

# Entwicklungstendenzen solarthermischer Kühlung

# Kälte aus der Sonne

Sonnenenergie ist der einzige Energieträger, der unbegrenzt und im Überfluss vorhanden ist. Während Strom und Wärme schon jahrzehntelang solar erzeugt werden, gewinnen nun auch vermehrt Anlagen zur solaren Kühlung an Bedeutung. Um mit elektrischen Kompressionsanlagen Schritt halten zu können, gilt es, die Anlage passend zu dimensionieren und die geeignete Kältetechnologie und Regelungsstrategie auszuwählen.

Jährlich werden etwa 43 Mio. Raumklimageräte verkauft. Die Hauptmärkte sind China mit 12 Millionen und die USA mit 11,8 Millionen. Der Markt in Europa ist kleiner, wächst jedoch stark - nicht nur im Verwaltungsbau. Die Gründe sind hohe interne Lasten, fehlende Nachtlüftungsmöglichkeiten und gestiegene Komfortansprüche. Alleine in Deutschland fallen etwa 40000 GWh Stromverbrauch für die Klimatisierung von Bürogebäuden an [1]. Gleichzeitig werden in China jährlich mehrere Millionen Quadratmeter Solarkollektorfläche installiert und Deutschland ist Spitzenreiter auf dem europäischen Solarthermie Markt. Nichts liegt daher näher, als die elektrischen Kompressionskältemaschinen durch thermische Kälte zu ersetzen. Nicht nur Solarenergie, sondern auch Abwärme von Biomasse-Blockheizkraftwerken, Stirlingmotoren und Mikrogasturbinen bieten umweltfreundliche Alternativen zur strombetriebenen Kühlung.

Der Markt für solarthermische Kühlung ist noch klein: insgesamt sind in Europa heute etwa 6 MW Kälteleistung mit einer Kollektorfläche von etwa 20000 m<sup>2</sup> installiert. Das Potential ist jedoch hoch. Die solarthermische Kühlung im mittleren und großen Leistungsbereich ist ausgereift. Bei den kleinen Leistungen unter 10 kW wird noch verstärkt entwickelt.

In vielen Demonstrationsprojekten in Deutschland und Europa werden Betriebserfahrungen gesammelt. Dadurch werden die Regelstrategien verbessert und die Planung der Anlagen erleichtert.

## Konkurrenzfähigkeit solarer Kühlung

Die am weitesten verbreitete solare Kühltechnik basiert auf einem geschlossenen Absorptions-Kreisprozess mit den Kältemitteln Wasser oder Ammoniak. Solche thermischen Kältemaschinen weisen Leistungszahlen (COP) von 0,7 bei einstufigen bis 1,3 bei zweistufigen Anlagen auf, d.h. aus 1 kW Wärme werden also 0,7 bis 1,3 kW Kälte erzeugt. Um mit elektrischen Kompressionskältemaschinen energetisch konkurrieren zu können, müssen vor allem bei einstufigen Anlagen hohe solare Deckungsgrade bzw. niedrige Nachheizenergiemengen gegeben sein. Denn elektrische Kältemaschinen haben selbst im kleinen Leistungsbereich einen COP von knapp 3,0, beste Technik liefert heute Leistungszahlen von 5 bis 6. Der Umwandlungswirkungsgrad von elektrischem Strom aus Primärenergie liegt bei etwa 35 Prozent. Durch Multiplikation des COP mit dem Umwandlungswirkungsgrad kann man die Primärenergie-Leistungszahl ermitteln. Sie besagt, wie viel kW Kälte man aus einer kW Primärenergie erzeugen kann. Je höher die Zahl, um effizienter ist die Kälteerzeugung. Elektrische Kompressionskältemaschinen liefern eine Primärenergie-Leistungszahl knapp unter 1,0 und bei Einsatz bester Technik maximal 2,0. Werden bei solarthermischer Kühlung solare Deckungsgrade von 70 Prozent erzielt, muss noch 30 Prozent fossil bei Leistungszahlen von 0,7 nachgeheizt werden: für 0,7 kW Kälte muss demnach 0,3 kW thermische Nachheizleistung aufgewendet werden. Die Primärenergie-Leistungszahl bei einem thermischen Umwandlungswirkungsgrad von 90 Prozent liegt damit bei 2,1.

