



Schlussbericht

Comparison of Heating and Cooling Concepts with PV Solar Energy - CoCoSol



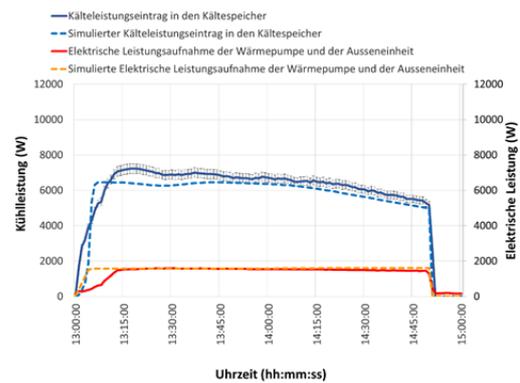
- Kälteverteilung mit Kühldecken



- PV-Module auf dem Vordach



- Kältemaschine mit Speicher



- Gemessene und simulierte Ergebnisse



Datum: 31.03.2017

Ort: Rapperswil

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Solarwärme
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Zehnder Group Schweiz AG, Moortalstrasse 3, CH-5722 Gränichen
MEYER BURGER AG Energy Systems, Schorenstrasse 39, CH-3645 Gwatt (Thun)
ait Schweiz AG, Industriepark, CH-6246 Altishofen
Abderhalden HARAPOL AG, Bildaustrasse 19 – 21, CH-8640 Rapperswil SG
vela solaris AG, Stadthausstrasse 125, 8400 Winterthur

Auftragnehmer/in:

Institut für Solartechnik SPF
HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

Autor/in:

Lukas Omlin, Institut für Solartechnik SPF, lukas.omlin@spf.ch
Paul Gantenbein, Institut für Solartechnik SPF, paul.gantenbein@spf.ch

BFE-Bereichsleitung: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Jean-Christophe Hadorn, jchadorn@baseconsultants.com &
Elimar Frank, elimar.frank@frank-energy.com.
BFE-Vertragsnummer: SI/500315-02 / REF-1081-00210

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Solares Kühlen hat gegenüber Heizen den Vorteil, dass für die meisten Anwendungen der Zeitpunkt des höchsten Bedarfs gut übereinstimmt mit der Verfügbarkeit von Solarenergie. Sowohl für solarthermisch angetriebene Kühlmaschinen auf Basis von Sorptionsprozessen, als auch für PV angetriebene Kompressionskältemaschinen sind Komponenten auf dem Markt verfügbar. Der Preiszerfall hat das Interesse an PV getriebenen Prozessen in den letzten Jahren stark erhöht und nach unserer Einschätzung wird sich diese Technologie gegenüber solar-thermische Kühlsystemen durchsetzen. In diesem Projekt wurde daher ein Kühlsystem mit 8 kW Leistung in Kombination mit einer PV-Anlage mit 2.56 kWp und thermischen Speichern aufgebaut und zur Kühlung von Laborräumen über Kühldecken eingesetzt. Vergleiche mit Simulationen, welche in Polysun durchgeführt wurden, zeigten im stationären Betrieb eine gute Übereinstimmung. Grössere Abweichungen zwischen Simulation und Messung konnten in den Anfahrphasen der Kältemaschine festgestellt werden. Da diese Phasen bei Verwendung thermischer Speicher relativ kurz sind, dürfte der Einfluss auf die Ergebnisse längerer Zeitperioden gering sein. Mit dem validierten Simulationsmodell wurde die Kälteversorgung eines Standard-Bürogebäudes (Niedrigenergiebau) simuliert. Dabei wurde ein Teil der erforderlichen elektrischen Energie für die Wärmepumpe durch die PV-Anlage direkt, respektive zeitgleich, zur Verfügung gestellt. Zur Reduktion des Bezuges von elektrischer Energie aus dem Stromnetz wurde das Einschalten der Wärmepumpe zur Bereitstellung von Kälte ab einer gewissen PV-Leistung forciert, bis eine bestimmte Temperatur im Kältespeicher unterschritten wurde. Wird der Kühlbedarf gedeckt, dann stellt sich bei den untersuchten Systemen ein hoher Eigenverbrauch bei einem Verhältnis von Kälteleistung zu PV Peak-Leistung von 1:1, einer Speichergrösse von 2 m³ und einer PV-Einschaltsschwelle im Bereich von 400 bis 600 W ein.

Résumé

Le refroidissement solaire possède l'avantage par comparaison au chauffage, que pour la plupart des applications, la période de forte demande concorde bien avec la disponibilité de l'énergie solaire. Pour les unités de réfrigération fonctionnant au solaire thermique basées sur des processus de sorption, tout comme pour les unités de réfrigération par compression alimentées avec du PV, il existe aujourd'hui des composants sur le marché. La chute des prix a fortement augmenté l'intérêt pour les processus alimentés par du PV ces dernières années, et selon nos estimations, cette technologie prévaudra sur les systèmes de refroidissement solaire thermique. Dans ce projet, un système de refroidissement avec une puissance de 8 kW combiné avec une installation PV de 2.56 kWc avec réservoirs thermiques a été construit et implémenté pour la climatisation de pièces de laboratoires, à l'aide de plafonds rafraîchissants. Des comparaisons, effectuées avec des simulations Polysun, montrent une bonne concordance en régime stationnaire. Des écarts plus élevés ont été observés entre simulations et mesures dans la phase de démarrage de l'unité de réfrigération. Étant donné que ces phases sont relativement courtes lors d'utilisation de réservoirs thermiques, l'impact sur les résultats à long terme est probablement faible. Le modèle de simulation validé, le refroidissement d'un immeuble de bureaux standard (basse consommation) a été simulé. À cet effet, une partie de l'énergie électrique nécessaire pour la pompe à chaleur a été mise directement, respectivement simultanément, à disposition. Pour recourir le moins possible à l'énergie électrique du réseau, la pompe à chaleur a été enclenchée de force, pour fournir une capacité de refroidissement, à partir d'une certaine puissance PV ; jusqu'à ce que la température du réservoir passe en dessous d'un certain seuil. Si la demande de refroidissement est satisfaite, l'autoconsommation est maximale pour un rapport 1:1 entre la puissance de refroidissement et la puissance crête PV, un réservoir de 2 m³ et un seuil de démarrage entre 400 et 600 W.



Summary

Solar cooling of buildings is beneficial compared to solar heating because the simultaneous need of cooling energy and available solar radiation. Solar thermal driven absorption and adsorption cooling machines are available on the market as like electric and thus photoelectric driven compressor-cooling machines. Based on the massive price decline of PV components in the last years a strong interest are dominating for PV driven cooling processes. Because of this reason a combined 8 kW cooling system with a 2.56 kW_p PV field was set up in the project. Cold ceilings were installed for cold distribution and for efficiency increase the system contains thermal storage tanks for the cooling fluid and for hot water. In stationary operation the validation of the Polysun® simulation results with the measurement data showed good coincidence. But in the system operation start-up phases larger deviation of the simulation and the measurement results were observed. Because of the short time periods of this start-up phases a minor deviation of the simulation results of the total energy consumption will occur. The cold supply of an office building was simulated with this validated simulation template, while a part of the consumed electric energy was simultaneously supplied by a PV field. To reduce the electric energy consumption from the grid an ON/OFF solar radiation threshold for the cooling machine was defined. The ON/OFF operation of the cooling machine is additionally controlled by the fall below a temperature set-point in the cold storage tank. While covering the cooling demand, the high own PV electric energy consumption of the investigated systems is at a 1:1 relation of cooling power to PV peak power, a thermal storage tank size of 2 m³ and a ON/OFF solar radiation power threshold in the range of 400 to 600 W.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1. Projektziele.....	7
2. Standort und Betriebsarten des System	7
2.1 Aufbau des Kühlsystems	8
2.2 Steuerung der Anlage und Messdatenerfassung	10
2.3 Betriebsmodi und Kontrollstrategie der Anlage	11
3. Experimentelle Ergebnisse	14
4. Simulationstemplate und Validierung	17
4.1 Validierung des Simulationstemplates / des Simulationsmodels.....	18
4.2 PV Anlage: Solarstrahlung, PV-Leistung und Modultemperatur.....	19
4.3 Kühlanlage: Leistungen und Temperaturen im Free Cooling	20
4.4 Kühlanlage: Leistungen und Temperaturen bei aktivem Kühlen ohne WRG	21
4.5 Kühlanlage: Leistungen und Temperaturen bei aktivem Kühlen mit WRG zur Aufbereitung von Warmwasser	23
4.6 Kälteverteilung: Kühldecken	25
5 Jahressimulationen und Plausibilität der Resultate	27
5.1 Simulationstemplate.....	27
5.2 Gebäudetyp: Bürobau.....	28
5.3 Anlagensteuerung.....	29
5.4 Plausibilität der Simulation: Unsicherheit von gemessenen und simulierten Ergebnissen ...	30
5.5 Parametervariation.....	32
5.6 Simulationsresultate.....	32
6 Ökonomische Aspekte	42
7 Nationale und internationale Zusammenarbeit & Präsentationen	43
8 Bewertung und Ausblick	44
9 Referenzen.....	44
11 Anhang.....	46
11.1 Kühldecken: Temperaturmessung - Infrarot Messungen	46
11.2 Wärmeträger-Flüssigkeit: Mischung Ethanol-Wasser.....	47



Abkürzungsverzeichnis

COP	Wirkungsgrad (coefficient of performance) der Kältemaschine
E	Energie (elektrisch), kWh
G	Solarstrahlung, W/m^2
Q	Energie (thermisch), kWh
T	Temperatur, °C, K
u	Unsicherheit (Messung), %
η	Wirkungsgrad PV Modul (in el. Energie gewandelte Solarstrahlung)
WRG	Wärmerückgewinnung
KM	Kältemaschine



1. Projektziele

Die Projektziele lassen sich in sechs Hauptpunkte zusammenfassen:

1. Aufbau eines PV elektrisch getriebenen Kühlsystems mit einer Kühlleistung im Bereich von $P_{cool} = 4-8$ kW. Das System soll zudem an das öffentliche Netz gekoppelt sein.
2. Betrieb des Systems und Messdatenerfassung zur Auswertung sowie Beurteilung der Resultate.
3. Simulation des Systems mit Polysun® in den unterschiedlichen Betriebsmodi, bzw. mit unterschiedlichen Systemvarianten.
4. Nutzen der thermischen Speicherung im Hinblick auf solare Deckung und Eigenverbrauch.
5. Vorschlag zur Skalierung der Anlage auf Systemgrößen mit Kühlleistungen im Bereich von $P_{cool} = 50$ bis 100 kW.
6. Präsentation der Resultate an Workshops und Konferenzen sowie Mitarbeit im IEA SHC Task 53 (New Generation Solar Cooling & Heating Systems - PV or solar thermally driven systems).

2. Standort und Betriebsarten des System

Im Labor (Eichwiesstrasse 6, Rapperswil-Jona) der HSR wurde eine PV getriebenes System zur Raumkühlung aufgebaut und in Betrieb genommen. Auf Grund der installierten Sensoren und der Messdatenerfassung konnte die Funktion des Systems überprüft und verifiziert werden. Das Kühlsystem kann in diversen Zuständen – Modi – betrieben werden, wie z.B. aktives kühlen mit Betrieb der Kältemaschine, free-cooling ohne Betrieb der Kältemaschine etc. Die dabei an charakteristischen Tagen gemessenen thermischen und elektrischen Leistungen sowie die Temperaturverläufe wurden zur Validierung eines Polysun Simulationstemplate eingesetzt. Auf der Basis dieses validierten Simulationstemplates wurden zusätzliche Templates erstellt. Mit diesem können Jahres- bzw. Kühlsaisonsimulationen und Parameterstudien für ein Bürogebäude durchgeführt werden.



2.1 Aufbau des Kühlsystems

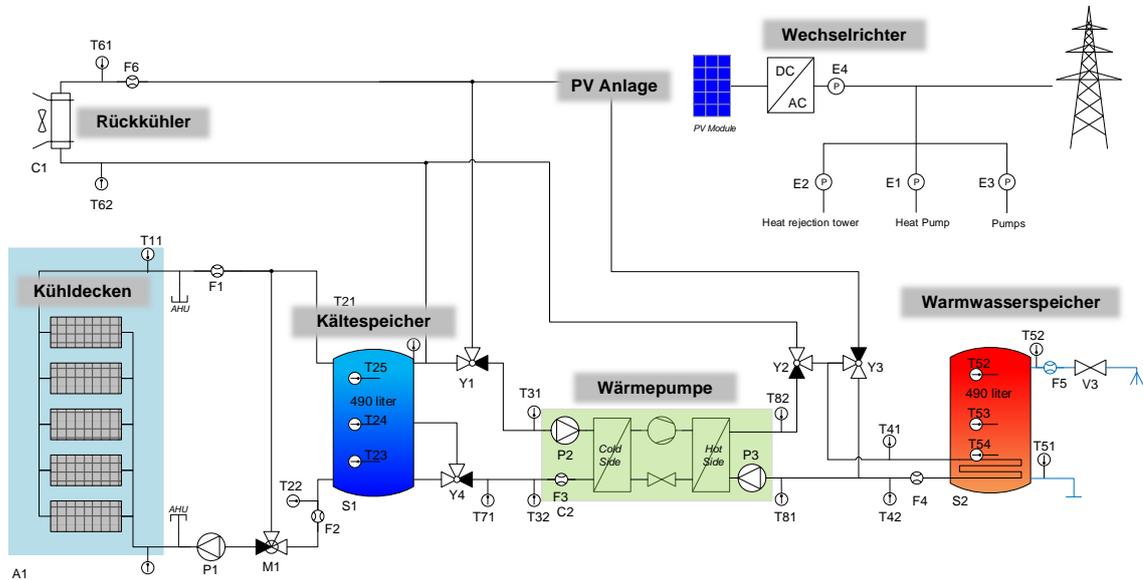


Abbildung 1 System: Schematische Darstellung der Anlage mit PV getriebener und Netz gekoppelter Kältemaschine (Wärmepumpe) und Kühldecken zur Kälteverteilung sowie einem ausserhalb des Gebäudes installierten Rückkühlers. Das Besondere an diesem System ist nun die Installation eines Kälte- und Warmwasserspeichers.

Das aufgebaute System besteht aus einer PV-Anlage mit Wechselrichter, einer Wärmepumpe mit Wärmespeicher zur Erhöhung der Effizienz und einem Kältespeicher zur Deckung des Kältebedarfs für Zeiten ohne Solarstrahlung, einem Rückkühler und im Labor montierten Kühldecken. Die PV Anlage verfügt über eine elektrische Peak-Leistung von $P_{PV} = 2.56 \text{ kW}_p$. Sie ist über einen Wechselrichter sowohl mit den elektrischen Verbrauchern des Kühlsystems verbunden, als auch mit dem öffentlichen Stromnetz (Abbildung 1). Dabei wird die photovoltaisch erzeugte elektrische Leistung, sowie an drei Stellen die benötigte elektrische Leistung der Verbraucher (Wärmepumpe, Rückkühler, übrige Pumpen), gemessen. Dies ermöglicht es, die vom Netz bezogene und die ans Netz abgegebene elektrische Leistung zu bestimmen. Das Herzstück der Anlage ist eine Sole/Wasser Wärmepumpe neuster Generation mit leistungsvariabler Verdichtertechnologie und maximaler Kälteleistung $P_{cool} = 8 \text{ kW}$. Zur Zwischenspeicherung der Kälteenergie steht ein Kältespeicher mit einem Volumen von $V_{KS} = 477 \text{ l}$ zur Verfügung. Die Kälteverteilung im Raum wird mittels Kühldecken mit einer Fläche von $A_{KD} = 52.8 \text{ m}^2$ realisiert. Deren Vorlauftemperatur wird mit einem Mischventil auf eine Temperatur über der Taupunkttemperatur geregelt. Die dem Raum entzogene Wärme kann durch die Wärmepumpe in einem Warmwasserspeicher zwischengespeichert oder über einen Rückkühler (Ausseneinheit) an die Umgebung abgegeben werden. Der Warmwasserspeicher wird über einen integrierten Wärmetauscher beladen. Zudem besitzt er eine Zapfstelle für Warmwasser, ausgeführt mit einem elektrisch gesteuerten Ventil, wodurch verschiedene Zapfprofile erzeugt werden können (siehe „Simulationstemplate und Validierung“). Im gesamten System wird ein Ethanol-Wasser-Gemisch, mit 20 vol% Ethanol, als Wärmeträger Medium eingesetzt. Gemäss Hersteller hat diese Flüssigkeit im tiefen Temperaturbereich von -5°C bis 20°C eine höhere spezifische Wärmekapazität als Wasser. Direkt neben der PV Anlage wurde ein Pyranometer zur Messung der Solarstrahlung in der PV-Modulebene installiert. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der eingesetzten Hauptkomponenten bzw. der Systemkennzahlen.



2.2 Steuerung der Anlage und Messdatenerfassung

Die Steuerung und Datenerfassung des Systems wurde mit einem cDAQ System (modulares Datenerfassung System) von National Instruments realisiert, welches über eine LabVIEW Anwendung angesteuert wird. Die Anlage wurde dazu mit kalibrierten Sensoren zur Messung von Fluidtemperatur, Oberflächentemperatur von Komponenten, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Durchflussvolumenströmen und elektrischer Leistung ausgerüstet. Die Messwerte werden aufbereitet und in einer Datenbank gespeichert. Zudem können alle elektrischen Geräte wie Wärmepumpe, Rückkühler, Pumpen und Elektroventile über eine Benutzeroberfläche angesteuert werden. Einzige Ausnahme bildet das vor den Kühldecken in die Rohrleitungen installierte Mischventil, welches zur Regelung der Vorlauftemperatur der Kälteverteilung dient. Dieses Mischventil wird zur Verhinderung von Kondensat aus der Raumfeuchte durch einen, vom übrigen System unabhängig laufenden, Taupunktwärter geregelt. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die grafische Benutzeroberfläche (LabVIEW GUI) der Anlagensteuerung und der Messdatenerfassung.

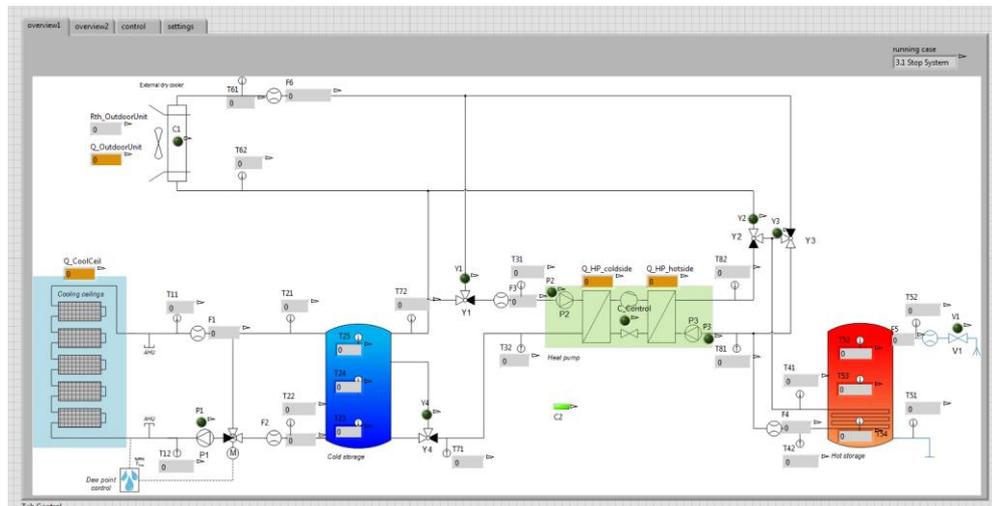


Abbildung 3 LabVIEW: Benutzeroberfläche der Anlagensteuerung und der Massdatenerfassung.

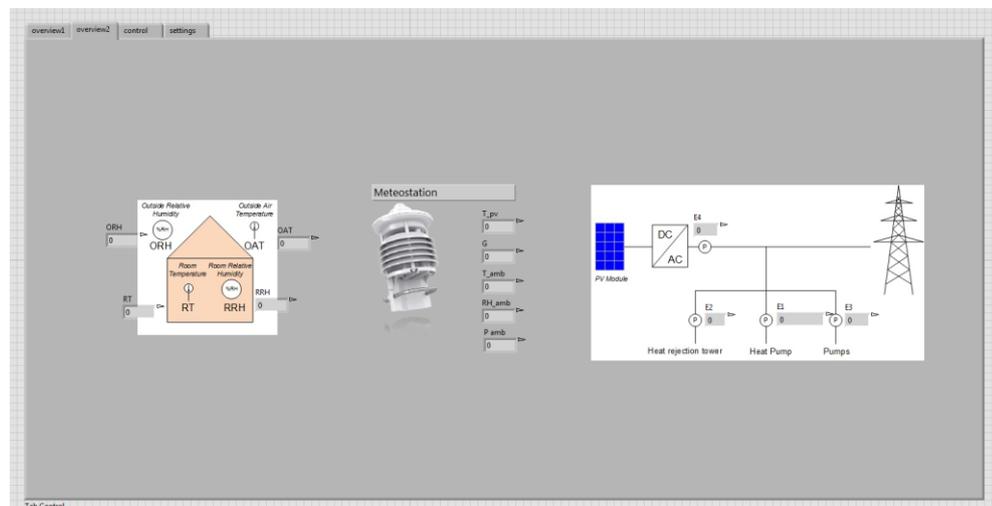


Abbildung 4 LabVIEW: Benutzeroberfläche der Messdatenerfassung: Raumklima, Wetterstation und elektrische Energie.



