

Kältemittelauswahl

G. Reiner, Sulzer Fritherm AG, Systems Engineering, Rothenburg / Winterthur

Insbesondere Unternehmen, die nachhaltige Entwicklung in ihr Leitbild aufgenommen haben, legen neben finanziellen auch auf ökologische Aspekte grossen Wert. Im Mittelpunkt stehen dabei Kältemittel und System.

Der Aufwand für eine seriöse Wahl von Kältemittel und System lohnt sich um so mehr, wenn sie für typische Anwendungsfälle (z.B. Kaltwassersätze, Wärmepumpen, Supermärkte...) durchgeführt wird und so die einmal gemachten Überlegungen für eine Vielzahl von Fällen genutzt werden können.

1. Auswahlmethode

Kältemittel und System sind untrennbar miteinander verbunden. Erst die Wirkung des Kältemittels und die Wirkung des Systems ergeben zusammen die Wirkung der Kälteanlage auf die Umwelt – und auf die Finanzen.

1.1 Systemgrenzen

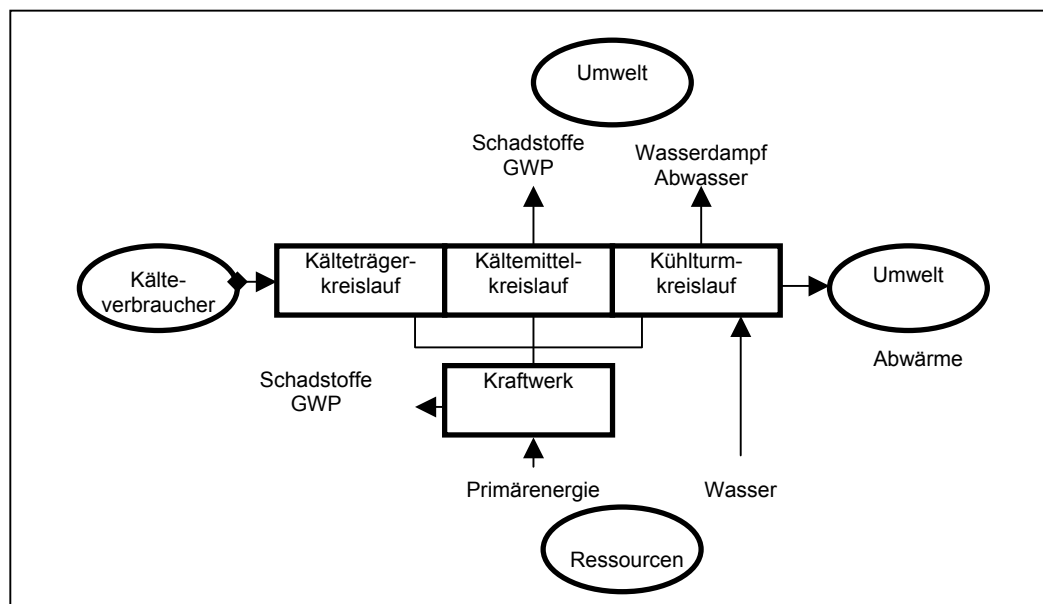


Bild 1.1: Systemgrenzen

Die Systemgrenzen sollten nicht zu eng gefasst werden. Sie sollten beim Punkt beginnen, an dem die Kälte gebraucht wird und bis zu jenem Punkt reichen, an dem die Abwärme der Kälteanlage an die Umwelt oder an ein Heizungssystem zur Wärmerückgewinnung abgegeben wird. Beim Verbrauch von Elektrizität sollte der Treibhauseffekt bei der Erzeugung in

thermischen Kraftwerken mitberücksichtigt werden. Bild 1.1 zeigt schematisch die Glieder der Wärmetransportkette einer Kälteanlage mit Kühlturm.

1.2 Qualitätskriterien

Die entscheidenden 5 Qualitätskriterien einer Kälteanlage sind in Bild 1.2 dargestellt

- *Minimale Mehrinvestitionskosten gegenüber kostengünstigster Variante*
Diese umfassen das ganze System, bauliche Kosten eingeschlossen.

