

# Kombinierte NK- und TK-Anlage für Logistikzentrum

## F-Gas-freie Kältetechnik mit Photovoltaik-Unterstützung

Christoph Peters,  
Kälte-Klima-Peters,  
Meerbusch

Vilim Mergl,  
mergl engineering,  
47229 Duisburg

Im Rahmen der Unternehmensentwicklung errichtete die Firma Citti mehrere neue Logistikzentren, eines darunter im niedersächsischen Stuhr nahe Bremen. Im Vorfeld der Vergabe des Auftrages wurde von allen Beteiligten die Anforderung an eine zukunftssichere Gewerbekälteanlage erörtert. Schnell stellte sich als eine der grundlegenden Anforderungen die Verwendung von halogenfreien Kältemitteln heraus. Die hervorragenden thermodynamischen Eigenschaften der meisten natürlichen Kältemittel waren schließlich das stichhaltigste Argument, um die Konzeption und die Planung der Anlage in die Richtung F-Gas-freie Anlagentechnik zu lenken.

Monat	Temperatur Tag (15:00) / [°C]	Temperatur Nacht (5:00) / [°C]	Kälteleistung Tag / [%]	Kälteleistung Nacht / [%]
1 Januar	0,1	-2,6	50	40
2 Februar	4	-1	55	45
3 März	10	4,6	60	50
4 April	14	7,7	65	55
5 Mai	19	11,8	70	60
6 Juni	24	15,9	80	65
7 Juli	26	17	100	80
8 August	25,1	17	80	65
9 September	19,9	12,7	70	60
10 Oktober	14,7	8,4	65	55
11 November	10,5	5,1	60	50
12 Dezember	4,4	0,3	55	45

Abb. 1: Grundlagen des energetischen Vergleichs der unterschiedlichen Konzepte, die bei allen erörterten Konzepten mit natürlichen Kältemitteln verwendet wurden.

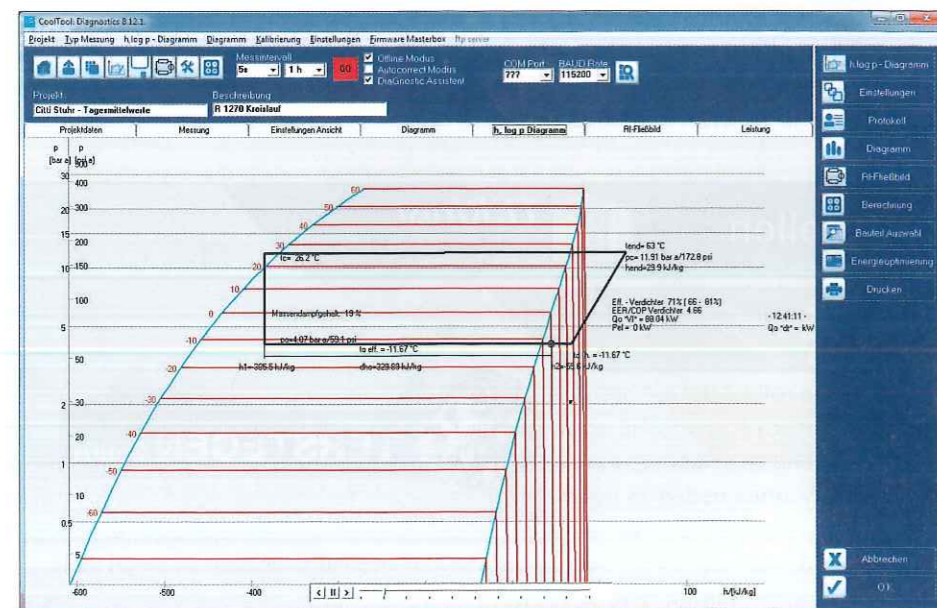


Abb. 2: Visualisierung der Kälteerzeugung durch das integrierte Monitoring-Tool in Echtzeit. Die Haupterzeuger mit dem Kältemittel R1270 haben einen COP von 4,6 bei 18 °C Außen- und 26 °C Verflüssigungstemperatur.

