom Stromverbrauch der Wärmepumpe und dem Ertrag der Photovoltaikanlage. Bei einem gut gedämmten Einfamilienhaus kann er über 30 % betragen!

Darüber hinaus ist entscheidend, in wie fern beide Anlagen miteinander gekoppelt sind. Mit einfachsten Maßnahmen ist es heute möglich, dass sich die Wärmepumpe automatisch einschaltet, wenn ein Überschuss an Solarstrom vorhanden ist.

Die Wärmepumpe wandelt den Solarstrom in Wärme um und speichert diese im Warmwasser- und Pufferspeicher. Die Temperaturen in den Speichern werden über das normale Niveau angehoben, sodass mehr Wärme produziert, als gebraucht wird. In den Abendstunden kann der Heizwärme- und Warmwasserbedarf zunächst aus den überladenen Speichern gedeckt werden. Die Wärmepumpe pausiert in dieser Zeit, und es muss kein Strom aus dem Netz zugekauft werden.

Mit diesem Leitfaden möchten wir Sie weiter an die Themen Wärmepumpe und Photovoltaik heranführen. Er soll Ihnen ein Grundwissen zur Kombination beider Techniken vermitteln und aufzeigen, worauf bei der Planung und bei Einstellungen im laufenden Betrieb zu achten ist, damit Ihre Wärmepumpe zum größtmöglichen Teil mit Solarstrom betrieben werden kann.





2 Funktionsweise einer Wärmepumpe

Seit ihrer flächendeckenden Markteinführung Ende der 70er Jahre, hat sich die Wärmepumpe zu einem immer effizienteren Heizsystem entwickelt. Die Leistungszahlen, genannt COP (von engl. „Coefficient Of Performance“), haben sich im Laufe der Jahre stark verbessert, sodass heute aus einer Kilowattstunde Strom mehr als vier Kilowattstunden Wärme erzeugt werden können.

Zum Vergleich: Wird Strom über Nachtspeicheröfen, Durchlauferhitzer, Heizstäbe usw. direkt „verheizt“, beträgt der COP lediglich „1“, aus einer elektrischen Kilowattstunde wird eine thermische. Das Prinzip, wie die zusätzliche und kostenlose Energie aus der Umwelt von Wärmepumpen gewonnen wird, hat sich seit jeher nicht verändert.

Wie auch bei Ihrem Kühlschrank oder der Klimaanlage im Auto, zirkuliert ein Kältemittel (heute frei von ozonschädlichen FCKWs) in einem geschlossenen Kreislauf. Dieser besteht im Wesentlichen aus zwei Wärmetauschern, einem Verdichter sowie einem elektronischen Expansionsventil. Während dem Innenraum des Kühlschranks und des Autos Wärme entzogen und nach außen abgeführt wird, funktioniert die Wärmepumpe genau umgekehrt: Der Umwelt (Luft, Erdwärme oder Grundwasser) wird Wärme entzogen und Ihrem Haus zugeführt. Bei der Effizienz ist die Wärmepumpe dabei jeder Kältemaschine überlegen, denn: Die Wärmeenergie, die durch die zugeführte elektrische Antriebsenergie im Verdichter entsteht, kann zusätzlich genutzt werden, während sie zu Kühlzwecken abgeführt werden muss.

Der Kreisprozess einer Wärmepumpe kann in vier Schritten beschrieben werden:

- Entspannen
 - flüssiges Kältemittel wird durch das Expansionsventil von einem hohen auf einen niedrigen Druck entspannt und kühlt sich dabei ab
- Verdampfen
 - da der Kondensationsdruck unterschritten wurde, geht das Kältemittel vom flüssigen in den gasförmigen Zustand über, es verdampft. Dazu entzieht es über den Verdampfer seiner Umgebung Wärme und speichert diese
- Verdichten
 - ein Verdichter saugt das gasförmige Kältemittel an und komprimiert es auf den höheren Druck, der vor dem Expansionsventil herrscht. Dabei erhöht sich die Temperatur
- Verflüssigen
 - das Kältemittel verflüssigt sich wieder, weil durch die Verdichtung der Kondensationsdruck überschritten wurde. Die Wärme, die es beim Verdampfen aufgenommen hat, gibt es an den zweiten Wärmetauscher auf der Heizungsseite ab.

2.1 Jahresarbeitszahl und Leistungszahl

Entscheidend für die Effizienz und den Stromverbrauch der Wärmepumpe ist die Jahresarbeitszahl.

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) ist das Verhältnis von erzeugter Wärmemenge zur bezogenen elektrischen Energie über ein Jahr und damit die wichtigste Kenngröße zur Beurteilung einer Wärmepumpenanlage. Sie ist vergleichbar mit dem Jahresnutzungsgrad einer Gas- oder Ölheizung, der die nutzbare Wärmeenergie und die mit dem Brennstoff zugeführte Energie ins Verhältnis setzt.

$$\text{JAZ} = \frac{\text{nutzbare Wärmemenge}}{\text{zugeführte elektrische Energie}}$$

Eine weitere Kenngröße von Wärmepumpen ist die Leistungszahl (COP). Sie ist eine Herstellerangabe und wird auf dem Prüfstand, also unter optimalen Bedingungen ermittelt und setzt die nutzbare Wärmeleistung ins Ver-

hältnis zur zugeführten elektrischen Leistung. Für die Wärmequelle Luft liegt sie in der Regel zwischen 3 und 4, bei Erdwärme über 4 und bei Grundwasser um die 5. Da sich die Leistungszahl mit dem Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und Vorlauftemperatur ändert, werden oft mehrere Werte für unterschiedliche Zustände angegeben.

$$\text{COP} = \frac{\text{nutzbare Wärmeleistung}}{\text{zugeführte elektrische Leistung}}$$

Beispielrechnung:

Wärmebedarf eines Einfamilienhauses für Heizung und Warmwasser, ermittelt durch Wärmemengenzähler: 15.000 kWh

Gasheizung, Jahresnutzungsgrad = 0,9
 → 15.000 kWh Wärme/0,9 = **16.667 kWh Gas**

Sole/Wasser-Wärmepumpe, JAZ = 4,3
 → 15.000 kWh Wärme/4,3 = **3.488 kWh Strom**

2.2 Inverter-Technik

Bis vor wenigen Jahren gab es ausschließlich Wärmepumpen, bei denen der Verdichter mit einer konstanten Drehzahl läuft. Wie bei jeder älteren Öl- oder Gasheizung auch, ist die Wärmeleistung, die erzeugt wird, stets größer als diejenige, die tatsächlich im Gebäude benötigt wird. Die Regulierung der Vorlauftemperatur geschieht durch das An- und Abschalten des Wärmeerzeugers.

Es wird für wenige Minuten mit voller Leistung geheizt, worauf ein Stillstand folgt. Ein solcher Stop-and-Go-Betrieb bringt Wärmeverluste mit sich, da sich das System ständig aufheizt und wieder abkühlt. Nicht nur für die Effizienz, sondern auch für die Langlebigkeit einer Wärmepumpe ist es aber von Vorteil, wenn sie nach einem Start möglichst lange arbeiten kann. Zum Vergleich: Ein Auto, das überwiegend für Kurzstrecken genutzt wird, verschleißt schneller als ein Langstreckenfahrzeug!

Seit einigen Jahren gibt es neben den On-/Off-Wärmepumpen auch solche, die ihre Heizleistung an den tatsächlichen Wärmebedarf anpassen. Dazu regulieren sie permanent und stufenlos die Drehzahl des Verdichters. Man spricht dabei von Inverter-Technik oder auch von modulierenden Wärmepumpen. Positiver Nebeneffekt:

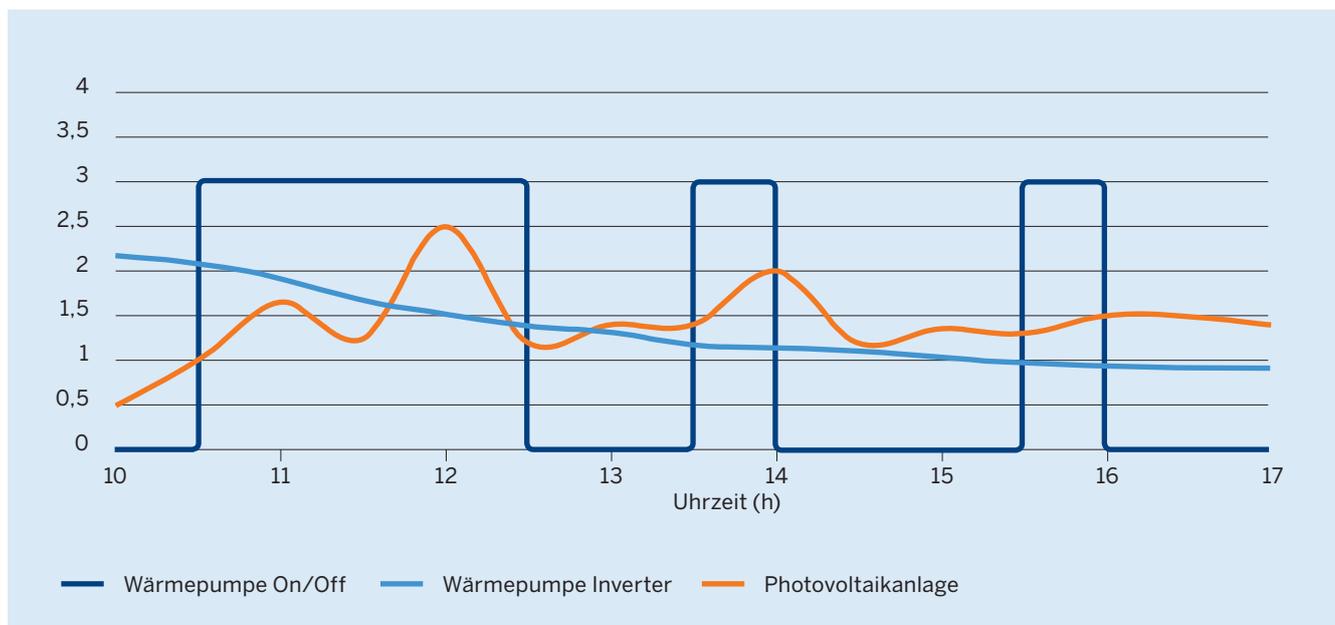
Im Teillastbereich arbeitet die Wärmepumpe effektiver als unter Vollast! So bescheinigte der Feldtest „Wärmepumpen im Bestand“ des Fraunhofer ISE teilnehmenden Wärmepumpen, die über Inverter-Technik verfügten, überdurchschnittlich hohe Jahresarbeitszahlen im Vergleich zu den On-/Off-Geräten.

Speziell für die Kombination mit einer Photovoltaikanlage bietet die variable Drehzahl einen weiteren, entscheidenden Vorteil: Mit reduzierter Drehzahl sinkt auch die elektrische Leistungsaufnahme. Folgende Grafik veranschaulicht das beispielhaft.

Die Wärmepumpe mit starrer Drehzahl bezieht schubweise ihre Anschlussleistung von 3.000 Watt. Pausiert die Wärmepumpe, wird ein Großteil des PV-Stroms ins Netz eingespeist. Läuft die Wärmepumpe, muss der Großteil des Stroms vom Energieversorger zurückgekauft werden.