2.3 Betriebsmodi und Kontrollstrategie der Anlage

Abbildung 5 stellt vereinfacht die Steuerung der Anlage zur Bereitstellung von Kälte, bzw. der Beladung des Kältespeichers, dar. Weiter sind in Abbildung 5 bis 10 die implementierten Betriebsmodi an Hand des Anlagenschemas dargestellt. Das System kann manuell über die grafische Oberfläche in den verschiedenen Modi in Betrieb genommen werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, über ein definiertes Batchfile die Anlage automatisiert laufen zu lassen.

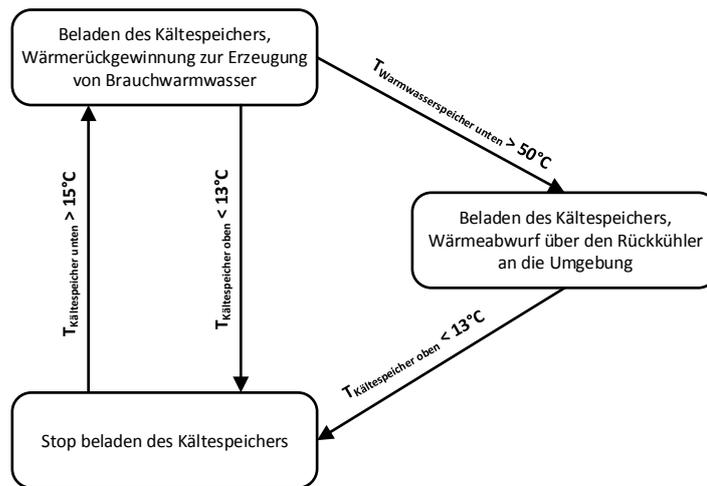


Abbildung 5 Steuerung: Zustandsmaschine zur Bereitstellung der Kälte (Beladen des Kältespeichers).

Die in Abbildung 5 dargestellte und in der Steuerung umgesetzte „Zustandsmaschine“ bewirkt, dass immer genügend „Kälteenergie“ im Kältespeicher vorhanden ist. Die Kältemaschine belädt den Speicher, wenn die Temperatur $T_{23} = T_{\text{Kältespeicher unten}} > 15^\circ\text{C}$ ist. Zur Erhöhung der Systemeffizienz wird die Abwärme aus der Kältemaschine prioritär zur Brauchwarmwassererzeugung verwendet. Erst wenn der Speicher für Brauchwarmwasser voll ist ($T_{54} = T_{\text{Warmwasserspeicher unten}} > 50^\circ\text{C}$) wird die Wärme über den Rückkühler an die Aussenluft abgegeben, siehe Abbildung 7. Die Temperaturen zur Umschaltung wurden in einem ersten Schritt empirisch ermittelt bzw. abgeschätzt. Sie wurden im weiteren Verlauf des Projekts optimiert.

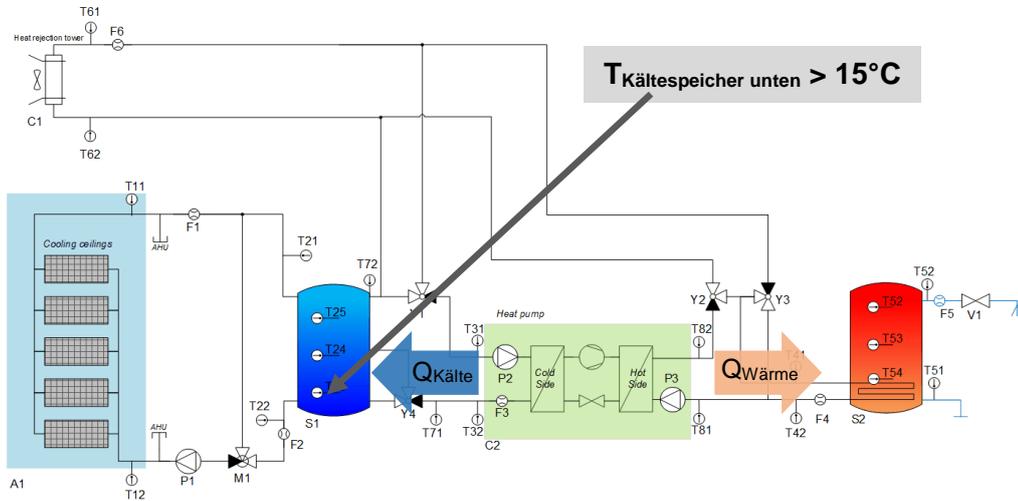


Abbildung 6 Beladen des Kältespeichers: Beladen des Speichers und Wärmerückgewinnung zur Erzeugung von Brauchwarmwasser – mit WRG.

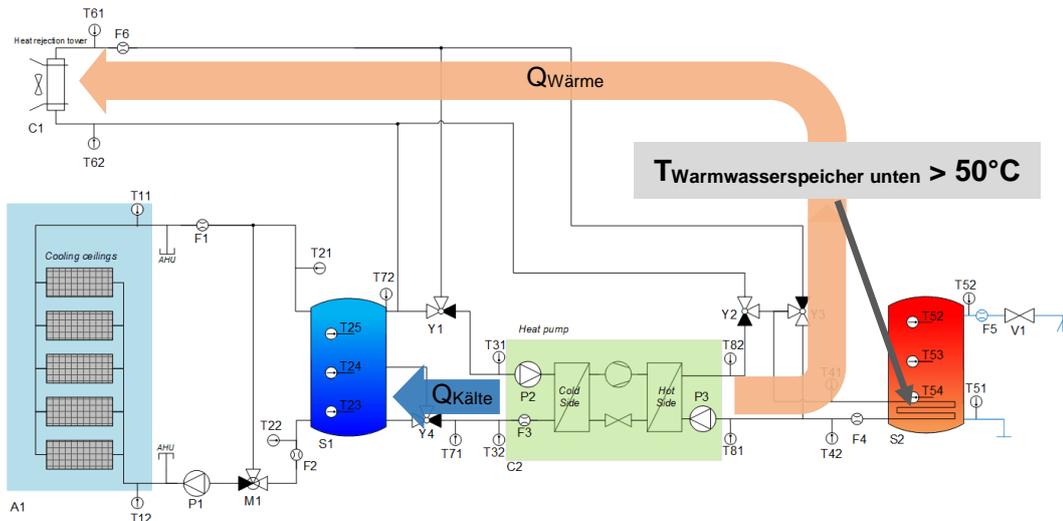


Abbildung 7 Beladen des Kältespeichers: Aktiv Kühlen mit Wärmeabwurf über den Rückkühler an die Umgebungsluft – ohne WRG. Die Rückkühlung wird über die Ausseneinheit gemacht, sobald der Warmwasserspeicher beladen ist (Bedingung: Heisswassertemperatur > 50°C).

Abbildung 9 zeigt den Anlagenmodus „Raumkühlen,“ bei Raumtemperaturen $T_{\text{Raum}} > 23^\circ\text{C}$. Dazu wird die Pumpe P1 eingeschaltet und die Kühldecken werden mit kaltem Fluid aus dem Kältespeicher durchströmt. Das Mischventil M1 wird durch einen Taupunktwärter geregelt. Die Raumkühlung kann auf Grund des gewählten Aufbaus unabhängig vom Rest der Anlage betrieben werden.

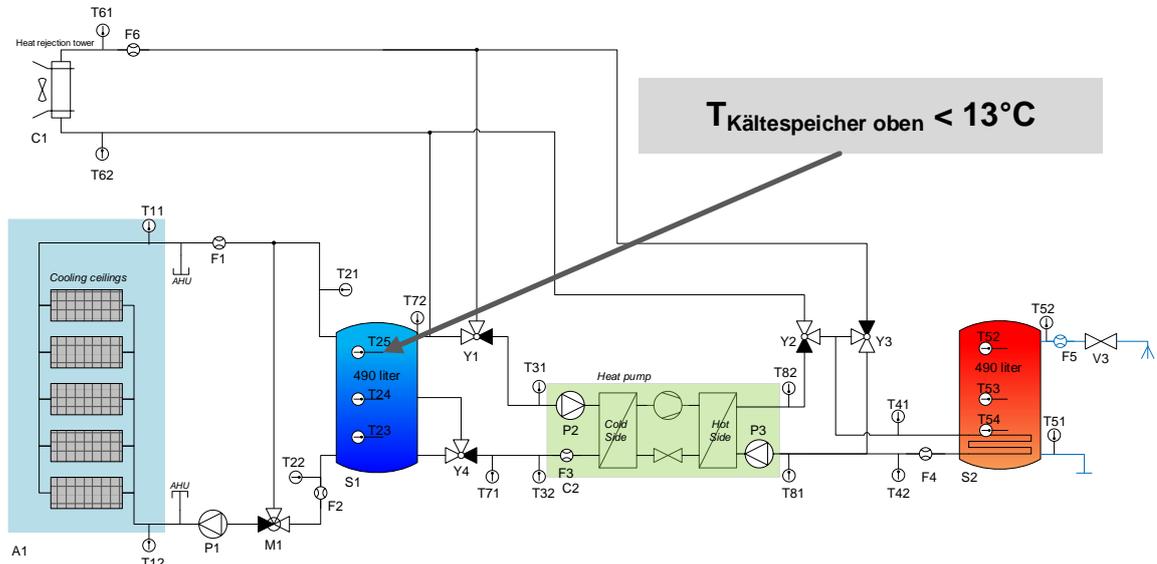


Abbildung 8 Stopp der Beladung des Kältespeichers: Bei einer Temperatur $T_{25} < 13^{\circ}\text{C}$ im oberen Bereich des Kältespeichers stoppt die Wärmepumpe ihren Betrieb. Je nach Betriebsmodus wird der Rückkühler ebenfalls gestoppt.

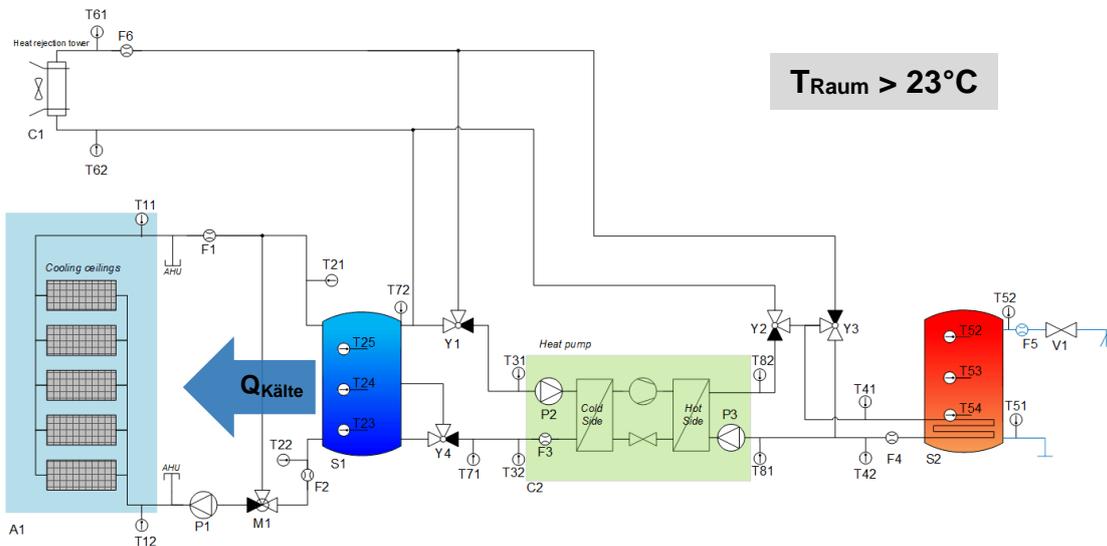


Abbildung 9 Betriebsmodus Raumkühlen: Kälteverteilung aus dem Kältespeicher.

Die Anlage kann weiter im Betriebsmodus „Free-Cooling“ betrieben werden. Diese effizientere Methode zur Raumkühlung ist bei Aussentemperaturen möglich, die unterhalb der Raumtemperatur liegen. Dies kann in einer kühlen Sommernacht oder während der Übergangszeiten im Frühling und Herbst interessant sein, weil ohne Einschalten der Wärmepumpe gekühlt werden kann und somit nur die Ausseneinheit (Lüfter) sowie eine Zirkulationspumpe als elektrische Verbraucher aktiv sind. Abbildung 10 zeigt schematisch diese Betriebsart.

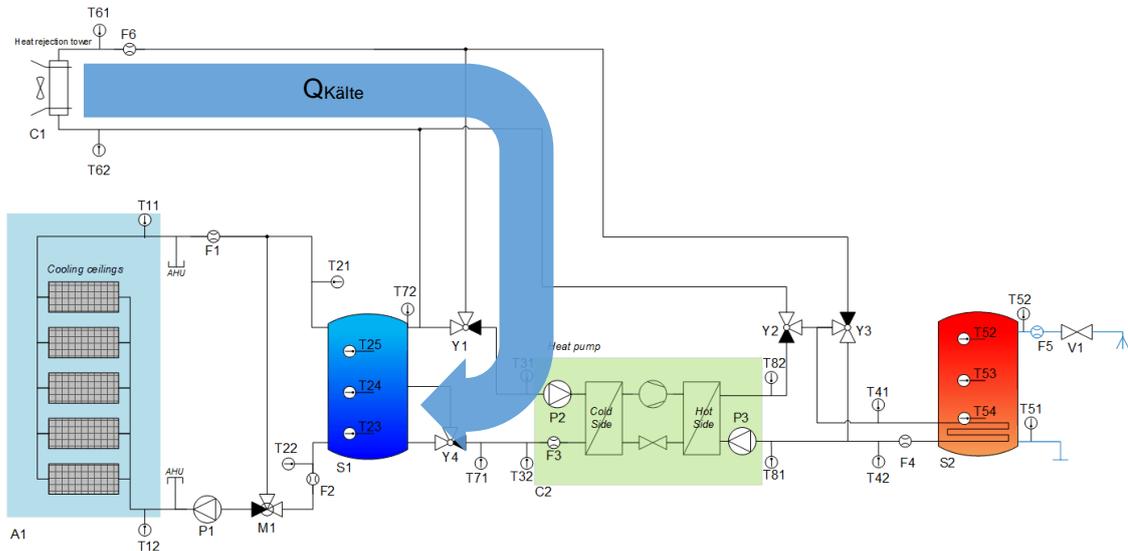


Abbildung 10 Free-cooling: Kühlung ohne Betrieb der Wärmepumpe.

3. Experimentelle Ergebnisse

Zur Überprüfung der Funktionalität der Anlage sowie zur Verifizierung der Messwerte wurden die Messdaten vorerst nur für einzelne Tage ausgewertet. In den Abbildung 11 bis 16 sind die Messdaten eines sehr sonnigen Tages (8. September 2015) aufgetragen – im Maximum erreichen die Einstrahlungswerte auf der PV-Anlage an diesem Tag nahezu $G=900 \text{ W/m}^2$.

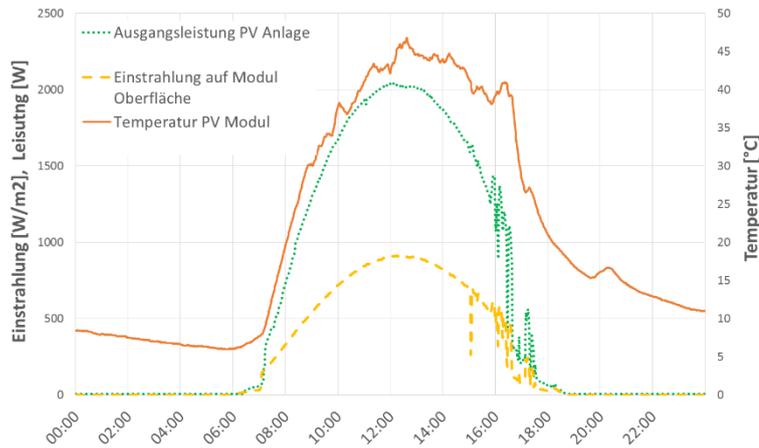


Abbildung 11 Sonniger Tag: Solare Einstrahlung auf die PV-Module, AC Ausgangsleistung P_{PV} der PV-Anlage nach dem Wechselrichter, sowie die Modultemperatur T_{PV} in Funktion der Tageszeit. Die Einstrahlung wird mit einem Pyranometer gemessen, welches am östlichen Rand der PV Anlage mit gleichem Anstellwinkel ($\beta=15^\circ$) zur Horizontalen montiert ist. Der Sensor zur Messung der Modultemperatur ist auf der Rückseite eines PV Moduls befestigt.

Am Nachmittag ab ca. 15.30 Uhr treten Strahlungsschwankungen auf, die vermutlich durch Wolken verursacht sind. Der steile Anstieg der Leistungskurven am Morgen kurz nach 7Uhr wird durch eine am Morgen vorhandene Abschattung des Pyranometers sowie der PV Anlage durch das östliche Nachbargebäude verursacht. Die PV Modultemperatur erreicht ein Maximum von 45°C und entspricht etwa dem erwarteten Verlauf. Das gegenüber der solaren Einstrahlung zeitlich verzögerte Maximum der



Modultemperatur kann durch deren Wärmekapazität, sowie durch den verzögerten Anstieg der Aussentemperatur, erklärt werden.

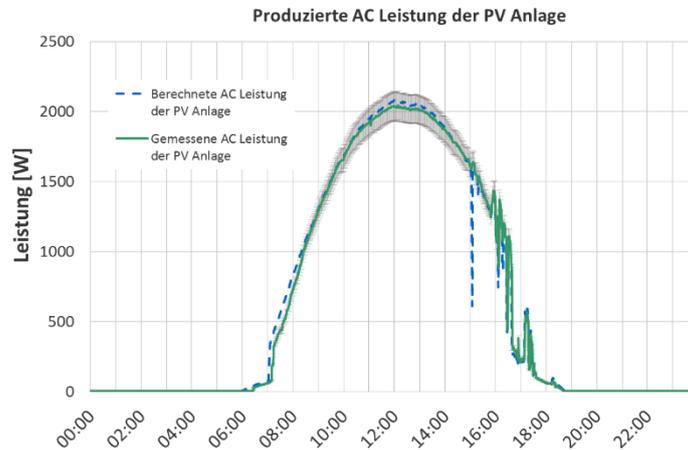


Abbildung 12 PV-Anlage: Elektrische Leistung der PV Anlage nach dem Wechselrichter - AC seitig - sowie berechnete AC Leistung in Funktion der Tageszeit. Die Messunsicherheit ist als grauer Bereich angegeben. Zur Berechnung der AC Leistung wurden die Werte von G , $\eta(T, \text{PV Modul})$ (T =Modultemperatur) sowie dem Wirkungsgrad des Wechselrichters verwendet.

In Abbildung 12 sind die Kurven für die gemessene sowie die berechnete AC Leistung aufgetragen. Für die Berechnung der AC Leistung wurden die Wirkungsgrade der Module und des Wechselrichters sowie die Strahlungsdaten eingesetzt. Die berechneten Werte liegen innerhalb der Messunsicherheit der gemessenen Werte.

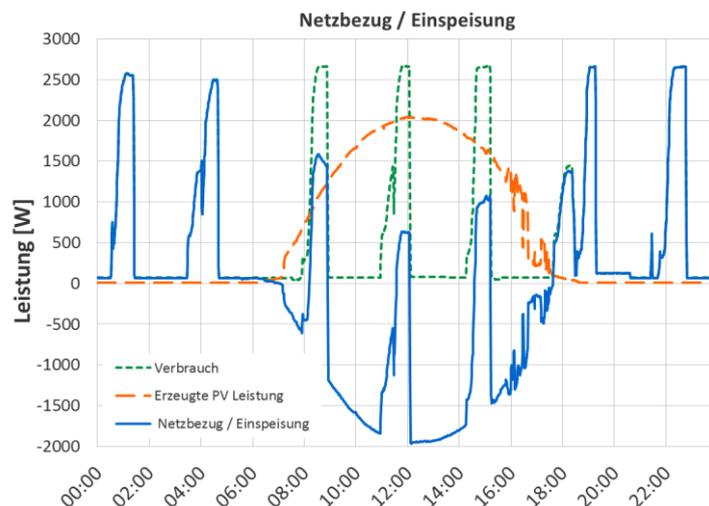


Abbildung 13 Elektrischer Verbrauch der Anlage: „Verbrauch“ und „Erzeugte PV Leistung“ sowie die Differenz der beiden Kurven, welche mit der Kurve „Netzbezug / Einspeisung“ dargestellt ist, in Funktion der Tageszeit. Der "Verbrauch" setzt sich zusammen aus der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe, dem Stromverbrauch des Rückkühlers, sowie der Umwälzpumpe für den Kühldeckenkreislauf. Die blaue Kurve zeigt den Netzbezug bzw. die Einspeisung von elektrischer Leistung ins öffentliche Stromnetz. Wenn mehr elektrische Leistung durch die PV Anlage erzeugt wird als Bedarf von der Anlage besteht, dann resultiert ein Überschuss und der Kurvenverlauf wechselt zu negativen Werten. Während der solaren Einstrahlung konnte der Netzbezug stark reduziert werden.



Der gesamte elektrische Verbrauch der Anlage beinhaltet alle Verbraucher mit Ausnahme der Anlagensteuerung, deren Verbrauch nicht gemessen wird. Der grösste elektrische Verbraucher des Systems ist die Wärmepumpe, welche einen maximalen Leistungsbedarf von ca. 2.5 kW hat. Weitere Verbraucher sind der Rückkühler und die Umwälzpumpe der Kühldecken mit einem Leistungsbedarf von 60 W bzw. 30 W.

