



Mit solarer Wärme kühlen

*Konzepte und Technologien
für die Klimatisierung von Gebäuden*

Zur Sache

Das Kühlen oder Klimatisieren von Gebäuden mit solarer Wärme hat einen besonderen Charme, denn Wärmebedarf und Wärmeangebot stehen meist im Einklang. Auch Kühllager in südlichen Klimazonen und viele Prozesskälteanlagen benötigen besonders viel Energie, wenn die Sonne intensiv scheint. Der Einsatz von solaren Kälteanlagen anstelle von elektrischen Kältemaschinen entlastet zudem das Stromnetz, gerade zu Spitzenlastzeiten. Solarthermische Kälteerzeugung könnte Absatzmärkte beispielsweise in der Mittelmeerregion erschließen aber auch zu einem kleinen Mosaikstein der Energiewende werden. Dem trägt die Forschungsförderung des Bundes Rechnung.

Technologisch haben sich deutsche Forschungseinrichtungen und die kleinen und mittelständischen Firmen durch intensive Forschung eine international führende Stellung erarbeitet. Aber die junge Branche befindet sich in einem doppelten Wettbewerb: Zum einen drängen aus der Kältebranche bekannte Anbieter, insbesondere aus Asien, auf die internationalen Märkte. Zum anderen erwächst auch technologisch eine neue Konkurrenz – denn mit den stark gesunkenen Preisen für Photovoltaik werden auch solarelektrische Systeme mit Kompressionskältemaschinen immer attraktiver.

Der Großteil der Wissenschaftler sieht jedoch Platz für beide Technologien. Allein in Europa wird sich der Kühlbedarf, laut einem Bericht für die EU-Kommission, zwischen 1990 und 2020 vervierfachen. Ein Vorteil der solarthermischen Systeme liege darin, dass sie flexibel auch mit anderen Wärmequellen kombinierbar sind. So könne auch industrielle Abwärme oder Energie aus der Kraft-Wärme-Kopplung genutzt werden. Die solare Kühlung benötigt im Vergleich zu konventioneller Kühltechnik hohe Anfangsinvestitionen, weist dann aber niedrigere Betriebskosten auf. Sie eignet sich daher insbesondere, wenn der Kühlbedarf, die Solarstrahlung und die Strompreise am Einsatzort hoch sind. Forschungsbedarf besteht bei den Komponenten, aber auch bei der Systemtechnik. Wir stellen im Folgenden die verschiedenen offenen und geschlossenen Verfahren vor und geben einen Einblick in die Forschung.

Ihre BINE-Redaktion wünscht Ihnen eine anregende Lektüre

Autoren

Dr. Alexander Morgenstern
Dr. Mathias Safarik
Edo Wiemken
Peter Zachmeier

Redaktion

Dr. Franz Meyer

Urheberrecht

Eine Verwendung von Text und Abbildungen aus dieser Publikation ist nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion gestattet. Sprechen Sie uns an.

Titelbild: Kramer GmbH

Alle Abbildungen stammen von den Autoren, soweit nichts anderes vermerkt.

Aufmacherbilder:

S. 3 s-power GmbH
S. 4 Klingenburg GmbH
S. 8 Klingenburg GmbH
S. 12 Festo AG Co. KG
S. 14 TU-Berlin
S. 20 Claus Ableitner (CC-BY-SA 3.0)

Inhalt

- 3** *Sonnenwärme ersetzt Netzstrom*
- 4** *Geschlossene und offene Verfahren*
- 8** *Anwendungen und Systemauswahl*
- 9** *En passant: Erste Gehversuche der Solaren Kühlung*
- 11** *Standpunkte: Wie stehen die Chancen der Solaren Kühlung?*
- 12** *Planung, Kosten und Integration*
- 14** *Wo die Forschung ansetzt*
- 18** *Aus der Praxis: Absorptionskälte für verschiedene Regionen*
- 19** *Aus der Praxis: Erfolgsgeschichten*
- 20** *Solarstrom statt Wärme*
- 24** *Ausblick*



Kaiserstraße 185-197, 53113 Bonn
Tel. 0228 92379-0
kontakt@bine.info
www.bine.info



Sonnenwärme ersetzt Netzstrom

Auch in gemäßigten Klimazonen müssen zahlreiche Gebäude klimatisiert werden.

In Kongresszentren, Theatern, Warenhäusern oder Hochhäusern können meist nur raumlufttechnische Anlagen ein behagliches Raumklima garantieren. Solare Verfahren können den Strombedarf gerade zu Spitzenlastzeiten senken.

Viele Länder in sonnenreichen Gegenden leiden unter einer hohen Belastung des Stromnetzes zur Bewältigung von Kühl- und Klimatisierungsaufgaben. In einigen Mittelmeerstaaten wird im Sommer mehr als die Hälfte des insgesamt produzierten Stroms zur Gebäudeklimatisierung eingesetzt. Auch eine deutliche Anhebung der Gebäudestandards würde kurzzeitig daran nichts ändern. Die Nutzung von Solarenergie zur Kühlung und Klimatisierung ist naheliegend, da eine hohe Korrelation zwischen Sonneneinstrahlung, Umgebungswärme und Kühlbedarf besteht. Solare Kühlung kann den Elektroenergieeinsatz zur Kühlung und Klimatisierung wirksam verringern und damit in sonnenreichen Ländern der wachsenden Belastung der Stromnetze entgegenwirken.

Weniger eindeutig ist die Situation für mitteleuropäische Klimazonen. Weniger als 5 Prozent der gesamten Endenergie Strom wird in Deutschland für die Gebäudeklimatisierung eingesetzt. Einen erheblich größeren Bedarf erfordert die Kühlung in der Nahrungsmittelerzeugung und -lagerung sowie die Industriekälteerzeugung. Bei diesen Einsatzgebieten ist der Kältebedarf nicht in gleicher Weise temperatur- und einstrahlungsabhängig. Aber auch in Deutschland ist von einem steigenden Bedarf an Komfortklimatisierung auszugehen, auch wenn die Anzahl der Volllaststunden im Jahr in vielen Anwendungen gering sein wird.

Unter solarer Kühlung und Klimatisierung versteht man einen Prozess, in dem Solarenergie direkt einen Kühl- oder Klimatisierungsprozess mit Energie beliefert. Es besteht also eine direkte Zuordnung zwischen solarer Energie und dem Kühlprozess.

Grundsätzlich bieten sich drei verschiedene Pfade an, um Kälte mit solarer Energie zu erzeugen:

- Die photovoltaische Produktion von Strom und die anschließende Nutzung in Kompressionskältesystemen,
- thermomechanische Systeme (Vuilleumier- und Rankine-Prozesse),
- solarthermische Systeme

(Sorptionsgestützte Kälteerzeugung (SGK bzw. DEC), Absorptionskälteprozess, Adsorptionskälteprozess, Dampfstrahlkälteprozess).

Dieses Themeninfo fokussiert auf solarthermische Anlagen. Hier unterscheidet man zwischen geschlossenen und offenen Verfahren. Geschlossene Verfahren stellen mit Ab- oder Adsorptionskälteanlagen Kaltwasser bereit, das beispielsweise in Kühldecken genutzt wird. Offene Sorptionsverfahren konditionieren hingegen die Zuluft. Dabei senken sie nicht nur die Temperatur, sondern sorgen auch für eine angenehme Raumluftfeuchte.

In beiden Fällen müssen die Anlagentechnik und das Kollektorsystem aufeinander abgestimmt sein hinsichtlich Größe, Eignung und Steuerung der Komponenten. Im Idealfall wird die solare Wärme für weitere Aufgaben verwendet, z. B. zur Brauchwassererwärmung oder Heizungsunterstützung. Die Vorteile solarthermisch betriebener Kühl- und Klimatisierungstechniken sind:

- Sie entlasten das Stromnetz, da sie nur wenig Strom verbrauchen.
- Die Kältemittel (z. B. Wasser) haben kein Treibhausgaspotenzial.
- Sie werden meistens mit Temperaturen unter 100 °C betrieben und eignen sich daher für stationäre Kollektortechnik.
- Sie können mit Abwärmenutzung kombiniert werden.
- Sie sind geräusch- und vibrationsarm.



Geschlossene und offene Verfahren

Wärmegestützte Anlagen zur Raumklimatisierung können nach der Art des verwendeten Verfahrens unterschieden werden. Geschlossene Kältemaschinen stellen Kaltwasser bereit, das beispielsweise in Kühldecken eingesetzt wird. Offene Sorptionsverfahren dienen der direkten Luftkonditionierung, also der Temperaturabsenkung und Entfeuchtung.

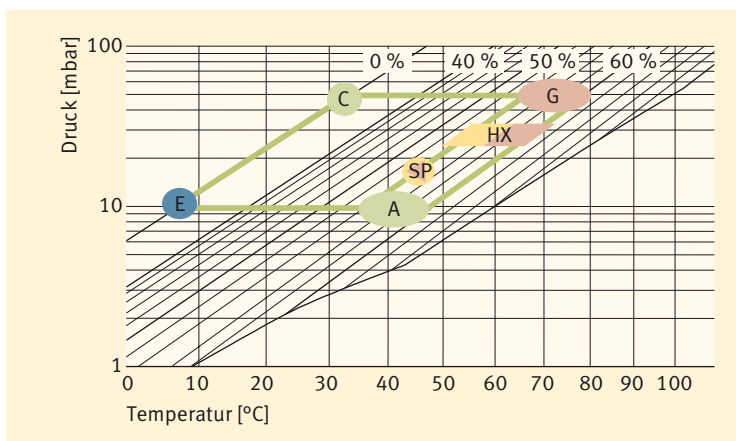
Geschlossene Kältemaschinen stellen Kaltwasser bereit. Die Kaltwassertemperatur hängt davon ab, ob Geräte versorgt werden, die auch für die Luftentfeuchtung (latente Lasten) benutzt werden, oder ob die angeschlossenen raumseitigen Komponenten nur zur Abfuhr sensibler Lasten, d. h. zur Kontrolle der Temperatur, dienen. In zentralen Lüftungsgeräten oder dezentralen Umluftgeräten, die sowohl zur Kontrolle der Temperatur als auch der Feuchte der Raumluft verwendet werden, wird die Luft unter den Taupunkt abgekühlt. Dadurch kondensiert ein Teil des Wasserdampfes aus der Luft und die absolute Feuchte sinkt. Für eine ausreichende Luftentfeuchtung sind Kaltwassertemperaturen im Bereich 6–9 °C erforderlich. Soll die Kältemaschine jedoch lediglich für die Abfuhr sensibler Lasten eingesetzt werden, so reichen deutlich höhere Kaltwassertemperaturen im Bereich 15–20 °C aus. Beispiele für raumseitige Komponenten sind Flächenkühlssysteme, also Kühldecken, Fußbodenkühlung, Wandflächen mit integrierten Kapillarrohrmatten, und Bauteilkühlung bzw. Betonkernkühlung. In Frage kommen auch andere Systeme der stillen Kühlung wie Umluftkühler, die mit natürlicher Luftzirkulation arbeiten.

Absorptionskältemaschinen

Absorptionskältemaschinen sind die am weitesten verbreitete Technik thermisch angetriebener Kälteerzeugung. Sie können Wärmequellen auf niedrigem Temperaturniveau verwerten, also z. B. solare Wärme, Fernwärme, industrielle Abwärme oder Abwärme eines Blockheizkraftwerkes. Sie nutzen wie Kompressionsmaschinen die Abhängigkeit des Siedepunkts eines Kältemittels vom Druck. Die Verdichtung des Kältemittels erfolgt jedoch in gelöster, flüssiger Form in einem Sorptionsmittel. Dadurch wird weniger Strom für die Kälteerzeugung verwendet. Die am häufigsten eingesetzten Kälte-/Sorptionsmittelpaarungen sind $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ und $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$. Für Anwendungen über ca. 4 °C (Gebäudeklimatisierung) wird üblicherweise $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ eingesetzt, da hiermit eine höhere Effizienz erreicht wird. Der Vorteil von $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ -Anlagen liegt dagegen im niedrigeren Gefrierpunkt von NH_3 , sodass auch Nutzttemperaturen deutlich unterhalb von 0 °C erreicht werden können.

Im Folgenden wird exemplarisch das Stoffpaar $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ betrachtet. Der Verdampfer (E) befindet sich auf niedrigem Druckniveau bei ca. 10 mbar. Das Kältemittel Wasser verdampft daher bereits bei 4–7 °C und erzeugt durch die Aufnahme der notwendigen Verdampfungsenergie die nutzbare Kälteleistung. Der Kältemitteldampf wird im Absorber (A) durch konzentrierte LiBr-Lösung absorbiert und kann – da jetzt wieder im flüssigen Zustand – durch geringen Energieaufwand mit einer Lösungsmittelpumpe (SP) auf das höhere Druckniveau gefördert werden. Durch die Zufuhr der Antriebswärme mit einer Temperatur von ca. 60–95 °C wird der Kältemitteldampf im Generator (G) wieder aus der $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ -Lösung ausgetrieben und im Kondensator durch zugeführtes Kühlwasser bei ca. 30 °C verflüssigt. Das Kältemittel kann nun – nach Drosselung auf das niedrige Druckniveau – im Verdampfer erneut verdampfen. Die im Generator entstandene konzentrierte Lösung wird über einen Lösungswärmeübertrager (HX) in den Absorber zurückgeführt und kann dort das Kältemittel wieder absorbieren. Durch die Abkühlung der konzentrierten Lösung und Vorwärmung der verdünnten Lösung im Lösungswärmeübertrager wird die Effizienz der Anlage deutlich verbessert.

Abb. 1 Prinzip einer Absorptionskältemaschine
Quelle: Fraunhofer ISE



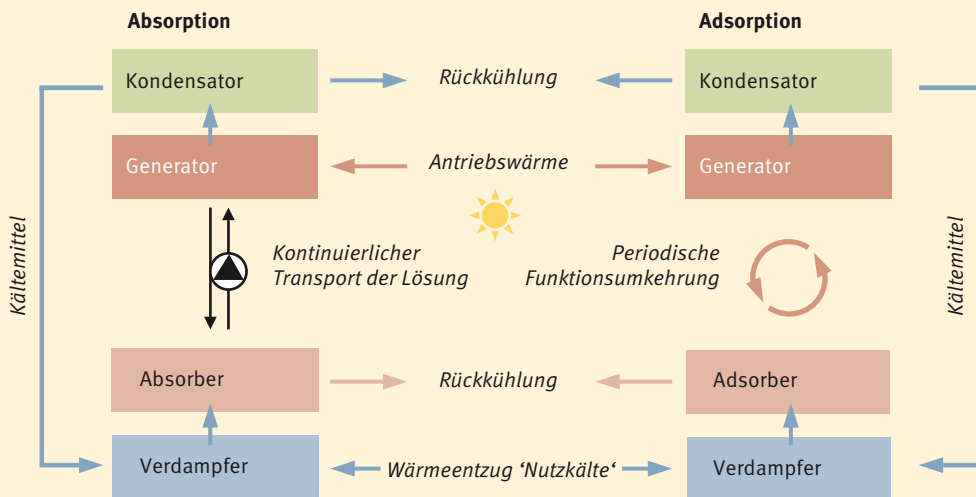


Abb. 2 Schematischer Vergleich zwischen Absorptionskälteprinzip (links) und Adsorptionskälteprinzip (rechts). Während im Absorptionsprozess durch eine kontinuierliche Umwälzung der flüssigen Lösung konstante Bedingungen in den hydraulischen Kreisläufen erreicht werden, treten im Adsorptionsprozess zyklische Temperaturschwankungen auf. Die Nennwerte der Leistungen und Temperaturen sind hier als mittlere Werte über mehrere Betriebszyklen definiert. Quelle: Fraunhofer ISE

Adsorptionskältemaschinen

Bei Adsorptionskälteanlagen wird der im Verdampfer erzeugte Kältemitteldampf in Adsorbentien angelagert. Bis zur Sättigung des Adsorbens wird der Kältemitteldampfstrom und damit die Kälteerzeugung aufrechterhalten. Anschließend ist eine Regeneration des Adsorbens erforderlich, um den Kälteprozess erneut zu starten. Adsorptionskälteanlagen arbeiten daher zyklisch. Während der Regenerationsphase treibt Antriebswärme den Kältemitteldampf aus dem Adsorbens aus. Der Dampf kondensiert im Kondensator. Sowohl zur Kühlung des Kondensators als auch zur Abfuhr der Adsorptionswärme ist ein Kühlkreis notwendig. Im Vergleich zu Absorptionskälteanlagen weisen Adsorptionskältegeräte eine etwas geringere thermische Effizienz auf. Von Vorteil ist aber, dass keine Pumpen im Vakuumbereich benötigt werden. Außerdem liegt keine Kristallisationsgefahr wie bei Absorptionskälteanlagen vor, sodass die Einschränkungen hinsichtlich der Kühlwassertemperatur geringer sind.