Das Inverter-Gerät mit gleicher maximaler Leistung läuft dauerhaft und bezieht durchschnittlich etwa 1.800 Watt. Diese Leistung kann zum Großteil durch die PV-Anlage gedeckt werden, sodass nur wenig Strom aus dem Netz bezogen werden muss. Inverter-Technik erlaubt dadurch einen höheren Eigenverbrauch und einen besseren Autarkiegrad.

Leistungsverläufe im Vergleich: Wärmepumpe mit und ohne Invertertechnik (Angaben in kW)



3 Die Photovoltaikanlage: Stromgenerator für die Wärmepumpe

Eine Photovoltaikanlage besteht im Wesentlichen aus Solarmodulen, einem oder mehreren Wechselrichtern und Stromzählern. Die Solarmodule erzeugen aus Sonnenstrahlung elektrischen Gleichstrom, den die Wechselrichter in netzkompatiblen Wechselstrom mit 400/230 Volt und 50 Hertz wandeln. Ein erster Stromzähler, häufig Ertragszähler genannt, misst den Strom, den die Photovoltaikanlage insgesamt produziert.

Danach folgt ein Zweirichtungszähler. Dieser übernimmt zum einen die Funktion des normalen Haushaltsstromzählers und misst den Strom, der aus dem Netz bezogen wird. Zum anderen misst er den Strom, den die Photovoltaikanlage ins Netz einspeist. Die Differenz aus dem insgesamt produzierten Strom und dem eingespeisten Strom, ergibt den Eigenverbrauch.

Seitens der Photovoltaikanlage bestimmen folgende Parameter, wie autark das Gebäude ist und welcher Eigenverbrauch sich erzielen lässt.

3.1 Größe

Zu Zeiten der Volleinspeisung, war die größtmögliche Photovoltaikanlage auch die lukrativste. Der Gewinn, der nach einer Betriebszeit von 20 Jahren mit der EEG-Vergütung erwirtschaftet wurde, stieg mit der Anlagengröße nahezu linear an.

Das ist nicht mehr so, seitdem der Eigenverbrauch Vorrang hat. Heute wird bei Einfamilienhäusern oft nicht mehr die komplette Dachfläche genutzt. Die Anlagengröße wird bewusst kleiner gewählt, damit der prozentuale Eigenverbrauch hoch ist. Je höher er ist, desto schneller amortisiert sich die PV-Anlage.

Kommt zum üblichen Stromverbrauch des Haushalts eine Wärmepumpe hinzu, sieht der Sachverhalt wiederum anders aus: Die Wärmepumpe muss in der Auslegung der PV-Anlage unbedingt berücksichtigt werden, da sie den Eigenverbrauch deutlich steigert. Soll z. B. 40 % des Solarstroms selbst verbraucht werden, kann das ohne Wärmepumpe mit einer Anlage von 4 kWp möglich sein.

Mit Wärmepumpe können 40 % Eigenverbrauch aber problemlos mit einer Anlage von 8 kWp oder mehr erreicht werden.

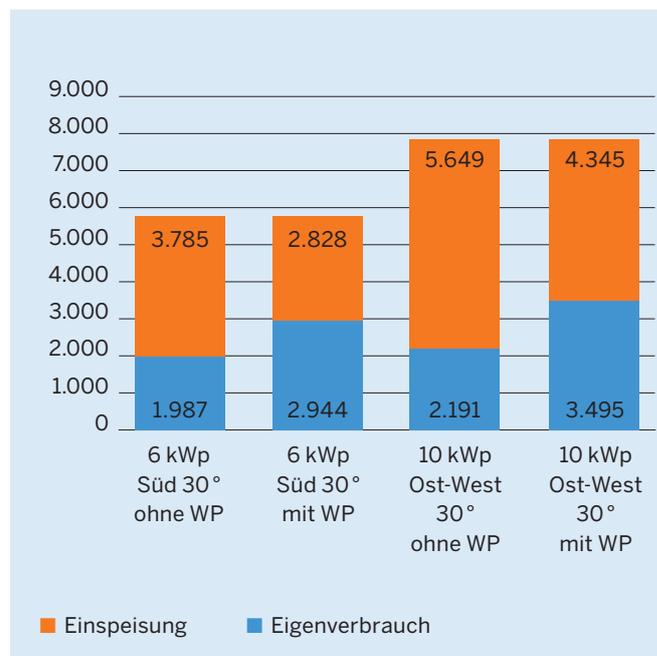
Pauschalaussagen, dass die Photovoltaikanlage beim Vorhandensein einer Wärmepumpe z.B. doppelt oder dreifach so groß ausfallen sollte, lassen sich jedoch nicht treffen. Zu viele Faktoren spielen eine Rolle, wie etwa der Stromverbrauch der Wärmepumpe, die Größe von Puffer- und Warmwasserspeicher und vor allem das Nutzerverhalten beim Haushaltsstrom.

Die ideale Anlagengröße ist mit einer intelligent eingebunden Wärmepumpe in jedem Fall größer, als wenn nur Stromverbraucher im Haushalt versorgt werden. Es hat sich in der Praxis bewährt, die Photovoltaikanlage so groß wie möglich zu dimensionieren.

3.2 Ausrichtung

Traditionell werden Solarmodule nach Süden ausgerichtet. Das verspricht den größtmöglichen Ertrag, und allein der war bei der Volleinspeisung ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit. Auch hier hat sich mit dem Eigenverbrauch etwas geändert: Es kommt nicht mehr allein auf

Eigenverbrauchssteigerung durch eine Wärmepumpe mit 4.000 kWh Stromverbrauch und optimierter Warmwasserbereitung (Angaben in kWh)



Quelle: Kombination von Heizungswärmepumpen und Photovoltaikanlagen im Einfamilienhaus, Björn Fritsche

die Höhe des Ertrages an, sondern auch darauf, wann der Strom produziert wird. Um Solarstrom im Haushalt verbrauchen zu können, ist es vorteilhaft, ihn möglichst gleichmäßig über den Tag verteilt zu erzeugen. Daher werden Photovoltaikanlagen immer häufiger auch auf Satteldächern installiert, deren Dachflächen nach Osten und Westen zeigen. Durch die Abweichung von der Südausrichtung produzieren die Module am Tag zwar insgesamt weniger Energie, dafür steht der Strom morgens eher und abends länger zur Verfügung. Vor allem in Haushalten, in denen mittags nicht regelmäßig gekocht und dadurch morgens und abends anteilig mehr Strom verbraucht wird, wirkt sich dieser Effekt positiv aus.

Ein weiterer, positiver Effekt, besteht darin, dass eine Photovoltaikanlage bei der Ost-West-Ausrichtung größer ausfallen kann: Bei einem Satteldach können beide Dachhälften genutzt werden. Auf Flachdächern werden die Modulreihen heute sogar gezielt abwechselnd nach Osten und Westen aufgeständert. Dadurch müssen keine Abstände zwischen den Modulreihen eingehalten werden, die bei Südausrichtung notwendig sind, damit sich die Module nicht gegenseitig verschatten. Es lassen sich daher mehr Module installieren.

Auf Satteldächern sind Anlagen mit Südausrichtung zurzeit noch etwas wirtschaftlicher. Sie erlauben zwar keinen größeren Eigenverbrauch, erwirtschaften mit ihrem höheren Ertrag aber mehr Gewinn über die Einspeisevergütung. Mit sinkender Vergütung und steigendem Strompreis wird der Unterschied zukünftig weiter abnehmen.

Für eine Wärmepumpe ist die Südausrichtung stets vorteilhafter. Während der Stromverbrauch im Haushalt über das Jahr gesehen relativ konstant ist, benötigt die Wärmepumpe den meisten Strom im Winter. Da die

Sonne dann sehr flach am Himmel verläuft, bieten südlich ausgerichtete Module den vorteilhafteren Winkel zur Sonne und können die Wärmepumpe besser versorgen. Wirtschaftlich ist eine Ost-West-Anlage ebenfalls, sie trägt nur etwas weniger zum Wärmepumpenstrom bei.

3.3 Neigungswinkel

Den größten Ertrag generieren Modulflächen mit Südausrichtung bei einem Neigungswinkel von etwa 30°, den gleichmäßigsten bei etwa 55°. Ost-West-Flächen leisten ihre maximalen Erträge bei ca. 10°. Für die Kombination mit Wärmepumpen sind tendenziell steilere Winkel vorteilhaft, da im Winter, also bei einem hohen Wärmebedarf, die Sonne sehr flach am Himmel verläuft.

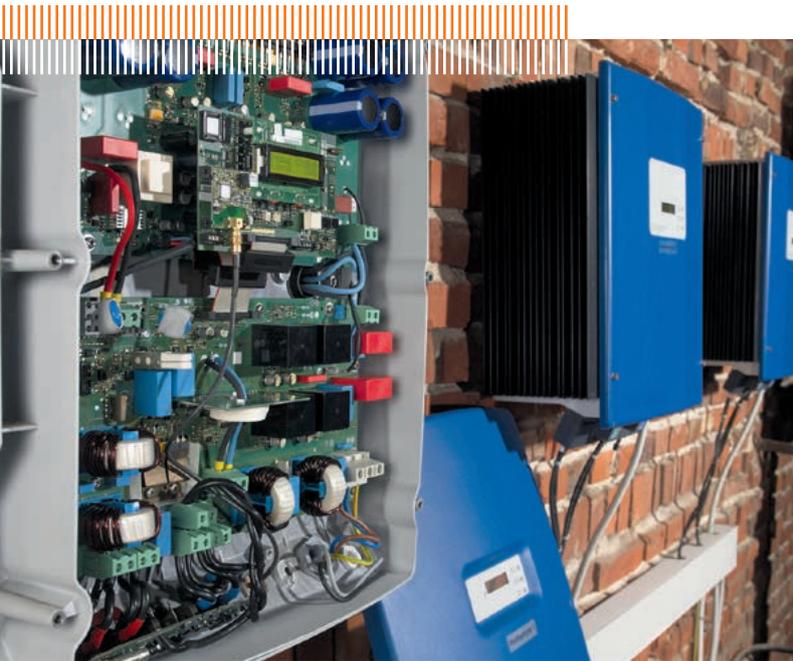
Durch die derzeit schnell fallenden Preise für Photovoltaikanlagen und den immer wichtiger werdenden Eigenverbrauch, rentieren sich heutzutage Anlagen, die weit von diesen optimalen Gegebenheiten abweichen. Selbst auf Ost-West-Flächen mit 50° Neigung lässt sich Solarstrom wirtschaftlich produzieren, erst recht, wenn eine Wärmepumpe ihn abnimmt!

3.4 Modultypen

Neben den anfänglich überwiegend installierten Modulen aus bläulich schimmerndem polykristallinem Silizium, werden heute vermehrt monokristalline Module mit höherem Wirkungsgrad eingesetzt. Auch die Dünnschicht-Technologie gewinnt an Marktanteil. Durch die etwa 100-mal dünnere Siliziumschicht ist der Material- und Energieaufwand wesentlich geringer als bei kristallinen Modulen. Dünnschicht-Module haben einen schlechteren Wirkungsgrad als kristalline Module, erzeugen also bei gleicher Fläche weniger Energie. Dafür weisen sie ein besseres Schwachlichtverhalten auf: Bei ungünstigen Winkeln zur Sonne und bei diffusem Licht, nimmt ihre Leistung

Die Modultypen im Vergleich

	Monokristallin	Polykristallin	Dünnschicht		
			amorphes Silizium	CIGS	CdTe
Wirkungsgrad	19 %	16 %	8 %	14 %	14 %
Fläche/kWp	5,25 m ²	6,25 m ²	12,5 m ²	7,1 m ²	7,1 m ²
installierbare Leistung auf 50 m ² Dachfläche	9,5 kWp	8 kWp	4 kWp	7 kWp	7 kWp



prozentual weniger ab. Daher kann der Ertrag pro Kilowatt Peak installierter Leistung bis zu 10 % größer sein als bei kristallinen Modulen.

