EcoVap: Energieeinsparung beim Einsatz von Industriegasen

(Nutzung der kostenlosen Kälte bei der Verdampfung kryogener Gase)

Friedhelm Herzog[1]*, Roberto Talluto[1], Jens Tauchmann[1], Stefan Terkatz[2],

[1] Messer SE & Co. KGaA, Kleinewefersstraße 1, 47803 Krefeld, Germany
[2] Messer Industriegase GmbH, Messer-Platz 1, 65812 Bad Soden, Germany

friedhelm.herzog@messergroup.com
roberto.talluto@messergroup.com
jens.tauchmann@messergroup.com
stefan.terkatz@messergroup.com

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Für die Nutzung der Kälte des flüssigen Stickstoffs gibt es eine Vielzahl von Anwendungen. In den meisten Fällen werden jedoch Stickstoff und auch Sauerstoff und Argon nur deswegen verflüssigt, um diese Industriegase kostengünstig speichern und transportieren zu können. Beim Anwender erfolgt dann wieder eine Verdampfung dieser kryogenen Gase mittels umgebungsluftbeheizter Rippenrohr-Wärmeaustauscher. Die Kälte der Flüssiggase geht dabei nutzlos verloren.

Wenn der Anwender einen Kältebedarf hat, der mittels einer konventionellen Kältemaschine abgedeckt wird, lässt sich der Kälteinhalt der kryogenen Gase jedoch leicht nutzen. Dabei wird der von Messer entwickelte EcoVap in den Kühlmittelkreislauf integriert und entnimmt aus diesem die für die Flüssiggas-Verdampfung erforderliche Wärme. Im Gegenzug entsteht eine Entlastung der Kältemaschine. Das führt zu einer Verringerung des CO_2-Footprints, macht die Gastemperatur unabhängig von Witterungsverhältnissen, vermeidet Eis- und Nebelbildung und reduziert den Platzbedarf.

Bei einem typischen Anwendungsfall lassen sich so leicht 100.000 kWh Elektroenergie pro Jahr einsparen, und die Investition in die EcoVap-Technologie amortisiert sich teilweise innerhalb eines Jahres.

Stichwörter: Kältenutzung, Flüssigstickstoff, kryogene Gase, CO_2-Footprint, EcoVap

1. Einleitung

Für die Nutzung der Kälte des flüssigen Stickstoffs gibt es eine Vielzahl von Anwendungen. In den meisten Fällen werden jedoch Stickstoff sowie Sauerstoff oder Argon nur deswegen verflüssigt, um diese sogenannten „Luftgase“ kostengünstiger speichern und transportieren zu können. Beim Anwender erfolgt dann wieder eine Verdampfung dieser kryogenen Gase, um sie in gasförmigem Zustand im Kundenprozess einzusetzen. Die Verdampfung (und die Überhitzung bis knapp unterhalb der Umgebungstemperatur) erfolgt meistens in Luftverdampfern (umgebungsluftbeheizten Verdampfern). Das sind Rippenrohr-Wärmeaustauscher, die ohne Einsatz weiterer Hilfsenergien der umgebenden Luft die Wärme für die Verdampfung und Anwärmung der verflüssigten Gase entziehen. Die Kälte der Flüssiggase geht dabei nutzlos verloren.

Bild 1 *Flüssigstickstoff-Tankanlage mit Luftverdampfern:*

Bei der Verdampfung des flüssigen Stickstoffs bereifen die Rippenrohre der Luftverdampfer. Für einen kontinuierlichen Dauerbetrieb sind die Apparate doppelt ausgeführt und werden nach einigen Stunden Betriebsdauer manuell oder automatisch umgeschaltet, sodass die vereisten Rohre abtauen können.

Beim Anblick der bereiften oder vereisten Luftverdampfer kommt einem sofort die Frage in den Sinn, ob diese „kostenlose“ Kälte irgendwie verwendet werden kann. Die starke Eisbildung an den Rippenrohren suggeriert, dass dort eine erhebliche Energiemenge verloren geht. Der sichtbare Effekt kommt jedoch hauptsächlich durch die kryogenen Temperaturen zustande, der tatsächliche Kälteverlust ist oft nicht so groß wie er erscheint. Trotzdem ist die Nutzung dieser Kälte häufig sinnvoll, insbesondere wenn der Anwender einen Kältebedarf hat, der mittels einer konventionellen Kältemaschine abgedeckt wird.