Thermische Kühlung kann daher erst bei sehr hohen solaren Deckungsgraden über 70 Prozent mit bester elektrischer Kältetechnik konkurrieren. Energetisch wesentlich günstiger sind solare Kühlanlagen, die nur mit Solarenergie beheizt werden und für den Spitzenbedarf elektrisch nachgekühlt werden.

## Dimensionierung bestimmt Wirtschaftlichkeit

Wird aktiv gekühlt, sind lange Laufzeiten der Kältemaschine entscheidend für die Wirtschaftlichkeit einer solarthermischen Kühlung. Während im Wohnungsbau in Mitteleuropa nur etwa 50 bis 200 Kühlstunden auftreten, sind im südlichen Mittelmeerraum sowie in einigen Industrie- und Verwaltungsbauten etwa 1000 Volllaststunden erforderlich. Spezielle Räume wie z.B. Computer-Serverräume haben ständig einen hohen Kühlbedarf, wodurch die Anlage deutlich wirtschaftlicher betrieben werden kann.

Vom Zentrum für angewandte Forschung an Fachhochschulen (zafh.net) in Stuttgart wurden verschiedene Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Büro, Hotel) mit maximalen Kühllasten zwischen 2 kW und 100 kW untersucht. Die Kühllastverläufe zeigten sich stark davon abhängig, ob der Kühlbedarf eher durch Sonneneinstrahlung (bei hoch verglasten Gebäuden mit wenig Verschattung) oder interne Lasten wie Personen oder Elektrogeräte verursacht wird. Die benötigten Kollektorflächen und spezifischen Erträge resultierten aus den jeweiligen Lastbedingungen. Generell führten hohe interne Lasten zu einem höheren Jahresenergiebedarf als externe Lasten und damit zu längeren Anlagenlaufzeiten und geringeren Gesamtkosten.

Für eine Kältemaschine mit 15 kW Spitzenleistung wurden z.B. für einen kleinen Bürobau mit 450 m<sup>2</sup> Fläche und

großzügiger Südverglasung, aber geringen internen Lasten selbst am Standort Madrid nur 850 Volllaststunden berechnet. Dasselbe Gebäude mit hohen internen Lasten hat dagegen 3700 Volllaststunden. Um 80 Prozent der erforderlichen Energie solar bereitzustellen, wären im ersten Fall 33 m<sup>2</sup> Kollektorfläche erforderlich, im zweiten Fall 103 m<sup>2</sup>. Die Kollektorfläche variierte etwa zwischen 2 und 7 m<sup>2</sup> pro Kilowatt Kälteleistung. Pro MWh Kühlenergie waren zwischen 2,6 m<sup>2</sup> Kollektorfläche bei hohen externen Lasten und 1,8 m<sup>2</sup> bei hohen internen Lasten notwendig.

Bei der Planung und Dimensionierung ist der Kühlenergiebedarf und dessen Verlauf sowie die Regelungsstrategie der Anlage entscheidend. Über das Verhältnis von Kollektorfläche und Speichervolumen zur erforderlichen Kälteleistung oder zur gekühlten Nutzfläche besteht noch keine Einigung. Bei der Kollektorfläche unterscheiden sich Minimal- und Maximalwerte verschiedener Demonstrationsprojekte um den Faktor 10 ((Abb. 2)), bei Speichern sogar um 100. Verlässliche Messdaten über den solaren Deckungsgrad liegen selten vor. Lange Anlagenlaufzeiten und eine optimierte Regelung führen zu den geringsten Gesamtkosten für die solare Kälteerzeugung.