Um eine sinnvolle Lösung für den jeweiligen Anwendungsfall zu finden, mussten einige Vorüberlegungen angestellt werden. Ausgehend von der Anforderung, eine zukunftssichere Gewerbekälteanlage für ein Logistikzentrum mit rein natürlichen Betriebsstoffen in der Kälteerzeugung einzusetzen, wurde nicht nur die grundsätzliche Verwendung von halogenfreien Kältemitteln favorisiert, sondern es wurden auch die Vor- und Nachteile verschiedener Konzepte im Vorfeld betrachtet. Mehrere Anlagenvarianten wurden in die engere Auswahl gezogen, die die Anforderungen erfüllen konnten. Im Einzelnen waren dies:

- Ammoniak mit überfluteter Verdampfung für NK und TK
- CO<sub>2</sub>-Booster-Anlage direktverdampfend mit transkritischem Prozess NK und subkritischem Prozess TK
- indirekte Flüssigkeitskühlsätze mit Ammoniak, Glykol-Luftkühlern im NK-Bereich und direktverdampfend subkritischem CO<sub>2</sub>-Prozess TK
- indirekte Flüssigkeitskühlsätze mit R1270, Glykol-Luftkühlern im NK-Bereich und direktverdampfend subkritischem CO<sub>2</sub>-Prozess TK

Anschließend wurden die potentiellen Lösungen einem Vergleich hinsichtlich praktischer Gesichtspunkte wie Wartung, Betriebssicherheit, Erweiterungsfähigkeit und natürlich einem energetischen Vergleich unterzogen, um die unterschiedlichen konzeptionellen Ansätze für den spezifischen Anwendungsfall zu erörtern. Dazu wurden

für die unterschiedlichen Anlagenkonzepte die Kosten, der Nutzen, das Ausfallrisiko, die Anlagenredundanz und schließlich der Energiebedarf sowie die Flexibilität im Betrieb einer Abwägung unterzogen.

- Die Lösung Ammoniak mit überfluteter Verdampfung für NK und TK wurde wegen zu hoher Investitionskosten, trotz der hervorragenden thermodynamischen Eigenschaften von Ammoniak, bedingt durch die relativ geringe Leistung von 315 kW verworfen. Die Amortisationszeit dieser Lösung ging über die zu erwartende Lebenszeit der Anlage hinaus.
- Die CO<sub>2</sub>-Booster-Anlage in der Variante direktverdampfend mit transkritischem Prozess NK und subkritischem Prozess TK erwies sich bei der Bestimmung der zu erwartenden Betriebskosten als energetisch nicht sinnvoll. Transkritische CO<sub>2</sub>-Anlagen können, wenn im Winter ausreichend Leistungsanforderung vorhanden ist, die energetischen Nachteile des hohen Energiebedarfs der Verdichter im Sommer sehr gut kompensieren, wie dies z.B. die mittlerweile fast flächendeckende Installation von Neuanlagen in der Supermarkttechnik zeigt. Da die weitaus größere Leistung aber im NK-Bereich liegt, wobei keine Warenabkühlung stattfindet, ist die Anforderung im Winter relativ klein. Ferner machte die Anforderung, die Heizlast des Verwaltungsgebäudes aus der Wärmerückgewinnung zu decken, was nur mit hohen Verflüssigungstemperaturen in der Nähe des kritischen Punktes von CO<sub>2</sub> zu realisieren wäre, diese Lösung für den vorliegenden Anwendungsfall zunichte.