2. Energieinhalt der Luftgase

Stickstoff, Sauerstoff und Argon werden meistens in Luftzerlegungsanlagen gewonnen. Dabei werden die Gase durch Tieftemperaturrektifikation voneinander getrennt. Pro kg Luft benötigt man hierfür etwa 0,5 kWh Elektroenergie. Danach erfolgt dann die Verflüssigung der einzelnen Komponenten mit einem Energiebedarf von ca. 0,48 kWh pro kg Flüssigprodukt. Typische Luftzerlegungsanlagen, auch Luftzerleger genannt, wie sie beispielsweise zur Sauerstoffversorgung von Stahlwerken eingesetzt werden, können mehrere 100.000 kg/h Luft ansaugen. Der erzeugte Sauerstoff wird dann i.d.R. in gasförmigem Zustand per Rohrleitung an das Stahlwerk geliefert, die übrigen Produkte werden verflüssigt. Da die Gase in dem Verhältnis produziert werden, in welchem sie in der Luft vorkommen (21% O_2, 78% N_2, 1% Ar), nicht aber im gleichen Verhältnis verkauft werden können, oder auch aus energetischen Gründen, werden die nicht verwendbaren Gaskomponenten abgeblasen. Deshalb ist die Kapazität der Gasverflüssiger oft um einen erheblichen Faktor (5 bis 10) kleiner als die Luftzerlegungskapazität einer solchen Industriegase-Produktionsanlage.

Im Folgenden wird beispielhaft der mit der Flüssigstickstoff-Versorgung eines „typischen“ Kunden einhergehende Energiebedarf dargestellt. Damit die Zahlen einfach nachvollziehbar sind wird von einem kontinuierlichen Stickstoffverbrauch von **360 kg/h (0,1 kg/s) über 8.760 h/a** (24/7-Betrieb) ausgegangen. Der Stickstoffverflüssiger benötigt dann eine Leistung von:

$$P_{(el.)} = 360 \text{ kg/h} \times 0{,}48 \text{ kWh/kg} = 173 \text{ kW}$$

Auf dem Weg vom Luftzerleger bis zum Kunden entstehen nun an vielen Stellen „Kälteverluste“. Diese sind in nachfolgender Grafik dargestellt:

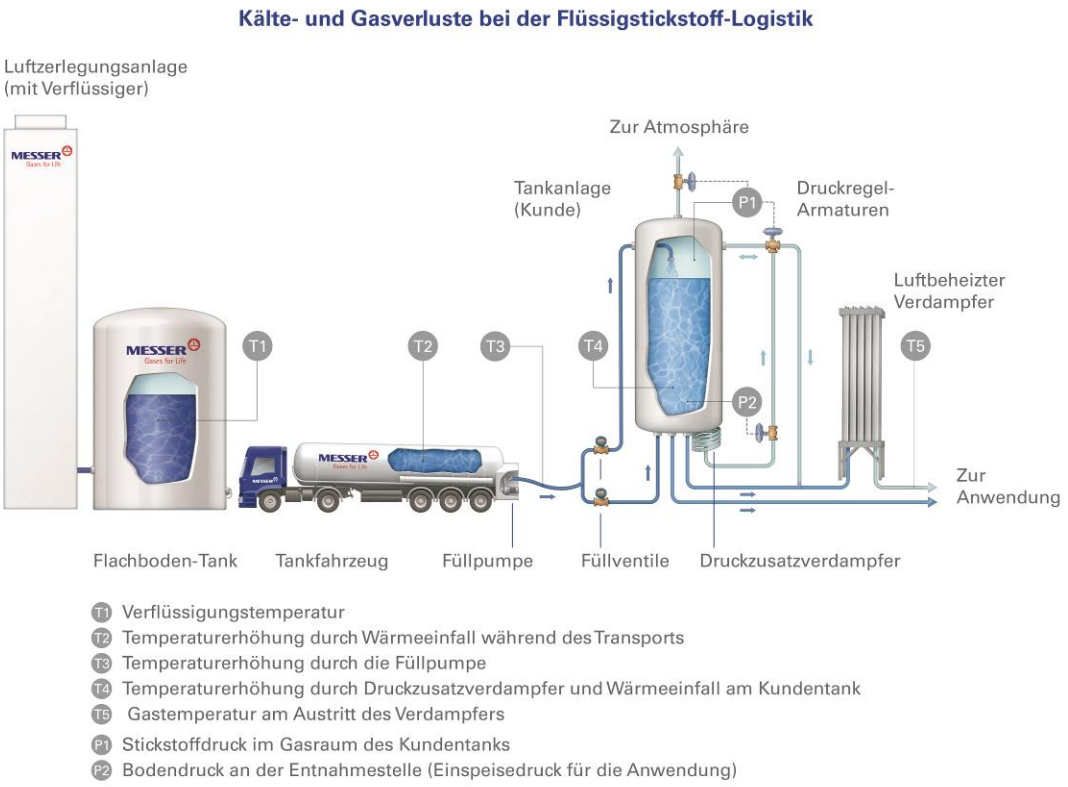

Bild 2 *Kälteverluste bei Transport und Lagerung des flüssigen Stickstoffs*

Im Vorratstank (Flachbodentank) der Luftzerlegungsanlage hat der flüssige Stickstoff eine Temperatur (T1) von -196°C (77 K) und eine Enthalpie von -122 kJ/kg. Während des Transports (150 km) steigt die Temperatur (T2) durch den Wärmeeintrag in den Tankauflieger um etwa 0,5 K, das ist i.d.R. zu vernachlässigen. Einen deutlich höheren Wärmeeintrag liefert die Füllpumpe während des Tankvorgangs beim Kunden. Dieser „Kälteverlust“ ist stark abhängig vom erforderlichen Druck im Tank. Soll beispielsweise das Gasnetz des Kunden bei 7 $bar_{(a)}$ betrieben werden, so ist ein Tankdruck von etwa 9 $bar_{(a)}$ erforderlich. Dies führt (bei sehr verlustarmen Pumpen) zu einer Temperaturerhöhung (T3) durch die Füllpumpe von etwa 5 K. (Bei höheren Drücken und älteren Pumpen kann es auch doppelt so viel sein).

Einen großen Beitrag zum Wärmeeinfall durch Transport und Lagerung liefert auch der Druckzusatzverdampfer des Kundentanks. Hier wird Flüssiggas verdampft wird, um den erforderlichen Tankdruck aufrecht zu erhalten. Je höher der Tankdruck ist, desto mehr Gas muss hier verdampft werden. Bei einem Druck von 9 $bar_{(a)}$ erhöht sich dabei die mittlere Temperatur (T4) der Flüssigphase im Tank um etwa 4 K. Die mittlere Enthalpie der Tankflüssigkeit liegt dann bei -102 kJ/kg.

In der Summe ergibt sich (im Idealfall) also eine Temperaturerhöhung ΔT = 0,5 K + 5 K + 4 K = 9,5 K bzw. eine Enthalpiedifferenz von Δh = (102 kJ/kg - 122 kJ/kg) = -20 kJ/kg. Daraus errechnet sich folgende Wärmeleistung:

$$\dot{Q} = 0{,}1\ \text{kg/s} \times (102\ \text{kJ/kg} - 122\ \text{kJ/kg}) = -2\ \text{kW}$$

Streng genommen müsste man den Wärmeeintrag durch die Kälteisolation des Kundentanks auch noch berücksichtigen. Dann wäre jedoch der Wärmeeintrag durch den Druckzusatzverdampfer um diesen Betrag wieder zu reduzieren, was die Berechnung nur komplizierter - aber nicht genauer - macht. Relevant ist eine solche Betrachtung nur dann, wenn es zu längeren Stillstandzeiten kommt und der mittlere Wärmeeintrag durch die Kälteisolation größer ist als die Wärmeleistung des Druckzusatzverdampfers. In einem solchen Fall verdampft dann mehr Flüssiggas als zur Erhaltung des Tankdrucks erforderlich ist, und es müsste Gas ins Freie abgeblasen werden.

3. Kältenutzung beim Industriegaseanwender

Die Flüssigphase im Kundentank hat unter den oben beschriebenen Bedingungen eine Enthalpie von -102 kJ/kg. Die für Verdampfung und Überhitzung erforderlich Wärmeleistung ist nun davon abhängig, auf welche Temperatur das Gas überhitzt wird (T5 in Bild 2). Im Folgenden werden für einen Stoffbedarf von 360 kg/h (0,1 kg/s) zwei Fälle betrachtet:

- Temperatur: -20°C / 253 K (Enthalpie: 261 kJ/kg) ➔ $\dot{Q}$ = 0,1 kg/s x (261 kJ/kg + 102 kJ/kg) = 36 kW
- Temperatur: +10°C / 283 K (Enthalpie: 292 kJ/kg) ➔ $\dot{Q}$ = 0,1 kg/s x (292 kJ/kg + 102 kJ/kg) = 39 kW

Wird die Wärmeleistung von Luftverdampfern erbracht, so tritt der verdampfte Stickstoff dort i.d.R. mit Temperaturen von 10 bis 20 K unterhalb der Umgebungstemperatur aus. Der erste Fall entspricht somit der Situation im Winter, und der zweite Fall zeigt, dass auch im Sommer das Gas noch relativ kalt aus den Luftverdampfern abströmt und an den angeschlossenen Rohrleitungen mit Kondenswasser zu rechnen ist.

