

# Fachveröffentlichung

## Luftgekühlte Verflüssiger in NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen als Alternative zum Verdunstungsverflüssiger



Dipl. Ing. Heinz Jackmann  
Geschäftsfeldleiter Industriekälte

### Themenschwerpunkte:

- Warum sind luftgekühlte Verflüssiger in NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen nach dem heutigen Stand der Technik eine interessante Alternative?
- Verschiedene Bauarten von NH<sub>3</sub>-Verflüssigern
- Die Vorteile von luftgekühlten NH<sub>3</sub>-Verflüssigern und Verdunstungsverflüssigern im Vergleich
- Einsatzgrenzen für NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen mit luftgekühlten Verflüssigern
- Welche Regionen eignen sich für den Einsatz von luftgekühlten NH<sub>3</sub>-Verflüssigern?
- Vergleich des Energieverbrauchs und der Betriebskosten
- Vergleich der Anschaffungskosten
- Vergleich der Gesamtkosten

## Inhaltsangabe

1. Warum sind luftgekühlte Verflüssiger in NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen nach dem heutigen Stand der Technik eine interessante Alternative?
2. Verschiedene Bauarten von NH<sub>3</sub>-Verflüssigern
3. Vorteile von luftgekühlten NH<sub>3</sub>-Verflüssigern und Verdunstungsverflüssigern
4. Einsatzgrenzen für NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen mit luftgekühlten Verflüssigern
5. Welche Regionen eignen sich für den Einsatz von luftgekühlten NH<sub>3</sub>-Verflüssigern?
6. Vergleich des Energieverbrauchs und der Betriebskosten
7. Vergleich der Investitionskosten
8. Vergleich der Gesamtkosten
9. Zusammenfassung

## Vorwort

NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen werden überwiegend mit Verdunstungsverflüssigern ausgerüstet.

Sind luftgekühlte Verflüssiger nach dem heutigen Stand der Technik eine interessante Alternative?

Welche Auswirkungen haben die gestiegenen Preise für Wasser, Abwasser und Energie auf die Betriebskosten der unterschiedlichen Systeme?

Diese Zusammenhänge haben wir untersucht und geben Ihnen mit dieser Präsentation einen Überblick, in welchen Regionen und für welche NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen luftgekühlte Verflüssiger eine wirtschaftliche Alternative sind.

### 1. **Warum sind luftgekühlte Verflüssiger in NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen nach dem heutigen Stand der Technik eine interessante Alternative?**

In den letzten 30 Jahren hat sich die Technik in NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen verändert, und die Kosten für Strom, Wasser und Abwasser sind gestiegen.

Was hat sich verändert?

#### 1.) *Kompressoren*

Im Gegensatz zu früher werden heute in NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen zunehmend Schraubenkompressoren eingesetzt.

Durch den Ölkreislauf im Schraubenkompressor wird Wärme abgeführt, und es entstehen Heißgastemperaturen, die höhere Verflüssigungstemperaturen zulassen als bei Kolbenkompressoren.

Schraubenkompressoren in NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen können eingesetzt werden bis zu einer Verflüssigungstemperatur von 50 – 60 °C.

#### 2.) *Regelungen*

Frei programmierbare Steuerungen optimieren den Betrieb der Anlage.

Um Energie einzusparen, wird die Verflüssigungstemperatur auf einen minimal zulässigen Wert von 20 oder 25 °C abgesenkt. Dadurch ergeben sich neue Perspektiven für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines luftgekühlten Verflüssigers.

Während beim Verdunstungsverflüssiger die Verflüssigungstemperatur proportional zur Feuchtkugeltemperatur fällt, fällt die Verflüssigungstemperatur beim luftgekühlten Verflüssiger proportional zur Umgebungstemperatur und damit bei abnehmender Temperatur deutlich stärker. Kälteanlagen mit luftgekühlten Verflüssigern erreichen deshalb unterhalb ca. 20 °C Umgebungstemperatur niedrigere Verflüssigungstemperaturen als Anlagen mit Verdunstungs-Verflüssigern.

#### 3.) *Kosten für Betriebsmittel*

Die Kosten für Energie, Wasser und Abwasser sind gestiegen und werden auch in Zukunft steigen.

Je nach Standort können die Betriebskosten der Verdunstungsverflüssiger höher sein als die Betriebskosten der luftgekühlten Verflüssiger.

#### 4.) *Umweltbewusstsein*

Chemikalien zur Wasserbehandlung belasten die Umwelt und können nicht in ungeklärte Abwassersysteme abgelassen werden. Trinkwasser wird in vielen Regionen der Erde kostbar und knapp.

## 2. Verschiedene Bauarten von NH<sub>3</sub>-Verflüssigern

Die Bauarten von NH<sub>3</sub>-Verflüssigern kann man in 3 Gruppen einteilen

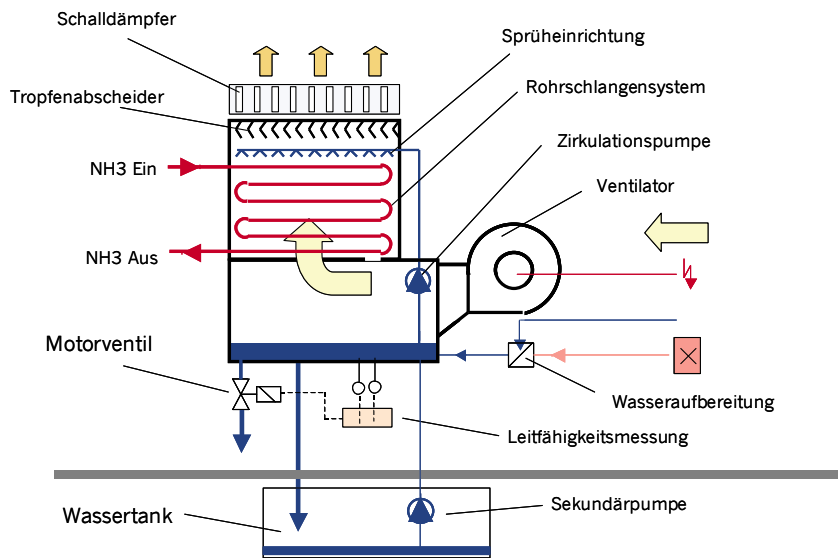
### 2.1 Verdunstungsverflüssiger

Der größte Teil aller NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen in der Industrie ist mit Verdunstungsverflüssigern ausgerüstet.

