

Schlüsselwörter: Kälteerzeugung · Absorptionskälteanlage · Wärmetransformation · Temperaturanhebung

Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlagen können nicht nur zur Klimakälteerzeugung betrieben werden sondern auch als Wärmetransformator zur Unterstützung der Wärmeversorgung durch Anhebung von sonst nicht nutzbaren Temperaturniveaus. Für diese Betriebsweise sind nur einfache Veränderungen im kältetechnischen Kreisprozess und in der Anlagenregelung erforderlich. Die Temperaturerhöhung ist von Randbedingungen abhängig und kann zwischen 5 und 60 K betragen.

Using of H₂O-LiBr-Absorption Refrigerating Plants as Heat Transformer

Keywords: cold generation · absorption refrigeration plant · heat transformer · temperature enhancement

Water-lithiumbromide-absorption refrigeration plants can be used not only to cold generation for air conditioning but also as heat transformer to supporting the heat supply through increasing temperature level of heat which couldn't be used else. Only simple modifications in the refrigeration plant are necessary for this operating method. The temperature enhancement is dependent on different conditions and can amount between 5 and 60 K.

Autor



Dipl.-Ing. Lutz Richter,
Institut für Luft- und
Kältetechnik Dresden

Der Betrieb von H₂O-LiBr-Absorptionskälteanlagen als Wärmetransformator

Einleitung

Die gegenwärtigen Kleinabsorptionskälteanlagen wurden entwickelt, um in Anknüpfung an solarthermische Anlagen oder Klein-BHKW zur Klimakälteerzeugung eingesetzt zu werden. Neben dieser Verwendung kann eine Absorptionskälteanlage jedoch zusätzlich auch zur Unterstützung der Wärmeversorgung betrieben werden.

Generell besitzen Energieversorgungsanlagen die höchste Effizienz innerhalb von Energieverbundsystemen. Beispielsweise sollten solarthermische Anlagen im mitteleuropäischen Raum nicht ausschließlich nur für eine Funktion wie zur solaren Kühlung, Warmwasserbereitung oder Heizungsunterstützung verwendet werden, sondern der Erfüllung aller Aufgaben dienen. Die Kopplung der Absorptionskälteanlage und der solarthermischen Anlage führt durch die sommerliche Wärmenutzung zur Kälteerzeugung zu einer Erhöhung der jährlichen solaren Erträge der Solaranlage. Jedoch könnte eine Absorptionskälteanlage die solaren Erträge auch im Winter erhöhen, wenn diese als Wärmetransformator betrieben werden kann. Bei dieser Funktion wird ähnlich einer Wärmepumpe das Temperaturniveau einer Wärmequelle erhöht. Jedoch auch andere Anwendungen einer als Wärmetransformator betriebenen Absorptionskälteanlage sind möglich:

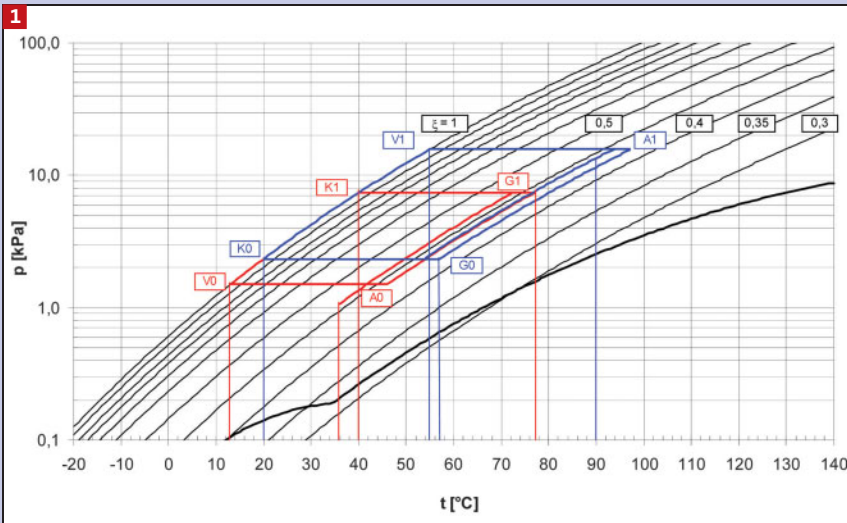
- Erhöhung des Temperaturniveaus der BHKW-Abwärme, wenn diese auf dem anfallenden Temperaturniveau nicht benötigt wird oder wenn eine ausreichend tiefe Rücklauftemperatur nicht gewährleistet werden kann
- Erhöhung des Temperaturniveaus von BHKW-Abwärme bspw. zur Dampferzeugung
- Erhöhung der Speicherkapazität eines Wärmespeichers durch Temperaturabsenkung eines Teils des Wärmespeichers und Anhebung der Speichertemperatur eines anderen Teils
- Heizungsunterstützung bei zu geringen Wärmespeichertemperaturen und keinem Betrieb der Solaranlage durch Nutzung der niedrigen Wärmespeichertemperatur als Wärmequelle