- *Minimale Umweltbelastung*
Auch wenn der TEWI nicht allein die Umweltbelastung ausdrücken kann, - dafür wäre eine Ökobilanz notwendig, - so ist er doch eine wichtige Kennzahl, um die Umweltbelastung durch Kältemittel und Energieverbrauch von mehreren Kälteanlagenvarianten vergleichen zu können. Ökobilanz-Untersuchungen sind Thema im Vortrag von Herr R. Frischknecht. Die TEWI-Methode, angewandt beim Globalkostenvergleich in Kap. 2.3 berücksichtigt :
 - direktes Treibhauspotential durch Kältemittelverluste
 - indirektes Treibhauspotential, das durch die Erzeugung von Elektrizität in thermischen Kraftwerken verursacht wird, die zum Antrieb der Kälteanlage benötigt wird.
 - Treibhauspotential, infolge Recyclieren des Kältemittels beim Abbruch der Anlage

- *Minimaler Energieverbrauch*
Der Energieverbrauch ist einerseits ein grosser Kostenfaktor bei den jährlichen Betriebskosten. Andererseits sind auch wichtige umweltspezifische Aspekte zu beachten, wie Schonung der Ressourcen (insbesondere von nicht erneuerbaren Energieträgern). CO₂-Emissionen bei der Umwandlung von Energie sind bereits im TEWI berücksichtigt.

- *Minimales Sicherheitsrisiko für Mensch und Umwelt*
Dieser Punkt ist vor allem von Bedeutung bei Kältemitteln, die entweder toxisch (z.B. Ammoniak) oder brennbar (z.B. Kohlenwasserstoffe) sind. Als Massstab kann das Schadenpotential oder eine eventuelle daraus resultierende Erhöhung der Haftpflichtversicherungsprämie beigezogen werden.

Entsprechen die Anlagen jedoch den gesetzlichen Vorschriften und sind auf dem geforderten Stand der Technik, so werden die Versicherungen keine höheren Haftpflichtprämien verlangen, da die Zahl der Schadensfälle versicherungstechnisch unbedeutend ist, und sich diese Risiken nicht von anderen alltäglichen Risiken abheben.

- *Minimales Ausfallrisiko der Kälteversorgung*
Minimales Ausfallrisiko der Kälteversorgung ist besonders bei Fabrikationsprozessen wichtig. Es lässt sich mit dem potentiellen Schadenpotential (Schadenpotential x Wahrscheinlichkeit) quantifizieren. Durch redundante Kältemaschinen lässt sich die Verfügbarkeit um Zehnerpotenzen verbessern, so dass das Schadenpotential vernachlässigbar wird.

1.3 Anforderungen der Kälteanwendung

Die Anforderungen an die Kälteanlage sind je nach Anwendungsfall verschieden (s. Bild 1.3).

Qualitätskriterien	Anforderungen der Kälteanwendung	
	niedriger	höher
Mehrinvestitionskosten gegenüber kostengünstigster Variante	kleiner, aber wichtiger Teil der Gesamtanlage	keine Bedeutung für Produktion
Umweltbelastung	Kompaktaggregat einmalige Versuchsanlage kleine Kälteleistung	weit verzweigtes Netz grosse Stückzahlen grosse Kälteleistung
Energieverbrauch	wenig Betriebsstunden hohe Nutztemperaturen	viele Betriebsstunden tiefe Nutztemperaturen
Sicherheitsrisiko für Mensch + Umwelt	in Industriebetrieb Fachpersonalbetreuung in Industriezone	im Publikumsbereich kein Fachpersonal in Wohngebiet / Spital
Ausfallrisiko der Kälteversorgung	für Komfort	für Produktion

Bild 1.3: Anforderungen der Kälteanwendung

1.4 Wirkung von Kältemittel und System

Die Wirkung der Kälteanlage auf die Umwelt - und auch der Finanzen - hängt nicht nur vom Kältemittel, sondern auch sehr stark vom System ab. Das System kann die Wirkung des Kältemittels (z. B. Treibhauseffekt) verstärken oder abschwächen (s. Bild 1.4).

