

# Wirtschaftlicher und ökologischer Einsatz von Kältemitteln

Autor(en): **Frei, Urban / Schmid, Christoph / Peter, Gustav**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tec21**

Band (Jahr): **127 (2001)**

Heft 11: **Kältemittel**

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-80132>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Wirtschaftlicher und ökologischer Einsatz von Kältemitteln

**Vollhalogenierte Kältemittel (FCKW) sind in der Schweiz wegen ihrer Auswirkungen auf die Ozonschicht seit 1994 verboten, teilhalogenierte (H-FCKW) werden es ab 2002 sein. Das Angebot an Alternativen ist gross und unübersichtlich. Der vorliegende Beitrag stellt diejenigen Kältemittel vor, die die ökologischen und wirtschaftlichen Anforderungen am besten erfüllen. Er gibt zudem Empfehlungen zur Sanierung bestehender Kälteanlagen.**

Die Gesetzgebung der meisten Länder hat wegen der fortschreitenden Ozonschichtzerstörung die Produktion und den Gebrauch von halogenhaltigen Kältemitteln verboten bzw. eingeschränkt. Kältemittel haben auch human- und ökotoxische Auswirkungen und tragen zur Treibhauserwärmung bei. In der Schweiz sind FCKW-Kältemittel in Neuanlagen seit 1994 verboten. Das Verbot für H-FCKW-Kältemittel gilt ab dem 1.1.2002. (Alle Abkürzungen sind im Glossar auf Seite 8 erklärt.)

Die H-FKW-Kältemittel stellen nach dem heutigen Wissensstand eine deutliche ökologische Verbesserung gegenüber den ozonschichtzerstörenden FCKW und H-FCKW dar. Bevor ein Kältemittel ausgewählt wird, muss ein Vergleich mit halogenfreien (natürlichen) Stoffalternativen vorgenommen werden. Bei diesen wiederum stehen Fragen wie Sicherheit und Giftigkeit im Vordergrund.

Anlagen mit FCKW-Kältemitteln (R12, R502) müssen so bald wie möglich ersetzt oder nach dem Retrofit-Verfahren saniert werden. Neben den heute verbotenen Kältemitteln soll auch R22 ab sofort nicht mehr in Neuanlagen eingesetzt werden, denn es gibt genügend gute Alternativen. Anlagen mit R22 und R123 (H-FCKW) sollten nicht im Retrofit-Verfahren saniert werden. Diese Anlagen sind eher so lange zu betreiben, wie es der Anlagezustand erlaubt.

Als wichtigste Beurteilungsgrösse zur Auswahl eines Kältemittels erweist sich die Leistungszahl. Es soll dasjenige Kältemittel eingesetzt werden, das unter den gegebenen Bedingungen die höchste Leistungszahl ermöglicht (unter Berücksichtigung einer maximal nutzbaren Abwärmemenge). Für gute Leistungszahlen ist die Kondensationstemperatur  $t_c$  möglichst tief und die Verdampfungstemperatur  $t_o$  möglichst hoch auszuwählen. Dabei ist der Einfluss von  $t_o$  auf die Leistungszahl etwa doppelt so gross wie jener von  $t_c$ .

