

Raumkühlung mit einer PV getriebenen Kompressor Kühlmaschine und hohem Eigenstromverbrauch

Zusammenfassung: PV elektrische Energie kann im Eigenverbrauch zur Kühlung von Gebäuden genutzt werden und entlastet damit das öffentliche Stromnetz. Das im Labor aufgebaute Kühlsystem mit einer Kühlleistung von $P_{\text{kühl,max}} = 8 \text{ kW}$ hat elektrisch angetriebene Komponenten welche prioritär mit Energie aus einem 14.7m^2 PV-Feld betrieben werden. Durch die Kopplung an das öffentliche Netz kann jedoch auch daraus bei Bedarf Energie bezogen oder, bei Überangebot, wird PV-Strom eingespeist. Zur Steigerung der Effizienz des Systems kann die Abwärme der Kühlmaschine zur Warmwasser Erwärmung genutzt werden. Ein Simulationstemplate wurde erstellt, Parameter wie Kühlmaschinen-Leistung oder Volumen des Kältespeichers wurden z.T. variiert und die damit erzielten Simulationsergebnisse mit den Messdaten der Anlage verglichen und validiert. Die Übereinstimmung der Resultate ist in stationären Betriebszuständen befriedigend wobei die Simulationsergebnisse jeweils tiefer liegen. Hingegen ist in Anlaufphasen eine grössere Abweichung zu beobachten. Da diese Betriebszeiten kurz sind gegenüber dem längeren, stationären Betrieb, ist eine Skalierung auf Systeme mit grösserer Kühlleistung möglich. Insgesamt ist die Anpassung der Leistung an den Bedarf vorteilhaft – also eher keine Speicherung – da dadurch die Verluste und der Eigenverbrauch steigen bzw. der Bezug von elektrischer Energie aus dem öffentlichen Netz sinkt.

Paul Gantenbein, Lukas Omlin, Daniel Notter
Institut für Solartechnik SPF, HSR Hochschule für Technik, Rapperswil
Tel. +41 55 222 48 11
E-Mail: paul.gantenbein@spf.ch; lukas.omlin@spf.ch
Internet: www.spf.ch

Einleitung

Erneuerbare Energien sind breit einsetzbar und ersetzen damit fossile Energieträger. Dies gilt besonders für hochwertige elektrische Energie aus Photovoltaik-Anlagen. So ist diese Solarenergie auch zum Betrieb von Kompressor-Kühlmaschinen zur Raumkühlung nutzbar, zumal die Gleichzeitigkeit von Bedarf und Angebot oft gegeben ist. Für Kühlbedarf in Zeiten ohne Solarstrahlung dienen (geladene) Speicher (thermische oder elektrische) zur Überbrückung oder die Systeme werden mit dem öffentlichen Netz gekoppelt. In dieser Arbeit wird über den Aufbau eines mit dem Netz gekoppeltes Kühlsystem mit thermischen Speichern berichtet. Die validierten Resultate aus Jahres- bzw. Saisonsimulationen werden präsentiert.

Aufbau des Kühlsystems und des Simulationstemplates

Eine PV- und Netzgetriebene Kompressor Kühlanlage wurde aufgebaut und im Betrieb Messdaten erfasst. Das System mit einer Frequenzgesteuerten Kompressor

Kühlmaschine der Kühlleistung $P_{\text{kühl,max}} = 8 \text{ kW}$ kann in verschiedenen Kühlmodi betrieben werden. Die elektrische Energie der PV Anlage mit einer Peak-Leistung von 2.3 kW wird mit einem Wechselrichter in Wechselstrom gewandelt und kann dann durch das Kühlsystem verbraucht, oder ins öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Das System beinhaltet einen thermischen Kältespeicher auf der Verdampfer Seite der Wärmepumpe, zur Wärmerückgewinnung und Effizienzsteigerung einen Brauchwarmwasserspeicher auf der Kondensatorseite der Wärmepumpe, einen Sole-Luft Rückkühler für den Wärmeabwurf ausserhalb des Gebäudes sowie Kühldecken für die Kälteverteilung im Raum. Abbildung 1 zeigt das Schema der Anlage und in Tabelle 1 sind die Anlagendaten zusammengefasst.

Während Solarenergie nutzbar ist, kann, wie erwähnt, die gewonnene PV Energie entweder im Netz als elektrische Energie „gespeichert“ oder über den Betrieb der Wärmepumpe als Kälte in den Kältespeicher geladen werden. Bei Aussen-temperaturen die tiefer sind als die Temperatur im Kältespeicher, kann dieser im freien Kühlmodus beladen bzw. gekühlt werden.

Als Wärmeträgerfluid in den Kühldecken, den Rohrleitungen sowie im Kältespeicher wird ein Wasser-Ethanol Gemisch (20vol% Ethanol) eingesetzt. Das System ist mit diversen Sensoren für Temperatur, Durchfluss, Feuchte sowie Solarstrahlung ausgerüstet. Die Datenerfassung und Systemsteuerung wird mit der NI LabVIEW® Software und entsprechender Hardware gemacht. Zur Simulation des Kühlsystems wird mit der Software Polysun ein Template aufgebaut welches die Anlage nach Abb. 1 abbildet, siehe Abb. 2. Das Ziel beim Betrieb des Systems ist die Optimierung auf maximalen Komfort oder maximale Effizienz.