#### Funktion Verdunstungsverflüssiger

Der Kältemitteldampf strömt durch das geschlossene Rohrsystem eines Glatrohr-Wärmeaustauschers, der an seiner Oberfläche ständig durch umlaufendes Wasser berieselt wird. Luft wird durch Ventilatoren über den Wärmeaustauscher gesaugt oder gedrückt, wodurch das Rohrsystem gekühlt wird und ein Teil des Umlaufwassers verdunstet. Die Kühlung mit Luft und die Verdunstung des Wassers führt Wärme aus dem Kältemitteldampf ab und führt zu dessen Verflüssigung. Durch den Verdunstungseffekt des Wassers wird bei hohen Umgebungstemperaturen eine Verflüssigungstemperatur erreicht, die ca. 10 K niedriger ist als bei einem luftgekühlten Verflüssiger.

Bild 1: Verdunstungsverflüssiger



Der Verdunstungsverflüssiger besteht aus folgenden Bauteilen:

- Gehäuse
- Rohrschlange für NH<sub>3</sub>
- Ventilator
- Tropfenabscheider
- Rohrsystem mit Sprühdüsen für Benetzungswasser
- Zirkulationspumpe für Benetzungswasser
- Wanne für Benetzungswasser
- Schalldämpfer (optional)
- Bei Frostgefahr: Integrierte Heizung oder separater Wassertank mit Sekundärpumpe

Für die Versorgung des Verdunstungsverflüssigers mit Kühlwasser werden benötigt:

- Wasseraufbereitungssystem für Frischwasser
- Chemikalien: Biozide, Korrosionsschutz, Härtestabilisator
- Leitfähigkeitsmessung
- Motorventil für Entsalzung / Abschlammung

Die Versorgung mit Kühlwasser verursacht zusätzliche Betriebskosten durch Frischwasser, Abwasser, Chemikalien und die erforderliche Überwachung der Anlage.

Erforderliche Betriebsmittel für Verdunstungsverflüssiger:

- Luft
- Strom
- Frischwasser
- Chemikalien
- (Abwasser)

## 2.2 Hybrid-Verflüssiger

Der Hybrid-Verflüssiger ist eine Kombination aus Verdunstungsverflüssiger und luftgekühltem Verflüssiger.

### Funktion Hybrid-Verflüssiger

Beim klassischen Hybrid-Verflüssiger strömt der Kältemitteldampf durch einen Lamellen-Wärmeaustauscher. Durch die große Oberfläche der Lamellen (ähnlich wie beim luftgekühlten Verflüssiger) ist es möglich, dieses System bis zu einer definierten Außentemperatur (z. B. 15 °C) ohne Wasserbesprühung zu betreiben. Erst bei höheren Umgebungstemperaturen werden die Lamellen-Wärmeaustauscher mit Wasser benetzt, um den Verdunstungseffekt zu nutzen und eine niedrige Verflüssigungstemperatur zu erreichen. Durch gezielte Maßnahmen der Wasseraufgabe und Regelung der Ventilatordrehzahl wird die Lamellenoberfläche nur teilweise benetzt und dadurch nur so viel Wasser verdunstet wie erforderlich ist, um die vorgegebene Verflüssigungstemperatur zu erreichen.

Dadurch entstehen beim klassischen Hybrid-Verflüssiger drei Betriebszustände:

Betriebszustand 1, bei niedrigen Umgebungstemperaturen:

Kühlung des Lamellen-Wärmeaustauschers mit trockener Luft.

Das System arbeitet als luftgekühlter Verflüssiger.

Betriebszustand 2, bei mittleren Umgebungstemperaturen:

Ein Teil der Lamellenoberfläche wird mit Wasser benetzt. Das System arbeitet zum Teil als luftgekühlter Verflüssiger und zum Teil als Verdunstungsverflüssiger.

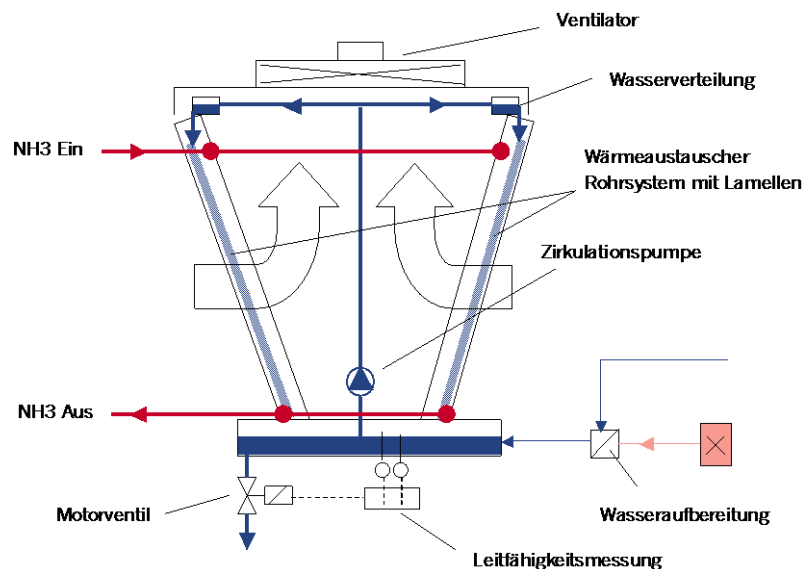
Betriebszustand 3, bei hohen Umgebungstemperaturen:

Die Lamellen des Wärmeaustauschers werden vollständig benetzt.

Das System arbeitet als Verdunstungsverflüssiger.

Hybrid-Verflüssiger verbrauchen nur einen Teil der Kühlwassermenge, die für Verdunstungsverflüssiger benötigt wird. Dadurch werden Hybrid-Verflüssiger trotz höherer Investitionskosten bei steigenden Wasser- und Abwasserkosten immer wirtschaftlicher. Im Betriebszustand 3 werden gleiche Verflüssigungstemperaturen erreicht wie beim Verdunstungsverflüssiger.

Bild 2: Hybrid-Verflüssiger



Der Hybrid-Verflüssiger besteht aus folgenden Bauteilen:

- Wärmeaustauscher als Rohrsystem mit Lamellen
- Ventilator
- Wasserverteilung
- Verrohrung für Wasserverteilung
- Zirkulationspumpe für Benetzungswasser
- Wanne für Benetzungswasser

Für die Wasseraufbereitung ist der gleiche Aufwand erforderlich wie beim Verdunstungsverflüssiger.

Heizungen gegen Einfrieren des Benetzungswassers oder ein zusätzlicher Wassertank sind nicht erforderlich.

Bei Hybrid-Verflüssigern ist bei einer Umgebungstemperatur unterhalb von + 5 °C bis + 10 °C das Benetzungswasser nicht mehr erforderlich und wird über ein Ventil abgelassen.