- Temperaturerhöhung in Warmwasserspeichern zur Legionellenvermeidung, wenn bspw. das Temperaturniveau der solarthermischen Anlage dazu nicht ausreicht

Da jedoch nur rd. 48% der zugeführten Wärme auf höherem Temperaturniveau nutzbar sind, müssen bei einem Wärmetransformatorbetrieb einige grundlegende Voraussetzungen erfüllt sein. Es muss ausreichend Wärme auf einem nicht nutzbaren Temperaturniveau kostenlos zur Verfügung stehen. Der Wärmebedarf auf dem höheren Temperaturniveau sollte außer bei solarthermischen Anlagen erheblich kleiner als das Abwärmeangebot sein, damit eine Kompressionswärmepumpenanwendung nicht effektiver und sinnvoller ist. Und in der Regel sollte der Wärmetransformatorbetrieb eine zusätzliche Betriebsweise einer zur Kälteerzeugung vorhandenen Absorptionskälteanlage sein.

Betriebsweise eines Wärmetransformators

Vereinfacht ausgedrückt ist ein Wärmetransformator (WTR) eine Absorptionskälteanlage, die mit einem „auf den Kopf“ gestellten Prozessverlauf betrieben wird. Verdampfer (V) und Absorber (A) arbeiten auf dem hohen Druckniveau (1), Kondensator (K) und Generator (G) auf dem Niederdruckniveau (0). Die Wärmezufuhr in den Sorptionsprozess erfolgt auf mittlerem Temperaturniveau im Verdampfer und Generator. Ein Teil dieser Wärmemenge kann dann aus dem Absorber bei hoher Temperatur wieder ausgekoppelt und genutzt werden. Der andere Teil der zugeführten Wärme muss im Kondensator auf einem tiefen Temperaturniveau an die Umgebung abgegeben werden. Durch die Wärmetransformation können rd. 48% der zugeführten Energie auf ein nutzbares hohes Temperaturniveau gebracht werden. Dies ist sinnvoll, wenn die nieder exergetische Wärme ohne diesen Wärmepumpenprozess nicht nutzbar wäre und vollständig verloren ginge. In Abb. 1 sind der Absorptions- und der Wärmetransformatorprozess im log p-t-Diagramm dargestellt.

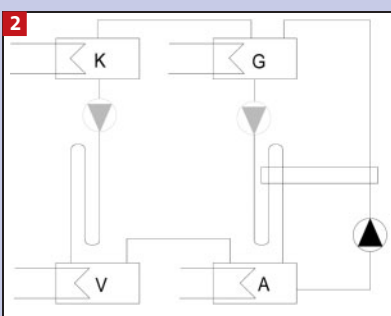


1 Vergleich der Kreisprozesse der Betriebsweisen Kälteerzeugung und Wärmetransformation einer H₂O/LiBr-Absorptionskälteanlage im log p/1-T-Diagramm

Abb. 2 ist ein vereinfachtes Schaltschema eines Wärmetransformators zu entnehmen. Der Vergleich von Absorptionskälteanlage mit einem Wärmetransformator zeigt, dass nur sehr wenige Modifikationen an der Kleinabsorptionskälteanlage für einen WTR-Betrieb notwendig sind. Zur Druckerhöhung für das Kältemittelkondensat ist eine Kondensatpumpe erforderlich und zur Druckerhöhung der armen Lösung eine weitere Lösungsmittelpumpe (grau). Letztere ist in größeren Absorptionskälteanlagen der Fa. EAW bereits vorhanden, wobei bei höheren Temperaturen der größere Drucksprung zu beachten ist. Weitere kreisprozessinterne Modifikationen sind für einen Wärmetransformatorbetrieb nicht erforderlich. Weitere Änderungen sind nur in der Regelung und Ansteuerung der Anlage sowie in der hydraulischen Anbindung der externen Medien vorzunehmen.