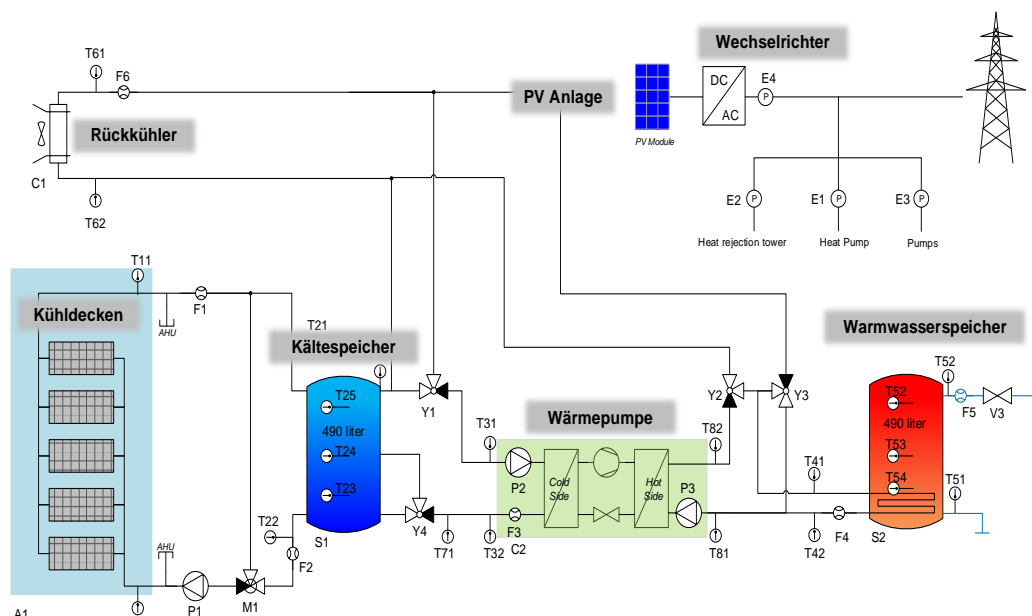


Abbildung 1 Schematische Darstellung der Anlage mit PV getriebener und Netz gekoppelter Kältemaschine, Warmwasser- und Kältespeicher, Kühldecken zur Kälteverteilung und Rückkühler.

Notizen

Tabelle 1 Hauptkomponenten der solaren Kühlanlage.

Bezeichnung	Hersteller / Lieferant	Typ	Beschreibung
PV Anlage	MEYER BURGER AG	Sky 285	9 Module à 285 Wp Nennleistung Ausrichtung: $\alpha = 8^\circ$ West Anstellwinkel: $\beta = 15^\circ$
Wechselrichter	SMA	TL2500	2.5 kW Nennleistung
Wärmepumpe	Nibe / ait	F 1155-6	Sole / Wasser Wärmepumpe (8 kW Kälteleistung)
Kältespeicher	alpha innotec	TPSK 500	477 l Pufferspeicher
Warmwasserspeicher	alpha innotec	SWWS 506	500l (445 l) Register / Wärmeübertrager
Rückkühler	WT AG	-	Sole - Luft Wärmetauscher (Ausseneinheit)
Kühldecken	Zehnder Group Schweiz AG	Zip2	25 Elemente à 3 m x 0.704 m
Wärmeträgerfluid	Abderhalden Harapol AG	Minoltherm	Frostschutzmittel auf Ethanol Basis mit 20 wt% Ethanol
Meteostation	SMA	SMA Meteostation	Strahlungs-, Aussentemperatur- und Modultemperaturmessung

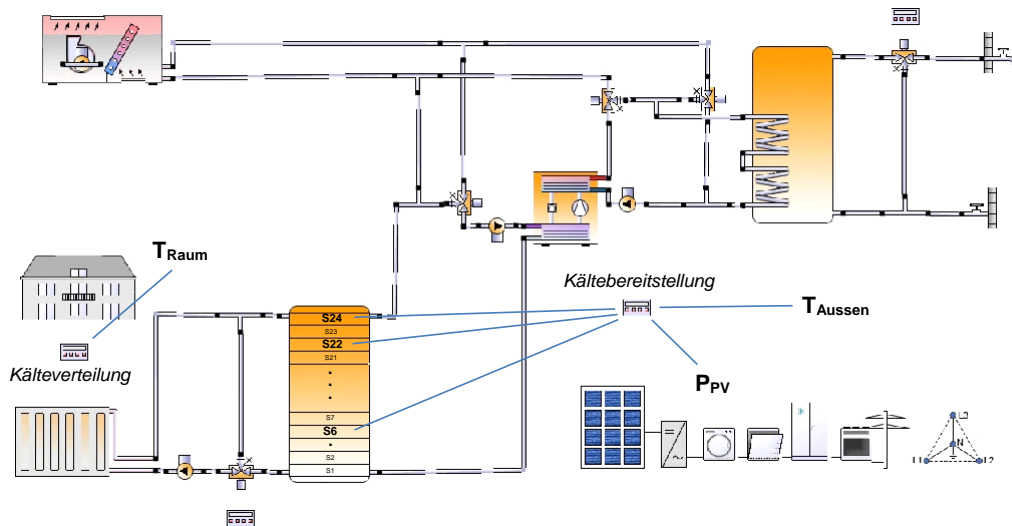


Abbildung 2 Polysun GUI zur Simulationen der Kühltisaison. Parameter sind Raumtemperatur T_{Raum} , Speichertemperatur T_s (Speicherschichten T_{S6} , T_{S22} und T_{S24}), Aussentemperatur T_{Aussen} und PV-Leistung P_{PV} sowie die Leistung der Kühlmaschine und Volumen des Kältespeichers V .

Validierung der Simulationsergebnisse

Ein Vergleich von Resultaten aus der Simulation und den Messungen zeigte generell eine gute Übereinstimmung. Grössere Abweichungen treten besonders in Anlaufphasen des Systems auf, Abb. 3 und Abb. 4. Diese sind auf eine noch zu verbessernde, parametrisierte frequenzgesteuerte Kompressor-Kühlmaschine zurückzuführen. Trotzdem ermöglicht das Simulationswerkzeug ein Hochskalieren auf Anlagen grösserer Kühlleistung. Zudem wurde durch die Anpassung der elektrischen Leistung der Wärmepumpe eine Optimierung für einen möglichst hohen Eigenstromverbrauch erreicht.

Notizen

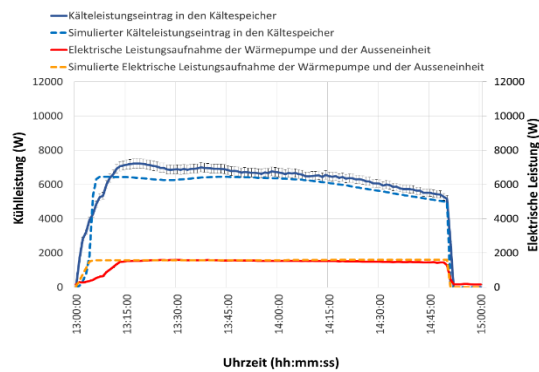


Abbildung 3 Vergleich von simulierter und gemessener Elektro- sowie Kühlleistung im aktiven Kühlmodus.