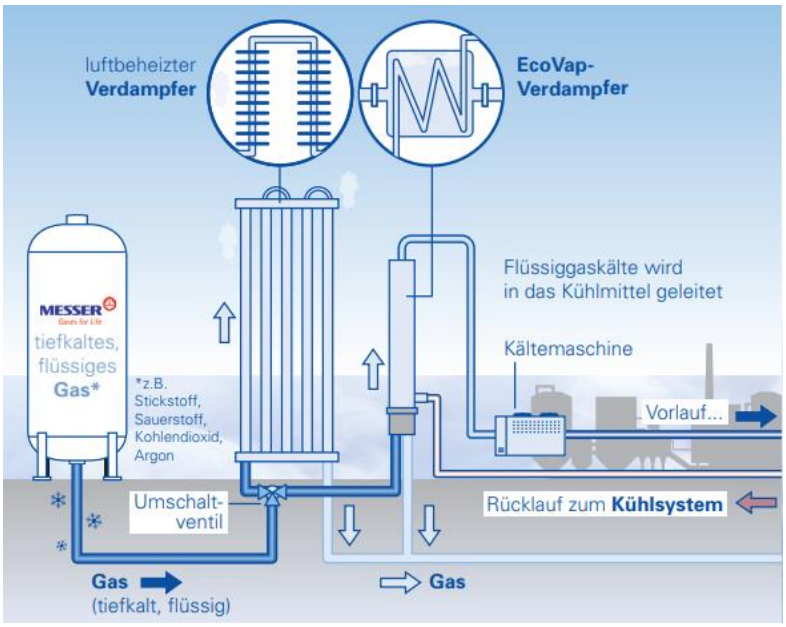

Bild 3 *Integration eines Flüssiggas-Verdampfers (EcoVap) in den Kühlmittelkreislauf einer Kälteanlage*

Betreibt der Anwender ein Kühlsystem, so lässt sich die Wärmeleistung leicht durch den Kühlmittelkreislauf erbringen, indem man dort den EcoVap integriert.

Der Apparat wird in die rücklaufende Kühlmittelleitung eingebaut und bezieht somit seine Wärme bei der höchsten Temperatur des Systems. Dabei reduziert sich dann die Temperatur der rücklaufenden Flüssigkeit, und die Kältemaschine wird entsprechend entlastet.

Bild 4 *EcoVap, typische Installation:*

Der EcoVap (rechts) wird auf einer Standzarge montiert und benötigt nur wenig Platz. Der Luftverdampfer (links) ist dann eigentlich überflüssig, als Backup-System wird er jedoch oft zusätzlich aufgebaut.

In den meisten Fällen ist eine Kälteisolation des EcoVaps nicht erforderlich, insbesondere bei Rücklauftemperaturen > 10°C (283 K). Das spart Geld und Platz. Bei Tiefkälte-Systemen kann der Apparat aber leicht zusammen mit den Kühlmittelleitungen isoliert werden.

Eine Installation des EcoVaps im Kühlmittel-Austritt der Kältemaschine ist auch möglich. Dann muss man aber bei schwankendem Stickstoffbedarf die Kälteanlage stets nachregeln. Bei einer Anordnung wie in Bild 3 dargestellt ist das nicht erforderlich. Hier wird die Kälteanlage bei schwankendem Gasbedarf nur unterschiedlich stark entlastet, und diese Schwankungen werden durch die vorhandene Kältemaschinenregelung automatisch ausgeglichen.

Wird die Kälte eines Kühlsystems überwiegend auf „hohem“ Temperaturniveau (z.B. +5°C) benötigt, manchmal (z.B. um Anfahrvorgänge zu beschleunigen) ist aber auch ein „tiefes“ Temperaturniveau (z.B. -20°C) gewünscht, dann ist die EcoVap-Installation stromab der Kältemaschine trotz des zusätzlichen Regelungsaufwands vorteilhaft.

Bild 5 *EcoVap mit Kälteisolation:*

Bei Installation des EcoVaps in einem Tiefkälte-Kreislauf erhält der Apparat eine entsprechende Kälteisolation.

Mit dem Apparat können dann Temperatur und Leistung des Kühlsystems geboostert werden, indem die Peak-Kälteanforderung durch zusätzliche Flüssigstickstoff-Einspeisung in den EcoVap abgedeckt wird. Während des

Peaks ist die Kälteerzeugung wegen des zusätzlichen Stickstoffbedarfs dann allerdings relativ teuer. Dafür erzielt man aber im Normalbetrieb Einsparungen, weil das System mit einer kleineren und auf höherem Temperaturniveau (und somit effizienter) arbeitenden Kältemaschine ausgestattet werden kann.

In Extremfällen lassen sich auf diese Weise Kühltemperaturen bis unter -100°C (173 K) erreichen, was mit üblichen Kompressions-Kältemaschinen kaum zu schaffen ist. Mit geringem Zusatzaufwand lässt sich auch die Kälteleistung des EcoVaps und damit der gesamten Kälteinstallation leicht vervielfältigen. So ist hier durchaus ein Faktor 3 bis 5 üblich. Ein normalerweise zweistündiger Kaltfahrvorgang kann dann ohne Weiteres auf unter eine halbe Stunde verkürzt werden, was dann eine erhebliche Steigerung für die Auslastung der Produktion bedeutet.

Bei Verwendung eines EcoVaps sind die Luftverdampfer eigentlich überflüssig. Um aber die Gasversorgung unabhängig vom Kühlsystem stets sicher zu stellen, werden die EcoVap-Anlagen mit einer Umschaltarmatur ausgestattet, die bei Ausfall oder Unterbrechung des Kühlmittelflusses den flüssigen Stickstoff auf die Luftverdampfer umleitet. Da dieser Notbetrieb normalerweise nur selten und auch nur kurzzeitig vorkommt, können die Luftverdampfer deutlich kleiner ausgelegt werden.