Welche Technik zum Einsatz kommt, hängt vom jeweiligen Dach ab. Bei einem durchschnittlich großen, einseitig genutzten Satteldach, zählt eher die maximal installierbare Leistung. Dann fällt die Entscheidung auf kristalline Module. Ist die Dachfläche sehr groß und lassen sich z. B. 10 kWp mit Dünnschicht-Modulen installieren, kann das eine Alternative sein.

Speziell für die Kombination mit Wärmepumpen sind alle der am Markt verfügbaren Modularten gleich gut geeignet. Die Entscheidungsgrundlagen für die eine oder andere Technologie mit ihren Vor- und Nachteilen sind – ob mit oder ohne Wärmepumpe – dieselben.

3.5 Wechselrichter und Zähler

Ab einer PV-Leistung von mehr als 4,6 kWp, müssen Wechselrichter seit Anfang 2012 dreiphasig ausgeführt sein, um das Stromnetz nicht mit zu großen Asymmetrien zu belasten. Das heißt, der Solarstrom wird im Gebäude auf allen drei Phasen gleichmäßig eingespeist. PV-Anlagen unter 4,6 kWp werden aus Kostengründen meist mit einphasigen Wechselrichtern betrieben, sodass der Solarstrom nur auf einer der drei Phasen zur Verfügung steht.

Auch Beleuchtung und Steckdosen in Ihrem Gebäude sind einphasig angeschlossen, werden also nur über eine der drei Phasen betrieben. Aber wie sieht es mit dem Eigenverbrauch aus, wenn Sie einen einphasigen Wechselrichter haben, der gerade z. B. 2.000 W auf der ersten Phase liefert und Sie Ihren Wasserkocher mit 2.000 W über eine Steckdose betreiben, die über die zweite Phase läuft?

Physikalisch betrachtet, speisen Sie 2.000 W Solarstrom ins Netz ein und der Wasserkocher bezieht 2.000 W vom Energieversorger. Abrechnungstechnisch läuft der Wasserkocher aber tatsächlich mit Solarstrom und der Eigenverbrauch beträgt 100 %! Das liegt daran, dass die Stromzähler in Ihrem Gebäude saldierend arbeiten. Gemessen wird die Summe der Ströme auf allen drei Phasen, die in diesem Beispiel $-2.000 \text{ W} + 2.000 \text{ W} + 0 \text{ W} = 0 \text{ W}$ beträgt. Es ist also egal, auf welcher Phase eingespeist und auf welcher Phase Strom verbraucht wird.

Bei dreiphasigen Wechselrichtern gilt das gleiche. Werden z. B. auf jeder Phase 1.000 W eingespeist und 3.000 W über Phase 3 bezogen, dreht sich weder der Einspeisezähler noch der Bezugzähler:
 $1.000 \text{ W} + 1.000 \text{ W} + (1.000 \text{ W} - 3.000 \text{ W}) = 0 \text{ W}$.

Neue, elektronische Zähler, können aber auch „nicht saldierend“ messen. Es wird dabei der Stromverbrauch auf jeder Phase einzeln erfasst, zum Nachteil für den Eigenverbrauch. Wer seinen Solarstrom (zumindest bilanziell) auf allen Phasen nutzen möchte, sollte darauf achten, dass der Energieversorger einen entsprechenden Zähler einbaut.

Wärmepumpen bieten die Möglichkeit, den selbst erzeugten Strom nicht nur in der Bilanz, sondern auch physikalisch zu 100 % selbst zu nutzen: Die meisten Wärmepumpen arbeiten mit Drehstrom und beziehen ihre Energie gleichmäßig über alle Phasen. Ist auch der Wechselrichter dreiphasig, kann der Strom direkt verwertet werden.

4 Kommunikation zwischen Photovoltaikanlage und Wärmepumpe

Der Markt bietet bereits mehrere technische Möglichkeiten für die Kommunikation zwischen beiden Anlagen. Seitens der Wärmepumpe, ist das Prinzip bei den meisten Herstellern identisch: Der „SG-Ready-Eingang“ (SG = Smart Grid) dient als Schnittstelle der Wärmepumpe, damit sie auf einen Überschuss an Solarstrom reagieren kann. Die Schnittstelle kann auf verschiedene Arten angesteuert werden.

Eine einfache Variante besteht darin, die Wärmepumpe über eine Leitung direkt mit dem Wechselrichter zu verbinden. Die meisten Wechselrichter verfügen über ein Relais mit potentialfreien Kontakten, welches dafür genutzt werden kann. Das Relais schaltet immer dann, wenn eine bestimmte PV-Leistung erzeugt wird. Dieser Wert kann individuell eingestellt werden. Wird er auf die elektrische Anschlussleistung der Wärmepumpe eingestellt – z. B. 2.000 W –, steuert der Wechselrichter den SG-Ready-Eingang an, wenn eben diese Leistung erzeugt wird.

Der erzeugte Solarstrom wird im Haus aber nicht nur von der Wärmepumpe, sondern auch anderweitig genutzt. Um das zu berücksichtigen, sollte zur Anschlussleistung der Wärmepumpe ein Aufschlag für die Grundlast des Hauses (Licht, Kühlschrank, Geräte im Stand-By-Betrieb, ...) addiert werden, z. B. 500 W. Wird als Schaltleistung für das Relais nun 2.500 W gewählt, wird gewährleistet, dass die Wärmepumpe hauptsächlich dann läuft, wenn wirklich genug Solarstrom für sie übrig ist.

Beispiel:

Wärmepumpe **2.000** Watt, aktuelle PV-Leistung **1.000** Watt

- Die Wärmepumpe läuft nur bei Wärmebedarf und bezieht etwa 50 % ihrer Antriebsenergie vom eigenen Dach und 50 % aus dem Netz

Wärmepumpe mit **2.000** Watt, aktuelle PV-Leistung **3.000** Watt

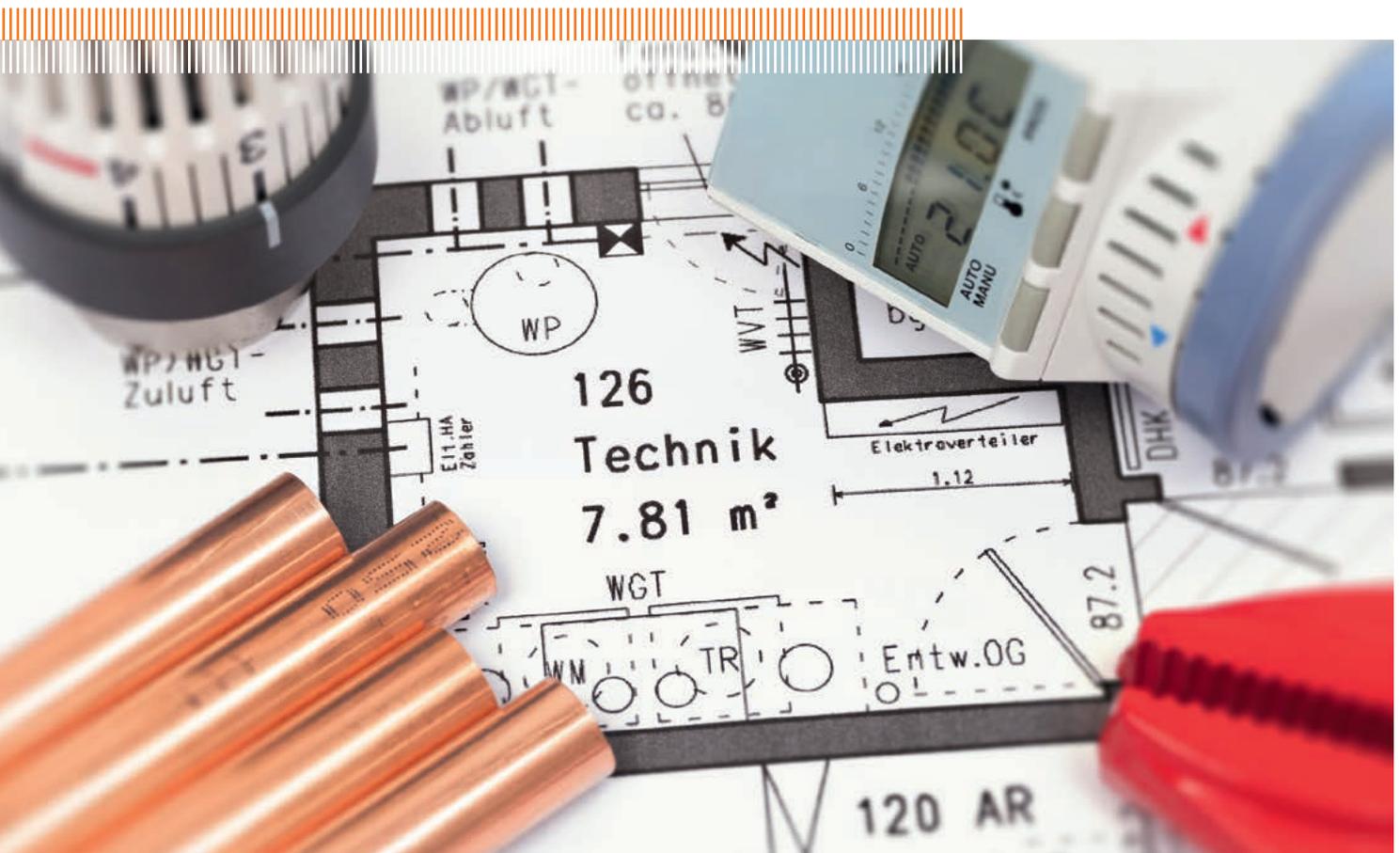
- Die Wärmepumpe wird vom Wechselrichter angesteuert, läuft zu 100 % autark mit Solarstrom und speichert diesen für spätere Stunden in Form von Wärme

Anstelle des Wechselrichters, können auch spezielle elektronische Stromzähler, sogenannte Smart-Meter, die Wärmepumpe über eine Leitung ansteuern. An ihnen wird ebenfalls die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe eingestellt und gilt als Schaltkriterium. Der Vorteil dieser Variante besteht darin, dass nicht der produzierte Strom gemessen wird, sondern nur der, der nach Versorgung aller anderen Verbraucher im Gebäude übrig ist. Sind große Verbraucher wie Backofen oder Waschmaschine in Betrieb, wird der forcierte Betrieb somit vermieden.

Über diese beiden Möglichkeiten hinaus, kann die Kommunikation von einem Energie-Management-System übernommen werden. Vor allem von Wechselrichterherstellern werden diese seit einigen Jahren angeboten, da sie neben der Visualisierung der Energieflüsse auch eine Steigerung des Eigenverbrauchs ermöglichen. In den Systemen können einzelne Stromverbraucher mit ihrem Betriebsverhalten hinterlegt und über Funksteckdosen eingeschaltet werden (Spülmaschine, Waschmaschine, Trockner, ...). Mit Wetterdaten aus dem Internet erstellt das System Ertragsprognosen und errechnet selbstständig, wann welcher Verbraucher eingeschaltet werden soll. Auch einige Wärmepumpen können mittlerweile eingebunden werden und liefern dem System sogar Informationen über den zu erwartenden Leistungsverlauf.