Wenn die Sonne auf die PV-Anlage scheint kann die konstante Grundlast (einige Watt) gut mit Energie aus der PV Anlage versorgt werden (Abbildung 13). Diese Grundlast setzt sich zusammen aus dem Stand-by Verbrauch der Wärmepumpe sowie dem Verbrauch der Umwälzpumpe für die Kühldecken. Während der Leistungsspitzen der Wärmepumpe ist jedoch zusätzlich ein Bezug von elektrischer Energie aus dem öffentlichen Netz nötig. Weiter sieht man, dass die Wärmepumpe periodisch ein- und ausschaltet. Das macht Sinn, da an diesem Tag gekühlt werden muss, und daher periodisch der Kältespeicher nachgeladen wird. Um die Mittagszeit erreicht die PV-Anlage ihre maximale Leistung mit $P_{PV} \approx 2000 \text{ W}$. In der Nacht wird die Anlage mit elektrischer Energie aus dem Netz versorgt.

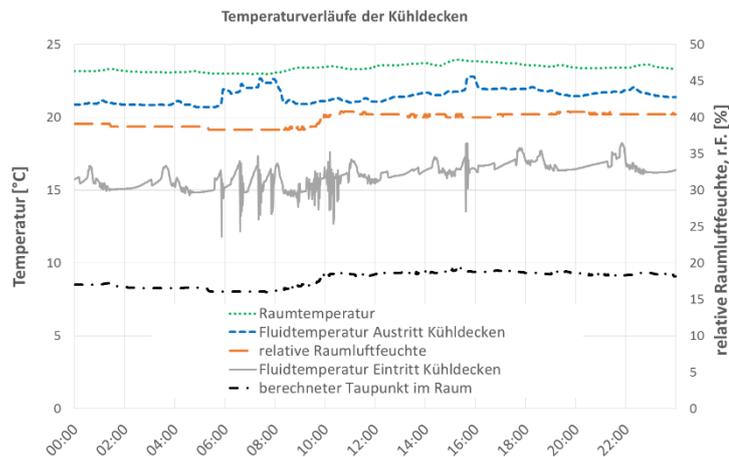


Abbildung 14 Raumklima und Kühldecken: Raumtemperatur (Labor), relative Raumluftfeuchte und berechnete Taupunkt-Temperatur, sowie Fluidtemperaturen der Kühldecken bei Ein- und Austritt in Funktion der Tageszeit. Aus der Raumlufttemperatur und der Raumluftfeuchte wurde der Taupunkt, respektive die Taupunkttemperatur, im Raum berechnet.

Abbildung 14 zeigt die Temperatur der Raumluft, die Fluidtemperatur bei Eintritt und Austritt aus den Kühldecken, sowie der berechnete Taupunkt der Raumluft über die Zeit. Die eher tiefe Raumluftfeuchte hat zur Folge, dass die Taupunkttemperatur über die ganze Zeit auf einem tiefen Niveau zwischen 7 °C und 10 °C zu liegen kommt. Durch den Anstieg der Raumluftfeuchte um 10 Uhr steigt auch die Taupunkttemperatur leicht an. Die Eintrittstemperatur des Fluides in die Kühldecken folgt mit einem Abstand von rund +7 K in etwa dem Kurvenverlauf der Taupunkttemperatur.

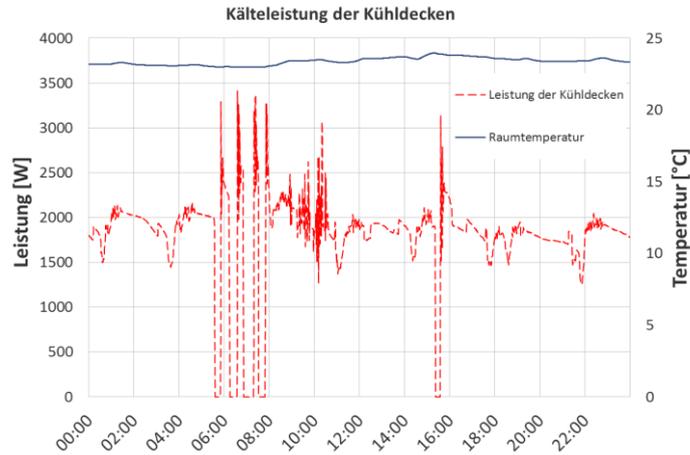


Abbildung 15 Leistung der Kühldecken: Energieaufnahme durch die Kühldecken.

Im eingeregelt Zustand liegt die durch die Kühldecken aufgenommene Leistung in Bereich von 2 kW. Dazu ist der Leistungsverlauf in Abbildung 15 in Funktion der Zeit aufgetragen. Die Leistungsschwankungen im Bereich von 1.5 kW bis 2 kW sind durch das Mischventil M1 der Anlage erklärbar. Der mehrfache Leistungsabfall von 2 kW auf 0 W (null) ist durch manuelle Betätigung verursacht d.h. in diesen Zeiten wurde die Umwälzpumpe der Kühldecken ausgeschaltet.

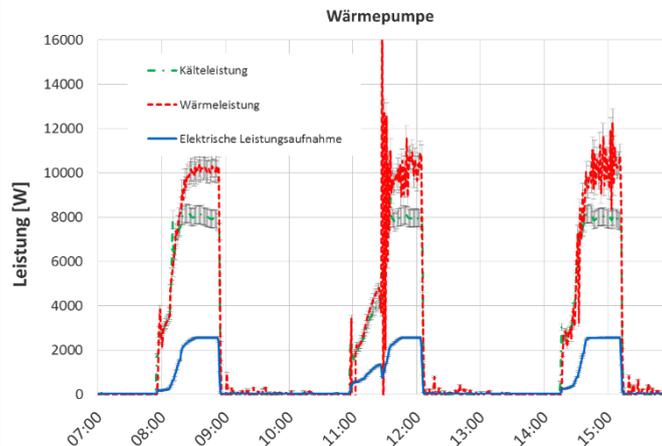


Abbildung 16 Leistungsaufnahme: Elektrische Leistungsaufnahme, Kälteleistung und Wärmeleistung der Wärmepumpe in Funktion der Tageszeit. Die durch Wärmeverluste an die Umgebung verursachte Abweichung aus der Summe von el. Leistung plus Kälteleistung und Wärmeleistung liegt innerhalb der Messunsicherheit.

In Abbildung 16 sind die Wärme- und die Kälteleistung sowie die aufgenommene el. Leistung in Funktion der Zeit aufgetragen. Die Kurven von Wärme- und Kälteleistung sind mit Messunsicherheitsbalken versehen. Die Kälteleistung beträgt im stationären Betriebszustand $P_{cool} = 8 \text{ kW}$, die Wärmeleistung $P_{heat} = 10 \text{ kW}$, und die aufgenommene el. Leistung $P_{el.} = 2.5 \text{ kW}$. Der steile Anstieg der aufgenommenen Leistung beim Anfahren der Kältemaschine ist auf den Leistungsgesteuerten Verdichter zurückzuführen. Entsprechend ist der Verlauf von Kälte- und Wärmeleistung.

4. Simulationstemplate und Validierung

Auf der Grundlage der Anlageninstallation (Abbildung 1) wurde in Polysun ein Modell erstellt. Dazu sind die Komponenten parametrisiert oder durch „Hilfs-Loops“ wie z.B. die Kälteverteilung (Abbildung 17) und



deren Parametrierung im Modell programmiert worden. Zur Simulation des Modells und dessen Validierung müssen jedoch die effektiven, gemessenen Wetterdaten mittels eines csv-Files in stündlicher Auflösung eingelesen werden. Für die Eingabewerte in Polysun, zur Neigung des PV-Feldes von 15° und zur Ost-West-Orientierung „Süd“ (0°) ist anzufügen, dass die Solarstrahlung in der Modulebene gemessen wird und daher für die Simulationen und deren Validierung jeweils die Werte 0° als Eingabe zu wählen sind. Im Messdaten-csv-File sind entsprechend die effektiv gemessenen Werte enthalten. Abbildung 17 zeigt das GUI des Modells mit welchem die Validierung gemacht wurde. Die Last der Kälteverteilung wurde mittels Hilfsloop (in Polysun als „Quelle“) mit separatem csv-File, in Form von Stundenwerten eingelesen.

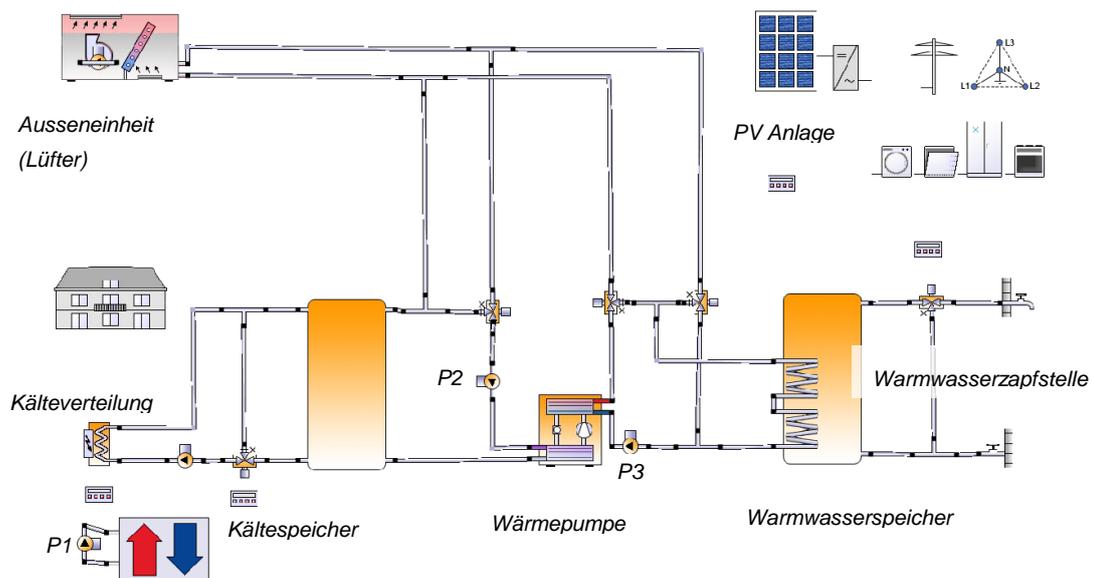


Abbildung 17 Polysun GUI: Simulationstemplate für die Validierung mit Messwerten. Die thermische Last des Raumes ist als „Hilfsloop“ in Form einer Quelle / Senke dargestellt.

Der Wasserbedarf wurde mit 200 l/Tag und einer stündlichen Verteilung gemäss Abbildung 18 festgelegt.

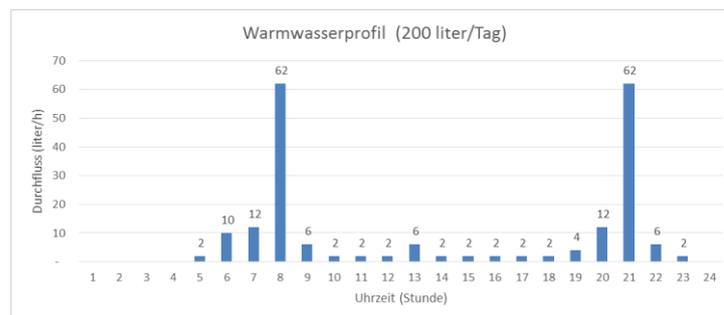


Abbildung 18 Warmwasserprofil: Profil des Brauchwarmwassers mit einem Verbrauch von 200 l/Tag in Funktion der Uhrzeit bzw. der Stunde im Tag.

4.1 Validierung des Simulationstemplates / des Simulationsmodells

In der System-Projektierung und -Dimensionierung werden Simulationswerkzeuge eingesetzt um nebst der Leistungsbilanz (Leistungsbedarf) auch eine (Jahres- bzw. Kühlsaison-) Energiebilanz zu erstellen. Eine Validierung der Modelle mit Messwerten ist je nach Anspruch auf Genauigkeit der Ergebnisse zwingend. Im folgenden Abschnitt wird die Validierung des Modells für Teile des Systems an einzelnen Tagen – oder zeitlichen Ausschnitten eines Tages - präsentiert, wobei die dazu eingesetzten Messwerte 18/49



mit den entsprechenden Unsicherheitsbalken versehen wurden. Liegen die Ergebnisse aus den Simulationen innerhalb der Messunsicherheiten, dann gehen wir von einem validierten Modell aus. Die Unsicherheiten werden in einem 95% (2 Sigma) Unsicherheitsintervall angegeben.

4.2 PV Anlage: Solarstrahlung, PV-Leistung und Modultemperatur

Das Modell der PV Anlage wurde mit den Messwerten eines sonnigen (6.5.2016) und eines bewölkten Tages (11.1.2016) validiert. Dazu müssen – als unabhängige Variable - die gemessenen Wetterdaten (nicht etwa synthetische Wetterdaten von Meteotest) in stündlicher Auflösung (wie oben erwähnt als csv-File) in das Polysun-Modell eingelesen werden. Die Abbildung 19 zeigt die solare Einstrahlung auf die Module für die oben genannten Tage und Abbildung 20 die gemessenen und simulierten Energieerträge. Wie erwartet stimmen die gemessenen und die von Polysun (PS) ausgegebenen Strahlungswerte für einen sonnigen Tag gut überein, wobei zu beachten ist, dass die PS-Werte nur als Stundenwerte zur Verfügung stehen. Bei den Energiewerten ist für diesen sonnigen Tag die gemessene elektrische Energie (17.2+/-1.3) kWh, der dazu simulierte Wert beträgt 16.2 kWh und weicht damit um 5.8 % ab. Für den bewölkten Tag ist die gemessene Energie 0.9+/-0.9 kWh. Der dazu simulierte Wert beträgt 0.8 kWh und weicht damit um 11.1 % vom Messwert ab.

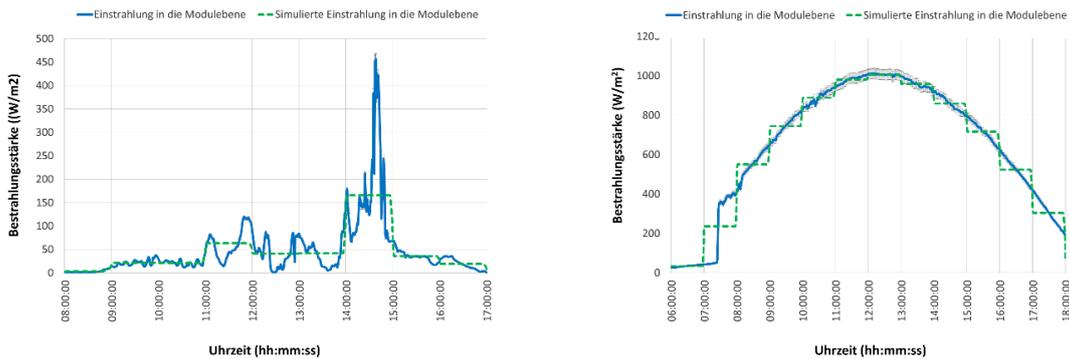


Abbildung 19 Solarstrahlung: Gemessene und simulierte Solarstrahlung in die Ebene der PV-Module. Links ein bewölkter Tag (11.01.2016), rechts ein sonniger Tag (06.05.2016).

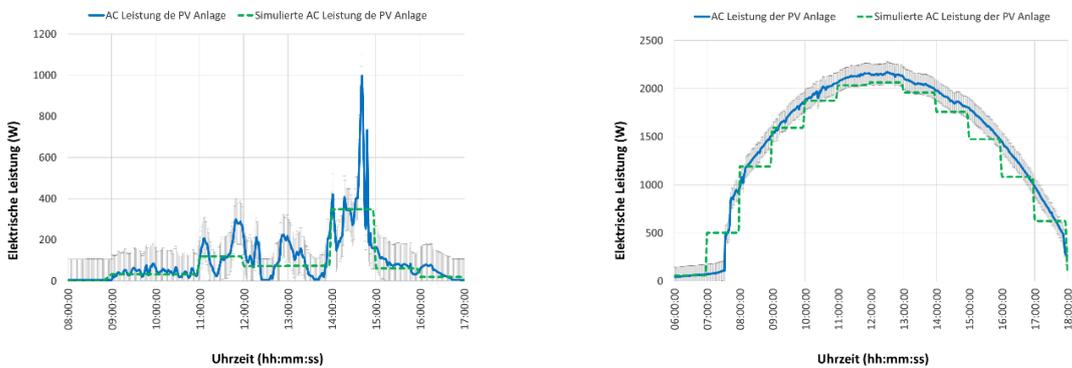


Abbildung 20 Elektrische Leistung des PV-Feldes: Elektrische Leistung nach den Wechselrichter – AC seitig – der PV Anlage in Funktion der Tageszeit für die Tage 11.01.2016 (links) und 06.05.2016 (rechts).

Die PV-Module heizen sich durch die Solarstrahlung (thermo-optische Verluste) auf und reduzieren damit durch Veränderung der thermo-elektrischen Eigenschaften (Band-Gap) deren Leistung. In der Abbildung 21 sind die gemessenen und die simulierten Temperaturen der PV-Module aufgetragen.



Auch hier ist bei geringer Solarstrahlung nur der integrale Wert in Übereinstimmung, für Tage mit hoher Solarstrahlung ist jedoch die Übereinstimmung akzeptabel.

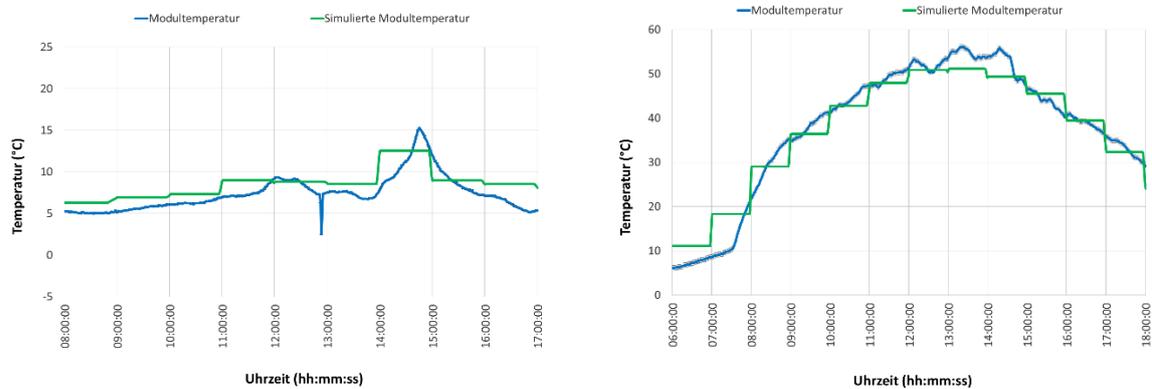


Abbildung 21 PV-Modul-Temperatur: Die Modultemperatur hängt ab von der Bestrahlungsstärke, der Windgeschwindigkeit sowie der Umgebungstemperatur. Da die Modultemperatur am gewählten Standort hauptsächlich von der Solarstrahlung abhängig ist, wurde die Windgeschwindigkeit nicht gemessen. Für die Simulation in Polysun wurde jedoch der Standardwert von 50% Windanteil (Messwerte vom SPF-Testdach übertragen in das csv-File) gewählt. Dies entspricht 50% der örtlichen (Rapperswil) Windgeschwindigkeiten.

4.3 Kühlanlage: Leistungen und Temperaturen im Free Cooling

Die energetisch effizienteste Methode Räume zu kühlen ist der „Freie Kühlmodus“, respektive das „Free-Cooling“. Diese Methode lässt sich jedoch nur bei entsprechenden Aussentemperaturen anwenden. D.h. beim beschriebenen System kann dieses „Free-Cooling“ genutzt werden, wenn ein Temperaturunterschied vom Kältespeicher zur Aussentemperatur besteht. Die Abbildung 22 zeigt den zeitlichen Verlauf der Kälteleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme des Systems im „Free-Cooling“ Modus. Wobei die elektrische Leistung der Leistung der Umwälzpumpe P2 (siehe Anlagenschema) entspricht. Die gemessene Kälteenergie beträgt (4.4 +/-0.2) kWh, die simulierte 4.1 kWh. Die Abweichung beträgt 9.8 %. Hingegen stimmen der gemessene Wert der elektrischen Energie von (0.6 +/- 0.03) kWh und der simulierte Wert mit 0.6 kWh überein.

Die Abbildung 23 zeigt die Schicht-Temperaturen (T23, T24, T25) im Kältespeicher bei einem Ladevorgang im „Free-Cooling“ Mode. Qualitativ stimmen die Temperaturen zwar gut überein – die Temperaturschichtung ist deutlich erkennbar – hingegen ist beim Start eine zeitliche Verschiebung um ca. 5 min sichtbar. Ab der Uhrzeit 08:30 stimmen jedoch die Werte aus Messung und Simulation gut überein.