- Auch die indirekten Flüssigkeitskühlsätze mit Ammoniak und Glykol-Luftkühlern im NK-Bereich sowie direktverdampfend subkritischem CO<sub>2</sub>-Prozess TK wurde wegen zu hoher Investitionskosten, bedingt durch die relativ geringe Leistung von 315 kW, verworfen.
- Die indirekten Flüssigkeitskühlsätze mit R1270, Glykol-Luftkühlern im NK-Bereich und direktverdampfendem subkritischem CO<sub>2</sub>-Prozess TK, insbesondere unter Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung, erwiesen sich als beste Lösung im Vergleich Investitions- zu Betriebskosten. Sicherheitstechnische Bedenken durch die Füllmenge von nur 4 x 11 kg gab es keine, da alle Auflagen, die sich aus der Normung ergeben, einfach zu erfüllen waren.

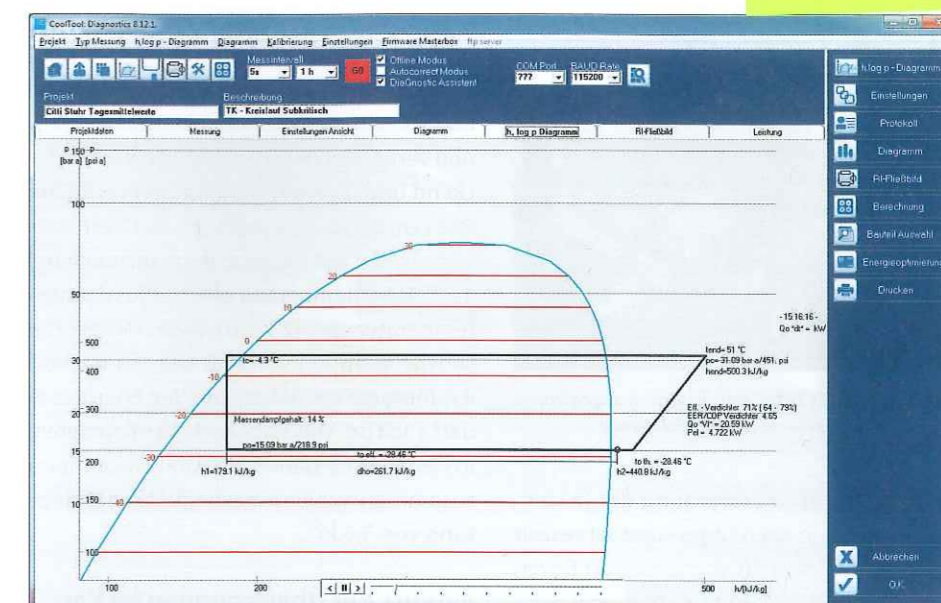


Abb. 3: Visualisierung des subkritischen CO<sub>2</sub>-Prozesses mit einem COP von 4,65 und einer Verflüssigungstemperatur von -4,3 °C



Abb. 4: Aufzeichnung der Betriebszustände: konstante Verflüssigung ohne stark schwankende Drücke im TK-Bereich durch die mit Glykol beaufschlagten Kaskadenkühler

### Bewertung der energetischen Effizienz der einzelnen Konzepte

Bezugnehmend auf den geforderten Kältebedarf wurde der zu erwartende Leistungsbedarf simuliert. Dabei wurden die Funktions-, Betriebs- und Regelweise der Anlage am Standort in Stuhr/Bremen berücksichtigt. Dabei wurden durchschnittlich zu erwartende Außentemperaturen im Jahres- und Tagesgang zugrunde gelegt. Der Einfluss der Steuerung und Regelung, insbesondere von

- Invertersteuerung der Verdichter,
- Invertersteuerung der EC-Motoren der Verdampferlüfter,

- Invertersteuerung der EC-Motoren der Verflüssigerlüfter,
- Einsatz von elektronisch geregelten Expansionsventilen,
- Einstellung der Winterregelung und
- Umwälzpumpen mit Drehzahlregelung, wurde dabei im Ganzjahresbetrieb für unterschiedliche Anlagenvarianten mit gleichen Umgebungsbedingungen simuliert. Dabei wurden die statistisch zu erwartenden Außentemperaturen zur jeweiligen Jahreszeit am Standort der Anlage in Bremen, im Tages- und Jahresgang, zur Bestimmung des Einflusses auf die Betriebsweise herangezogen. Ferner wurden typische Auslas-