Wärmepumpen, die über den SG-Ready-Eingang verfügen, dürfen das SG-Ready-Label tragen. Der Bundesverband Wärmepumpe e. V. (BWP) führt auf seiner Internetseite eine Liste mit allen bisher ausgezeichneten Wärmepumpen unterschiedlichster Hersteller.

Durch den forcierten Betrieb fällt die Jahresarbeitszahl etwas schlechter aus, da zur Wärmebevorratung höhere Temperaturen erzeugt werden und dementsprechend mehr Strom genutzt wird. Die Effizienz der Wärmepumpenanlage nimmt also augenscheinlich ab. Die Wirtschaftlichkeit aber steigt, da das Mehr an Strombedarf von der Photovoltaikanlage erzeugt wurde. Sind Wärmepumpe und Photovoltaikanlage gekoppelt, kann die Effizienz der Wärmepumpenanlage daher nicht allein durch die Jahresarbeitszahl ausgedrückt werden.



5 Optimierung der Wärmepumpenanlage für hohe Autarkie und hohen Eigenverbrauch

Zu wie viel Prozent die Wärmepumpe mit Solarstrom betrieben werden kann, hängt von vielen Faktoren ab. Einige davon betreffen bereits die Planung der Anlage, andere die Einstellungen im laufenden Betrieb. Damit Wärmepumpe und Photovoltaikanlage gut zusammen arbeiten können, ist auf folgendes zu achten.

5.1 Wärmeverteils- und Speichersystem

Je kleiner der Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und Heizungsvorlauftemperatur ist, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe. Speziell für die Kombination mit einer Photovoltaikanlage bedeutet das, dass die Wärmepumpe anteilig mehr durch Solarstrom versorgt werden kann. Daher stellt die Vorlauftemperatur der Heizkreise sowie die Temperatur im Warmwasserspeicher eine wichtige Stellschraube dar.

5.1.1 Vorlauftemperatur

Welche Temperatur das Wasser in der Heizung haben muss, damit Ihr Haus im Winter ausreichend warm wird, hängt maßgeblich von zwei Faktoren ab:

- Dämmung der Außenhülle
- Größe und Art der Heizflächen

Wenn durch eine gut gedämmte Außenhülle weniger Energie entweicht, muss folglich auch weniger Energie über die Heizflächen eingebracht werden. Neben dem offensichtlichen Vorteil, dass insgesamt weniger Energie benötigt wird, besteht ein zweiter: Weniger Energieeintrag heißt weniger Leistung der Heizflächen, heißt weniger Vorlauftemperatur. Und jedes Grad Celsius weniger, das die Wärmepumpe erzeugen muss, steigert die Effizienz um etwa 6 %!

Neben der Temperatur bestimmt natürlich die Größe einer Heizfläche dessen Leistung. Vorteilhaft sind großzügig bemessene Plattenheizkörper, der Idealfall ist die Fußboden- oder Wandheizung.

Welche Vorlauftemperaturen fahren Sie denn zuhause, wenn es draußen richtig kalt ist? 30 °C, 50 °C, ...? Könnten 5 °C weniger vielleicht auch ausreichen? In der Steuerung Ihrer Heizung/Wärmepumpe ist bei der Inbetriebnahme die Steilheit der Heizkurve eingestellt worden. Sie weist jeder Außentemperatur eine bestimmte Vorlauftemperatur zu (sofern witterungsgeführter Betrieb gefahren wird und nicht nur die Raumtemperatur ausschlaggebend ist). Oft ist sie steiler als nötig eingestellt, damit es unter keinen Umständen zu kalt werden kann.

Tipp:

Drehen Sie die Thermostatventile aller Heizkörper ganz auf und senken Sie die Heizkurve schrittweise ab. So stellen Sie fest, welche Vorlauftemperaturen Sie wirklich benötigen, um es ausreichend warm zu haben. Auch wenn Sie noch eine Verbrennungsheizung betreiben, können Sie dadurch Heizkosten sparen.

5.1.2 Pufferspeicher

Zur hydraulischen Entkoppelung von Wärmepumpe und Heizkreisen ist in der Regel ein Pufferspeicher eingebunden. Mit seiner Größe wächst die Wärmemenge, die bevorratet werden kann. Platzverhältnisse und Zugänglichkeit des Aufstellraumes begrenzen diese natürlich.

Neben der Größe ist aber auch hier die Vorlauftemperatur der Heizkreise entscheidend, da die Wärmepumpe den Speicher auf maximal 60 °C bis 65 °C aufheizen kann. Je größer der Unterschied zwischen der benötigten und der maximal möglichen Vorlauftemperatur, umso mehr Energie kann gespeichert werden, wenn Solarstrom zur Verfügung steht.

Bei Fußboden- und Wandheizungen kann auf einen Pufferspeicher verzichtet werden, wenn das Rohrsystem alleine schon genügend Wasservolumen bietet und ein Mindestvolumenstrom gegeben ist. Dieser ist für den effizienten Betrieb der Wärmepumpe unverzichtbar und lässt sich zum Beispiel erreichen, indem einige Heizkreise, üblicherweise im Wohnbereich, ständig geöffnet sind.

Beispiel:

Pufferspeicher 500 l, Vorlauftemperatur 50 °C
 $500 \text{ kg} \times 1,163 \text{ (Wh/kg}^{\circ}\text{K)} \times (60^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}) = \mathbf{5,8 \text{ kWh}}$
 Pufferspeicher 500 l, Vorlauftemperatur 30 °C
 $500 \text{ kg} \times 1,163 \text{ (Wh/kg}^{\circ}\text{K)} \times (60^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}) = \mathbf{17,4 \text{ kWh}}$

(Speicherinhalt x Wärmekapazität Wasser x Temperaturdifferenz = speicherbare Wärmemenge)

Ist ein Pufferspeicher vorhanden/vorgesehen und soll er als Wärmespeicher für solare Überschüsse genutzt werden, sollten die Heizkreise über Mischventile verfügen. Dann ist es möglich, die Temperatur im Speicher auf bis zu 65 °C anzuheben, die Heizkreise aber weiterhin mit z. B. 30 °C Vorlauftemperatur zu betreiben. Die Mischventile regulieren den Volumenstrom aus dem Speicher in die Heizkreise so, dass die Vorlauftemperatur den gewünschten Wert einhält. Während die erhöhte Temperatur des Speichers über langsames Entladen in die Heizkreise abgebaut wird, bleibt die Wärmepumpe ausgeschaltet.

5.1.3 Warmwasserspeicher und -temperatur

Während bei Mehrfamilien- und Mietshäusern mindestens 60 °C im Warmwasserspeicher herrschen müssen, gelten für Ein- und Zweifamilienhäuser keine Anforderungen. In der Regel steht dort ein verhältnismäßig kleiner Speicher zwischen 160 l und 300 l, der gut durchmischt wird und Legionellen wenig Chancen bietet, denn diese brauchen zur Vermehrung nicht nur Wärme, sondern auch Zeit.

Wie heiß duschen, baden und spülen Sie? Sicherlich mit kaum mehr als 40 °C. Den Warmwasserspeicher dauernd auf 55 °C oder mehr zu halten und bei der Entnahme kaltes Wasser beizumischen, ist energetisch denkbar ungünstig. Zum einen benötigt die Wärmepumpe mehr Strom, zum anderen steigen die Verluste an Rohrleitungen und Speicher. Dazu kommt die Gefahr des Verbrühens. Nicht zu guter Letzt, soll bei genügend PV-Leistung auch im Warmwasserspeicher Wärme bevorratet werden, wozu die Differenz zur maximal erreichbaren Temperatur groß sein sollte!

Den Sollwert auf 45 °C oder weniger zu senken, erscheint daher sinnvoll. Aber natürlich steigt mit jedem Grad weniger die Legionellengefahr. Ob und wann sie zu groß wird, hängt stark vom Nutzerverhalten und von der Installation ab, das lässt sich nicht pauschalisieren. Jeder Betreiber muss das Risiko selbst abschätzen.

Dieses sieht bei einem Vierpersonenhaushalt mit 300 l Speicher natürlich ganz anders aus, als bei einem Zweipersonenhaushalt und einem 400 l fassenden Speicher. Die Legionellen-Schaltung der Wärmepumpe, die den Speicher einmal pro Woche auf eine Temperatur zwischen 60 °C und 70 °C aufheizt und Legionellen abtötet, reduziert das Risiko.

Es lässt sich umso mehr Solarstrom in Wärme umwandeln, je größer der Speicher ist. Ein größerer Speicher wird aber weniger gut durchmischt, das Wasser verweilt länger im Speicher und bietet Legionellen mehr Zeit zum Wachstum. Zur Pufferung von in Wärme umgewandeltem Solarstrom etablieren sich daher zunehmend Speicher mit Frischwasserstationen, die nach dem Prinzip eines Durchlauferhitzers funktionieren.

Es handelt sich um eine am Speicher montierte Box, die einen leistungsstarken Plattenwärmetauscher sowie eine Umwälzpumpe beinhaltet. Alternativ zum externen Plattenwärmetauscher gibt es auch Modelle mit innenliegendem Rohrwärmetauscher.

Der Speicher bevorrätet nicht das Brauchwasser selbst, sondern Heizungswasser. Es wird von der Pumpe aus dem Speicher entnommen, im Wärmetauscher vom vorbeiströmenden Brauchwasser stark abgekühlt und wieder eingeleitet. So wird Ihr Wasser zum Duschen, Baden oder Spülen erst wenige Sekunden vor der Entnahme erwärmt und bietet Legionellen keine Chance. Die Temperatur kann beliebig gering gewählt werden.

5.1.4 Raumtemperatur

Ein großer und kostenloser Wärmespeicher ist das Gebäude selbst. Wird im forcierten Betrieb die Raumtemperatur um einige Grad erhöht, lassen sich große Mengen Energie speichern.

Die Luft selbst bietet dabei aufgrund ihrer geringen spezifischen Wärmekapazität nur wenig Potential. Da aber alles im Gebäude durch sie erwärmt wird (Innenwände, Decken und Böden, Möbel, ...), ergibt sich eine riesige Speichermasse, die umso mehr Energie aufnehmen kann, je größer der Temperaturunterschied zwischen der normalen und der erhöhten Raumtemperatur ist. Wenn Sie ihr Gebäude nachmittags mit Solarstrom von 20 °C auf z.B. 23 °C aufgeheizt haben, hat die Wärmepumpe in den Abendstunden erst einmal Pause.

5.2 Dimensionierung der Wärmepumpe

Die Wärmepumpe muss bei der regionalen Normauslegungstemperatur für Ihren Wohnort (z.B. -10 °C) so viel Wärme erzeugen, dass eine Rauminnentemperatur von 20 °C eingehalten werden kann. Mit anderen Worten: Die Heizleistung der Wärmepumpe muss der Heizlast Ihres Gebäudes entsprechen. Für einen effizienten Betrieb ist die Auslegung auf genau diesen Wert notwendig. Überschlägige Dimensionierungen mit typischen, spezifischen Werten – z.B. 100 Watt pro Quadratmeter –, sind sehr ungenau. Auch Berechnungen über den Verbrauch der alten Gas- oder Ölheizung, unter Annahme von Volllaststunden, erlauben nur eine Annäherung an die Heizlast. Oft wird ein „Reservezuschlag“ addiert, und die Wärmepumpe wird in den meisten Fällen zu groß dimensioniert.