## Glossar

Azeotrop	Kältemittelgemisch mit konstanten Temperaturen $t_c$ , $t_o$ bei Phasenänderung
Blends	Kältemittelgemische
COP	Leistungszahl Wärmepumpe (Coefficient of Performance EN255) $COP = \text{Heizleistung} / \text{elektrische Leistung}$
PN25	Nennndruck 25 bar
EER	Leistungszahl Kältemaschine (Energy efficiency ratio EN255) $EER = \text{Kälteleistung} / \text{elektrische Leistung}$
FCKW	Vollhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
GWP	Treibhausewärmepotential (Global warming potential) im Vergleich zu $CO_2$
Glide	Bei Verdampfung des Kältemittels findet ein Temperaturanstieg, bei Kondensation eine Temperaturabsenkung statt = Temperaturgleit/glide
GLZ	Gesamtleistungszahl kombinierter KM-WP [12] $GLZ = (\text{Heiz-} + \text{Kälteleistungsbedarf}) / \text{elektrische Leistung}$ $GLZ_{max} = COP + EER$
Halogene	Chemische Elemente Brom, Fluor, Jod, Chlor
H-FCKW	Teilhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
H-FKW	Fluor-Kohlenwasserstoffe
KM	Kältemaschine
Leistungszahl	Nutzleistung der Anlage dividiert durch die elektrische Aufnahmeleistung des Kompressors
MAK	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (von der Suva vorgeschriebene maximale Schadstoffwerte am Arbeitsplatz)
$NH_3$	Ammoniak
ODP	Ozonerstörungspotential (ozone depletion potential) im Vergleich zu R11
$p_c$	Kondensationsdruck
$p_o$	Verdampfungsdruck
POCP	Potential zu Bildung von Sommersmog (Photochemical ozone creation potential) im Vergleich zu $CH_4$ (Methan)
R.....	ASHRAE-Klassifizierung (Refrigerant); andere Bezeichnungen wie KLEA, HP, AZ usw. sind reine Herstellerbezeichnungen
$t_c$	Kondensationstemperatur
TEWI	Treibhauseffekt einer Anlage mit Kältemittel, umfasst Herstellung, Betrieb und Abbruch der Anlage (Total equivalent warming impact) im Vergleich zu $CO_2$
$t_o$	Verdampfungstemperatur
WP	Wärmepumpe
Zeotrop	Gemisch mit Temperaturgleit $t_c$ , $t_o$ bei Phasenänderung

## Problemstellung

Die Hersteller haben eine Fülle neuer Kältemittel mit der dazugehörigen Technologie entwickelt. Das Angebot ist wenig übersichtlich. «Alte» Kältemittel wie Ammoniak sind wieder auferstanden, Anlagen für ganz «neue» Stoffe wie Wasser, Propan oder Kohlendioxid sind verfügbar. Der vorliegende Beitrag basiert auf einer Diplomarbeit an der Zürcher Hochschule Winterthur (ZHW) im Rahmen des Nachdiplomstudiums Bau, Energie und Umwelt (heute EN Bau), deren Ziel es war, aus all den verfügbaren Kältemitteln jene herauszufinden, die die Anforderungen hinsichtlich Öko- und Humantoxizität sowie Effizienz am besten erfüllen. Als Grundlage diente die Firma des Verfassers, die vorwiegend Grossanlagen primär zu Kältezwecken betreibt. Möchte ein Planer oder Bauherr eine Kältemittel enthaltende Anlage installieren oder beurteilen, so wird er mit folgenden Fragestellungen konfrontiert:

- Braucht es überhaupt eine Kältemaschine?
- Welches sind heute die ökologisch vertretbaren Kältemittel?
- Welches sind die gesetzlichen Auflagen?
- Was ist zu beachten, damit die Anlage möglichst effizient wird?
- Auf was muss geachtet werden, damit Personen wie Umwelt nicht gefährdet sind?
- Kann die bestehende Anlage eventuell umgerüstet werden oder ist sie zu ersetzen?
- Wie gross muss die neue oder die sanierte Anlage wirklich sein? Überdimensionierte Anlagen kosten zuviel.

## Systematik der Kältemittel

Die Fülle von alternativen Kältemitteln zu den FCKW muss zuerst systematisch geordnet werden (Bild 1).