Qualitätskriterien	Wirkung		
	Kältemittel	+ System	= Kälteanlage
Mehrinvestitionskosten gegenüber kostengünstigster Variante	kein Maschinenraum nötig	Kompaktanlage	geringe Baukosten geringe Montagekosten
Umweltbelastung	kein GWP geringer GWP	offene Verdichter hermetische Verdichter Kompaktanlage Plattenverdampfer	ohne direkten TEWI kleine ständige KM-Verluste - " - kleine plötzliche KM-Verluste
Energieverbrauch	energieeffizientes Kältemittel	überflutete Verdampfer effiziente Verdichter günstiger Winterbetrieb	energieeffizientes System energieeffiziente Komponent. Nutzung tiefer Aussentemp.
Sicherheitsrisiko für Mensch + Umwelt	nicht toxisches Kältemittel nicht brennbares Kältemittel	Kälte-trägerkreislauf separater Maschinenraum geringe Kältemittelfüllung KM-Überwachung	Gefahr verhindert Gefahr vermindert Gefahr begrenzt - " - Gefahr angezeigt
Ausfallrisiko der Kälteversorgung	Abstand vor Einsatzgrenzen feuchteunempfindliches KM	redundante Kältemaschin.	robuster Betrieb - " - Reserve bereit

Bild 1.4: Vorteilhafte Wirkungen der Kälteanlage

Wie der TEWI gesenkt werden kann, zeigt das Bild "Treibhauseffekt vermindern" im Anhang.

1.5 Qualitätsprofile für Anforderung und Wirkung

Die Wirkung der Kälteanlage (siehe Bild 1.4) ist den Anforderungen der zu untersuchenden Kälteanwendung (s. Bild 1.3) gegenüberzustellen. Aus Bild 1.5 sind die sich daraus ergebenden Profile am Beispiel einer Kälteversorgung für ein Spital ersichtlich.

