

Die Bewertung des umweltfreundlichen Kältemittels Ammoniak nach dem TEWI-Konzept

„Ein außergewöhnlicher Temperaturanstieg im späten 20. Jahrhundert und die zunehmenden Klimaveränderungen sind ein weiterer Beleg dafür, dass der Treibhauseffekt bereits den natürlichen Grad der Klimaveränderungen überschritten hat. Die prognostizierte globale Erwärmung im 21. Jahrhundert übertrifft die natürliche Veränderung der letzten 1.000 Jahre bei weitem und ist ausgeprägter als die weltweiten Temperaturveränderungen während der letzten zwischeneiszeitlichen Periode.“^[1]

Es gibt überzeugende Beweise dafür, dass Emissionen von Treibhausgasen durch den Menschen das weltweite Klima verändern, weshalb der Klimawandel eines der wichtigsten Themen ist, mit denen sich die Menschheit derzeit auseinandersetzen muss. Kohlendioxid (CO₂), das bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Öl und Gas zur Energiegewinnung entsteht, beeinflusst den Klimawandel am stärksten. Da die Industrieländer etwa ein Sechstel ihres gesamten Stroms für Kühlung und Klimatisierung nutzen, sieht sich diese Branche mit einer Vielzahl von Herausforderungen konfrontiert:

- Verbesserung der Energieeffizienz von Kühlsystemen, um die Menge der bei der Energiegewinnung produzierten Treibhausgase zu verringern.
- Reduzierung direkter Emissionen von Kältemitteln mit hohem Treibhauspotenzial (Global Warming Potential - GWP) durch verbesserte Service-Praktiken und eine bessere Systemintegrität im Design und bei der Herstellung von Kälte- und Klimaanlage mit Kältemitteln mit hohem Treibhauspotenzial oder Verwendung von Alternativen mit niedrigem Treibhauspotenzial.
- Weltweite Einstellung des Einsatzes von Kältemitteln mit Ozonabbaupotenzial (Ozone Depleting Potential - ODP), um eine weitere Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht zu verhindern.

Letzteres ist im Rahmen des im Montreal-Protokoll festgelegten stufenweisen Ausstiegs bereits in Angriff genommen worden. Mit der Umsetzung der ersten beiden Punkte, die im Kyoto-Protokoll geregelt sind, wurde im Rahmen nationaler Gesetze begonnen. Es herrscht weitestgehend Übereinstimmung darin, dass der Einfluss der Kältetechnik auf die globale Er-

wärmung zu durchschnittlich 20% direkten Gasemissionen zugeordnet werden kann. Die restlichen 80% stammen aus dem Energieverbrauch und den damit verbundenen indirekten Emissionen.^[2] Diese beiden Bereiche werden zur Beurteilung und zum Vergleich von Kühlsystemen beim meistverbreiteten Ansatz herangezogen: dem Total Equivalent Warming Impact oder TEWI. Zusätzlich benötigte Energiemengen für die Herstellung, Installation und Stilllegung von Kühlsystemen werden durch die komplexere Life Cycle Climate Performance (LCCP) Analyse berücksichtigt. Im Vergleich zu den direkten und indirekten Emissionen ist der relative Anteil dieser Emissionen jedoch meist zu vernachlässigen.

Obwohl sich die TEWI-Berechnung auf eine einfache Gleichung stützt, hängt das Ergebnis von einer Reihe von Annahmen ab, wie Kälteleistung, Nutzungsmuster, Leckagerate, Kältemittleigenschaften und Stromerzeugungseffizienz, d.h. spezifischer CO₂-Ausstoß pro kWh. Die Berechnung muss daher von unterstützenden Dokumentationen begleitet werden^[3] Da das Ergebnis ein numerischer Wert ist, muss zudem berücksichtigt werden, dass der TEWI-Wert von zwei oder mehr Systemen nur dann vergleichbar ist, wenn Kälteleistung, Funktion und saisonale Nutzung vergleichbar sind.

