

Bild 1 Solarzellenfabrik Q-Cells AG in Thalheim/Wolfen

Solarzellenfabrik mit innovativer Heiz-/Klimaanlage und mehrstufiger Rückkühlanlage

Heizen mit Abwärme – Kühlen durch Befeuchtung

Zwei Jahre nach dem Start der ersten Solarzellenfertigung nahm die Q-Cells AG in Thalheim/Wolfen ihr neues Werk zur Herstellung von photovoltaischen Hochleistungszellen in Betrieb. Anders als in Werk I mit getrennter Heizungs-, Klima-, Kälte- und Rückkühlanlage wird in Werk II die Abwärme aus dem Herstellungsprozess der Photovoltaikzellen direkt zur Vorwärmung der Zuluft genutzt. Ein Novum: Ein großer Teil des Kältebedarfs für die Klimaanlage und die gesamte Rückkühlung des Prozesswassers wird durch adiabatische Kühlung erreicht. Heizkessel und Kältemaschinen gehen nur noch bei Betriebsunterbrechungen oder extrem warmen bzw. kalten Außentemperaturen in Betrieb.

Fünf Jahre nach ihrer Gründung ist die Q-Cells AG in Thalheim/Wolfen zum zweitgrößten deutschen Hersteller von Photovoltaikzellen (PV) aufgestiegen. Die erste vollautomatische Produktion ging 2001 in Betrieb, die zweite Fabrik mit rund 2000 m² Fertigungs- und Bürofläche wurde im Oktober 2003 offiziell eingeweiht. Mit dieser Erweiterung sowie dem Wechsel von der 5-Inch- zur 6-Inch-PV-Zelle konnte die Q-Cells AG ihre Produktionskapazität auf 48 MW_p verdoppeln. Die neue Hocheffizienz-PV-Zelle hat eine um 44% größere Oberfläche und

kommt in der Massenfertigung auf einen Wirkungsgrad von maximal 16,4%.

Als einer der Marktführer im Bereich regenerative Energien legte die Geschäftsleitung beim Bau des zweiten Werkes sehr viel Wert auf sparsamen Energieeinsatz, Nutzung der Abwärme und Senkung von Betriebskosten. Während die Heizungs-, Klima- und Kälteanlagen in Werk I noch als Einzelsysteme konzipiert wurden, strebte der Fachplaner bei Werk II von Anfang an eine innovative Verbundlösung an. Schon bei der Vorplanung zeichnete sich ab, dass die Summe der Abwärme aus Öfen, Ätzanlagen, Siebdrucklinien usw. ausreicht, die Zuluft der Raumklima-Anlage mit einer Luftleistung von 42000 m³/h auch im Winter von -14°C auf +32°C aufzuwärmen. Die Berechnungen ergaben auch, dass es durch adiabatische Befeuchtung möglich ist, den größten Teil des Jahres ohne maschinell erzeugte



Foto: Q-Cells

Bild 2 Blick in die Fertigung der neuen 6-Inch-PV-Zellen

Kälteenergie auszukommen. Nachdem mehrere Wärme-Kälte-Verbundkonzepte zur Diskussion standen, erhielt die von der Michelbach GmbH, Zirndorf, angebotene Lösung den Zuschlag.

Dreifach Rückkühlsystem für Prozesswasser und Heißgas-kondensation der Kältemaschine

Herzstück des Wärme-Kälte-Verbundkonzeptes bei Q-Cells ist das LUMI-Rückkühlsystem (Bild 3), das innerhalb des Gebäudes in der Klimazentrale platziert ist. Es ist so in den Wärmeverbund integriert, dass die Prozessabwärme primär zur Vor- und Nachwärmung der Luftaufbereitung genutzt und die noch vorhandenen Wärmeüberschüsse über den LUMI-Rückkühler an die Außenluft abgegeben werden. Verteilstelle ist eine hydraulische Weiche zwischen dem ankommenden

Kontakt zum Hersteller

Michelbach GmbH
90513 Zirndorf
Telefon (0 91 27) 9 00 60
Telefax (0 91 27) 90 06 10
www.michelbach.net

warmen und abgehenden kalten Prozesswasser des Lüftungszentralgerätes bzw. des Rückkühlsystems.