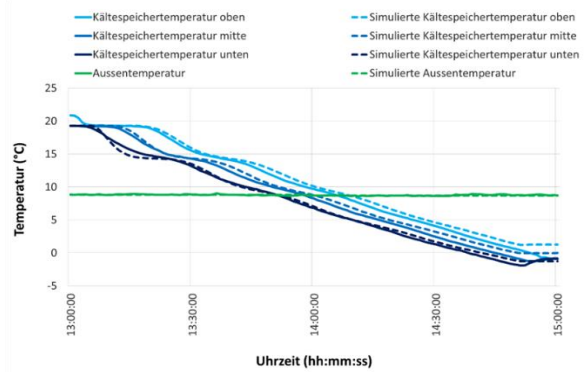


Abbildung 4 Vergleich von simulierten und gemessenen Temperaturen im Kältespeicher während einem Ladevorgang im aktiven Kühlmodus.

Steuerung der Simulation in der Kühlsaison

Die Simulationen sind mit den Parametern „Temperatur“ (Speicher T_S , T_{Raum} und T_{Aussen}), Leistung der Kühlmaschine (KM) und des PV-Feldes (einschalten der KM bei einer bestimmten PV elektrischen Leistung P_{PV} „Einschaltschwelle“) sowie Volumen V des Kältespeichers durchgeführt worden. Im Vergleich dient der Modus „Komfort“ als Referenz für die drei Solar-Modi. Abb. 2 zeigt das Polysun GUI mit welchem die Simulationen durchgeführt wurden. Die Basis dazu ist das in Abb. 1 dargestellte und im Labor aufgebaute Kühlsystem.

Das in den Simulationen eingesetzte Bürogebäude hat eine Raumgrösse von 100m^2 . Es handelt sich dabei um ein Niedrigenergiegebäude mit einem U-Wert von 0.35K/W/m^2 . Als Gebäudestandort wurde Rapperswil (Schweiz) gewählt, dies entspricht einem „hot temperate“ Klima. Bezüglich dem Komfort werden in allen Simulationen Raumtemperaturen unterhalb von 26°C als behaglich eingestuft. Da die Raumkühlung über den Kältespeicher geschieht, hat die Anlage zwei Teil-Steuerungen. Die eine dient der Kältebereitstellung – Kältemaschine oder freier Kühlmodus – und die andere der Kälteverteilung über die Kühldecken. Diese Teilsysteme können unabhängig voneinander betrieben werden. Die Raumtemperatur des Gebäudes dient als Führungsgrösse beim Betrieb der Kälteverteilung. Bei Raumtemperaturen tiefer als 25°C wird die Zirkulationspumpe der Kälteverteilung eingeschaltet. Zudem sind in den Simulationen zwei verschiedenen Betriebsmodi der Kältebereitstellung möglich. Dies sind der Modus „Komfort“ und der Modus „Solar“. Dabei gewährleistet der Modus Komfort dass immer genügend Kälteenergie im Kältespeicher vorhanden ist. Falls die Temperatur der Schicht 6 im Kältespeicher grösser als 10°C ist ($T_{\text{KS},S6} > 10^\circ\text{C}$), dann wird die Kältemaschine gestartet und der Kältespeicher wird geladen bis die Schicht 24 eine Temperatur tiefer als 10°C hat ($T_{\text{KS},S24} < 10^\circ\text{C}$). Der Modus „Solar“ ist dem Modus „Komfort“ überlagert. Dies bedeutet, dass dafür gesorgt ist, dass jederzeit eine bestimmte Menge an Kälteenergie im Speicher vorhanden ist.

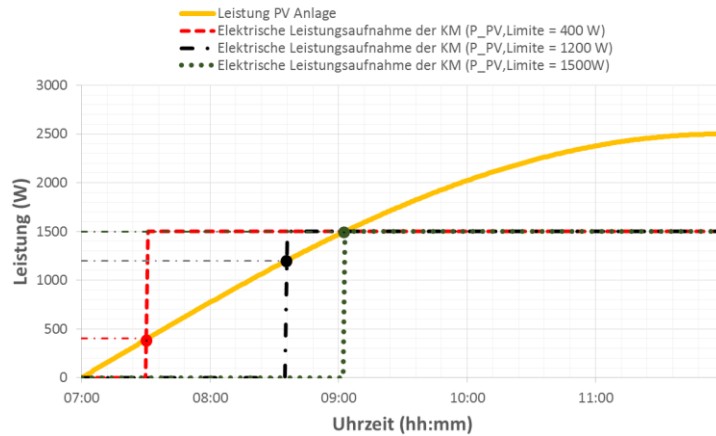


Abbildung 5 Elektrische Leistungsaufnahme 1.5 kW – Anteil Solar und Anteil Netz - der Kältemaschine bei den drei Einschaltsschwellen P_{PV} 400 W, 1200 W und 1500 W. Die Kältemaschine mit einer elektrischen Leistungsaufnahme 1.5 kW wird eingeschaltet, wenn die Leistung der PV Anlage die Einschaltsschwelle $P_{PV, Limite}$ überschritten hat ($P_{PV} > P_{PV, Limite}$).

Tabelle 2: Vorgegebene Steuerung der Anlage (Modus) in der Simulation.

Modus	Komfort (Referenz)	Solar Modus 1	Solar Modus 2	Solar Modus 3
Steuerung grafische Darstellung; Temperatur, T_{raum} , Soll=25°C in allen Modi				
Steuerung Temperatur	ON $T_{KS, S6} > 10^\circ C$. OFF $T_{KS, S24} < 10^\circ C$	ON $T_{KS, S6} > 10^\circ C$. OFF $T_{KS, S24} < 10^\circ C$		
Steuerung PV-Leistung P_{PV}	kein Einschaltkriterium für PV-Leistung	Einschaltkriterium PV-Leistung ON $P_{PV} = 1200 W$ OFF $P_{PV} < 1200 W$	Einschaltkriterium PV-Leistung ON $P_{PV} = 400 W$ OFF $P_{PV} < 400 W$	Einschaltkriterium PV-Leistung ON $P_{PV} = 400 W$ OFF $P_{PV} < 400 W$
Leistung der Kühlmaschine	Kühlleistung 4.5 kW	Kühlleistung 4.5 kW	Kühlleistung 2.5 kW	Kühlleistung 1.9 kW