4. Eisbildung im Strömungsweg

Bei der Auslegung des EcoVaps, insbesondere wenn er in einem variablen Leistungs- und Temperaturbereich arbeiten soll, ist darauf zu achten, dass das zur Beheizung dienende Kreislaufmedium im Apparat nicht einfriert. Eine Eisbildung lässt sich zwar i.d.R. nicht vermeiden, da die Verdampfungstemperaturen der Flüssiggase weit unter den Schmelztemperaturen der zur Anwendung kommenden Kreislaufmedien liegen, aber bei korrekter Auslegung lässt sich das Eiswachstum begrenzen. Bild 6 zeigt diesen Vorgang schematisch am Beispiel eines wasserbeheizten Apparates für die Verdampfung von Flüssigstickstoff (LIN).

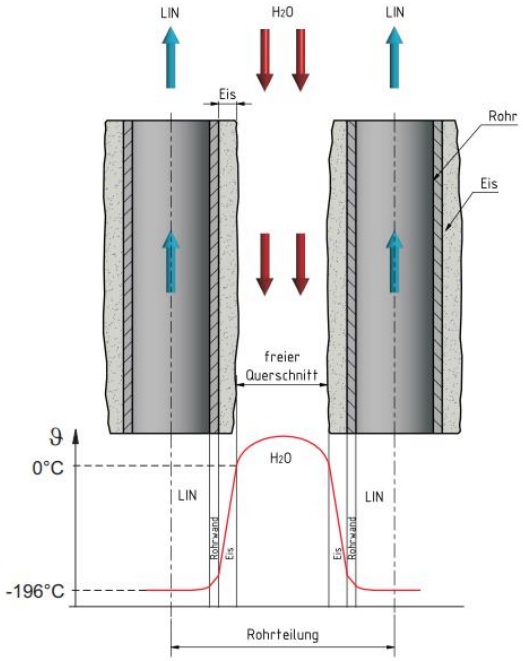

Bild 6 *Eisbildung im Strömungsweg:*

Bei korrekter Auslegung des EcoVaps bildet sich eine definierte Eisschicht auf den Wärmetauscher-Rohren, die auch bei Dauerbetrieb des Apparates nicht weiter anwächst. Dadurch ist der Druckverlust im Strömungsweg ebenfalls begrenzt, und es entsteht keine Verstopfung durch das gefrierende Kreislaufmedium (H2O).

Die Innenseiten der Verdampfer-Rohre haben wegen des hohen Wärmeübergangs auf der Flüssigstickstoff-Seite eine Temperatur, die nur knapp oberhalb der Stickstoff-Siedetemperatur liegt. Diese beträgt -196°C (77 K) bei 1 $bar_{(a)}$ und steigt bei höheren Verdampfungsdrücken nur geringfügig an. Je nach Rohrwandstärke und Heizflächenbelastung ist die Temperatur an der Außenseite der Verdampfer-Rohre bereits etwas höher, aber immer noch viel tiefer als der Gefrierpunkt des Heizmediums (0°C). Deshalb baut sich dort eine Eisschicht auf.

Innerhalb der Eisschicht erhöht sich dann in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Eises und des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Wasser und Eis die Temperatur bis auf 0°C (273 K). Würde die Eisschicht weiter wachsen, stiege ihre wasserseitige Temperatur über ihren Schmelzpunkt hinaus an, was wiederum zum Abschmelzen des Eises führt. Aus diesem Grund erreicht bei stationärem Betrieb die Eisschicht eine bestimmte Dicke, die dann auch im Dauerbetrieb nicht mehr anwächst.

Die Eisschicht ändert sich also nicht mit der Betriebsdauer, aber sie ist abhängig von der Leistungsanforderung an den EcoVap. Bei höherer Leistung vergrößert sich die Eisschicht-Dicke und damit auch ihre thermische Isolationswirkung. Gleichzeitig verringert sich aber auch der freie Querschnitt zwischen den Wärmetauscher-Rohren, und die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers steigt. Hierdurch erhöht sich der Wärmeübergang zwischen Eis und Wasser, was den erhöhten Wärmewiderstand der Eisschicht teilweise kompensiert. Bei der Auslegung ist dann darauf zu achten, dass der verbleibende freie Querschnitt so groß bleibt, dass kein unzulässig hoher Druckverlust entsteht. Außerdem muss wegen der isolierenden Wirkung der Eisschicht eine entsprechend größere Wärmeübertragungsfläche einkalkuliert werden.

Durch qualifizierte Berechnungen der Wärmeübertragungskoeffizienten und der Wärmeleitfähigkeiten der Systemkomponenten und auch aufgrund der Betriebserfahrungen von über 30 EcoVap-Installationen ist es zuverlässig möglich, die Apparate so auszulegen, dass keine unkontrollierte Vereisung entsteht.