Das liegend angeordnete LUMI-Rückkühlsystem ist konstruktiv ähnlich wie ein Lüftungszentralgerät aufgebaut, allerdings mit dem Unterschied, dass gleich zwei LUMI-Druckwasserbefeuchter als Kaskade hintereinander angeordnet sind. Die Außenluft durchströmt nacheinander folgende Systembauteile:

- Außenluftgitter
- Schalldämpfer
- Sprühkammer 1
- Kühler 1, 300 kW (Prozesswasser)
- Sprühkammer 2
- Kühler 2, 300 kW (Prozesswasser)
- Kühler 3, 400 kW (Kondensatorkühler der Kältemaschine, ohne Besprühung)
- Radialventilator, saugend angeordnet, Motor im Abluftstrom, dadurch kein Temperaturanstieg durch den Ventilatorenbetrieb
- Schalldämpfer
- Abluftgitter

Die Abmessungen des 1000-kW-Rückkühlsystems liegen bei 8,30 m Länge, 3,36 m Breite und 3,13 m Höhe. Der von Ludwig Michelbach entwickelte LUMI-Rückkühler arbeitet nach dem Prinzip der adiabatischen Kühlung, wobei ausschließlich vollentsalztes Wasser (VE-Wasser) mit einer elektrischen Leitfähigkeit von maximal 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zum Einsatz kommt (Bild 5). Die Vorteile von VE-Wasser bei der adiabatischen Kühlung sind:

- kein Verkalken der Wärmeübertrageroberflächen
- kein Abschlämmen, dadurch weniger Frischwasser-/Abwasserkosten
- hoher, konstruktiv bedingter Hygienestandard entsprechend VDI 6022 (zertifiziert)



Bild 3 LUMI-Rückkühlsystem mit geschlossenem Kühlkreislauf und Wärmeübertrager nach dem Gegenstromprinzip. Die Kühlung des Prozesswassers (35/25 °C) erfolgt über adiabatische Kühlung (Druckwasser-Befeuchter-Düsenstock)

- weniger Wartungs- und Instandhaltungskosten (einmal jährlich)
- kein Einsatz von Chemikalien zur Stabilisierung der Wasserhygiene

Eine Besonderheit des LUMI-Konzeptes ist die frequenzgeregelte Hochdruckpumpe mit variablem Druck. Sie erlaubt es, nur so viel Wasser über die Präzisionsdüsen einzubringen, wie zur Rückkühlung des Wärmeträgermediums tatsächlich benötigt wird. Die Sprühkammer bleibt dadurch weitgehend trocken (Bild 4).



Bild 4 Die Kunst der adiabatischen Befeuchtung liegt darin, nur so viel VE-Wasser zu vernebeln, wie tatsächlich gebraucht wird. Die „Befeuchterkammer“ bleibt dabei weitgehend trocken

Neben dem exakt auf die adiabatische Kühlung abgestimmten Regelkonzept tragen insbesondere die Düsenanordnung, die Düsengeometrie sowie die Länge der Befeuchterstrecke zu der sehr wirtschaftlichen Befeuchtungskühlung bei. Verglichen mit einem konventionellen Kühlturm bei Vollast kommt das LUMI-Rückkühlsystem mit etwa 60 % weniger Wasser aus. An dem hohen Gesamtwirkungsgrad sind in erster Linie die Gegenstrom-Wärmeübertrager beteiligt, die in der Lage sind, auch kleinste Temperaturunterschiede zu nutzen. Durch den Anschluss der Wärmeübertragerverrohrung nach Tichelmann werden alle Rohrreihen gleichmäßig beaufschlagt; der Wirkungsgrad der Wärmeübertrager kann somit auf bis zu 95 % angehoben werden.

Die Anpassung der durchgesetzten Luftmenge an den jeweiligen Rückkühlbedarf erfolgt über einen drehzahleregelten Radialventilator. Messwerte für die Regelkreise liefern zwei Temperatursensoren am Eintritt bzw. Austritt des Kühlwassers aus dem Rückkühlsystem und ein Durchflussmesser im Heißgas der Kältemaschine. Damit kann die gewünschte Temperatur für das Prozesskühlwasser exakt eingehalten werden. Temperaturschwankungen, wie sie für zweistufig geregelte Kühltürme typisch sind, treten hier nicht auf.