Mögliche Temperaturerhebungen

In Abb. 3 sind die möglichen Temperaturerhebungen Δt_{Hub} dargestellt. Es ist ersichtlich, dass diese mit höheren Wärme-



2 Vereinfachtes Kreislaufschema eines Wärmetransformators

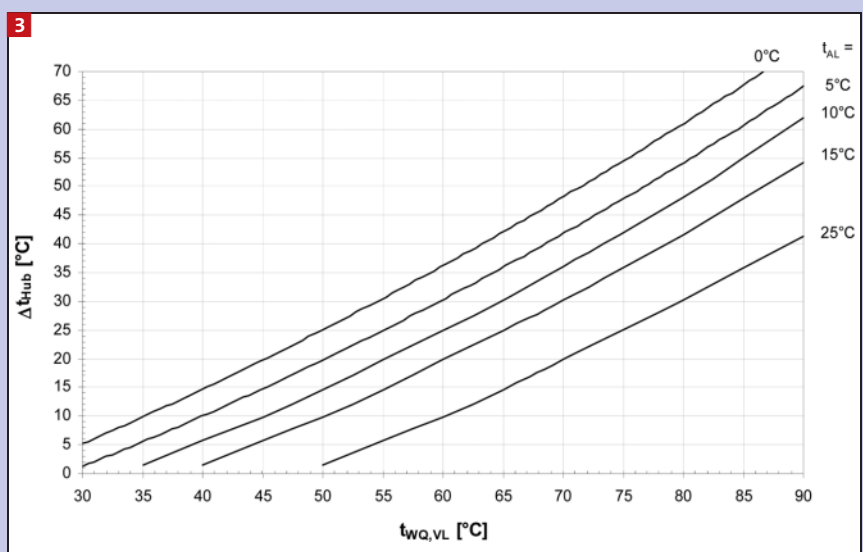
quellen- und tieferen Rückkühltemperaturen steigen. Der Abb. 3 liegen folgende Annahmen zu Grunde. Die Kondensationstemperatur t_k liegt 10 K über der Außenlufttemperatur t_{AL} , die Geratorendtemperatur t_G 3 K unter der Wärmequellenvorlauftemperatur $t_{\text{WQ,VL}}$, die Verdampfungstemperatur t_o 4 K unter t_G und die Absorptionstemperatur t_{ABS} 2 K über der Heizwasservorlauftemperatur $t_{\text{HW,VL}}$. Der Temperaturhub, Temperaturerhebung, ergibt sich aus der Differenz von $t_{\text{HW,VL}} - t_{\text{WQ,VL}}$. Als maximaler spezifischer Lösungsumlauf des Kreisprozesses wurde ein Wert von 30 angesetzt. Besitzt die Wärmequelle bspw. eine Temperatur von 40 °C und kann die Rückkühlung

bei 5 °C realisiert werden, kann eine Temperaturerhebung um 10 K erreicht werden. Bei einer Wärmequellentemperatur von 70 °C und einer Außenlufttemperatur von 15 °C beträgt die Temperaturerhebung sogar 30 K.

Die Leistung des Wärmetransformators ergibt sich aus der Auslegung der Absorptionskälteanlage und ist abhängig von der Rückkühltemperatur (hier Außenlufttemperatur), der Wärmequellentemperatur und der Heizwasservorlauftemperatur. Nach einer Abschätzung hätte die Absorptionskälteanlage SE 15 der Fa. EAW, die für 15 kW Kälteleistung bei den Temperaturen Kaltwasseraustritt 11 °C, Heizwassereintritt 90 °C und Kühlwassereintritt 30 °C ausgelegt ist, im Wärmetransformatorbetrieb eine Heizleistung \dot{Q}_{ABS} von ca. 22 kW bei $t_{\text{AL}} = 10$ °C, $t_{\text{WQ,VL}} = 70$ °C und $t_{\text{HW,VL}} = 95$ °C bzw. ca. 12 kW Heizleistung bei $t_{\text{AL}} = 0$ °C, $t_{\text{WQ,VL}} = 32,5$ °C und $t_{\text{HW,VL}} = 40$ °C. Es wurde angenommen, dass mit den in der Anlage installierten Pumpen die Lösungsmassenströme in erster Näherung konstant sind.