### Teilweise chlorhaltige Kältemittel

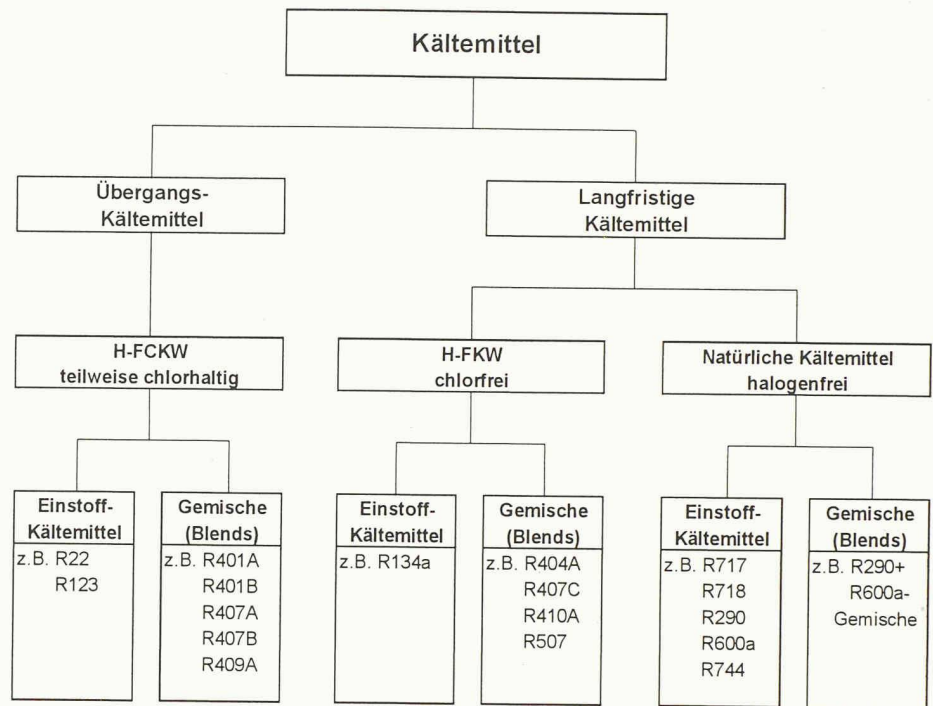
Bei diesen H-FCKW-Kältemitteln handelt es sich meistens um R22 oder Mischungen auf der Basis von R22. Das Ozonabbaupotential (ODP) ist niedriger als bei den FCKW, da sie in der Umwelt weniger stabil sind. Es ist aber immer noch zu hoch. Darum werden die H-FCKW-Kältemittel mittelfristig verboten (ab 1.1.2002).

### Chlorfreie Kältemittel H-FKW

Diese Kältemittel haben keinen ODP-Wert. Trotz ihrer geringen Stabilität in der Umwelt haben diese Stoffe ein gewisses Treibhauspotential. Die H-FKW sind als langfristige Lösung zu betrachten. Die chlorfreien Blends werden auch als Retrofit-Blends bezeichnet.

### Halogenfreie («natürliche») Kältemittel

«Natürlich» werden diese Kältemittel genannt, weil sie im Unterschied zu den synthetischen Kältemitteln in der Natur vorkommen. Ihr Langzeitverhalten ist bekannt. Diese Kältemittel haben kein Ozonabbaupotential. Ihre Verwendung wird eventuell durch andere Nachteile eingeschränkt. In diese Familie gehören: Ammoniak R717, Wasser R718, Kohlendioxid R744, Kohlenwasserstoffe wie Propan R290 und ISO-Butan R600a.