Bild 5 Umkehrosmoseanlage „LUMI-Hydrotech“ (2500 l/h) zur Aufbereitung von vollentsalztem Wasser für die adiabatische Druckwasserbefeuchtung und die Produktionsanlagen. Die Anlage arbeitet ohne Vorratsbehälter „on demand“

Bedarfsgeführte Kältemaschine

Eine weitere Besonderheit im Energiekonzept von Q-Cells ist die Kältemaschine mit 340 kW Kälteleistung bei 32 °C Lufttemperatur am Kondensatorkühler (Bild 6). Das von Michelbach entwickelte Regelkonzept erlaubt eine gradgenaue Auskoppelung von Kaltwasser ohne zusätzlichen Pufferspeicher. Dazu wird der Schraubenverdichter zwischen 10 und 100 % stufenlos geregelt. Folgende Betriebsweisen sind vorgesehen:



Bild 6 Die Leistung der 340-kW-Kältemaschine lässt sich im Bereich zwischen 10 und 100 % stufenlos variieren

- Kaltwasser von 14 °C zur Luftkühlung der Klimaanlage (ohne Entfeuchtung)
- Kaltwasser von 6 °C zur Zuluft-Entfeuchtung der Klimaanlage
- Zeitweise Versorgung von Umluftkühlgeräten innerhalb der Fertigung

Der im LUMI-Rückkühlsystem angeordnete Kondensator der Kältemaschine ist so ausgelegt, dass er auch ohne vorgeschaltete adiabatische Kühlung die volle Rückkühlleistung erbringt (Bild 7).

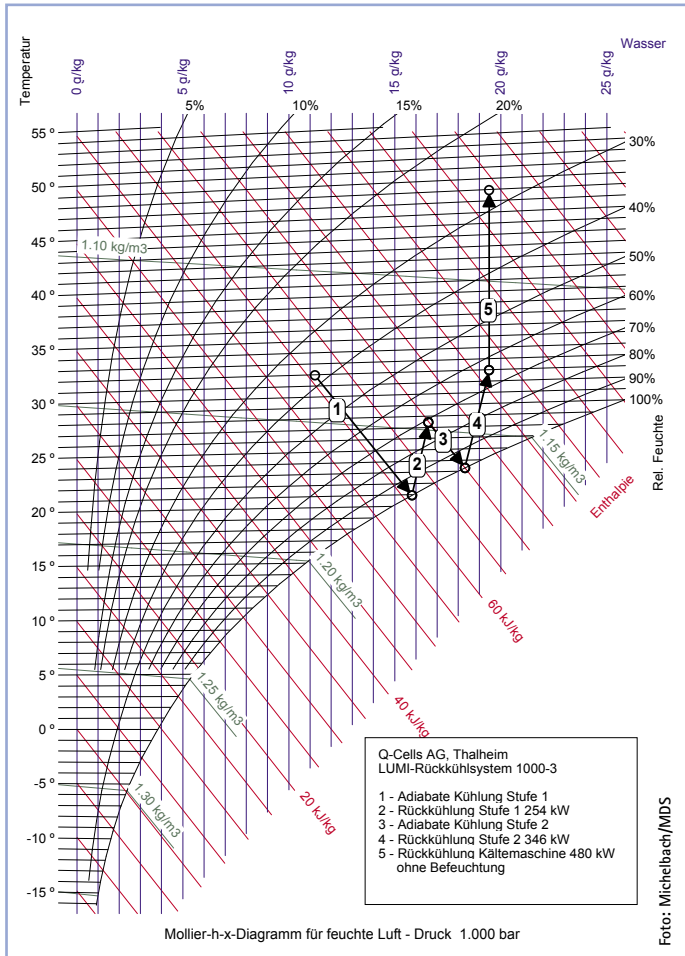


Bild 7 hx-Diagramm des LUMI-Rückkühlsystems für Prozesswasser mit zwei adiabaten Rückkühlstufen. Die Rückkühlung der Kältemaschine (3. Wärmeübertrager) erfolgt ohne Besprühung