Anwendungsmöglichkeiten von Wärmetransformatoren

Ein Betrieb einer Absorptionskälteanlage als Wärmetransformator besitzt, wie bereits erwähnt, nur Sinn, wenn Abwärme kostenlos in ausreichender Menge zu Verfügung steht und diese ohne einen Wärmetransformatorbetrieb an die Umgebung abgegeben werden müsste. Für einen Wärmetransformatorbetrieb der Absorptionskälteanlage sind neben den kreisprozessinternen Modi-



3 Möglicher Temperaturerhebung durch einen H₂O/LiBr-Wärmetransformator in Abhängigkeit der Wärmequellen- und der Außenlufttemperatur

fikationen Änderungen in der Anbindung der externen Medien des Heiz-, Kühl- und Kaltwasserkreislaufs erforderlich. Diese Änderungen können beispielhaft der Abb. 4 entnommen werden. Die stärker gezeichneten Linien repräsentieren den Kälteerzeugungsbetrieb.

Nachfolgend werden 3 mögliche Anwendungen für einen Wärmetransformatorbetrieb von Absorptionskälteanlagen näher erläutert.

Anwendung innerhalb von BHKW-Anlagen

Innerhalb von BHKW-Anlagen sind zwei Anwendungen denkbar und sinnvoll. Würde bspw. die BHKW-Abwärme von 90 °C zur Wärmeversorgung bzw. Kälteerzeugung, im Sommer oder in Übergangszeiten, nicht benötigt und müsste diese bei stromgeführter Fahrweise des BHKW über einen Notkühler an die Umgebung abgeführt werden, könnte mit der Abwärme, wenn benötigt,

Dampf erzeugt werden. Bei einer Außenlufttemperatur von 25 °C wäre eine Temperaturerhöhung auf rd. 130 °C möglich. Eine zweite BHKW-Anwendung könnte bestehen, wenn die Rücklauftemperatur zum Kühlen des BHKW den maximal zulässigen Wert überschreitet. In diesem Falle könnte über den Wärmetransformatorbetrieb der Rücklauf ausgekühlt werden mit dem Ergebnis, dass die Hälfte der Auskühlungswärme als höher temperierte Wärme nutzbar wäre.

Anwendung innerhalb von solarthermischen Anlagen

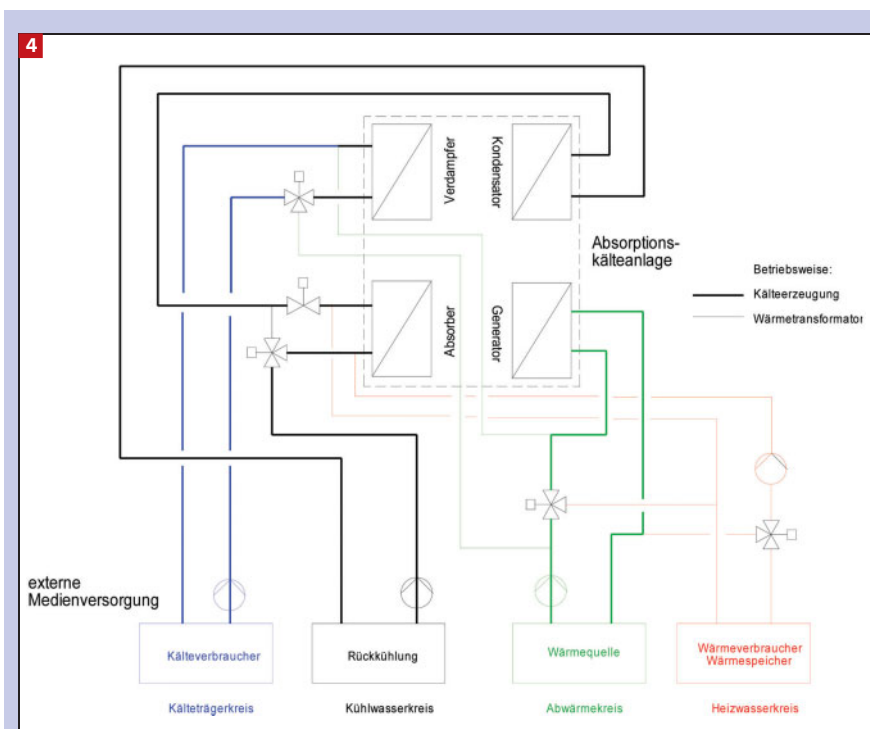
Solare Kühlung ist zum Beispiel in Deutschland nur effektiv in Verbindung mit einer Heizungsunterstützung in der Heizsaison. Unter dieser Voraussetzung ist die Untersuchung der Erweiterung der Anwendung der Absorptionskälteanlage auf Wärmetransformatorbetrieb zur Anhebung des aus der solarthermischen Anlage kommenden Temperaturniveaus sinnvoll.