Allgemein gesprochen wird das Ergebnis des Vergleichs in höchstem Maße von der relativen Energieeffizienz des Systems beeinflusst. Kälteanlagen, die bereits über effiziente Komponenten und Ausstattungsmerkmale verfügen wie

- ein Kältemittel mit guter exergetischer Effizienz
- ein effizienter Verdichter bei Voll- und Teillast, z.B. durch den Einsatz von drehzahl-geregelten Antrieben
- Verdampfer und Verflüssiger mit geringen Temperaturdifferenzen zwischen den Medienströmen
- variabler Verflüssigungsdruck zur Minimierung der Verdichterleistung während der Wintermonate und bei Teillastbedingungen

haben einen weitaus höheren Leistungskoeffizienten als z. B. Systeme mit künstlich angehobenem Verflüssigungsdruck oder zu klein dimensionierten Verdampfern und Verflüssigern. Diese sparen zwar zunächst Kosten, führen aber zu höheren Verflüssigungs- und geringeren Verdampfungstemperaturen und damit zu erhöhtem Energieverbrauch – je K höherer Verflüssigungs- oder tieferer Verdampfungstemperatur steigt der Energieverbrauch einer Kälteanlage um ca. 2 bis 3%. Ähnlich verhält es sich bei Anlagen, bei denen eine zu große Ausle-

gung bzw. die Steuerung von Prozessen dazu führt, dass die Verdichter längerfristig im Teillastbetrieb arbeiten.

Das Kältemittel hat Einfluss auf die Energieeffizienz der Kälteanlage. Die thermodynamischen Eigenschaften bestimmen die Verdichtergröße und damit einhergehende Verlustanteile, die auch einen Anteil am Gesamtleistungsbedarf der Kälteanlage haben. Die für den Wärmetransport erforderlichen Temperaturdifferenzen in Wärmeübertragern und der Leistungsbedarf für Nebenantriebe von Pumpen und Ventilatoren werden durch das Kältemittel beeinflusst.

Bei insgesamt gleichen Bedingungen verfügen Kaltdampfverdichtungssysteme, die für den Betrieb mit Ammoniak entwickelt wurden, durch Reduzierung des Gesamtleistungsbedarfes und der damit indirekten Emissionen (z. B. CO₂ durch Erzeugung von Elektroenergie) über bessere Eigenschaften. Ammoniak besitzt eine äußerst hohe latente Wärme, sodass im Vergleich zu synthetischen Kältemitteln ein weitaus geringerer Kältemittelmassendurchfluss benötigt wird, um eine bestimmte Kälteleistung zu erzeugen. Außerdem erreicht Ammoniak im Vergleich zu synthetischen Kältemitteln den höchsten Wärmeübergang beim Verdampfen und Verflüssigen. Grundsätzlich ist Ammoniak in seinem ganzen Betriebsbereich (-40 °C bis +40 °C) sehr wirtschaftlich. Dies reduziert den Energieaufwand der Kälteanlage.

Zur Bewertung von 3 Flüssigkeitskühlsätzen mit unterschiedlichen Kältemitteln, 300 kW Volllast-Kälteleistung, wurde die saisonale Energiekennzahl **SEPR** (**S**easonal **E**nergy **P**erformance **R**atio) benutzt. SEPR wird aus Gesamt-Kältebedarf geteilt durch Gesamt-Elektroenergiebedarf eines Jahres berechnet. Details für den Jahrestemperaturverlauf und das von der Außentemperatur abhängige Lastprofil eines Jahres und die Berechnungsmethode sind der COMMISSION REGULATION (EU) 2015/1095 [4] „Process Chiller“ für Nutzttemperatur MT entnommen, d.h. für eine Soleaustrittstemperatur von -8°C am Verdampfer.

TEWI wird in Kilogramm CO₂-Äquivalent ausgedrückt. Diese Zahl schließt den gesamten Lebenszyklus einer Kälteanlage ein bis hin zum Recycling.