Notizen

Zusätzlich wird jedoch noch über die Strahlungsmessung registriert, ob Solarenergie vorhanden ist. Wenn dies der Fall ist, bzw. wenn eine bestimmte Leistung (Limite $P_{PV, Limite}$; siehe Abb. 5) von der PV Anlage geliefert wird ($P_{PV} > P_{PV, Limite}$) sowie der Kältespeicher noch nicht vollständig beladen ist ($T_{KS, S22} > -5^{\circ}C$), wird Kälteenergie bereitgestellt – die Kältemaschine wird in Betrieb gesetzt. Dabei kann der Speicher gegenüber dem Modus „Komfort“ quasi „überladen“ werden und zwar bis auf eine Temperatur von $T_{KS, S24} < -5^{\circ}C$. Zudem kann der Zustand Kältebereitstellung „Solar“ nur erreicht werden, wenn die Aussentemperatur höher als $20^{\circ}C$ ist ($T_{Amb} > 20^{\circ}C$). Dies verhindert, dass der Kältespeicher zu unnötigen Zeiten „überladen“ wird und sich damit wegen Wärmeverlusten der Wirkungsgrad der Kälteanlage verschlechtert. Abbildung 5 zeigt bei einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1.5 kW der Kühlmaschine den Anteil „Solar“ und den Anteil „Netz“. Tabelle 2 gibt eine Übersicht zu den Steuerungs-Modi.

Resultate aus den Jahressimulationen - Kühlsaison

Darstellung der Ergebnisse Die Simulationsresultate werden jeweils in zwei Balkendiagrammen dargestellt - abhängig von den veränderten Parametern, welche unter den einzelnen Balken aufgeführt sind. Davon ist ein Diagramm zur Kühlenergie und ein Diagramm zur elektrischen Energie. Der erste Balken im Diagramm zeigt die Resultate der Referenz; dies entspricht der Anlage im Steuerungsmodus Komfort. Im Diagramm mit der Kühlenergie (Abb. 6, 10, 12) wird unterschieden ob die Kühlenergie mit Netzstrom (grau) oder mit Solarstrom (gelb) erzeugt wurde. Ausserdem ist auf der zweiten vertikalen Achse – rechts im Diagramm - der System-COP aufgetragen. Innerhalb der einzelnen Balken sind die prozentualen Werte der Kühlenergie aus Solarstrom bzw. der Kühlenergie aus Netzstrom angegeben.

In den Diagrammen Abb. 7, 11, 13 wird die jährlich verbrauchte elektrische Energie dargestellt. Die Balken sind wiederum in zwei Bereiche unterteilt, wobei der obere Bereich (gelb) dem verbrauchten Solarstrom (Eigenverbrauch) und der untere Bereich (grau) dem verbrauchten Netzstrom (Netzbezug) entspricht. Oberhalb des Balkens ist die totale verbrauchte jährliche elektrische Energie (E_{total}) angegeben. Weiter ist der Netzbezug (E_{Netz}) als Zahl innerhalb des grauen Teil-Balkens angegeben. Die zweite vertikale Achse in diesen Diagrammen zeigt die Reduktion des Netzbezuges „Netzbezug Abnahme“ (ΔE_{Netz}). Diese Reduktion ist im Vergleich mit der Referenzanlage (Anlage im Komfortmodus). Diese Grösse „Netzbezug Abnahme“ hängt vom COP der Maschine sowie von den Anlagenverlusten ab (Speicherverluste, etc.). In den Gleichungen 1 bis 4 sind die formalen Zusammenhänge der Simulationsresultate beschrieben wie sie in den Diagrammen dargestellt wurden:

$$(1) \quad \Delta E_{Netz} = E_{Netz, Referenz} - E_{Netz, System}$$

$$(2) \quad COP_{kühlen} = \frac{Q_{Kälte, total}}{E_{total}}$$

$$(3) \quad Q_{Kälte, Solar} = COP_{kühlen} \cdot E_{Solar}$$

Notizen

$$(4) \quad Q_{\text{Kälte,Netz}} = COP_{\text{kühlen}} \cdot E_{\text{Netz}}$$

Leistung aus dem PV-Feld „Einschaltschwelle“ Die Abb. 6 und 7 zeigen die Resultate zur Kühlenergie und zum COP für eine 2.5 kW Kühlmaschine mit einem mittleren elektrischen Leistungsbezug von 0.7 kW (plus Umwälzpumpen) in Abhängigkeit der Einschaltsschwelle im Bereich von 0 W bis 1200 W. Der Anteil an Solarenergie ist in allen „Solar-Modi“ höher als bei der Referenz und erreicht bei der Einschaltsschwelle um 200 W ein Maximum. Hingegen ist der COP in allen Fällen tiefer als bei der Referenz. Dies, weil in den „Solar-Modi“ die Temperaturen im Kältespeicher tiefer sind als im Referenz-Fall und damit zum einen die thermischen Systemverluste grösser werden und zum anderen die Kältemaschine mit einem schlechteren Wirkungsgrad läuft.