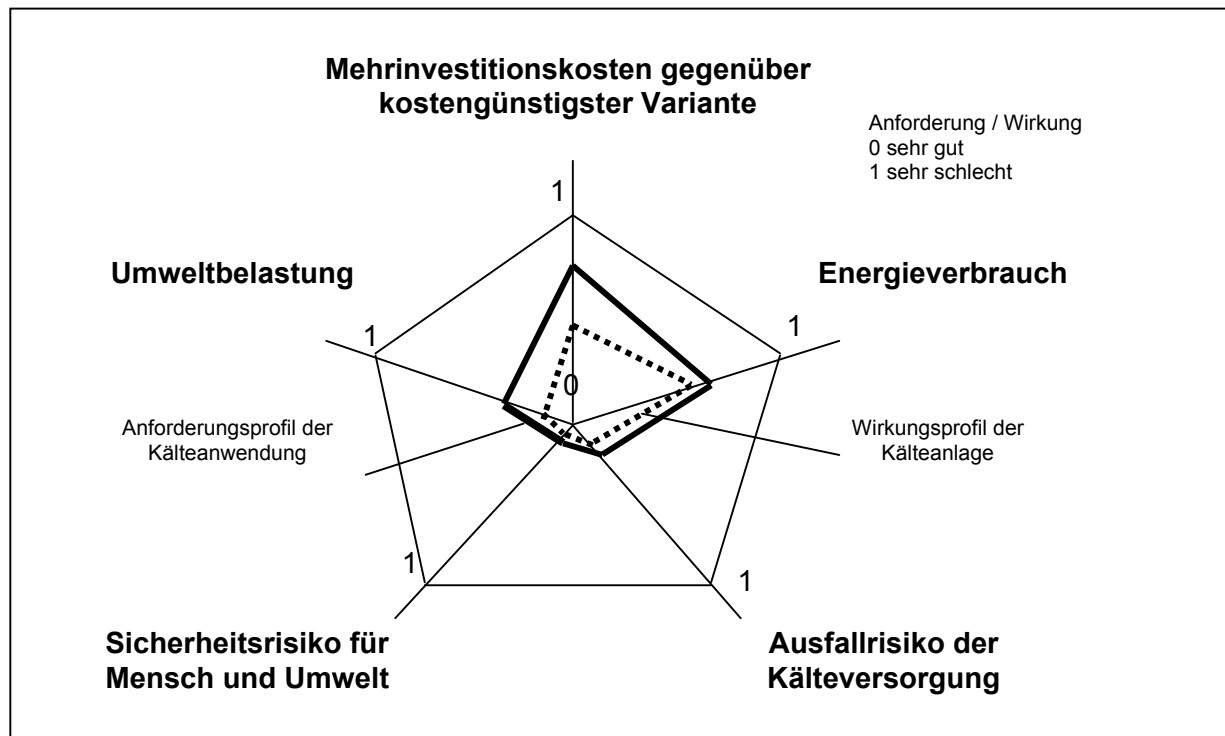


Bild 1.5: Qualitätsprofile für Anforderung der Kälteanwendung und Wirkung der Kälteanlage

1.6 Chancen und Risiken der Monetarisierung

Für eine eindeutige Optimierung und einen verlässlichen Vergleich ist es notwendig, alle Kriterien in einem gemeinsamem Wertmasstab darzustellen.

Bei allem Vorbehalt gegen eine Monetarisierung der Einflüsse auf die Umwelt, darf nicht übersehen werden, dass diese tagtäglich stattfindet ohne dass wir uns dessen bewusst sind. Dann nämlich, wenn ein Bauherr entscheiden muss zwischen einer Kälteanlagenvariante die bezüglich Umwelt günstig ist und einer die bezüglich Kosten günstig ist. Er wird den zahlenmässig erfassbaren finanziellen Vorteil dem ihm nur gefühlsmässig erfassbaren ökologischen Vorteil gegenüberstellen.

Die Frage ist nun, ob - trotz aller Unzulänglichkeiten - mit einer systematischen Analyse nicht doch bessere Entscheidungen möglich sind. Dabei geht es nicht immer nur darum, zwischen natürlichen und synthetischen Kältemittel zu entscheiden, sondern, wenn synthetische Kältemittel nicht zu vermeiden sind, sozusagen die Variante mit dem "kleinsten Uebel" auszuwählen und zu optimieren.

Den *Risiken* ist aber auch gebührend Rechnung zu tragen. Sie liegen z. B. in der *Methode der Monetarisierung* (Ökobilanz liefert sicherlich genauere Entscheidungsgrundlagen als die TEWI-Methode, ist allerdings auch viel aufwendiger), der *Bewertung der Umweltbelastung* (eine Lenkungsabgabe berücksichtigt nicht alle Umweltkosten, sondern ist nur politisch begründet) und der subjektiven *Einschätzung der Risiken*.

Je näher der Zeitpunkt eines evtl. Schadens, je sichtbarer die Schäden und je mehr man sich selbst bedroht fühlt um so ernster werden Risiken genommen. Insofern reagieren viele Leute gegenüber möglichen Unfällen in ihrem persönlich Umfeld sensibler als gegenüber zukünftigen Umweltschäden, die die Gesellschaft allgemein betreffen.

2. Praktische Anwendung

2.1 Fragen zur Wahl des Kältemittels

Mit den nachfolgenden Fragen kann die Auswahl immer mehr eingegrenzt werden, um so für die jeweilige Anwendung das bestgeeignete Kältemittel zu finden.

a) *Welche Kältemittel stehen für das vorgesehene Betriebsregime zur Verfügung?*

Die im Kapitel 2.2 erläuterte und im Anhang beigefügte Tabelle "Kältemittelübersicht" zeigt, welche Kältemittel für Neuanlagen für die vorgesehenen Verdampfungs- und Verflüssigungstemperaturen in Frage kommen.