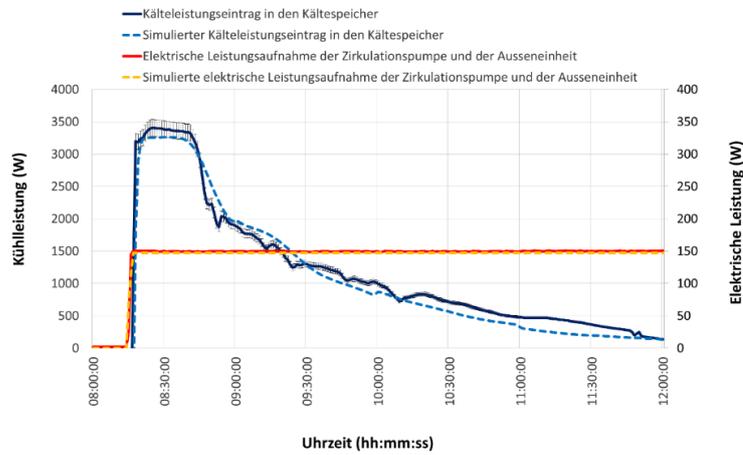


Abbildung 22 Leistungen bei Free-Cooling: Kälteleistungseintrag in den Kältespeicher und elektrische Leistungsaufnahme in Funktion der Tageszeit im Systemzustand „Free-cooling“.

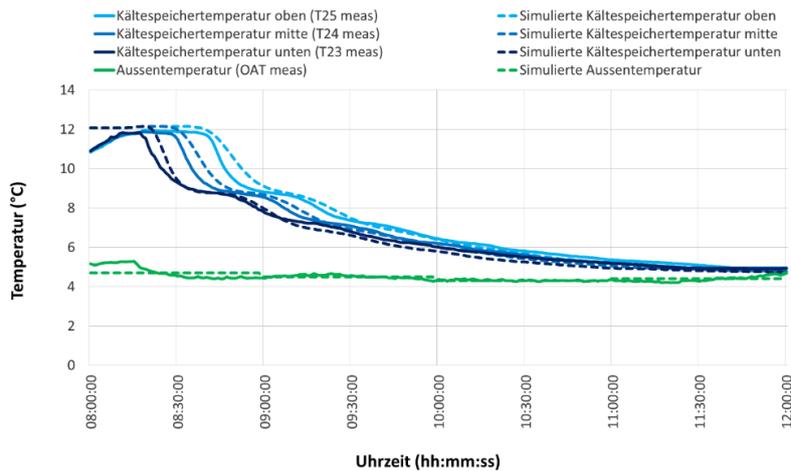


Abbildung 23 Kältespeicher: Temperaturen im Kältespeicher bei Free-Cooling: Temperaturen im Kältespeicher in Funktion der Zeit während einem Ladevorgang „Free-Cooling“.

4.4 Kühlanlage: Leistungen und Temperaturen bei aktivem Kühlen ohne WRG

Bei Kühlbedarf wird die aktive Kühlung mit der Kühlmaschine der Regelfall sein. In diesem Abschnitt ist aktives Kühlen ohne Wärmerückgewinnung dargestellt. Auch in diesem Modus wird der Kältespeicher geladen und die Kälteverteilung wird vom Speicher aus „gespeist“. Die Abbildung 24 zeigt den zeitlichen Verlauf der Kälteleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme des Systems im Modus „aktives Kühlen“. Die elektrische Leistung umfasst sowohl jene der Kältemaschine sowie jene der Umwälzpumpen und der Ausseneinheit (siehe Anlagenschema). Die gemessene Energie beträgt (11.6 +/- 0.4) kWh, die simulierte 10.8 kWh. Die Abweichung beträgt 6.9 %. Der gemessene Wert für die elektrische Energie ist (2.7 +/- 0.05) kWh und jener der Simulation 2.9 kWh. Die Abweichung der elektrischen Energie beträgt somit 0.2 kWh, respektive 7.4 %.



Die Abbildung 25 zeigt die gut übereinstimmenden Temperaturen (T23, T24, T25) im Kältespeicher bei einem Ladevorgang im Modus „aktiv Kühlen“ sowohl aus der Messung als auch aus der Simulation. Qualitativ und quantitativ stimmen die Temperaturen gut überein – die Temperaturschichtung ist deutlich erkennbar.

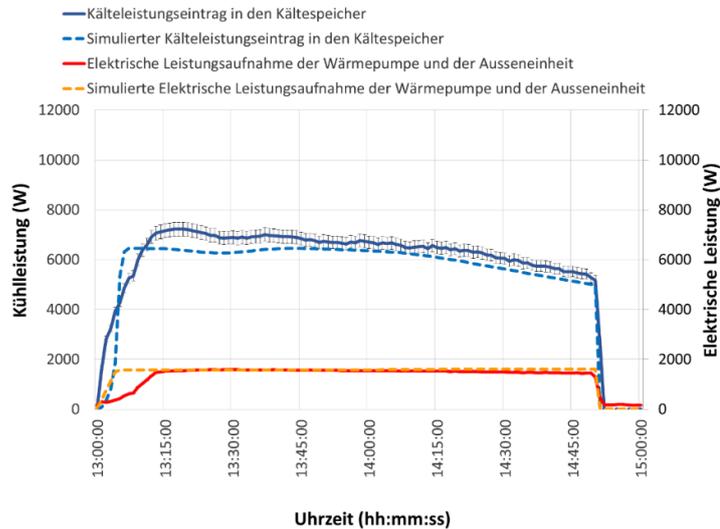


Abbildung 24 Leistungen bei aktivem Kühlen: Kühlleistung in den Kältespeicher während einem Ladevorgang im Betrieb ohne Wärmerückgewinnung d.h. Rückkühlung an die Umgebung sowie die elektrische Leistungsaufnahme des Systems in Funktion der Tageszeit. Dabei ist auch das Anfahrverhalten, respektive das langsame hochfahren, der frequenzmodulierten Wärmepumpe gut sichtbar (rote durchgezogene Linie).

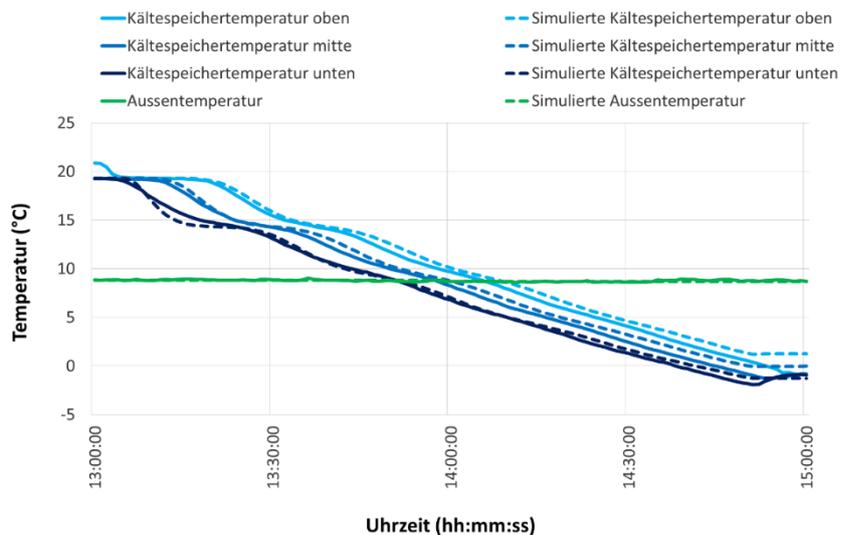


Abbildung 25 Kältespeicher: Temperaturen im Kältespeicher in aktiven Kühlmodus: Temperaturen im Kältespeicher in Funktion der Zeit während einem Ladevorgang ohne Wärmerückgewinnung, d.h. mit Rückkühlung an die Umgebung.



4.5 Kühlanlage: Leistungen und Temperaturen bei aktivem Kühlen mit WRG zur Aufbereitung von Warmwasser

Wird bei Kühlbedarf mit der Kühlmaschine – im aktiven Kühlmodus - zudem eine Wärmerückgewinnung (WRG) gemacht, dann steigt die Effizienz des Systems. In der Anlage ist die Wärmerückgewinnung auf der Hochtemperaturseite der Kühlmaschine zur Aufbereitung des Brauchwarmwassers möglich. Gleichzeitig wird in diesem Modus der Kältespeicher geladen und die Kälteverteilung wird vom Speicher aus „gespeist“. Die Abbildung 26 zeigt den zeitlichen Verlauf der Kälteleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme des Systems im Modus „aktives Kühlen“ mit WRG. Wobei auch hier nun die gesamte elektrische Leistung jene der Kältemaschine sowie jene der internen Umwälzpumpen (P2, P3) umfasst (siehe Anlagenschema). Die gemessene gesamte Kälteenergie beträgt (16.1 +/- 0.6) kWh, die simulierte 15.6 kWh. Die Abweichung beträgt 3.1 %. Der gemessene Wert für die elektrische Energie von (5.7 +/- 0.1) kWh und jener der Simulation von 6.0 kWh. Die Abweichung beträgt 0.3 kWh und somit 5.3 %.

Die Abbildung 27 zeigt die Temperaturen (T23, T24, T25) verschiedener Schichten im Kältespeicher bei einem Ladevorgang im Modus „aktiv Kühlen“ mit WRG. Qualitativ stimmen die Temperaturen zwar überein – die Temperaturschichtung ist deutlich erkennbar – aber die Temperaturwerte haben erst ab 14:00 eine relativ geringe Abweichung.

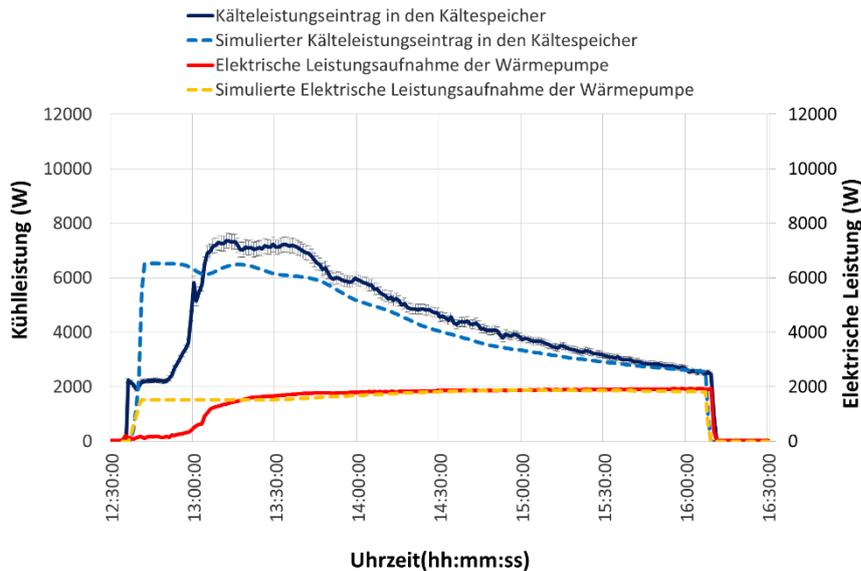


Abbildung 26 Leistungen bei aktivem Kühlen mit WRG: Kühlleistungseintrag in den Kältespeicher während einem Ladevorgang im Systemzustand „aktiv Kühlen mit Wärmerückgewinnung“ (zur Aufbereitung von Warmwasser) und elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe inklusive interner Umwälzpumpen P2 und P3 (ohne P1) in Funktion der Tageszeit.

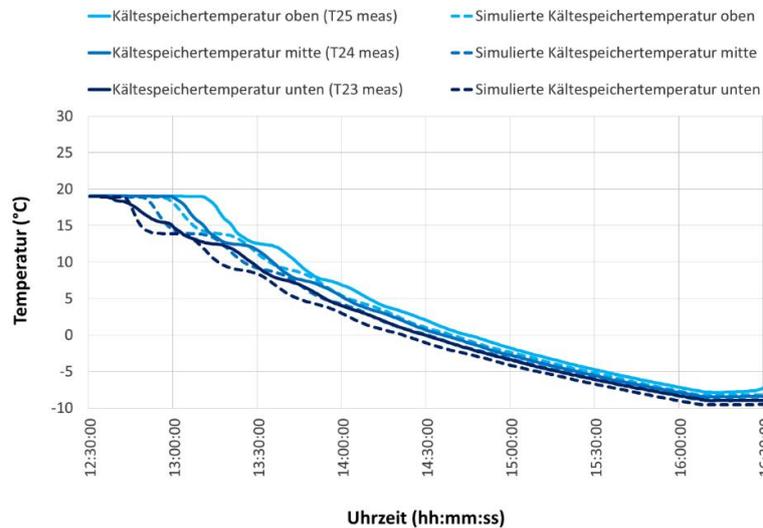


Abbildung 27 Kältespeicher: Temperaturen im Kältespeicher in Funktion der Zeit während einem Ladevorgang im Systemzustand "aktives Kühlen mit Wärmerückgewinnung" zur Aufbereitung von Warmwasser. Zu Beginn des Ladevorgangs bis zum Zeitpunkt 14:00Uhr ist eine typische Temperatur-Schichtung – stufenartiger Verlauf der Temperaturen - im Speicher sichtbar.

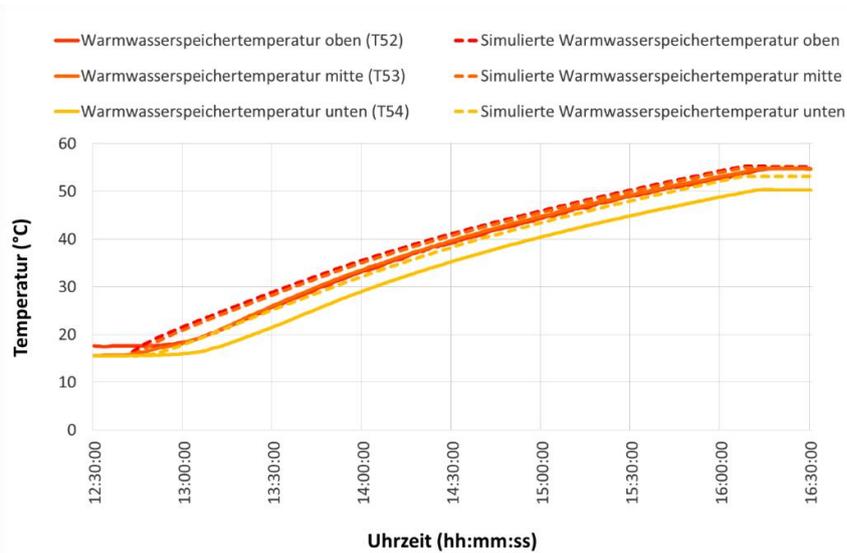


Abbildung 28 Warmwasserspeicher: Temperaturverläufe (T54, T53, T52) im Speicher für Brauchwarmwasser während einem Ladevorgang im Systemzustand „aktives Kühlen“ mit WRG. Die Fühler oben (T52) und mitte (T53) zeigen die gleiche Temperatur. Dies ist auf die Platzierung der Temperaturfühler zurückzuführen.

In Abbildung 28 sind die Temperaturen im Speicher für Brauchwarmwasser in Funktion der Zeit dargestellt. Die gemessenen und simulierten Werte haben zwar qualitativ den gleichen Verlauf, weichen jedoch am Anfang der Aufwärmphase stärker voneinander ab als gegen Ende. Bei der Entladung des Speichers für Brauchwarmwasser hat das Verbraucherprofil einen dominierenden Einfluss (Abbildung 29). Allerdings sind hier die Abweichungen von gemessenen und simulierten Temperaturen höher, nur qualitativ ist eine Übereinstimmung erkennbar.

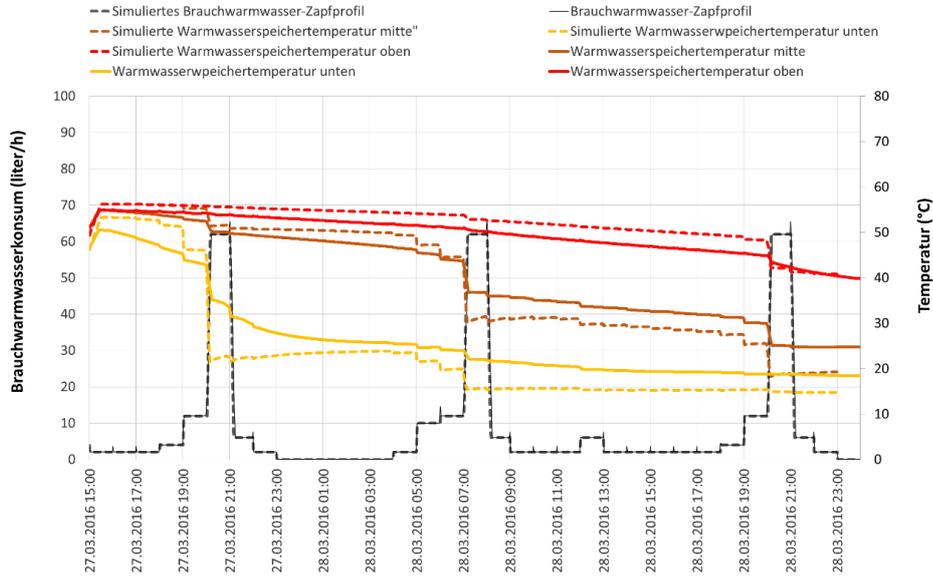


Abbildung 29 Warmwasserspeicher: Verbrauchsprofil und Temperaturverläufe (T54, T53, T52) im Speicher für Brauchwarmwasser während einem Entladevorgang – ohne gleichzeitige Beladung durch die Kühlmaschine. Die Abweichungen von gemessenen und simulierten Werte für die Temperaturen nehmen von oben (T52), mitte (T53) nach unten (T54) zu.

4.6 Kälteverteilung: Kühldecken

Im aufgebauten System ist die Beladung des Kältespeichers durch die Kältemaschine unabhängig von der Kälteverteilung. Bei beladenem Speicher kann daher die Kälteverteilung auch ohne Kühlmaschine betrieben werden. In Abbildung 30 sind die Leistung der Kühldecken sowie die elektrische Leistung der Kälteverteilung dargestellt. Bis auf eine zeitliche Verschiebung beim Anfahren stimmen die Werte aus der Messung und der Simulation gut überein. Vergleichen wir wiederum die Kühlenergie aus der Messung mit (14.9 +/- 0.6) kWh mit der Simulation (14.8 kWh), so ist die Abweichung weniger als 1 %. Für die elektrische Energie stimmt der Wert aus der Messung von (0.4 +/- 0.03) kWh mit dem Wert 0.4 kWh aus der Simulation überein.

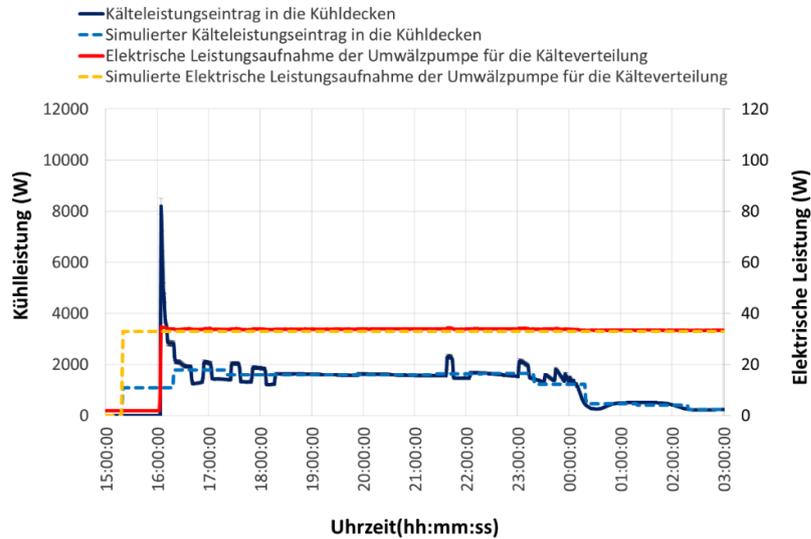


Abbildung 30 Leistungen bei der Kälteverteilung: Kühlleistung und elektrische Leistung bei der Kälteverteilung in Funktion der Tageszeit. Eine zeitliche Verschiebung der Werte beim Anfahren ist deutlich sichtbar.

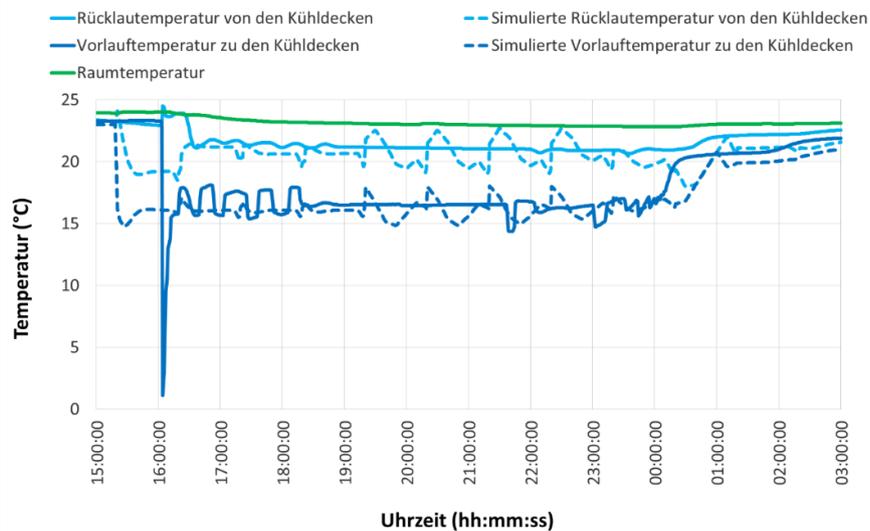


Abbildung 31 Temperaturen bei der Kälteverteilung: Vorlauf- und Rücklaufemperatur der Kühldecken sowie Raumtemperatur in Funktion der Tageszeit. Die Temperaturschwankungen bei der Vorlauftemperatur sind auf den Temperaturregler und das damit geregelte Dreiwegstellventil zurückzuführen. Die Auflösung der Reglerwerte zum Dreiwegstellventil ist ungenügend um einen Temperaturverlauf ohne Schwankungen zu erreichen.