Der Kollektorkoeffizient einer solarthermischen Anlage ist abhängig von der mittleren Übertemperatur zur Umgebung $(t_{m,Koll} - t_{AL})$, der Einstrahlung E_G und natürlich von der Gestaltung des Kollektors. Er berechnet sich wie folgt:

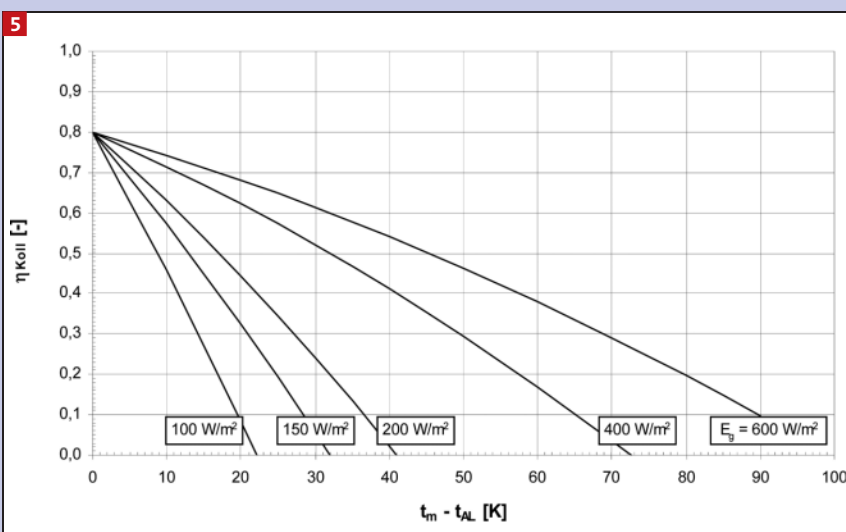
$$\eta_{Koll} = \eta_0 - a_1(t_{m,Koll} - t_{AL}) / E_G - a_2(t_{m,Koll} - t_{AL})^2 / E_G$$

Für den Flachkollektor infinity der Fa. Phönix bspw. betragen die Kollektorkoeffizienten $\eta_0 = 0,8$, $a_1 = 3,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $a_2 = 0,0161 \text{ W/m}^2\text{K}^2$, für den Vakuumröhrenkollektor ETC 16 der Fa. Schott $\eta_0 = 0,773$, $a_1 = 1,09 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $a_2 = 0,009 \text{ W/m}^2\text{K}^2$. In der Abb. 5 sind für ersten Kollektorkoeffizienten dargestellt.

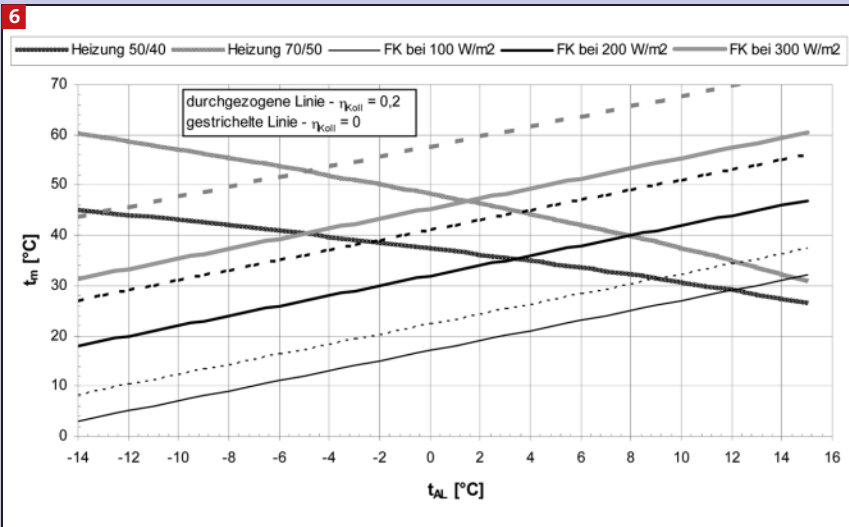
Aus Abb. 5 ist ersichtlich, dass vom Kollektor nicht immer nutzbare Temperaturen geliefert werden können. Bei einem Kollektorkoeffizienten größer 0 beginnt eine solare Wärmegewinnung. Erreichbare mittlere Kollektortemperaturen, mittlere Temperatur aus Ein- und Austritt des Kollektorkreislaufs, sind beispielhaft in Abb. 6 dargestellt. Bspw. kann bei einer Einstrahlung von 200 W/m² auf einen Flachkollektor Typ infinity und einer Außenlufttemperatur von 2 °C sowie bei einem sich einstellenden Kollektorkoeffizienten von 0,2 eine mittlere Kollektortemperatur von 34 °C erreicht werden. Bei einer außenlufttemperaturgeregelten Niedertemperaturheizung, Auslegung 50 °C–40 °C, wäre jedoch bei 2 °C Außenlufttemperatur eine mittlere Heizungstemperatur von 36,3 °C erforderlich. Die Kollektortemperatur ist folglich zur Heizungsunterstützung nicht nutzbar. Über eine Wärmetransformation kann die Kol-