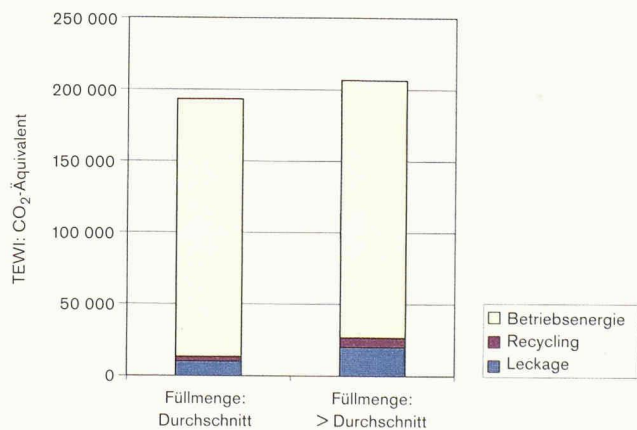
1  
Systematik der Kältemittel

### Evaluation der Kältemittel

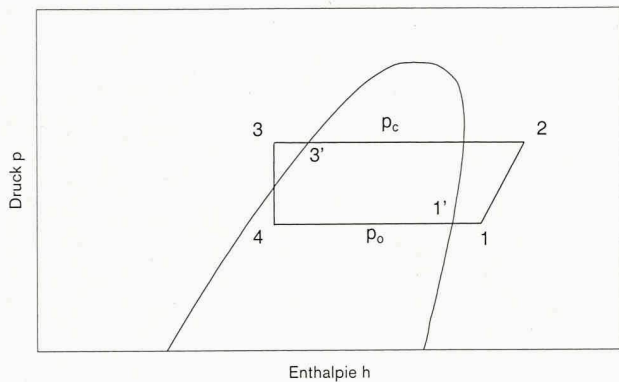
Für die langfristigen Kältemittel wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Es wurden ökologisch/chemische Parameter (Treibhauserwärmungspotential GWP, Explosionsgrenze, Brennbarkeit, Wassergefährdung, MAK-Wert, Sommersmog POCP, chemische Stabilität) und technische Parameter (Temperaturglide, Dampfdruck, volumetrische Verdampfungswärme, Isentropenexponent, Einsatzbereich Kältemittel, Schmiermittel, kritische Temperatur, Materialverträglichkeit) analysiert.

Bei korrekter Handhabung und Erfüllung der Vorschriften ergeben sich aus heutiger Sicht nur geringe Probleme mit den Kältemitteln. Einzig Kohlenwasserstoffe (da schwerer als Luft, werden diese bei unterirdischen Anlagen von der Gebäudeversicherung kaum bewilligt) und Ammoniak müssen mit spezieller Sorgfalt behandelt werden. Grundsätzlich ist zu vermeiden, dass Kältemittel mit einer Flamme oder glühendem Metall in Berührung kommen. Die Kältemittel zersetzen sich dabei, und es entstehen korrosive und giftige Stoffe. Eine starke Anreicherung der Kältemittel wirkt anästhetisch, da sie den Sauerstoff verdrängen. Daher sind Räume mit Kältemitteln gut zu belüften. Beim Hantieren mit Kältemitteln sollen Schutzhandschuhe (Hautentfettung und Kälteverbrennungen) und Schutzbrillen getragen werden.

Der TEWI-Wert (Total Equivalent Warming Impact) ist ein Mass für die Erwärmung durch Treibhausgase des gesamten Systems. Er berücksichtigt den Energieverbrauch einer Anlage während der Nutzungsdauer, die Kältemittelfüllung und -verluste durch Leckagen sowie die Wiederverwertung des Kältemittels. Wie sich zeigt, hat dabei der Energieverbrauch der Anlage während der Betriebsphase den weitaus grössten Einfluss auf den TEWI-Wert (Bild 2). Der Recyclinganteil und der Ein-

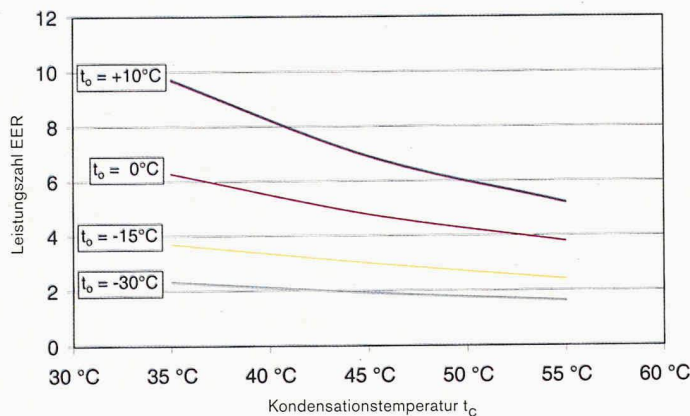


2  
Berechnung des TEWI-Äquivalentes



3

Referenz-Kreisprozess



4

Kälte-Leistungszahl EER von R717 (Ammoniak)

fluss der Leckagen ist für die TEWI-Berechnung praktisch vernachlässigbar (selbst bei hohen Füllmengen). Mit einer Verbesserung der Leistungszahl um 5% kann ein Kältemittel mit doppelt so hohem GWP-Wert eingesetzt werden, ohne dass der Treibhauseffekt zunimmt. Dies ergibt die Schlussfolgerung, dass auch bei langfristig einsetzbaren Kältemitteln mit hohen GWP-Werten gilt: Die maximale Energieeffizienz einer Kältemaschine/Wärmepumpe ist das primäre Ziel. Sie ist wichtiger als der GWP-Wert des Kältemittels. Diese Aussage gilt insbesondere bei den immer geringer werdenden Füllmengen, der steigenden Dichtigkeit der Anlagen und dem hohen Recyclinganteil.