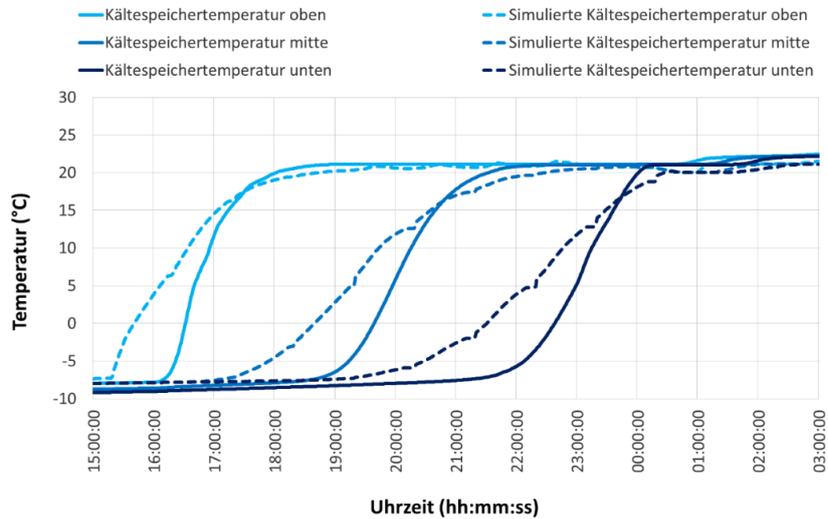


Abbildung 32 Temperaturen im Kältespeicher: Temperaturverlauf unten (T23), mitte (T24) und oben (T25) in Funktion der Zeit bei der Entladung des Kältespeichers. Die Temperaturschichtung ist deutlich erkennbar und Start- sowie Endwerte aus der Messung und der Simulation stimmen überein. Die Werte dazwischen stimmen qualitativ zwar überein, aber in der Simulation ist die Schichtung nicht so ausgeprägt wie in der Messung – die Thermokline ist breiter und dadurch entsteht ein zeitlicher Offset.

5 Jahressimulationen und Plausibilität der Resultate

Mit dem validierten Polysun Simulationstemplate wurden Jahres- bzw. Kühlsaisonsimulationen durchgeführt. Dazu wurden im Simulationstemplate die Kühldecken (Kühlleistung 220W/m^2 bei $\Delta T = 8\text{K}$, [6]) entsprechend einem Bürogebäude mit 100m^2 angepasst sowie die Steuerung erweitert. Damit lassen sich verschiedene Kontrollstrategien simulieren. Die Simulationen wurden mit Rückkühlung an die Aussenluft durchgeführt.

5.1 Simulationstemplate

Für die Simulationen sind zwei Simulationstemplates (Abbildung 33) aufgebaut worden, welche aus dem validierten Simulationstemplate (Abbildung 17) abgeleitet wurden. Das obere dient als Simulationstemplate ohne Speicher und das untere als Template mit Kältespeicher. Bei beiden Templates ist die PV Anlage als Option (gestrichelter Rahmen) vorgesehen. Das heisst es kann mit und ohne PV Anlage simuliert werden. Bei der Steuerung der Anlage ohne Kältespeicher kann zudem optional die Vorlauftemperatur der Kälteverteilung geregelt werden, wenn eine Leistungsmodulierte Wärmepumpe eingesetzt wird.

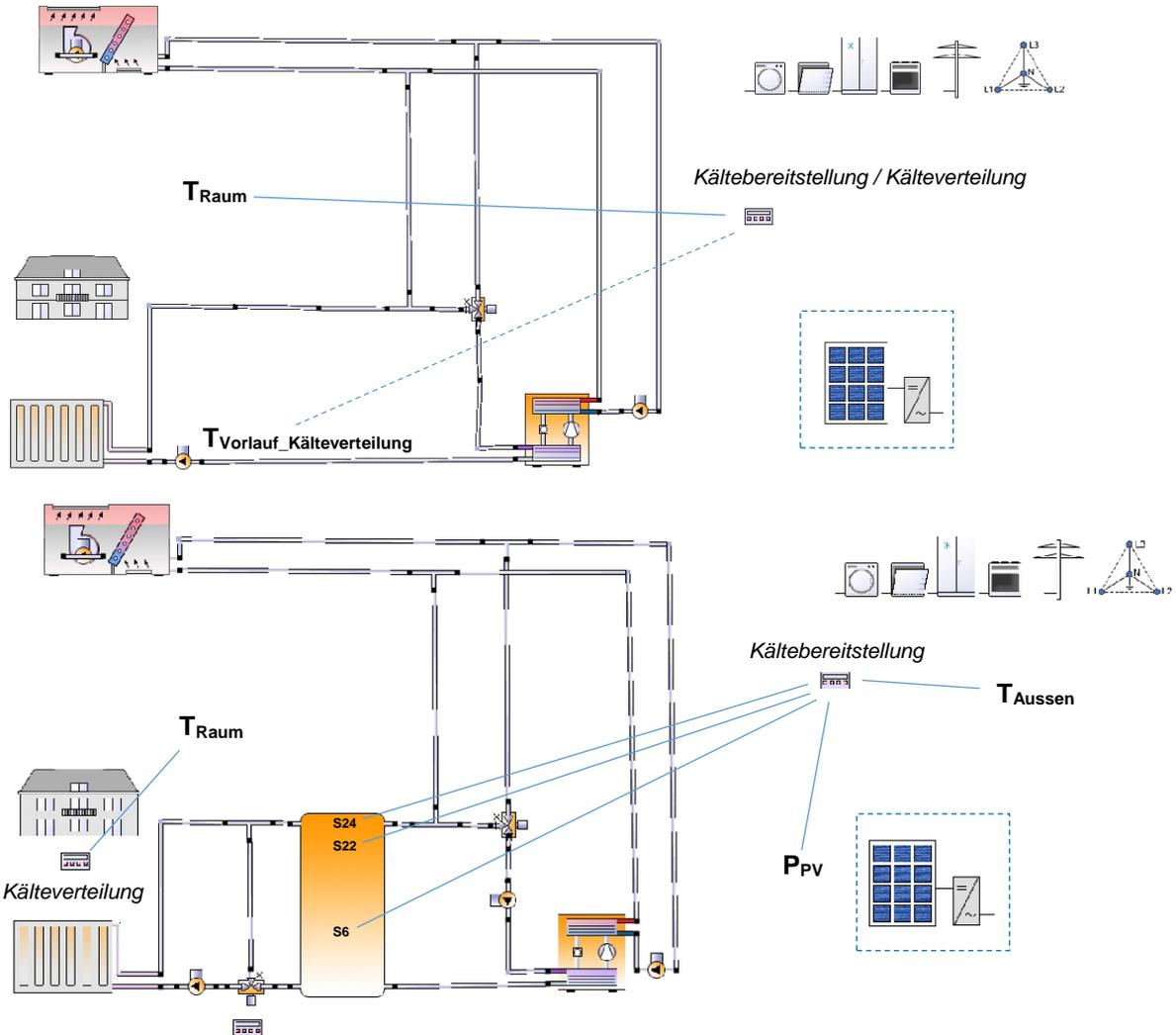


Abbildung 33 Polysun GUI: Grafische Oberfläche zur Simulationen der Kùhlsaison. In beiden Templates sind neu Kùhldecken entsprechend einem Bùrobau integriert. Die Parameter in der Simulation sind Raumtemperatur T_{Raum} , $T_{Vorlauf_Kälteverteilung}$, Speichertemperatur T_s (Speicherschichten T_{S6} , T_{S22} und T_{S24}), Aussentemperatur T_{Aussen} und PV-Leistung P_{PV} sowie die Leistung der Kùhlmaschine und das Volumen des Kùltespeichers V .

5.2 Gebäudetyp: Bùrobau

Das in den Simulationen eingesetzte Bùrogebäude hat eine Raumgrösse von 100 m^2 . Es handelt sich dabei um ein Niedrigenergiegebäude mit einem U-Wert von 0.35 K/W/m^2 . Als Gebäudeort wurde Rapperswil (Schweiz) gewàhlt, dies entspricht einem „hot temperate“ Klima. Bezùglich dem Komfort werden in allen Simulationen Raumtemperaturen T_{Raum} unterhalb von $26 \text{ }^\circ\text{C}$ als behaglich eingestuft. In diesen Simulationen wird keine WRG zur Aufbereitung von Warmwasser gemacht, da im Bùrogebäude von einem geringen Warmwasserverbrauch ausgegangen wird zudem wurden auch keine Simulationen mit Free-cooling gemacht.



5.3 Anlagensteuerung

Die Steuerung der Systeme ohne Kältespeicher, hat als Führungsgrösse die Raumtemperatur T_{Raum} . Steigt diese höher als $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, dann schaltet die Kühlmaschine ein. Die generierte Kälte wird unmittelbar, ohne Zwischenspeicherung, über die Kühldecken im Gebäude verteilt. Wenn eine Leistungsgesteuerte Kältemaschine eingesetzt wird, regelt die Steuerung die Leistung der Kältemaschine so, dass die Vorlauftemperatur der Kälteverteilung $T_{Vorlauf_Kälteverteilung}$ $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird.

Für die Systeme mit Speicher geschieht die Raumkühlung über den Kältespeicher und die Anlage hat daher zwei Teil-Steuerungen. Die eine dient der Kältebereitstellung – Kältemaschine oder freier Kühlmodus – und die andere der Kälteverteilung über die Kühldecken. Diese Teilsysteme können beliebig und unabhängig voneinander betrieben werden. Die Raumtemperatur des Gebäudes dient als Führungsgrösse beim Betrieb der Kälteverteilung. Bei Raumtemperaturen T_{Raum} höher als $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird die Umwälzpumpe der Kälteverteilung in Betrieb gesetzt. Bei T_{Raum} tiefer als $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ stoppt die Kälteverteilung wieder. Zudem sind in den Simulationen zwei verschiedene Betriebsmodi der Kältebereitstellung möglich. Dies sind der Modus „Komfort“ und der Modus „Solar“, siehe Tabelle 2 unten. Dabei gewährleistet der Modus Komfort, dass der Temperaturkomfort im Raum jederzeit eingehalten wird, und somit der Kältespeicher immer mindestens z.T. beladen ist. Dazu setzt der Modus Komfort die Kältemaschine in Betrieb, wenn die Temperatur der Schicht 6 im Kältespeicher grösser als $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist ($T_{KS,S6} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) und schaltet sie wieder aus, wenn die Temperatur in Schicht 24 des Kältespeichers tiefer als $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist ($T_{KS,S24} < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Der Modus „Solar“ ist dem Modus „Komfort“ überlagert und hat folgende Funktion: Bei einer bestimmten PV-Leistung ($P_{PV} > P_{PV,Limite}$, Abbildung 34) und bei unvollständig beladenem Kältespeicher ($T_{KS,S22} > -5\text{ }^{\circ}\text{C}$), wird Kälteenergie bereitgestellt. Der Speicher kann in diesem Fall bis auf eine Temperatur von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ beladen werden. Zudem soll der Modus „Solar“ nur dann genutzt werden, wenn die Aussentemperatur T_{Aussen} höher als $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist ($T_{Aussen} > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dies verhindert, dass der Kältespeicher bei tiefen Aussentemperaturen (kein Kühlbedarf) unnötig tiefe Temperaturen erreicht und damit der Wirkungsgrad der Kälteanlage reduziert wird.

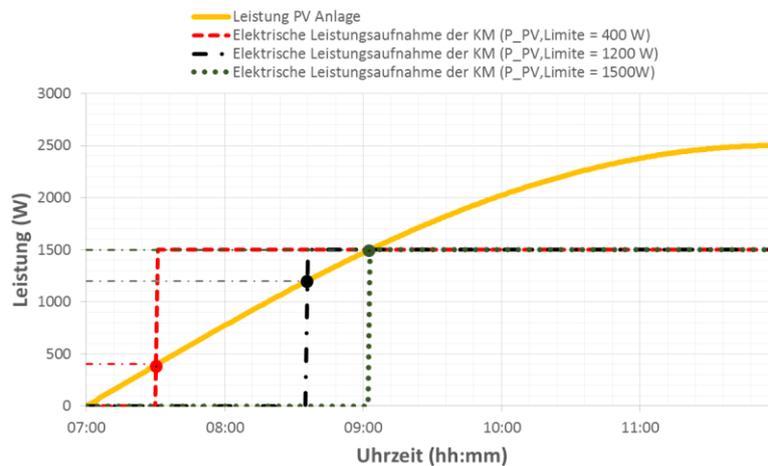


Abbildung 34 Elektrische Leistungsaufnahme 1.5 kW – Anteil Solar und Anteil Netz - der Kältemaschine bei den drei Einschaltsschwellen P_{PV} 400 W, 1200 W und 1500 W. Die Kältemaschine mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1.5 kW wird eingeschaltet, wenn die Leistung der PV Anlage die Einschaltsschwelle $P_{PV,Limite}$ überschritten hat ($P_{PV} > P_{PV,Limite}$).



Tabelle 2 Vorgegebene Steuerung der Anlage (Modus) zur Simulation des Templates mit Kältespeicher.

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 $T_{KS, S24} < 10^{\circ}C$ ON $T_{KS, S22} > -5^{\circ}C$ und $T_{Aussen} > 20^{\circ}C$. OFF $T_{KS, S24} < -5^{\circ}C$ oder $T_{Aussen} < 20^{\circ}C$		
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

Die Simulationen sind mit den Parametern „Temperatur“ (Speicher T_S , T_{Raum} und T_{Aussen} bzw. $T_{Vorlauf_Kälteverteilung}$), Leistung der Kühlmaschine und des PV-Feldes ($P_{PV, Limite}$ „Einschaltschwelle“) sowie Volumen V des Kältespeichers durchgeführt worden. Im Vergleich dient der Modus „Komfort“ als Referenz für die drei „Solar“-Modi.

5.4 Plausibilität der Simulation: Unsicherheit von gemessenen und simulierten Ergebnissen

Bei der Simulation einzelner Tage sehen wir, dass die Unsicherheit der gemessenen und der simulierten Energiewerte höher sind als bei bewölkten Tagen. Daher wurden zur Validierung der PV-Energieerträge während der Kühlsaison (Mai, Juni, Juli, August, September) die mit Polysun simulierten Tage nach der Einstrahlungsenergie in der Modulebene in „Ertragsklassen“ K mit einer Abstufung von 1 kWh/m²*d eingeteilt (Tabelle 3). Für jede dieser Klassen wurde ein Tag nach dem Zufallsprinzip ausgewählt und die Unsicherheit in % relativ zum Messwert ermittelt.



Tabelle 3 Einteilung der Tage nach der Strahlungsenergie

Einstrahlungsklasse	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
Strahlungsenergie Q (kWh/m ² /d)	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	>8

Die Abbildungen 35 und Abbildung 36 umfasst die Klassen K1 bis K9 mit entsprechender Strahlungsenergie der 153 Tage dauernden KÜhlsaison in den Monaten Mai bis September.

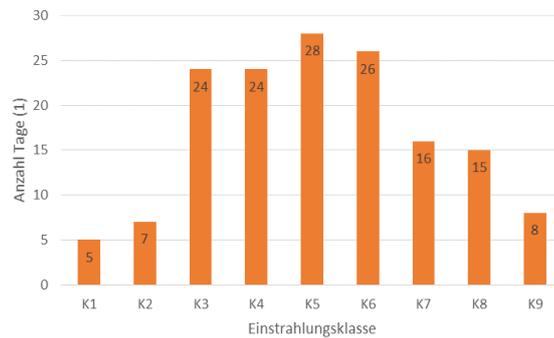


Abbildung 35 Klasseneinteilung der simulierten Tage in Einstrahlungsklassen während der KÜhlsaison (Mai, Juni, Juli, August, September).

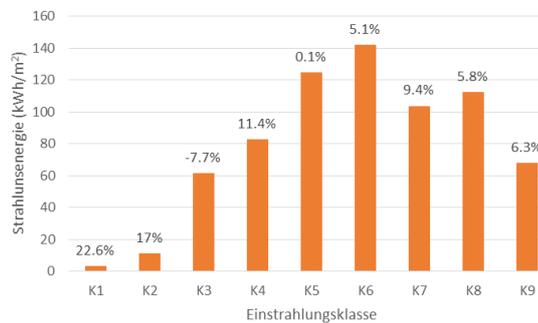


Abbildung 36 Strahlungsenergie Q_k (k=K1..K9) der einzelnen Einstrahlungsklassen während der KÜhlsaison (Mai, Juni, Juli, August, September). Die prozentuale Unsicherheit von gemessenen zu simulierten Werten ist angegeben.

Zur Illustration ist die Bestimmung der Unsicherheit des 21.1.2016 angegeben. Die Einstrahlungsenergie in der Modulebene beträgt 428 Wh/m². Das entspricht der Einstrahlungsklasse K1. Aus dem gemessenen und simulierten PV Ertrag ergibt sich nun die Unsicherheit u_{K1} für diese Einstrahlungsklasse:

$$u_{K1} = \frac{E_{AC_Mess} - E_{AC_Sim}}{E_{AC_Mess}} \cdot 100\% = \frac{986Wh - 763Wh}{986Wh} \cdot 100\% = 22.6\% ; u = \frac{\sum_{k=K1}^{K9} u_k \cdot G_k}{\sum_{k=K1}^{K9} G_k} = 6.3\%$$

Die Unsicherheiten der einzelnen Klassen wurden mit der dazugehörigen Strahlungsenergie gewichtet und daraus die Unsicherheit u für die gesamte KÜhlsaison abgeleitet. D.h. die simulierten Werte zum Energieertrag weichen somit um 6.3 % von den gemessenen Werten ab.



5.5 Parametervariation

In Tabelle 4 sind die Parameter zusammengestellt, welche für die Simulationen variiert wurden. Allerdings ist dabei zu beachten dass nicht alle möglichen Kombinationen simuliert wurden

Tabelle 4 Parameter die während den Simulationen variiert wurden.

Einschaltschwelle, $P_{PV,Limite}$	0 W	200 W	400 W	600 W	800 W	1200 W	1600 W
WP Kühlleistung (Heiz- & el. Leistung) ¹	4.5 kW (90 Hz) (6 kW; 1.5 kW)		2.5 kW (50 Hz) (3.2 kW; 0.7 kW)		1.9 kW (40 Hz) (2.5 kW, 0.5 kW)		
Steuerung (Modus)	Modus „Komfort“				Modus „Solar“		
Volumen V des Kältespeichers	300 l	477 l	1000 l	2000 l	3000 l	4000 l	

Einschaltschwelle, $P_{PV,Limite}$: Im Solarmodus reagiert die Steuerung auf die produzierte AC Leistung – nach dem Wechselrichter - der PV Anlage. Ab der Einschaltschwelle $P_{PV,Limite}$ werden Wärmepumpe und alle übrigen elektrischen Verbraucher, die für die Kältebereitstellung benötigt werden, aktiviert. Sinkt die PV Leistung unter die Einschaltschwelle, dann wird die Anlage wieder ausgeschaltet. Für die $P_{PV,Limite}$ wurden die in Tabelle 2 angegebenen Werte zwischen 0 W und 1600 W variiert.

5.6 Simulationsresultate

Erklärung zu den Diagrammen: Die Simulationsresultate werden jeweils mit Balkendiagrammen veranschaulicht. Jeder der Balken entspricht darin einem Steuerungs-Modus und/oder Anlagentyp, welcher unterhalb des Balkens beschrieben ist.

Im einen Diagrammtyp wird die jährliche Kühlenergie dargestellt, darin wird unterschieden ob die Kühlenergie mit Netzstrom $Q_{Kälte, Netz}$ (grau) oder mit selbst erzeugtem Solarstrom $Q_{Kälte, Solar}$ (gelb) produziert wurde. Ausserdem ist auf der Sekundärachse der System COP für Kühlen $COP_{kühlen}$ aufgetragen. Innerhalb der Balken sind zudem die prozentualen Werte der Kühlenergie aus Solarstrom, respektive der Kühlenergie aus Netzstrom, angegeben.

Im anderen Diagramm wird die jährlich verbrauchte elektrische Energie dargestellt. Die Balken sind wiederum in zwei Bereiche eingeteilt, wobei der gelbe Bereich dem verbrauchten Solarstrom (Eigenverbrauch) und der graue Bereich dem verbrauchten Netzstrom (Netzbezug) entspricht. Oberhalb des Balkens ist die totale benötigte jährliche elektrische Energie (E_{Tot}) angegeben. Zudem ist der Eigenverbrauch (E_{Solar}) als Zahl oder in % innerhalb des gelben Balkens deklariert. Auf der Sekundärachse ist die Netzbezug Abnahme ΔE_{Netz} aufgetragen. Die Netzbezug Abnahme bezieht sich immer auf das System mit 477 l Speicher und Steuerung „Komfort“. Das heisst, es wird im jeweiligen Solarmodus verglichen, wieviel weniger Netzstrom bezogen werden muss.