Die Kosten für ein System mit einer 15 kW Kältemaschine variieren dabei für Anlagen unter 1000 Volllaststunden (Bürobeispiel 1) zwischen 37 Cent pro kWh für eine einfach geregelte Anlage und 26 Cent für eine optimierte Regelung und hohe Kälteverteilttemperaturen durch eine Kühldecke. Bei längeren Laufzeiten (Bürobeispiel 2 mit hohen internen Lasten) sinken die Kosten auf Werte zwischen 12 und 15 Cent pro kWh.

Die Gesamtkosten sind meist von den Kosten der solarthermischen Anlage dominiert. Um solare Kühlanlagen besonders bei geringen Laufzeiten wirtschaftlich zu betreiben, müssen die Kollektoren ganzjährig für zusätzliche Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung genutzt werden.

## Entwicklungen thermischer Kältetechnik

### Absorptionskälte

Im kleinen Leistungsbereich unter 20 kW sind bisher nur wenige Absorber verfügbar. EAW Westenfeld produziert einen Absorber mit 15 kW Kälteleistung ((Abb. 3)), der eine Leistungszahl von 0,75 erzielt. (unverständlicher Satz – daher gelöscht)

Interessant ist die Entwicklung von Komplettpaketen für die Heizungsbranche. Eine Reihe von Solartechnikherstellern oder Systementwicklern stellen mittlerweile Komplettpakete für die solare Kühlung bereit. Eine integrierte Regelung vereinfacht das Zusammenspiel von thermischer Solaranlage und Kältemaschine und vermeidet Funktionsfehler. Konkrete Messdaten eines CitrinSolar Projektes ergaben einen COP von 0,6 unter Teillastbedingungen und Temperaturrandbedingungen von 75,8°C (Antriebsenergie) und 13,4°C (Kältebereitstellung). Auch große Firmen wie die Schüco International KG präsentieren seit 2007 Komplettssysteme mit doppelt verglasten Kollektoren und EAW Maschinen mit 15 bzw. 30 kW Kälteleistung ((Abb. 4)).

Die Firma Phönix Sonnenwärme AG aus Berlin führt Feldtests an verschiedenen europäischen Standorten mit einer 10 kW Lithiumbromidanlage mit guten Leistungszahlen durch. Die Markteinführung über die Firma Sonnenklima ist für 2009 geplant.

Neben diesen ersten kommerziellen Kleinanlagen werden größere Absorber mit dem Stoffpaar Wasser-Lithiumbromid seit vielen Jahren in solaren Kühlprojekten eingesetzt. Für die solarthermischen Anlagen werden sowohl effiziente Flachkollektoren oder Vakuumröhren verwendet.

Während für die Vermeidung von Kristallisation in konventionellen Absorptionskältemaschinen ein hoher Aufwand getrieben wird, nutzt die schwedische Firma ClimateWell AB genau dieses Prinzip der Kristallisation von hochkonzentrierter LiCl Lösung zur Erhöhung der internen Speicherdichte: Um das Kältemittel Wasser komplett aus der Salzlösung auszutreiben und zwei Behälter mit Salzlösung auszukristallisieren, werden insgesamt 88 kWh Heizwärme benötigt. Erste Prototypen im Leistungsbereich 1 bis 7 kW sind seit 2005 im Feldtest in Spanien [2]. Das Gerät ClimateWell 10 benötigt Antriebstemperaturen, die 50°C über dem Niveau des Kühlwassers liegen. Wird die Wärme bei 30°C abgeführt und die Kälte mit 17°C bereitgestellt, werden 10 kW Kälteleistung erreicht. Die ersten größeren Projekte für 160 Wohneinheiten im spanischen Andalusien (Mijas) sind derzeit in Planung.

Eine weitere LiBr Maschine kleiner Kälteleistung (Solar 45V) wird seit einigen Jahren von der Firma Rotartica in Spanien entwickelt und in Feldtests analysiert. Mit gemessenen 4 kW Kälteleistung werden Leistungszahlen zwischen 0,6 und 0,7 erzielt [3]. Vom ITW der Universität Stuttgart wird derzeit eine Ammoniak-Wasser-Anlage mit 9 kW maximaler Kälteleistung entwickelt. Die Beförderung der Lösung auf den hohen erforderlichen Druck erfolgt mit einer Membranpumpe. Die deutsche Firma SolarNext AG vertreibt seit 2007 eine in Österreich entwickelte Ammoniak-Wasser Kältemaschine mit 10 kW Kälteleistung.