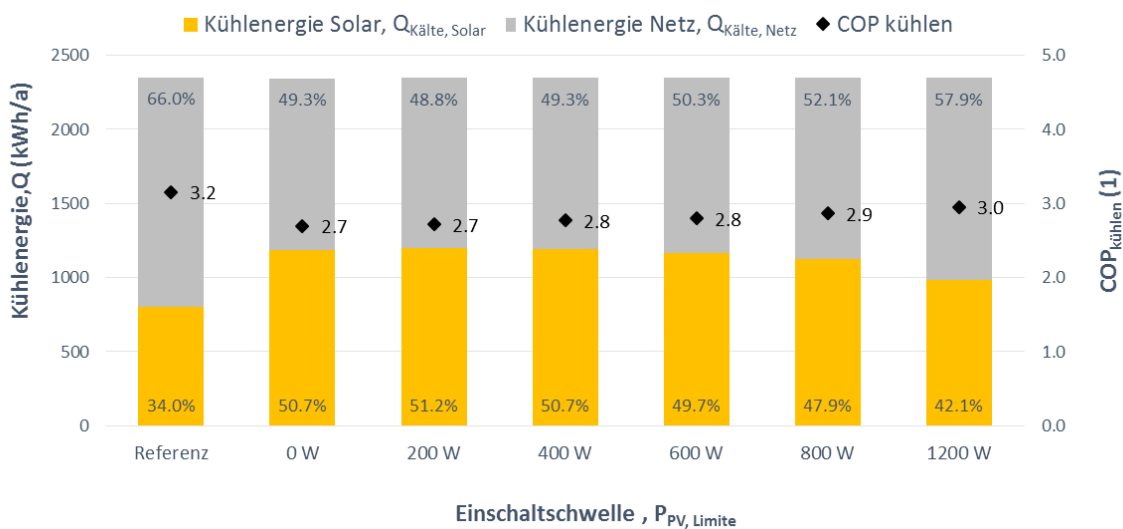


Abbildung 6 Kühlenergie – Anteil „Solar“ Q_{Kälte,Solar} und „Netz“ Q_{Kälte,Netz} – sowie COP_{kühlen} einer 2.5 kW Kältemaschine, wenn die Einschaltsschwelle für die P_{PV} zwischen 0 W und 1200 W variiert wird. Die Referenz bildet eine 2.5 kW Kältemaschine welche im Komfort Modus betrieben wird.

Wird zum Vergleich mit der Referenz der Netzbezug herangezogen – der sich reduzierende elektrische Energiebezug aus dem Netz, dann liegt das Optimum bei einer Einschaltsschwelle von 400 W. Die Netzbezug Abnahme beträgt in diesem Fall 73 kWh. Interessant ist dabei auch, dass für alle „Solar-Modi“ der Bedarf an elektrischer Energie abnimmt; zwar nur gering, da der COP nur leicht ansteigt. D.h. der Einfluss der Einschaltsschwelle ist eher gering und bedarf einer feineren Analyse.

Notizen

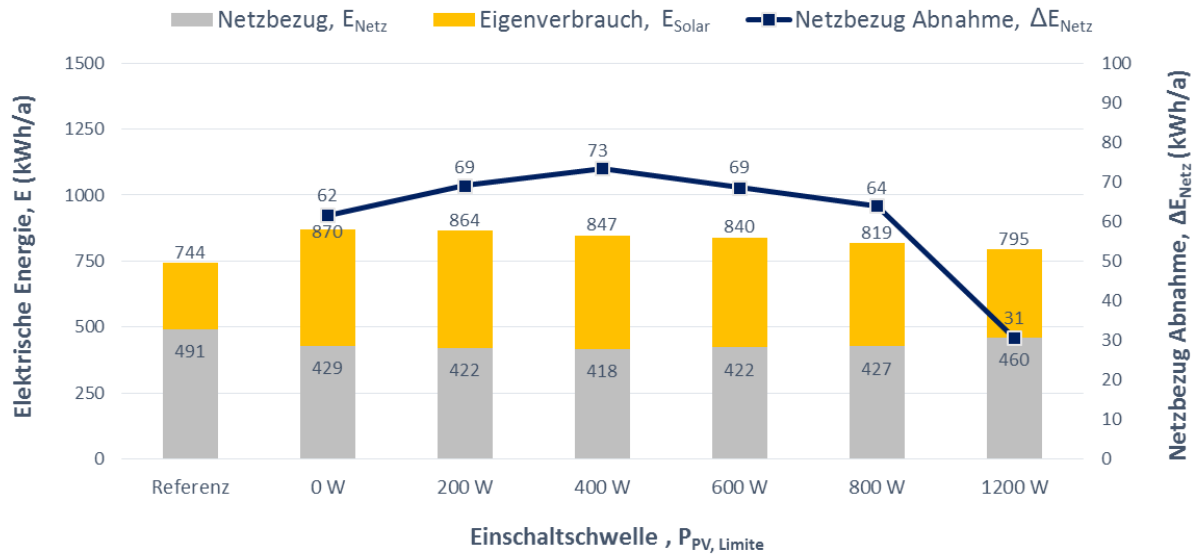


Abbildung 7 Elektrische Energie – Anteil „Netz“ und Anteil „Solar“ bzw. „Eigenverbrauch“ – sowie Netzbezug Abnahme einer 2.5 kW Kältemaschine wenn die Einschaltsschwelle für die P_{PV} zwischen 0 W und 1200 W variiert wird. Die Referenz bildet eine 2.5 kW Kältemaschine welche im Komfort Modus betrieben wird. Bei der Einschaltsschwelle 400 W ist ein Optimum sichtbar.

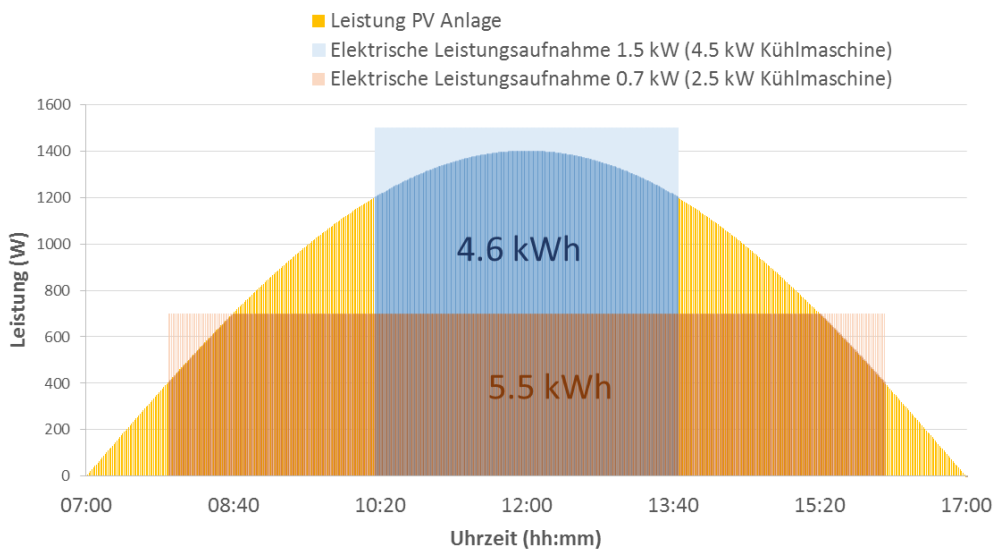


Abbildung 8 Leistung der PV-Anlage und elektrische Leistungsaufnahme der Kühlmaschine sowie leistungsabhängiger elektrischer Energiebedarf. Sonniger Tag mit ca. 55% (1400 W) der maximalen Leistung aus den PV Modulen. Zwei Wertepaare mit Leistungsaufnahmen der Kühlmaschine in kW und PV Einschaltsschwellen in W sind dargestellt; (1.5 kW; 1200 W) & (0.7 kW; 400 W). Die elektrische Leistungsaufnahme der 4.5 kW Kühlmaschine ist 1.5 kW jene der 2.5 kW Kühlmaschine 0.7 kW. In beiden Fällen ist ein Netzbezug nötig (hell-blaue und hell-orange Flächen). Die 2.5 kW Kühlmaschine mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 0.7 kW hat mit 5.5 kWh einen höheren Eigenverbrauch als die 4.5 kW mit 4.6 kWh.