Abb. 5: Die vier R1270-Kälteerzeuger im abgegrenzten Maschinenraum mit je 11 kg Füllmenge

einen wesentlichen Anteil am Energiebedarf der Anlage haben. Als Schlussfolgerung wurden in allen Bereichen hocheffiziente Bauteile, wie EC-Ventilatoren bei Luftkühlern und Verflüssigern verwendet, die flächendeckend über Drehzahlregelungen verfügen. Die Temperaturspreizungen der Verflüssiger wurden auf 7 K festgelegt, um auch bei 35 °C Außentemperatur eine Verflüssigungstemperatur von 42 °C zu gewährleisten. Die Umwälzpumpen von KSB werden alle mit IE4-Motoren betrieben, um den Energiebedarf auch bei Vollastbetrieb zu minimieren. In der Summe haben alle Umwälzpumpen zusammen nur eine maximale Antriebsleistung von 3,6 kW.

**Einfluss der Überlegungen im Vorfeld auf die Konstruktion**

Der Normalkühlkreislauf (NK) wurde mit indirekter Kühlung mit vier Propylen(R1270)-Verdichtern, luftgekühlten Verflüssigern, einer Wärmerückgewinnung (WRG) zu Heizzwecken und einem Glykolverteiler-Rohrnetz realisiert. Im Tiefkühlkreislauf (TK) kommen drei CO<sub>2</sub>-Verdichter zum Einsatz; der Verflüssiger, ein Plattenwärmetaucher mit einer nominellen Temperaturspreizung von 4 K, wird mit Kaltssole aus dem NK-Glykolkreislauf beaufschlagt. Das Glykolverteilernetz verfügt

über einen Pufferspeicher, der gleichzeitig als hydraulische Weiche dient und über einen hydraulischen Abgleich. Die hohe Trägheit der Gesamtanlage kommt dem Betrieb entgegen, da von einer konstanten Auslastung des Objekts ausgegangen werden kann. Eine Stillstandskühlung kann entfallen, da die hohe thermische Speicherfähigkeit des Glykols ein Ansteigen des Drucks in der CO<sub>2</sub>-Anlage, z.B. bei geringer Auslastung des NK-Bereichs an Wochenenden im Winter, mehrere Stunden verhindern kann, ohne dass die R1270-Verdichter zwingend laufen müssen.

Um die energetische Güte des Gesamtkonzepts abzurunden, befindet sich auf dem Dach des Logistikzentrums eine Photovoltaik-Anlage mit einer nominellen Leistung von 150 kWp, die bei entsprechender Witterung einen Großteil des Energiebedarfs der Kälteanlage mit selbst erzeugtem Solarstrom versorgen kann.

**Die grundlegenden Daten der Anlage, jeweils gültig im Auslegungspunkt, sind: Kälteleistungen:**

NK mit Propylen (R1270) inkl. Qc TK: 315 kW  
TK mit CO<sub>2</sub> (R744): 60 kW  
**Maximale Leistungsaufnahme der Kreisläufe:**

NK-Verdichter: 101,00 kW  
NK-Verdampfer-/Verflüssigerlüfter: 12,69 kW  
NK-Leistung Glykolpumpen: 3,60 kW  
TK-Verdichter: 21,00 kW  
TK-Verdampfer-/Verflüssigerlüfter: 2,40 kW

**Verdampfungs-/Verflüssigungstemperaturen mit Nominalwerten:**

to<sub>min</sub> NK: -12 °C      to<sub>max</sub> NK: -8 °C  
tc<sub>max</sub> NK: 42 °C      tc<sub>min</sub> NK: 18 °C  
to<sub>min</sub> TK: -32 °C      to<sub>max</sub> TK: -28 °C  
tc TK: -3 °C