Zweistufige Absorptionskältemaschinen mit Parabolrinnenkollektoren sind in ersten Projekten der Firma Solitem in der Türkei im Betrieb. Neben solarer Kühlung wird Dampf für Hotel- und Industrieanwendungen erzeugt. Weitere Projekte laufen in der Türkei, Marokko und Jordanien. Bei Kollektortemperaturen von 180°C wird im Dampferzeuger 144°C heißer Dampf erzeugt, der die zweistufige Kältemaschine antreibt.

### Adsorptionskälte

Ein wesentliches Problem der geschlossenen Adsorptionsanlagen ist der schlechte Wärmetransport zwischen Feststoff-Adsorbentien wie z.B. Packungen um einen Wärmetauscher und dem flüssigen Wärmeträger. Erst durch die Beschichtung von Wärmetauschern mit Adsorptionsmaterialien wird diese Technologie leistungsfähig. Die Firma SorTech AG entwickelt derzeit einen Prototypen von 8 bis 10 kW Kälteleistung, der modular aufgebaut bis zu 100 kW erweiterbar sein soll [5].

Größere Adsorptionsanlagen der japanischen Hersteller Nishyodo und Mayekawa laufen in verschiedenen Demonstrationsanlagen mit zuverlässigem Betrieb. Mittlere thermische Leistungszahlen von 0,43 eines 70 kW Adsorbent wurden am Uniklinikum Freiburg gemessen, wobei der solare Deckungsgrad der 171 m<sup>2</sup> Vakuumröhrenanlage durch lange

nächtliche Laufzeiten nur 28 Prozent jährlich erreicht [6].

#### Offene sorptionsgestützte Klimatisierung

Wenige solarthermisch betriebene offene sorptionsgestützte Klimaanlage verfügen über eine detaillierte Messdatenerfassung und -auswertung. Detaillierte Untersuchungen des zafh.net Stuttgart an einer größeren Sorptionsanlage einer Spritzgussfabrik in Althengstett mit 18000 m<sup>3</sup>/h Volumenstrom mit 100 m<sup>2</sup> Luftkollektorfeld zeigen, dass der Kollektorwirkungsgrad während des Regenerationsbetriebs mit Werten um 50 Prozent gut ist, der Kollektorenergieertrag jedoch mit unter 100 kWh/m<sup>2</sup> im Sommer niedrig liegt. Dieses ist vor allem auf die geringen Betriebszeiten mit voller Regeneration, d.h. Aussenlufttrocknung, zurückzuführen.

Eine vom Fraunhofer Institut in Freiburg vermessene Sorptionsanlage mit 10200 m<sup>3</sup>/h Volumenstrom und rein solarem Regenerationsbetrieb ergab jährliche Kollektorerträge der Luftkollektoranlage von maximal 100 kWh/m<sup>2</sup>a. Dieser geringe Ertrag ist vor allem durch die niedrige Laufzeit der Anlage verursacht, die für nur temporär genutzte Seminarräume verwendet wird. Die mittlere jährliche Leistungszahl liegt bei 0,43. Wichtig für den effizienten solaren Kühlbetrieb mit offener Sorption sind daher vor allem lange Laufzeiten der Anlage im Regenerationsbetrieb oder eine parallele Nutzung der Kollektorwärme z.B. für Warmwasserbereitung.

#### Flüssigsorption

Flüssige Sorbentien werden in offenen Systemen zur Trocknung von Luft eingesetzt, um anschließend einen Kühleffekt über Verdunstungskühlung zu erreichen. Sie bieten den Vorteil einer kontinuierlichen Lufttrocknung und können gleichzeitig Wärme abführen. Verschiedene Forschungseinrichtungen arbeiten an der Realisierung von Flüssigsorptionsabsorbern und -desorbern: das Zentrum für angewandte Energieforschung Bayern entwickelt und betreibt Flüssigsorptionsanlagen im Labor und der Praxis. Die University of South Australia arbeitet an Regeneratoren/Absorbern mit Kunststoff-Plattenwärmetauschern und Baumwollmatten für die Verteilung der Flüssigkeit. Das zafh.net Stuttgart entwickelt für den kleinen Leistungsbereich eine sensible Zuluftkühlung mit Flüssigsorptionstrocknung rein auf der Abluftseite.