TEWI umfasst die Summe aus direktem Treibhauspotential von Kältemittel, das im Lebenszyklus der Kälteanlage in die Atmosphäre gelangt und aus indirektem Treibhauspotential, das als Folge der Energieumwandlung von fossilen Brennstoffen in Elektroenergie zum Betrieb der Kälteanlage entsteht.

TEWI wird gemäß (3) nach der folgenden Beziehung ermittelt:

$$\text{TEWI} = \text{GWP} \times L \times n + [\text{GWP} \times m \times (1 - \eta_R)] + n \times E_a \times \beta$$

Das direkte Treibhauspotential resultiert aus Leckagen während des Lebenszyklus

$$\text{GWP} \times L \times n$$

und aus Kältemittelverlusten beim Recycling der Kälteanlage.

$$\text{GWP} \times m \times (1 - \square_R)$$

Dabei sind

GWP Treibhauspotential des Kältemittels in kg CO₂ - Äquivalent pro kg Kältemittel

L Leckage in kg pro Jahr

n Anzahl der Betriebsjahre eines Lebenszyklus

m Kältemittelfüllmenge in kg;

\square_R Rückgewinnungsrate bei Außerbetriebsetzung

Das indirekte Treibhauspotential, das in der Tabelle mit GWP_E bezeichnet wird, hat die Größe

$$n \times E_a \times \beta$$

Dabei sind

E_a ist der Energiebedarf zum Betrieb der Kälteanlage in kWh pro Jahr;

β Konversionsfaktor zur Energieumwandlung in kg CO₂ pro kWh.

Tabelle: Jahresenergiebedarf *E_a*, saisonale Energieeffizienz SEPR in Bezug auf Ammoniak, GWP der jeweiligen Kältemittel und TEWI in Tonnen CO₂-Äquivalent für 12-jährige Nutzung

Kältemittel	SEPR/ SEPR _{Ammoniak}	Verdichter- bauart	<i>E_a</i> [kWh]	GWP (AR4)	GWP _E [t CO ₂]	TEWI [t CO ₂]
Ammoniak	100%	Schraube	612.400	0	2.940	2.940
R410A	90%	Scroll	683.600	2088	3.281	3.354
R407F	91%	Hubkolben	673.400	1825	3.332	3.312

Für den Vergleich wurden Verdichterbauarten gewählt, die typischerweise für das jeweilige Kältemittel für 300 kW Kälteleistung eingesetzt werden.

Zur TEWI-Berechnung wurden folgende Werte benutzt:

$m = 120 \text{ kg}$ für R404A, $m = 150 \text{ kg}$ für R410A

$n=12$

$\eta_R = 0,95$

$L=2\%$

Durch den VDKF werden knapp 3% Kältemittelverlust pro Jahr angegeben [5].

Konversionsfaktor $\eta=0,40$.

In Ammoniakanlagen zur Wasserkühlung, die mit Verdunstungsverflüssiger oder mit luftgekühltem Verflüssiger ausgerüstet sind, lässt sich die extrem große Verdampfungsenthalpie von Ammoniak zur freien Kühlung ausnutzen, d.h. zur Wärmeabfuhr an die Umgebung, sobald es die Außentemperatur ermöglicht. Das Kältemittel zirkuliert dabei nach dem Prinzip eines Wärmerohres zwischen Verdampfer und Verflüssiger ohne Verdichterbetrieb. Dadurch lässt sich der Jahresenergiebedarf deutlich reduzieren.

Ammoniak bietet auf Grund seiner thermodynamischen Eigenschaften die Voraussetzungen für eine energieeffiziente Kälteanlage und hat im Unterschied zu den synthetischen Kältemitteln kein direktes Treibhauspotenzial. Daher weist Ammoniak einen deutlichen Vorteil auf, der bei der Berechnung des TEWI ersichtlich wird. Ammoniak-Leckagen sollten zwar aus Sicherheitsgründen vermieden werden, obwohl sie keinen Einfluss auf den Treibhauseffekt haben. Zudem können Leckagen auf Grund der hohen Warnwirkung von Ammoniak schnell erkannt und abgestellt werden. Dadurch besteht kaum die Gefahr, dass ein System aufgrund geringer Kältemittelfüllmenge bei verminderter Effizienz betrieben wird.