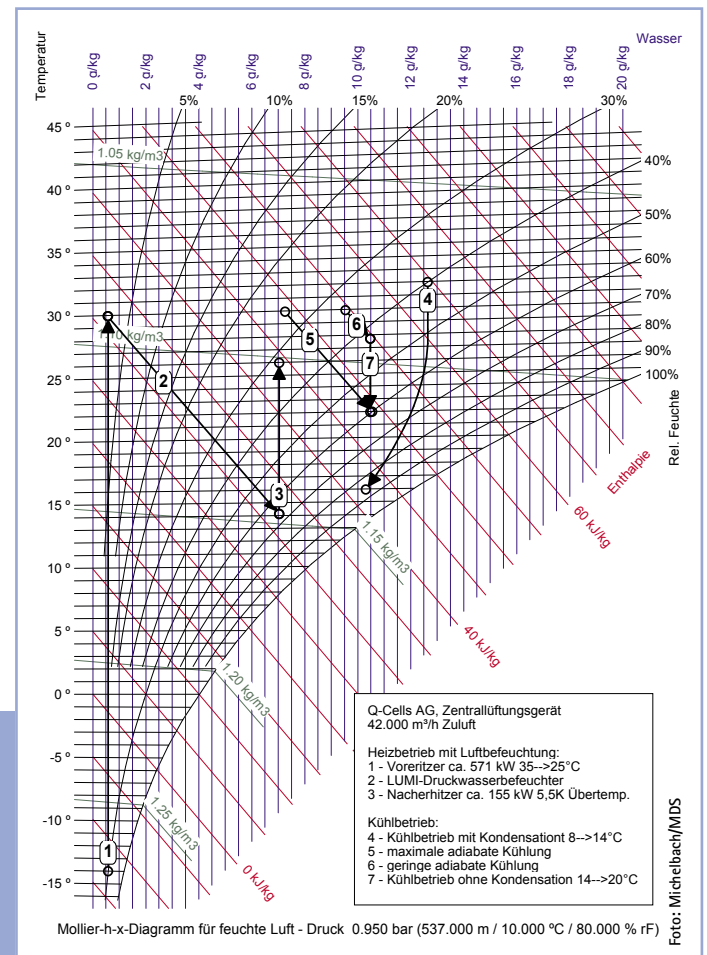
Heizventil Vorerhitzer auf, Heizventil Nacherhitzer auf) und einer Vorlauftemperaturregelung mit festgelegter Heizkurve für den Kühlwasserstrang. Da in der Produktionshalle auf statische Heizkörper verzichtet wurde, muss die Zuluft zur Deckung der Transmissionswärmeverluste mit einer Übertemperatur von ca. 5 bis 6 K eingblasen werden. Die eingestellte

LUMI-Druckwasserbefeuchter

Obwohl die Produktion von Solarzellen unter Reinraum-ähnlichen Bedingungen abläuft, reicht für die Klimatisierung der Produktionsanlagen eine konventionelle Luftaufbereitung aus (Vorfilter F7, Zuluftfilter F9). Um das Eindringen von ungefilterter Außenluft über Fugen zu vermeiden, wird über das Lüftungszentralgerät ein leichter Überdruck von 10 bis 15 Pa erzeugt. Zur Abfuhr von Stoff- und Wärmelasten benötigt die Fabrikationshalle ein Zuluftvolumen von 42000 m³/h bei Raumtemperaturen von mindestens 22°C im Winter und im Sommer.

Die Raumluftfeuchte sollte im Winter bei 45% relative Feuchte liegen; im Sommer sollte ein Wert von $x = 11,5 \text{ g/kg}$ möglichst nicht überschritten werden. Vorgabe war außerdem, die Prozessabwärme zur Luftvor- und Luftnacherwärmung zu nutzen. Wärmedefizite können über einen Plattenwärmeübertrager (200 kW) aus der konventionellen Heizungsanlage zur Versorgung der Heizkörper in den Büros ausgeglichen werden. Die Befuchtung der Zuluft sollte ausschließlich, die Luftkühlung möglichst umfassend über die adiabaten Sprühbefeuchter erfolgen.

Bild 8 hx-Diagramm des Heizbetriebs (1–3) und Kühlbetriebs (4–7). Selbst während des Jahrhunderts-sommers 2003 reichte die Leistung der adiabatischen Kühlung aus



Winterbetrieb

Die Außenluft (min. -14 °C) wird im Vorerhitzer (Gegenstrom-Wärmeübertrager mit zwölf Rohrreihen) mittels Prozessabwärme von 35°C auf etwa 32°C erwärmt und anschließend im adiabatischen Sprühbefeuchter mit vollentsalztem Wasser befeuchtet. Dabei kühlt die Luft auf etwa 14,5°C ab (Bild 8). Durch diese Abkühlung entsteht eine weitere Temperaturdifferenz zum Prozesswasser (35/25°C), das durch den Nacherhitzer (kombiniertes Heiz-/Kühlregister mit fünf Rohrreihen) weiter abgekühlt wird.