Die Auswirkungen sind folgende:

- die nächst größere Wärmepumpe ist teurer
- bei Sole/Wasser-Geräten wird die Wärmequelle ebenfalls zu groß dimensioniert und damit teurer
- Wärmepumpen mit On-/Off-Betrieb kommen auf kurze Laufzeiten und viele Startvorgänge
- Inverter-Wärmepumpen können ihre Vorteile nicht voll ausspielen
- eventuell muss ein übergroßer Warmwasserspeicher her, da die Fläche des Rohrwärmetauschers sonst nicht die Heizleistung der Wärmepumpe übertragen kann
- die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe ist unnötig hoch, dadurch geringerer Deckungsanteil durch PV-Anlage und größerer Strombezug vom Energieversorger

Viele Wärmepumpenmodelle werden von den Herstellern mit unterschiedlichen Leistungen angeboten. Doch was tun, wenn die Heizlast genau zwischen zwei erhältlichen Leistungsstufen liegt? Es sollte das nächst kleinere Gerät gewählt werden, nicht das größere: Die Heizlast bezieht sich auf den „Worst Case“. Dieser tritt sehr selten auf und wenn, dann in der Regel nachts, wenn ein leichtes Absinken der Raumtemperatur auf z. B. 18 °C zu verschmerzen ist.

Bei älteren Gebäuden ist die Heizlast oft unbekannt. Mit dem Wissen um die verbauten Materialien und dessen Schichtdicken kann Sie aber nachträglich errechnet werden. Im Internet bieten einige Online-Rechner eine benutzerfreundliche Variante, um die U-Werte der Bauteile Ihrer Gebäudehülle berechnen zu können. Wie nachfolgend beschrieben, werden Wärmepumpen je nach Art der Wärmequelle unterschiedlich ausgelegt.

5.2.1 Luft/Wasser-Wärmepumpen

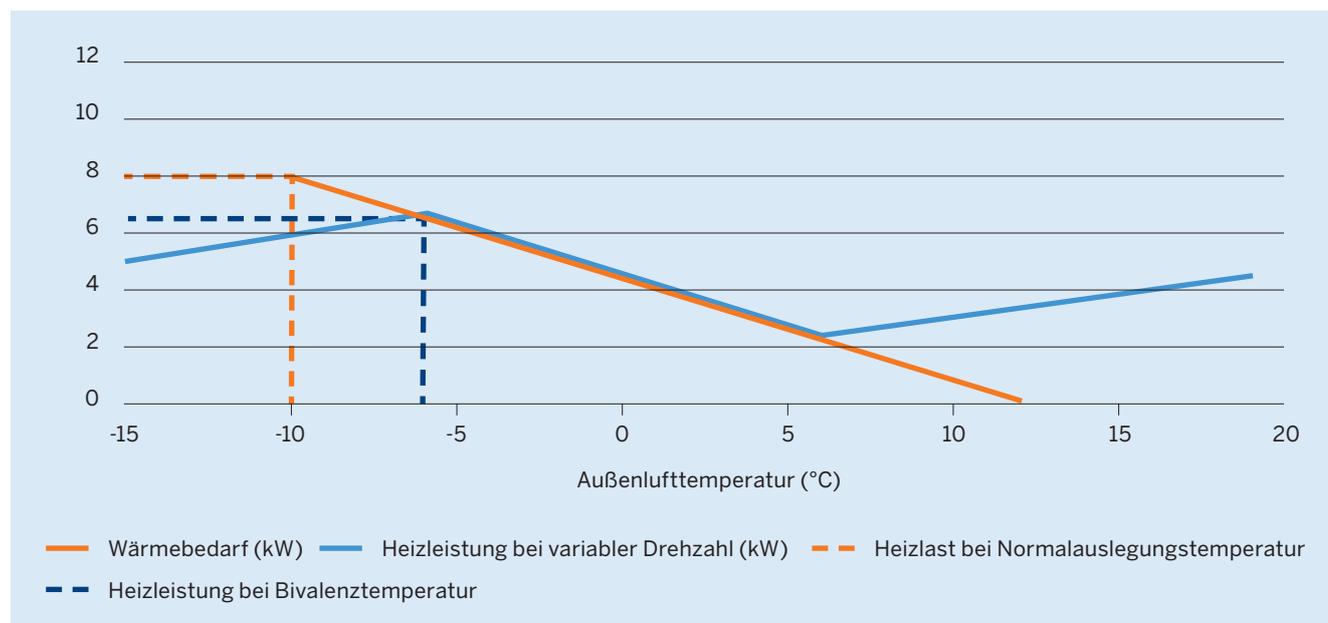
Die Grafik zeigt, dass die Wärmeleistung von Wärmepumpen, die ihre Energie aus der Außenluft beziehen, stark von dessen Temperatur abhängt. Je wärmer es draußen ist, desto größer ist die Wärmeleistung. Wird die Leistung auf die Normauslegungstemperatur ausgelegt, ist die Wärmepumpe für milde Tage in der Übergangszeit eigentlich zu stark. Dadurch verkürzen sich ihre Laufzeiten und sie muss häufiger starten.

Dieser Effekt lässt sich deutlich reduzieren, indem nicht auf die Normauslegungstemperatur hin dimensioniert wird, sondern auf eine höhere Außenlufttemperatur. Die

Wärmepumpe wird also absichtlich unterdimensioniert und in extrem kalten Stunden notfalls durch einen elektrischen Heizstab unterstützt. Man spricht von mono-energetischem Betrieb. Der Schnittpunkt von Wärmeleistung und Wärmebedarf heißt Bivalenzpunkt und sollte sich zwischen -7 °C und -2 °C befinden. Unterhalb von -7 °C wäre der Nutzen der Unterdimensionierung sehr gering, oberhalb von -2 °C würde der Heizstab zu oft aushelfen müssen.

Ein kurzzeitiges Unterschreiten des Bivalenzpunktes muss jedoch nicht mit einem sofortigen Einschalten des Heizstabes einhergehen: In den Steuerungen der meisten Wärmepumpen kann genau definiert werden, wann nachgeholfen werden soll, z.B. nach mehrstündigem Unterschreiten einer gewissen Außenlufttemperatur. Durch eine Nachtabsenkung lässt sich das Zuheizen weiter minimieren, da die kältesten Außentemperaturen für gewöhnlich nachts auftreten. Der Heizstab muss also nicht zwingend zum Einsatz kommen, auch wenn eine Wärmepumpe theoretisch nur bis -5 °C ausreichend Wärme liefern könnte.

Bivalente Auslegung einer Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Inverter-Technik (Angaben in kW)





5.2.2 Sole/Wasser-Wärmepumpen

Die Wärmequelle „Erdreich“ bietet über das ganze Jahr nahezu konstante Temperaturen, ab einer Tiefe von 10 Metern herrschen mindestens 8 °C bis 10 °C. Zwei Verfahren haben sich besonders bewährt, um sie zu nutzen: In eine oder auch mehrere senkrechte Bohrungen – je nach Wärmebedarf und Ergiebigkeit des Bodens – werden Erdsonden in bis zu 100 Metern Tiefe eingebracht. Die Erdsonden werden mit dem Wärmetauscher der Wärmepumpe verbunden, welcher die Sole – ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel – um ca. 4 K abkühlt. Im Erdreich wird der Sole die entnommene Wärme wieder zugeführt.

Wer einen ausreichend großen Garten besitzt (etwa die 2- bis 3-fache Wohnfläche), kann sich die Erdwärme mit einem Flächenkollektor ins Haus holen. Das Funktionsprinzip gleicht dem der Erdsonde. In Tiefen zwischen 1,2 bis 1,5 m werden spezielle Kunststoffrohre ähnlich wie bei einer Fußbodenheizung verlegt. Die Fläche über dem Kollektor darf nicht versiegelt sein, damit genügend Regenwasser zu ihm durchsickern kann. Ferner dürfen keine tiefwurzelnden Sträucher und Bäume gepflanzt werden.

Bei beiden Varianten nimmt das Tagesmittel der Soletemperatur zu Beginn der Heizperiode leicht ab und steigt im Frühjahr wieder an, -3 °C werden dabei nicht unterschritten. Weil die Heizleistung dadurch ganzjährig nahezu konstant ist, werden Sole/Wasser-Wärmepumpen überwiegend monovalent betrieben. Das bedeutet, ihre Wärmeleistung wird auf die Heizlast ausgelegt und ein Heizstab zur Reserve ist nicht erforderlich. Auch bei Sole/Wasser-Wärmepumpen gibt es mittlerweile solche mit Inverter-Technik. Durch die im Winter durchschnittlich höhere Quelltemperatur, arbeiten Sole/Wasser-Wärmepumpen effizienter als Luft/Wasser-Geräte.

5.2.3 Wasser/Wasser-Wärmepumpen

Im Gegensatz zu Erdsonden und Flächenkollektoren, handelt es sich bei der Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle um ein „offenes System“: Aus einem Saugbrunnen wird Grundwasser zur Wärmepumpe gefördert, in einem Plattenwärmetauscher um ca. 4 K abgekühlt und dem Erdreich über einen Schluckbrunnen wieder zugeführt. Bei der Positionierung der beiden Brunnen wird die natürliche Fließrichtung des Grundwassers berücksichtigt, damit bereits genutztes Wasser abtransportiert und nicht erneut angesaugt wird. Weil das Grundwasser ganzjährig eine relativ hohe Temperatur zwischen 10 °C und 12 °C aufweist, können Wasser/Wasser-Wärmepumpen die höchsten Jahresarbeitszahlen erreichen und werden ebenfalls monovalent ausgelegt.

6 Kühlen mit Solarstrom und Wärmepumpe

Photovoltaikanlagen und Wärmepumpen passen umso besser zusammen, wenn mit ihnen nicht nur geheizt, sondern auch gekühlt werden soll: Der Wunsch nach kühleren Raumtemperaturen (vor allem in Schlafzimmern) kommt an Tagen im Sommer auf, an denen jede Menge Solarstrom zur Verfügung steht. Den können Wärmepumpen nutzen, um das Gebäude kostenlos zu kühlen!