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

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

¹ Leistungsstufen der Wärmepumpe NIBE F1155-6 für den Betriebspunkt (B0/W35)



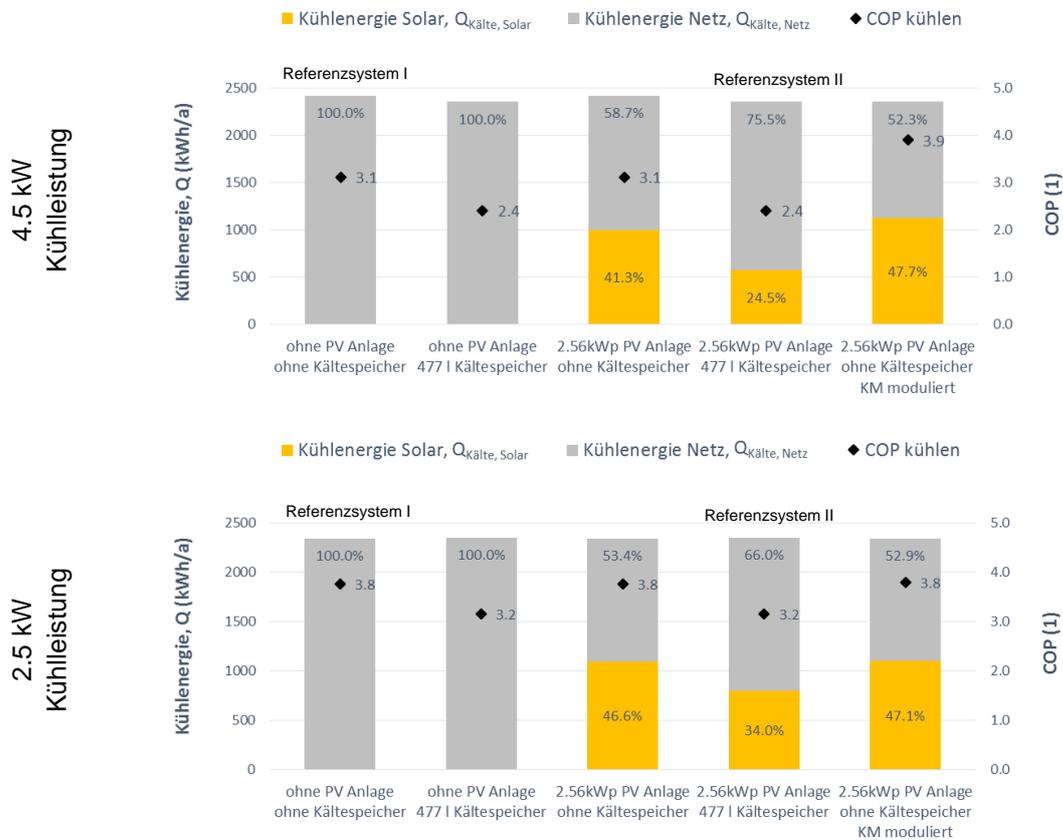
$$(3) \quad Q_{K\ddot{a}lte,Solar} = COP_{k\ddot{u}hlen} \cdot E_{Solar}$$

$$(4) \quad Q_{K\ddot{a}lte,Netz} = COP_{k\ddot{u}hlen} \cdot E_{Netz}$$

$$(5) \quad E_{Tot} = E_{Solar} + E_{Netz}$$

Komfortkriterium: Zur Bewertung des Komforts wurde ein zusätzliches Kriterium eingeführt. Dabei wird gemessen wie viele Stunden die Raumtemperatur oberhalb 26°C liegt. Liegt der Wert unterhalb von 26°C, wird das Raumklima als angenehm gewertet. Der Sollwert für die Raumtemperatur liegt bei 25°C.

Resultate zum Referenzsystem: In dieser Untersuchung definieren wir ein Referenzsystem I mit Netzanschluss, ohne PV Anlage und ohne Speicher sowie ein Referenzsystem II mit Netzanschluss, einer 2.56 kWp PV Anlage und mit Kältespeicher. Dabei ist zu beachten, dass durch die tiefen Vorlauftemperaturen (unterhalb des Taupunktes) zu den Kühldecken das Referenzsystem I in der Praxis, um in den Räumen anfallendes Kondensat zu verhindern, mit einer Air Handling Unit (AHU) betrieben werden müsste. Das Referenzsystem II wird im Modus „Komfort“ betrieben.



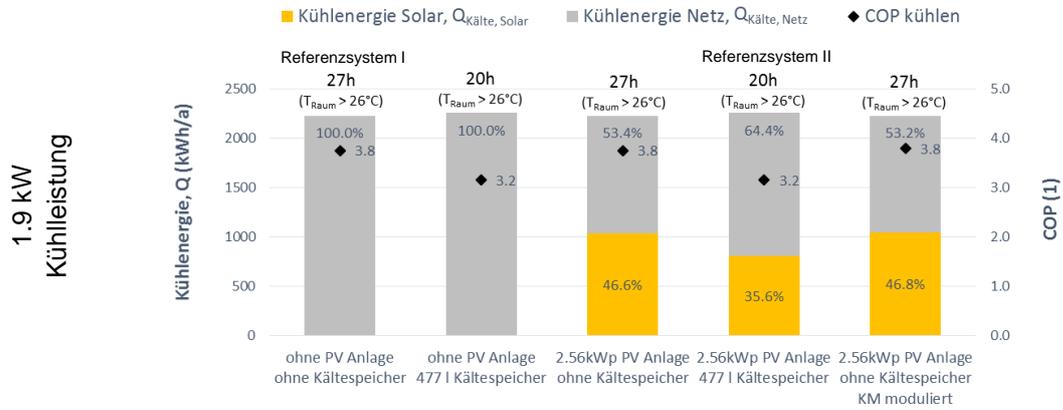
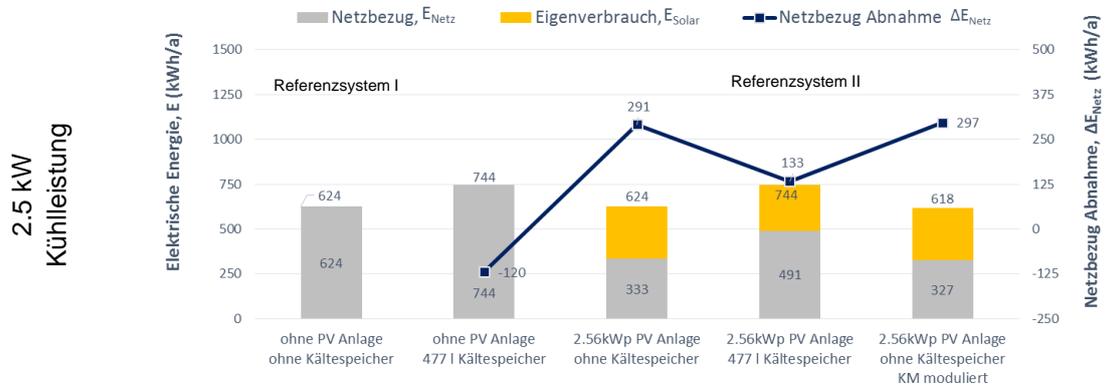
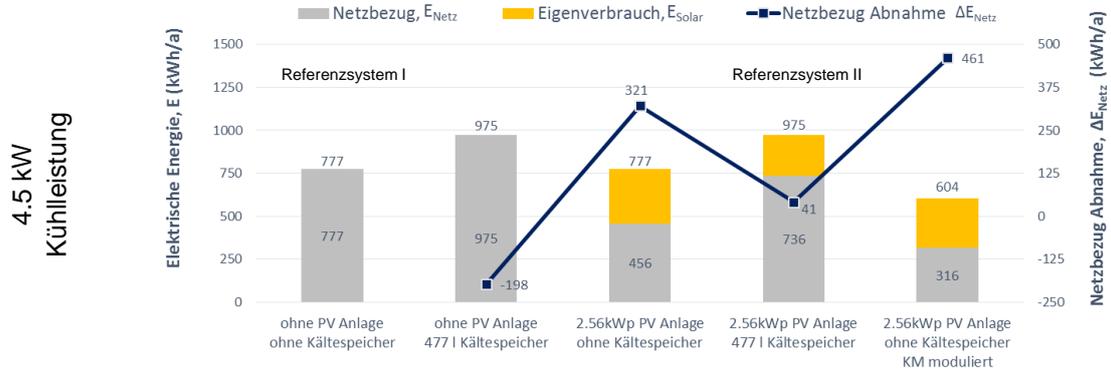


Abbildung 37 Kühlenergie und COP in Abhängigkeit des Systemkonzeptes und der Leistung der Kältemaschine. Die Kühlenergie ist aufgeteilt in „Solar“ und „Netz“, die jährlich zur Kühlung benötigt wird und mit einer Kühlmaschine von 4.5 kW, 2.5 kW oder 1.9 kW bereitgestellt wird. Die Systeme ohne PV-Anlage und ohne bzw. mit Speicher (links); das System mit PV-Anlage ohne und mit Speicher und bei modulierendem Betrieb des Systems. Das System mit PV-Anlage und mit Speicher (Referenzsystem II) wird unten weiterverfolgt.



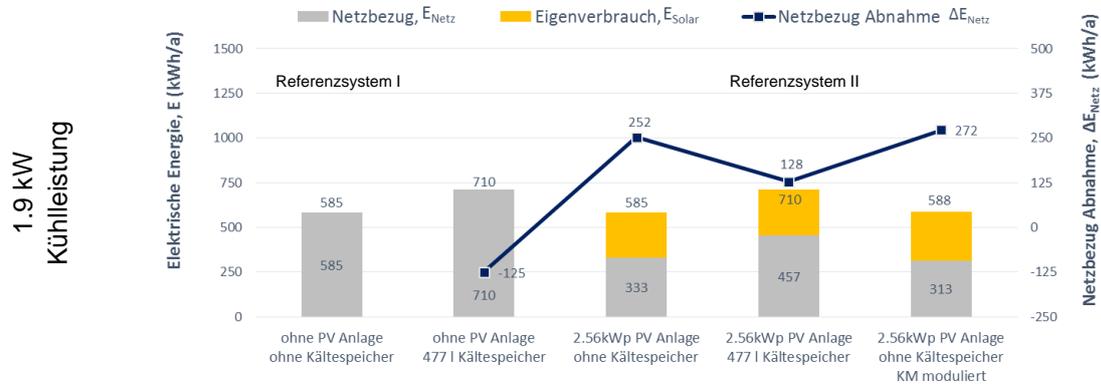


Abbildung 38 Elektrische Energie zur Kühlung und Reduktion des Netzbezugs (Netzbezug Abnahme) in Abhängigkeit des Systemkonzeptes und der Leistung der Kältemaschine. Die elektrische Energie ist aufgeteilt in „Solar“ und „Netz“, die jährlich zur Kühlung benötigt wird und mit einer Kühlmaschine von 4.5 kW, 2.5 kW oder 1.9 kW bereitgestellt wird. Die Systeme ohne PV-Anlage und ohne bzw. mit Speicher (links); das System mit PV-Anlage ohne und mit Speicher und bei modulierendem Betrieb des Systems. Das System mit PV-Anlage und mit Speicher wird unten weiterverfolgt.

Die Grafiken in Abbildung 37 und 38 zeigen die Simulationsergebnisse für die drei Kühlmaschinenleistungen (4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW). Es werden jeweils folgende Systeme dargestellt: Zwei Systeme ohne PV Anlage welche nur mit Netzstrom betrieben werden, jeweils mit und ohne Kältespeicher, dann folgen zwei Systeme welche mit einer PV Anlage ausgerüstet und gleichzeitig ans Stromnetz gekoppelt sind und jeweils auch mit und ohne Kältespeicher betrieben werden. Zudem wird noch ein System dargestellt (ganz rechts in den Grafiken), welches mit einer Leistungsmodulierten Kältemaschine betrieben wird und mit einer PV Anlage ausgerüstet ist, jedoch keinen Kältespeicher hat. Gut zu sehen ist dabei, dass ein Kältespeicher ohne zusätzliche «intelligente» Steuerung sich negativ auf die Systemeigenschaften auswirkt und dazu führt, dass der Energieverbrauch steigt und mehr Netzstrom benötigt wird als ohne Speicher. Zudem kann mit dem System mit PV Anlage und Kältespeicher nur ein kleinerer Teil des gesamten Kühlbedarfs mit solarer Kühlenergie gedeckt werden, verglichen mit den zwei Systemen ohne Kältespeicher und mit PV Anlage.

In der Folge werden nun Systeme mit PV-Anlage und Speicher weiter verfolgt. Dies weil davon auszugehen ist, dass auch zu Zeiten ohne Solarstrahlung Kühlbedarf besteht. Diese Systeme lassen sich mit den Referenzsystemen II vergleichen.

Resultate zum System mit PV-Anlage und mit Speicher: In diesem Abschnitt werden die Resultate der Parametervariation, respektive deren Jahressimulationen, gezeigt und beurteilt. Zuerst wird die Einschaltsschwelle, $P_{\text{PV,Limite}}$ variiert und für die drei Wärmepumpen Kühlleistungen 4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW simuliert (Abbildung 39). Danach werden die Kühlleistungen 4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW mit optimierter $P_{\text{PV,Limite}}$ miteinander verglichen. Zum Schluss wird das Volumen des Kältespeichers für wiederum die drei Kühlleistungen 4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW mit optimierter $P_{\text{PV,Limite}}$ variiert und simuliert.

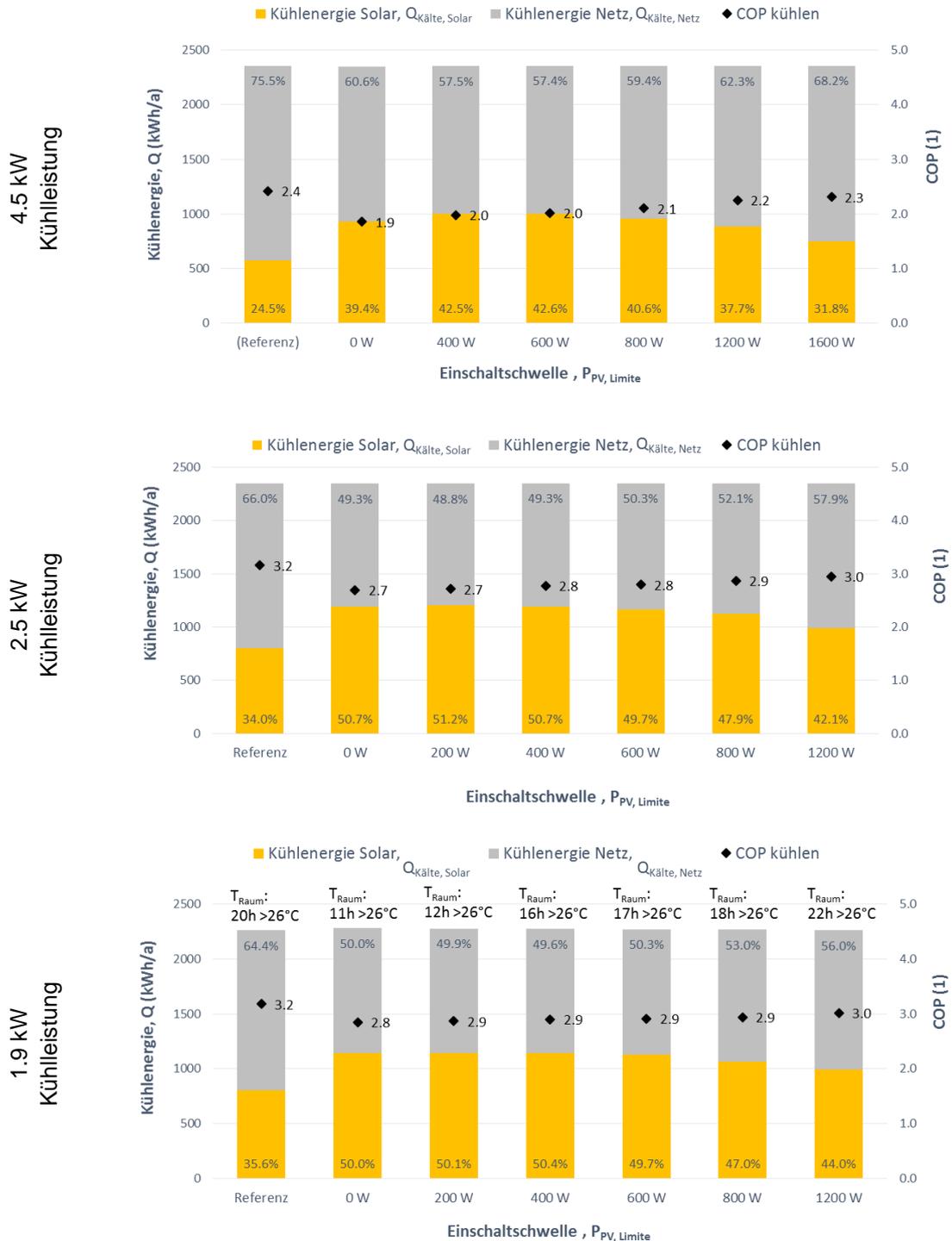
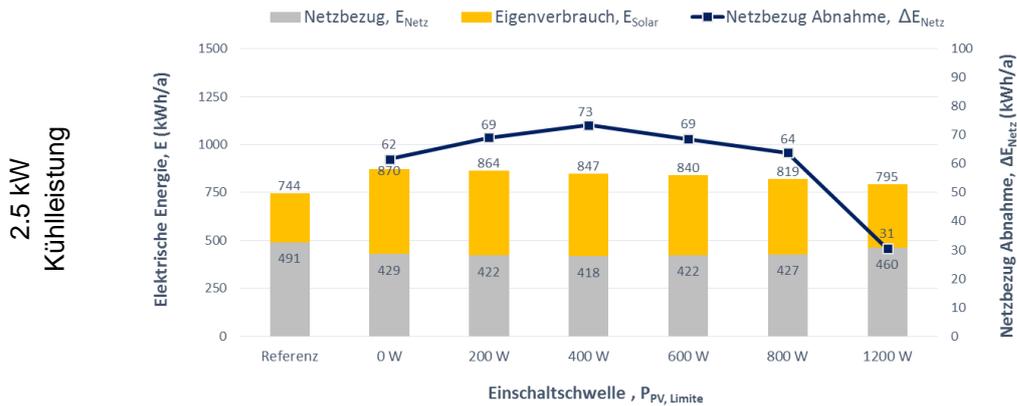
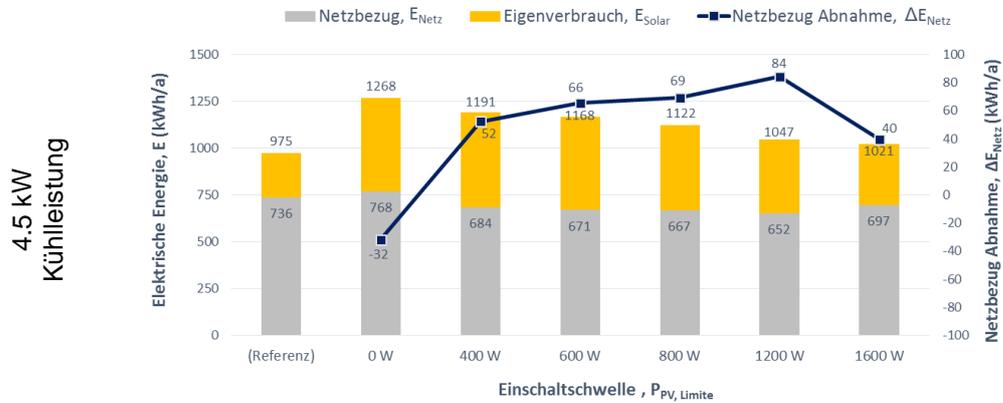


Abbildung 39 Kühlenergie „Solar“ und „Netz“: Kühlenergie in Abhängigkeit der Leistung der Kühlmaschine und der Einschaltswelle, $P_{PV, Limite}$. Die Kältemaschine wird mit einer Kühlleistung von 4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW betrieben. Der Kältespeicher hat für alle Modi ein Volumen von 477 Liter. Für die Kühlmaschine mit 1.9 kW konnte das Komfortkriterium ($T_{Raum} < 26^{\circ}C$) für keine der Einschaltswellen erreicht werden.