Notizen

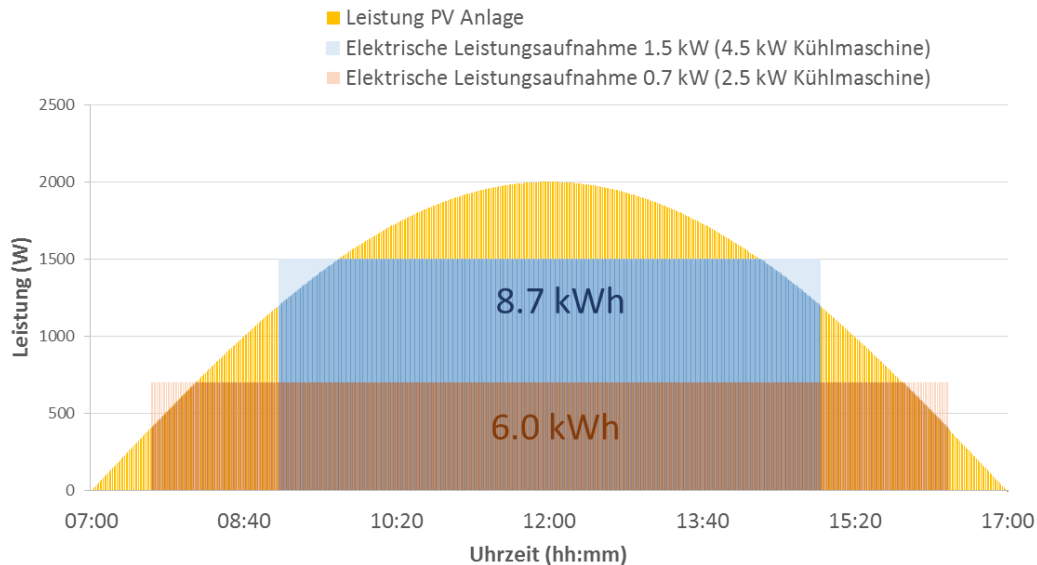


Abbildung 9 Leistung der PV-Anlage und elektrische Leistungsaufnahme der Kühlmaschine sowie leistungsabhängiger elektrischer Energiebedarf. Sonniger Tag mit ca. 80% (2000 W) der maximalen Leistung aus den PV Modulen. Zwei Wertepaare mit Leistungsaufnahmen der Kühlmaschine in kW und PV Einschaltsschwellen in W sind dargestellt; (1.5 kW; 1200 W) & (0.7 kW; 400 W). Die elektrische Leistungsaufnahme der 4.5 kW Kühlmaschine ist 1.5 kW jene der 2.5 kW Kühlmaschine 0.7 kW. In beiden Fällen ist ein Netzbezug nötig (hellblaue und hell-oranger Flächen). Die 4.5 kW Kühlmaschine mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1.5 kW hat mit 8.7 kWh einen höheren Eigenverbrauch als die 2.5 kW mit 6.0 kWh.

Leistungsaufnahme der Kühlmaschine In den Diagrammen Abb. 8 und 9 ist aufgezeigt wie der Zusammenhang von Leistungsaufnahme der Kühlmaschine und deren Laufzeit sowie PV elektrische Leistung des PV-Feldes im Hinblick auf eine Optimierung des Eigenverbrauchs anzugehen ist. Mit der Anpassung der Kältemaschinenleistung kann der Solare Kühlenergieertrag optimiert werden. Ist die PV-Leistung wesentlich tiefer als das Maximum, dann kann mit einer kleineren Kühlmaschine ein höherer Eigenverbrauch erzielt werden (Abb. 8) als bei hoher PV-Leistung (Abb. 9). Welche Kältemaschinenleistung optimal ist hängt vom Angebot an PV-Leistung und damit letztlich von der Solarstrahlung ab. D.h. aus den Resultaten wird deutlich, dass mit einer genauen Vorhersage der Solarstrahlung und einer angepassten Anlagensteuerung – z.B. Frequenz gesteuerte Kältemaschine - der Eigenverbrauch optimiert werden kann. Selbstverständlich ist die Behaglichkeit der zu kühlenden Räume zu berücksichtigen.

Leistungsaufnahme der Kühlmaschine & Einschaltsschwelle Werden nun die Parameter Leistung der Kühlmaschine und Einschaltsschwelle kombiniert, dann folgen die Resultate in den Abb. 10 und 11. Dabei wird die Leistung der Kühlmaschine über die Frequenz des Antriebs verändert. Die Ergebnisse zeigen, dass die optimale Kältemaschinenleistung von der erzeugten PV-Leistung abhängig ist – PV-Feldgröße und Solarstrahlung. Während nach Abbildung 8 die 2.5 kW Kältemaschine mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 0.7 kW die bessere Wahl ist, ist nach Abbildung 9 die 4.5 kW Kältemaschine mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1.5 kW die bessere Lösung. In Tabelle 3 ist die Abhängigkeit der Heizleistung, Kühlleistung und elektrischer Leistungsaufnahme von der Frequenz aufgeführt.

Tabelle 3 Heizleistung, Kühlleistung und elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe NIBE 1155-6 in Funktion der Antriebsfrequenz. Die thermischen Verluste der Wärmepumpe werden vernachlässigt.