Beide Temperaturniveaus verfügen über jeweils einen drehzahlgeregelten Führungsverdichter und können im Teillastbetrieb die Verdampfungstemperatur anheben. Ferner sind auch die Verflüssigerlüfter und alle Umwälzpumpen drehzahl geregelt, womit die Leistungsaufnahme im vorherrschenden Teillastbetrieb deutlich gesenkt werden kann. Verdichter: Bitzer halbhermetik

Verflüssiger: Thermofin mit dt = 7 K  
Luftkühler/Verdampfer: Thermofin mit dt = 4,5 K

Glykolpumpen: KSB mit IE4-Motoren und PumpDrive (FU)

Elektronische Expansionsventile: Carel EV mit Schrittmotorantrieb

Dynamische Volumenstromregler: Caleffi Typ 124

Steuerung: Siemens S7 mit Panel PC



Abb. 7: Die CO<sub>2</sub>-Verdampfer im TK-Raum mit Warmsoleabtauung und den Abtauhauben

**Kälteerzeuger NK**

Insgesamt kommen vier Glykolkühlkreisläufe mit jeweils nur 11 kg Füllmenge R1270 zum Einsatz. Die sicherheitstechnischen Anforderungen, die sich z.B. aus der EN 378 ergeben, wurden durch einen separaten Aufstellungsraum erfüllt, der schwadendicht vom restlichen Maschinenraum getrennt ist. Lediglich in diesem Bereich, der als ATEX-Zone 2 gilt, mussten einige wenige Bauteile einfache Auflagen erfüllen. Alle Flüssigkeitskühlsätze können, bei entsprechender Außentemperatur und Auslastung, die Verflüssigungstemperatur auf einen Wert von +18 °C absenken. Dies wird durch die Verwendung von elektronischen Expansionsventilen möglich, die auch bei geringen Druckdifferenzen noch präzise arbeiten können. Da das Kältemittel R1270 keinen Glide ausweist, ist die Regelung der Überhitzung, bei Voll- und bei Teillast, völlig unproblematisch. Durch die großzügige Dimensionierung aller Wärmetauscher können alle notwendigen Leistungen, auch zur Gewährleistung der technisch notwendigen Unterkühlung und Überhitzung, sicher übertragen werden.

Der COP für den NK-Kreislauf kann dadurch einen Wert von bis zu 6,8 erreichen. Dies wird noch durch das kurze Rohrnetz, die geringen Druckverluste kältemittelseitig und die guten Wärmeübertragungseigenschaften von R1270 unterstützt. Eine Überwachung der ordnungsgemäßen Funktionen der Kälteerzeuger ist durch ein in die SPS-Steuerung integriertes Monitoringsystem gewährleistet. Ferner ist eine Energiemengen-

genzähler für die erzeugten Kälteleistungen sowie für die Energieaufnahme im System installiert.

**Kälteerzeuger TK**

Bedingt durch die geringen Druckverluste und insbesondere die guten Wärmeübertragungseigenschaften von R744 kann hier mit, für den TK-Bereich, vergleichsweise hohen Verdampfungstemperaturen von -28 °C gearbeitet werden. Hier können im Durchschnitt während des Betriebs leicht Werte für den COP von über 4 erzielt werden. In der Summe, kombiniert mit den COP der NK-Stufe, ist der COP für den TK-Bereich damit weit über 2.

Durch die hohe thermische Trägheit des mit Glykol beaufschlagten Kaskadenverflüssigers ist die Verflüssigung sehr stabil. Ferner ist das Takten, für den sehr seltenen Fall, dass nur eine Stillstandskühlung für den R744-Kreislauf gefahren werden muss, dadurch wesentlich geringer.

Alle Tiefkühlverdampfer verfügen über Warmsoleabtauung, die durch die Verwendung von Abtauhauben an den Wärmetauschern in ihrer Funktion unterstützt werden. Alle Luftkühler im NK- und im TK-Bereich werden über die zentrale, SPS-geführte Masterregelung überwacht und die Abtauung nur bei Bedarf eingeleitet.