Erforderliche Betriebsmittel für Hybridverflüssiger:

- Luft
- Strom
- Frischwasser
- Chemikalien
- (Abwasser)

Außer der hier dargestellten Bauart gibt es noch weitere Bauarten von Hybrid-Verflüssigern, z. B. mit einer Kombination aus Glattröhrwärmeaustauscher und Lamellenwärmeaustauscher. Die Betriebszustände der unterschiedlichen Bauarten sind ähnlich.

### 2.3 Luftgekühlter Verflüssiger

Der größte Teil aller FKW-Kälteanlagen wird mit luftgekühlten Verflüssigern ausgerüstet.

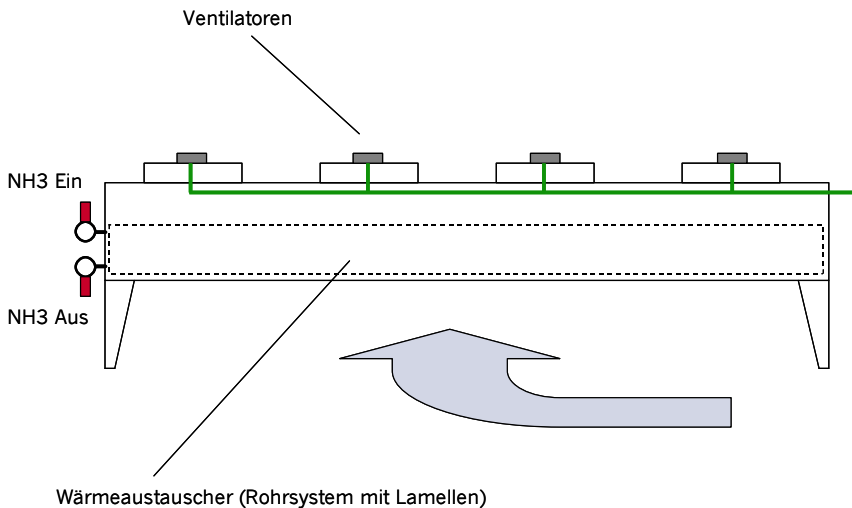
In den letzten 20 Jahren werden aber auch für NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen zunehmend luftgekühlte Verflüssiger eingesetzt.

*Funktion luftgekühlter Verflüssiger:*

Beim luftgekühlten Verflüssiger strömt Kältemitteldampf durch das Rohrsystem eines Lamellen-Wärmeaustauschers. Ventilatoren saugen die Luft durch den Wärmeaustauscher. Der Kältemitteldampf wird abgekühlt und verflüssigt.

Die Verflüssigungswärme wird nur durch die Kühlung des Wärmeaustauschers mit Luft abgeführt. Bei einer wirtschaftlichen Auslegung liegt die Verflüssigungstemperatur ca. 10 - 12 K über der Umgebungstemperatur.

Bild 3: Luftgekühlter Verflüssiger



Der luftgekühlte Verflüssiger besteht aus folgenden Bauteilen:

- Gehäuse mit Aufstellfüßen
- Wärmeaustauscher als Rohrsystem mit Lamellen
- Axialventilatoren

Erforderliche Betriebsmittel:

- Luft
- Strom

Der luftgekühlte Verflüssiger ist von allen Verflüssiger-Bauarten das einfachste System und beinhaltet nur wenige Bauteile. Außer Stromkosten für die Ventilatoren entstehen keine weiteren Betriebskosten

## 2.4 Andere Varianten

Neben den hier vorgestellten drei Bauarten von NH<sub>3</sub>-Verflüssigern gibt es noch weitere Varianten, z. B.

- Verdunstungsverflüssiger mit integriertem Lamellen-Wärmeaustauscher als Enthitzer oder adiabatischem Vorkühler
- Luftgekühlte Verflüssiger mit Düsen für Wasserbesprühung

Fazit:

Die Kosten für Energie, Wasser und Abwasser sind gestiegen, darum haben viele Hersteller in den letzten Jahren neue Gerätekombinationen entwickelt mit dem Ziel, Kosten für Strom, Wasser und Abwasser einzusparen. Alle Systeme mit Verdunstungskühlung benötigen jedoch eine Wasserversorgung mit den dafür erforderlichen Komponenten und den entsprechenden Chemikalien. Die größten Vorteile bietet daher ein System, das völlig ohne Kühlwasser und Chemikalien auskommt.

## 3. Vorteile von luftgekühlten NH<sub>3</sub>-Verflüssigern und Verdunstungsverflüssigern

Bild 4: Vergleich Vorteile luftgekühlter Verflüssiger / Verdunstungsverflüssiger

| Luftgekühlter Verflüssiger           | Verdunstungs-Verflüssiger   |
|--------------------------------------|---|
| - Kein Wasserverbrauch               | -Verflüssigungstemperatur ist niedriger bei Außentemperaturen über 20°C |
| -Keine Anlage für Wasseraufbereitung | - Geringerer Energieverbrauch   |
| - Keine Kosten für Chemikalien       | - Geringere Investitionskosten  |
| - Keine Abwasserkosten               | - Kleine Aufstellfläche   |
| - Keine Schwadenbildung              | - Kleinere Antriebsmotore für die Kompressoren                          |
| - Keine Legionellengefahr            | - Geringere Kältemittelfüllung  |
| - Niedriges Gewicht                  |   |
| - Minimaler Wartungsaufwand          |   |
| - Keine Probleme mit Frost           |   |

## 4. Einsatzgrenzen für NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen mit luftgekühlten Verflüssigern

Die Verflüssigungstemperatur von luftgekühlten NH<sub>3</sub>-Verflüssigern liegt bei wirtschaftlicher Auslegung ca. 10 - 12 K über der Umgebungstemperatur. Dadurch übersteigt die Verflüssigungstemperatur bei extremen Außentemperaturen möglicherweise die Einsatzgrenze der Kompressoren.

Bei der Projektierung von NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen mit luftgekühlten Verflüssigern müssen daher folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- die Einsatzgrenze der Kompressoren
- das Lastprofil der Kälteanlage
- die max. Umgebungstemperatur am Aufstellungsort

### 4.1 Einsatzgrenzen von NH<sub>3</sub>-Kompressoren nach Umgebungstemperaturen

Durchschnittliche maximale Verflüssigungstemperaturen mit Kältemittel NH<sub>3</sub>

- für Kolbenkompressoren 40 °C
- für Kolbenkompressoren mit Zylinderkopfkühlung 45 °C
- für Schraubenkompressoren 50 – 55 °C

Kolbenkompressoren werden in der Regel in NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen mit kleinerer und mittlerer Leistung eingesetzt; für solche Anlagen ist es sinnvoll, luftgekühlte Verflüssiger mit einem max. Delta T von 10 K zwischen Umgebungstemperatur und Verflüssigungstemperatur einzusetzen.