Die drei Grafiken in Abbildung 39 zeigen die Simulationswerte für die drei Kühlmaschinenleistungen (4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW) sowie 6 Einschaltswerte $P_{PV, Limite}$ (0 W .. 1200 W). Der Balken links der einzelnen Diagramme repräsentiert Resultate für das Referenz System. Referenzsystem bedeutet, wie



oben erwähnt, Steuerungsmodus „Komfort“ – keine $P_{PV, \text{Limite}}$. Wird nun die Anlage im Modus „Solar“ betrieben und die Einschaltsschwelle erhöht, dann steigt die „Kühlenergie Solar,“ zuerst bis zu einer optimalen $P_{PV, \text{Limite}}$ und sinkt danach wieder. Der Bereich des Optimums ist jedoch flach und liegt bei 600 W für die 4.5 kW Kältemaschine, bei 200 W für die 2.5 kW Kältemaschine und bei 400 W für die 1.9 kW Kältemaschine. Wobei das Komfortkriterium mit der 1.9 kW Kältemaschine nicht eingehalten werden kann. Weiter sinkt der COP des Systems im Vergleich zur Referenz anfänglich stark ab um danach langsam mit steigender Einschaltsschwelle wieder zu steigen. Der tiefere COP hat zwei Hauptgründe. Erstens, die Verluste - vor allem Speicherverluste - durch die tiefen Temperaturen (-5°C) im Kältespeicher steigen und zweitens, der COP der Wärmepumpe ist bei tiefen Temperaturen schlechter



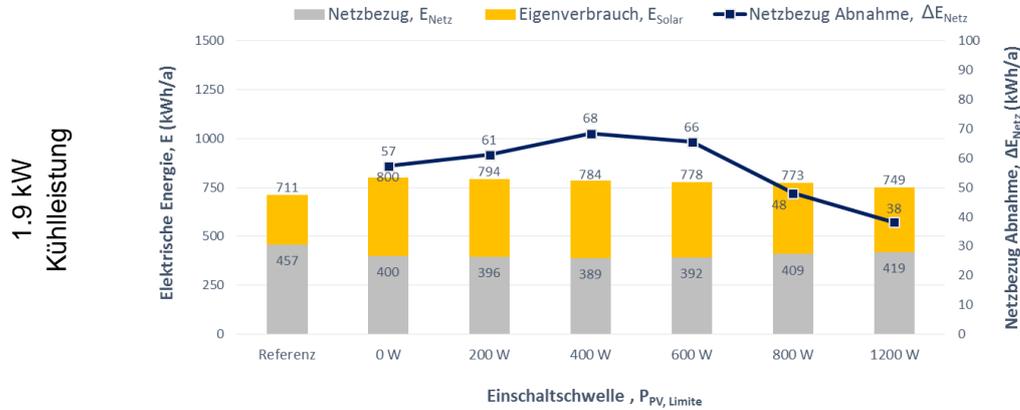


Abbildung 40 Elektrische Energie zur Kühlung: Elektrische Energie, aufgeteilt in „Solar“ und „Netz“, die jährlich zur Kühlung verbraucht wird, in Abhängigkeit der Leistung der Kühlmaschine und der Einschaltswelle $P_{PV, Limite}$. Die Kältemaschine wird mit einer Leistung von 4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW betrieben. Im Diagramm ist auf der rechten vertikalen Achse zudem die Reduktion des Anteils aus dem Netz (Netzbezug Abnahme) aufgetragen.

In Abbildung 40 ist die total benötigte elektrische Energie (E_{Tot}) aufgetragen. Diese nimmt mit zunehmender Einschaltswelle $P_{PV, Limite}$ ab. Die Erklärung dazu ist wie in Abbildung 39, diesmal aber durch die Zunahme des COP. Die aus dem Netz bezogene elektrische Energie E_{Netz} sinkt bis zu einer bestimmten Einschaltswelle ab, danach steigt sie wieder an. Die Netzbezugsabnahme hat bei der Einschaltswelle 1200 W für die 4.5 kW Kältemaschine, bzw. bei 400 W für die beiden kleineren Kältemaschinen von 2.5 kW und 1.9 kW, ein Maximum. Damit würde man für einen hohen Eigenverbrauch die Einschaltswelle auf das Maximum der Netzbezugsabnahme setzen. In den nun folgenden zwei Abbildungen (Abbildung 41 und Abbildung 42) wird die Kühlleistung der Kältemaschine variiert bei optimierter Einschaltswelle $P_{PV, Limite}$.

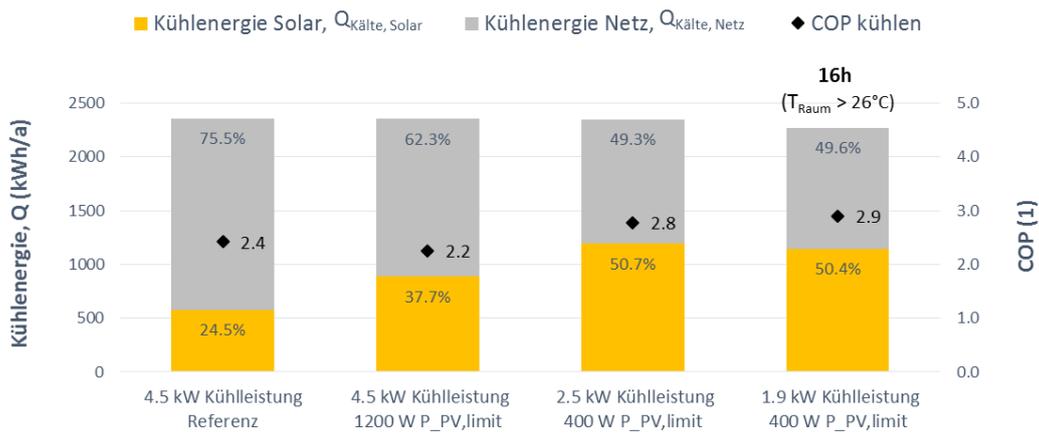


Abbildung 41 Kühlenergie und COP in Abhängigkeit der Kühlleistung der Kältemaschine und der Einschaltswelle. Als $P_{PV, Limite}$ wurde die optimierten Werte 1200 W für die 4.5 kW Kältemaschine und 400 W für die 2.5 kW und 1.9 kW Kältemaschine verwendet. Bei einer Leistung von 1.9 kW der Kühlmaschine ist die Raumtemperatur während 16 h höher als die Komfortlimite von 26°C.

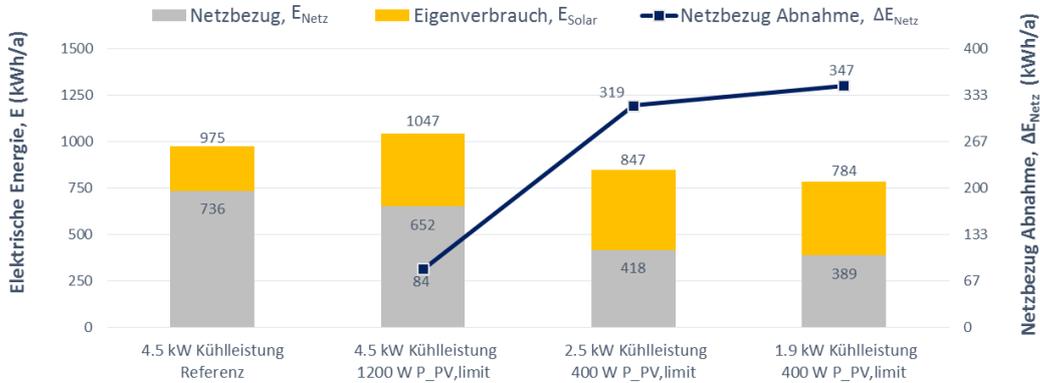
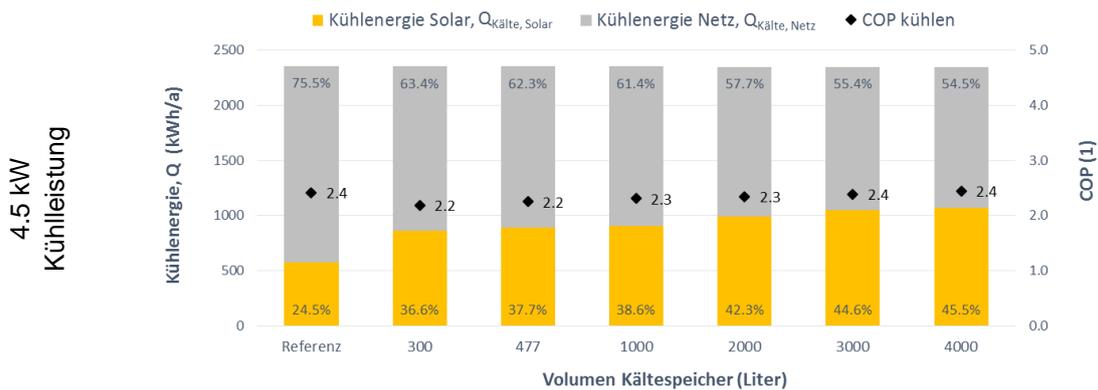


Abbildung 42 Elektrischer Energieverbrauch des Systems, sowie die Netzbezugsabnahme in Funktion der Kühlleistung. Als $P_{\text{PV,Limit}}$ wurde die optimierten Werte 1200 W für die 4.5 kW Kältemaschine und 400 W für die 2.5 kW und 1.9 kW Kältemaschine verwendet.

Abbildung 41 zeigt, dass durch den Wechsel vom Modus „Komfort“ (Referenz) in den Modus „Solar“ die Solare Kühlenergie $Q_{\text{Kälte,Solar}}$ erhöht werden kann. Eine weitere Erhöhung der Solaren Kühlleistung kann durch den Einsatz einer kleineren Kältemaschine erzielt werden. Die Begründung für diesen Effekt liegt erstens in der besseren Anpassung der elektrischen Bezugsleistung der Kältemaschine auf die PV Leistung der Anlage von 2.56 kWp. Bei der Kältemaschine mit 2.5 kW Kühlleistung beträgt die elektrische Bezugsleistung 0.7 kW und für die Kältemaschine mit 1.9 kW Kühlleistung 0.5 kW. Zweitens steigt der Wirkungsgrad des Systems aufgrund der höheren Kältespeichertemperaturen. Zu beachten ist jedoch, dass die Komfortkriterien noch eingehalten werden. Wobei dies mit der kleinsten Kältemaschine (1.9 kW) während 16 h nicht erreicht wurde. Abbildung 43 zeigt die Resultate zur Variation des Volumens des Kältespeichers in drei Diagrammen.



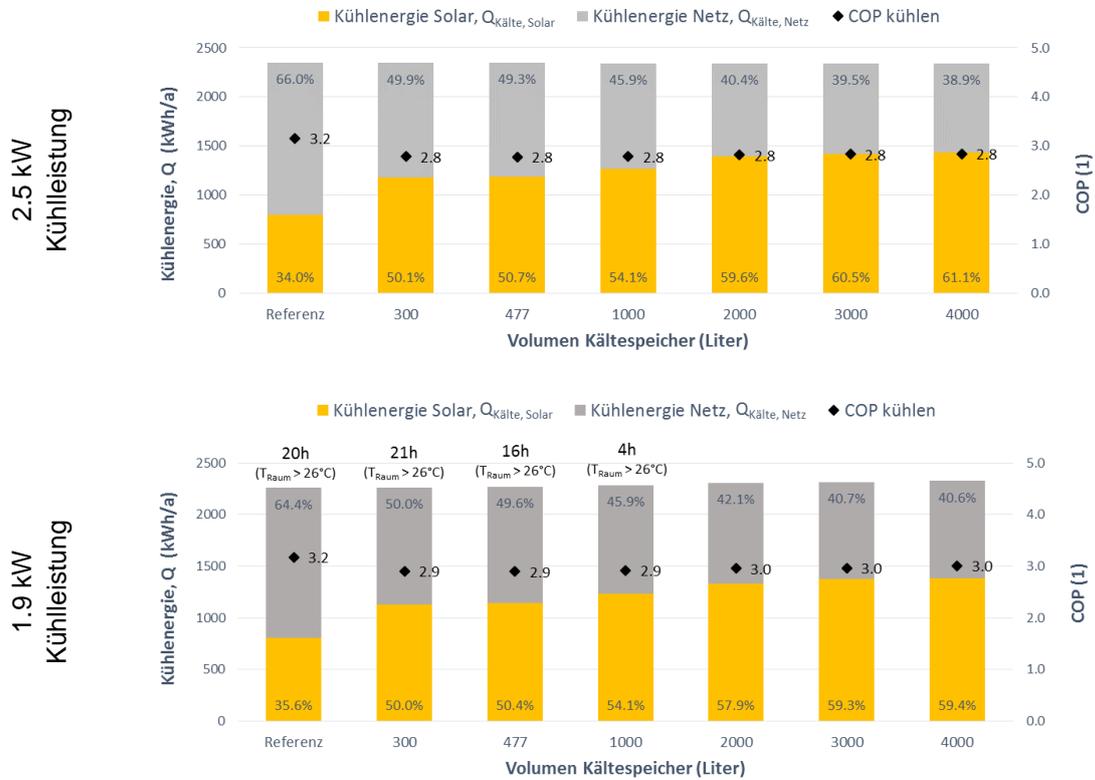


Abbildung 43 Speichervolumen: Über die Kälteverteilung abgegebene Kühlenergie sowie COP in Abhängigkeit des Kältespeichervolumens. Die Kältemaschine wird mit einer Leistung von 4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW betrieben. Für die Kältemaschine mit 1.9 kW Kühlleistung ist der Komfort für die kleinen Speichervolumina (300 l bis 1000 l) nicht gewährleistet.

Mit steigendem Volumen des Kältespeichers nimmt solar erzeugte (gewandelte) Kühlenergie zu. Dies ist nachvollziehbar, denn durch die Vergrößerung des Volumens kann an sonnigen Tagen mehr el. PV Energie in solare Kühlenergie umgewandelt und als thermische Kühlenergie gespeichert werden. Weiter ist durch die Vergrößerung des Kältespeichervolumens die Kältespeichertemperatur höher, was sich in einem leicht höheren System COP ($COP_{\text{kühlen}}$) niederschlägt. Die Zunahme der solaren Kühlenergie pro Volumen Kältespeicher nimmt jedoch bei grossen Kältespeichervolumina stark ab, so ist zum Beispiel für die Kältemaschine mit 2.5 kW Kühlleistung die Zunahme an solarer Kühlenergie zwischen dem 3000 Liter Kältespeicher und dem 4000 Liter Kältespeicher nur noch 0.6%. Ausserdem kann man bei Systemen mit knapp ausgelegter Kühlleistung, mit einem grossen Kältespeichervolumen den Komfort verbessern. Es können damit kurzfristig auftretende Kühllastspitzen abgedeckt werden. Dies zeigt die Grafik zur Kühlleistung von 1.9 kW, dort ist erst ab einem Kältespeichervolumen von 2000 Liter der volle Komfort gewährleistet.

Die weiterführenden Ergebnisse zeigen nun den Einfluss des Volumens V des Kältespeichers auf den Bezug an elektrischer Energie aus dem Netz, Abbildung 44. Das Volumen wird von 300 l bis auf 4000 l vergrössert, wobei das Referenzsystem einen Kältespeicher von 477 l hat und im Modus Komfort läuft.

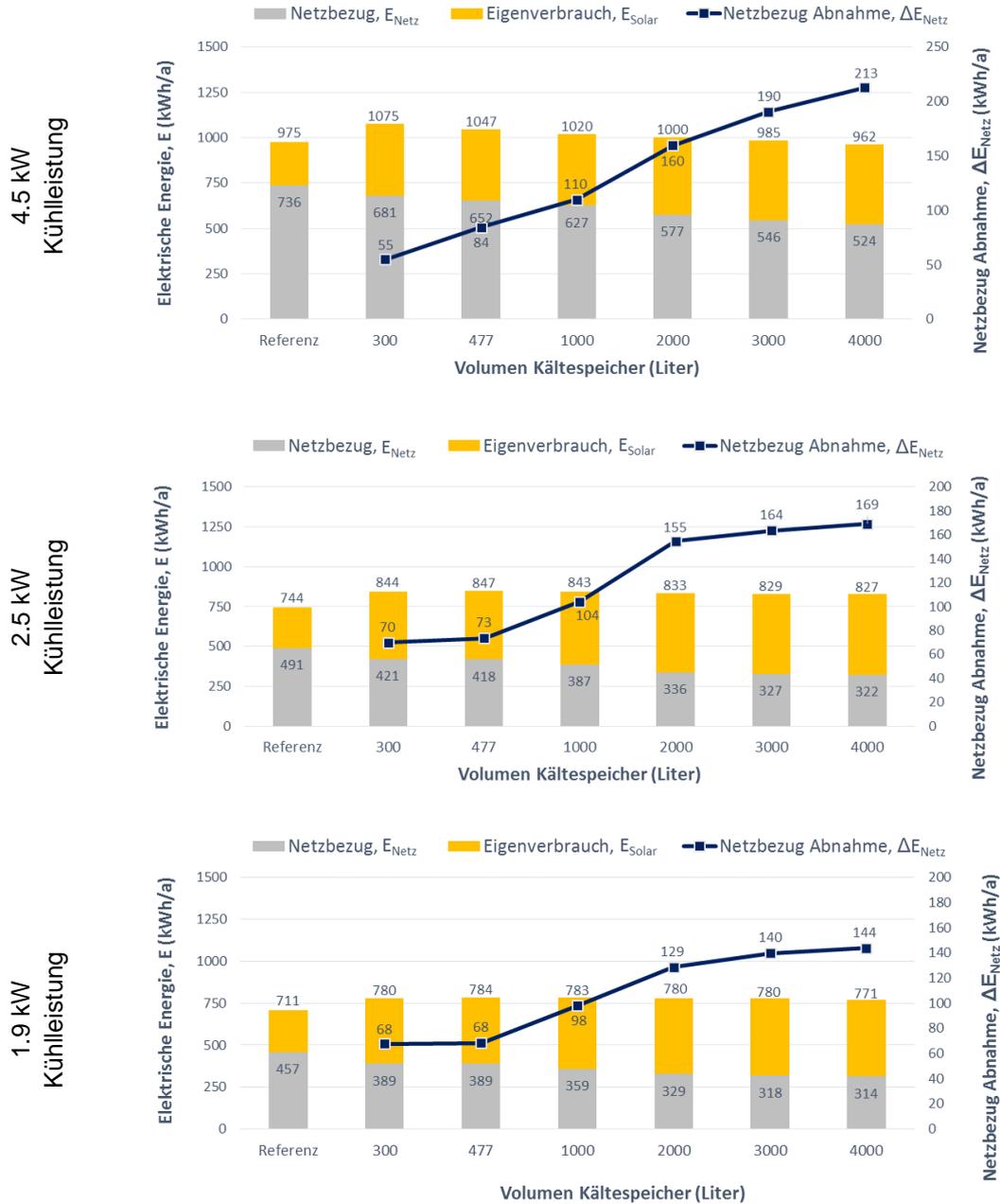


Abbildung 44 Reduktion des Anteils aus dem Netz: Elektrische Energie sowie die Netzbezug Abnahme in Funktion des Kältespeichervolumens. Die Kältemaschine wird mit einer Leistung von 4.5 kW, 2.5 kW und 1.9 kW betrieben. Mit steigendem Volumen des Kältespeichers reduziert sich der Anteil aus dem Netz.

Die benötigte elektrische Energie, welche für die Kältebereitstellung sowie die Kälteverteilung verwendet wird, nimmt mit steigendem Kältespeichervolumen leicht ab. Begründen lässt sich dies mit dem leicht ansteigenden System COP, welcher in Abbildung 43 ersichtlich ist. Gut zu sehen ist auch, dass für alle Kältemaschinenleistungen die bezogene Netzenergie mit steigendem Volumen abnimmt. Bei der 4.5 kW Kältemaschine ist die Netzbezugsabnahme bis zum Speichervolumen von 4000 Liter nahezu linear steigend. Bei den kleineren Kältemaschinen flacht die Netzbezugsabnahme hin zu den grossen Speichervolumen langsam ab.



6 Ökonomische Aspekte

In den Arbeiten zum vorliegenden Projekt wurde der Fokus vorwiegend auf Aspekte der Anlagentechnik und deren Steuerung sowie der Simulation gelegt. Die Kosten der Anlage standen dabei nicht direkt im Vordergrund – vor allem nicht die Kostenoptimierung. Zum Vergleich mit einem Kühlsystem ohne PV-Module und ohne Speicher aber mit einer direkten Kälteverteilung ohne Mischventil werden die Anlagenkosten tabellarisch zusammengestellt. Tabelle 5 enthält die Kosten für die PV-Anlage und die Tabelle 6 enthält die Zusatzkosten für die Kälteverteilung. Die Tabelle 7 enthält die Kosten für eine (übergeordnete) Steuerung, welche im aufgebauten System zwar nicht vorhanden ist, die aber notwendig wäre, wenn kein Gebäudeleitsystem dazu genutzt werden kann oder die Steuerung der Kältemaschine nicht entsprechend erweiterbar wäre.

Tabelle 5: Kosten des PV-Teilsystems.

Bezeichnung	Hersteller / Lieferant	Typ	Preis (CHF)
9 PV Module	MEYER BURGER AG	Sky 285	2700
Montagesystem	Bossard	Aufdach 15°	1430
Wechselrichter	SMA	TL2500	1150
Elektroinstallation			3250
Total			8530

Die Kosten für die PV Anlage von CHF 8530 ($P=2.56 \text{ kW}_p$) liegen gemäss PV-Preisumfrage 2015 [7] im Bereich zwischen Aufdach- (CHF 3143/ kW_p) und Indach-Anlagen (CHF 3717/ kW_p). Wobei zum einen der Eigenaufwand zur Module-Montage nicht eingerechnet ist und zum anderen in unserem Fall die relativ grosse Distanz (40 m) von elektrischen Verbrauchern im Labor zur PV-Anlage auf dem Vordach zu berücksichtigen ist. Zudem waren zusätzliche Schutzschalter AC und DC seitig notwendig. Die Elektro-Kabelführung mit Durchbrüchen und Halterung wurde von einem konzessionierten Installateur durchgeführt.

Die Zusatzkosten für den Kältespeicher, Pumpe plus Mischventil und Wärmeträgerfluid betragen CHF 2430. Dies sind gut CHF 300/ kW_{cool} . Bei entsprechender Regelung der Kühlmaschine und Kälteverteilung über einen Monoblock könnte auf die zusätzliche Pumpe und das Mischventil verzichtet werden.

Tabelle 6: Kosten bzw. Zusatzkosten bei der Kälteverteilung.