FCKW (verboten für Neuanlagen seit 1.1.1994) und HFCKW (verboten für Neuanlagen ab 1.1.2002) können von vornherein ausgeschlossen werden. Für Vergleiche sind ihre Zahlen aber trotzdem nützlich. In Frage kommen also nur noch HFKW und natürliche Kältemittel.

b) *Können natürliche Kältemittel eingesetzt werden?*

Von den natürlichen Kältemitteln Wasser, Luft, Ammoniak, Kohlenwasserstoffe und CO₂ werden Wasser und Luft nur ausnahmsweise eingesetzt. Ammoniak hat sich in Industriekälteanlagen etabliert, seine Toxizität ist dort von zweitrangiger Bedeutung, da diese Anlagen in der Regel nicht dem Publikum ausgesetzt sind und von Fachpersonal betreut werden. Kohlenwasserstoffe konnten sich zumindest im deutschsprachigen Raum bei den Haushaltskühlschränken durchsetzen. Ihre Brennbarkeit bekommt man durch geringe Füllungen in den Griff.

Neue Techniken erlauben es, natürliche Kältemittel auch in Anlagen einzusetzen, die bisher synthetischen Kältemitteln vorbehalten waren. Mit Plattenverdampfern wird die Kältemittelfüllung gegenüber früher drastisch verringert (Anwendung z.B. in Supermärkten mit Kältemittel Ammoniak oder Kohlenwasserstoffen, separater Maschinenraum, Kälteverteilung durch Kälteträger).

c) *Falls natürliche Kältemittel nicht möglich sind, welche HFKW kommen in Frage?*

Vorteilhaft sind Kältemittel, die ein kleines Verdichter-Hubvolumen benötigen (hohe volumetrische Kälteleistung), einen geringen Energiebedarf bewirken (hoher exergetischer Wirkungsgrad), kein oder ein zumindest geringes Treibhauspotential aufweisen.

d) *Braucht es zu den vorhandenen Kältemitteln unbedingt noch ein weiteres ?*

Bei der Verwendung von mehreren Kältemitteln ist eine Verwechslungsgefahr grösser und die Kosten für Transport und Lagerung sind höher.

e) Welches Kombination von Kältemittel und Kältesystem hat die niedrigsten Globalkosten.
Siehe Kap. 2.3

2.2 Kältemittelübersicht

Die Tabelle im Anhang mit der zugehörigen Legende zeigt auf einen Blick, welche Kältemittel für gewählte Verdampfungs- und Verflüssigungstemperaturen zur Verfügung stehen und ob sie ohne weiters eingesetzt werden können oder besondere Massnahmen notwendig sind. Die kritischen Werte sind dann grau hinterlegt.

2.3 Globalkostenvergleich

Eine Globalkostenrechnung erlaubt die Gegenüberstellung verschiedener Varianten unter Berücksichtigung der erwähnten Qualitätskriterien. Sie kombiniert Wirtschaftlichkeitsrechnung und TEWI-Methode.

Im Beispiel werden dabei die Investitionskosten zu den Betriebskosten während der Amortisationszeit addiert. Dazu kommen noch fiktive Umweltabgaben entsprechend den Emissionen der TEWI-Rechnung während der Nutzungszeit der Anlage. Für die Umrechnung von Elektrizität in CO₂-Emissionen wurde der europäische Strommix (0.39 kg CO₂/ kWh el) zugrundegelegt. Die CO₂-Emissionen wurden mit der 1994 vom schweizerischen Bundesrat (allerdings für fossile Brennstoffe) vorgeschlagenen CO₂-Lenkungsabgabe von CHF 35 pro Tonne CO₂ in Geldeinheiten umgerechnet. Je nach Engagement für den Umweltschutz kann dieser heute noch freiwillig einzusetzende Wert vom Bauherr um ein Mehrfaches erhöht werden.

Das Diagramm (Bild 2.3) zeigt ein Beispiel einer Kältezentrale mit 800 kW-Kälteleistung mit 3 Varianten von Kältemaschinen: Turboverdichterumbau (Variante A), NH₃-Schraubenverdichter (Variante B), und R507-Schraubenverdichter (Variante C). Die absoluten Zahlenwerte hängen dabei aber stark von den spezifischen Umständen ab.