**Vergleich der Kreisprozesse**

Ein Referenz-Kreisprozess dient dazu, sämtliche Modellrechnungen mit denselben Randbedingungen durchzuführen (Bild 3). Damit ist die Vergleichbarkeit der Resultate gegeben und es können Rückschlüsse auf die einzelnen Kältemittel gewonnen werden. Der Referenz-Kreisprozess stellt eine gute Annäherung an die realen Prozesse der eingesetzten Kälteanlagen dar:

- 1-2: Isentrope Verdichtung
- 2-3: Isobare Verflüssigung
- 3'-3: Unterkühlung Kondensator, 5 K
- 3-4: Adiabate Entspannung
- 4-1: Isobare Verdampfung
- 1'-1: Überhitzung Verdampfer, 5 K

Mit verschiedenen Wertepaaren von Kondensations- und Verdampfungstemperaturen kann der ganze Anwendungsbereich analysiert werden:

- Kondensationstemperatur: +35 bis +70 °C
- Verdampfungstemperatur: -30 bis +10 °C

Die Verdichterbauart, weitere Konstruktionsmerkmale und irreversible Vorgänge haben ebenfalls einen Einfluss auf die Leistungszahl. Die realen Leistungszahlen liegen deshalb systematisch:

- für  $t_c < 40\text{ °C}$  und  $t_o > 0\text{ °C}$ :  
5-10% tiefer als in diesem Beitrag angegeben,
- für  $t_c > 40\text{ °C}$  und  $t_o < 0\text{ °C}$ :  
10-15% tiefer als in diesem Beitrag angegeben.

Diese Genauigkeit ist für konkrete Aussagen ausreichend. Folgende technischen Eigenschaften sind bei der Wahl eines Kältemittels zu beachten (Bilder 4 bis 6):

- Leistungszahl: Wie erwähnt, soll die Leistungszahl COP bzw. EER möglichst hoch sein. Für die Beurteilung kombinierter Kältemaschinen/Wärmepumpen wird die Gesamtleistungszahl GLZ eingeführt (siehe Glossar).
- Volumetrische Kälteleistung (= pro Volumenstrom-Einheit erbrachte Kälteleistung). Die Verdichtergrosse sinkt bei zunehmender volumetrischer Kälteleistung, so dass kleinere Verdichter eingebaut werden können.
- Druckverhältnis  $p_c/p_o$  und Enthalpiedifferenz  $\Delta h_{12}$ : Es ist darauf zu achten, dass das Druckverhältnis nicht zu gross wird (ideal  $< 5$ ). Diese Parameter haben einen Einfluss auf die Wahl des Verdichters.
- Kondensationsdruck  $p_c$ : bestimmt den erforderlichen nominellen Druck der Anlagekomponenten (Normalfall PN25).
- Kondensations- und Verdampfungstemperatur: Die Leistungszahl steigt mit sinkender Kondensationstem-

peratur  $t_c$  überproportional, dasselbe gilt bei steigender Verdampfungstemperatur  $t_o$ . Der Einfluss der Verdampfungstemperatur ist dabei deutlich grösser als jener der Kondensationstemperatur (siehe Bild 4).

### Ökologischer Vergleich von Kältemitteln

Folgende ökologische Eigenschaften sind besonders bedeutsam: ODP (Ozonzerstörungspotential) und GWP (Treibhausewärmungspotential). Klar zu erkennen ist die ökologische Verbesserung der alternativen Kältemittel gegenüber R12 (die H-FKW weisen kein ODP aus). Die natürlichen Kältemittel wie R717 (Ammoniak) und R290 (Propan) schneiden besonders gut ab: es ist weder ein ODP noch ein GWP vorhanden (Bild 7).

### Empfehlungen für Neuanlagen

Auf Basis der beschriebenen Einflussfaktoren kann das jeweils vorteilhafteste Kältemittel für einen bestimmten Anwendungszweck aus den Bildern 8–10 herausgelesen werden. Das Kältemittel an erster Stelle ist erste Wahl, dasjenige in Klammer die nächstbeste Alternative. Die Resultate von Bild 10 basieren auf der Gesamtleistungszahl GLZ unter der Annahme gleichzeitiger und vollständiger Kälte- wie Wärmenutzung.