Dampfstrahlkälte

Die Dampfstrahlkälte arbeitet mit Wasser als Kälte- und Treibmittel. Auf hohem Druckniveau zugeführte Wärme erzeugt Treibdampf. Dieser Dampf wird durch eine Düse geleitet und entspannt. Der beschleunigte Dampf erzeugt in der Düse einen Unterdruck, wodurch Wasserdampf von einem Verdampfer abgesogen wird. Im Verdampfer kann so bei niedrigem Druck Wasser verdampfen und dabei Wärme aufnehmen. Der entspannte Treibdampf, der mit dem Kältemitteldampf des Verdampfers gemischt wird, kondensiert bei mittlerem Temperaturniveau und Rückkühlwärme wird abgeführt. Die Effizienz wird maßgeblich von der Kondensationstemperatur beeinflusst. Bei üblichen Betriebsbedingungen liegt der thermische EER unter 1. Dampfstrahlkälte wird derzeit nur für wenige industrielle Anwendungen im sehr hohen Leistungsbereich verwendet. In Forschungsvorhaben wird jedoch versucht, die Technik auf einen kleinen Leistungsbereich zu skalieren und mit solarthermischem Antrieb zu koppeln. Es werden auch andere Kältemittel als Wasser untersucht.

Offene, sorptionsgestützte Verfahren

Offene Verfahren basieren auf einer Kombination der sorptiven Luftentfeuchtung mit Verdunstungskühlung. Sie ermöglichen es, die Zuluft über eine Lüftungsanlage zu konditionieren. Nicht nur die Lufttemperatur, sondern auch die Luftfeuchte können auf einen komfortablen Bereich eingestellt werden. Die Verfahren werden im deutschsprachigen Raum als sorptionsgestützte Klimatisierung (SGK) oder allgemein als Desiccant and Evaporative Cooling (DEC)



Effizienz der Kälteerzeugung

Die Effizienz der Kälteerzeugung wird über den EER-Wert (Energy-Efficiency-Ratio) angegeben. Er ergibt sich aus dem Verhältnis der Kühlleistung zur Antriebsleistung. Klimatisierungsanwendungen mit Kompressionskältemaschinen erreichen typischerweise EER-Werte zwischen 3 und 4.

Thermische Kältemaschinen verbrauchen neben der Wärmeenergie auch Strom, z. B. für Steuerung, Lösungsumwälzpumpen usw. Deshalb werden hierfür häufig zwei EER-Werte verwendet. Typische thermische EER-Werte liegen bei Adsorptionskältemaschinen zwischen 0,5 und 0,6; für einstufige Absorptionskältemaschinen etwa zwischen 0,6 und 0,8. Zweistufige Systeme erreichen sogar EER-Werte von bis zu 1,3. Sie benötigen allerdings Antriebswärme auf einem höheren Temperatur-Niveau von ca. 140–160 °C. Der elektrische EER von thermischen Kältemaschinen liegt teilweise über 50, bei Adsorptionskältemaschinen teilweise über 100. Allerdings bezieht sich dieser Wert nur auf die Kältemaschine. Der Strombedarf für die Wasserkreisläufe und die Rückkühlung ist deutlich größer als für die reine Kältemaschine, sodass das Gesamtsystem auf einen deutlich geringeren elektrischen EER-Wert abfällt. Eine genaue Bezifferung ist sehr schwierig, da dies systemspezifisch ist. Ein Wert über 8 ist auch für kleine Leistungsklassen erreichbar und anzustreben, damit eine deutliche elektrische Energieeinsparung gegenüber einer Kompressionskälteanlage zu verzeichnen ist.



Abb. 3 Seit 2001 in Betrieb: Solar betriebene offene, sorptiv gestützte Klimatisierung (SGK) von Seminarräumen der IHK Südlicher Oberrhein, Freiburg. Die Regeneration des Entfeuchtungsrotors wird direkt durch ein 100 m² Luftkollektorfeld betrieben, das kostengünstig auf dem Gebäudedach installiert wurde. Quelle: Fraunhofer ISE

bezeichnet. Das Kältemittel ist Wasser und steht in direktem Kontakt mit der Atmosphäre, daher die Bezeichnung als „offene Systeme“. Bei Anlagen dieser Art werden die Zulufttemperatur und -feuchte entsprechend den Komfort-Anforderungen eingestellt und gleichzeitig die erforderliche Frischluft geliefert. Thermische Antriebsenergie ist zur Regeneration des Sorptionsstoffes erforderlich (Austreibung des im Sorptionsmaterial gebundenen Wassers), damit die Entfeuchtung aufrecht gehalten werden kann. Die sorptionsgestützte Klimatisierung nutzt immer das Kühlpotenzial der – gegenüber der Außenluft – vergleichsweise kühlen Abluft aus den klimatisierten Räumen. Es erfordert somit ein geschlossenes Zuluft- und Abluftsystem. Durch die umfassenden Klimatisierungsaufgaben, die mit dieser Technik bewältigt werden, ist der direkte Vergleich mit Kaltwassererzeugern schwierig. Allen technischen Umsetzungen gemeinsam ist eine Wärmerückgewinnungseinheit, die erforderlich ist für den effizienten Betrieb der Anlage. Das verbreitetste Verfahren ist die Feststoffsorption mittels rotierender Sorptionskomponenten (Sorptionsräder). Das Funktionsprinzip zeigt Abb. 4. In der festen Matrix der Sorptionsräder ist das Sorptionsmaterial, beispielsweise Silicagel oder Lithium-Chlorid, eingebettet. Die Anlagen setzen sich aus kommerziell verfügbaren Komponenten zusammen; die systemtechnische Herausforderung besteht in der Komponentenauswahl und -dimensionierung und Aufstellung einer geeigneten Regelstrategie für das Gesamtsystem.

Als thermische Effizienzzahl lässt sich in den sorptionsgestützten Verfahren – analog zu geschlossener Kältetechnik – das thermische Leistungsverhältnis Kälteleistung/Antriebswärmeleistung bilden, wobei dieser Quotient dann nur für die Zeiträume mit einer Antriebswärmeleistung > 0 definiert ist (mit aktiver Regeneration der Sorptionskomponente). Die Kälteleistung errechnet sich aus der Enthalpedifferenz zwischen Außenluft und Zuluft.

Eine Alternative zu SGK-Systemen mit rotierenden Sorptionskomponenten ist die Anwendung der Flüssigsorption. Derartige Anlagen entfeuchten die Zuluft mittels eines flüssigen Sorptionsmittels (Beispiel: Lithiumchlorid), das im Absorber verrieselt wird. Das Sorptionsmittel nimmt da-

bei Wasser aus der Zuluft auf. Die Sorptionsmittellösung zirkuliert in einem Kreislauf; über den Eintrag von Wärme, z. B. aus einem Kollektorfeld, wird Wasserdampf ausgetrieben und der Sorptionsstoff steht wieder zur Luftentfeuchtung bereit. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass das mit Wasser angereicherte und das desorbierte Sorptionsmittel separat zwischengespeichert werden können. Dies ermöglicht den Betrieb der Klimatisierung außerhalb der Betriebsstunden des Kollektorfeldes. Dies wurde beispielsweise beim Bau des Energy Efficiency Center in Würzburg (Projekt DEENIFDEENIF, FKZ 0327879A) oder im Projekt Sara, FKZ 0329662D (Speicherung und Umwandlung industrieller Abwärme zur Raumklimatisierung durch offene Absorption). Für SGK-Anlagen mit Flüssigsorption gibt es bisher wenige Anbieter von Gesamtsystemen.

Ein anderes, neues Verfahren nutzt einen zuluftseitig sorptiv beschichteten Kreuzstrom-Luft-Luft-Wärmeübertrager. Die Zuluft wird beim Passieren des Wärmeübertragers durch den Kontakt mit dem Sorptionsmittel entfeuchtet. Die dabei frei werdende Sorptionswärme wird auf die Abluftseite des Wärmeübertragers übertragen, von der durchströmenden Abluft aufgenommen und mit der Abluft an die Umgebung abgegeben. Durch Verdunstungskühlung auf der Abluftseite wird der Effekt so weit verstärkt, dass eine Kühlung der Zulufttemperatur erfolgt und deren Temperatur unter der Außenlufttemperatur liegt. Dies Verfahren kühlt gleichzeitig den Sorptionsprozess und erhöht die Entfeuchtungsleistung. Zur periodischen Regeneration des Sorptionsmittels wird der Prozess zyklisch betrieben. Das Verfahren wurde in Pilotanlagen getestet (Beispiel: ECOS, FKZ 0327406 A) und zielt auf den Klimatisierungsbereich im eher kleinen Luftvolumenstrombereich $< 1.000 \text{ m}^3/\text{h}$.

In SGK-Anlagen stellt sich durch die zusätzlichen Komponenten gegenüber konventioneller Lüftungstechnik im Luftkanal ein höherer Druckverlust ein, der einen erhöhten elektrischen Strombedarf für die Ventilatoren zur Folge hat. Für einen realistischen Vergleich mit konventioneller Technik, z. B. in der Abschätzung der Primärenergieeinsparungen, muss daher der gesamte Hilfsenergieaufwand berücksichtigt werden.

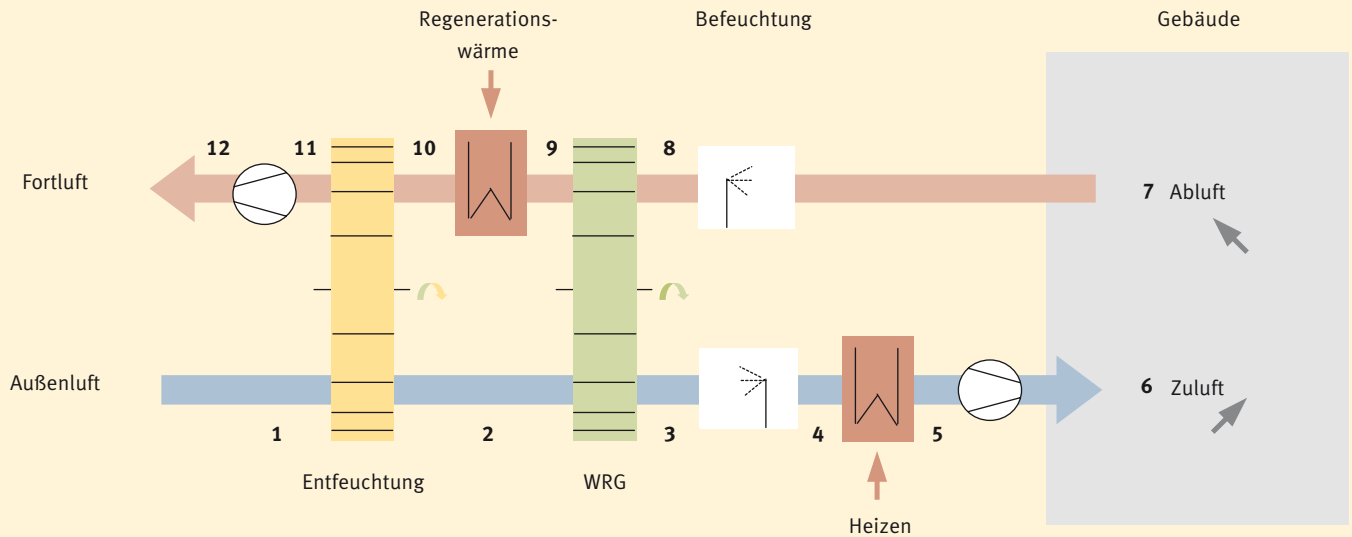


Abb. 4 Schema einer sorptionsgestützten Klimatisierung (SGK) mit Sorptionsrotor und rotierender Wärmerückgewinnungs-Komponente (WRG). Die Regenerationswärme (Antriebswärme) kann von einem Solarkollektor bereitgestellt werden, dazu ist oft ein Temperaturniveau zwischen 60 °C und 75 °C ausreichend. Standardzyklus mit Verdunstungskühlung in der Zuluft und indirekter Verdunstungskühlung im Abluftstrang. Quelle: Fraunhofer ISE

- 1 → 2 Sorptive Entfeuchtung der Zuluft; der Prozess ist exotherm und die Luft wird durch die Adsorptionswärme, welche in der Matrix frei wird, sowie durch Schleppwärme aus dem Abluftstrang erwärmt
- 2 → 3 Vorkühlung der Zuluft im Gegenstrom zur Gebäudeabluft im Wärmerückgewinnungsrotor
- 3 → 4 Direkte Verdunstungskühlung der Zuluft mit gleichzeitiger Erhöhung der Zuluftfeuchte
- 4 → 5 Heizungsregister zur Zulufterwärmung im Winter
- 5 → 6 Geringer Temperaturanstieg, bedingt durch den Ventilator
- 6 → 7 Anstieg von Temperatur und Feuchte der Zuluft durch interne Lasten im Gebäude
- 7 → 8 Kühlung der Gebäudeabluft durch direkte Verdunstungskühlung, möglichst bis nahe an die Sättigung
- 8 → 9 Vorheizung der Abluft im Gegenstrom zur Zuluft im Wärmerückgewinnungsrotor
- 9 → 10 Zufuhr von Regenerationswärme an die Abluft, z. B. aus einem Solarsystem
- 10 → 11 Desorption (Austreiben) des in den Poren des Sorptionsmaterials gebundenen Wassers durch die heiße Abluft
- 11 → 12 Mit dem Ventilator wird die Abluft an die Umgebung abgegeben (jetzt Fortluft)

Der Prozessverlauf in einem SGK-System im Temperatur-Feuchte-Diagramm ist in der Abb. 5 dargestellt.