Bezeichnung	Hersteller / Lieferant	Typ	Preis (CHF)
Kältespeicher	alpha innotec	TPSK 500	1080
Wärmeträger	Harapol Abderhalden AG	Minoltherm (ca. 600 Liter)	600
Mischventil und Regelantrieb	TICOM	3/4 Zoll / EA103	420
Pumpe	Grundfos	Alpha2 25-60 130	330
Total			2430

Falls die Steuerung der Anlage nicht über jene der Kühlmaschine zu machen ist oder auch kein Gebäudeleitsystem vorhanden ist und entsprechend programmiert werden kann, dann würden sich die Zusatzkosten für z.B. eine TA-Steuerung auf CHF 640 belaufen.

Tabelle 7: Kosten System-Steuerung.

Bezeichnung	Hersteller / Lieferant	Typ	Preis (CHF)
Steuerungseinheit	Technische Alternative (TA)	UVR16x2A	580
4 Temperaturfühler (Kältespeicher; Mischventil)	Technische Alternative (TA)	PT1000	60
Total			640



Wie sich die PV-Anlage und dem daraus abzuleitenden Eigenverbrauch auf die Betriebskosten auswirken ist von der lokalen Tarifstruktur für elektrische Energie abhängig und soll hier nicht weiter ausgeführt werden.

Im Hinblick auf eine Optimierung wäre zu prüfen, wie sich der Einsatz eines Speichers mit Phasenänderungsmaterial (PCM) und der dadurch zu erreichenden COP-Erhöhung der Kühlmaschine auf die Investitions- und Betriebskosten auswirken würde. Hingegen ist für eine Inselanlage – eine Anlage ohne Netzanschluss - die Installation einer Batterie als Speicher notwendig, und dies erhöht dann direkt die Investitionskosten. Eine Erweiterung des Anlagenkonzepts mit der Möglichkeit zum kombinierten „Heizen & Kühlen“ schlägt sich weiter auf die Kosten des Systems nieder

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit & Präsentationen

Die Zusammenarbeit mit den Partnern aus der Industrie hat sich auf die Kofinanzierung durch die zur Verfügungsstellung der Hauptkomponenten beschränkt. Es ist geplant diese an einzelnen Treffen über die Arbeiten und Ergebnisse tiefergehend zu informieren. Zudem wurden das Projekt und die daraus erarbeiteten Ergebnisse im Rahmen verschiedener nationaler Workshops präsentiert:

- **Vergleich von Heizungs- und Kühlkonzepten mit Photovoltaik - Validierung der Simulationsergebnisse im Kühlmodus.** Lukas Omlin und Paul Gantenbein. 1. Internationale Konferenz zur Simulation gebäudetechnischer Energiesysteme, SIGES 2016, 8. & 9. September 2016, Winterthur, Schweiz, 2016.
- **Solares Kühlen mit PV getriebener Kühlmaschine unter Einsatz eines thermischen und elektrischen Speichers.** Lukas Omlin, Paul Gantenbein und Daniel Notter. Workshop, Solarenergie und Wärmepumpen, Fokus: Photovoltaik + Wärmepumpe, 16. November 2016, Rapperswil, Schweiz, 2016.
- **Heizen und Kühlen mit PV & Wärmepumpe - Testverfahren, Simulationen, Produktentwicklung.** Lukas Omlin und Robert Haberl. SPF Industrietag, 1. März 2017, Rapperswil, Schweiz, 2017.
- **Solare Raumkühlung mit einer PV getriebenen Kompressor Kühlmaschine.** Lukas Omlin, Paul Gantenbein. 15. Nationale Photovoltaik – Tagung, 23. und 24. März 2017. EPFL Lausanne, Suisse, 2017.

Das Projekt („solar PV cooling“) wurde im September 2015 am 4th IEA SHC Task 53 Meeting in Bozen vorgestellt und diskutiert. Weitere Präsentationen und Diskussionen im Rahmen des Tasks 53 fanden 2016 in Madrid und La Palma statt. Über die Laufzeit des Projektes hinaus klären wir mit den nationalen Partnern, ob und welche Messdaten den Task 53 Teilnehmern zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt werden können. Zudem wurden - bzw. werden - Präsentation und Veröffentlichungen an verschiedenen internationalen Konferenzen – z.B. EU-PVSEC 2016 in München – gemacht:

- **Key model of PV solar cooling.** A. Snegirjovs, P. Gantenbein, M. Rommel. The 12th International Conference of Young Scientists on Energy Issues, May 27-28 2015, Kaunas, Lithuania, 2015.
- **Improved model of combined PV solar cooling and free cooling system.** Andrejs Snegirjovs, Paul Gantenbein, Lukas Omlin, Peteris Shipkovs. OTTI 6th International Conference on Solar Air-Conditioning, September 24/25 2015, Rome Italy, 2015.



- **Combined PV solar compression cooling and free cooling system.** Paul Gantenbein, Lukas Omlin, Daniel Notter and Andrejs Snegirjovs. EU PVSEC 2016 32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 20 – 24 June 2016, Munich, Germany, 2016.
- **Raumkühlung mit einer PV getriebenen Kompressor Kühlmaschine und hohem Eigenstromverbrauch.** Paul Gantenbein, Lukas Omlin, Daniel Notter. OTTI 32. PV-Symposium 8. bis 10. März 2017, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Deutschland, 2017.

8 Bewertung und Ausblick

Ein PV solar-elektrisch angetriebenes System wurde aufgebaut, mit Sensoren ausgerüstet und mit einer entsprechend programmierten Steuerungssoftware betrieben. Die Sensormessdaten wurden zur Validierung eines Simulationsmodells herangezogen. Dazu ist auf Basis der Anlageninstallation ein Polysun-Modell erstellt worden. Die Grösse des Systems mit maximal 8 kW Kühlleistung ist für Anwendungen in der Schweiz auf Grund fehlender Kältelasten in kleinen (Wohn-)Gebäuden als ein „Downscaling“ zu betrachten. Daher sind die Simulationen im Hinblick auf grössere Systeme zur Anwendung in z.B. Büro-, Schulungs- und Konferenzräumen - mit einer Leistung in Bereich von 50 kW durchgeführt worden. Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass nebst der Dimensionierung der Anlage zur Deckung des (Kühl-) Leistungsbedarfs und des Energiebedarfs die Steuerung bzw. deren Schaltpunkte sowie der thermische Speicher die Effizienz stark beeinflussen. Basierend auf unserem (besten) System mittlerer Kühlleistung von 2.5 kW, einer PV-Anlage von 2.56 kWp und einem thermischen Speicher von 2m³ Volumen wäre eine Überprüfung der Ergebnisse an einem grossen System, bzw. in einem entsprechenden Demonstrationsprojekt, sinnvoll und sollte durchgeführt werden. Mit Blick auf den steigenden Komfortbedarf der Gesellschaft, sowie die Temperaturerhöhung auf Grund des Klimawandels (ICPP, 2013: Summary for Policymakers [8]) wird der Kühlenergiebedarf auch in unseren Breitengraden steigen. Als erneuerbare Energiequelle können PV-elektrisch angetriebene Systeme einen substanziellen Beitrag an den Energiebedarf leisten, zumal eine Übereinstimmung an Bedarf und Angebot durch die Solarstrahlung besteht. Ein verstärkter Fokus ist auf die Speicherung der Solarenergie zu richten. Diese kann sowohl thermisch in einem Kältespeicher oder elektrisch in einer Batterie erfolgen. Gegenwärtig haben thermische Kältespeicher (noch) einen ökonomischen Vorteil [9]. Im Gegenzug dazu hat ein elektrischer Speicher einen Zusatznutzen, da elektrische Energie sehr vielfältige Anwendung findet. Weiter ist zu bedenken, dass die Dimensionierung der Anlagen stark von der eingesetzten Speichertechnik abhängt. Dies, weil beispielsweise beim Einsatz eines thermischen Speichers die Kältemaschine und das PV-Feld entsprechend – bei bereits optimierter Anlage - grösser ausgelegt werden müssen um den Kühlbedarf in Zeiten ohne Solarstrahlung zu decken. Insbesondere könnten zur Verbesserung des COP der Kühlmaschine Phasenänderungsmaterialien (PCM) mit einer Phasenänderungstemperatur in Bericht von 5 °C bis 10 °C eingesetzt werden. Allerdings wären die Kosten eines solchen Speichers höher. Die Untersuchungen zu all den erwähnten Aspekten sollten in weiteren Projekten durchgeführt werden.

9 Referenzen

- [1] Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings - A Handbook for Planners. Hans-Martin Henning (Ed.), Springer 2004 ISBN 3-211-00647-8.
- [2] Solar Cooling: The earthscan expert guide to solar cooling systems. Paul Kohlenbach and Uli Jakob, Routledge Chapman & Hall; ISBN-10: 0415639751; ISBN-13: 978-0415639750.
- [3] Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik – einschliesslich Warmwasser- und Kältetechnik. Recknagel, Sprenger, Schramek, Oldenburg Industrieverlag München. ISBN 10: 3-8356-3104-7; ISBN 13: 9778-3-8356-3104-5.
- [4] Improved model of combined PV solar cooling and free cooling system. Andrejs Snegirjovs, Paul Gantenbein, Lukas Omlin, Peteris Shipkovs 6th International Conference on Solar Air-Conditioning (Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. OTTI), Rome Italy, 2015.



- [5] DGS Swissolar PV-Leitfaden, 4. Komplet überarbeitete Auflage, 2010. ISBN 978-3-9805738-2-5.
- [6] Das Fachbuch für gute Raumbeglichkeit, 1. Auflage, 2014. ISBN 978-3-033-04774-7.
- [7] PV-Preisumfrage 2015, M. Arnold, L. Konersmann, A. Wanner, M. Suter, ee-news.ch/Energie Zukunft Schweiz, 2016.
- [8] ICPP, 2013: Summary for Policymakers. In: Climatic Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climatic Change (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgely). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- [9] Thermische Energiespeicher im Energiesystem der Zukunft. Christian Doetsch, Deutscher COMTES Workshop, Wissenschaft und Forschung in NRW, International Renewable Energy Storage IRES 2016, Düsseldorf, Deutschland.



11 Anhang

11.1 Kühldecken: Temperaturmessung - Infrarot Messungen

Die Kälteverteilung im Laborraum geschieht über Kühldecken. Zur Kontrolle der Funktion der Kälteverteilung wurden Temperaturmessungen mit einer Infrarot-Kamera (IR) gemacht. Die Emissivität $\epsilon=0.97$ an der Kamera wurde dazu mit Kontakt-Temperaturfühlern ermittelt. Die folgende Abbildung zeigt eine IR-Aufnahme der Kühldeckenbahnen A bis E. Vom Eintritt der Wärmeträgerflüssigkeit (siehe nächster Abschnitt) in die Kühldecken bei E mit $T=8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis zum Austritt bei A mit $T=14.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann den Messdaten ein lineare Funktion hinterlegt werden. Die Abbildung A1 zeigt die Messung an der Kühldecken-Position „vorne“.

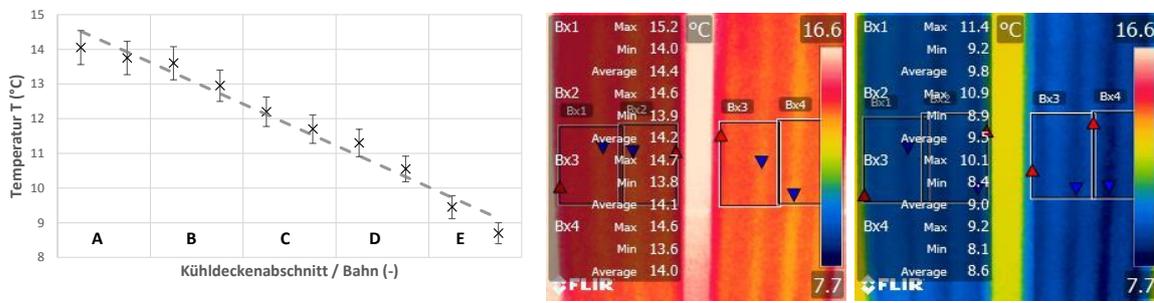


Abbildung A1: Temperaturmessung an den Kühldecken „vorne“ (siehe Abbildung A2): Vom Eintritt der Wärmeträgerflüssigkeit in die Kühldecken bei E bis zum Austritt A kann den Messdaten eine lineare Funktion hinterlegt werden ($T=(14-n*1.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$; mit $n=0..4$, wobei $n=A=0$; $n=B=1$; .. $n=E=4$).

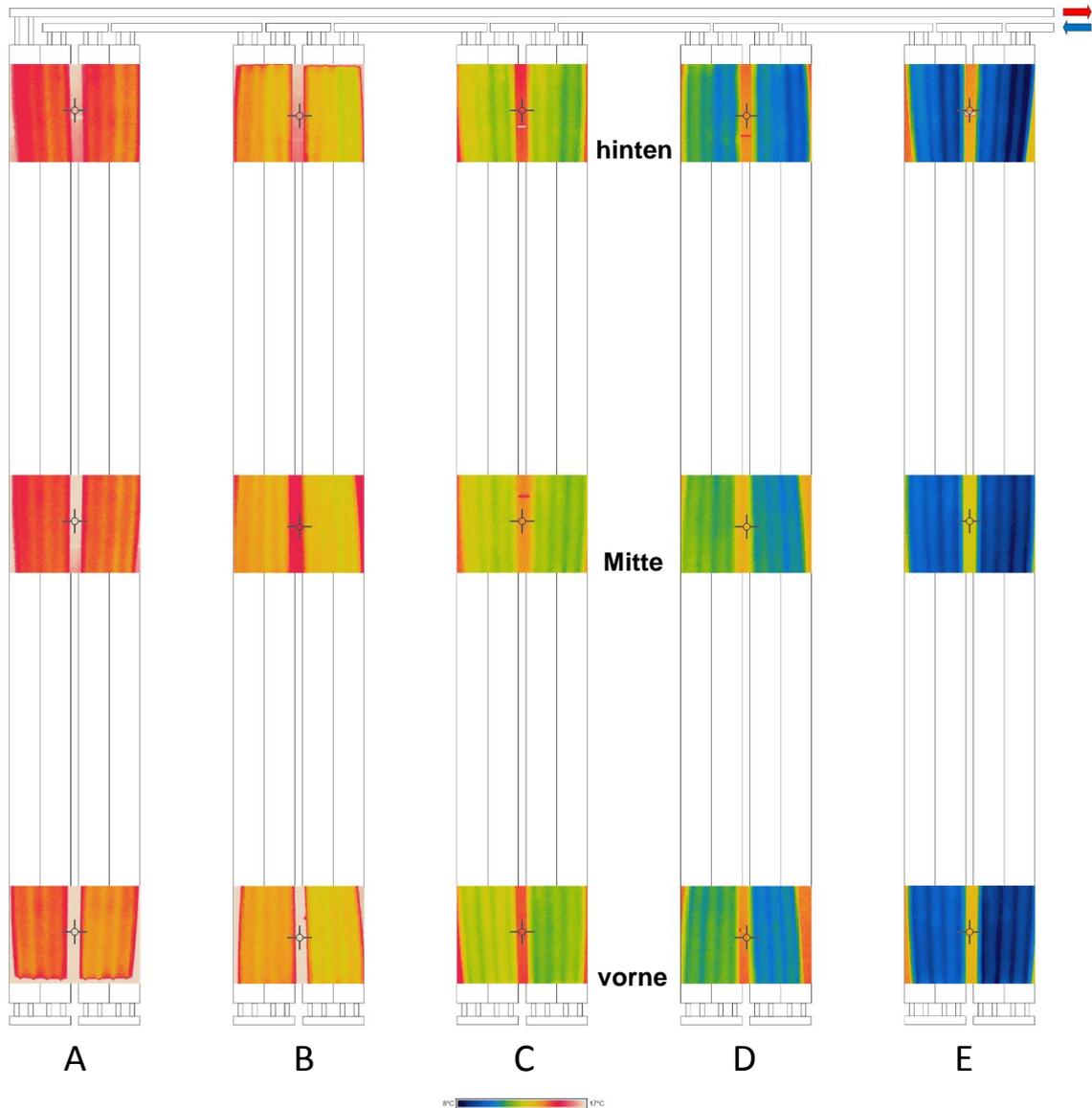


Abbildung A2 Infrarot (IR) Aufnahmen zur Messung der Temperaturverteilung in den Kühldecken. Ein- und Austritt des Kühlmittels ist oben rechts - blauer und roter Pfeil. Die Temperatur bei Abschnitt / Bahn E ist $T=9\text{ °C}$ und diese nimmt linear auf $T=14\text{ °C}$ bei Abschnitt / Bahn A zu.

11.2 Wärmeträger-Flüssigkeit: Mischung Ethanol-Wasser

Als Wärmeträger wurde eine Mischung aus Ethanol-Wasser mit einem Ethanolanteil von 20vol.% eingesetzt. Dieses Fluid hat eine Frostsicherheit bis -18 °C und hat bis 20 °C nach Herstellerangaben eine leicht höhere spezifische Wärmekapazität als Wasser (siehe Tabelle A1). Als Einschränkung gilt eine maximale Einsatztemperatur von 58 °C für dieses Fluid. Die Anwendung dieser Flüssigkeit als Wärmeträger in unserem System ist vorteilhaft, da es mehrheitlich im Kühltemperaturbereich (20 °C und tiefer) betrieben wird, und die Temperaturen in unserem System nicht über die Temperaturlimite steigen. Eine Messung bzw. Überprüfung der spezifischen Wärmekapazität $c_p(T)$ in unserem Labor steht noch aus.



Tabelle A1 Herstellerangaben zu ausgewählten thermo-physikalische Eigenschaften des Wärmeträgers Minoltherm und zum Vergleich für Wasser nach VDI: Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c_p und kinematische Viskosität ν .

Minoltherm	-5 °C	0 °C	5 °C	10 °C	20 °C
ρ (g/cm ³)	0.984	0.984	0.983	0.981	0.977
c_p (kJ/kg*K)	4.37	4.37	4.32	4.31	4.27
ν (mm ² /s)	3.79	2.98	2.39	2.02	1.51

Wasser (VDI)	-5 °C ¹⁾	0 °C	5 °C	10 °C	20 °C
ρ (g/cm ³)	0.9993	0.9998	0.9998	0.9997	0.9982
c_p (kJ/kg*K)	4.236	4.219	4.205	4.195	4.185
ν (mm ² /s)	2.154	1.792	1.518	1.306	1.003

¹⁾ Wasser in unterkühltem Zustand

Die im Kühlsystem verwendeten fluidführenden Rohrleitungen und Apparaten sind auf Grund der eingesetzten Materialien – unterschiedliche Metalle - als „Mischinstallation“ zu bezeichnen. Um eine allfällige Korrosion zu erkennen, wurden einzelne Fluidproben entnommen und dem Lieferanten/Hersteller zur Analyse zur Verfügung gestellt. Abbildung A3 zeigt die Flüssigkeit im Anfangszustand a) und nach ca. 1 ½ Jahren Betrieb bzw. Kontakt zu den fluidführenden metallischen Oberflächen. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Analyse zusammengestellt. Auf Grund der Analysedaten kann – entsprechend der relativ kurzen Betriebszeit - Korrosion ausgeschlossen werden.

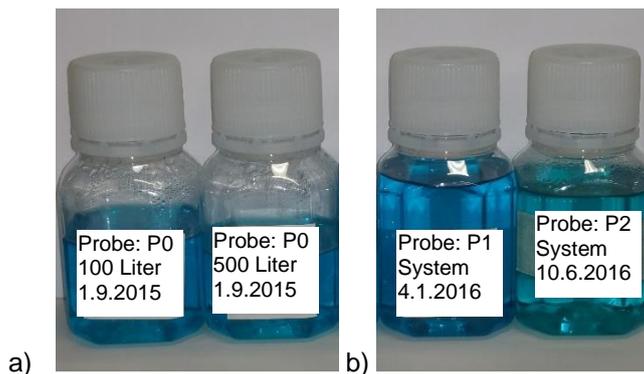


Abbildung A3 Fluidproben aus dem Wärmeträgerkreis. Die Referenzproben P0 (100l) und P0 (500l) aus den Transportbehältern bei Anlieferung a) und die Probe P1 haben die gleiche blaue Farbe. Eine Farbänderung von Probe P1 (blau - nach einiger Betriebszeit) nach Probe P2 (türkis - nach längerer Versuchsperiode) ist deutlich sichtbar b).



Tabelle A2 Auswertung der Fluidproben, welche im Verlauf des Projekts entnommen wurden. Die Probe P1 zeigt untypische, unerwartete Werte. Wahrscheinlich ist bei der Entnahme zusätzliches Kondenswasser in die Probe geraten, daher die etwas höheren Werte für die Dichte bei 20°C und die Frostsicherheit.

Probe	P0 100 I	P0 500 I	P1	P2	P3
Labornummer	5757	5758	5756	5759	(5760)
Datum Probenentnahme	01.09.2015	01.09.2015	04.01.2016	10.06.2016	09.11.2016
Eisen Fe (mg/l)	<0.1	<0.1	0	<0.1	<0.1
Kupfer Cu (mg/l)	<0.2	<0.2	0	<0.2	<0.2
Chlorid (mg/l)	8	11	5	11	16
Dichte bei 20 °C (g/cm ³)	0.975	0.979	0.988	0.977	0.977
pH-Wert @25 °C (fertig Mischung)	8.5	8.66	8.58	8.65	8.65
el. Leitfähigkeit (µS/cm)	2.4	2.46	3.48	2.42	2.42
Alkalinität (ml c(HCl) 0.1M)	18.51	18.45	21.31	18.42	18.4
Frostsicherheit (°C)	-18	-18	-13	-18	-18