Schraubenkompressoren werden häufig in Anlagen mit größerer Leistung eingesetzt. Um bei solchen Anlagen die Anzahl der Verflüssiger und die Aufstellfläche in Grenzen zu halten, werden die luftgekühlten Verflüssiger mit einem Delta T1 von 10 - 12 K ausgelegt.

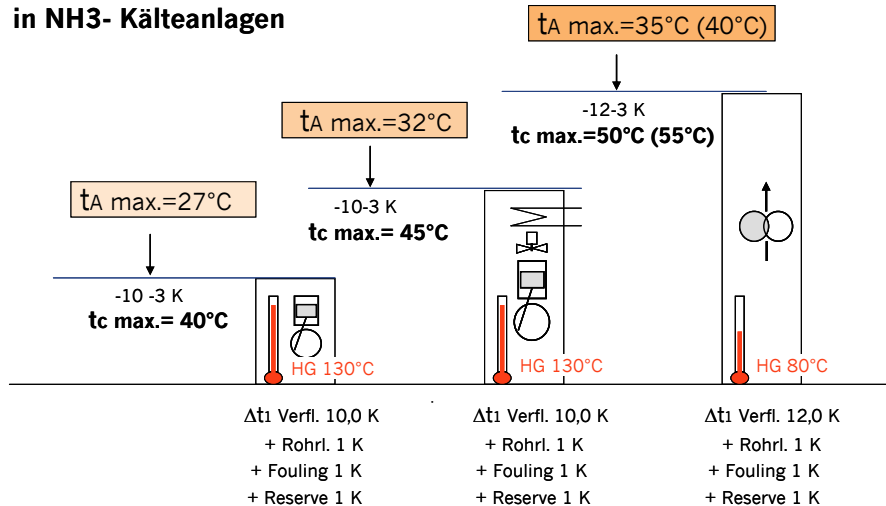
Berücksichtigt man zusätzlich 1 K Druckverlust für Ölabscheider, Rohrleitungen und Armaturen und 1 K für die Verschmutzung des Verflüssigers, ergeben sich für die unterschiedlichen Kompressorbauarten folgende Einsatzgrenzen für die max. Umgebungstemperatur am Aufstellungsort:

Kolbenkompressoren 27 °C

Kolbenkompressoren mit Zylinderkopfkühlung 32 °C

Schraubenkompressoren 35 – 40 °C

Bild 5 **Maximale Umgebungstemperaturen für luftgekühlte Verflüssiger in NH<sub>3</sub>- Kälteanlagen**



#### 4.2 Einsatzgrenze nach dem Lastprofil der Kälteanlage

Bei der Projektierung einer Kälteanlage müssen wir unterscheiden, ob es sich um eine Anlage handelt, die zu jeder Zeit 100 % der Kälteleistung zur Verfügung stellen muss, oder ob Leistungsanpassungen über 24 Std. zulässig sind.

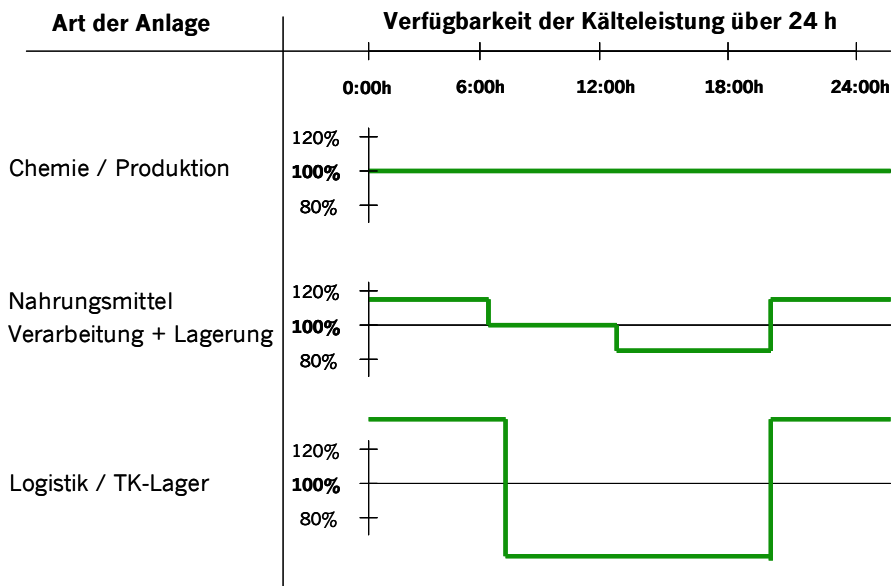
Kälteanlagen für die Kühlung von verfahrenstechnischen Anlagen oder Produktionsanlagen müssen zu jeder Zeit 100 % der Kälteleistung zur Verfügung stellen. Deshalb können luftgekühlte Verflüssiger bei solchen Anlagen nur in Regionen eingesetzt werden, die o. g. Temperaturbedingungen für die max. Umgebungstemperatur erfüllen.

Kälteanlagen im Logistikbereich können bei Bedarf mit unterschiedlicher Leistung betrieben werden. In Tiefkühlagern z. B. ist es möglich, bei hohen Umgebungstemperaturen am Tag die Kälteleistung zu reduzieren, um die maximal zulässige Verflüssigungstemperatur einzuhalten. In den Nachtstunden können die Anlagen dann mit entsprechend höherer Leistung betrieben werden, um das Defizit wieder auszugleichen.

Ist eine solche Betriebsweise der Kälteanlage möglich, können luftgekühlte Verflüssiger auch in Regionen mit Umgebungstemperaturen über 35 – 40 °C eingesetzt werden. Außerdem können bei dieser Betriebsweise die Antriebsmotore der Kompressoren kleiner dimensioniert werden, und durch die Kälteerzeugung bei niedrigen Umgebungstemperaturen und niedrigen Stromkosten in den Nachtstunden können Energiekosten eingespart werden.



Bild 6: Lastprofil unterschiedlicher Kälteanlagen (Beispiel)



### 5. Welche Regionen eignen sich für den Einsatz von luftgekühlten NH<sub>3</sub>-Verflüssigern?

In Regionen mit einer max. Umgebungstemperatur von 35 - 40 °C können luftgekühlte Verflüssiger für NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen mit Schraubenkompressoren ohne Einschränkung eingesetzt werden. Übersteigen die Umgebungstemperaturen kurzzeitig den Wert von 35 - 40 °C, ist es erforderlich, für kurze Zeit die Leistung zu reduzieren oder den Verflüssiger mit Wasser zu besprühen.