**Wärmerückgewinnung**

Aus der Wärmerückgewinnung wird nicht nur die Heizungsanlage des Verwaltungstraktes unterstützt, sondern auch die Wärmeenergie für verschiedene Frostschutz-

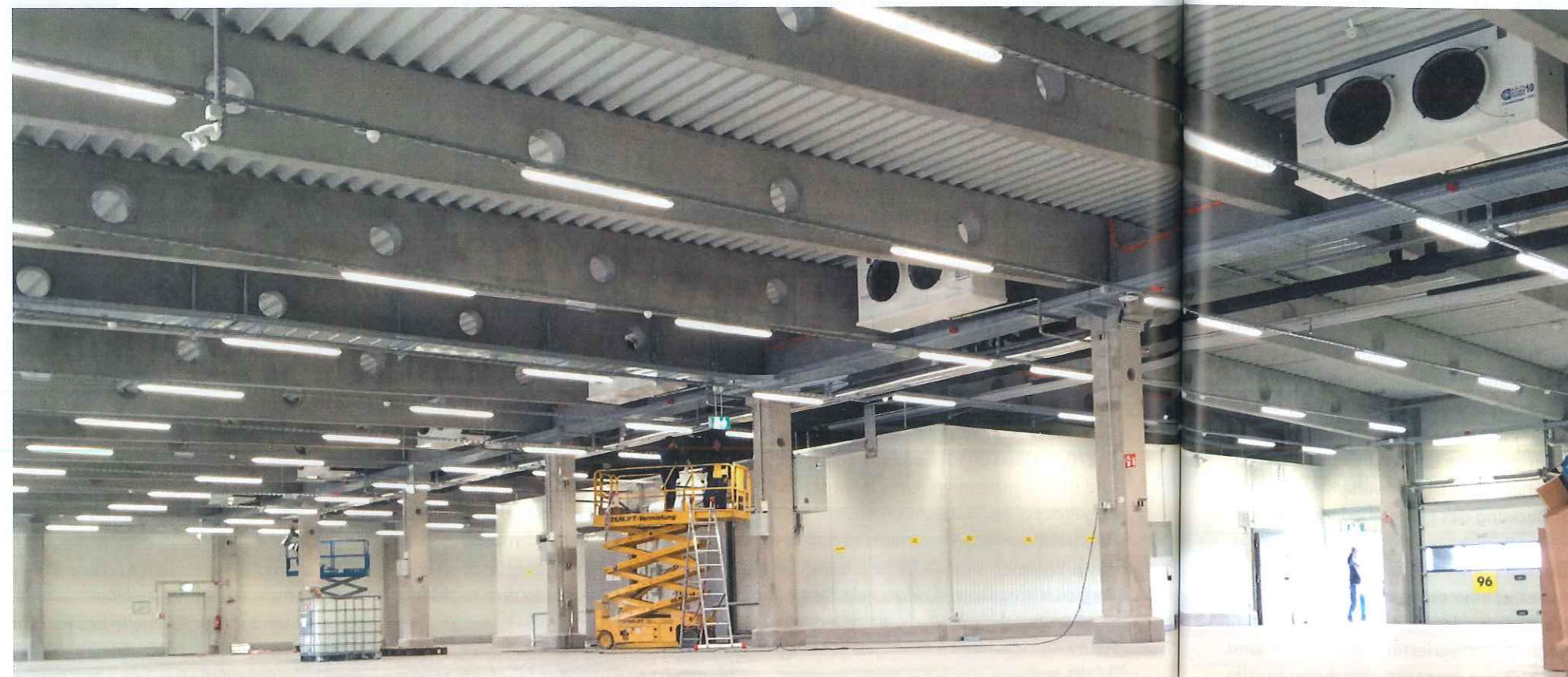


Abb. 6: Die hauptsächlich zu kühlende Fläche des Logistikzentrums mit Glykol beaufschlagten Luftkühlern mit geringer Temperaturspreizung und großer Austauschfläche





Abb. 8: Die beiden zweikreisigen, auf geringe Temperatur-Spreizung ausgelegten Verflüssiger mit großer Fläche und mit einem gut gelaunten Mitarbeiter

heizungen, Unterflurheizungen und die Wärmsoleabtauung zur Verfügung gestellt.