5. Energieeinsparung durch den EcoVap

Bei den Luftverdampfern treten die Gase mit 10 bis 20 K unterhalb der Umgebungstemperatur aus. Im Vergleich dazu ist die Temperaturdifferenz zwischen Gas und Wärmequelle bei den EcoVaps deutlich geringer. Hier nähert sich unter üblichen Auslegungsbedingungen die Gastemperatur bis auf etwa 2 K an die Temperatur des rücklaufenden Kühlmittelstroms an. Im Folgenden wird exemplarisch an drei Beispielen dargelegt, wie sich die elektrische Leistung bei einer Verdampfung von 360 kg/h (0,1 kg/s) Flüssigstickstoff im EcoVap reduziert:

5.1 Rückkühlung bei +12°C (285 K)

Bei einem Kaltwassersatz zur Rückkühlung eines Wasserkreislaufs mit 12°C (285 K) Eintrittstemperatur in die Kältemaschine lässt sich unter den o.a. Bedingungen (N2-Austrittstemperatur: +10°C) das Kühlsystem thermisch um 39 kW (siehe Kap. 3) entlasten, wenn der EcoVap mit 360 kg/h Flüssigstickstoff beaufschlagt wird. Bei einem COP (coefficient of performance) der Kältemaschine von 3 sinkt dann die erforderliche elektrische Leistung um 13 kW.

5.2 Rückkühlung bei -18°C (255 K)

Bei einem Tiefkühllager mit -18°C (255 K) Kreislauftemperatur (N2-Austrittstemperatur: -20°C) unter ansonsten gleichen Annahmen beträgt zum Vergleich die thermische Entlastung nur 36 kW (siehe Kap. 3). Da sich bei dieser Temperatur jedoch nur COPs von etwa 2 realisieren lassen, ist der Stromspar-Effekt trotz geringerer Kälteeinspeisung höher als bei dem Kaltwassersatz, er liegt bei ca. 18 kW.

5.3 Gasanwärmung

Für viele Gaseanwendungen ist die in den Verdampfern erzielte Gastemperatur zu niedrig, und es ist eine Anwärmung des Gasstroms erforderlich. Diese erfolgt oft in einem Elektroheizer. In diesen Fällen lassen sich auch dann Einsparungen erzielen, wenn der EcoVap in einem Kühlmittelkreislauf arbeitet, der keine Kältemaschine enthält. Das ist beispielsweise bei mit Umgebungsluft gekühlten Rückkühlwerken oder Kühltürmen der Fall. Die thermische Entlastung des Kühlsystems ist dann nur von geringer Bedeutung, die Erhöhung der Gastemperatur durch die Installation eines EcoVaps aber schon. Erhöht sich beispielsweise die Temperatur um 30 K gegenüber der Austrittstemperatur aus einem Luftverdampfer, so wird bei einer Stickstoff-Verdampfung von 360 kg/h der Elektroerhitzer um etwa 3 kW entlastet.

Dies lässt sich anhand folgender Formel mit c_p = 1,05 kJ/kgK (spez. Wärmekapazität N2-gasfürmig) sehr einfach berechnen (mit $\dot{Q}_{(thermisch)} = - P_{(elektrisch)}$):

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T$$

$$\dot{Q} = 0{,}1 \text{ kg/s} \times 1{,}05 \text{ kJ/kgK} \times 30 \text{ K} = 3 \text{ kW}$$

Diese Ersparnis erscheint zwar nur gering, aber es gibt durchaus Anwendungsfälle, bei denen sich die EcoVap-Installation bereits lohnt, wenn nur die Gasanwärmung als Einspareffekt zu Buche schlägt. So wurde beispielsweise ein EcoVap für die Verdampfung von 2.000 kg/h Sauerstoff mittels Kühlturmwasser realisiert. Die Kälteleistung des Apparates von ca. 200 kW ist zwar erheblich, sie macht sich jedoch bei dem vorhandenen 1,5 MW-Kühlwassersystem nur geringfügig bemerkbar. Die Vergleich zur Luftverdampfer-Installation deutlich höhere O2-Temperatur (im Jahresmittel ca. 30 K) führt dann zu einer Verringerung der Leistung des elektrischen Anwärmers um 15 kW. Das summiert sich im Laufe eines Jahres bei 6.000 bis 7.000 Vollaststunden auf eine Elektroenergie-Ersparnis von über 100.000 kWh.

6. CoolSold: Der EcoVap beim Löten elektronischer Bauteile

Die Lötprozesse bei der Herstellung von Flachbaugruppen für die Elektronikindustrie laufen aus Qualitäts- und Umweltschutzgründen unter inerten Bedingungen ab. Hierzu werden die Lötanlagen mit Stickstoff beaufschlagt, um den Luftsauerstoff an den heißen Oberflächen zu verdrängen. Die Lötanlagen haben Heiz- und Kühlsysteme, damit der Herstellprozess die heute erforderlichen Anforderungen erfüllen kann.

