

# Solarunterstützte Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung – Hybridsysteme im Trend

## Einleitung

Seit Beginn der Menschheit wird Energie zur Steigerung der Lebensqualität und Produktivität eingesetzt. Die absolute Höhe des Energiebedarfs stieg nahezu kontinuierlich bis zum heutigen Tag an. Zusätzlich verschoben sich, als Spiegelbild der Gesellschaftsstruktur, die Anteile der einzelnen Bedarfssektoren am Gesamtbedarf. Der seit der industriellen Revolution hinzugekommene Bedarfssektor „Industrie“ hat aufgrund der damit sprunghaft gestiegenen Produktivität und der damit verbundenen materiellen Lebensqualität ebenfalls zu einem deutlich erhöhten Energiebedarf geführt.

Eine effizientere Nutzung der Energieträger mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) führt zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs und des Emissionsausstoßes klimarelevanter Schadstoffe. Diese Technologien auf rein fossiler Basis zu nutzen, reicht jedoch langfristig nicht aus.

Eine intelligente Weiterentwicklung liegt in der solarunterstützten KWK und KWKK, wodurch der Bedarf fossiler Energieträger und dadurch die Schadstoffemissionen verringert werden.

Dieser Beitrag stellt beispielhafte Hybrid-Anlagenkonzepte und Anlagenkomponenten vor, die eine Energieversorgung von Gebäudekomplexen wie Hotelanlagen oder Krankenhäuser mit Wärme, Kälte und Strom durch solarunterstützte KWKK sicherstellen. Bei der gekoppelten Erzeugung lassen sich Energieverluste, die bei der getrennten Erzeugung entstehen, vermeiden.

## Anwendungen der KWKK-Anlagen

In den Sommermonaten sind die Nah- und Fernwärmenetze der regionalen Energieversorger, in die mittlerweile auch solarthermische Anlagen einspeisen, aufgrund des geringen sommerlichen Wärmebedarfes relativ wenig ausgelastet, was mit einer geringen Temperaturabsenkung verbunden ist. Zur besseren energetischen Nutzung dieser Netze können Wärmekraftmaschinen eingesetzt werden, die Strom aus der thermischen Energie gewinnen und diesen in das öffentliche Netz einspeisen. Der nicht in Strom konvertierbare Energieanteil kann in Prozesswärmeanwendungen mit Temperaturen bis 100 °C genutzt werden. Dieses Zusammenwirken fossiler und solarer Energiequellen wird als solarunterstützte KWK bezeichnet und trägt wesentlich zu einer wirtschaftlicheren Nutzung bei.

In den Sommermonaten wird allerdings gerade in vielen öffentlichen Gebäuden verstärkt Kälte für die Kühlung und Klimatisierung benötigt. Im Jahre 1996 wurden in Europa allein für kleine Klimaanlageanlagen mit Kühlleistungen von bis zu 12 kW insgesamt 11.000 GWh an Primärenergie verbraucht. EU-Studien sagen voraus, dass dieser Wert im Jahr 2020 auf das Vierfache, nämlich 44.000 GWh ansteigen wird [1].

Dieser Bedarf wird zurzeit noch überwiegend unter Verwendung von elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschinen (KKM) bereitgestellt. Der Ersatz von Kompressionskältemaschinen durch thermisch angetriebene Absorptionskältemaschinen (AKM) reduziert den Strombedarf. Die Wärmenetze und solarthermischen Anlagen werden durch die damit verbundene gleichmäßigere Verteilung des Wärmebedarfs über das ganze Jahr besser ausgelastet, wodurch die Wirtschaftlichkeit

Dr. Ahmet Lokurlu  
SOLITEM GmbH  
a.lokurlu@solitem.de

Dr. Reiner Buck  
DLR  
reiner.buck@dlr.de

Dr. Christian Dötsch  
Fraunhofer UMSICHT  
christian.doetsch@umsicht.fraunhofer.de

Dr. Hans-Martin Henning  
Fraunhofer ISE  
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

dieser Netze und der sie speisenden, fossil betriebenen und solarthermischen Anlagen enorm erhöht wird.