Die Feldtests mit Flüssigsorptionssystemen waren positiv. Mittlere thermische Leistungszahlen von knapp 1,2 wurden während der ersten Messphase 2005 eines Flüssigsorptionssystems der Firma Menerga erzielt. Die Firma L-DCS hat 2006 ein 350 kW großes Flüssigsorptionssystem zur Lufttrocknung in Singapur installiert, basierend auf den Entwicklungsarbeiten am ZAE Bayern. Mit insgesamt 13000 m<sup>3</sup>/h Luftvolumenstrom konnte bei Außentemperaturen von 33°C und 21 g/kg Feuchte eine Entfeuchtungsleistung von mehr als 10 g/kg erreicht werden. Auch in den USA werden Flüssigsorptionssysteme mit besonders geringen Durchflussmengen entwickelt und derzeit im Feldtest geprüft [6].

#### Fazit

Der Energiebedarf für Kälte und Klimatisierung steigt weltweit. In Deutschland werden bereits 77000 GWh elektrisch für Kühlung eingesetzt. Das sind 14 Prozent des Stromverbrauchs und 5,8 Prozent des Primärenergiebedarfs. Thermische Kühlung mit Solarthermie oder Biomasse kann den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub> Emissionen deutlich verringern. Allerdings können die niedrigen Leistungszahlen schnell zu hohen Primärenergieverbräuchen führen, wenn mit nicht erneuerbaren Energieträgern nachgeheizt werden kann. Deshalb muss vor allem bei einstufigen thermischen Kältemaschinen der solare Deckungsgrad hoch sein oder besser ein vollständig solares Heizsystem vorliegen.

Noch gibt es wenig solare Kühlprojekte, was in erster Linie auf die mangelnde Wirtschaftlichkeit zurückzuführen ist. Ein Grund dafür sind die hohen Wärmegestehungskosten der solarthermischen Wärme. Hier sind Förderinstrumente dringend erforderlich, um den Markt schneller zu durchdringen. Große solarthermische Anlagen für solare Kühlung können noch bis Ende 2008 über das Förderprogramm Solarthermie 2000 plus des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unterstützt werden ([www.solarthermie2000plus.de](http://www.solarthermie2000plus.de)).

Um die Anlagen wirtschaftlich betreiben zu können, müssen die zusätzlichen Investitionskosten der thermischen Kältetechnik außerdem reduziert werden, was bei höheren Stückzahlen zu erwarten ist. Bei sehr geringen Wärmepreisen wie z.B. in Biomasse-KWK Anlagen oder bei ohnehin vorhandenen solarthermischen Anlagen zur Heizungsunterstützung und langen Laufzeiten können heute thermische Kühlanlagen nahezu mit elektrischer Kompressionskälte konkurrieren. Die durchschnittliche Anlagengröße thermischer Kollektoranlagen im Wohnungsbau hat sich auf mittlerweile rund 11 m<sup>2</sup> erhöht. Bei diesem Trend bieten thermische Kältemaschinen gute Möglichkeiten, sommerliche Wärme effizient zu nutzen. Viele Konzepte aus Absorption, Flüssigsorption und Adsorptionstechnik haben mittlerweile nach dem Prototypenstadium den Feldtest und die Produktion erreicht, so dass in den nächsten Jahren vermehrt Projekte auch im kleinen Leistungsbereich zu erwarten sind.