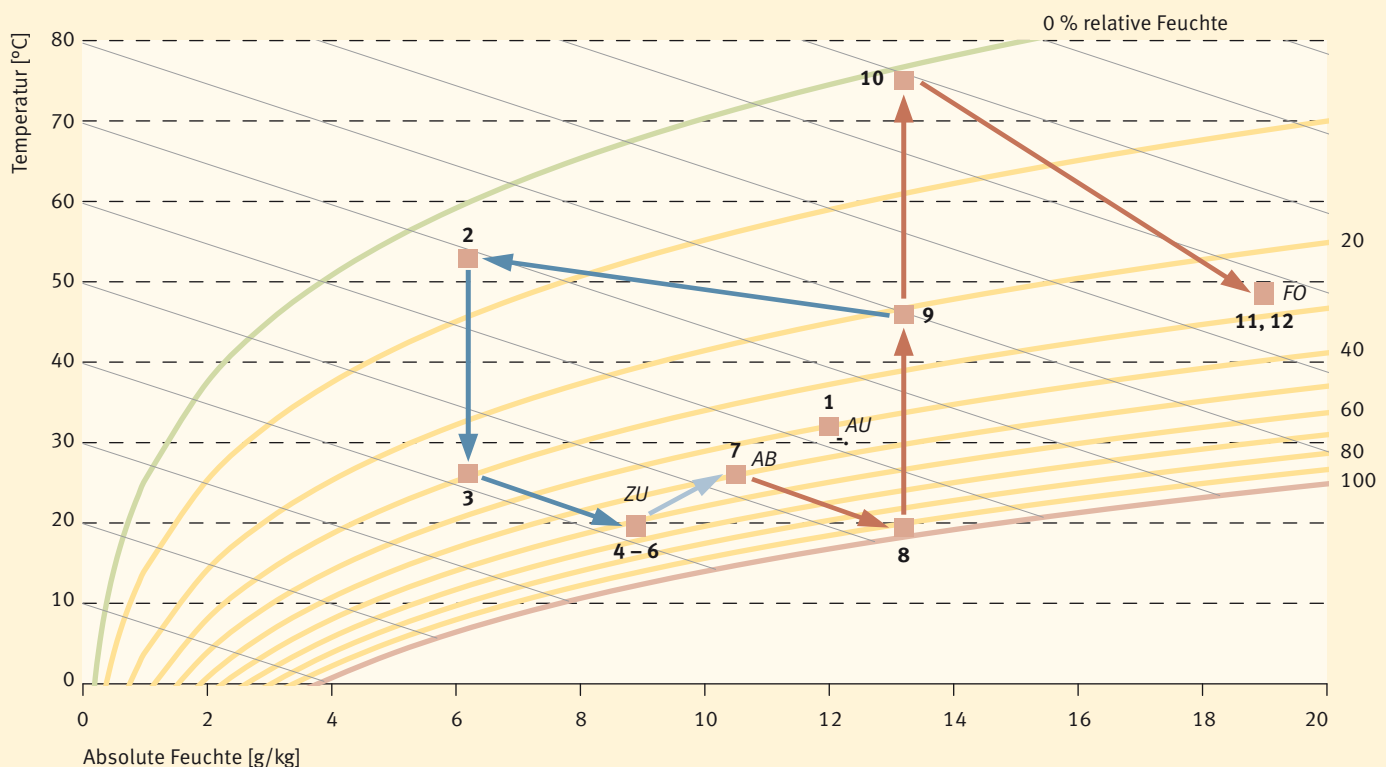


Abb. 5 Temperatur-Feuchte-Diagramm des Prozessverlaufs in einem SGK-System für folgende Werte: Außenluft 32 °C, 40 % rel. Feuchte; Zuluft 20 °C, 60 % rel. Feuchte. Quelle: Fraunhofer ISE

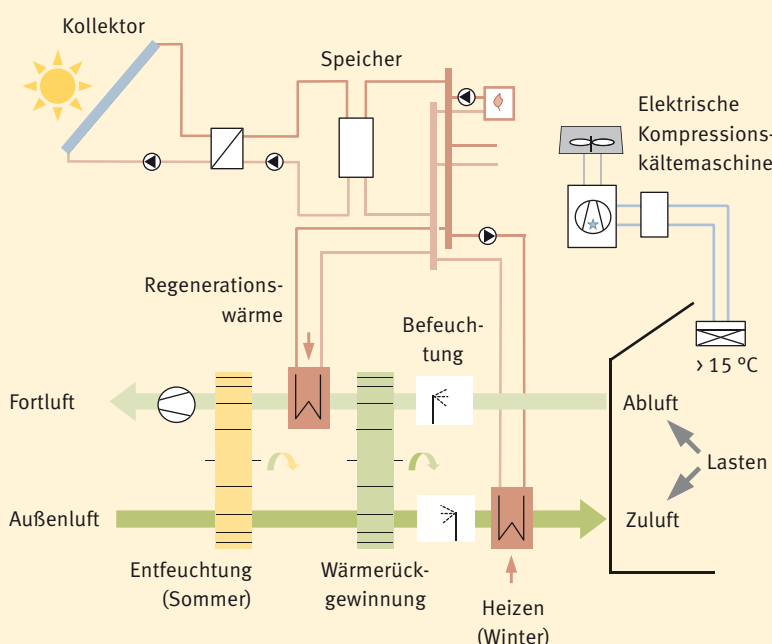


Anwendungen und Systemauswahl

Je nach Kühl- und Klimatisierungsaufgabe bieten sich bei der Gebäudeplanung verschiedene solarthermisch unterstützte Systeme an. Ein vereinfachtes Entscheidungsdiagramm hilft dem Planer der Vorauswahl zwischen einem Kaltwassersystem, einer sorptiv gestützten Lüftung oder einer Kombination aus beiden Systemen.

Ab- und Adsorptionskältemaschinen können niedrige Kaltwassertemperaturen zur Luftentfeuchtung bereitstellen oder auch im höheren Temperaturbereich zur sensiblen Kühlung, z. B. über Kühldecken, arbeiten. Absorptionskältetechnik lässt sich auch zur Prozesskühlung im Temperaturbereich $< 0\text{ °C}$ einsetzen. Einige Beispiele zeigen die hohe Bandbreite der Einsatzgebiete:

Abb. 6 Sorptionsgestützte Klimatisierung mit solarthermischer Regeneration der Entfeuchtungseinheit. Im Beispiel ist ein Standard-Rotorprozess für moderate Klimazonen gezeigt. Die Bewältigung der verbleibenden sensiblen Kühllasten übernimmt eine konventionelle Raumkühlung; diese kann mit hoher Verdampfer Temperatur und damit mit hoher Effizienz betrieben werden. Quelle: Fraunhofer ISE



Kaltwasserbereitstellung ab 6 °C zum Betrieb von Umluft-, Flächen- oder Zuluftkühlung:

- Nur solarthermische Kälteversorgung (ohne Kälte-Backup-System) zur Raumluft-Komforterhöhung. Option für den Wohngebäudebereich und gewerblichen Einsatz im kleinen Leistungsbereich. Es wird stationäre Kollektortechnik eingesetzt. Die Solarthermieanlage unterstützt auch bei Bedarf die Warmwasserversorgung und den Heizbetrieb.
- Fuel-saver-Betrieb, d. h., bei ausreichender solarer Wärmeversorgung wird der konventionelle (elektrisch betriebene) Teil der Kälteversorgung teilweise oder ganz heruntergefahren. Bei guter Korrelation zwischen Kühllast und solarer Wärmeleistung wird neben elektrischem Energiebedarf auch die Spitzenlast reduziert. Diese Betriebsart ist sowohl in großen Einzelanwendungen als auch in Kältenetzen interessant. Im großen Leistungsbereich und an sonnigen Standorten ist auch der Einsatz nachgeführter Kollektortechnik und mehrstufiger thermisch betriebener Kältetechnik möglich.
- Kombination mit Nutzung vorhandener Abwärme (aus Produktion oder Kraft-Wärme-Kopplung) mit Berücksichtigung, dass die Abwärmenutzung nicht verdrängt wird.

Kälteträger $< 0\text{ °C}$:

- Einsatz in gewerblicher Prozesskühlung, in der Regel als fuel-saver-Betrieb. Kommerziell verfügbar sind dazu Absorptionskälteanlagen mit Ammoniak-Wasser als Arbeitsmittel. In der Regel sind dazu Antriebstemperaturen $> 100\text{ °C}$ erforderlich, die entweder gerade noch stationäre Vakuum-Röhrenkollektoren oder bereits nachgeführte, konzentrierende Kollektortechnik erfordern.
- Auch in der Gebäudekühlung kann diese Technik zum Einsatz kommen, etwa in Kombination mit Phasenwechselspeichern (z. B. Eisspeicher). Eventuell kann dabei auch auf ein Backup-System verzichtet werden.

Geeignete Kollektoren lassen sich grundsätzlich in stationäre Kollektoren und nachgeführte Kollektoren mit hohem

En passant

Konzentrationsverhältnis unterscheiden. Unter den stationären Kollektoren sind abgedeckte Flachkollektoren mit selektiver Beschichtung sowie Vakuum-Röhrenkollektoren unterschiedlicher Bauarten einsetzbar.

In der Planung des Kollektorfeldes muss berücksichtigt werden, dass die Temperaturspreizung im Antriebskreis der Kältemaschine gering ist (üblicherweise ca. 10 K zwischen Vor- und Rücklauf) und die Massenströme hoch sind. Dies hat Auswirkungen auf die Verschaltung der Kollektoren und auf die Kollektorsteuerung. Stationäre Kollektortechnik kommt in einstufiger, thermisch betriebener Kältetechnik mit Antriebstemperaturen $< 100\text{ °C}$ zum Einsatz. Die Verfahren eignen sich daher auch für mitteleuropäische Regionen. In den meisten Fällen wird noch konventionelle nasse Rückkühlung über offene oder geschlossene Kühltürme angewendet; das Augenmerk richtet sich allerdings zunehmend auf Einsatzmöglichkeiten trockener Rückkühlung.

In Regionen mit hoher solarer Einstrahlung eröffnen sich Optionen für den Einsatz mehrstufiger Absorptionskältetechnik, die Antriebstemperaturen deutlich über 100 °C erfordert und damit auf nachgeführte, konzentrierende Kollektortechnik angewiesen ist. In einigen Pilot- und Demonstrationsvorhaben wurden dazu linear konzentrierende Kollektoren für den Mitteltemperaturbereich (bis ca. 250 °C) eingesetzt. Dies sind Parabolrinnen- oder Fresnel-Kollektoren.

Die Temperaturniveaus entscheiden

Für eine erste Auswahl der Kälte- und Kollektortechnik in einer gegebenen Anwendung ist der Zusammenhang zwischen den drei Temperaturniveaus Antriebstemperatur (T_{hoch}) und der thermischen Effizienz der Kältetechnik sowie die Abhängigkeit vom Temperaturhub ($T_{\text{mittel}} - T_{\text{tief}}$) von Bedeutung, wobei der Temperaturhub der Temperaturdifferenz zwischen Rückkühlung und Kaltwasser entspricht. Abb. 9 zeigt diesen Zusammenhang.

Insbesondere sind durch die hohen thermischen Leistungsverhältnisse zweistufige Absorptionskälteanlagen interessant, weil dort die benötigte Wärmeleistung für den Antrieb und auch die erforderliche thermische Rückkühlleistung sinken. Dies führt zu kleineren Kollektorfeldern und zu geringeren Investitionskosten in der Rückkühlung. Demgegenüber steht die steigende Antriebstemperatur, die den Einsatz konzentrierender Kollektortechnik erfordert und damit die Anwendungen auf sonnenreiche Standorte eingrenzt. Außerdem ist der Einsatz trockener Rückkühlung kaum noch möglich, da dies zu einem erhöhten Temperaturhub führt; ein hoher Temperaturhub bedingt aber bei hoher thermischer Effizienz Antriebstemperaturen, die außerhalb des Arbeitsbereichs von Mitteltemperaturkollektoren und außerhalb der Spezifikationen der Absorptionskälteanlagen liegen.

In einigen Ländern des südlichen Mittelmeerraums ist der Einsatz von entsalztem Wasser für die Rückkühlung in Kühlanlagen problematisch bzw. verboten; üblicherweise wird daher trockene Rückkühlung angewendet. Für diese Anwendungen mit erhöhtem Temperaturhub ist daher Ab-

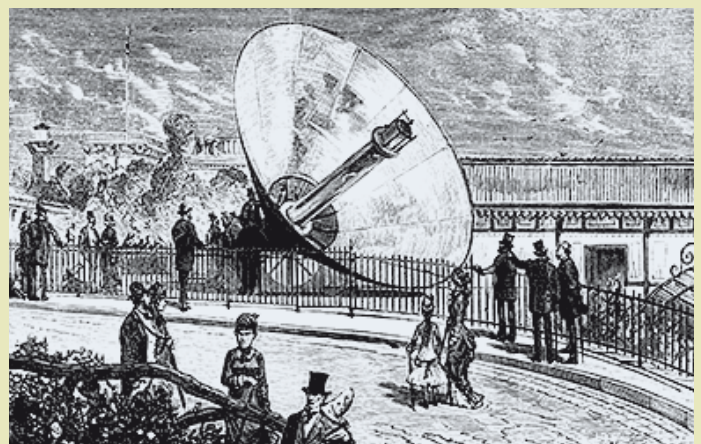


Abb. 7 Solarofen von Mouchot
Quelle: London Permaculture (CC BY-NC-SA 2.0) via Flickr

Erste Gehversuche der Solaren Kühlung

Durch Engpässe in der Brennstoffversorgung im Zuge der energiehungrigen Industrialisierung entwickelte sich in Frankreich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ein starkes Interesse an der Nutzung solarer Wärme. Das Interesse erlosch leider weitgehend, nachdem neue Kohlelagerstätten erschlossen und Transportprobleme zur Brennstoffbeschaffung durch neue Eisenbahnverbindungen gelöst wurden. Dennoch blühte in dieser Zeit die Solartechnik auf. Der Beginn der solaren Kühlung kann vielleicht auf das Jahr 1878 datiert werden. In diesem Jahr wurde am 29. September auf der Pariser Weltausstellung von Augustin Mouchot erstmalig ein Eisblock mit solarer Wärme erzeugt. Er verwendete dazu den seinerzeit größten Solarspiegelapparat mit ca. 20 m^2 Öffnung und einem 2 m langen Heizkessel zur direkten Dampferzeugung als Absorber. Die Kälte erzeugte ein periodisch arbeitendes Absorptionskälteverfahren in einem Carréschen Apparat. Namensgeber sind die Brüder Edmond Carré und Ferdinand Carré. Sie entwickelten und betrieben Absorptionsverfahren mit unterschiedlichen Stoffpaaren (Schwefelsäure-Wasser, Ammoniak-Wasser). Mouchot berichtet zum Versuch auf der Weltausstellung: „Am 29. September klärte sich der Himmel gegen 11:30 Uhr auf, und bis Mittag hatte ich 75 Liter Wasser zum Sieden gebracht; die Spannung des Dampfes stieg trotz einiger vorübergehender Wolken innerhalb von zwei Stunden allmählich auf 7 Atmosphären, mehr zeigte das Manometer nicht an. Ich konnte den Versuch vom 22. September wiederholen und den Dampf in einen Carréschen Apparat leiten, sodass ich den ersten Eisblock erhielt, der jemals mit Sonnenstrahlen erzeugt wurde.“

Abb. 8 Erzeugung eines Eisblocks am 29. September 1878 während der Pariser Weltausstellung mit einem konzentrierenden Spiegelsystem und durch Nutzung eines Absorptionskälteprozesses in einem Carréschen Apparat. Quelle: Public Domain via wikimedia



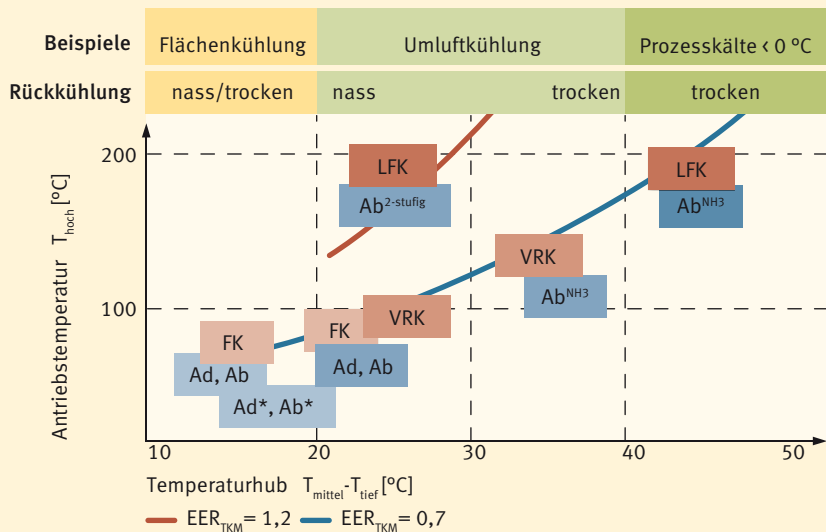


Abb. 9 Die Art der Anwendung in solarer Kühlung und die eingesetzte Rückkühltechnik hat Auswirkungen auf die benötigte Antriebstemperatur und auf die Wahl der Kollektor- und thermisch betriebenen Kältetechnik. Exemplarisch sind zwei Kurven der Antriebstemperatur für Kältetechniken mit der thermischen Leistungszahl 0,7 (einstufige Technik) und 1,2 (2-stufige Absorptionstechnik) eingetragen. Die Antriebstemperaturen und die Arbeitsbereiche von Kollektoren und Kältetechnik sind nur als grobe Anhaltswerte zu verstehen und können produktspezifisch und standortabhängig (bedingt durch das Temperaturniveau der Rückkühlung) variieren. Quelle: Fraunhofer ISE