**Glykolrohrnetz**

Die Trennung von Primär- und Sekundärkreislauf erfolgt durch einen Pufferspeicher, der gleichzeitig als hydraulische Weiche dient. Dies reduziert die Antriebsleistungen der Glykolpumpen deutlich. Statt der 3,6 kW Summenleistung aller Pumpen haben die

Pumpen bei 50 % Teillastbetrieb der Anlage lediglich 0,6 kW Leistungsaufnahme. Der hydraulische Abgleich aller Kühlstellen, der auch nach EnEV §9 für alle Arten von hydraulischen Anlagen gefordert wird, wird durch dynamische Volumenstromregler gewährleistet. Somit erfolgt eine gleichmäßige, ordnungsgemäße Verteilung des Glykols zu allen Verbrauchern. Dadurch werden eine energieintensive Überströmung an

Verbrauchern mit geringem Druckverlust und die Unterversorgung am Schlechtpunkt der Anlage, dem Verbraucher mit dem größten Druckverlust, vermieden. Durch die geringe Temperaturspreizung von lediglich 4,5 K in den glykolbeaufschlagten Luftkühlern konnte konsequent auf eine energetisch hoch effiziente Umluftabtauung gesetzt werden. Die stabilen Vorlauftemperaturen des Glykols begünstigen diese Art der Abtauung, da der Eisansatz im Vergleich zu direktverdampfenden Systemen deutlich geringer ist.

**Periphere Einrichtungen zur Senkung des Energiebedarfs**

Abgerundet wird die hohe energetische Güte der Gesamtanlage durch eine Türüberwachung im NK- und TK-Bereich, die das Eindringen von warmer und feuchter Außenluft verhindert. Auch die mit EC-Motoren angetriebenen Türluftschleier in den Durchgangswegen mit hoher Frequenz führen zu einer starken Reduzierung des Feuchteintrags und damit zur Vermeidung von unnötigen Abtauphasen.

Die berechneten Effizienzwerte aller Anlagenteile wurden in der Praxis bestätigt. Teil des Auftrags war es, eine Obergrenze für den Jahresenergiebedarf der Kälteanlage zu garantieren. Grundlage für die vertragliche Vereinbarung waren die Simulationsberechnungen, die im Vorfeld durch den unabhängigen Planer gemacht worden sind. In den ersten Monaten des Anlagenbetriebs konnten die simulierten Vorgaben eingehalten werden bzw. sogar leicht unterschritten werden.

Die durch das Monitoring-System gespeicherten Daten und Auswertungen belegen die hohe energetische Güte des Gesamtkonzepts, die sich aus dem gezieltem Einsatz der guten thermodynamischen Eigenschaften von R1270 und R744 ergibt, die durch den Einsatz energiesparender Komponenten und durch sinnvolles Engineering unterstützt bzw. hervorgehoben werden.

Durch die hohe Effizienz der Kälteerzeugung hat sich die Photovoltaik-Anlage, die zur Deckung des Energiebedarfs installiert wurde, als überdimensioniert erwiesen. So kann fast immer ein Teil des erzeugten Solarstroms, eine entsprechende Witterung vorausgesetzt, ins Netz eingespeist werden. Durch die integrierten Monitoring- und Energieerfassungssysteme können alle Energieflüsse transparent aufgezeigt wer-



Abb. 9: Die auf dem Dach befindliche Photovoltaik-Anlage mit 150 kWp zur Bedeckung des Energiebedarfs der Kälteerzeugung bei entsprechender Witterung