### Empfehlungen für Sanierungen

Bei der Sanierung von Kälteanlagen wird das Kältemittel ersetzt. «Retrofit» und «Drop-In» beschreiben zwei Verfahren, die es ermöglichen, Anlagen mit chlorhaltigen Kältemitteln (FCKWs) und klassischen Kältemaschinenölen auf den Betrieb mit alternativen Kältemitteln und geeigneten Ölen umzurüsten. Dabei sind vor allem Kriterien wie Anlagenkonzeption, Temperatur-Glide des Kältemittels, Ölverträglichkeit alt-neu zu beachten.

#### Drop-In-Verfahren

Beim Drop-In-Verfahren werden keine Änderungen am Aggregat vorgenommen, es wird nur das Kältemittel (nicht aber das Öl) ausgetauscht. Das neue Kältemittel muss dem zu ersetzenden so nahe kommen, dass keine weiteren Änderungen an den Anlagenkomponenten erforderlich sind. Bei den Kältemitteln handelt es sich um zeotrope Blends auf der Basis von H-FCKW (R22). Vorteile des Drop-In-Verfahrens:

- Günstiges Verfahren
- Einfache Handhabung

Nachteile des Drop-In-Verfahrens:

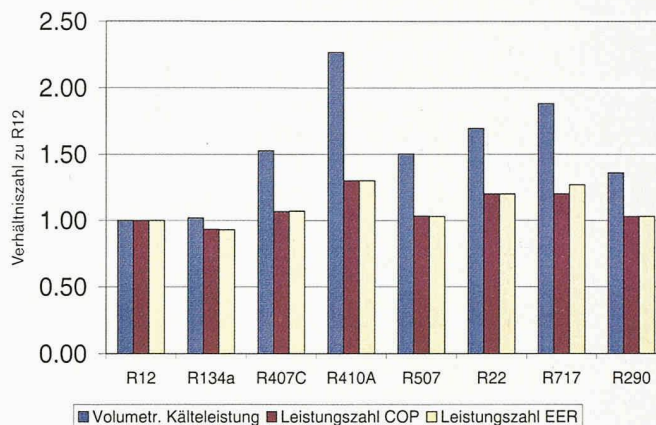
- Kältemittel enthält R22, daher keine langfristige Lösung

#### Retrofit-Verfahren

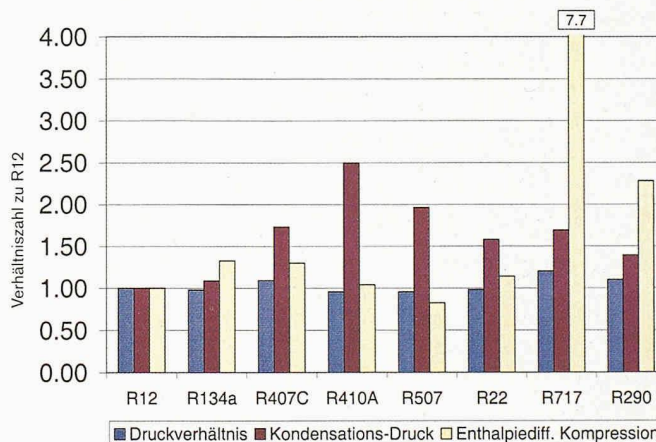
Beim Retrofit-Verfahren werden nicht nur das Kältemittel, sondern auch das Kältemaschinenöl und demzufolge einzelne Anlagekomponenten (z.B. Expansionsventil, Filtertrockner usw.) ersetzt. Als Kältemittel werden nur langfristige Alternativen auf der Basis von H-FCKW verwendet (z.B. R134a). Auch Propan kann grundsätzlich verwendet werden.