Zusätzlich zu dem ungleich verteilten Kältebedarf für Klimatisierungszwecke ist ein relativ konstanter Kältebedarf der Industrie für Kälteprozesse vorhanden. Auch dieser wird größtenteils noch mit KKM oder mit durch Industrieabwärme angetriebenen AKM gedeckt. Aufgrund des besseren Wärmeschutzes (Energieeinsparverordnung) ist ein zurückgehender Wärmebedarf an Nah- und Fernwärme zu verzeichnen, gleichzeitig wird ein größerer Kühlungsbedarf aufgrund unterschiedlicher Ursachen notwendig. Deshalb ist die Erzeugung von Kälte aus Wärme zunehmend wirtschaftlich bedeutender.

Durch die Systemeffizienz der solarunterstützten KWKK kann eine Senkung der Strombedarfs-  
spitzen im Sommer erreicht werden, wodurch die Betriebskosten signifikant gesenkt werden. Bei entsprechend großem Wärme- und Kältebedarf sind deshalb dezentrale KWKK-Anlagen zu empfehlen. Bei einigen Verfahren kann das Verhältnis von Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung in weiten Bereichen variiert werden, während bei anderen Verfahren eher ein festes Verhältnis vorgegeben ist. Anlagen, bei denen die Anteile von Strom, Wärme und Kälte nicht variiert werden können, sind besonders für eine am Wärme- bzw. Kältebedarf orientierte Betriebsweise geeignet. Mit der Einbindung von Wärme- und Kältespeichern bietet sich jedoch auch hier die Möglichkeit eines variablen Anlagenbetriebs, der auch an den aktuellen Strombedarf bzw. Strombezugspreis angepasst werden kann, um den Bedarf kostenoptimal zu decken.

## Wärme-Kraft-Maschinen

Prinzipiell können verschiedenste Arten von Maschinen, wie z. B. ORC<sup>1</sup>-Turbinen, Dampf- und Mikroturbinen sowie Stirling- und Dampfmaschinen für die Umwandlung von Solarwärme in elektrische Energie genutzt werden. Außerdem ist die Einbindung der Solarenergie auf höherem Temperaturniveau mittels Gasturbinen und Dampfturbinen möglich.

ORC- und Dampf-Turbinen gibt es ab einer elektrischen Leistung von 200 kW<sub>el</sub>. Für kleinere Leistungsbereiche bis etwa 150 kW<sub>el</sub> und damit dezentrale Versorgungskonzepte eignen sich auch Stirlingmotoren. Die Stirlingmotoren sind aufgrund der extern angeordneten Wärmequelle hervorragend für die Nutzung solarer Wärme geeignet. Stirlingmotoren im kleineren Leistungsbereich (5-25 kW<sub>el</sub>) sind in der Entwicklung und werden in Kombination mit Hochtemperaturwärme von Parabolspiegeln getestet [2]. Mikroturbinen werden derzeit im Leistungsbereich von 30 bis 200 kW<sub>el</sub> angeboten. Aufgrund der hohen Abgastemperatur eignen sie sich sehr gut für die Kombination mit Absorptionskältemaschinen.

Die Auswahl der Wärme-Kraft-Maschine ist vom Betriebstemperaturniveau, ihrer Effizienz im Teillastbetrieb und von den Wärmequellen bzw. -senken im KWKK-System abhängig. Sie kann erst nach einer genauen Analyse des gesamten Energieversorgungssystems vorgenommen werden.

## Kältemaschinen

Die Kälteerzeugung mit thermisch angetriebenen Kältemaschinen ist ideal zur besseren Auslastung von Wärmenetzen und solarthermischen Anlagen mit KWKK-Systemen geeignet. In Deutschland werden pro Jahr ca. 1000 Gebäude mit Vollklimaanlagen ausgestattet. Dies entspricht einer jährlich installierten Kälteleistung von 500 MW<sub>th</sub>. Die Haupteinsatzgebiete der Kältemaschinen liegen im Bereich von

<sup>1</sup> ORC = Der Organic-Rankine-Cycle (ORC) ist ein nicht-überhitzender thermodynamischer Zyklus, in dem eine organische Betriebsflüssigkeit Elektrizität erzeugt.

Büro-, Verwaltungs- und EDV-Gebäuden sowie, Krankenhäusern, Hotels und sonstigen Zweckbauten. Schätzungen für die derzeit im Klimakältebereich installierte Kälteleistung einschließlich der Lebensmittelbranche und der Industrie gehen von ca. 20 GW<sub>th</sub> aus. [5]

Folgende Kältemaschinen werden im Allgemeinen eingesetzt:

- Absorptionskältemaschinen (Wasser-LiBr-AKM, Wasser-Ammoniak-AKM)
- Adsorptionskältemaschinen
- Kaltgasmaschinen
- Dampfstrahlkältemaschinen

Die aufgeführten Kältemaschinentypen unterscheiden sich hinsichtlich der Verfahren, des Antriebs und des zur Verfügung gestellten Temperaturniveaus des Kältebedarfs (Klimakälte > 6 °C, Prozesskälte < 0 °C). Die Wahl einer geeigneten Kältemaschine für ein solarunterstütztes KWKK-Konzept ist mit einer Kältebedarfsanalyse, den technischen Optionen zur Klima- und Prozesskältebereitstellung und einer gründlichen Wirtschaftlichkeitsuntersuchung verbunden. Beeinflusst wird dies sowohl durch die Anforderungen an die Qualität und Charakteristik der Kältebelastung als auch durch die lokalen geographischen Bedingungen für die Aufstellung der Kältemaschine und Rückkühlwerke.

Zu beachten ist außerdem, dass thermische Kältemaschinen eine hohe Sensitivität gegenüber den Antriebs-, Kühlwasser- und Rückkühl- bzw. Kühlturmtemperaturen aufweisen. Deshalb ist es notwendig, bei der Auslegung oder dem Betrieb die möglichen Optimierungspotenziale zusammen mit der Anwendung moderner Technologien zu erschließen.

## Solarkollektoren

Für einen effizienten Betrieb der Wärme-Kraft-Maschinen im mittleren Leistungsbereich sind Temperaturen von 200 °C bis 400 °C erforderlich. Die Kollektoren der bisher realisierten Solarkraftwerke in Kramer Junction (USA) und die verbesserten Parabolrinnenkollektoren vom Typ EuroTrough können Wärme auf diesem Temperaturniveau effizient bereitstellen.

Allerdings sind diese Kollektoren für kleinere Kollektorfelder mit Aperturflächen von einigen Hundert Quadratmetern nicht wirtschaftlich nutzbar. Diese Lücke schließen mittelgroße Parabolrinnenkollektoren, die von der Firma SOLITEM entwickelt und eingesetzt werden. Diese Kollektoren werden durch effizienzsteigernde Maßnahmen, wie z. B. Vakuumabsorber und hinreichend hohe Konzentrationsfaktoren der Solarstrahlung weiter verbessert. Die Parabolrinnenkollektoren der SOLITEM PTC-Reihe<sup>2</sup> stellen bereits heute Wärme mit Temperaturen von 250 °C und höher für Strom-, Prozesswärme- und Kälteerzeugung bereit.

Für Temperaturen über 400 °C werden punktkonzentrierende Systeme wie Parabolspiegel (bis 25 kW<sub>el</sub>) oder kleine Heliostatfelder (ab 100 kW<sub>el</sub>) eingesetzt. Verschiedene derartige Systeme wurden als Demonstrationsanlagen gebaut.

## Anlagenkonzepte der solarunterstützten KWKK

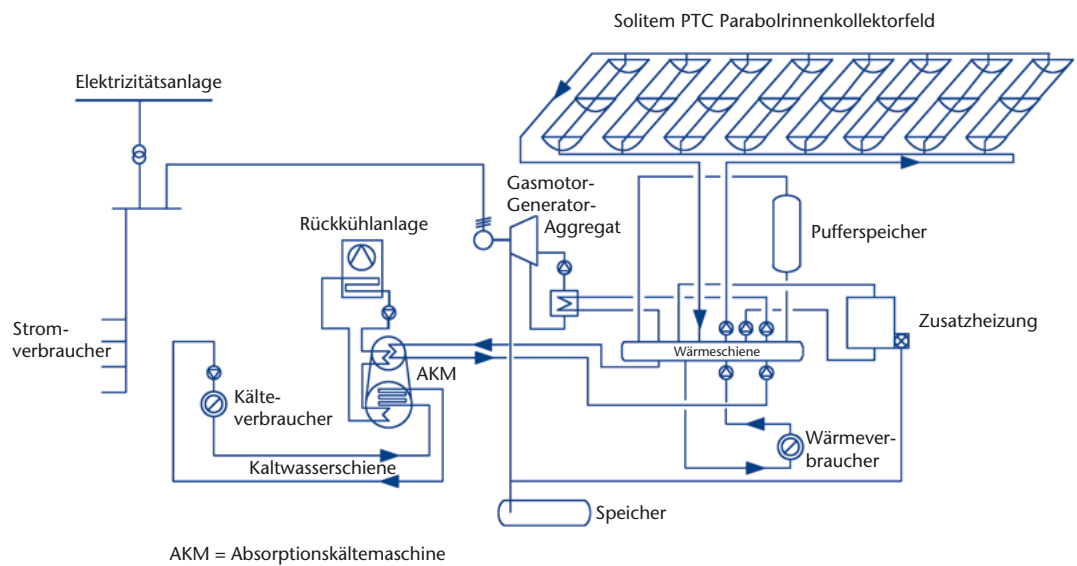
Eine Möglichkeit der solarunterstützten KWKK ist die Kopplung einer Absorptionskälteanlage mit einer solarunterstützten KWKK-Anlage (Abb. 1). Dabei nutzt die Kälteanlage die Abwärme der BHKW-Anlage und die Solarwärme.

Mit der gekoppelten Erzeugung der Nutzenergieformen Wärme, Kälte und elektrische Energie durch den Einsatz einer Absorptionskälteanlage und durch die Nutzung der Solarenergie als Wärmequelle wird Brennstoff eingespart. Das führt zu wirtschaftlichen Vorteilen und zu Schadstoffemissionsminderungen. Während die meisten Kompressionskälteanlagen als Arbeitsmittel FCKW verwenden, nutzen Absorptionsanlagen andere Kältemittel, wie z. B. Lithiumbromid (LiBr)-Wasser oder Ammoniak-Wasser.

Die Auslegung einer KWKK-Anlage richtet sich nach der Bedarfsstruktur des Verbrauchers. In der Kombination mit der BHKW-Technik wird deshalb oft ein Spitzenlastkessel eingesetzt.

<sup>2</sup> PTC = Parabolic Trough Collectors

Abbildung 1  
Energieversorgung  
eines Hotels mit  
Wärme und Elektro-  
energie aus dem  
BHKW, Zusatz- und  
Ersatzstromversorgung  
aus dem Netz und mit  
Solarwärme [3]



Bei dem System wird zusätzlich die Solarwärme in das System eingekoppelt. Ein Konzept mit Spitzenlastkessel bietet den Vorteil, dass Schwankungen im Solarstrahlungsangebot ausgeglichen werden können. Für solche Systeme bieten sich besonders in den Gebieten mit einem hohen Anteil an direkter Solarstrahlung gute Nutzungsmöglichkeiten der Solarenergie. So können z. B. in den Mittelmeerländern bis zu 70 % des für Kälteerzeugung benötigten Wärmebedarfs durch Solarenergie bereitgestellt werden [3]. Durch dieses Anlagensystem lassen sich gegenüber dem heutigen Stand der Technik erhebliche Mengen an fossilen Energieträgern und damit große Mengen an Schadstoffemissioneneinsparen.

Bei der Betrachtung der heutigen Energieversorgung von Hotelanlagen im Süden Europas, wo Milliarden von Kilowattstunden Strom nur für die Klimatisierung und für die Warmwasser- und Heizwassererwärmung verwendet werden, wird die Notwendigkeit deutlich, in diesem Bereich die ersten Schritte in Richtung auf eine energie-sparende und emissionsarme Versorgungsstruktur zu verwirklichen. Mit der Einbindung der Solarenergie in KWKK-Anlagen können die Systemeffizienz weiter gesteigert, die Betriebskosten gesenkt und die Ressourcen geschont werden.

In Abhängigkeit von den Parametern der für die KWKK-Anlagen verwendeten Komponenten und Systemkonzepte gibt es weitere Möglichkeiten,

die Solarstrahlung einzuspeisen. Für eine hohe Effizienz der Anlagen sind Temperaturen von 200 °C bis 400 °C (Parabolrinnenkollektor) oder Temperaturen bis 900 °C (Solarturm) notwendig.

Das Anlagenkonzept (Abb. 2) weist drei deutlich zu unterscheidende Kreisläufe auf:

- Im **Solarkreislauf** wird die Solarstrahlung von Parabolrinnenkollektoren in Wärme umgewandelt und an ein Wärmeträgermedium übertragen.
- Der **Organic-Rankine-Kreislauf** (ORC-Kreislauf) entzieht dem Solarkreislauf über einen Verdampfer Energie. Der Dampfkessel wird bei Bedarf zugeschaltet. Der Dampf des organischen Arbeitsmediums durchläuft eine Turbine, die einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Das entspannte Arbeitsmedium wird in einem Regenerator (Kondensator) wieder verflüssigt und der Kreisprozess startet von neuem.
- Der **Kältekreislauf** besteht aus einer zwei-stufigen Absorptionskältemaschine (AKM), die den Sattdampf, der optional auch vom Dampfkessel bereitgestellt werden kann, bei ca. 4 bar der Dampfschiene als Energieinput in Kälteenergie überführt. Das erzeugte Kaltwasser wird über das Kaltwassersystem dem Kälteverbraucher zugeführt und strömt als aufgewärmtes Wasser wieder in die AKM zurück. Schließlich wird der AKM über einen Kühlturm die Restwärme entzogen.

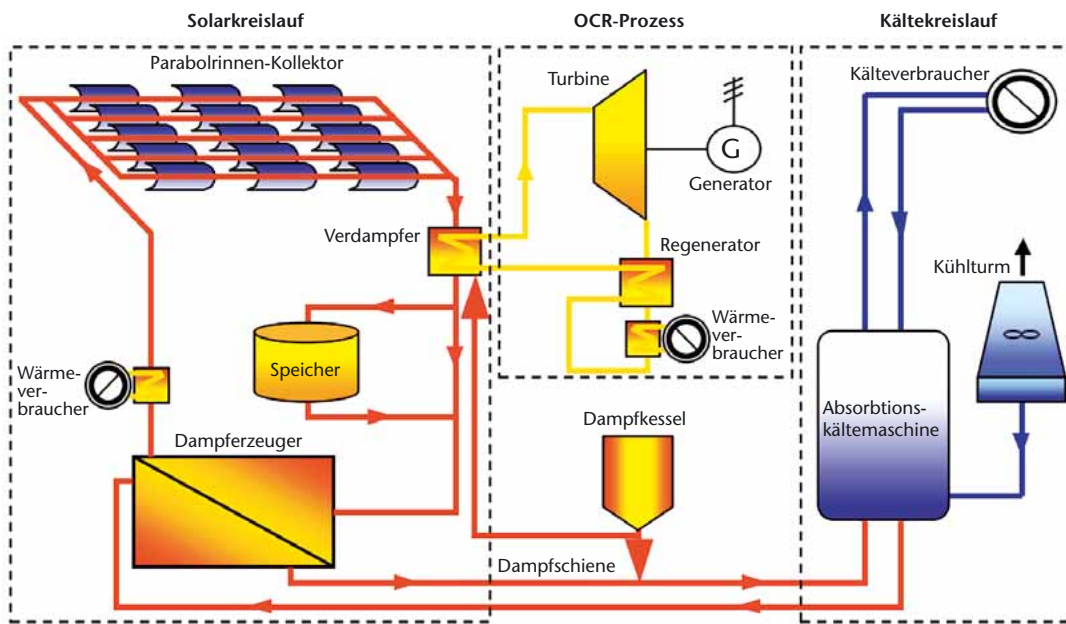


Abbildung 2 Konzept für eine KWKK-Anlage mit Parabolrinnenkollektorfeld, ORC-Prozess und Absorptionskältemaschine von SOLITEM

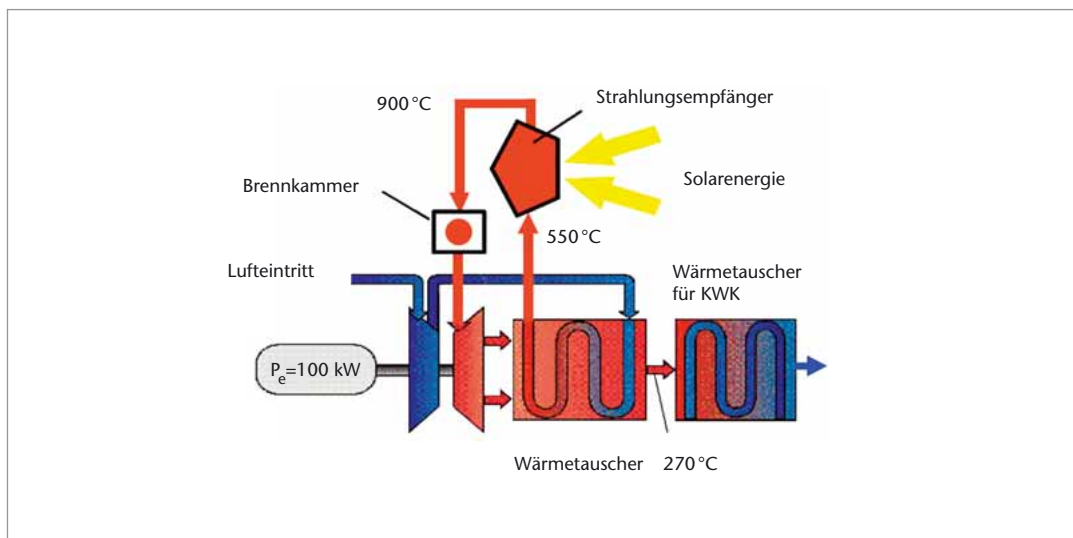


Abbildung 3 Funktionsprinzip einer solarunterstützten Mikroturbine

Bevor das Wärmeträgermedium erneut im Parabolrinnenkollektorfeld erwärmt wird, überträgt der Wärmetauscher die noch nutzbare Wärme an die Wärmeverbraucher für Wärme im Temperaturbereich unterhalb von 100 °C.

Ein weiteres Anlagenkonzept stellt die Kombination einer solarunterstützten Gasturbine mit einer Absorptionskältemaschine dar. In einer Solarturm-Anlage wird mittels vieler Heliostate (nachgeführte Spiegel) die Solarstrahlung auf einen Receiver (Strahlungsempfänger) konzentriert. Im Receiver wird damit die zugeführte Luft aus der Gasturbine auf bis zu 900 °C erhitzt. Abb. 3 zeigt schematisch die Einkopplung der

Solarenergie in einen Mikroturbinen-Prozess. Vom Receiver strömt die erhitzte Luft in die Brennkammer, wo sie durch Zufeuerung auf die erforderliche Turbineneintrittstemperatur von 950 °C gebracht wird. Nach Entspannung in der Turbine gibt das heiße Abgas einen Teil seiner Wärme im Wärmetauscher an die komprimierte Luft, die zum Receiver strömt, ab. Mit der verbleibenden Wärme kann Prozesswärme oder Kälte erzeugt werden. Abb. 4 zeigt die Leistungskennndaten einer Anlage auf Basis einer kommerziellen Mikroturbine mit 100 kW<sub>e</sub>. Im Abgas-Wärmetauscher wird Wasser erhitzt, das zum Antrieb einer Absorptionskältemaschine genutzt wird.

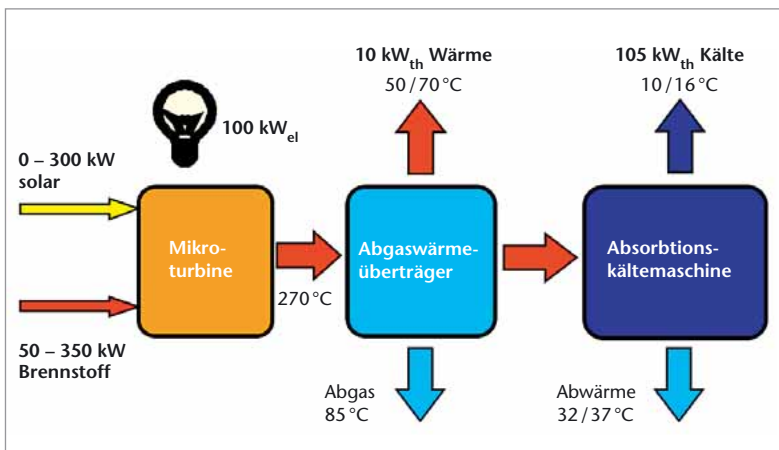


Abbildung 4 (rechts)  
Leistungsdaten einer  
Solarturm-KWKK-  
Anlage

Durch die Möglichkeit der Zufeuerung kann die Anlage jederzeit gesichert elektrische Leistung bzw. Kälte-Leistung liefern. Je nach Sonneneinstrahlung kann die Energiebereitstellung weitgehend über Sonne, durch Brennstoff oder entsprechende Anteile beider Quellen erfolgen. Ein Backup-System für Zeiten ohne Sonnenschein kann somit entfallen. Ein Prototyp einer derartigen Anlage befindet sich derzeit in Empoli (Italien), im Aufbau und soll nach Fertigstellung zur Strom-, Kälte- und Wärmeversorgung eines Krankenhauses beitragen [6].

### Kleine Anlagen für den elektrischen und thermischen Leistungsbereich von bis $5 \text{ kW}_{el}$ und $30 \text{ kW}_{th}$

Die solarunterstützte KWKK kann auch zur Deckung des Bedarfes von Ein- und Zweifamilien-Häusern dienen. Dies erfordert kleine Kollektoren, die auf geneigten Dächern installiert werden können. Die Firma SOLITEM steht kurz vor der Markteinführung der dafür geeigneten kleinen Parabolrinnenkollektoren SOLITEM PTC 1100. Des Weiteren sind kleine, hocheffiziente Kälte- und Wärmekraftmaschinen notwendig. Verschiedene Forschungsinstitute und kommerzielle Unternehmen entwickeln zurzeit kleine Absorptionskältemaschinen von 30 kW Kälteleistung und Stirling- sowie Dampfmaschinen von einigen Kilowatt elektrischer Leistung für die solarunterstützte KWKK von Kleinverbrauchern.

Der Bedarf für Mikro-KWKK-Anlagen, die einige Kilowatt Strom, Wärme und Kälte bereitstellen, hat ein enormes Potenzial, besonders in den Mittelmeerländern. Die solare Wärme, Kälte und Elektrizität kann durch Nutzung von thermischen Speichern auch nachts zur Verfügung gestellt werden. Dies ist besonders interessant für solare Siedlungen im Inselbetrieb.

### Zusammenfassung

Der Einsatz der KWKK-Technik in Hotels, Krankenhäusern, Verwaltungsgebäuden und kommunalen Einrichtungen ist bereits heute zu einer Selbstverständlichkeit geworden und kann als Stand der Technik bezeichnet werden. Bei einem Vergleich der  $\text{CO}_2$ -Emissionen fossil befeuerter und solarunterstützter KWKK-Anlagen zeigt sich die eindeutige Überlegenheit von solarunterstützten KWKK-Anlagen, besonders wenn diese mit dem Zusatzbrennstoff Erdgas betrieben werden und dadurch eine  $\text{CO}_2$ -arme Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung ermöglichen.

Die Wirtschaftlichkeit von KWKK-Systemen kann durch den bedarfsoptimierten Einsatz zur Erzeugung von Elektrizität, Wärme und Kälte und durch erhöhte Ressourcenausnutzung verbessert werden. Für solche Installationen werden sowohl leistungsstarke mittelgroße Parabolrinnenkollektoren als auch Wärmekraft- und Kältemaschinen im kleineren Leistungsbereich unter 100 kW benötigt.

Zurzeit gibt es Aktivitäten, den Bedarf an geeigneten Maschinen zu decken und dadurch den Markt für solarunterstützte KWKK-Anlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich zu beleben. Solche Anwendungen von Solar-Hybrid-Systemen sind sowohl im Wohn- als auch im Industriebereich interessant und werden dazu beitragen, die Kosten von solarunterstützten KWKK-Anlagen zu verringern. Für solare Turmsysteme mit Mikroturbinen müssen vor allem die Kosten der Heliostate und der Anlagenkomponenten weiter gesenkt werden.

Die solarunterstützte KWKK ist ein ganzheitlicher Ansatz im Rahmen eines Energiedienstleistungsangebots und für Contracting- oder Nutzenergiekonzepte innerhalb von kommunalen oder lokalen Energieversorgungssystemen geeignet.

## Literaturangaben

- [1] Henning, H.-M. (Ed.): Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings. A Handbook for Planners. Springer Wien New York. 2004.
- [2] Krüger, D., Mangold, D., Hennecke, K., Christmann, R., Dersch, J., Lüpfer, E., Riffelmann, K.-J.: Combined Solar Heat and Power. A Future Solar Option? Eurosun 2004. Freiburg: 2004.
- [3] Lokurlu, A., Richarts, F.: Klimatisierung durch solarbetriebene Absorptionskälteanlagen (AKM) und Integration von Blockheizkraftwerken (BHKW) am Beispiel von Hotelanlagen. In: AGIT GmbH (Hrsg.): Symposium für Rationelle Energienutzung in Kommunen, Industrie und Gewerbe. Ankara: 1998.
- [4] Pruschek, R., Lokurlu, A., Oeljeklaus, G., Vogelsang, H.: CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung durch Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie – Ist-Stand und Potentiale. S. 145-170. In Sauer, E., Kammann, H.: Jahrbuch 96. VDI Gesellschaft Energietechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1996
- [5] Schönberg, I., Noeres, P.: KWKK. Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Profiinfo II/98. Fachinformationszentrum Karlsruhe. 1998.
- [6] Caselli, T. et. Al.: Solar-Hybrid Gas Turbine Power Plants for the new Hospital in Empoli, Proc. 12th SolarPACES Int. Symposium, October 6-8, 2004, Oaxaca, Mexico