FK = Flachkollektor, VRK = Vakuumröhrenkollektor, LFK = linear fokussierender Kollektor

Ad = Adsorptionstechnik, Ab = Absorptionstechnik (H₂O/ LiBr), Ab2-stufig = 2-stufige Ab, AbNH₃ = NH₃/H₂O-Absorptionskältetechnik

Ad*, Ab* = Ad- bzw. Absorptionstechnik, die unter bestimmten Voraussetzungen mit trockener Rückkühlung betrieben werden kann

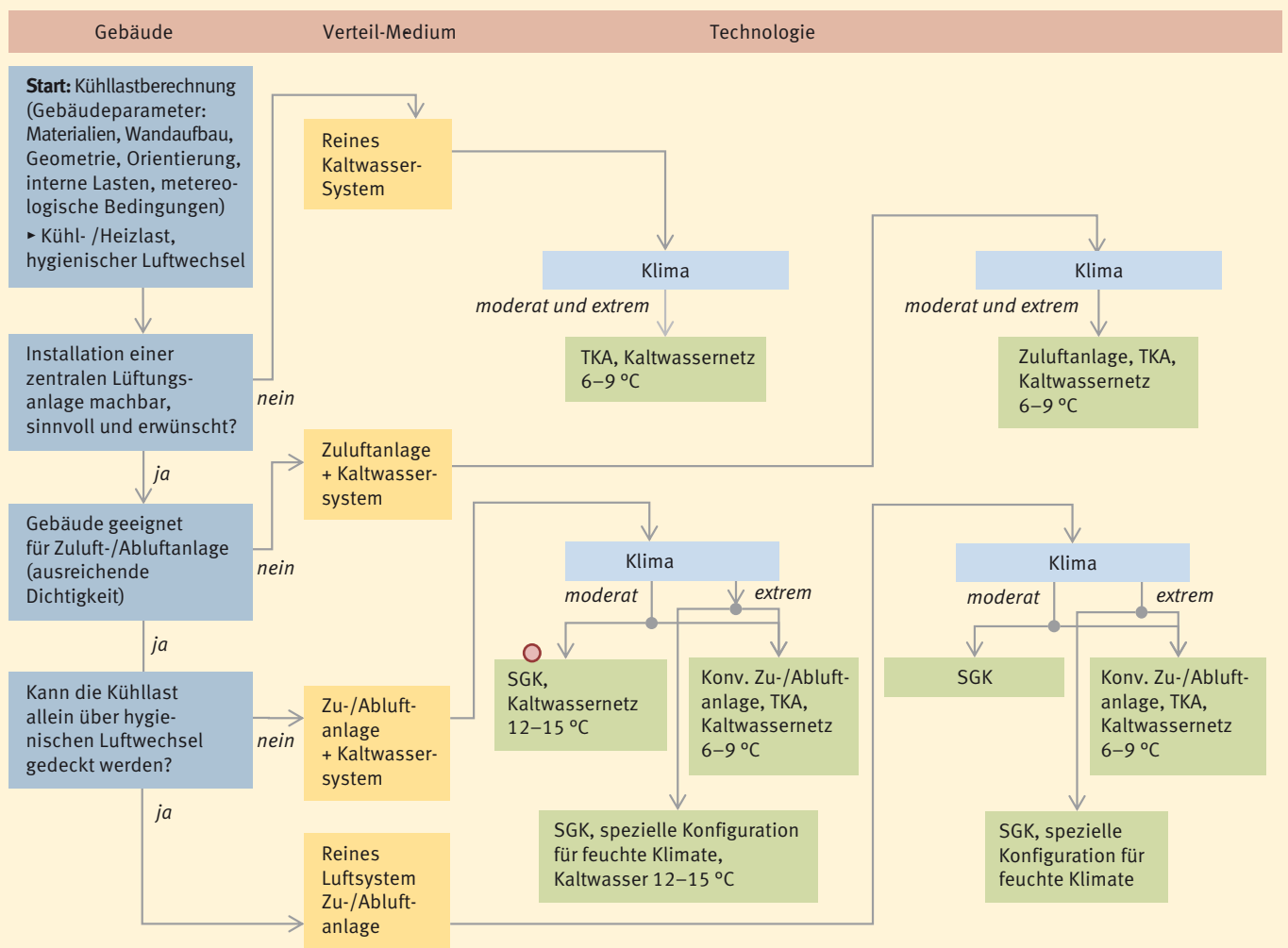


Abb. 10 Entscheidungsbaum für Verfahren der solarthermisch unterstützten Gebäudeklimatisierung. Ausgehend von gebäudetechnischen Fragen wird das Verteilmedium festgelegt und danach die grundlegende Technologie ausgewählt. Die mit dem farbigen Punkt markierte Technologie könnte wie in Abb. 8 mit Entfeuchtungsrad, aber auch mit Verfahren der Flüssigsorption umgesetzt werden. Quelle: Fraunhofer ISE
TKA = thermisch angetriebene Kälteanlage (Kaltwasser); SGK = Sorptionsgestützte Klimatisierung

Standpunkte

sorptionskältetechnik mit dem Stoffpaar $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ interessant. Diese Technik bietet den Vorteil, dass sie auch in der Prozesskühlung mit Temperaturen $< 0^\circ\text{C}$ eingesetzt werden kann.

Die Marktverfügbarkeit thermisch betriebener Kältetechnik war bis vor kurzem noch auf Nennkälteleistungen oberhalb von ca. 8 kW begrenzt. Inzwischen sind Anbieter mit Geräten ab ca. 2,5 kW Kälteleistung auf dem Markt, damit ist dezentrale solare Kühlung für den kleinen Leistungsbereich in Reichweite. Dem Leistungsbereich sind nach oben hin weniger Grenzen gesetzt; klassische Absorptionskältetechnik mit $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ als Stoffpaar ist auch im MW-Kälteleistungsbereich erhältlich. Die derzeit größte Anlage zur solaren Kühlung befindet sich auf dem Campus des United World College in Singapur mit ca. 1,5 MW Nennkälteleistung der Absorptionskälteanlage und einem Flachkollektorfeld von 3.870 m².

Mischsysteme für warme Standorte

Offene, sorptionsgestützte Klimatisierung eignet sich vorwiegend zur Zuluftentfeuchtung (Behandlung latenter Kühllasten) und unterstützt auch im begrenzten Maße die Kühlung in Gebäuden. Insbesondere an warmen Standorten sind jedoch oft die sensiblen Kühllasten größer, als dass sie von der solarthermisch betriebenen Klimatisierung bewältigt werden können. Hier ist eine Trennung der Klimatisierungsaufgaben sinnvoll: ein solarthermisch betriebener sorptiver Teil sorgt für die Entfeuchtung der Zuluft, während konventionelle Kompressionskältetechnik die Zuluft kühlt. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Kompressionskältetechnik auf hohem Verdampfer-Temperaturniveau betrieben werden kann, da keine Taupunktunterschreitung mehr erforderlich ist. Sie arbeitet damit effizienter und die Leistung kann reduziert werden. Darüber hinaus entfällt die oft bei Taupunktunterschreitung notwendige anschließende Zuluft-Nacherwärmung. Abb. 10 zeigt als Beispiel eine mögliche Anlagenkonfiguration mit dieser Betriebsweise.

Auswahlkriterien

Bereits im Task 25 „Solar Assisted Air-Conditioning“ des Solar Heating and Cooling Programme der Internationalen Energieagentur IEA wurde vor einigen Jahren ein vereinfachtes Schema zur Vorauswahl der grundlegenden Technologie für eine solarthermisch unterstützte Gebäudeklimatisierung erstellt. Das Schema ist in Abb. 10 dargestellt und setzt bereits Kenntnisse zum erforderlichen hygienischen Luftwechsel und zu den Kühllasten voraus. Nicht betrachtet in dem vereinfachten Ansatz werden die Notwendigkeit von Back-up-Systemen, wirtschaftliche Aspekte sowie die detailliertere Auswahl der Technik (Ab- oder Adsorption, Kollektorart, usw.). Dem Schema können Argumente für ein reines Kaltwassersystem, für ein reines sorptiv gestütztes Lüftungssystem oder für ein Mischsystem entnommen werden.

Wie stehen die Chancen der Solaren Kühlung?



Prof. Dr. Hans-Martin Henning
Leiter des Bereichs Thermische Anlagen und Gebäude am ISE und stellvertretender Institutsleiter. Professur Technische Energiesysteme an der Fakultät für Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Mittlerweile konnte die Praxistauglichkeit der Anlagen zur solaren Kühlung und Klimatisierung im praktischen Betrieb gezeigt werden, wenn eine hohe Qualität in Auslegung, Errichtung und Betriebsführung gegeben ist. Noch ist die solare Kühlung aber eine anspruchsvolle Technik, die viel Kommunikation zwischen Planer und den installierenden Firmen auf der Heizungs- und Kälteseite erfordert; ein Zusammenspiel, das noch einer stärkeren Standardisierung bedarf, um einen optimalen Anlagenbetrieb in der Breite zu gewährleisten. Auch hinsichtlich der konkurrierenden Möglichkeiten mit Nutzung erneuerbarer Energien durch Photovoltaik-Anlagen sind erweiterte Konzepte notwendig, um die Vorteilhaftigkeit der solarthermischen Kühlung auch wirtschaftlich zu unterstreichen: etwa durch zusätzliche Nutzung der Kollektorstärke für andere Prozesszwecke und durch Effizienzfortschritte in der Rückkühlung. Vielversprechend sind Entwicklungen zur thermisch angetriebenen Wärmepumpe im Kühl- und Heizbetrieb. Ein genereller Vorteil der solarthermischen Verfahren im Vergleich zur Lösung mit Photovoltaik ist, dass eine hohe Belastung des Stromnetzes ausbleibt. Dies ist neben den hohen Potenzialen zur Vermeidung klimaschädlicher Emissionen ein weiteres Argument für Bemühungen, um die Marktdurchdringung zu erhöhen.



Dr. Uli Jakob
Geschäftsführer des Green Chiller Verbandes für Sorptionskälte e. V. in Berlin. Direktor von dr. jakob energy research (JER) und Geschäftsführer von Solem Consulting in Europa. Lehrbeauftragter im Studiengang KlimaEngineering der Hochschule für Technik Stuttgart

Die solare Kühlung wurde maßgeblich in den letzten zehn Jahren in Deutschland von Forschungseinrichtungen sowie innovativen Firmen von ersten Prototypen zu marktreifen Produkten entwickelt und vermarktet. So haben wir heute speziell eine Vielzahl von Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen im kleinen und mittleren Kälteleistungsbereich am Markt verfügbar. In Deutschland wird solare Kühlung durch verschiedene Förderprogramme für den privaten/kommerziellen Bereich sowie gewerblichen Bereich gefördert. Letzte Schätzungen sprechen von über 1.200 installierten solaren Kühlungsanlagen weltweit (Stand Ende 2014), somit ist diese Technologie immer noch ein Nischenprodukt, aber mit sehr großem Potenzial. So zeichnet die Internationale Energie Agentur in deren Solar Heating and Cooling Technology Roadmap von 2012 das Potenzial für solare Kühlung wie folgt auf: ca. 17 % des gesamten weltweiten Kältebedarfs sollen in 2050 durch solare Kühlung abgedeckt werden, was rund 417 TWh/a entspricht. Die Märkte für solare Kühlung werden hauptsächlich in Asien und im Nahen Osten gesehen. Solare Kühlung ist somit ein Exportprodukt für deutsche Firmen.



Planung, Kosten und Integration

Die korrekte Auslegung einer Gesamtanlage zur solaren Kühlung ist eine anspruchsvolle planerische Aufgabe. Bisher gibt es noch zu wenige Experten, die Erfahrung mit dieser Technologie haben. Dies und auch die gegenwärtig noch zu hohen Kosten einzelner Komponenten sind heute noch Hemmnisse für die weitere Verbreitung.

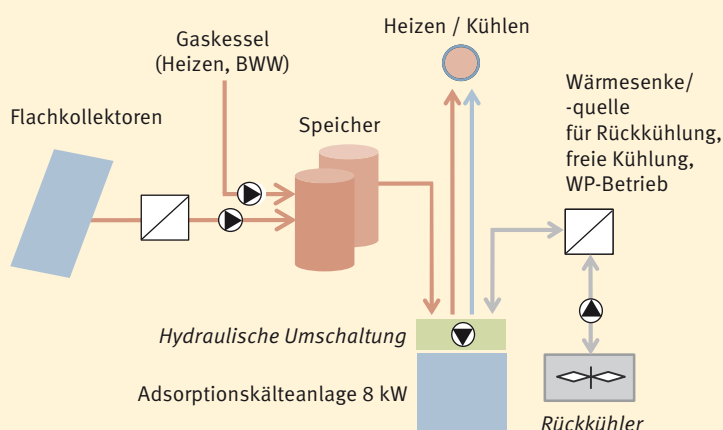
Die Detailplanung der hydraulischen Komponenten und der Anlagensteuerung hat einen erheblichen Einfluss auf die Energieeffizienz. Entsprechend sorgfältig müssen die Teilgewerke Solarthermie, Wärme- und Kälteversorgung zusammengeführt werden. Dabei erschwert die noch lückenhafte Normung den Vergleich der Komponentenleistung und -effizienz (siehe Infobox Normung). Optimierungen auf mehreren Ebenen begrenzen den Planungs- und den Betriebsaufwand. Erforderlich sind:

- Einfache Auslegungswerkzeuge (Tabellen, komfortable Programme),
- Qualitätssicherung in Installation, Inbetriebnahme und Wartung (Empfehlungen und Richtlinien),
- standardisierte Bewertungsmethodiken auf Komponenten- und Systemebene (Kriterien, Richtlinien, tabellen- oder simulationsbasierte Methoden),
- laufende Betriebsüberwachung (z. B. mit Fehlerdiagnose).

Diese Fragen wurden von Wissenschaftlern und Firmen in der Task 48 ‚Quality Assurance & Support Measures for Solar Cooling Systems‘ im Solar Heating and Cooling Programme der Internationalen Energieagentur (IEA) aufgenommen und daraus Empfehlungen und Rahmendokumente zum Bereich der Qualitätssicherung erarbeitet. Die Task wurde in 2015 beendet, die Dokumente sind über die Internetseite erhältlich. Für Endkunden sind insbesondere Modelle des Energie-Contracting interessant, wie es sie bereits bei der solarthermischen Wärmeversorgung gibt. Für die solare Kühlung sind die wirtschaftlichen Hürden noch hoch. Dennoch wurde ein solches Modell bereits von dem österreichischen Solarunternehmen S.O.L.I.D. für eine große solare Wärme- und Kälteversorgung am United World College in Singapur umgesetzt.

Das noch sehr kleine Marktvolumen hat starke Auswirkungen auf die Komponentenpreise und eine geringe Standardisierung führt zu erhöhtem Planungsaufwand. Beides erhöht die Investitionskosten. Bei Ab- oder Adsorptionskälteanlagen im kleinen Kälteleistungsbereich sind auch zwischen den Herstellern und Technologien große Unterschiede in den spezifischen Komponentenkosten beobachtbar. Abb. 13 zeigt ein Beispiel.

Abb. 11 Vereinfachtes Anlagenschema der SolCoolSys-Installationen. Nicht in allen Anlagen im Feldtest ist der Wärmepumpenmodus aktiviert. Quelle: Fraunhofer ISE



Die Preise der Hauptkomponenten zeigen starke Skaleneffekte: 2011 lagen die Kosten von ‚Solar Cooling Kits‘ (Kollektor, Kälteanlage, Peripherie; ohne Installation und Kälteverteilung) für Anlagen mit einer Nennkälteleistung zwischen 8 und 15 kW bei ca. 4.500 Euro pro kW. Bei 100-kW-Anlagen lagen die spezifischen Kosten hingegen bei ca. 2.000–2.500 Euro/kW. In jedem Fall übersteigen die Investitionskosten die der konventionellen Kühlung um ein Mehrfaches. Es muss aber berücksichtigt werden, dass eine solarthermische Anlage weiteren Wärmebedarf decken kann. Ein Kostenvergleich ist daher eher auf der Basis von Vergleichsrechnungen, wie in Abschnitt 3 dargestellt, zielführend.