Bild 7: Regionen für den Einsatz von luftgekühlten NH<sub>3</sub>-Verflüssigern

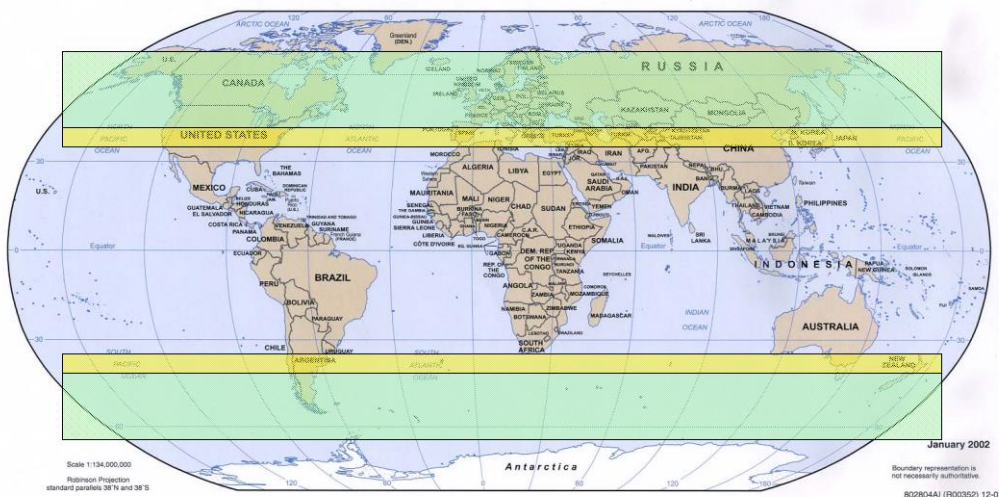


Bild 7 zeigt die Regionen auf der nördlichen und südlichen Halbkugel, in denen luftgekühlte NH<sub>3</sub>-Verflüssiger eingesetzt werden können. Besonders interessant sind die Industrieländer in Nordeuropa, Osteuropa und Nordamerika.

- Grüner Bereich: Mit Schraubenkompressoren ist der Einsatz von luftgekühlten Verflüssigern für alle NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen möglich.
- Gelber Bereich: Leistungsreduzierung bei hohen Umgebungstemperaturen oder Besprühung mit Leitungswasser für max. 200 h/a.



Die 35 °C-Klimazone liegt etwa auf 45° nördlicher und südlicher Breite.

Das Klima und die Umgebungstemperaturen sind jedoch abhängig vom individuellen Standort und werden unter anderem beeinflusst durch die Seennähe oder die Höhe über dem Meeresspiegel. Für einen Vergleich der Systeme ist es erforderlich, die maximalen Umgebungstemperaturen am Aufstellungsort zu berücksichtigen.

## 6. Vergleich des Energieverbrauchs und der Betriebskosten

Für den Vergleich des Energieverbrauchs und der Betriebskosten wird eine Musteranlage mit den folgenden in der Praxis häufig auftretenden Parametern untersucht.

Verdampfungstemperatur: -10 °C

Umgebungstemperatur: + 35 °C

Die Verdampfungstemperatur wird mit -10 °C angenommen. Dies ist eine typische Verdampfungstemperatur für eine einstufige und eine zweistufige NH<sub>3</sub>-Kälteanlage, da die Hochdruckstufe einer zweistufigen Kälteanlage häufig mit -10 °C Verdampfungstemperatur betrieben wird und die Verflüssigungstemperatur sich nur auf die Hochdruckstufe auswirkt.

Die maximale Umgebungstemperatur wird mit 35 °C angenommen und das Delta T1 für die Verflüssiger mit 12 K. Unter Berücksichtigung der Druckverluste in den Rohrleitungen und eines Verschmutzungsfaktors für den Verflüssiger ergeben sich damit folgende max. Verflüssigungstemperaturen am Austritt des Kompressors:

37 °C für die Anlage mit Verdunstungsverflüssiger

49 °C für die Anlage mit luftgekühltem Verflüssiger.

Für die Ölkühlung wird ein separater Rückkühler mit Wasser-/Glykolgemisch berücksichtigt. Wird das hohe Temperaturniveau des Kühlkreislaufs von 70 – 45 °C für Wärmerückgewinnung genutzt, kann damit ein Teil der Energiekosten für die Kompressoren kompensiert werden.

Bild 8: Beispiel einer NH<sub>3</sub>-Kälteanlage für den Vergleich von Energieverbrauch und Betriebskosten

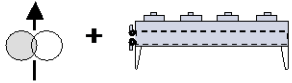
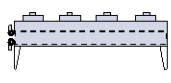


| Anlagenbeschreibung                             |  +  |  +  |
|---|---|--|
| <b>Kompressoren</b>                             | <b>3x Schrauben Grasso V-2</b>  | <b>3x Schrauben Grasso V-2</b>   |
| <b>Kälteleistung</b>                            | <b>3150 KW (-6,8%)</b>  | <b>3380 KW (-0%)</b>   |
| <b>Verdampfungstemperatur</b>                   | -10°C   | -10°C  |
| <b>Verflüssigungstemperatur am Kompressor</b>   | 49°C  | 37°C   |
| <b>Verflüssigungstemperatur am Verflüssiger</b> | 47°C  | 35°C   |
| <b>Max. Antriebsleistung Kompressoren</b>       | 1205 KW   | 980 KW   |
| <b>Verflüssiger</b>                             | 5xGüntner AGVH 100.2A/2x5N  | 2xBAC CXV-280  |
| <b>Leistung Verflüssiger</b>                    | <b>3560 KW</b>  | <b>3840KW</b>  |
| <b>Umgebungstemperatur</b>                      | 35°C  | Feuchtkugeltemp. 22,5°C  |
| <b>Ventilatoren</b>                             | Axial 50x2,2 KW   | Axial 4X11 KW  |
| <b>Drehzahlregelung</b>                         | Frequenzumrichter   | Frequenzumrichter  |
| <b>Pumpen</b>                                   |   | 2x4 KW (integrierte Pumpen)  |
| <b>Rückkühler für Ölkühlung</b>                 | <b>820 KW</b>   | <b>500 KW</b>  |