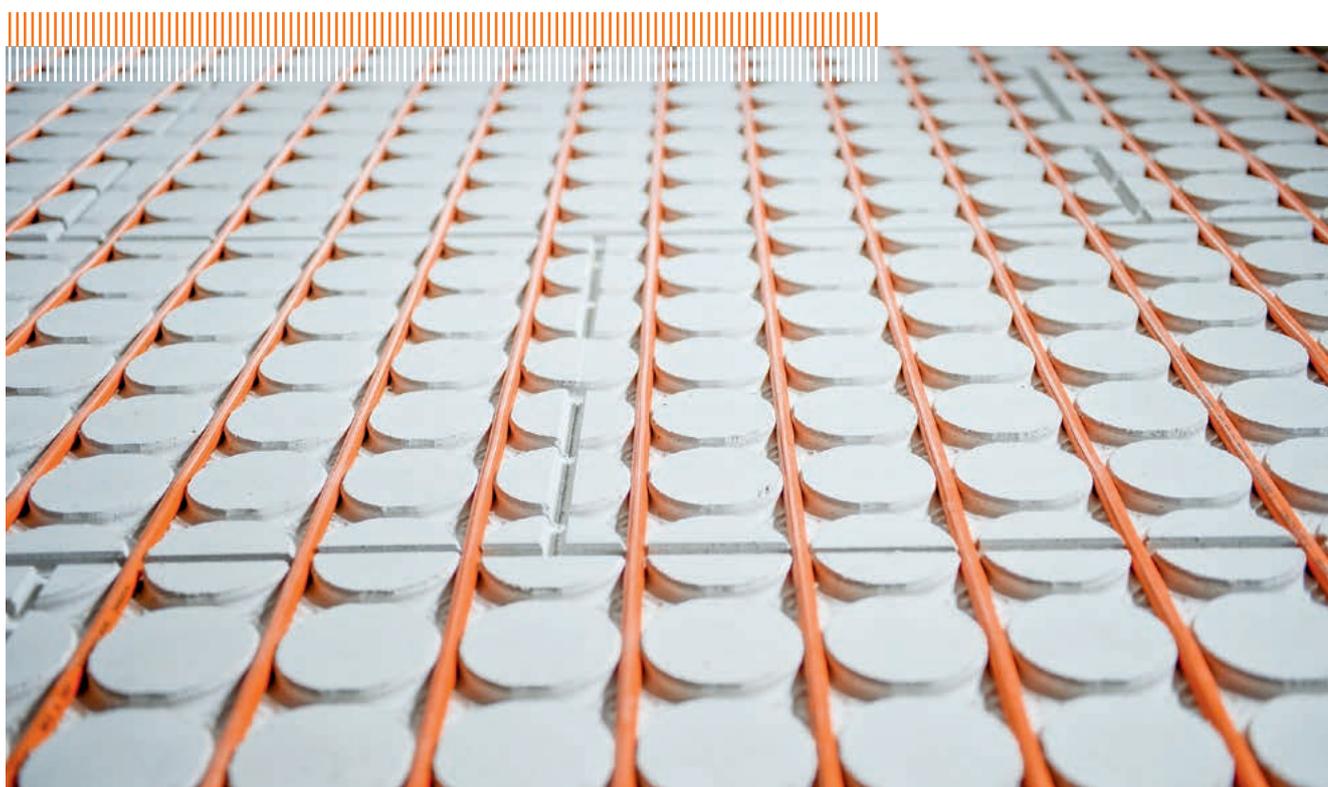
Das Wasser in den Heizkreisen sollte dazu nicht unter 16 °C–18 °C – je nach relativer Luftfeuchtigkeit – abgekühlt werden, um Kondenswasser an den Heizflächen und Rohrleitungen zu vermeiden. Wenn alle Rohrleitungen und Rohrverbinder dampfdiffusionsdicht isoliert sind, kann die Vorlauftemperatur auch unter den Taupunkt abgesenkt werden, um eine größere Kühlleistung zu erreichen. Kondenswasser tritt dann ausschließlich an den Heizflächen auf.

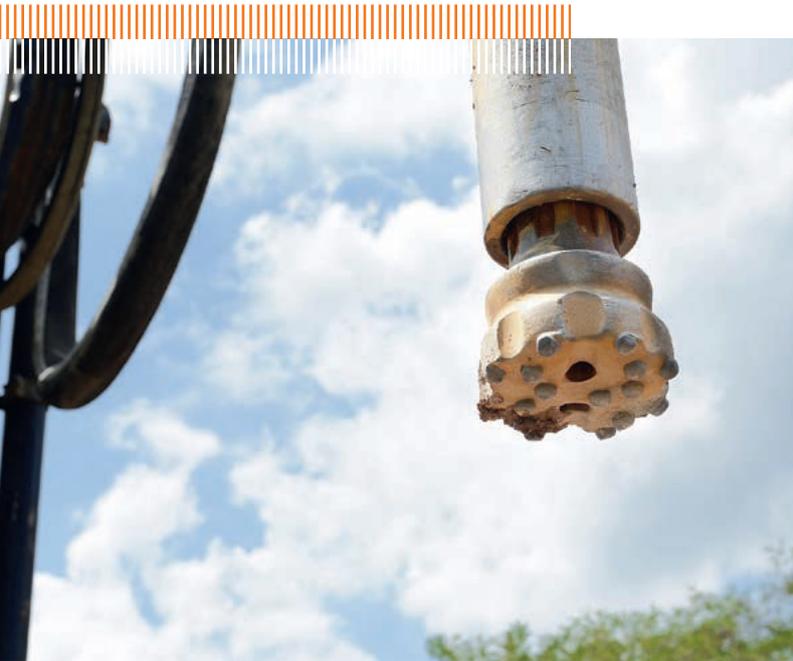
6.1 Passiv kühlen

... können ausschließlich Sole-/Wasser-Wärmepumpen. Passiv bedeutet, dass nur die Umwälzpumpen für den Sole- und Heizkreis arbeiten und der Verdichter außer Betrieb ist. In einem zusätzlichen Wärmetauscher werden Sole und Heizwasser aneinander vorbeigeführt, wobei das Heizwasser die über die Heizflächen aufgenommene Raumwärme an die kältere Sole abgibt, die diese ins Erdreich leitet.

Die Kühlleistung wird maßgeblich vom Wärmeverteilungssystem bestimmt:

- **Heizkörper**
 - erlauben aufgrund ihrer kleinen Flächen nur sehr kleine Übertragungsleistungen und sind kaum zur Kühlung geeignet
- **Fußbodenheizungen/Wandheizungen**
 - liefern dank der großen Flächen Übertragungsleistungen, die die Luft um 2 °C bis 3 °C Grad abkühlen können
 - eine Taupunktüberwachung begrenzt die Vorlauftemperatur, um die Bildung von Kondenswasser zu vermeiden
- **Gebläsekonvektoren**
 - sorgen mit ihren Ventilatoren für genügend Konvektion an den Heizflächen und Luftumwälzung im Raum
 - können unterhalb des Taupunktes betrieben werden und entfeuchten dadurch die Luft; Kondenswasser wird in Wannen aufgefangen oder über Schläuche abgeleitet
 - führen große Wärmemengen ab und sorgen schnell für die gewünschte Raumtemperatur





6.2 Aktiv kühlen

Bei aktiver Kühlung ist der Verdichter in Betrieb, die Fließrichtung des Kältemittels wird mit einem 4-Wege-Ventil umgekehrt. Das heißt, im eigentlichen Verflüssiger auf der Heizungsseite wird das Kältemittel verdampft, wodurch es das Heizungswasser abkühlt. Die dort aufgenommene Wärme wird im Verdampfer an der eigentlichen Wärmequelle abgegeben, indem es dort kondensiert. Die Kühlleistung ist wesentlich höher als bei der passiven Kühlung, da der Kältemittelkreislauf für größere Temperaturunterschiede sorgt.

Luft/Wasser-Wärmepumpen können ausschließlich aktiv kühlen, da sie im Gegensatz zu erdgekoppelten Anlagen über keine natürliche Wärmesenke verfügen: Die Raumluft kann ohne Kältemittelkreislauf nicht kälter werden als die Außenluft!

Der eigentliche Nachteil der aktiven Kühlung, nämlich der Stromverbrauch des Verdichters, wird zum Vorteil, wenn er mit PV-Strom betrieben wird. Jedoch ist der technische und finanzielle Aufwand größer, als bei der passiven Kühlung:

- Alle heizwasserführenden Rohrleitungen müssen dampfdiffusionsdicht isoliert werden, da der Taupunkt in jedem Fall unterschritten wird und die Leitungen ansonsten „schwitzen“ würden
- Es sollten Gebläsekonvektoren eingebunden werden, da die kritische Vorlauftemperatur für Flächenheizungen schnell erreicht wird und sich ein häufiges an- und abschalten der Wärmepumpe kaum vermeiden lässt

Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen bestimmt neben dem Wärmeverteilsystem vor allem die Wärmequelle die maximale Kühlleistung:

- **Erdsonden**
 - eignen sich für passives und aktives kühlen und leiten große Wärmemengen ins Erdreich, die vor allem von vorbeifließendem Grundwasser abgeführt werden
 - equivalent zur leichten Abkühlung der Sole in der Heizperiode, erwärmt sie sich bei aktiver Kühlung
- **Flächenkollektoren**
 - eignen sich in jedem Fall zur passiven Kühlung
 - soll aktiv gekühlt werden, muss eine geologische Bewertung sicherstellen, dass die eingetragene Wärme ausreichend abgeführt werden kann und nicht zu einer schädlichen Austrocknung des Bodens führt.

7 Warmwasser-Wärmepumpen: Einfache Eigenverbrauchssteigerung

Neben Wärmepumpen, die den gesamten Wärmebedarf Ihres Hauses abdecken, gibt es kleine Modelle, die ausschließlich der Warmwasserbereitung dienen. Neben „Warmwasser-Wärmepumpe“ ist „Brauchwasser-Wärmepumpe“ ein gängiger Begriff. Sie funktionieren als kompakte, innenstehende Luft/Wasser-Geräte, die betriebsbereit auf einem dazugehörigen Warmwasserspeicher montiert sind.

Als Energielieferant nutzen sie die Raumluft. Sie wird angesaugt, im Verdampfer um einige Grad abgekühlt, entfeuchtet und wieder ausgestoßen. Die der Raumluft entzogene Energie wird direkt im Warmwasserspeicher abgegeben.

Durch die ganzjährig relativ hohe Lufttemperatur (Aufstellung im Keller, Hauswirtschaftsraum, Garage, ...) und durch ihre niedrige Leistung (elektrisch etwa 400-700 Watt Anschlussleistung des Kompressors) arbeiten Warmwasser-Wärmepumpen äußerst effizient.

In folgenden Fällen werden Warmwasser-Wärmepumpen bevorzugt eingesetzt:

- Umstieg von dezentralen, elektrischen Durchlauf-erhitzern auf zentrale Warmwasserbereitung
- Entkoppelung eines älteren Öl-/Gaskessels von der Warmwasserbereitung:
 - Verwertung der vom Kessel erwärmten Luft im Heizungsraum während der Heizperiode
 - Vermeidung der Anfahrverluste im Sommerbetrieb
 - Nutzung von Solarstrom
- feuchter Keller: WW-Wärmepumpe reduziert Luftfeuchtigkeit und trocknet die Wände
- Entkoppelung einer Heizungswärmepumpe von der Warmwasserbereitung, wenn ihre Leistungsaufnahme groß und die Photovoltaikanlage klein ist

Viele erhältliche Warmwasser-Wärmepumpen sind „SG-Ready“ und können zum Beispiel direkt vom Wechselrichter angesteuert werden. Ist keine SG-Ready Schnittstelle vorhanden, lässt sich der Betrieb mit einer herkömmlichen Zeitschaltuhr oder Funksteckdosen optimieren.