Für diese Art der Lufterwärmung hat Michelbach eine eigene Regelstrategie entwickelt. Sie besteht aus einer Zulufttemperaturregelung als Kaskadenregelung (Umluftklappe auf Maximalwert,

Soll-Zuluftfeuchte wird so lange ausgeregelt, bis die Raumfeuchte den eingestellten Sollwert erreicht hat. Danach wird die Zuluftfeuchte abgesenkt, um den eingestellten Raumsollwert zu halten.

Sommerbetrieb

Zur Kühlung im Sommer steht eine Kältemaschine mit einer Kälteleistung von 340 kW bei Kaltwassertemperaturen von 6/12°C zur Verfügung. Als Extremwert für den Außenluftzustand wurden 32°C, 40% r.F. angenommen. Die beiden Wärmeübertrager und die Druckwasserbefeuchter des Lüftungszentralgerätes wurden jedoch so dimensioniert, dass die adiabatische Kühlung auch bei relativ hohen Außentemperaturen und normalen Außenluftfeuchten ausreicht.

Betriebszustände mit Luftbefeuchtung (adiabatische Kühlung) und anschließender Kühlung mit mechanisch erzeugter Kälte bei niedrigen Registeroberflächentemperaturen sollten aus energetischen Gründen vermieden werden. Bei adiabater Kühlung wird deshalb eine Kühlwasservorlauftemperatur im Kühlregister von mehr als 14 °C angestrebt, d.h. die Oberflächentemperatur des Kühlers muss über der Taupunkttemperatur bei $x_{\max, \text{ad Bef.}} = 10,5 \text{ g/kg}$ liegen.

Bei der Q-Cells-Anlage ist die Absolutfeuchte bei 10,5 g/kg und die Zuluftfeuchte am Ausgang des Gerätes auf 75% r.F. begrenzt. Die Raumluftfeuchte stellt sich bei Raumtemperaturen von 22 °C bei ca. 60% r.F. ein. Regelungstechnisch wird der Feuchtegrenzwert über eine Leistungsbegrenzung der Befeuchterpumpe erreicht. Der Betrieb der adiabaten Kühlung ist aber nur sinnvoll, wenn die Außenluftenthalpie unter 59 kJ/kg liegt. Grundsätzlich sind im Lüftungszentralgerät mit der Kombination adiabatische Kühlung/mechanische Kühlung folgende Betriebsarten möglich:

- Heizbetrieb mit Luftbefeuchtung
- Kühlung mit adiabatischer Luftbefeuchtung ohne Nachkühlung
- Kühlung mit adiabatischer Luftbefeuchtung und Nachkühlung, aber ohne Entfeuchtung
- Standardkühlung (mechanisch) ohne Entfeuchtung
- Standardkühlung (mechanisch) mit Entfeuchtung

Zur Vermeidung von Frostschäden ist eine spezielle Anfahrregelung hinterlegt.

Härtetest im Jahrhundertsummer

Die ersten sommerlichen Erfahrungen zeigen, dass die Kombination von adiabatischem Rückkühler und Lüftungszentralgerät mit adiabatischer Kühlung bestens funktioniert. Die Anlage lief von Anfang an zur vollsten Zufriedenheit des Nutzers, auch während der so genannten Hundstage mit Außentemperaturen von bis zu 40 °C. Während der trockenheißen Sommerperiode wies die adiabatische Kühlung sogar noch Leistungsreserven

auf. So wurden bei Außentemperaturen von 38 °C noch 22 °C Vorlauftemperatur zum Verbraucher erreicht. Auch wenn die Energiekosten von Werk I und Werk II nicht direkt vergleichbar sind, so zeichnet sich ab, dass mit der Prozesswärme-Kälte-Klima-Verbundlösung große Kosten eingespart werden. Der Mehrpreis für das LUMI-Konzept von Michelbach amortisiert sich nach wenigen Jahren. Deshalb soll bei künftigen Erweiterungen bei Q-Cells wieder das LUMI-System zum Einsatz kommen. ←

Dipl.-Ing.
Wolfgang Schmid
ist Fachjournalist
für Technische
Gebäudeausrüstung,
München, E-Mail:
wsm@netsurf.de