Frequenz	Heizleistung	Kühlleistung	elektrische Leistungsaufnahme
90 Hz	6 kW	4.5 kW	1.5 kW
50 Hz	3.2 kW	2.5 kW	0.7 kW
40 Hz	2.5 kW	1.9 kW	0.5 kW

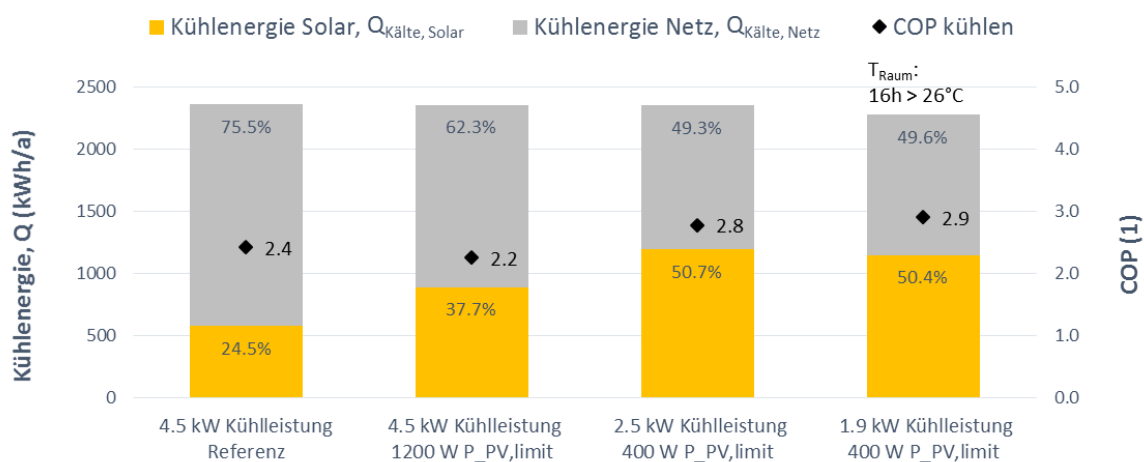


Abbildung 10 Variierte Kühlleistung der Kältemaschine mit 4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW und optimierte Einschaltsschwellen mit den Wert 1200 W für die 4.5 kW Kältemaschine bzw. 400 W für die beiden anderen Leistungen 2.5 kW und 1.9 kW der Kältemaschine. Für die Kältemaschine mit der Leistung 1.9 kW und Einschaltsschwelle 400 W kann die Komfortbedingung nicht mehr eingehalten werden. In der Simulation ist die Raumtemperatur während 16 h höher als 26°C.

Der COP steigt mit einer kleineren Kältemaschine (Abbildung 10), da die Temperaturen im Kältespeicher höher werden und damit die Kältemaschine höhere Temperaturen im Verdampfer hat sowie tiefere Verluste aus dem Speicher entstehen. Zudem wird dieser Effekt noch durch den Wirkungsgrad der Kältemaschine verstärkt, da dieser bei 50Hz und damit einer Kühlleistung von 2.5 kW, maximal ist.

Weiter zeigt Abbildung 11, dass die total verbrauchte elektrische Energie für die 2.5 kW und die 1.9 kW Kühlmaschinen im Vergleich zur Referenz durch die Zunahme des COP reduziert werden kann. Hingegen hat die 4.5 kW Kühlmaschine einen tieferen COP als die Referenz und braucht daher mit 1047 kWh/a mehr elektrische Energie.

Notizen

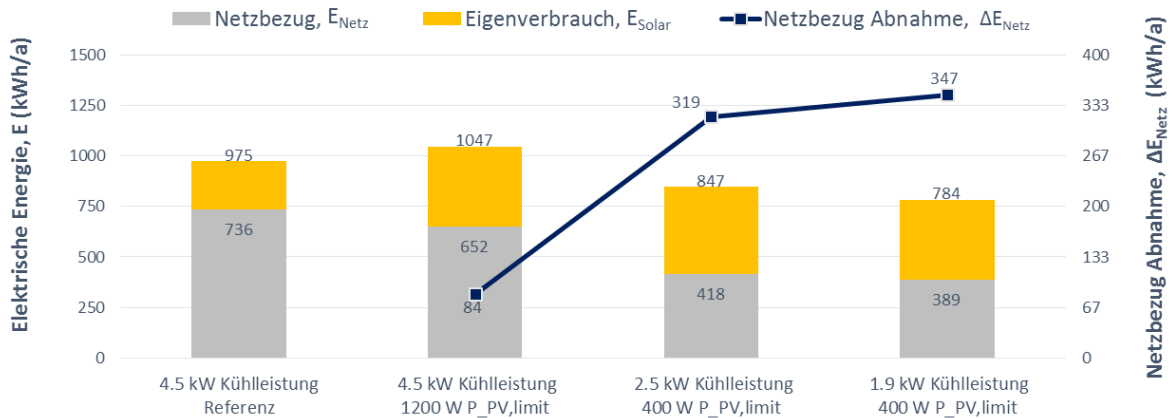


Abbildung 11 Elektrische Energie (Eigenverbrauch – solar - und Netzbezug) für die Kältemaschinen mit den Kühlleistungen 4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW und den Einschaltswellen 1200 W für die 4.5 kW Kältemaschine bzw. 400 W für die beiden anderen Leistungen, 2.5 kW und 1.9 kW. Für die Anlagen im „Solar Modus“ ist der Netzbezug durch die 4.5 kW Kühlmaschine am höchsten, nimmt jedoch gegenüber der Referenz um 84 kWh/a ab. Die beiden anderen Systeme haben einen stärker reduzierten Netzbezug, 319 kWh/a für die 2.5 kW Kühlmaschine und 347 kWh/a für die 1.9 kW Kühlmaschine. Wobei zu erwähnen ist, dass die 1.9 kW Kühlmaschine die Komfortbedingungen nicht erfüllt.

Volumen des Kältespeichers Durch die Vergrößerung des Kältespeichervolumens steigt die genutzte Solarenergie, Abbildung 12. Der Anstieg ist ab dem Volumen von 2000 l jedoch nur noch gering. Die Erhöhung des Kältespeichervolumens hat zudem einen positiven Effekt auf den Komfort, welcher ab einem Volumen von 2000 l wieder gewährleistet ist. Zudem ist der COP für grössere Speicher leicht besser, da die Speichertemperaturen für grosse Speicher leicht höher sind und daher auch der COP der Maschine höher wird.