Bild 9: Schema der NH<sub>3</sub>-Kälteanlage mit luftgekühlten Verflüssigern

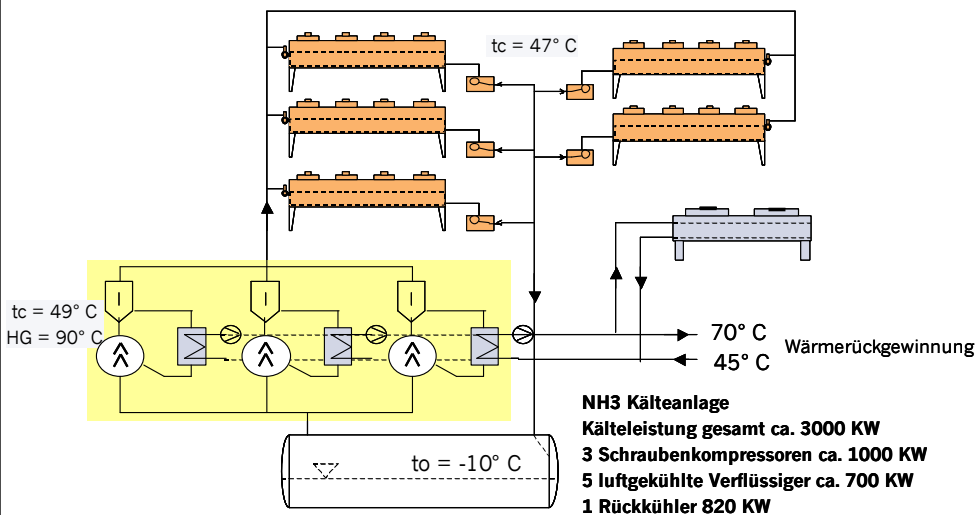
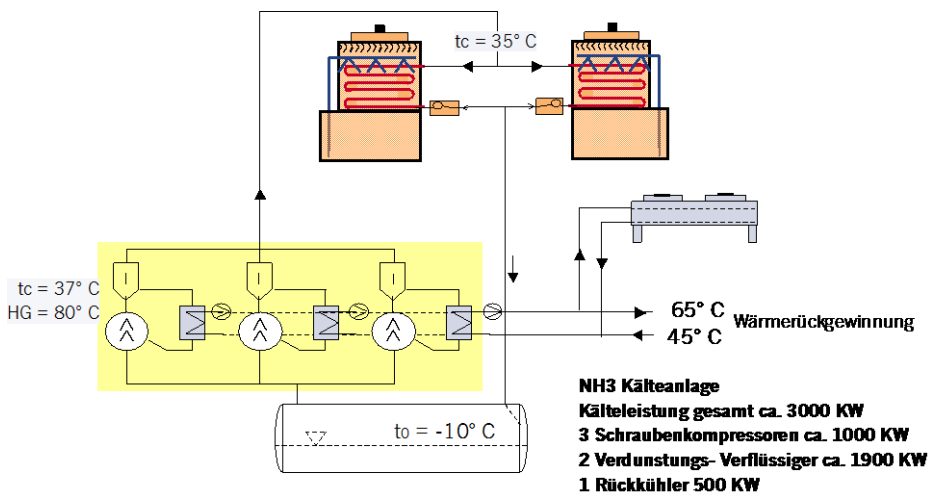


Bild 10: Schema der NH<sub>3</sub>-Kälteanlage mit Verdunstungsverflüssigern



Für den Vergleich der Betriebskosten betrachten wir als Erstes die Energiekosten für die Kältekompressoren und als Zweites die Betriebskosten für die Verflüssiger.

### 6.1 Vergleich des Energieverbrauchs für die Kältekompressoren

In einer Kälteanlage haben die Kompressoren den höchsten Energieverbrauch. Der Energieverbrauch der Kompressoren ist hauptsächlich abhängig vom Niveau der Verflüssigungstemperatur.

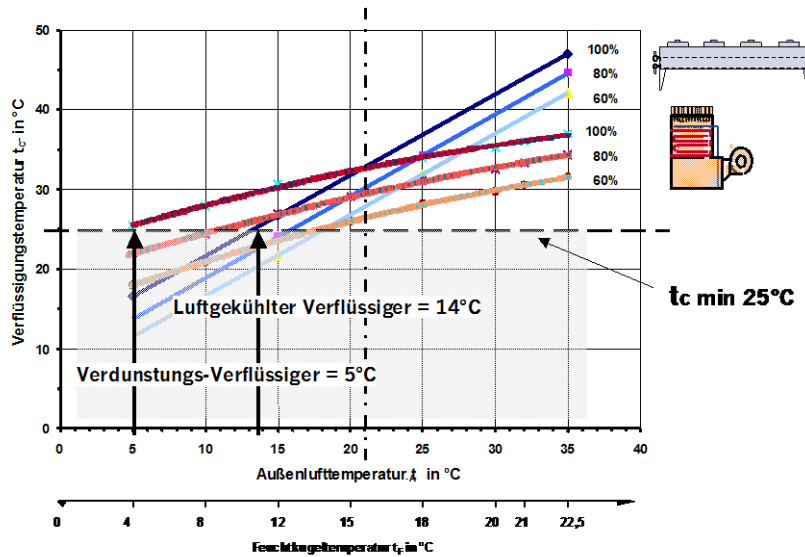
Um den Energie- und Wasserverbrauch für beide Systeme über ein zu vergleichen, ist es notwendig, jeweils das vollständige Jahresprofil der Umgebungstemperatur, der Feuchtkugeltemperatur und der Verflüssigungstemperatur zu berücksichtigen.

Bei hohen Umgebungstemperaturen erreichen Verdunstungsverflüssiger eine niedrigere Verflüssigungstemperatur als luftgekühlte Verflüssiger.

Die Verflüssigungstemperatur bei Verdunstungsverflüssigern fällt proportional zur Feuchtkugel-Temperatur. Die Verflüssigungstemperatur bei luftgekühlten Verflüssigern fällt proportional zur Umgebungstemperatur.