Im Vergleich mit einem Ammoniaksystem wird der TEWI bei einem mit synthetischen Kältemitteln befüllten System in den meisten Fällen deutlich höher sein. Die indirekten Emissionen durch Energiebereitstellung sind aufgrund der teilweise geringeren Energieeffizienz von Anlagen, die mit synthetischen Kältemitteln gefüllt sind, meist höher als die eines Ammoniaksystems. Außerdem tragen bereits geringe Austrittsmengen infolge des vergleichsweise hohen spezifischen Treibhauspotenzials von synthetischen Kältemitteln beträchtlich zu den direkten Emissionen bei. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die meisten – wenn nicht gar alle – synthetisch hergestellten Kältemittel geruch- und farblos sind. Daher kann ein Großteil der Systemfüllmenge bereits verloren gegangen sein, bevor der Betreiber oder die Wartungsfirma den niedrigen Stand oder die sinkende Systemleistung wahrnimmt. Aus diesem Grund verpflichten Rechtsvorschriften, wie z. B. die europäische F-Gase-Verordnung, Betreiber von Kälteanlagen im Falle großer Kältemittelfüllmengen mit der Durchführung regel-

mäßiger Leckagetests sowie der Installation durchgehend aktiver Leckage-Erkennungssysteme.

Ammoniak ist für viele Anwendungen ein exzellentes Kältemittel, und sein Einsatzbereich hat sich dank seiner ausgezeichneten Energieeffizienz und seines vernachlässigbar geringen Umwelteinflusses deutlich erweitert. Darüber hinaus ist Ammoniak zukunftssicher: Es ist nicht der Unsicherheit der synthetischen Kältemittel ausgesetzt, deren Verwendung zukünftig vom Gesetzgeber erneut eingeschränkt oder verboten werden könnte. Der Schlüssel zu seinem erfolgreichen Einsatz sind Verbesserungen beim Komponenten- und Systemdesign sowie die adäquate Anwendung von Sicherheitsvorkehrungen, wie sie z. B. in EN378 für Ammoniak dargelegt sind. Solche Maßnahmen umfassen die Auslegung für die Mindestfüllmenge (kritische Füllmenge), einen Hauptkreislauf, der ein sekundäres Kälte-trägersystem versorgt, standortspezifische Risikobewertungen sowie die Bereitstellung von Sicherheitsausrüstung und die Festlegung von Notfallmaßnahmen.

Literatur

- [1] Crowley, Thomas J.; "Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years" *Science* 14 July 2000: Vol. 289. no. 5477, pp. 270 – 277.
- [2] International Institute of Refrigeration (IIR) Statement: "Global warming: refrigeration-sector challenges", Eleventh session of the Conference of the Parties (COP11), First session of the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol (COP/MOP1), Montreal, Canada, November 28 – December 9, 2005.
- [3] British Refrigeration Association (BRA): "Guideline Methods of Calculating TEWI, Issue 2 (2006)"
- [4] COMMISSION REGULATION (EU) 2015/1095 of 5 May 2015 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for professional refrigerated storage cabinets, blast cabinets, condensing units and process chillers
- [5] Zaremski, Wolfgang, „Kältemittel-Emissionen aus deutschen Kälte- und Klimaanlage“ VDKF Information Nr.9-10 September-Oktober 2016, Seiten 8-10

Herausgegeben von *eurammon*
Postfach 71 08 64 ♦ D-60498 Frankfurt
Telefon +49 69 6603 1277 ♦ Fax +49 69 6603 2276
e-mail: karin.jahn@eurammon.com
<http://www.eurammon.com>