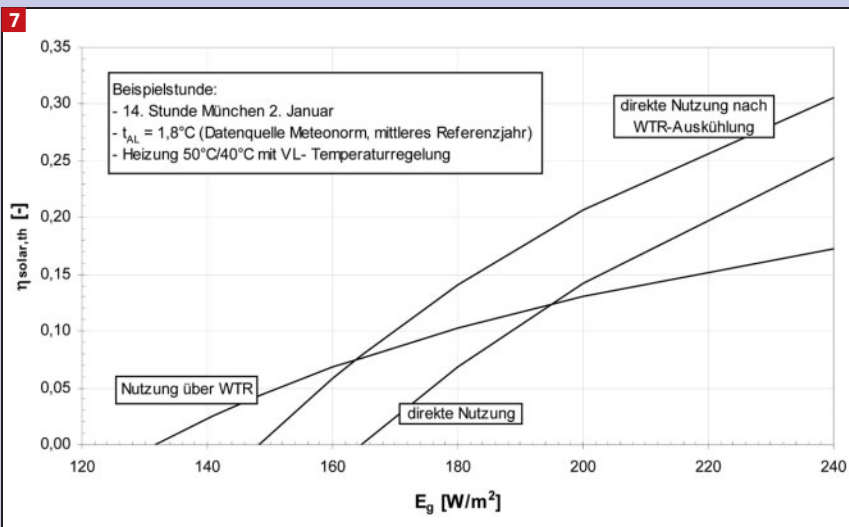
4 Vereinfachtes Schaltschema der externen Medienversorgung für die Betriebsweisen Kälteerzeugung und Wärmetransformation



5 Kollektorkoeffizient des Flachkollektors Typ infinity Fa. Phönix in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur und der Gesamteinstrahlung



6 Vergleich von erforderlichen mittleren Heizungstemperaturen mit erreichbaren mittleren Kollektortemperaturen für den Flachkollektor Typ infinity Fa. Phönix in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur und der Gesamteinstrahlung



7 Vergleich der solarthermischen Wirkungsgrade bei unterschiedlichem Anlagenbetrieb für den Flachkollektor Typ infinity Fa. Phönix in Abhängigkeit der Gesamteinstrahlung

lektortemperatur auf ein nutzbares Niveau gehoben werden.

In Abb. 6 sind weiterhin die mittlere Heizungstemperatur einer $70^\circ\text{C}/50^\circ\text{C}$ -Heizung sowie andere erreichbare mittlere Kollektortemperaturen für den Flachkollektor Typ infinity Fa. Phönix in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur und der Gesamteinstrahlung dargestellt. Für einen Wärmetransformatorbetrieb in solarthermischen Anlagen kommen nur Zeitpunkte in Betracht, bei denen ein kleiner Temperaturhub erforderlich ist.

Die Möglichkeit eines Wärmetransformatorbetriebes innerhalb von solarthermischen Anlagen käme natürlich nur in Betracht, wenn eine Kleinabsorptionskältean-

lage zur solaren Kühlung bereits installiert wäre, da eine Nutzung der direkt nicht nutzbaren Kollektortemperaturen als Wärmequelle für eine Kompressionswärmepumpe selbstverständlich eine bessere Lösung zur Erhöhung der solaren Erträge wäre.

Erste abschätzende Simulationen mit Klimadaten aus dem Datensatz Meteonorm ergaben, dass der Wärmetransformatorbetrieb einer vorhandenen Absorptionskälteanlage punktuell sinnvoll ist, eine erhebliche Erhöhung der solaren Erträge über die Heizsaison aber bisher nicht errechnet wurde. Eine praktische Vermessung ist diesbezüglich zur Bewertung erforderlich.