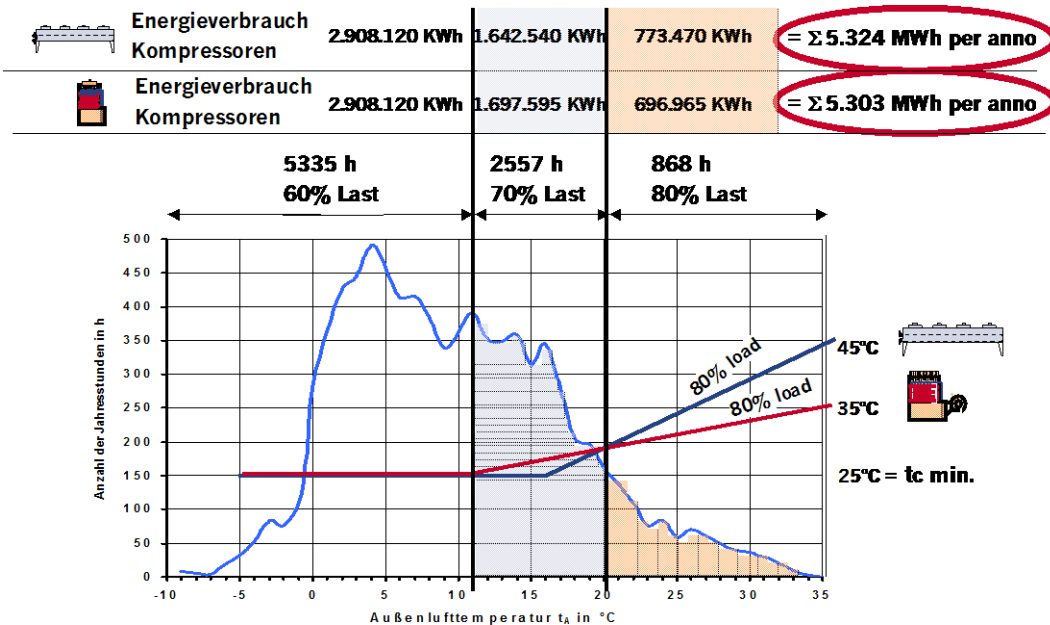
Das führt dazu, dass je nach Auslastung der Anlage bei einer Umgebungstemperatur kleiner 18 – 21 °C mit dem luftgekühlten Verflüssiger niedrigere Verflüssigungstemperaturen erreicht werden können als mit dem Verdunstungsverflüssiger.

Bild 11 zeigt den Verlauf der Verflüssigungstemperatur beider Systeme in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, Feuchtkugeltemperatur und Auslastung der Kälteanlage.



Um den Energieverbrauch der Kältekompressoren zu beurteilen, muss die Verflüssigungstemperatur und die Betriebszeit bei den unterschiedlichen Umgebungstemperaturen berücksichtigt werden.

Bild 12: Vergleich des Energieverbrauchs für die Kompressoren (über ein Jahr bei 80 % Last)



Das Bild zeigt den Verlauf der Temperaturhäufigkeit nach Stunden pro Jahr für einen Standort in Deutschland (Essen).

Für die Betrachtung der Energiekosten ist der Verlauf der Verflüssigungstemperatur bei einer Leistung von 80 % der Kälteanlage eingezeichnet. Die minimal zulässige Verflüssigungstemperatur wird mit 25 °C angenommen.

- 868 h/Jahr ist die Antriebsleistung der Kältemittelkompressoren bei luftgekühlten Verflüssigern höher als bei Verdunstungsverflüssigern.
- 2557 h/Jahr ist die Antriebsleistung des Kältemittelkompressoren bei luftgekühlten Verflüssigern niedriger als bei Verdunstungsverflüssigern.
- 5335 h/Jahr ist die Antriebsleistung der Kompressoren bei beiden Systemen gleich, weil die Mindest-Verflüssigungstemperatur von 25 °C erreicht ist.

Multipliziert man die Antriebsleistung der Kompressoren mit den anteiligen Betriebsstunden, kommt man zu dem Ergebnis, dass der luftgekühlte Verflüssiger bezogen auf den jährlichen Energieverbrauch der Kältekompressoren keine Mehrkosten verursacht.

Bei optimierter Betriebsweise mit einer Verflüssigungstemperatur  $T_c \text{ min} = 20 \text{ °C}$  könnten mit luftgekühlten Verflüssigern in diesem Beispiel sogar Energiekosten für die Kältekompressoren eingespart werden.

**Ergebnis: Der Energieverbrauch der Kompressoren über das ganze Jahr ist bei beiden Systemen gleich.**

Hier bleibt nur die Frage, welche zusätzlichen Bereitstellungskosten für die Stromversorgung durch die Leistungsspitzen der größeren Antriebsmotore in der warmen Jahreszeit entstehen, oder ob diese Leistungsspitzen ausgeregelt werden können.

## 6.2 Vergleich des Energieverbrauchs und der Betriebskosten für die Verflüssiger

Den Energieverbrauch und die jährlichen Betriebskosten für die Verflüssiger haben wir wie folgt ermittelt: Die mittlere Auslastung der NH<sub>3</sub>-Kälteanlage wird angenommen mit:

- 80 % bei Umgebungstemperaturen von 20 – 35 °C
- 70 % bei Umgebungstemperaturen von 11 – 19 °C
- 60 % bei Umgebungstemperaturen unter 11 °C

Bei Erreichen einer min. Verflüssigungstemperatur von 25 °C wird die Drehzahl der Ventilatoren für beide Systeme mit Frequenzumrichtern geregelt.

Kosten für Strom: 0,095 €/KWh  
 Kosten für Frischwasser: 1,50 €/m<sup>3</sup>  
 Kosten für Abwasser: 2,10 €/m<sup>3</sup>  
 Kosten für Chemie: 1,00 €/m<sup>3</sup> verdunstetes Wasser

Bild 13 Vergleich des Energieverbrauchs und der Betriebskosten für die Verflüssiger