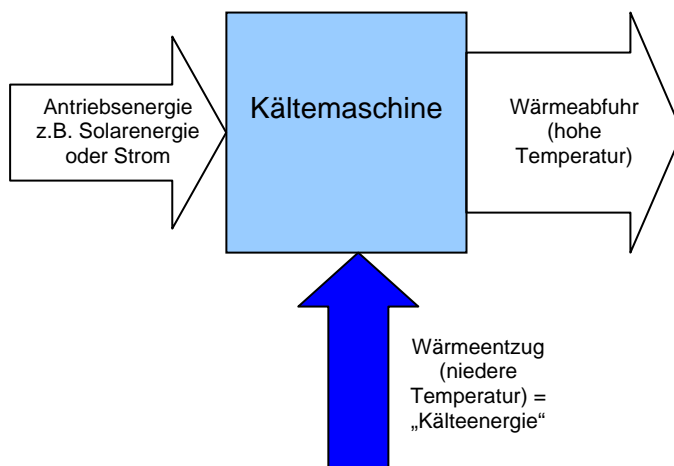
Prof. Dr. Ursula Eicker ist Leiterin des Zentrums für angewandte Forschung nachhaltige Energietechnik (zafh.net) an der Hochschule für Technik Stuttgart  
[ursula.eicker@hft-stuttgart.de](mailto:ursula.eicker@hft-stuttgart.de)

#### Literatur

- [1] Nick-Leptin, Joachim: Political framework for research and development in the field of renewable energies, International Conference Solar Air conditioning, Staffelstein 2005.
- [2] Bales, C., Bolin, G., Nordlander, S., Settenwall, F. : Solar driven chemical heat pump with integral storage – the thermo-chemical accumulator, International Conference Solar Air conditioning, Staffelstein 2005.

- [3] Gorritxategi, X., Usabiaga, M., Egilegor, B., Aldecoa-Otalora, I.: Innovation in solar domestic air-conditioning, International Conference Solar Air conditioning, Staffelstein 2005.
- [4] Paulußen, S., Braunschweig, N., Mittelbach, W.: A novel compact adsorption chiller in the range of 10 kW cooling power, International Conference Solar Air conditioning, Staffelstein 2005.
- [5] Wiemken, E., Henning, H.-M.: Solar Assisted Cooling at the University Hospital Klinikum Freiburg, International Conference Solar Air conditioning, Staffelstein 2005.
- [6] Andrew Lowenstein, Steven Slayzak, Eric Kozubal: A zero carry over liquid desiccant air conditioner for solar applications, ASME/SOLAR06, Juli 2006; Denver, CO, USA , ISEC2006-99079
- [7] Jürgen Schumacher, Ursula Eicker, Dirk Pietruschka: Energetic and economical performance of solar powered absorption cooling systems, Proceedings International Conference Solar Air Conditioning, Bad Staffelstein, 10/2005, www.insel.eu

((Infokasten))



#### Infos für Einsteiger

Eine Kältemaschine setzt einen thermodynamischen Kreisprozess um, bei dem Wärme unterhalb der Umgebungstemperatur aufgenommen („Kälteenergie“) und bei höherer Temperatur abgegeben wird. Dazu wird Antriebsenergie benötigt. Bei Kompressionskältemaschinen wird Strom eingesetzt, bei Absorptions- und Adsorptionsmaschinen Wärme. Der Kreisprozess einer Kältemaschine ist identisch mit dem Kreisprozess der Wärmepumpe. Einstufige Anlagen haben einen Generator zum Austreiben des Kältemittels, bei zweistufigen werden zwei Generatoren nacheinander geschaltet.

#### Kompressionskälteanlagen

Die Kompressionskältemaschine ist mit einem mechanischen Kompressor (Verdichter) und einem Drosselorgan sowie zwei Wärmeübertragern ausgerüstet. Das Kältemittel verdampft bei niederem Druck und entzieht dabei der Umgebung Wärme. Es wird danach durch die Antriebsenergie auf einen höheren Druck komprimiert, in dem folgenden Wärmeübertrager unter Wärmeabgabe bei höherer Temperatur verflüssigt und danach durch den Druckabfall am Drosselorgan expandiert. Dann beginnt der Kreislauf erneut.