Nicht nur bei den Komponentenkosten, sondern auch im Bereich der Systementwicklung gibt es Potenziale, die Anlagen- und Installationskosten wirksam zu senken: Forscher optimierten im Projekt SolCoolSys Systeme kleiner

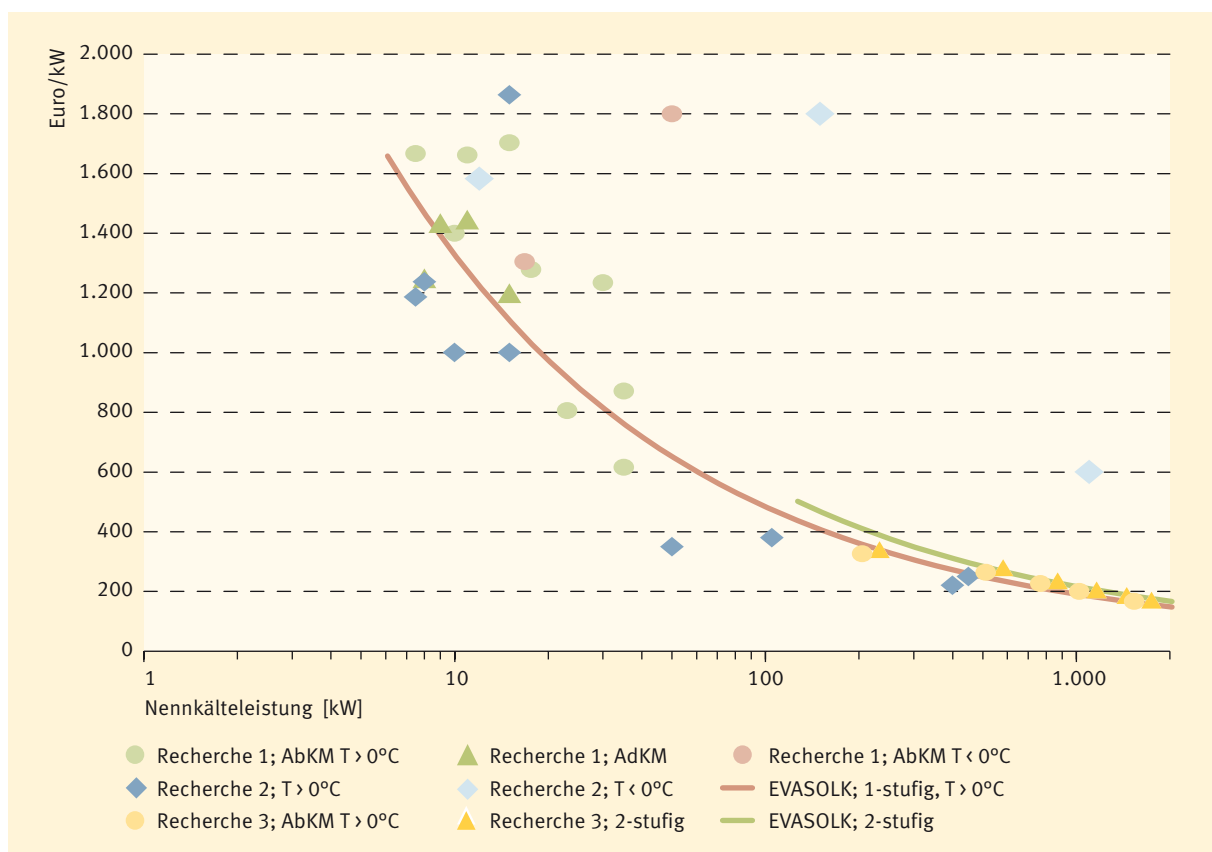


Abb. 12 Solare Kühlung im Rahmen der SolCoolSys-Feldtests an der Richard-Fehrenbach-Gewerbeschule in Freiburg. Links: Adsorptionskältemaschine und Hydraulikgruppe; rechts: Kollektorfeld. Quelle: Fraunhofer ISE

Leistung und erprobten sie in Feldtests. Insgesamt wurden sechs Adsorptionskälteanlagen mit einer Kälteleistung zwischen 8 und 15 kW in Verbindung mit einem Flachkollektorsystem installiert. Eine speziell entwickelte, vorgefertigte Schaltgruppe enthält alle wesentlichen hydraulischen Elemente und erlaubt in einigen Anlagen auch

den Betrieb der Adsorptionsanlage als Wärmepumpe sowie die freie Kühlung über den Luftkühler mit hocheffizienter Lüfertechnik (Abb. 11). Die letzte Anlage ging im Sommer 2013 an einer Gewerbeschule in Freiburg in Betrieb (Abb. 12). Dort werden zusätzlich vorhandene Erdsonden als Wärmesenke in der Rückkühlung genutzt.

Abb. 13 Zwischen 2010 und 2012 durchgeführte Preisrecherchen für thermisch angetriebene Kältemaschinen, umgerechnet auf die spezifischen Kosten pro kW Nennkälteleistung. Preise ohne MwSt., ohne Rückkühler und sonstiger Peripherie. Die durchgezogenen Linien wurden als Kostenkurve in der Vergleichsstudie Solare Kühlung in Gebäuden im Verbundvorhaben EVASOLK verwendet. Quelle: Fraunhofer ISE





Wo die Forschung ansetzt

Spätestens mit dem Förderkonzept Solarthermie 2000plus wurde die solare Kühlung ein Bestandteil der Energieforschung. In der Folgezeit konnten unterschiedliche Solarsysteme in Forschungs- und Demonstrationsvorhaben als integrale Bestandteile der Gebäudetechnik fortentwickelt werden. Ein Schwerpunkt heute ist die Komponentenentwicklung.

In Solarthermie 2000plus wurde der Betrieb von fünf Anlagen mit sehr unterschiedlichen Betriebskonzepten analysiert. Die Forscher konnten in einer Begleitforschung (FKZ 0329605A) zeigen, dass sich auch in großen bestehenden Anlagen mit thermisch angetriebener Kälteversorgung eine zusätzliche Kollektoranlage mit gutem Erfolg integrieren lässt.

Ein Beispiel ist die solare Kühlung in Betriebsgebäuden der Deutschen Telekom am Standort Rottweil. In Rottweil vermindert eine Solarthermieanlage den Einsatz von Gaskesseln. Größter Wärmeversorger für den Antrieb der Absorptionskälteanlage ist auch hier Abwärme aus einem BHKW. Der Betrieb der Wärmeversorger erfolgt hier im Gegensatz zur Anlage bei FESTO (s. Rubrik Aus der Praxis: Erfolgsgeschichten) nicht gleichzeitig, sondern sequenziell. Beide Konzepte stellen unterschiedliche Anforderungen an die Kollektorgroße, Speichergröße und Betriebsstrategie. Ein Schema mit den Hauptkomponenten der Anlage in Rottweil zeigt Abbildung 14.

Zwei weitere Installationen demonstrieren die solar autonome Kühlung im kleinen Leistungsbereich (ohne kältetechnischen Backup; Einsatz des Gaskessels nur zu Heiz- bzw. Warmwasserversorgungszwecken): Im Niedrigenergiegebäude der Berufs- und Technikerschule in Butzbach klimatisieren zwei Absorptionskälteanlagen mit je 10 kW Nennkälteleistung die Schulungsräume. Sie stellen Kaltwasser auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus bereit zum einen für die Zuluftkühlung und -entfeuchtung und zum anderen für den Betrieb der Flächenkühlung. Die Anlage dient auch zu Ausbildungszwecken im technischen Bereich. Das Schema der Anlage zeigt Abbildung 15.

In Fürth kühlt seit 2007 eine Absorptionskälteanlage mit 30 kW Nennkälteleistung die Bürogebäude der IBA AG. Die Wärme liefert ein Flachkollektor mit 88 m² Aperturfläche. Sowohl in Butzbach als auch in Fürth konnte für kleine Anlagen gezeigt werden, dass über mehrere Stunden am Tag solar gekühlt werden kann (in Butzbach bis zu 8 Stunden) und dass sich das Raumklima im Gebäude auch ohne weiteren Backup in der Kälteversorgung wirksam verbessert.

Technisch verlief der Anlagenbetrieb der solaren Kühlung in Solarthermie 2000plus weitgehend störungsfrei. Während der Betrieb der Kollektorfelder positiv bewertet wurde, waren die Forscher nicht immer mit der elektrischen Arbeitszahl der solaren Kühlung zufrieden. Optimierungspotenzial sehen sie hauptsächlich in der Auslegung und Betriebsstrategie der Rückkühlung, aber auch die sorgfältige Dimensionierung der Kreislaufpumpen in allen hydraulischen Kreisen ist essentiell.

Rückkühlung mit Phasenwechspeicher

Die Leistungsfähigkeit von thermischen Kältemaschinen hängt stark von der zur Verfügung gestellten Rückkühltemperatur ab. Trockene Rückkühlwerke stoßen an sehr heißen Tagen mit höchstem Kältebedarf an ihre Grenzen. In dem Projekt SolarCool+PCM entwickelten Forscher des ZAE Bayern ein Konzept, bei dem ein Phasenwechspeicher (PCM Speicher) solche Lastspitzen auffängt. Der Latentwärmespeicher nimmt einen Teil der Abwärme bei einer konstanten Temperatur von 29 °C auf, indem das Salzhydrat Calciumchlorid Hexahydrat aufgeschmolzen wird. In der darauffolgenden Nacht entlädt sich der Speicher wieder über den Rückkühler.

Eine Demonstrationsanlage wurde 2007 entwickelt, installiert und fortlaufend optimiert. Der PCM-Speicher ist auf der Rückkühlseite einer 10-kW-Absorptionskältemaschine integriert, die über Kühldecken zur Büro Kühlung eingesetzt wird. Dadurch kann auch bei hohen Umgebungstemperaturen eine ausreichend niedrige Rückkühltemperatur von 32 °C gewährleistet werden. Der elektrische EER dieses Systems erreicht nach der Optimierung einen durchschnittlichen Wert von 11 und liegt somit deutlich über einem vergleichbaren Kompressionskältesystem.

Rückkühlung in existierenden Kühlsystemen

Die Rückkühlung solarthermischer Kühlsysteme wirkt sich stark auf Leistung sowie Effizienz der Sorptionskälteanlage aus und verursacht zudem häufig einen beträchtlichen

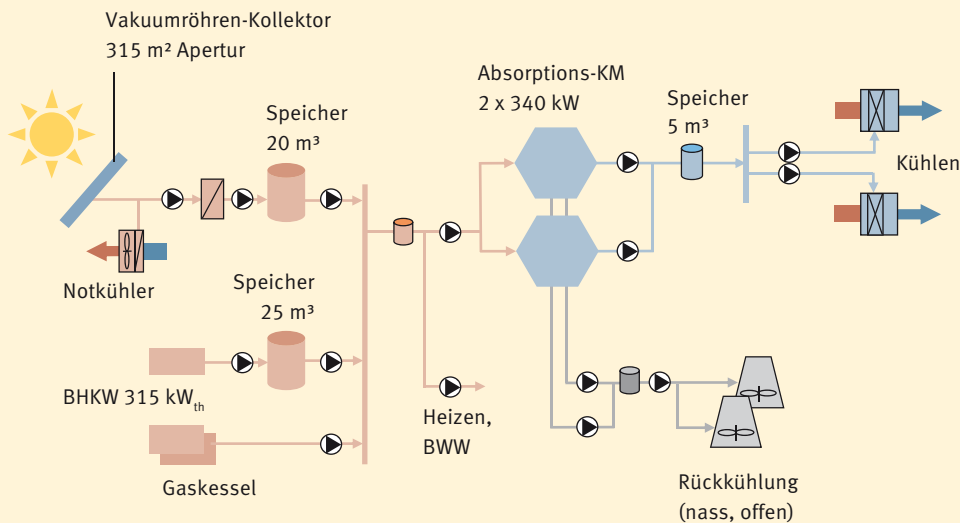


Abb. 14 Solarthermisch unterstützte Kühlung von Betriebs- und Büroräumen am Betriebsstandort Rottweil der Deutschen Telekom. Die Kollektoranlage ist auf einem Nebengebäude installiert und wurde 2011 in Betrieb genommen.
Quelle: Schema: Fraunhofer ISE; Foto rechts: Hochschule Offenburg

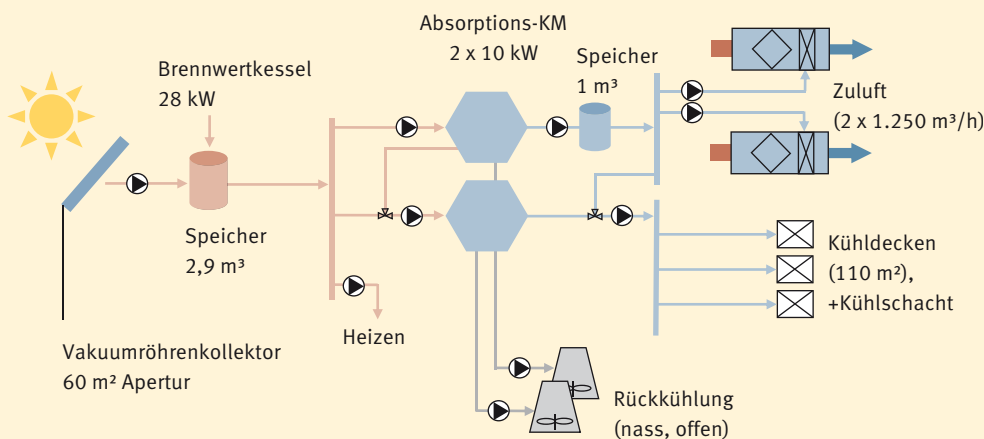


Abb. 15 Solarthermische Kühlung im Niedrigenergiegebäude der Beruflichen Schule Butzbach. Zur Erprobung unterschiedlicher Betriebsstrategien lassen sich die Antriebskreise beider Kältemaschinen seriell oder parallel verschalten. Die Anlage wurde in 2009 Betrieb genommen.
Quelle: Schema: Fraunhofer ISE; Foto rechts: Berufs- und Technikerschule Butzbach

Strombedarf. Im Projekt SolaRück (www.solarueck.de), koordiniert vom Fraunhofer ISE, analysierten Wissenschaftler den Betrieb von Rückkühlern in existierenden Kühlsystemen. Sie untersuchen, wie sich der Wärmeübergang verbessern lässt und gleichzeitig Hilfsenergie eingespart werden kann. Darüber hinaus entwickelten sie generische Betriebsführungsstrategien für Rückkühler sowie für Gesamtsysteme, um die energetische Effizienz der Gesamtanlage zu erhöhen. Von den Industriepartnern wurden unterschiedliche Konzepte für innovative Rückkühler experimentell erprobt:

- Adiabate Luftvorkühlung zur Absenkung der Kühlwassertemperatur bei hohen Umgebungstemperaturen,
- Hybridkühler im kleinen Leistungsbereich mit minimalem Wartungsaufwand,

- Trockenrückkühler auf Basis von Kunststoffmaterialien zur Gewichts- und Kostenreduktion.

Kollektorintegrierte Sorptionskomponenten

Im Forschungsprojektpojekt KollSorp untersuchte die Firma Vaillant in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE innovative Systemlösungen zur Einbindung solar erzeugter Wärme und Kälte.

Ein Konzept basiert auf dem zyklischen Betrieb kollektor-integrierter Sorptionsmodule. Als Arbeitspaar kommen hier hygroskopische Salze in Betracht, die durch Wasserabsorption einen Wärmetransformationsprozess ermöglichen. Ein Funktionsmuster wurde auf dem Solarsimulator des Fraunhofer ISE getestet.