Bild 7 *Elektronik-Lötanlage:*

Eine Steuerung regelt die Stickstoff-Zufuhr für den Lötofen in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration unter der Löthaube. Die Kälte des dabei verdampfenden Stickstoffs wird zeitgleich zur Unterstützung der Prozesskühlanlage des Lötsystems verwendet.

Der Bedarf an gleichzeitigem Heizen, Kühlen und Inertisieren sind ideale Voraussetzungen für die Integration eines EcoVaps in diesen Herstellungsprozess. So entsteht das CoolSold-Verfahren, bei welchem sich alle Vorteile dieser Technologie gleichzeitig nutzen lassen.

Der EcoVap wird dabei in die rücklaufende Kühlmittelleitung der Lötanlagen eingebaut und nutzt so die Abwärme auf einem Temperaturniveau von +12°C (285 K). Der verdampfte Stickstoff erwärmt sich dabei auf ca. +10°C (283 K) und hat im Sommer und im Winter eine ausreichend hohe Temperatur, um die Kondensation von Luftfeuchtigkeit an den Rohrleitungen zu vermeiden. Dies ist gerade im Bereich der Elektronikindustrie von besonderer Bedeutung, da die Stickstoffleitungen teilweise durch Reinräume zu den Lötanlagen geführt werden. Wenn dabei Kondenswasser entsteht, lassen sich die hohen Qualitätsanforderungen in der Elektronik-Fertigung nicht einhalten.

Die energetische Einsparung entspricht bei dieser Anwendung den in Kap. 4.1 dargestellten Werten. Bei einem Stickstoffbedarf von 360 kg/h (0,1 kg/s) reduziert sich also die elektrische Leistungsaufnahme der Kältemaschine um 13 kW.

Der aus dem Verdampfer austretende Stickstoff wird nicht mittels eines Elektroheizers erwärmt. In der Lötanlage erwärmt er sich aber trotzdem. Wenn er also mit einer im Vergleich zum Luftverdampfer um 30 K höheren Temperatur in die Lötanlage gelangt, so benötigt die Heizung der Lötanlage entsprechend weniger Energie. Diese „versteckte Ersparnis“ wird in Anbetracht der vergleichsweise hohen Heizleistung der Maschine zwar häufig übersehen, sie ist aber dennoch vorhanden und liegt bei 3 kW. Die Gesamtersparnis beim CoolSold-Verfahren beträgt dann unter den o.a. Annahmen 16 kW, was sich je nach Auslastung der Produktion dann auf über 100.000 kWh pro Jahr aufsummieren kann.

7. CO_2-Verdampfung (Sonderfall: Karbonisierung in der Getränkeindustrie)

Bei einem EcoVap für die Verdampfung von flüssigem Stickstoff, Sauerstoff oder Argon muss konstruktiv und verfahrenstechnisch beachtet werden, dass das wärmezuführende Medium in dem Apparat nicht einfriert. Bei fehlerhafter Ausführung kann das leicht passieren, weil die entsprechenden Solen, Thermalöle oder Frostschutzgemische bei Temperaturen fest werden, die weit oberhalb der Verdampfungstemperaturen der kryogenen Gase liegen. Bei der Verdampfung von flüssigem Kohlendioxid (CO_2) ist das einfacher. Standardmäßig wird flüssiges CO_2 bei einer Temperatur von -20°C (253 K) gelagert und hat dann einen Dampfdruck von 20 $bar_{(a)}$. Dieser Zustand wird durch ein Heiz/Kühl-System aufrechterhalten:

- Eine kleine Kältemaschine kompensiert den Umgebungswärmeeinfall in die Tankanlage, wenn kein CO_2 entnommen wird, und verhindert so einen Druckanstieg.
- Wird CO_2 aus der Tankanlage entnommen, so sorgt eine Elektroheizung für die Verdampfung einer der Volumenänderung entsprechenden CO_2-Menge, um ein Absinken des Tankdrucks zu verhindern.

Wenn nun in einem Kühlkreislauf ein Medium zirkuliert, welches bei der CO_2-Temperatur im Tank noch flüssig ist, besteht keine Einfriergefahr für den EcoVap, wenn dieser hiermit beheizt wird. Dann ist für den Verdampfer auch keine Rohrbündelkonstruktion erforderlich, der EcoVap lässt sich als kostengünstiger Platten-Wärmeübertrager ausführen.

Bild 8 *CO_2-EcoVap:*

Für die Verdampfung von CO_2 lässt sich ein vergleichsweise kleiner Plattenwärmetauscher einsetzen, wenn das Kreislaufmedium zur Beheizung eine Schmelztemperatur unterhalb von -20°C aufweist. Dies ist bereits mit einfachen Frostschutzlösungen (z.B. Ethylenglycol / Wasser-Gemischen) zu erreichen.