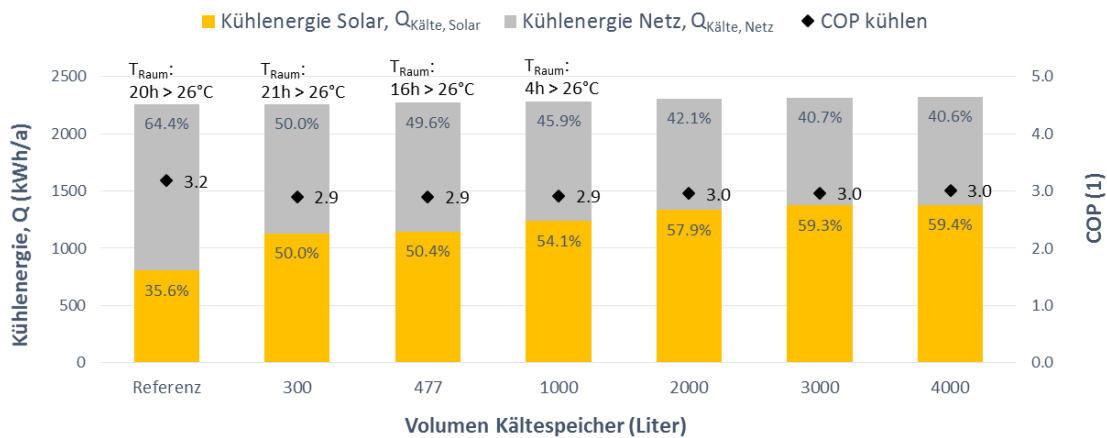


Abbildung 12 Kühlenergie, sowie der COP der 1.9 kW Kältemaschine. Das Volumen des Kältespeichers wird zwischen 300 Liter und 4000 Liter variiert. Die Raumtemperatur T_{Raum} steigt ab einem Volumen von 2000 l nicht mehr über 26°C; der Komfort ist gewährleistet.

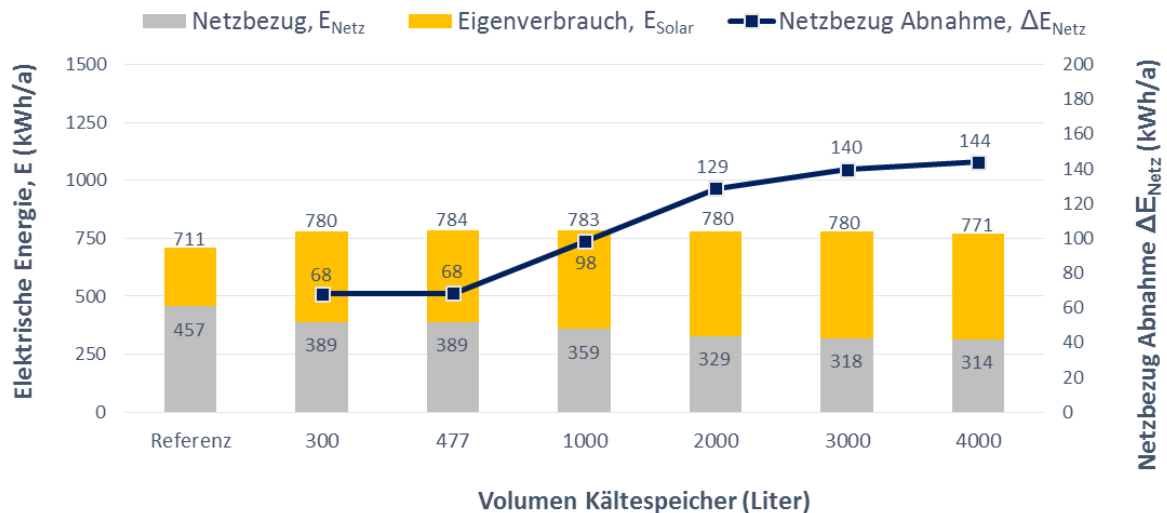


Abbildung 13 Elektrischer Energieverbrauch der 1.9 kW Kältemaschine sowie die „Netzbezug Abnahme“ bei verändertem Volumen des Kältespeichers. Je grösser der Speicher ist, umso tiefer ist der Netzbezug.

Abbildung 13 zeigt weiter, dass der gesamte elektrische Energieverbrauch (Eigenverbrauch + Netzbezug) bis zu einem Kältespeichervolumen von 3000 l auf etwa gleichem Niveau bleibt (Bereich 780 kWh/a – 784 kWh/a) und bei 4000 l mit 771 kWh/a leicht tiefer ist. Der Netzbezug sinkt mit steigendem Speichervolumen.

Schlussfolgerung und Ausblick

Erneuerbare Energien können fossile Energieträger ersetzen. PV elektrische Solarenergie, als ein Beispiel davon, kann in Kombination mit einer Wärmepumpe bzw. einer Kältemaschine zur Raumklimatisierung genutzt werden. Für Zeiten mit Kühlbedarf, aber ohne Solarstrahlung, ist entweder Energie aus dem Netz oder aus Speichern zu beziehen. Dies hat erhebliche Konsequenzen auf die Dimension der Anlage. Ist hoher Anteil „Solar“ erwünscht, dann stellt sich die Frage nach der Art der Speicherung – ob elektrisch in einer Batterie oder thermisch in einem Tank mit entsprechendem Speichermaterial. Im vorgestellten Projekt kann ein Speicher den Energiebezug aus dem Netz reduzieren und durch leicht erhöhte Speichertemperaturen den COP des Systems erhöhen.

Eine gute Auslegung kann durch die Simulation verschiedenster Varianten erreicht werden. In dieser Arbeit wurde dazu ein Simulationstemplate entwickelt, mit welchem Systeme ausgelegt werden können die Leistungen bis in den Bereich von 50 kW haben.

Danksagung

Wir danken dem Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) und der HSR Hochschule für Technik Rapperswil für die finanzielle Unterstützung sowie den Industriepartnern für die Unterstützung durch Komponenten für Systeme zur Raumklimatisierung.

Referenzen

- [1] Burkhard Sanner and Co. Common Vision for the Renewable Heating & Cooling sector in Europe, Brussels, January, 2011, 48p.
- [2] Henning Hans-Martin; Motta Mario; Mugnier Daniel. Solar Cooling Handbook. Ambra; 3rd Revised & enlarged edition, September 2013. 368 p. ISBN: 3990434381.