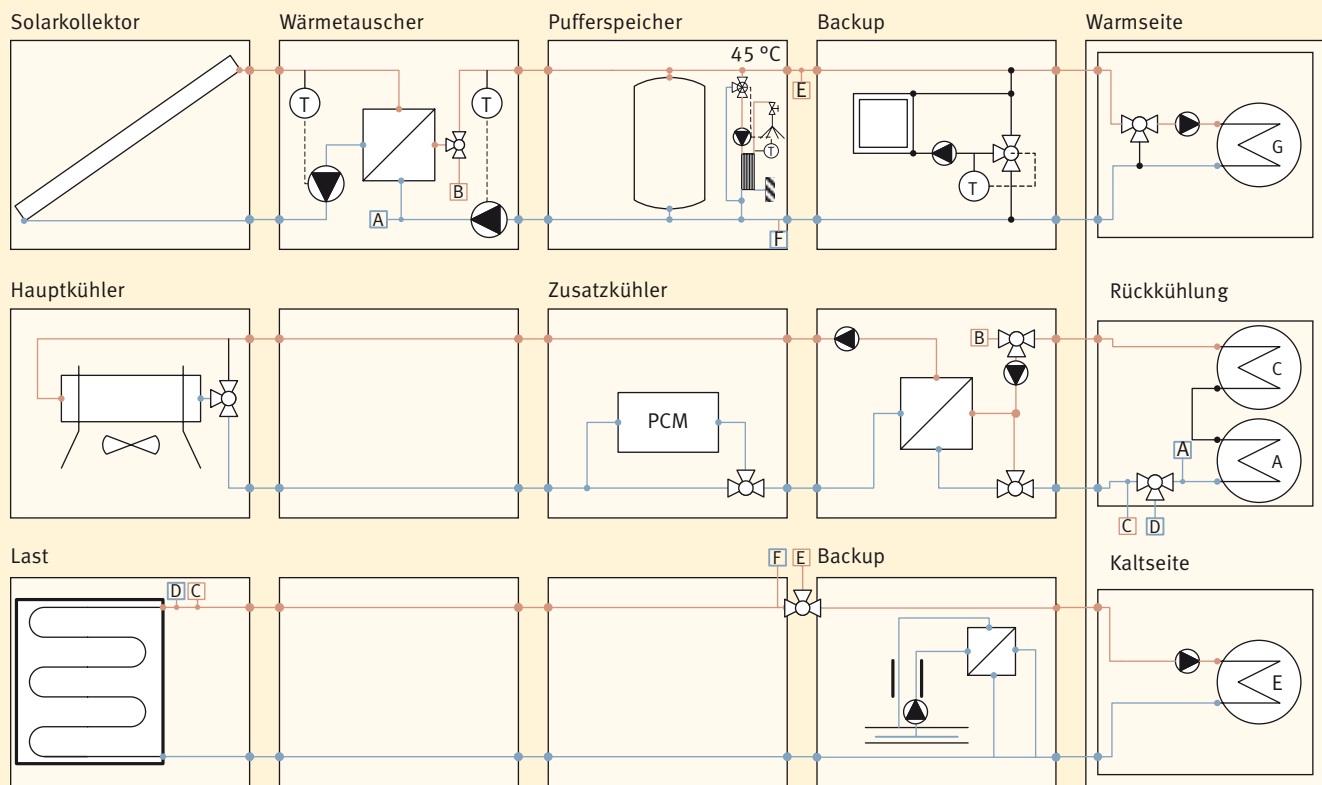


Abb. 16 Schematische Darstellung des Kühlkonzepts SolarCool+PCM. Durch Integration eines Phasenwechselspeichers in die Rückkühlung kann auch bei hohen Außentemperaturen eine niedrige Rücklaufumtemperatur des Kühlwassers gewährleistet werden. Somit werden die Vorteile eines nassen Rückkühlwerks, der niedrigen Rückkühltemperatur, mit den Vorteilen eines trockenen Rückkühlers, der Wartungsfreundlichkeit vereint. Durch eine Wärmeabgabe aus dem Speicher an die Nachtluft wird der Speicher regeneriert. Somit kann die Rückkühlung in die Nachtstunden verschoben werden, was die Nutzung der niedrigen Außentemperaturen ermöglicht. Quelle: ZAE Bayern

Die technischen Ziele wurden erreicht. Bedingt durch den Systemaufbau und das verwendete Arbeitsmittelpaar LiCl-H₂O ergeben sich insbesondere die folgenden Vorteile:

- Geringe Systemkomplexität,
- Desorptionstemperaturen > 100 °C problemlos möglich,
- hohe thermische Effizienz (Arbeitsmittelpaar, geringe Verluste),
- hohe elektrische Effizienz mit elektrischer Arbeitszahl > 12 (Rückkühlung ist verteilt auf Tag und Nacht, hohe Rückkühltemperaturen möglich, keine Pumpe für Hochtemperaturkreis).

Weitere untersuchte Konzepte beinhalten die Kopplung von Solarthermie, Back-up (Gasbrenner) und Sorptionsmodul zur effizienten Erzeugung von Heizwärme, Brauchwarmwasser und Nutzkälte.

Plattenwärmeübertrager ersetzen Rohrbündelwärmetauscher

Im Forschungsprojekt „Absorptionskältemaschine auf Basis kompakter Plattenapparate“ untersuchen Forscher des ZAE Bayern, inwieweit Absorptionskälteanlagen kleiner Leistung (3–5 kW Kälteleistung) mit Plattenwärmeübertrager anstatt der üblichen Rohrbündelwärmetauscher gebaut werden können. Davon versprechen sie sich eine deutliche Volumen- und Kostenreduzierung. Dadurch können auch Absorptionskälteanlagen mit kleinen Leistungen besser im

Massenmarkt Fuß fassen. Hierzu werden verschiedene Plattengeometrien getestet und auch eine Versuchsanlage auf Basis von Plattenwärmeübertragern aufgebaut.

Entwicklung eines solarthermischen Wärmepumpenheiz- und Kühlsystems

Da bei einer solaren Klimatisierung bei gewissen Komfort- bzw. Prozessanforderungen stets ein Backup-System zur Kälteerzeugung vorgehalten werden muss, steigt der Platzbedarf und Apparateaufwand. Das ZAE Bayern forscht an der Integration dieses Backup in Form eines direkt befeuernden Gasbrenners in eine mehrstufige Absorptionskältemaschine. Im Rahmen des Forschungsprojektes soll ein Prototyp entwickelt werden. Da der thermische EER einer einstufigen Absorptionskälteanlage sehr niedrig ist (0,7), soll die Wärmeeinkopplung über den Gasbrenner in einer zweiten Stufe der AKM erfolgen. Somit kann eine thermische Kälteeffizienz von 1,2 erreicht werden. Des Weiteren wird durch die integrierte Gasfeuerung ein effizienter Wärmepumpenbetrieb im Winter ermöglicht. Der Gasbrenner kann konventionelle Heizaufgaben übernehmen, falls ein Wärmepumpenbetrieb mangels Umweltwärme nicht möglich sein sollte. Ziel der Entwicklung ist es zudem, die integrierte Lösung mit einer vorkonfektionierten Regelungs- und Hydraulikeinheit zu versehen, sodass das System stets im effizientesten Modus betrieben und die Einbindung des Systems in der Planung und im Betrieb beim Endanwender vereinfacht wird.

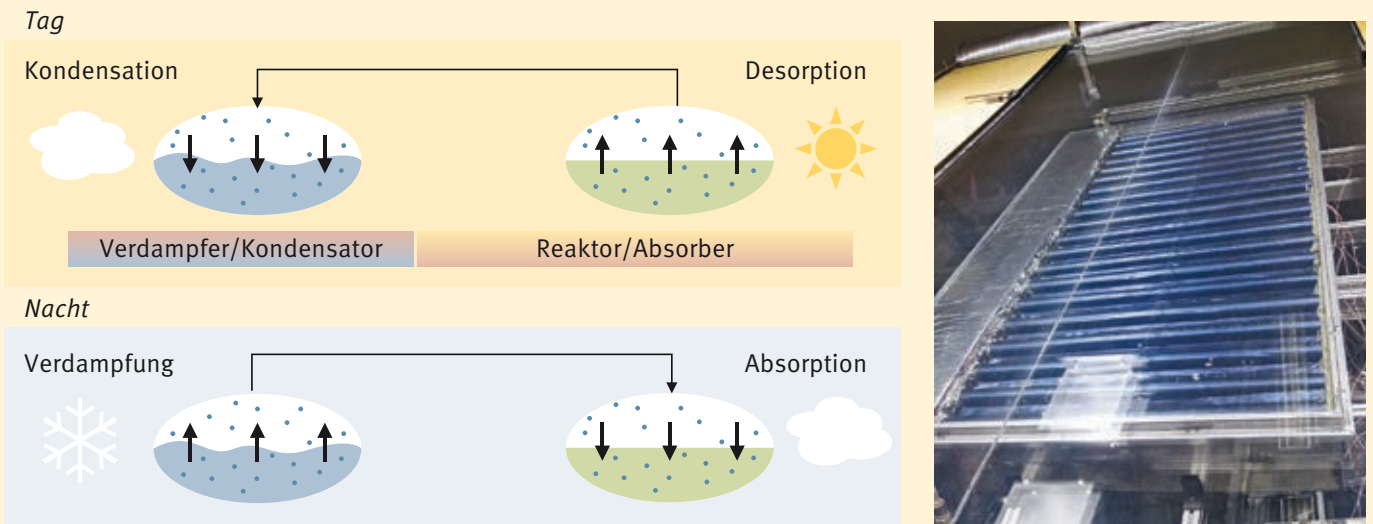


Abb. 17 Funktionsprinzip kollektorintegrierter Sorptionsmodule: Durch Sonneneinstrahlung wird das Arbeitsmittel im Absorber aktiviert (getrocknet), der Kondensator muss gekühlt werden. Nachts kann durch Verdampfung des Wassers Kälte erzeugt werden, der Reaktor/Absorber muss aktiv gekühlt werden. Das rechte Bild zeigt das Funktionsmuster auf dem Solarsimulator. Quelle: Fraunhofer ISE



Abb. 18 Modifizierter Plattenwärmeübertrager im Schnitt; äußerlich ähnelt der Plattenwärmeübertrager einem konventionellen Modell. Durch die inneren Strukturen und Einbauten wird neben dem Wärmeübergang auch der Stofftransport ermöglicht. Somit soll die gleiche Funktionalität wie bei einem Rohrbündelwärmetauscher bei kompakterer Bauweise und geringerem Gewicht erreicht werden. Quelle: ZAE Bayern

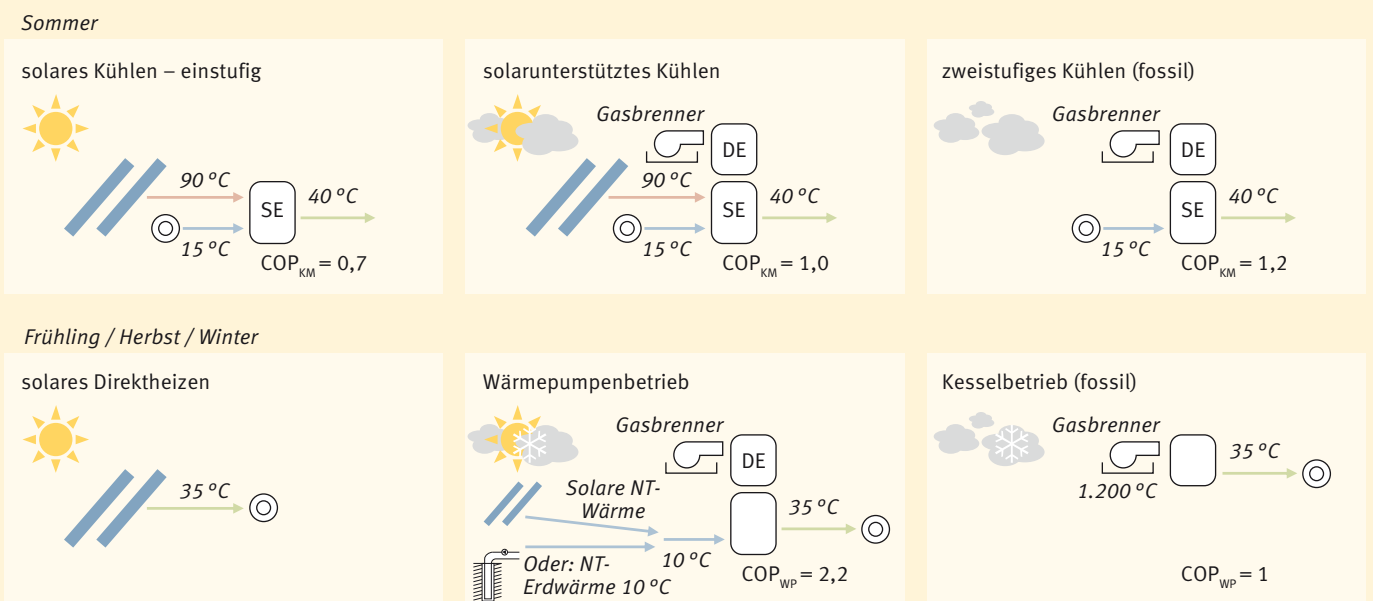


Abb. 19 Betriebsmodi des solarthermischen WP-Heiz- und Kühlsystems. Quelle: ZAE Bayern

Aus der Praxis

Absorptionskälte für verschiedene Regionen

In vielen sonnenreichen Regionen stellen hohe Umgebungstemperaturen in Verbindung mit einem Mangel an Frischwasser ein Problem für den Betrieb einer solaren Kühlung mit nasser Rückkühlung dar. Die Nutzung trockener Rückkühlung wiederum grenzt die einsetzbare thermisch betriebene Technik ein. Das Fraunhofer ISE hat zusammen mit kommerziellen Partnern speziell für die Kühlung in warmen, sonnenreichen Regionen ein Konzept für solarthermische Prozesskühlung im Temperaturbereich zwischen 0 °C und –10 °C erprobt. Dazu wird eine luftgekühlte Absorptionskälteanlage mit dem Stoffpaar $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ mit Solarwärme aus einem Fresnel-Kollektorfeld betrieben. Der Pilotaufbau der Anlage erfolgte beim Projektpartner Kramer

Kühlraumbau GmbH in Umkirch/Freiburg. Der Zielmarkt für spätere Anwendungen liegt in Südeuropa und Nordafrika.

Ein typisches Beispiel für eine solarthermische Kühlung in Deutschland ist die 2012 errichtete Anlage in Altensteig. Das Schrägdach der Technikzentrale eines Produktionsbetriebes wird zur solaren Wärme-, Kälte- und Stromerzeugung genutzt. Die Solarwärme treibt eine Niedertemperatur-Wasser/Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine an. Die zunächst für die Nutzung der Abwärme motorischer BHKW und Fernwärme konzipierten Anlagen können mit vergleichsweise niedrigen Antriebstemperaturen betrieben werden (z. B. Heizwasser 86/71 °C bei Kaltwasser 9/15 °C) und sind damit auch für die Nutzung von Solarwärme hervorragend geeignet. Die kontinuierliche Betriebsweise und der flexible Betrieb über einen weiten Bereich externer Temperaturen sind weitere Vorteile der Absorptionstechnologie.