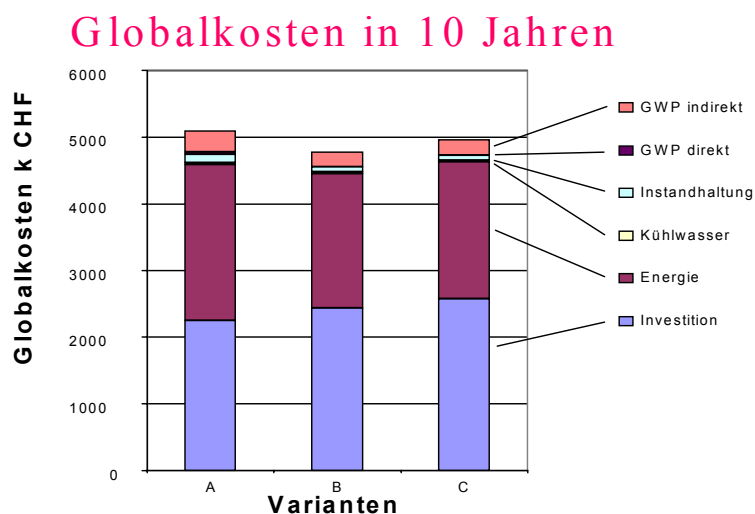


Bild 2.3: Globalkostenvergleich

2.4 Praktische Erfahrungen

Industrie

Hier rennt man mit Ammoniak oftmals offene Türen ein: für Kälte-trägerkühlung und Kühlhäuser ist Ammoniak nicht nur das ökologisch Beste und das mit den niedrigsten Betriebskosten, es ergibt oft auch die kostengünstigsten Anlagen.

Gewerbe

Da die Kühlstellen sich im Publikumsbereich befinden, können natürliche Kältemittel nur eingesetzt werden, wenn sich die Kältemaschinen in einem eigenen Maschinenraum befinden und die Kälte über Kälte-träger den Kühlmöbel zugeführt wird. Das Dilemma: Zwar wird damit das durch das Kältemittel verursachte Treibhauspotential eliminiert aber das durch den Energieverbrauch verursachte Treibhauspotential erhöht. Verbesserungen stellt hier der Einsatz von CO₂ als Kälte-träger in Aussicht, der aber noch mit wesentlich höheren Kosten verbunden ist.

Heizung/Klima

In Bürogebäuden haben Kaltwassersätze und Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln einen schweren Stand. Allerdings fördern grosse Konzerne und die öffentliche Hand den Einsatz von Ammoniak, so dass es viele gute Beispiele von Schulen und grösseren Verwaltungsgebäuden mit Ammoniak-Kältemaschinen und -Wärmepumpen gibt.

Sportcenter

Kunsteisbahnen werden in der Schweiz Deutschland und Österreich fast ausschliesslich mit Ammoniak betrieben. In letzter Zeit werden allerdings aus Sicherheitsgründen Neuanlagen fast nur noch mit indirekter Kühlung gebaut. Kälte-träger ist dabei entweder Ethylenglykol oder seit neuesten CO₂, bei dem der Energieverbrauch für das Umpumpen im Vergleich zum Glykol auf einen Bruchteil zurückgeht, so dass die Anlage fast so energieeffizient arbeitet wie bei Direktverdampfung.

Beliebt ist auch, der Kälteanlage einen Ammoniak-Hochdruck-Wärmepumpenverdichter nachzuschalten, weil diese ohne Zwischenwärmetauscher auskommt und deshalb besonders hohe Leistungszahlen erreicht. Diese Wärme kann dann für Gebäudeheizung Warmwasserbereitung oder Schwimmbadheizung genutzt werden.

Neue und bestehende Anlagen

Ammoniak und Kohlenwasserstoffe lassen sich in der Regel aus Kostengründen nur beim Bau von neuen Anlagen als Kältemittel einsetzen. Ein späterer Umbau von synthetischen auf natürliche Kältemittel ist wenn nicht unmöglich dann doch mit sehr hohen Kosten, nicht zuletzt baulicher Art, verbunden. Insofern werden beim Neubau die Weichen für viele Jahre gesetzt