8 Photovoltaik, Solarthermie, oder beides?

Neben der Photovoltaik, lassen sich auch solarthermische Anlagen hervorragend mit Wärmepumpen kombinieren. Sie wandeln die Sonnenstrahlung auf dem Dach direkt in Wärmeenergie um und unterstützen die Wärmepumpe bei der Erwärmung des Warmwasserspeichers oder des Kombispeichers für Warmwasser und Heizung. Auch eine Dreierkonstellation – bestehend aus Photovoltaik, Solarthermie und Wärmepumpe – ist technisch kein Problem. Die Solarthermie erwärmt den Speicher direkt über einen Wärmetauscher, die Photovoltaik erwärmt ihn indirekt über die Wärmepumpe.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung für ein solches System ist jedoch oft schwierig. Wird eine Dachfläche komplett mit Photovoltaikmodulen belegt, ist die Investition geringer, als wenn Module für Solarthermie und Photovoltaik installiert werden. Ob sich die höhere Investition für beide Anlagen rechnet, sollte für jeden Fall im Einzelnen geprüft werden. Zu beachten ist dabei, dass der Eigenverbrauch von Solarstrom bei einer solchen Dreierkonstellation geringer ausfallen wird, da die Wärme, die die Solarthermie produziert, nicht mehr über Solarstrom und Wärmepumpe erzeugt werden kann.

9 Solarstrom oder Wärmepumpentarif?

Speziell für Wärmepumpen bieten viele Energieversorger einen separaten Stromtarif an, wie es ihn früher schon für Nachtspeicherheizungen gab. Dem Vorteil des vergünstigten Strompreises steht eine zweite Grundgebühr gegenüber, die die Miete für den separaten Stromzähler und einen Rundsteuerempfänger enthält. Ein solcher Tarif räumt dem Energieversorger das Recht ein, Ihre Wärmepumpe dreimal täglich für jeweils zwei Stunden abzuschalten, um Lastspitzen im Stromnetz abzuschwächen. In der Praxis wird von der maximalen Sperrzeit jedoch kaum Gebrauch gemacht, viele Energieversorger schalten nur einmal täglich ab, einige auch überhaupt nicht.

Wer seine Wärmepumpe mit Solarstrom versorgen möchte, entscheidet sich im Normalfall automatisch gegen einen solchen Tarif. Bisher bieten nur wenige Energieversorgungsunternehmen die Möglichkeit an, die Wärmepumpe über einen Wärmepumpentarif und mit Solarstrom zu betreiben. Bei den meisten Energieversorgern müssen Sie sich entscheiden: Entweder Sie versorgen mit Ihrer Photovoltaikanlage das ganze Gebäude inklusive Wärmepumpe, oder Sie nutzen den Sondertarif für die Wärmepumpe und den Solarstrom nur im Haushalt.

Neben dem Wunsch nach mehr Unabhängigkeit von Energiepreisen, fließt häufig auch die Ideologie vieler Menschen mit in die Entscheidung ein, ihre Wärmepumpe sogar dann mit Solarstrom zu betreiben, wenn ein Wärmepumpentarif günstiger wäre. Für viele wird es zunehmend wichtiger, einen Großteil des Energiebedarfs selbst produzieren zu können. Ebenfalls spielt aktiver Klimaschutz vermehrt eine Rolle.

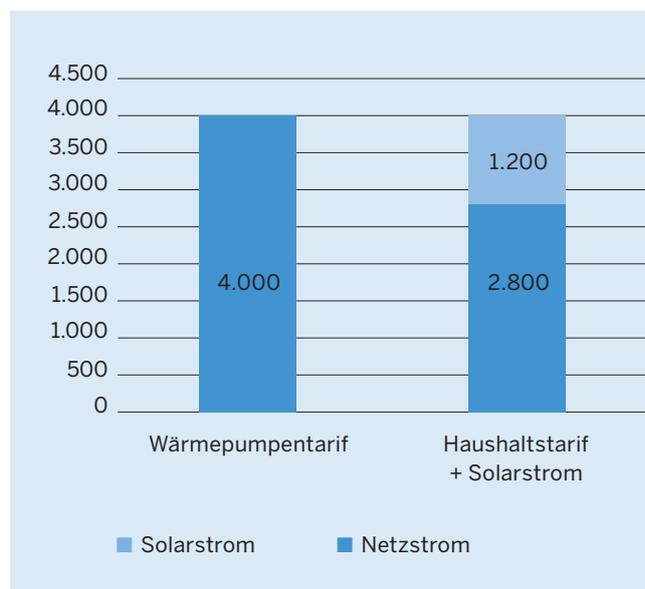
Welche Variante wirtschaftlicher ist, wird unter anderem von folgenden Faktoren bestimmt:

- Stromverbrauch der Wärmepumpe
- Größe der Photovoltaikanlage
- Preisunterschied zwischen Haushalts- und Wärmepumpentarif
- Einspeisevergütung Solarstrom

Beispielrechnung:

Stromverbrauch Wärmepumpe:	4.000 kWh/a
Wärmepumpe gedeckt durch PV:	30 % = 1.200 kWh/a
Wärmepumpentarif:	20 Cent
Haushaltstarif:	27 Cent
Grundgebühr Wärmepumpentarif:	120 Euro/a
Einspeisevergütung Solarstrom:	12,4 Cent

Herkunft des Stroms für die Wärmepumpe (Angaben in kWh/a)



Stromkosten mit Wärmepumpentarif:

$4.000 \text{ kWh/a} * 0,20 \text{ Euro/kWh} + 120 \text{ Euro/a} =$
920 Euro/a

Stromkosten mit Solarstrom aus einer vorhandenen Anlage:

$2.800 \text{ kWh/a} * 0,27 \text{ Euro/kWh} + 1.200 \text{ kWh/a} * 0,124 \text{ Euro/kWh} =$
905 Euro/a

Der Solarstrom, der von der Wärmepumpe verbraucht wurde, muss mit der Einspeisevergütung multipliziert und zu den Stromkosten addiert werden, da er nicht vergütet wird.

Welche Tarife sind bei Ihnen erhältlich? Wie viel Strom würde eine Wärmepumpe bei Ihnen verbrauchen? Passen Sie die Werte an die Gegebenheiten bei Ihnen zu Hause an, um die für Sie wirtschaftlichere Variante herauszufinden. Bei der Entscheidung, wie Sie Ihre Wärmepumpe versorgen möchten, sollte auch über Preisstabilität nachgedacht werden. Der Strom vom Energieversorger kann teurer werden. Die Kilowattstunde Strom aus der eigenen Photovoltaikanlage hingegen, kostet auch in 15 Jahren genauso viel wie heute.



Beispiel 1



Beispiel 2



Beispiel 4



Beispiel 3

10 Hausbesitzer berichten

Warmwasser über die Heizungswärmepumpe bereiten, oder lieber separat mit einer Warmwasser-Wärmepumpe? Wärmepumpentarif, ja oder nein? Macht die Einbindung eines Stromspeichers Sinn? Kann ich mit meinem Solarstrom auch kühlen?

Es gibt unzählige Möglichkeiten, wie Sie Ihre Haustechnik gestalten können. Eine Patentlösung gibt es hingegen nicht, denn jedes Gebäude ist unterschiedlich, genauso wie das Nutzerverhalten seiner Bewohner. Bei einem Neubau hat man die Qual der Wahl, da die gesamte Technik als System geplant werden kann und von Grund auf neu installiert wird. Bei Bestandsgebäuden muss man sich dagegen häufig mit gegebenen Verhältnissen arrangieren und eine individuelle Lösung finden, um sein Eigenheim möglichst effizient zu gestalten und einen hohen Autarkiegrad zu erreichen.

Um Ihnen mögliche Anlagenkonstellationen nahe zu bringen und Ihren Ideenreichtum zu wecken, haben wir auf den folgenden Seiten die Haustechnik einiger Wohngebäude erklärt. So unterschiedlich sie auch sind, ist ihnen allen gemein, dass eine möglichst große Photovoltaikanlage installiert wurde. Die Nutzung des Solarstroms variiert jedoch.

10.1 Beispiel 1

Bernard Schulten führt einen Elektro- und Sanitärfachbetrieb, der sich auf individuelle Energiekonzepte und Gebäudeautomation spezialisiert hat. Daher wundert es nicht, dass sein neugebautes Zweigenerationenhaus ein Vorzeigeobjekt für energieeffiziente Haustechnik geworden ist.

Ein Multifunktionsspeicher mit 1.000 l dient als zentrales Wärmereservoir, welches die Heizkreise versorgt und auch die Warmwasserbereitung übernimmt. Beheizt wird er über eine Sole/Wasser-Wärmepumpe und über Solarthermie. Die Fußbodenheizungen bieten nicht nur Behaglichkeit an kalten, sondern auch Vorzüge an heißen Tagen: „Im Sommer nutzen wir die passive Kühlfunktion der Wärmepumpe. Mit den Erdsonden kühlen wir das Wasser in den Heizkreisen, wodurch selbst im Dachgeschoss immer angenehme Temperaturen herrschen.“

Auch der Keller, die Garage und eine Werkstatt werden ganzjährig temperiert. Um die insgesamt 450 m² Nutzfläche zu beheizen, nutzte die Wärmepumpe 2014 lediglich 8.700 kWh Strom und produzierte 38.000 kWh Wärme. Eine konventionelle Heizung hätte hierfür über 40.000 kWh Gas oder Heizöl verbraucht.



Der Ertrag der Photovoltaikanlage wird zum Großteil im Haushalt und von der Lüftungsanlage genutzt, die Wärmepumpe ist noch nicht mit der Photovoltaikanlage gekoppelt. Der Heizwärmebedarf könnte nur zu einem geringen Anteil durch Solarstrom gedeckt werden, da er sehr hoch ist. Auch zur Warmwasserbereitung könnte die Photovoltaikanlage nur wenig beitragen, weil die Solarthermie diesen Part dominiert. „Wir nutzen zurzeit noch den Wärmepumpentarif der örtlichen Stadtwerke. Sollte der in den nächsten Jahren unattraktiv werden, können wir jederzeit auf die Kombination von Haushaltstarif und Solarstrom umsteigen. Die Wärmepumpe ist SG-Ready und könnte dann vom SO_Kontakt des Stromzählers angesteuert werden.“

Daten des Gebäudes:

Beheizte Fläche:	450 m ²
Heizung:	Sole/Wasser-Wärmepumpe mit 14 kW _{th} / 3,1 kW _{el} , momovalent. Kühlfunktion
Wärmeverteilungssystem:	Fußboden- und Wandheizung
Wärmequelle:	3 x 100 m Erdwärmesonden
Pufferspeicher:	Multifunktionsspeicher, 1.000 l
Warmwasser:	über Multifunktionsspeicher
Lüftungsanlage:	Zentrallüftung mit Wärmerückgewinnung, Befeuchtung,
Solarthermie:	9,3 m ² Flachkollektoren, dachintegriert, Heizungs- und Warmwasserunterstützung
Photovoltaikanlage:	76 kWp, Monokristallin, Westausrichtung, 45° Neigung 3,75 kWp, Monokristallin, auf dem Carport
Wechselrichter:	3 x einphasig

Ansprechpartner:

Elektro Schulten GmbH & Co. KG
www.elektro-schulten.de

10.2 Beispiel 2

Familie Nahs aus Duisburg hat vor einigen Jahren ihre Ölheizung durch eine Sole/Wasser-Wärmepumpe ersetzt. „Im Winter haben wir täglich mit unserem Scheitholzofen zugeheizt, weil der alte Heizkessel auf 18°C Raumtemperatur eingestellt war, um Heizöl zu sparen. Wir brauchten etwa 4 m³ Holz im Jahr. Heute nutzen wir den Ofen nur noch wegen der Gemütlichkeit, die Raumbeheizung übernimmt die Wärmepumpe alleine.“

Die Energie dazu bezieht sie zu 75 % aus Erdwärmesonden, die sich in zwei 87 m tiefen Bohrungen unter Rasen und Terrasse verstecken. Die restlichen 25 %, die elektrische Antriebsenergie für den Verdichter, wird zum Teil durch die Photovoltaikanlage gedeckt. Im Erdgeschoss wird die Wärme über eine Fußbodenheizung übertragen, im ersten Stock über Heizkörper.