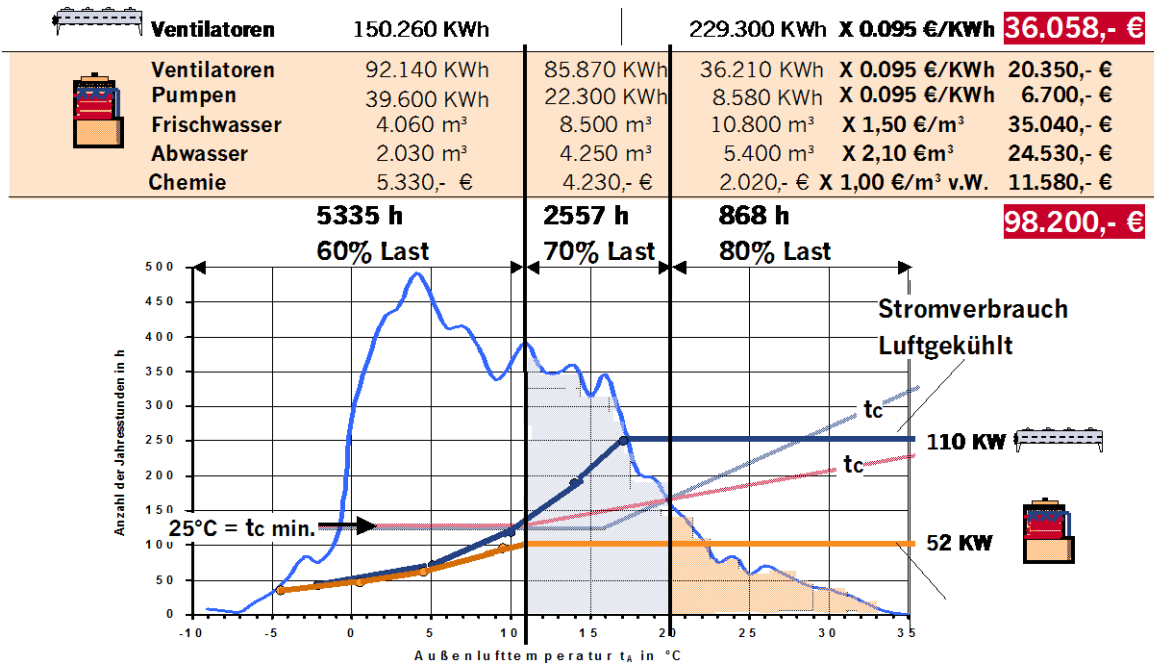


Bild 13 zeigt die Leistungsaufnahme der Ventilatoren in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur über das Jahr. Oben im Bild sind der Energieverbrauch und die Betriebskosten für die unterschiedlichen Temperaturen und Lastannahmen aufgelistet.

**Ergebnis**

Energieverbrauch: Verdunstungsverflüssiger 284.700 kWh = 100 %  
 Luftgekühlte Verflüssiger 379.560 kWh = 133 %

Die Energiekosten für luftgekühlte Verflüssiger sind 33% höher.

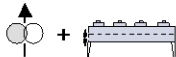
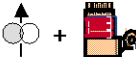
Betriebskosten: Verdunstungsverflüssiger 98.200,- €  
 Luftgekühlte Verflüssiger 36.058,- €

Die Betriebskosten für die Verdunstungsverflüssiger sind in diesem Beispiel höher und werden zum größten Teil von den Kosten für Wasser, Abwasser und Chemikalien bestimmt.

**In Regionen mit hohen Preisen für Frischwasser und Abwasser haben Verdunstungsverflüssiger höhere Betriebskosten als luftgekühlte Verflüssiger.**

**6.3 Vergleich der Betriebskosten für die Gesamtanlage**

Bild 14: Vergleich der Betriebskosten für die Gesamtanlage pro Jahr

| Betriebskosten p. anno                                |  Luftgek. Verflüssiger |  Verdunstungsverflüssiger |
|---|---|--|
| <b>Stromkosten Kompressoren 9,5 ct./KWh</b>           | <b>505.780,- €</b>  | <b>503.785,- €</b>   |
| Stromkosten Ventilatoren 9,5 ct./KWh                  | 36.058,- €  | 20.350,- €   |
| Stromkosten Pumpen 9,5 ct./KWh                        | —   | 6.700,- €  |
| Frischwasser (1,50 €/m <sup>3</sup> )                 | —   | 35.060,- €   |
| Abwasser (2,10 €/m <sup>3</sup> )(Eindickung: 3-fach) | —   | 24.530,- €   |
| Chemie (1,55 €/m <sup>3</sup> )                       | —   | 11.580,- €   |
| Wartungskosten  | 2.000,- €   | 4.000,- €  |
| Stromkosten Ölkühler 9,5 ct./KWh                      | 8.000,- €   | 6.000,- €  |
| <b>Betriebskosten Kondensator + Ölkühler</b>          | <b>46.000,- €</b>   | <b>106.000,- €</b>   |

**7. Vergleich der Investitionskosten**

Für die Kalkulation der Investitionskosten haben wir folgende Annahmen getroffen:

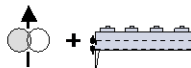

- Ausführung der Anlage wie in Bildern 9,10,11 dargestellt
- Verrohrung und Anschluss der Verflüssiger mit Hochdruck-Schwimmer
- Regelung der Verflüssigerdrehzahl mit Frequenzumrichter
- Aufstellung der Verflüssiger auf dem Dach eines Gebäudes

Bild 15: Vergleich der Investitionskosten

| Investitionskosten              | Luftgekühlter Verflüssiger<br>5x Güntner AGVH 100.2A 2x5N | Verdunstungs-Verflüssiger<br>2x BAC CXV-280 |
|---------------------------------|---|---|
| Mehrpreis Kompressoren          | 2.700,- (anteilig 7%)                                     | ---   |
| Mehrpreis Ölkühler              | 2.400,-   | ---   |
| Mehrpreis Antriebsmotor         | 7.500,-   | ---   |
| Gerätepreis einschl. Montage    | 145.000,-   | 76.600,-                                    |
| Stahlbau, Unterkonstruktion     | 10.800,-  | 5.500,-                                     |
| Anlage für Wasseraufbereitung   | ---   | 21.900,-                                    |
| Verrohrung inkl. HD-Schwimmer   | 20.300,-  | 17.200,-                                    |
| Rückkühler für Ölkühlung        | 20.200,-  | 12.700,-                                    |
| Verrohrung und Pumpe für Rückk. | 9.850,-   | 8.850,-                                     |
| Elektro- Schaltanlage           | 19.800,-  | 16.600,-                                    |
| Elektro- Verdrahtung            | 7.700,-   | 6.000,-                                     |
| Wasserbehälter + Pumpe          |   | 16.000,-                                    |
| <b>Gesamtkosten</b>             | <b>246.250,-</b>  | <b>181.350,-</b>                            |

### 8. Vergleich der Gesamtkosten

Bild 16 Vergleich der Gesamtkosten

| Vergleich der Gesamtkosten   |  |  |
|--|---|--|
| <b>Investitionskosten</b>  | <b>246.250,- €</b>  | <b>181.350,- €</b>   |
| <b>Betriebskosten per anno</b>   | <b>46.000,- €</b>   | <b>106.000,- €</b>   |
| <b>Gesamtkosten in 15 Jahren</b><br>(ohne Zinsen und<br>ohne Preiserhöhungen für Energie und Wasser) | <b>936.250,- €</b>  | <b>1.771.350,- €</b>   |
|  |   | <b>Einsparung<br/>835.100,-</b>  |

### 9. Zusammenfassung

Luftgekühlte Verflüssiger sind für viele NH<sub>3</sub>-Kälteanlagen in Nordeuropa, Nordamerika und teilweise in Asien eine interessante Alternative zu Verdunstungsverflüssigern. Bei steigenden Preisen für Wasser und Abwasser bieten luftgekühlte Verflüssiger wirtschaftliche Vorteile durch niedrigere Betriebskosten. Entgegen der häufig vertretenen Meinung entstehen bei entsprechender Betriebsweise der Kälteanlage keine höheren Energiekosten für die Kompressoren. Weitere Vorteile sind das einfache System und die geringen Wartungs- und Instandhaltungskosten.