#### Absorptionskälteanlagen

Die Absorptionskältemaschine arbeitet mit geschlossenen Kreisprozessen und verfügt über einen Lösungsmittel- und einen Kältemittelkreis, z.B. mit Ammoniak und Wasser. Im Gegensatz zur Kompressionskältemaschine erfolgt die Verdichtung durch die Absorption des Kältemittels in einer Lösung und anschließendes Auskochen des Kältemittels im Generator. (thermische Verdichtung).

#### Adsorptionskälteanlagen

Die Adsorptionskältemaschine arbeitet mit einem festen Lösungsmittel, dem "Adsorbens", an dem das Kältemittel ad- bzw. desorbiert wird. Dem Prozess wird Wärme bei der Desorption zugeführt und bei der Adsorption abgeführt. Da das Adsorbens nur bei flüssigen Sorptionsmitteln in einem Kreislauf umgewälzt werden kann, läuft der Prozess bei festen Adsorbens nur diskontinuierlich, indem zwischen Ad- und Desorption zyklisch gewechselt wird.

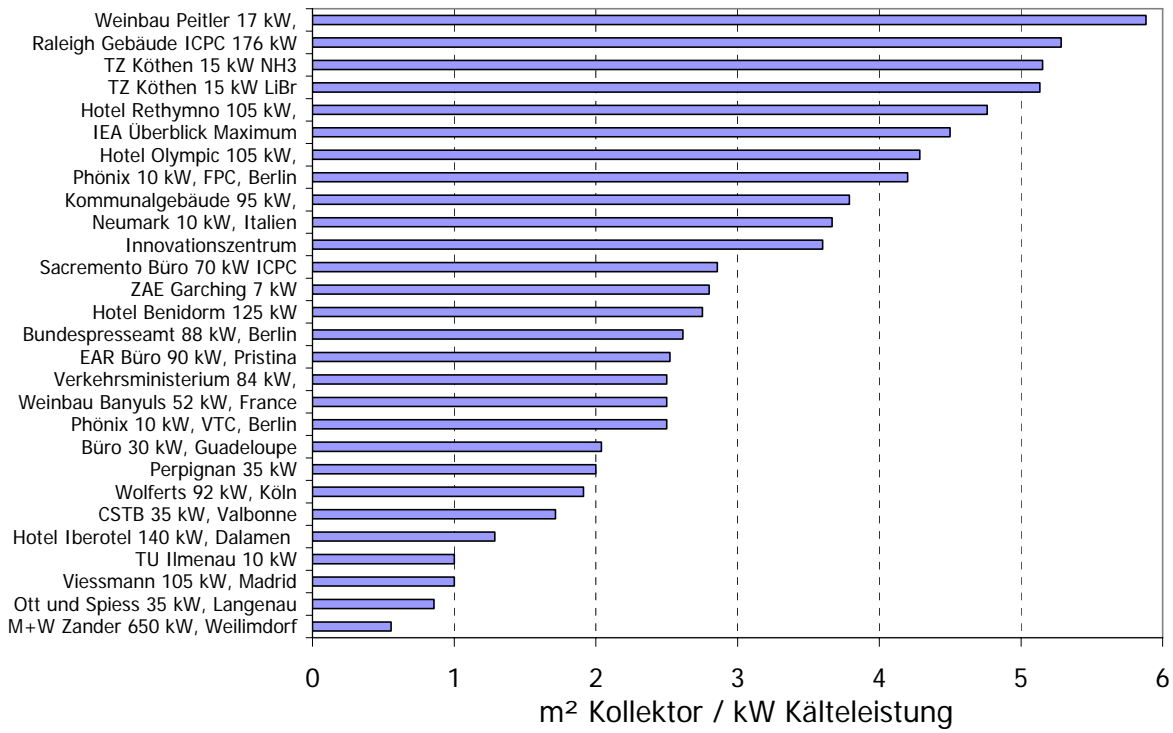


Abbildung 1: Verhältnis installierter Kollektorfläche zur Kälteleistung bei Demonstrationsprojekten solarer Kühlung.