Abb. 20 Pilotanlage zur solaren Kühlung. Das Kühllager im flachen Anbau enthält auch einen Eisspeicher. Der Fresnel-Kollektor und die Absorptionskälteanlage sind auf dem Dach installiert.
Quelle: Kramer GmbH



Abb. 21 380 m² Vakuumröhrenkollektoren (links) auf einem Dach der Fa. Friedrich Boysen GmbH & Co. KG in Altensteig liefern Wärme zum Antrieb einer 150 kW Wasser/Lithiumbromid-Absorptionskälteanlage (rechts).
Quelle: EAW Energieanlagenbau Westenfeld GmbH



Luftbeaufschlagte Sorptionskälteanlage

Zur solarthermischen Kälteerzeugung werden indirekt beheizte Sorptionskältemaschinen benötigt, also Anlagen, welche mit Heizwasser oder Heißdampf betrieben werden können. Indirekt beheizte Sorptionskältemaschinen sind bisher ausschließlich mit wassergekühltem Kondensator und Absorber/Adsorber verfügbar und benötigen einen zusätzlichen Rückkühler. Im Vergleich dazu weisen luftgekühlte Systeme folgende Vorteile auf:

- Geringere Systemkomplexität,
- reduzierter Installationsaufwand,
- geringerer Hilfsenergiebedarf durch Wegfall, des Kühlwasserkreislaufs.

In dem Projekt „Luftbeaufschlagte Sorptionskälteanlage“ entwickelte und baute das Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden eine direkt luftgekühlte Absorptionskältemaschine mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser/LiBr. Nach der Vermessung auf dem Prüfstand erfolgte eine Felderpro-

bung im Sommer 2015. Dabei konnte die Funktionalität und Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden.

Solar Heating and Cooling in Northern and Central Europe (FKZ 03ET1231A)

Da in Nord- und Zentraleuropa der Heizfall energetisch dominant ist, entwickelt das ZAE Bayern ein System, das ohne weitere Hilfsaggregate sämtliche Anforderungen sowohl an Kühlung aber vor allem auch an Heizung und Warmwasser bedient. Dabei wird eine Absorptionswärmepumpe mit einem solarthermischen Kollektor und einer Biomassefeuerung kombiniert. Die Solarenergie wird sowohl als Antriebsenergie für die Sorptionskälteanlage genutzt, als auch als Niedertemperatur-Wärmequelle für die Absorptionswärmepumpe im Heizfall. Als Backup für die Antriebsenergie wird eine integrierte Holzpelletsfeuerung genutzt. Diese kann sowohl für den Heizfall als auch den Kühlfall die Antriebsenergie bereitstellen, sofern nicht ausreichend Solarenergie bereitsteht.

Aus der Praxis

Erfolgsgeschichten



Abb. 22 Seit 1991 in Betrieb: Solare Kühlung eines Weinflaschenlagers in Banyuls in Südfrankreich. Zwei Absorptionskälteanlagen mit zusammen 52 kW Nennkälteleistung kühlen ca. 3.500 m² Lagerfläche. Durch die thermische Trägheit des Flaschenlagers ist ein Kältespeicher nicht notwendig. Die Anlage wird über ein Vakuumröhren-Kollektorfeld angetrieben; ein Backup-System existiert nicht.
Quelle: Tecsol, FR

Zur Erfolgsgeschichte der solaren Kühlung zählt die rein solarthermische Kühlung eines Weinlagers in Banyuls, Südfrankreich. Die Anlage wurde 1991 in Betrieb genommen und arbeitet daher seit mehr als 20 Jahren. Eine Absorptionskälteanlage mit 52 kW Nennkälteleistung und einem Vakuumröhren-Kollektorfeld von 215 m² kühlt über ein Lüftungssystem die drei Etagen eines Weinflaschenlagers. Dort lagern auf 3.500 m² Nutzfläche ca. 3 Millionen Weinflaschen. Ein Heißwasserspeicher mit einem Kubikmeter ist nur als Kurzzeitspeicher ausgelegt. Die Weinflaschen selbst übernehmen die Rolle des Kältespeichers.

Ein weiteres Beispiel ist die solar unterstützte Kälteversorgung des Technologie-Centers der Firma FESTO AG & Co. KG in Esslingen-Berkheim. Seit 2001 klimatisiert eine Adsorptionskälteanlage mit 1,05 MW Nennkälteleistung den Gebäudekomplex. Zum Antrieb der drei Adsorptionskältemaschinen mit jeweils 350 kW Nennkälteleistung wird Abwärme aus der Produktionsstätte sowie Wärme aus Gaskesseln verwendet. Im Rahmen des Förderprogramms Solarthermie 2000plus wurde die Anlage zusätzlich um ein großes Vakuumröhren-Kollektorfeld erweitert, das den Einsatz der Gaskessel für den Antrieb der Kälteversorgung weitgehend verringert. Die Kollektorfläche beträgt 1.218 m² (Aperturfläche). Auch hier ist der Heißwasserspeicher mit insgesamt 17 m³ nur als Kurzzeitpuffer ausgelegt; solare Wärme wird immer durch die hohe Betriebsstundenzahl der Kältetechnik sofort aufgenommen. Als Kollektorfluid wird nur Wasser eingesetzt; eine spezielle Frostschutzschaltung der Kollektorsteuerung verhindert Kollektorschäden im Winter.



Abb. 23 oben:
seit 2001/2007 in Betrieb: Solar unterstützte Klimatisierung des Technologie-Centers der Fa. FESTO AG & Co. KG. Links ist eine der drei Adsorptionskälteanlagen mit je 350 kW Nennkälteleistung zu sehen
Quelle: Fraunhofer ISE

unten:
Das Kollektorfeld wurde in 2007 hinzugebaut. Abwärme und Solarwärmenutzung haben Vorrang, bei erhöhtem Kältebedarf wird Wärme aus den Gaskesseln zusätzlich eingesetzt.
Quelle: Hochschule Offenburg



Solarstrom statt Wärme

Die solarelektrische Kälteerzeugung mit Kompressionskältemaschinen wird, dank der gesunkenen Preise für Photovoltaik, immer attraktiver. Im Verbundvorhaben EvaSolK analysierten Forscher die Konkurrenzsituation solarthermischer Anlagen für unterschiedliche Gebäude, Klimazonen und Konfigurationen, auch im Vergleich zu konventionellen Kühltechnologien.

Bei der „Evaluierung der Chancen und Grenzen von solarer Kühlung im Vergleich zu Referenztechnologien“ zeigten die Forscher die Perspektiven für unterschiedliche Anwendungsbereiche auf. Kriterien der Bewertung waren der Primärenergiebedarf, die CO₂-Emissionen und die Wirtschaftlichkeit. Als Referenz untersuchten die Forscher Szenarien mit konventionellen Kompressionskältemaschinen.

Beim Vergleich der solarthermischen und photovoltaischen Systeme betrachteten die Wissenschaftler die Gesamtbilanz der Gebäudeversorgung auf Jahresebene, also Heizen, Kühlen und Brauchwassererwärmung. Für ihre Modellrechnungen wählten sie fünf Standorte, die die häufigsten Klimaklassen in Mittel- und Südeuropa repräsentieren. Weitere Rechnungen erfassen sehr sonnenreiche und warme Standorte (Antalya, Türkei und Bechar, Nordafrika). Hier sind konzentrierende Kollektoren und 2-stufige Absorptionskältemaschinen einsetzbar.

Die Forscher analysierten drei Anwendungs- bzw. Nutzungsarten:

- A** Gebäude, deren Nutzungsstruktur etwa einem Mehrfamilienhaus mit sechs Wohneinheiten entspricht. Neben der Kühl- und Heizlast wird auch der Warmwasserbedarf berücksichtigt.
- B** Bürogebäude, bei denen sich die Nutzung auf den werktäglichen Arbeitszeitraum konzentriert. Der Brauchwasserbedarf ist gering. Unterschieden wurde in (B) kleine Gebäude mit zwei Etagen und (B+) größere Gebäude mit acht Etagen und Lüftungssystem.
- C** Gebäude mit einer verstärkten Nutzung in den Abendstunden, auch am Wochenende. Als Modell wird ein Hotel verwendet. Auch hier besteht ein erhöhter Brauchwarmwasserbedarf. Die Rechnungen unterscheiden Gebäude mit zwei Etagen (C) und Gebäude mit acht Etagen und Lüftungssystem (C+).

Im Einzelnen simulierten die Forscher folgende Konfigurationen:

ST – solarthermisch unterstützte Gebäudeversorgung

- Adsorption, Absorption 1-stufig (2-stufig an zwei Standorten),

- Flachkollektor, Vakuumröhrenkollektor (2-stufig: konzentrierender Koll.),
- Backup-Kälteversorgung: Kaltwassersatz; in geeigneten Anwendungen auch solarthermisch autonome Kühlung,
- Wärme-Backup: Gaskessel (nur Heizen, BWW).

Referenz

- Kälteversorgung: elektrisch betriebene Kompressionskältetechnik; je nach Gebäudeart und -größe: Multi-Split-Geräte, Kaltwassersatz,
- Wärmeversorgung: Gaskessel.

Referenz + PV (netzgekoppelt)

- Gebäudeversorgung: wie in Referenz,
- zusätzlich: netzgekoppelter PV-Generator; keine zusätzlichen Komponenten (Speicher),
- PV-Nennleistung: 50 % der elektrischen Nennleistungsaufnahme der Kältetechnik.

In den Simulationen wurde die Kollektorfeldgröße auf minimale solare Überschüsse optimiert. Die Nennleistungen der PV-Anlagen wurden auf 50 % der Nennleistungsaufnahme der elektrischen Kompressionskältetechnik begrenzt, um eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Mehr als 70 % des PV-Stroms kann so direkt von der Versorgungstechnik und von sonstigen Verbrauchern aufgenommen werden. Der überschüssige, ins Netz eingespeiste Strom wurde primärenergetisch und emissionsmäßig berücksichtigt.

Wirtschaftliche Bewertung

Die Bewertungsgrößen wie beispielsweise die relativen Primärenergieeinsparungen ΔPE_{rel} und die Kosten der Primärenergieeinsparung ΔKPE wurden für einen Betriebszeitraum von 20 Jahren berechnet. Die Bewertungsgrößen sind auf die Referenz bezogen. Beispiel: Eine relative Primärenergieeinsparung von $\Delta PE_{rel} = 0,2$ bedeutet 20 % weniger Primärenergieaufwand im Vergleich zur Referenz. ΔKPE gibt an, wie hoch die Kosten der eingesparten kWh Primärenergie in der solaren Variante

im Vergleich zu den Kosten der Referenz sind (> 0 : noch keine Amortisation innerhalb des Betriebszeitraums; < 0 : die Lebenszykluskosten sind geringer als die der Referenz).

Für kleine Wohngebäude (A) erweist sich die solarthermisch unterstützte Kälteversorgung bei heutigen Kosten als unwirtschaftlich. Das Potenzial zur Kostensenkungen ist zudem gering. Dies trifft insbesondere auf weniger einstrahlungsreiche Standorte mit relativ wenigen Kühlbetriebsstunden zu. Allerdings sind die CO_2 -Einsparungen hoch. Wann immer möglich, sollte auf ein Backup-System zur Kälteversorgung verzichtet werden.

Auch bei Bürogebäuden (B) sind die solarthermischen Varianten noch deutlich von der Kostenneutralität entfernt. Das Potenzial zur Primärenergieeinsparung ist erheblich geringer als in Anwendung A. Bemerkbar machen sich hier der geringe Brauchwasserbedarf und die geringe Lastanforderung am Wochenende. Bezogen auf Primärenergieeinsparung und in den spezifischen Kosten der PE-Einsparung, ist hier die Option Ref+PV vorteilhafter.

Wesentlich günstiger ist die Situation bei dem Lastprofil eines Hotels (C). Hier begünstigt ein hoher Brauchwarmwasserbedarf die solarthermischen Varianten. Das Kälte-Backup erlaubt es, die thermisch betriebene Kühlung auf etwa 1/3 der Kühllastspitze auszulegen (Abb. 25). Dies verbessert die Wirtschaftlichkeit deutlich. Da die Spitzenleistung nur selten abgerufen wird, sinkt die Primärenergieeinsparung nur moderat.

Auch hier ist die solarelektrische Variante insgesamt wirtschaftlich attraktiver. Für südeuropäische Standorte reichen die solarthermischen Systeme aber an die Referenz heran. Insbesondere die CO_2 -Einsparungen sind vorteilhaft.

Nimmt man eine mittelfristig realisierbare Kostensenkung von -25% bei dem Solarkollektor und -33% für das Kältesystem an, so wird die Wirtschaftlichkeit an südeuropäischen Standorten vergleichbar mit den konventionellen und den photovoltaischen Systemen. Solar-

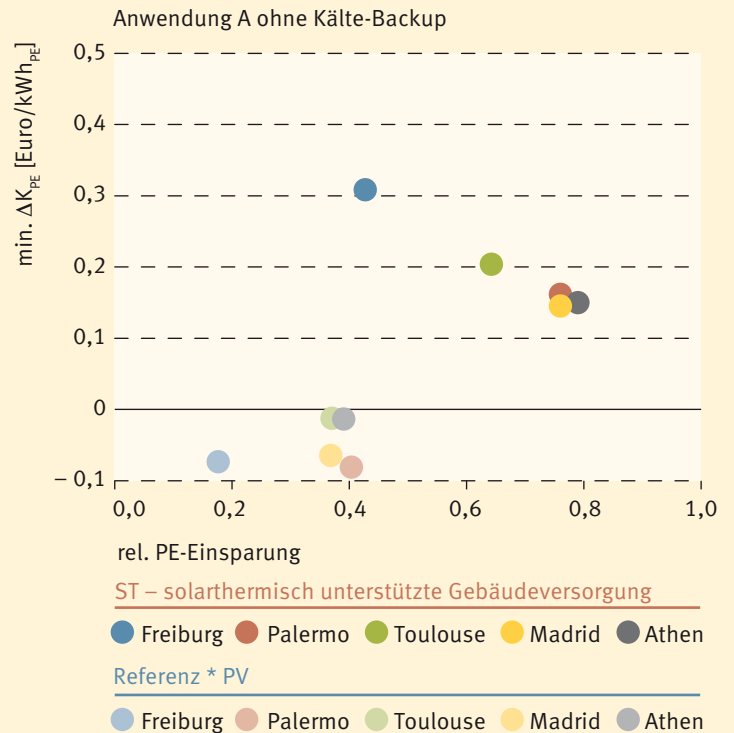


Abb. 24 Systemsimulationen für den Anwendungsbereich A. Die Konfiguration ST wird hier ohne Backup-System zur Kälteversorgung betrieben. Die solare Deckung des Kühlbedarfs mit der solarthermisch angetriebenen Kältetechnik ist dabei immer $> 70\%$. Innerhalb der Kühltisaison sind daher in begrenztem Maße Überschreitungen der Raumtemperatur-Sollwerte möglich. Dies ist für Wohngebäude tolerierbar. Die Konfigurationen Referenz+PV haben geringere Kosten, sparen aber weniger Primärenergie ein. Quelle: Fraunhofer ISE

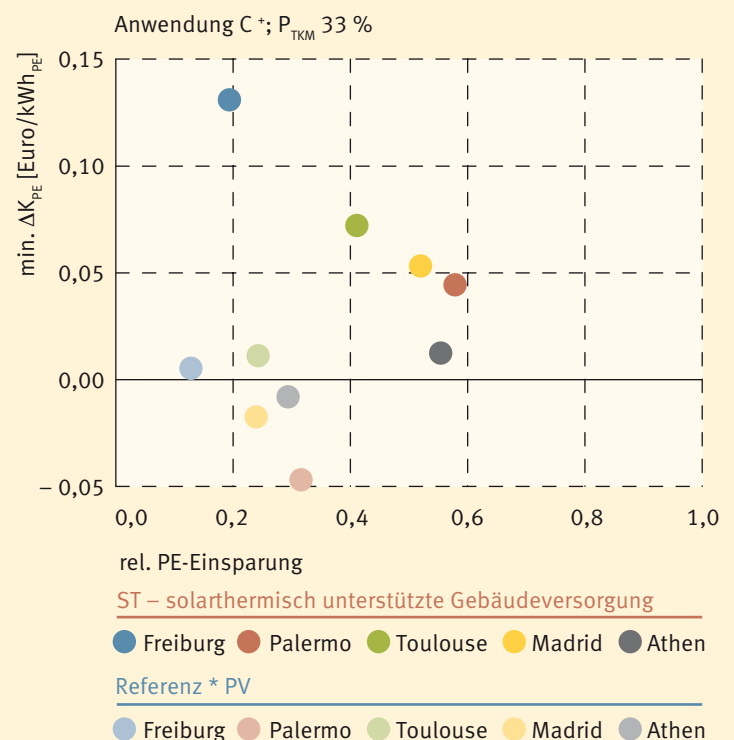


Abb. 25 Systemsimulationen für den Anwendungsbereich C+. Die thermisch angetriebene Kältemaschine (TKM) in der Konfiguration ST wurde hier nicht auf Volllast, sondern auf 33 % der maximalen Kühllast ausgelegt. Die Anlage verfügt über ein Kompressionskälte-Backup. Quelle: Fraunhofer ISE