In Abb. 7 werden für die 14. Stunde des 2. Januar Ort München, Datensatz mittleres

Referenzjahr Meteonorm, erreichbare solarthermische Wirkungsgrade verglichen. Die statistische Gesamtstrahlung E_G bei 40° Kollektorneigung und 0° Azimut wurde mit 141 W/m^2 angegeben. Bei diesem Wert ist eine direkte Nutzung der Kollektortemperatur des Flachkollektors Typ infinity Fa. Phönix nicht möglich, eine geringfügige Nutzung der Solarwärme über einen Wärmetransformatorbetrieb jedoch schon. In $\eta_{solar,th}$ ist das Wärmeverhältnis der Wärmetransformation, Quotient aus Nutzwärme zur zugeführten Wärme, berücksichtigt. Bei dem betrachteten Punkt wird eine direkte Nutzung der Kollektortemperatur erst bei einer Einstrahlung von über 190 W/m^2 günstiger gegenüber der Wärmetransformation.

Jedoch kann der Kollektoreffizienzgrad auch über die Senkung der mittleren Kollektortemperatur gesteigert werden. Das kann erreicht werden, wenn die Soleeintrittstemperatur in den Kollektor gesenkt wird. Die Austrittstemperatur kann dabei konstant bleiben. Dieser Sachverhalt liegt der Kurve zu Grunde, die in Abb. 7 als direkte Nutzung nach WTR-Auskühlung bezeichnet wurde. Praktisch wäre dies wie folgt zu realisieren. Der Solarspeicher wird über den Wärmetransformatorbetrieb der Absorptionskälteanlage unter Erzeugung nutzbarer Heizwärme ausgekühlt und eine tiefere Eintrittstemperatur in den Kollektor als die aus dem Heizungssystem kommende steht zur Verfügung. Hinsichtlich der wahren energetischen Beträge sind diese Varianten weiter zu untersuchen.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit eines Wärmetransformators innerhalb von solarthermischen Anlagen kann in der Temperaturerhöhung eines Warmwasserspeichers zur Legionellenvermeidung bestehen, wenn das Temperaturniveau der solarthermischen Anlage dazu nicht ausreichen sollte.

Anwendung innerhalb von Wärmespeichersystemen

Je höher das Temperaturniveau der Wärmequelle ist, desto höher ist auch der Temperaturhub des Wärmetransformators. Dies kann beispielsweise für Wärmespeicher ausgenutzt werden. Eine hydraulische Anbindungsmöglichkeit einer Absorptionskälteanlage an einen Schichtenspeicher für den Wärmetransformatorbetrieb ist in Bild 8 skizziert. Der Speicher wurde in 4 Temperaturzonen unterteilt. Die Wärmequelle kann an 2 Stellen eingespeist und der Speicher je nach Betriebsweise an 3 Stellen genutzt werden. Die Nutzung kann direkt durch den Wärmeverbraucher erfolgen aber auch als Wärmequelle für

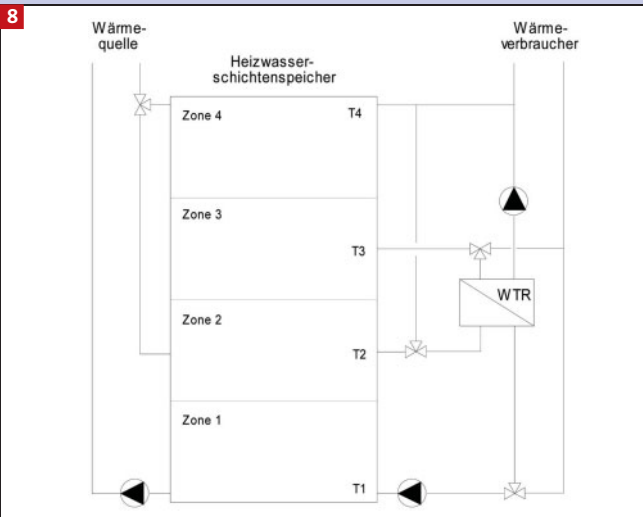
Tabelle 1 Mögliche Speichertemperaturen des Schichtenspeichers entsprechend des Speicherbetriebes und des Speicherzustandes

Betriebzustand	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]
Heizwasserspeicheranlage 90 °C/70 °C				
$t_{AL} = 5\text{ °C}$ Temp.-Hub = 29,5 K				
Speicher entladen	70	70	70	70
Erhöhung Speicherkapazität durch WTR-Betrieb mit gleichzeitiger Speicherung HT	54,5	60,5	70	90
Nutzung des entladenen Speichers zur HT-Erzeugung über WTR-Betrieb	54,5	54,5	54,5	60,5
Solare Heizung 50 °C/40 °C				
$t_{AL} = 1,8\text{ °C}$ Temp.Hub = 6,3 K				
Speicher entladen	33,8	33,8	33,8	33,8
Nutzung des entladenen Speichers zur Erzeugung nutzbarer Wärme durch WTR-Betrieb und Nutzung zusätzlicher Solarwärme	27,8	32,8	33,8	39,1