Das Projekt wurde beim Chillventa Award 2016 in der Kategorie „Gewerbekälte“ eingereicht und schaffte es auf die Shortlist der Jury. Auch 2018 wird es wieder einen Chillventa Award geben. Halten Sie schon 2017 Ausschau nach würdigen Projekten, die Sie einreichen können!

sind Einstoffe, das heißt, sie haben keinen Temperatur-Glide und ihre Material- und Ölverträglichkeit ist seit langem bekannt. Die energische Güte der Kohlenwasserstoffe, die 25 bis 30 % besser ist als bei synthetischen Kältemitteln, reicht fast an die von Ammoniak heran. Damit sind sie für indirekte Kühlung im mittleren Leistungssegment zwischen 100 und 600 kW, insbesondere in der vielschichtigen Industrie- und Gewerbekälte, interessant.

den. Ferner können die für den Kunden wichtigen Benchmark-Zahlen einfach zur Verfügung gestellt werden. Evtl. Fehlfunktionen, die im Laufe der Jahre auftreten, können so schnell lokalisiert und behoben werden, bevor hohe und unnötige Energiekosten anfallen.

Als Sonderfunktion wurde in die SPS-Steuerung, eine Siemens S7, ein Online-Monitoring-Tool integriert. Dieses kann in Echtzeit Leistungsmessung, Effizienzüberwachung und Darstellung aller relevanten Betriebspunkte wie COP, Verdichterwirkungsgrad, Verdichterliefergrad und ordnungsgemäße Unterkühlungen und Überhitzungen vornehmen. Diese können in Echtzeit in Messkurven aber auch im h,log p-Diagramm dargestellt werden. Die im System enthaltene Plausibilitäts-Überprüfung aller Prozesspunkte zeigt dem Wartungspersonal evtl. ungünstige Betriebspunkte auf.

**Vorteile des Anlagenkonzepts auf einen Blick**

Als natürliche Kältemittel finden die Kohlenwasserstoffe R600a, R290 und R1270 seit vielen Jahren Anwendung in verschiedenen Bereichen der Kältetechnik. Alle als Kältemittel verwendeten Kohlenwasserstoffe

Einschränkungen in der Verfügbarkeit durch Verwendungsverbote, die sich aus Umweltschutzgründen ergeben, sind nicht zu erwarten. Somit ist die Verfügbarkeit für Nachfüllungen für den äußerst unwahrscheinlichen Fall von Leckagen oder für verschleißbedingte Reparaturen für die Zukunft gewährleistet.

Durch die Anforderung einer Betriebszeit von 365 Tagen im Jahr und 24 Stunden am Tag ist die Trägheit des Systems von Vorteil – insbesondere bei kürzeren Stromausfällen oder kurzen Ausschaltzeiten während erforderlicher Wartungs- und Reparaturarbeiten. Durch moderne Anlagentechnik wie drehzahlregelte Umwälzpumpen und durch eine detaillierte Planung des Verteilrohrnetzes mit akribischem hydraulischen Abgleich kommt der größte Nachteil der etwas tieferen Verdampfungstemperatur kaum zum Tragen. Alle wesentlichen, relevanten kältetechnischen Komponenten wie invertiergeleitete Verdichter und elektronische Expansionsventile, befinden sich zentral in zwei Räumen und können leicht überwacht werden. Die Verteilung übernimmt im NK-Bereich ein robustes und wenig fehleranfälliges Glykolrohrnetz mit einfachen Komponenten.

Überwachungsgemeinschaft Kälte- und Klimatechnik e.V.  
Kaiser-Friedrich-Straße 7, 53113 Bonn



Qualifizierte und überwachte  
Fachbetriebe der Kälte- und Klimatechnik

findet man unter:

[www.uewg-kaelte.de](http://www.uewg-kaelte.de)

ÜWG – Ihr Partner in Technik und Umweltschutz