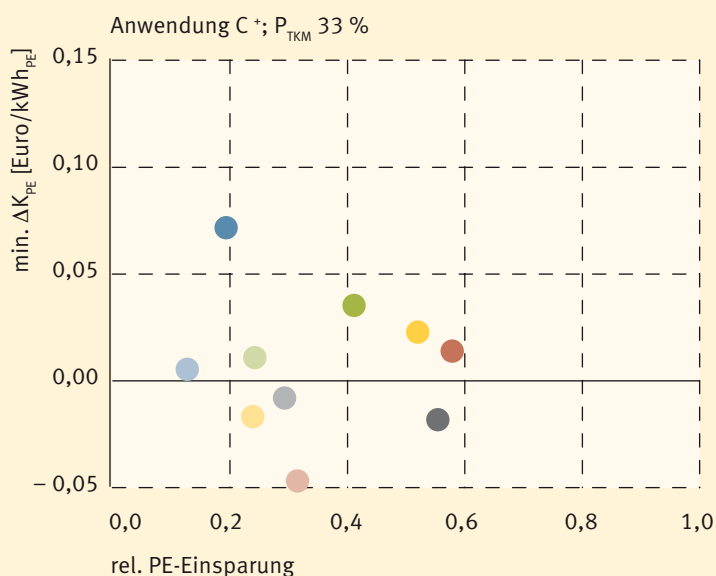
Abb. 26 Die solarthermische Kühlung steht in Konkurrenz zu Systemen mit konventionell oder solarelektrisch angetriebenen Kompressionskältemaschinen. Links: Absorptionskältemaschine Quelle: Kramer GmbH; rechts: Kompressionskältemaschine Quelle: Gerd Hirn, BINE Informationsdienst

thermische Anlagen besitzen aber wiederum das größere Potenzial zur Primärenergieeinsparung.

Zusammenfassend kommen die Forscher zu dem Schluss: Solarthermische Kühlung ist aufgrund der noch hohen Kosten am aussichtsreichsten, wenn ein weiterer Wärmebedarf zu einer gleichmäßig hohen Ausnutzung des Kollektors

führt. Beispiele sind Hotels, Klinikbereiche usw. Weitere Berechnungen zeigen, dass in Regionen mit sehr hoher Sonneneinstrahlung hocheffiziente 2-stufige Absorptionskältetechnik vergleichbare Kosten gegenüber der Referenz erreicht. Die solarelektrische Variante ist aber geringfügig wirtschaftlicher. Neben einer sorgfältigen Dimensionierung der thermisch angetriebenen Kälteversorgung sind daher mittelfristige Kostensenkungen in den Hauptkomponenten von hoher Bedeutung.

Abb. 27 Anwendung wie in Abb. 25, aber Absenkung der Investitionskosten in der ST-Konfiguration: Kollektorsystem –25 %; thermisch angetriebenes Kältesystem (einschl. Rückkühlung) –33 %. Quelle: Fraunhofer ISE



ST – solarthermisch unterstützte Gebäudeversorgung

● Freiburg ● Palermo ● Toulouse ● Madrid ● Athen

Referenz * PV

● Freiburg ● Palermo ● Toulouse ● Madrid ● Athen

Umwelteffekt besser bewerten

Die Bewertungsgröße ΔK_{PE} bemisst ausschließlich die Kosten der Primärenergieeinsparung. Die Höhe der tatsächlich erreichten Primärenergieeinsparung bleibt aber unberücksichtigt. Als Kompromiss zwischen reiner wirtschaftlicher und reiner umweltbezogener Betrachtung definierten die Forscher eine dimensionslose Größe Opt⁺. Darin summieren sie gleichgewichtet die Kosten- und Primärenergieeinsparung (jeweils normiert auf den Aufwand in der Referenz). Die Beurteilungsgröße kompensiert somit Kostennachteile durch hohe Primärenergieeinsparungen. Vorteilhaft im Vergleich zur Referenz sind Werte > 0 von Opt⁺.

Netzentlastung

Insbesondere in südlichen Klimazonen spielen die Auswirkungen auf das oft schwache Netz eine wichtige Rolle. Die Untersuchungen zeigen, dass solarthermische Verfahren den „Netz-Stress“ verringern, während PV-Anlagen diesen tendenziell erhöhen – trotz hohem Eigenverbrauchsanteil. In der solarthermischen Variante zeigt sich zudem insbesondere in der Konfiguration ohne Kälte-Backup (solarthermisch autonome Kühlung) ein geringeres Betragmaximum. In Ref+PV wurden keine zusätzlichen Speicher (thermisch oder elektrisch) berücksichtigt. Diese können bei geeigneter Regelung die Netzfluktuationen herabsetzen, bedingen aber spürbar höhere Investitionskosten.



Normung

Für konventionelle Komponenten der Wärme- und Kälteversorgung existieren umfangreiche Standards und Prüfvorgaben, die einen Vergleich unterschiedlicher Fabrikate untereinander ermöglichen. Im Bereich der (solar-) thermisch getriebenen Kühlung sind die Regelwerke dagegen lückenhaft. Bereits auf der Komponentenebene liegen keine aktuellen, für Europa gültigen Standards vor für heißwasserbetriebene Kühlgeräte. Daher wird aktuell im Rahmen des IEA-SHC-Task 48 (Quality Assurance and Support Measures for Solar Cooling Systems) eine einheitliche Bewertungsmethode erarbeitet. Dabei werden zwei unterschiedliche Ansätze verglichen.

- Die BIN-Methode, in der im Tabellenverfahren Teillastwerte der Komponenten mit Betriebshäufigkeiten verknüpft werden. Dieses Verfahren findet derzeit beispielsweise in der Norm zur Bewertung der saisonalen Effizienz von elektrischen Wärmepumpen Anwendung (DIN EN 14825:2013).
- Die CTSS-Methode (Component Testing System Simulation – Komponententests mit Systemsimulation): dabei werden die Schlüsselkomponenten des Systems einzeln vermessen und so Parameter bestimmt, die anschließend in Simulationen zur Bestimmung der Systemperformance unter Referenzbedingungen herangezogen werden. Auf diese Weise wird beispielsweise der Ertrag von solarthermischen Warmwassersystemen berechnet (DIN EN 12977:2012).

Die Ergebnisse können beispielsweise in nachfolgenden DIN-Aktivitäten aufgegriffen werden. Als erstes Land hat Australien im September 2013 einen „Solar Cooling Standard“ veröffentlicht. Dieser arbeitet nach der CTSS-Methode und beinhaltet bisher jedoch nur offene Verfahren.

Abb. 30 Solare Kühlung Großmarkthalle Oberkirch
Quelle: p-power GmbH

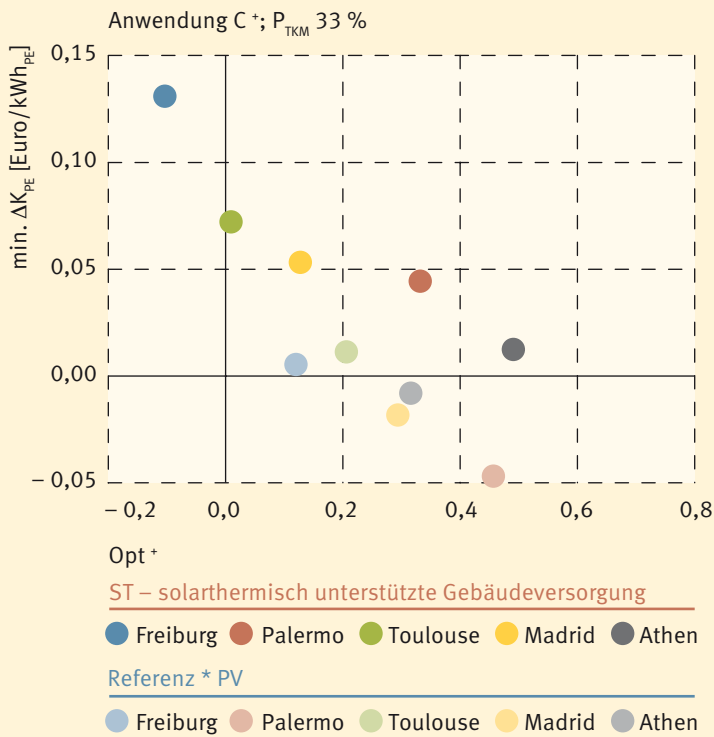


Abb. 28 Anwendung C+ : Gegenüberstellung von ΔK_{PE} und Opt+. Mit der Optimierungsgröße Opt+ liegen neben den Konfigurationen aus Ref+PV auch die ST-Konfigurationen an mehreren Standorten im positiven Bereich. Eine Absenkung der Investitionskosten wurde hier nicht vorgenommen.
Quelle: Fraunhofer ISE

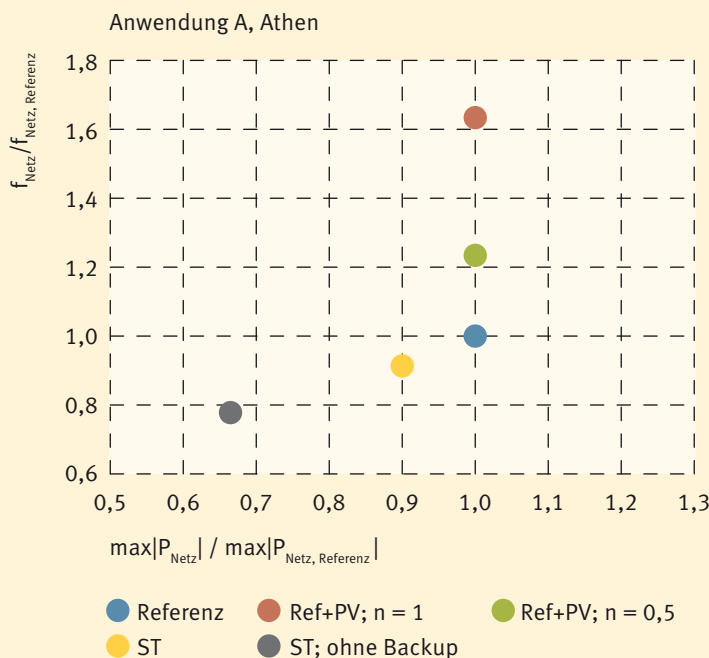


Abb. 29 Netz-Interaktionsindex f_{Netz} aufgetragen über dem Maximalwert der el. Leistung in/aus dem Netz. Die Werte sind auf die der Referenz normiert. f_{Netz} stellt ein Maß für die Fluktuationen im Stromaustausch (Einspeisung und Bezug) dar: mit steigendem Wert kann von einem höheren „Netz-Stress“ ausgegangen werden. Für die Variante Ref+PV sind zwei Datenpunkte enthalten: für die in der Vergleichsstudie standardmäßige Auslegung des PV-Generators auf 50 % der el. Leistungsaufnahme der Kompressionskältemaschine ($n = 0,5$) und für eine 100 %-Auslegung ($n = 1$).
Quelle: Fraunhofer ISE



Ausblick

Die solare Kühlung und Klimatisierung erweist ihre Vorteile insbesondere an sonnigen Standorten mit hohen Betriebsstunden. Für deutsche Unternehmen liegen die Chancen daher insbesondere im Export in südliche Länder. Forscher und Unternehmen erwarten, dass sich die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Technologien verbessert. Entwicklungspotenzial sehen sie beispielsweise in einer Erhöhung der thermischen und elektrischen Arbeitszahl von Sorptionskälteanlagen. Entscheidend sind aber weitere Kostensenkungen bei den Komponenten und in der Systemtechnik. Forscher und Anbieter arbeiten an der systemtechnischen Vereinfachung und damit an der Kostensenkung, insbesondere bei Geräten im kleinen Leistungsbereich. Ansatzpunkte sind z. B. die Geräteintegration der Kreislaufpumpen (Antriebswärme, Rückkühlung, Kaltwasser) sowie die integrierte trockene Rückkühlung.

Bei der Projektplanung lässt sich ein ökonomischer und ökologischer Vorteil nur bei optimaler Ausnutzung des Kollektorfeldes erreichen. Vergleichsrechnungen zeigen:

- Grundsätzlich sind die Umwelteffekte hoch; die Primärenergieeinsparungen können an sonnigen Standorten je nach Anwendungsart bis zu 80 % erreichen. Wird jedoch nur Elektroenergie durch den regenerativen Versorgungsteil eingespart, ist derzeit ein wirtschaftlich vorteilhafter Betrieb schwer zu erreichen.
- Wird die solarthermische Anlage zusätzlich auch zur Heizungsunterstützung und insbesondere zur Brauchwarmwassererwärmung herangezogen, verbessert sich die Wirtschaftlichkeit. Es findet eine Kostenannäherung gegenüber der konventionellen Versorgungstechnik statt, wobei in der Regel noch die Lebenszykluskosten der solarthermischen Varianten höher sind. Insbesondere Anwendungen mit sehr hohem zusätzlichem Brauchwarmwasserbedarf (z. B. Hotels, Kliniken) sind in dieser Hinsicht günstig.
- Die richtige Auslegung großer Anlagen spielt eine wichtige Rolle: Ist ein Kälte-Backup vorhanden (konventionelles Kühlaggregat), ist es sinnvoll, die Ab- oder Adsorptionskälteanlage nicht auf Spitzenlastdeckung auszulegen. Optimierte Auslegungen auf Kälteleistungen deutlich unterhalb der Spitzenlast sparen wirksam Kosten ein, ohne signifikant an Primärenergieeinsparung zu verlieren.
- Solarthermische Konfigurationen unterstützen tendenziell die Senkung der Fluktuationen im Strombezug aus dem Netzanschluss. Dies ist insbesondere in Regionen mit hoher Auslastung der Stromnetze durch Klimatisierungsaufwand zu berücksichtigen.

Links und Literatur

- » Projektberichte zu EVASOLK, Solarthermie 2000plus, ECOS, AgroKühl
www.solare-kuehlung.info
- » Quality Assurance and Support Measures for Solar Cooling Systems
<http://task48.iea-shc.org/>
- » Industrieverband green chiller – Verband für Sorptionskälte e.V., Berlin
www.greenchiller.de
- » Henning, H.-M. (Ed.); Motta, M. (Ed.); Mugnier, D. (Ed.): Solar Cooling Handbook. A Guide to Solar Assisted Cooling and Dehumidification Processes. Wien (Österreich): AMBRA/V, 2013. 3. Aufl., ISBN 978-3-99043-438-3 (Printausgabe)

Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Kühlen und Klimatisieren mit Wärme. Hrsg.: FIZ Karlsruhe GmbH, BINE Informationsdienst, Bonn. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2015. 2., vollständig überarb. Aufl., ISBN 978-3-8167-8324-4
- » Dieses Themeninfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter www.bine.info/Themeninfo_III_2016

BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter www.bine.info/abo

Impressum

Projektorganisation
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
11019 Berlin

Projekträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Förderkennzeichen

0325966A,B,C
0325979A
0325994
0325997
0327406A
0327875A
0327879A
0329662D
03ET1107A
03ET1213A

ISSN

1610-8302

Herausgeber

FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Kontakt · Info

Fragen zu diesem Themeninfo?
Wir helfen Ihnen weiter:

0228 92379-44
kontakt@bine.info

BINE Informationsdienst
Energieforschung für die Praxis
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185-197
53113 Bonn
www.bine.info

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages