

Kraft und Kälte aus Abwärme und Solarthermie

# Neue Möglichkeiten für die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Abwärme von Blockheizkraftwerken und industriellen Anlagen sowie Solarthermie sind die Quellen, aus denen mit Hilfe der Schukey-Technologie bedarfsgerecht elektrischer Strom und Kälte zur Kühlung und Klimatisierung erzeugt werden können. Eine neue Energieumwandlungstechnologie sowie ein robustes Anlagenkonzept steigern die Energieeffizienz und erweitern die Möglichkeiten der Nutzung solarer Energie. Erste Anlagen sollen 2010 marktreif sein.

**K**raft-Wärme-Kopplung (KWK) leistet einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz und damit auch zur Verminderung der Umweltbelastungen durch CO<sub>2</sub> und sonstiger Schadstoffe. Während der von BHKW erzeugte elektrische Strom nicht zuletzt aufgrund attraktiver Einspeisebedingungen praktisch unbegrenzt zu wirtschaftlichen Bedingungen absetzbar ist, kann die prozessbedingt erzeugte Abwärme mangels geeigneter lokaler Verbräuche und fehlender Verteilungsmöglichkeiten nicht ausreichend genutzt werden. Bei größeren Anlagen ist dies aufgrund des höheren elektrischen Wirkungsgrads oft noch akzeptabel, bei kleineren und Kleinanlagen mit einer elektrischen Leistung von weniger als 1 MW ist deren Wirtschaftlichkeit bei unzureichender Wärmeabnahme jedoch bedroht.

Mit der neuartigen Schukey-Technologie (ST) besteht die Möglichkeit, den Gesamtnutzungsgrad von BHKW signifikant zu erhöhen, indem die Abwärme der Anlage so-

wohl zur Erzeugung zusätzlicher Elektrizität als auch zur Kälteproduktion genutzt wird.

Das Anlagenkonzept ist einfach aufgebaut: eine Schukey-Maschine wandelt (Ab)wärme in mechanische Energie um und treibt einen Generator sowie eine zweite Schukey-Maschine an, die als Kältema-

schine arbeitet. Die Umgebungsluft wird direkt gekühlt. Aufgrund der kompakten Bauweise der ST können neue BHKW damit aus- und bestehende nachgerüstet werden. Darüber hinaus können auch solare Wärme und industrielle Abwärme in Strom und/oder Kälte umgewandelt werden.

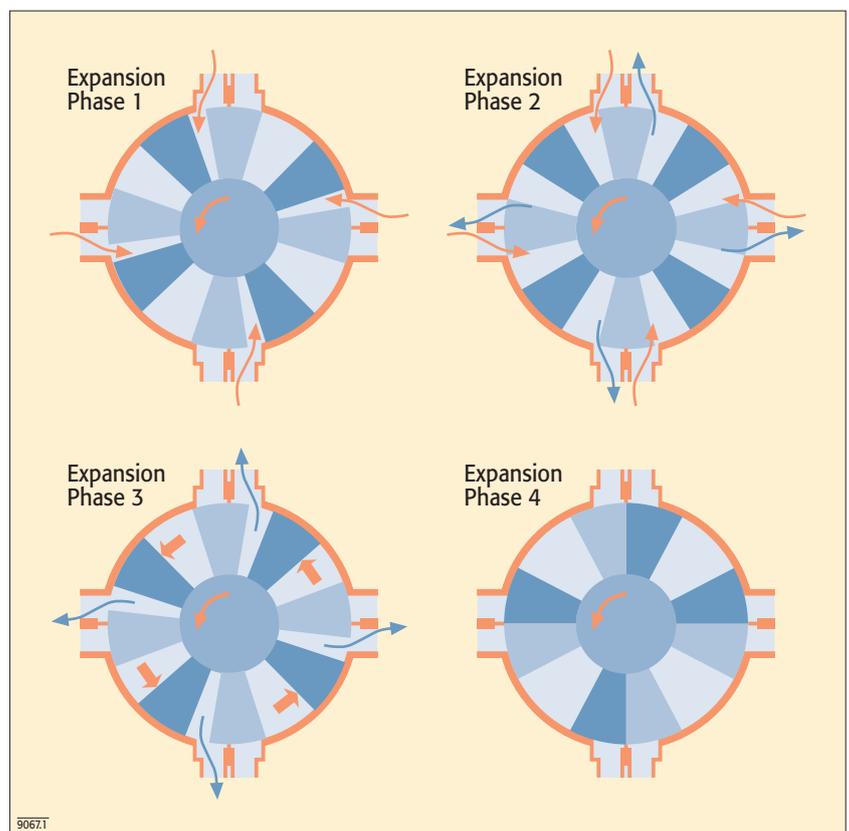
## Eine Basistechnologie für Kraft und Kälte aus (Ab)wärme

### Universalität als Konzept

Bei einer Maschine der Schukey-Technologie rotieren in einem gemeinsamen Gehäuse 2 ineinandergreifende, gegeneinander bewegliche Flügelkreuze. Jedes dieser Flügelkreuze wird über eine Welle von jeweils einem speziell entwickelten Getriebe in der Weise angetrieben, dass sich die Flügelkreuze nicht gleichförmig, sondern gegeneinander versetzt mal schneller mal langsamer drehen. Dabei vergrößern und verkleinern sich die 8 durch die Flügelkreuze abgeteilten Gehäusekammern jeweils 8 Mal je Umdrehung, das heißt, deren Rauminhalte werden entsprechend komprimiert



Dipl.-Ing. oec. **Volker Bergholter** ist Geschäftsführender Gesellschafter der Consulogica GmbH, Bremen, und Geschäftsführer der Schukey-Technology GmbH, Hamburg



**Bild 1.** Funktionsweise als Wärme-Kraft-Maschine im Expansionsbetrieb (Clausius-Rankine-Prozess)

Quelle: Bergholter

und expandiert (Bild 1). Die Anordnung der Einlass- und Auslassöffnungen und die Bewegungen der Flügelkreuze sind derart aufeinander abgestimmt, dass diese auch das Öffnen und Schließen der Ansaug- und Auslasskanäle steuern. Besonderer Schließorgane und Steuerungen – wie Nockenwelle und Ventile – bedarf es daher nicht. Das Getriebekonzept für den modulierten Umlauf der Flügelkreuze ist vollkommen neu und für die Großserienfertigung geeignet. Es gewährleistet an jeder Stelle des Umlaufs eine formschlüssige und verlustarme Kraftübertragung.

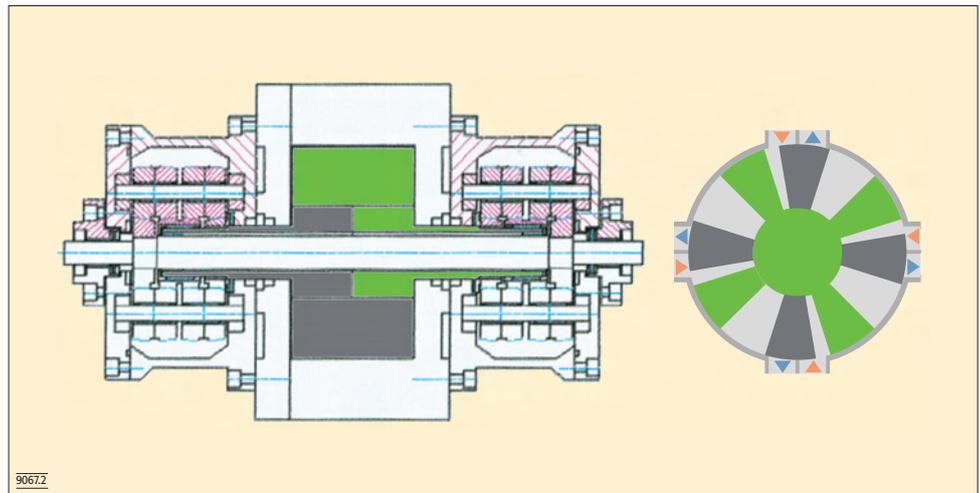
Maschinenbaulich betrachtet ist die Schukey-Maschine eine Verdrängermaschine, genauer eine Umlaufschwingkammermaschine. ST ist einsetzbar mit Pressluft, Heißluft, Heißgas und Dampf als reine Expansionsmaschine, als Kompressions-/Expansionsmaschine, im offenen und geschlossenen Joule-Prozess, im Clausius-Rankine-Prozess sowie im Organic-Rankine-Prozess (ORC). ST weist einen deutlich höheren Gütegrad auf als die bislang bekannten Energieumwandlungssysteme (Otto-, Diesel-, Wankel-, Stirlingmotoren auf der Kraft-Wärme-Seite, verschiedene Kompressoren auf der Kälteseite).

Das Basisaggregat ist für alle Einsatzgebiete weitgehend gleich, es besteht aus weniger als 50 Einzelteilen; davon sind lediglich 16 bewegt. Alle sich bewegendenden Teile führen ausschließlich Rotationsbewegungen aus. Im Betrieb zeigen sich vor allem folgende Vorteile der Schukey-Technologie:

- kompakte Bauweise, dadurch gute Möglichkeiten zur Nachrüstung,
- gutes Teillastverhalten, günstig vor allem bei nicht kontinuierlichem Wärmestrom,
- geringe Drehzahl, ein Getriebe zwischen Schukey-Maschine und Generator wird nicht benötigt,
- der Wartungs- und Betriebsaufwand der Schukey-Maschinen ist minimal; dieser Technologieträger ist einfach und robust aufgebaut und betriebssicher.

### Wärme-Kraft-Maschine

Die Schukey-Wärme-Kraft-Maschine setzt das Prinzip des Heißdampf-motors um. Das Aggregat arbeitet als reine Expansionsmaschine im Clausius-Rankine Prozess. Die Flügelkreuze, Getriebe und Steuerung



**Bild 2.** Aufbau Schukey-Maschine (Seiten- und Vorderansicht)

Quelle: Bergholter

P kW	$T_e$ °C	Rotor mm	Drehzahl U/min	$P_{max}$ MPa	V/U l
2,5	150	150	2 600	0,11	2
6	120	150	1 500	0,2	2
7,4	150	150	1 500	0,2	2
19	120	220	1 500	0,2	8
35	300	220	1 500	0,2	8
40	400	220	1 500	0,2	8
53	400	220	2 000	0,2	8
100	400	300	2 000	0,6	42

**Tafel 1.** Parameter und Leistungsdaten als Wärme-Kraft-Maschine

Quelle: Bergholter

wirken derart zusammen, dass schon bei geringem Eingangsdruck eine hohe mechanische Leistung erzielt werden kann. Unter den Bedingungen des reinen Expansionsbetriebs werden die durch die Flügelkreuze abgeteilten 8 Expansionskammern jeweils 4 Mal je Umdrehung durch das unter Druck einströmende Medium vergrößert.

Die Ansprüche an eine Technologie, die Wärme im unteren Temperatur- und Druckbereich in mechanische Energie umwandeln kann, sind hoch. Sie muss:

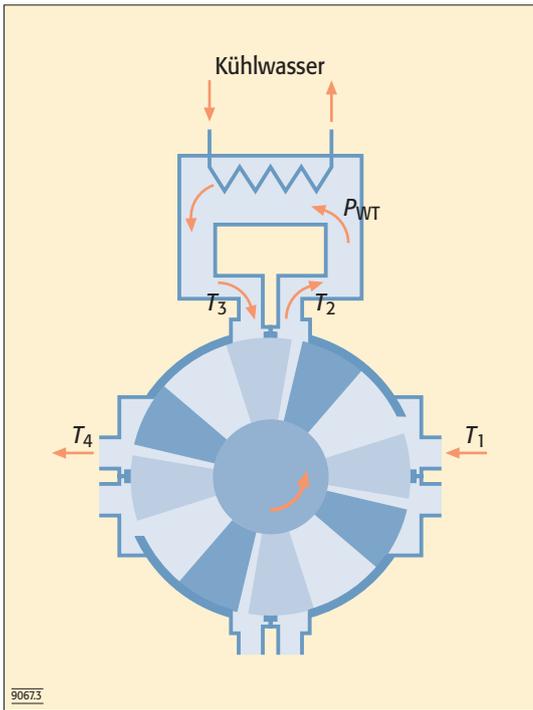
- sehr große Volumenströme durchsetzen können, um den Mangel an spezifischer Energie durch Volumenstrom zu kompensieren,
- klein und kompakt sein, um auch bei wenig Platz zum Einsatz kommen zu können,
- extrem geringe innere Widerstände aufweisen sowie
- preiswert und robust sein, damit ihr Einsatz auch bei physikalisch bedingtem geringeren Wirkungsgrad wirtschaftlich ist.

Außer der Schukey-Technologie erfüllt keine derzeit bekannte Technologie sämtliche dieser Voraussetzungen. Tafel 1 zeigt den Leistungsbereich, der mit einer Maschine der Schukey-Technologie zur Elektrizitätsgewinnung aus (Ab)wärme abgedeckt wird sowie die jeweiligen Betriebsbedingungen.

### Kältemaschine

Als Kältemaschine arbeitet die Schukey-Maschine im Joule-Prozess ohne Phasenübergang. Damit kann Umgebungsluft direkt gekühlt werden. Für den Joule-Prozess werden eine Kompressions- und eine Expansionsmaschine benötigt. Die Schukey-Maschine ist die einzige Maschine, die Kompressions- und Expansionsaggregat in einem Gehäuse vereinigt.

Sie ermöglicht den Joule-Prozess mit einem vergleichbaren Wirkungsgrad konventioneller Kältdampfprozesse. Die Funktionsweise der Kältemaschine demonstriert Bild 3:



**Bild 3.** Funktionsweise als Kältemaschine im Kompressions-Expansionsbetrieb (Joule-Prozess)

Quelle: Bergholter

- einströmende Umgebungsluft ( $T_1$ ) wird verdichtet und damit erwärmt ( $T_2$ ),
- die erhitzte Luft ( $T_2$ ) wird mit einem Wärmeübertrager gekühlt ( $T_3$ ),

- die unter Druck befindliche abgekühlte Luft ( $T_3$ ) wird auf Umgebungsdruck expandiert und dabei auf unter Umgebungstemperatur abgekühlt ( $T_4$ ) und strömt anschließend aus,
- in einem geschlossenen System (Kühlraum, Gefrierraum, Büro usw.) wird die nunmehr abgekühlte Luft dem Prozess erneut zugeführt ( $T_4 = T_{1\text{neu}}$ ) und weiter abgekühlt.

Das große Fördervolumen bei relativ kleiner Kompression (Verdichtungsverhältnis 1:1,3 bis 1:1,8) macht die Schukey-Maschine zur optimalen Maschine für den Joule-Prozess.

Die Fördermenge wird von der Drehzahl gesteuert. Mechanisch verschiebbare Steuerkanten an Ein- und Auslass der Kompressions-Expansionskammern regeln die Kälteleistung. Die über den Wärmeübertrager entzogene Wärme kann für Heiz- oder Brauchwasserzwecke verwendet werden.

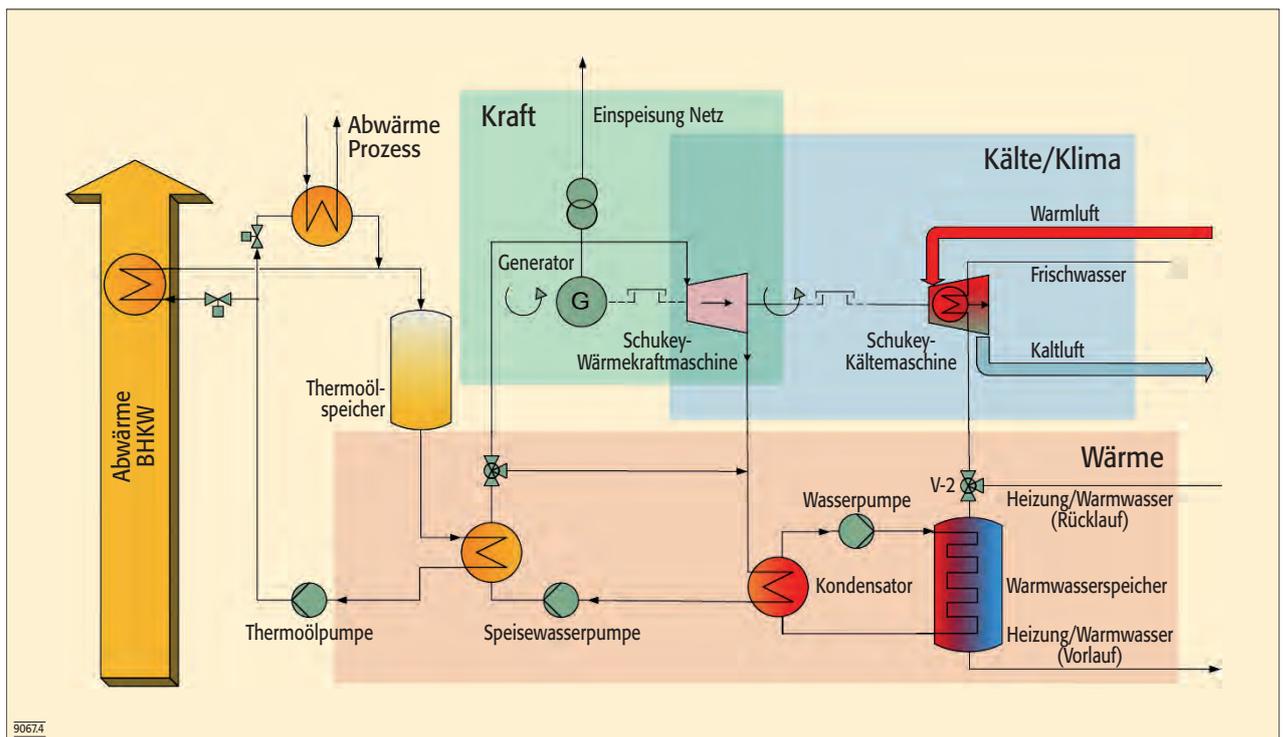
Die jeweils optimale Stellung der Steuerkanten sorgt für einen optimierten Wirkungsgrad im Teillastbereich. Die Maschine kann damit innerhalb eines großen Drehzahl- und Temperaturbereichs wirtschaftlich eingesetzt werden. Der Wirkungsgrad von Kompressions- und Expansionsteil ist größer als

90 %, die Kältezahl liegt zwischen 3,2 und 3,9.

### Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit Schukey-Technologie

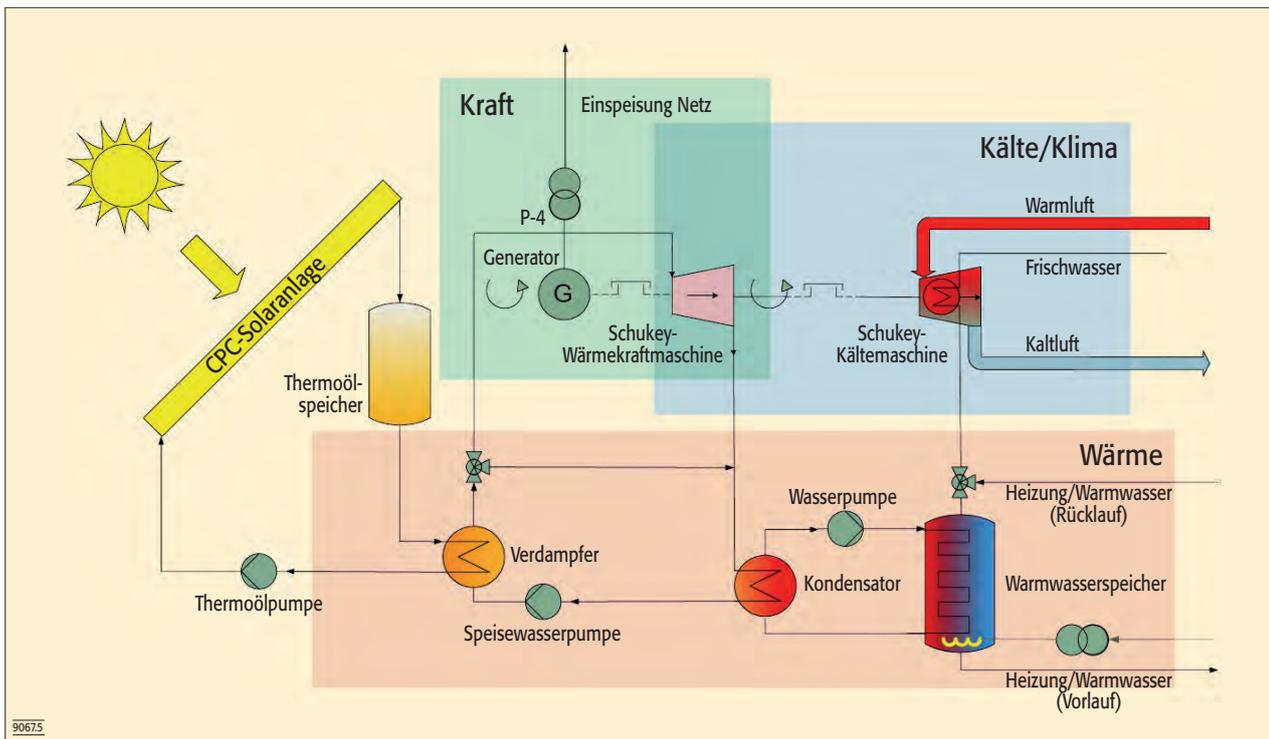
#### Konzept und Technik

Überlegungen zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) im Sinne einer Erhöhung des Nutzungsgrads eines BHKW sowie der Vermeidung des Einsatzes stromgebundener Kältetechnik sind generell sinnvoll. Die Schukey-Wärme-Kraft-Maschine verfügt über die Fähigkeit, Abwärme relativ geringer Temperatur in mechanische Energie umwandeln zu können. Viele BHKW sind in der Lage, dieses Temperaturniveau zur Verfügung zu stellen. Damit kann – als Alternative zu einer Absorptionskältemaschine (AKM) – auch eine Kältemaschine mit ST von der Schukey-Wärme-Kraft-Maschine mechanisch angetrieben und zur Kälteerzeugung eingesetzt werden. Dafür sprechen die hohe Kältezahl der Schukey-Technologie, die die von AKM deutlich übertrifft, und Gewicht, Volumen und Investitionsaufwand. Hier ist die Schukey-Technologie noch deutlicher im Vorteil. Praktisch jedes ständig oder zeitweise Überschusswärme erzeugende Blockheizkraftwerk kann da-



**Bild 4.** Schukey-Synthesegas-KWKK-Anlage mit Prozesswärmenutzung

Quelle: Bergholter



**Bild 5.** Schukey-Solarthermisches Heizkraft- und Klimawerk (SHKKW)

Quelle: Bergholter

her mit ST ausgerüstet, zumeist auch nachgerüstet werden.

#### Pilotprojekt Synthesegas-BHKW

Mit dem Verfahren der allothermen Dampfreformierung wird aus dem Rohstoff (zurzeit Hackschnitzel, später Rückstände der Speiseölproduktion) hochreiner Wasserstoff hergestellt und mittels Gas-Otto-Motor verstromt. Die Abwärme dieser Anlage wird mit Hilfe der Schukey-Technologie in zusätzlichen elektrischen Strom und in Kälte umgewandelt.

Neben der Abwärme aus dem Rauchgas steht bei diesem Anlagentyp auch prozessbedingte Abwärme zur Verfügung: in der dritten Stufe der Synthesegaserzeugung, die bei einer Temperatur von 1 000 °C stattfindet, muss zunächst erheblich Wärme von außen zugeführt werden (Bild 4). Zur Energierückgewinnung kommen 2 hintereinander geschaltete Schukey-Kraft-Wärmemaschinen zum Einsatz. Der elektrische Wirkungsgrad der Anlage steigt damit von 27,5 % auf 37,5 %. Der Gesamtwirkungsgrad wird von 82,5 % auf 92,5 % erhöht. Ob unter den gegebenen Betriebsbedingungen, das heißt Einspeisung der erzeugten Elektrizität in das allgemeine Netz gegenüber einer Einspeisungsvergütung eine alternative Kälteer-

zeugung empfehlenswert ist, muss eine Wirtschaftlichkeitsberechnung im Einzelfall zeigen. Als Insellösung ohne Netzkopplung bzw. ohne Einspeiservergütung kann diese Anlage alternativ zur Stromerzeugung eine Kälteleistung von theoretisch mehr als 1 MW erbringen.

#### Wirtschaftlichkeit

Je nach Typ und verfügbarer Abwärme kann mit ST der elektrische Wirkungsgrad eines BHKW um 12 bis 40 % gesteigert werden. Bei vollständiger Wärmeauskopplung sind mit ST Gesamtwirkungsgrade von über 90 % erzielbar. Insbesondere kleinere Anlagen der KWK mit hoher Wärmenutzung profitieren von dieser Steigerung. Als Berechnungsmodell dient ein durchschnittliches BHKW mit Synthesegaserzeuger und Gasmotor:

- elektrische Leistung ohne Schukey-Nachrüstung: 275 kW,
- elektrische Leistung mit Schukey-Nachrüstung: 375 kW,
- jährliche Betriebsstunden: 6 000 h,
- das Schukey-Kälteaggregat ist Option,
- Energiegewinnung aus Holzhackschnitzel, Kosten 110 €/t.

Berechnet wird nur der Kraftwerksanteil ohne die Kosten und Erträge aus der Wärmeauskopplung. Die wesentlichen Ergebnisse:

- Die Stromerzeugungskosten der Anlage belaufen sich ohne ST auf rd. 15 Ct/kWh, mit ST fallen diese auf rd. 12 Ct/kWh.
- Der jährliche Mehrertrag bei Einspeisung gegen Vergütung beläuft sich unter Einsatz der ST auf knapp 120 000 €, deutlich mehr als der zusätzliche Investitionsaufwand.

Hauptkostentreiber sind die Brennstoffkosten, sie machen in diesem Fall über 60 % der Gesamtkosten aus. Abschreibungen, kalkulatorische Verzinsung und Betriebskosten teilen sich den Rest etwa paritätisch auf. Die Kosten für die Kälteerzeugung (ohne Verteilung) liegen bei rd. 5 Ct je kWh Kälte. Die niedrigen Kosten für die Kälteproduktion sind im Wesentlichen auf 2 Faktoren zurückzuführen:

- Aufgrund der mechanischen Kopplung von Stromerzeugung und Kälteproduktion wird jeweils in variablen Anteilen gleichzeitig Strom und Kälte produziert. Auch wenn keine Kälte benötigt wird, kann unbegrenzt Strom produziert werden. Somit ist jede Betriebsstunde eine Volllaststunde.
- ST ist insgesamt sehr einfach und äußerst preiswert herzustellen. Es kommt hinzu, dass die Abkühlung der Umgebungsluft direkt mittels Durchgang durch die Schukey-Maschine erfolgt. Bei Netzkopplung



**Bild 6.** Innerhalb der nächsten 6 Monate will Thermodyna eine Pilotanlage bauen, die Strom und Kälte erzeugt. Das Leistungsvolumen soll ausreichen, um etwa Tankstellenshops oder Restaurants solar zu klimatisieren

Quelle: Bergholter

und Einspeisevergütung oberhalb der üblichen Bezugskosten wird aus wirtschaftlichen Gründen immer eingespeist, wenn der Ertrag hieraus höher ist als der aus Kälteabgabe. Wird bei einer Insellösung oder bei einer netzgekoppelten Anlage ohne Einspeisevergütung die Kälte ortsnah benötigt, beispielsweise zur Raumklimatisierung, ist es generell attraktiv, diese Möglichkeit zu nutzen. Eine Schukey-BHKKW kann jeweils bedarfsgerecht Wärme, Kraft und Kälte liefern.

### Strom und Kälte aus Solarthermie

Solarthermie gewinnt auch in der Stromproduktion zunehmend an Bedeutung. Zahlreiche Großkraftwerksprojekte – wie Nevada Solar One bei Las Vegas oder Desertec in Europa und Nordafrika – belegen diese Entwicklung. Sonnenenergie steht jederzeit ausreichend und auf Dauer kostenlos zur Verfügung. Gelingt ihre umfassende Nutzung, wären die Energieprobleme der Menschheit für alle Zeiten gelöst. Solarthermie-Technik ist einfach und das Kostensenkungspotenzial noch sehr hoch. Neuartige Kurzzeitspeichertechniken erlauben einen reibungslosen Betrieb von Solarthermiekraftwerken auch dann, wenn die Sonne nicht scheint.

Die derzeit realisierten und geplanten Vorhaben sind ausschließlich Großkraftwerke mit einer elektrischen Leistung von bis zu mehreren 100 MW. Die Umwandlungstechnik Wärme in Strom erfordert sehr hohe Temperaturen von mehreren 100 °C. Kraft-Wärme-Kopplung, beziehungsweise Kälteerzeugung, ist bislang nicht vorgesehen. Der Energiebedarf dieser Großkraftwerke kann nur in sonnenreichen Gegenden wirtschaftlich gedeckt werden. Aber auch mit kleineren Solarthermieanlagen und sogar

in unseren Breiten können elektrischer Strom und Kälte solar erzeugt werden, wenn eine Umwandlungstechnik zur Verfügung steht, die auch bei niedrigeren Temperaturen und schwankender Energiezufuhr wirtschaftlich arbeitet – wie die Schukey-Technologie. Bei zusätzlicher Nutzung der Solar- und Abwärme entstehen kleine, dezentrale Lösungen der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, beheizt mit kostenloser Solarenergie. Der Aufbau dieser Anlage (Solarthermische Heizkraft- und Klimawerk) ähnelt stark dem des Blockheizkraftwerks mit Kälteproduktion (Bild 5).

Handelsübliche Vakuumröhrenkollektoren sind für die Wärmelieferung grundsätzlich geeignet. Steht ausreichend Medium (Dampf) zur Verfügung, kann mit einer Kollektorfläche von 40 m<sup>2</sup> eine Leistung von 2,5 bis 5 kW(el) abgegeben werden. Je nach Bedarf wird entweder Strom eingespeist oder mit Schukey-Technologie das Gebäude klimatisiert. Eine solarthermische Anlage dieser Größenordnung deckt zusätzlich rd. 77 % des Wärmebedarfs eines durchschnittlichen Einfamilienhauses ab. Lediglich im Umfang von weniger als rd. 2 000 kWh muss jährlich zusätzlich beheizt werden. Erfolgt dies elektrisch, wird neben der Solarthermie kein zweites Heizsystem benötigt.

Solarthermische Heizkraftwerke mit ST sind auch in unseren Breiten wirtschaftlich zu betreiben, in Gebieten mit höherer Sonneneinstrahlung kann der gesamte Energiebedarf einschließlich der Klimatisierung gedeckt werden.

Die Stromerzeugungskosten liegen in unseren Breiten in der Größenordnung des Netzbezugs, in sonnenreicheren Gegenden lassen sie sich etwa halbieren. Kälte aus Solarwärme mit ST ist mit etwa der Hälfte der Stromerzeugungskosten zu produzieren. ■



**Bild 7.** Blick in das Innere einer Schukey-Maschine. Zu sehen sind die beiden Flügelkreuze (rot und gelb). An den Spitzen links und rechts befinden sich die beiden Getriebe. Jedes Getriebe treibt jeweils einen Rotor an

Quelle: Bergholter

[bergholter@consulogica.de](mailto:bergholter@consulogica.de)

[info@thermodyna.com](mailto:info@thermodyna.com)

[www.thermodyna.com](http://www.thermodyna.com)