Ihr Brauchwasser erwärmen die Nahs' aber nicht mit Erdwärme, sondern mit Luft: „Unser Keller ist über 100 Jahre alt und war immer sehr feucht. Jetzt zieht die Warmwasser-Wärmepumpe die Feuchtigkeit aus dem Keller und aus den Wänden, und das funktioniert so gut, dass wir inzwischen unsere Wäsche zum trocknen extra in den Keller stellen!“

Die dachintegrierte PV-Anlage mit 28 Modulen und insgesamt 7 kWp erzeugt Energie für die beiden Wärmepumpen und für den Haushalt. „2014 verbrauchten wir mit den Wärmepumpen 4.500 kWh Strom und im Haushalt 3.500 kWh. Mit der PV-Anlage haben wir 6.400 kWh erzeugt. Ins Netz speisen wir nur den Strom ein, den wir selbst nicht gebrauchen können.“

Daten des Gebäudes:

Wohnfläche:	140 m ²
Heizung:	Sole/Wasser-Wärmepumpe mit 10,9 kW _{th} / 2,2 kW _{el} , monovalent
Wärmequelle:	2 x 87 m Erdwärmesonden
Wärmeverteilsystem:	Fußbodenheizung EG, Radiatoren 1. OG
Pufferspeicher:	200 l
Warmwasser:	Warmwasser-Wärmepumpe, 200l, 2.400 W _{th} / 650 W _{el}
Lüftungsanlage:	–
Photovoltaikanlage:	7 kWp, Monokristallin, Südausrichtung, Neigung 45°
Wechselrichter:	1 x dreiphasig



Ansprechpartner:

MW Wasser Wärme Luft GmbH
www.mw-wasserwaermeluft.de

B&E Technik
www.be-technik.de

10.3 Beispiel 3

Ein Eigenverbrauch von 55 % lässt sich mit einer kleinen Photovoltaikanlage um die 3 kWp leicht realisieren. Das Doppelhaus von Klaus Löderbusch erreicht diesen Wert aber mit einer Anlage, die 14 kWp leistet! Noch beeindruckender ist der Autarkiegrad des Gebäudes: 70 % des jährlichen Energieverbrauchs wird durch die Sonne gedeckt.

Zusammen mit der Firma MP Wärmetechnik aus Billerbeck und Stiebel Eltron entwickelte der Bauherr – und Inhaber von „Löderbusch Elektrotechnik“ – das ausgeklügelte Energiekonzept, welches diese vorbildlichen Zahlen ermöglicht und das Zusammenspiel zwischen der Photovoltaikanlage, einer Wärmepumpe und einem Batteriespeicher dirigiert.

Erzeugen die Solarzellen mehr Energie, als gerade im Gebäude benötigt wird, beginnt zunächst der Batteriespeicher zu laden. Übersteigt die Solarleistung die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe, signalisiert der Wechselrichter der Wärmepumpe über die SG-Ready-Schnittstelle, dass sie autark mit Solarstrom laufen kann. Sie schaltet sich daraufhin ein und erhitzt zuerst den Warmwasserspeicher auf 55 °C. Danach erwärmt sie das Heizungswasser im Pufferspeicher (sofern geheizt werden muss).

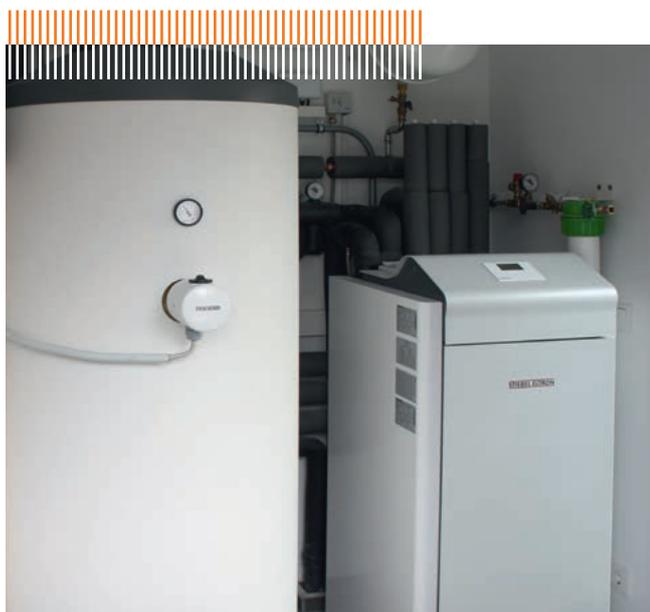
Sind der Batteriespeicher und die Wärmespeicher gefüllt und werden immer noch mehr als 6 kW ins Netz eingespeist, registriert das ein intelligenter Stromzähler. Er schaltet einen Heizstab ein, der den Warmwasserspeicher von 55 °C auf ca. 75 °C erwärmt. Der Speicher bevorratet dann so viel Energie, dass er frühestens am nächsten Tag mit Solarstrom nachgeladen werden muss. Nach Sonnenuntergang nutzen die Haushalte und die Wärmepumpe den Solarstrom aus dem Batteriespeicher.

Aus zwei 90 m langen Erdsonden fördert die Wärmepumpe Energie für die Fußbodenheizungen beider Haushälften und den Warmwasserbedarf. Bei einer Vorlauftemperatur von 35 °C und einer Soletemperatur von 0 °C, ergibt sich ein COP von 5. Die Leistungsaufnahme der Wärmepumpe beträgt dann gerade einmal 2 kW, weitere 8 kW liefert das Erdreich.

Im ersten Betriebsjahr wurden 12.000 kWh Strom verbraucht: 4.000 kWh von der Wärmepumpe und ca. 4.000 kWh je Haushalt. Insgesamt mussten nur 3.500 kWh vom Energieversorger zugekauft werden, den Rest lieferte die Photovoltaikanlage.

Daten des Gebäudes:

Wohnfläche:	2 x 120 m ²
Heizung:	Sole/Wasser-Wärmepumpe mit 10,4 kW _{th} / 2 kW _{el} , monovalent
Wärmeverteilsystem:	Fußbodenheizung
Wärmequelle:	2 x 90 m Erdwärmesonden
Pufferspeicher:	400 l
Warmwasser:	Warmwasserspeicher 300 l, über Wärmepumpe und Heizstab (6 kW)
Lüftungsanlage:	–
Photovoltaikanlage:	14 kWp, Monokristallin, Südausrichtung, 45° Neigung
Wechselrichter:	1 x dreiphasig
Stromspeicher:	Wechselstromspeicher, 11,5 kWh



Ansprechpartner:

Elektrotechnik Löderbusch GmbH & Co. KG
www.loederbusch.de

10.4 Beispiel 4

Bei der Planung ihres Einfamilienhauses, legte Familie Müller großen Wert auf Energieeffizienz. Ihr Fertighaus ist so gut gedämmt, dass es ohne ein klassisches, wasserführendes Heizungssystem auskommt. Die benötigte Wärme wird direkt über die Lüftungsanlage in die Räume transportiert. Reicht die Energie aus der Wärmerückgewinnung nicht aus, gewinnt eine Luft/Luft-Wärmepumpe, die im Lüftungsgerät integriert ist, weitere Energie aus der Abluft. Sollte die Heizleistung immer noch nicht ausreichen, kann raumindividuell durch elektrische Heizelemente nachgeheizt werden, die direkt vor den Luftauslässen in der Decke verbaut sind.

Ein Scheitholzofen im Wohnzimmer verbreitet im Winter nicht nur Gemütlichkeit, er reduziert auch den Stromverbrauch der Wärmepumpe. Eine elektrische Fußbodenheizung sorgt für Komfort im Badezimmer. Die Warmwasserbereitung übernimmt eine Warmwasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von 750 W, die der Luft im Keller Wärme entzieht und in den Warmwasserspeicher führt. Das nach Süden ausgerichtete Pultdach bietet einer PV-Anlage mit 11,4 kWp Platz. Sie ist an einen Stromspeicher mit einer Kapazität von 6,9 kWh angeschlossen, der neben der Batterie auch den Wechselrichter beinhaltet. Neben den Stromverbrauchern des Haushalts, sind auch die Wärmepumpen über den Stromspeicher mit der Photovoltaikanlage verbunden. Wenn die Wärmepumpe im

Lüftungsgerät nach Sonnenuntergang läuft, bezieht sie den Strom zunächst aus dem Speicher. Die Warmwasser-Wärmepumpe erwärmt ihren Speicher durch eine Zeitsteuerung zur Mittagszeit, wenn die Photovoltaikanlage für gewöhnlich ihre maximale Leistung erzeugt.

Zum Zeitpunkt unseres Besuches bei Familie Müller, war die Haustechnik erst seit wenigen Monaten in Betrieb. Die Daten bisher sind vielversprechend: Im März wurde der Energiebedarf für Haushalt, Lüftung und beide Wärmepumpen zu 46 % durch die Photovoltaikanlage und den Speicher gedeckt, im April zu 73 %, im Mai sogar zu 90 %.

Daten des Gebäudes:

Wohnfläche:	140 m ²
Heizung:	Luft/Luft-Wärmepumpe mit 1.500 W _{th} / 440 W _{el} , PTC-Elemente, elektr. Fußbodenheizung Bad
Wärmeverteilsystem:	Lüftungsanlage
Warmwasser:	Warmwasser-Wärmepumpe, 250 l, 2.800 W _{th} / 750 W _{el}
Lüftungsanlage:	Zentrallüftung mit Wärmerückgewinnung, Kühlfunktion
Photovoltaikanlage:	11,4 kWp, Monokristallin, Südausrichtung, 30° Neigung
Stromspeicher:	Gleichstromspeicher mit Wechselrichter, dreiphasig, 6,9 kWh



Ansprechpartner:

SchwörerHaus KG
www.schwoererhaus.de

B&W Energy GmbH & Co. KG
www.bw-energy.de

Impressum

EnergieAgentur.NRW
Wärmepumpen-Marktplatz NRW
Roßstraße 92
40476 Düsseldorf

Telefon: 0211/837 1930
hotline@energieagentur.nrw
www.energieagentur.nrw

© EnergieAgentur.NRW/EA407

Ansprechpartner

EnergieAgentur.NRW
Wärmepumpen-Marktplatz NRW
Sven Kersten
Björn Fritsche

E-Mail: kersten@energieagentur.nrw
www.waermepumpe.nrw

Bildnachweis

Seite 4: Fotolia.com/Westend61
Seite 5, 18, 19: Bundesverband Wärmepumpe e.V.
Seite 10: Fotolia.com/Ingo Bartussek
Seite 12: Fotolia.com/Berlinstock
Seite 16: Fotolia.com/eyecat
Seite 17: Fotolia.com/jörn buchheim
Seite 20: Fotolia.com/manfredxy

Gestaltung

www.designlevel2.de

Stand

10/2015