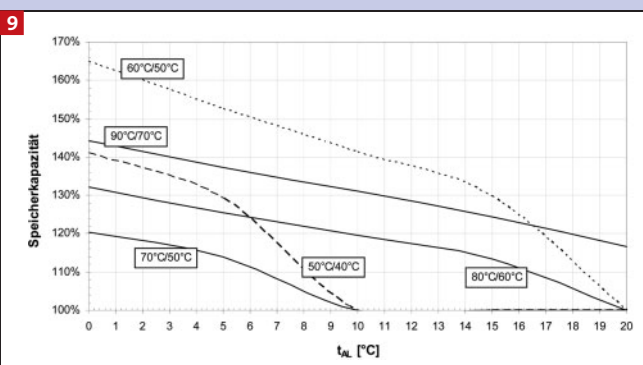
Über eine Speicherentladung kann die Speicherkapazität eines Wärmespeichers erhöht werden. Anhaltswerte dafür können Abb. 9 entnommen werden. Die Werte sind abhängig von der Nutz-, der Speicher- und der Rückkühltemperatur. Als 100 % wird ein auf Vorlauftemperatur voll beladener Speicher in Bezug zur Rücklauftemperatur definiert. Speicherkapazitätssteigerungen von 130 bis 150 % sind möglich.

Fazit

Als Wärmetransformator ist eine Absorptionskälteanlage in der Lage niedere temperierte Wärme auf ein höheres Temperaturniveau zu heben. Somit könnten Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlagen nicht nur im Sommer zur Klimakälteerzeugung betrieben werden sondern auch ganzjährig zur Unterstützung der Wärmeversorgung. Für diese Betriebsweise sind nur einfache Veränderungen im kältetechnischen Kreisprozess und in der Anlagenregelung erforderlich. Nutzungsmöglichkeiten einer Absorptionskälteanlage kleiner Leistung zur Wärmetransformation bestehen bspw. in der Anhebung des Niedertemperaturniveaus in solarthermischen Kreisläufen, in der Anhebung des Temperaturniveaus von BHKW-Abwärme bspw. zur Dampferzeugung oder in der Erhöhung der Speicherkapazität von Wärmespeichersystemen. Die Temperaturerhöhung ist abhängig vom Ausgangspunkt des Temperaturniveaus der Wärmequelle und von der Rückkühltemperatur. Im Niedertemperaturbereich kann die Erhöhung zwischen rd. 5 und 15 K betragen, im Mitteltemperaturbereich zwischen rd. 20 und 50 K. Von der zugeführten Wärme stehen nach der Temperaturerhöhung rd. 48 % auf dem höheren Temperaturniveau zur weiteren Nutzung zur Verfügung. Voraussetzung für einen Wärmetransformatorbetrieb sollte eine ausreichende, kostenlose Menge an Wärme auf einem nicht nutzbaren Temperaturniveau sein. Der Wärmetransformatorbetrieb könnte eine zusätzliche Betriebsweise einer zur Kälteerzeugung vorhandenen Absorptionskälteanlage sein.



8 Möglichkeit der hydraulischen Anbindung einer Absorptionskälteanlage an einen Schichtenspeicher für den Wärmetransformatorbetrieb



9 Erhöhung der Speicherkapazität eines Heizwasserspeichers bei Ankopplung einer Absorptionskälteanlage und Wärmetransformatorbetrieb

den Wärmetransformator bzw. zur Temperaturerhöhung des Vorlaufwassers. Ist beispielsweise ein Wärmespeicher entladen (siehe Tabelle 1) und kann durch den Wärmeverbraucher nicht genutzt werden, kann ein Teil des Speichers unter Erzeugung nutzbarer Wärme weiter ausgekühlt werden. Das nutzbare Temperaturniveau kann in den oberen Teil des Speichers gebracht oder aber direkt zum Wärmever-

braucher geführt werden. Bei letzterem könnte gar fast der gesamte Speicher stärker ausgekühlt werden. In Tabelle 1 sind für zwei ausgewählte Betriebspunkte und Anwendungsfälle sich einstellende Speichertemperaturen angegeben. Durch Auskühlung eines Solarspeichers könnte eine Erhöhung der Solarerträge erzielt werden, auch wenn der Betrag in Bezug zum Wärmebedarf gering wäre.