Der spezifische Kälteinhalt des flüssigen CO_2 ist etwas geringer als bei den kryogenen Gasen. Im Tank liegt die CO_2-Enthalpie bei 155 kJ/kg (-20°C @ 20 $bar_{(a)}$), bei +10°C und gleichem Druck beträgt sie 471 kJ/kg. Für einen Massenstrom (siehe Kap. 3) von 360 kg/h (0,1 kg/s) lässt sich dann die nutzbare Kälte leicht berechnen:

$$\dot{Q} = 0{,}1\ kg/s \times (471\ kJ/kg - 155\ kJ/kg) = 32\ kW$$

Bei einer vergleichbaren Kältemaschine wie in Kap. 5.1 (Rücklauftemperatur: +12°C / COP: 3) würde sich die erforderliche elektrische Leistung dann um ca. 11 kW verringern. Eine Vielzahl solcher Anwendungsfälle gibt es bei der Karbonisierung von Getränken (Mineralwässer, Limonaden, Biere). Meist werden diese auf +4°C (277 K) gekühlt und dann mit CO_2 beaufschlagt, welches auf jeden Fall vollständig verdampft sein muss und i.d.R. auf +7°C (280 K) bis +10°C (283 K) erwärmt wird.

Da die CO_2-Tankanlagen zur Aufrechterhaltung des Drucks mit einer Elektroheizung ausgestattet sind, liegt es nahe, diese so groß zu dimensionieren, dass sie zusätzlich auch die Verdampfung und Überhitzung des CO_2 leisten kann. In diesem Fall wäre dann (zusätzlich zum Druckausgleich) bei 360 kg/h CO_2-Entnahme eine Leistung von 32 kW erforderlich. Der Ersatz dieser elektrischen Verdampfung durch einen CO_2-EcoVap führt dann zu einer Gesamtersparnis von:

$$P_{(el.)} = 32\ kW_{(CO2\text{-}Erhitzer)} + 11\ kW_{(Kältemaschine)} = 43\ kW_{(ges.)}$$

Tatsächlich kann die Ersparnis noch höher ausfallen, da beispielsweise in der Heizanlage installierte Pumpen wegfallen.

8. Fazit / Zusammenfassung

Viele Produktionsbetriebe benötigen Industriegase (Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Kohlendioxid), die in flüssiger Form bei tiefen Temperaturen transportiert und gelagert werden. Für die meisten Anwendungen werden die verflüssigten Gase dann mittels umgebungsluftbeheizter Verdampfer wieder in den gasförmigen Zustand überführt, wobei der Kälteinhalt nutzlos verloren geht. Wenn in der Produktion ein mit zirkulierendem Kühlmedium arbeitendes Kühlsystem vorhanden ist, lässt sich mit Hilfe des EcoVaps die Kälte der verflüssigten Gase in den Kühlkreislauf einkoppeln und so energetisch nutzen.

Bei einem Gasebedarf von 360 kg/h (0,1 kg/s) entstehen folgende Kälteleistungen für das Kühlsystem:

- Flüssigstickstoff, Verdampfung und Anwärmung auf +10°C (283 K): 39 $kW_{(th.)}$
- Flüssigstickstoff, Verdampfung und Anwärmung auf -20°C (253 K): 36 $kW_{(th.)}$
- CO_2-flüssig, Verdampfung und Anwärmung auf +10°C (283 K): 32 $kW_{(th.)}$

In der Produktionsanlage reduziert sich dann der elektrische Leistungsbedarf von Kältemaschinen bzw. Elektroerhitzern typischerweise um folgende Beträge:

- Einsparung bei elektrischer Gasanwärmung (ohne Kältemaschine): 3 $kW_{(el.)}$
- Einsparung bei einem Kaltwassersatz (+12°C / +8°C): 13 $kW_{(el.)}$
- Einsparung bei einer Tiefkühlanlage (-18°C / -22°C°C): 18 $kW_{(el.)}$
- Einsparung bei Lötanlagen für elektronische Bauteile (CoolSold): 16 $kW_{(el.)}$
- Einsparung bei der CO_2-Verdampfung (+12°C / +8°C): 11 $kW_{(el.)}$
- Ersatz elektrischer CO_2-Verdampfer bei der Getränkekarbonisierung: 43 $kW_{(el.)}$

Bei Verdampfung von flüssigem Sauerstoff liegen die Einsparungen etwa 6% niedriger, bei flüssigem Argon ist der massenspezifische Kälteinhalt ca. 36% geringer als beim Stickstoff.

Je nach Anwendungsfall und Auslastung der Produktion summieren sich die Elektroenergieeinsparungen in der Praxis auf eine Größenordnung von 100.000 kWh pro Jahr. Das entspricht beim heutigen Energiemix einer CO_2-Emission von ca. 12 PKWs mit je 30.000 km/a Fahrleistung.

Referenzen

1. Herzog, F: Cold and gas losses during transportation and storage of liquid nitrogen - Gasworld 08/2018
2. Herzog, F.; Talluto, R.: EcoVap – Using the cold from vaporisation of liquid gases - Birmingham Energy Institute 2015