Vorteile des Retrofit-Verfahrens:

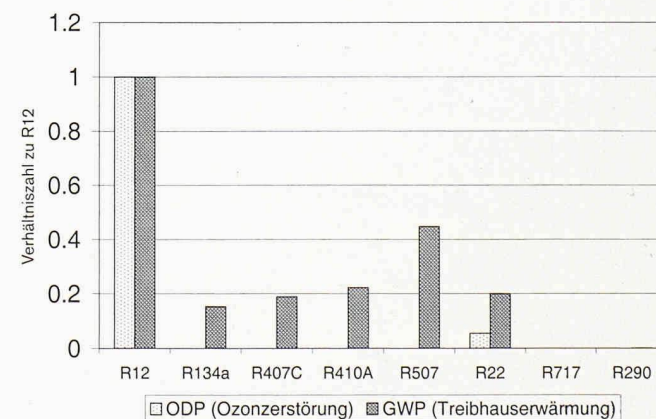
- kein Ozonabbaupotential



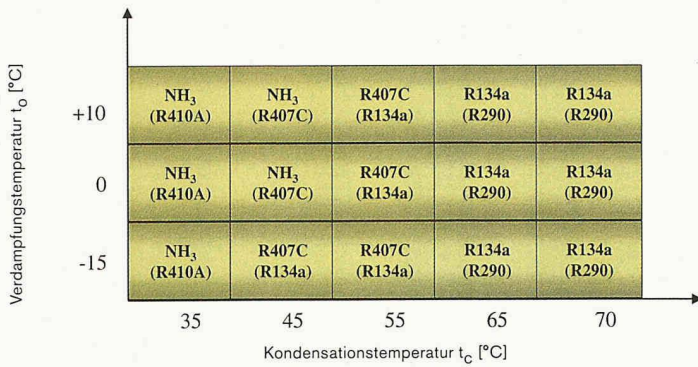
5  
Leistungseigenschaften von Kältemitteln relativ zu R12 bei  $t_o = 0^\circ\text{C}$ ,  $t_c = 55^\circ\text{C}$   
(R12: Vol. Kälteleistung = 1838 kJ/m<sup>3</sup>, COP = 4.0, EER = 3.0)



6  
Kompressionseigenschaften von Kältemitteln relativ zu R12 bei  $t_o = 0^\circ\text{C}$ ,  $t_c = 55^\circ\text{C}$   
(R12:  $p_c/p_o = 4.4$ ,  $p_c = 13.7$  bar,  $\Delta h_{12} = 35.6$  kJ/kg)



7  
Ökologische Eigenschaften von Kältemitteln im Vergleich zu R12  
(R12: ODP = 1.0, GWP = 8500)



8

**Kältemittel für neue Wärmepumpen**

- Langfristige Sanierungslösung  
 Nachteile des Retrofit-Verfahrens:  
 - Teureres Verfahren als Drop-In  
 - Sehr sorgfältige Handhabung beim Kältemittel- und Ölersatz notwendig  
 Aus ökologischen Gründen ist das Retrofit-Verfahren vorzuziehen. Die vorteilhaftesten Retrofit-Kältemittel sind:  
 - R12 → R134a (ohne Einschränkung, die Bilder 5 und 6 zeigen die grosse Ähnlichkeit der thermodynamischen Eigenschaften),  
 - R22 → R407C (falls kein Turboverdichter, falls keine Röhren-WT, sonst R134a),  
 - R502 → R507 oder R404A (ohne Einschränkung).

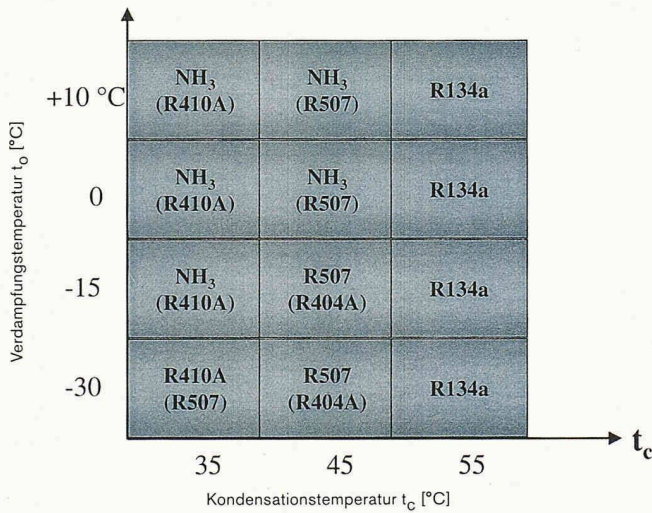
**Gesamtbeurteilung von Kältemitteln**

Im folgenden werden die untersuchten Kältemittel charakterisiert. Es wird der Versuch gemacht, die Kältemittel ganzheitlich zu bewerten:

- ☺☺☺: Kältemittel ist sehr gut, wird sich einen festen Platz erobern.
- ☺☺: Kältemittel ist gut, wird aber zweite Wahl bleiben.
- ☺: Kältemittel wird nur in Spezialfällen eingesetzt werden, eine grosse Verbreitung findet nicht statt.

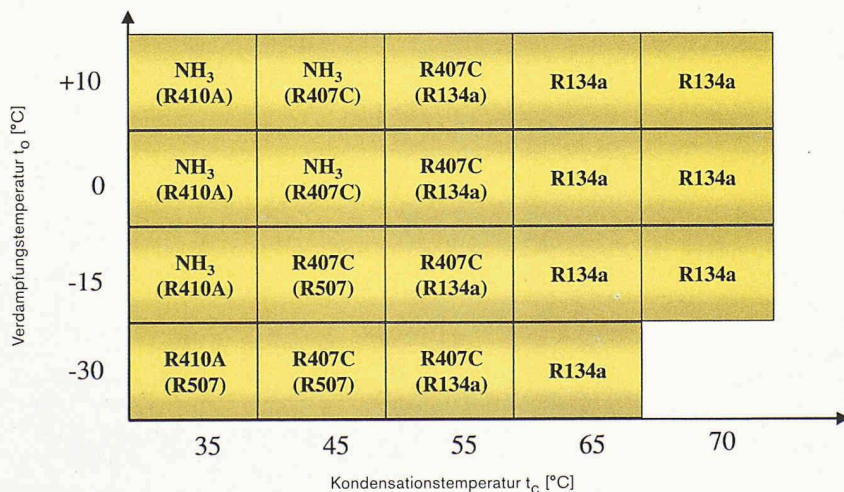
**☺☺☺ R134a (CH<sub>2</sub>F CF<sub>3</sub>)**

R134a ist ein Kältemittel, das über einen sehr grossen Einsatzbereich verfügt. Wenn es darum geht, grössere Anlagen mit Kondensationstemperaturen über 60 °C einzusetzen, so ist R134a praktisch die einzige Möglichkeit. Dabei ist allerdings auf das hohe Druckverhältnis zu achten. Leider liegt die Leistungszahl von R134a etwa 15% unter jener von R407C. R134a ist das



9

**Kältemittel für neue Kältemaschinen**



10

**Kältemittel für neue kombinierte Wärmepumpen/Kältemaschinen**

ideale Retrofit-Kältemittel für R12, kann aber auch als Retrofit für R22 verwendet werden, falls R407C nicht einsetzbar ist.

#### ☺☺ R404A (CHF<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>/CH<sub>3</sub>CF<sub>3</sub>/CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub>)

R404A wird in der Normal- und Tiefkühlung eingesetzt. Es ist auch ein gutes Retrofit-Kältemittel für R502. Es liegt allerdings bezüglich der Leistungszahl etwas tiefer als R507. Ein Vorteil von R404A ist das tiefe Druckverhältnis auch bei hohen Differenzen  $t_c - t_o$ .

#### ☺☺☺ R407C (CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>/CHF<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>/CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub>)

R407C ermöglicht überdurchschnittliche Leistungszahlen. Bei korrekter Anwendung ist der hohe Temperaturglide kein Nachteil. R407C ist das ideale Retrofit-Kältemittel für R22, falls die Wärmetauscher nicht als Rohrbündel konzipiert sind und falls der Verdampfer nicht überflutet ist (R407C ist bei Turboverdichtern somit nicht einsetzbar). Mit R407C lässt sich Heizungswasser von maximal 50 °C wirtschaftlich erzeugen. Danach wird der Kondensationsdruck zu hoch, und PN25-Anlagen sind nicht mehr realisierbar.

#### ☺☺☺ R410A (CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>/CHF<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>)

R410A ergibt sehr hohe Leistungszahlen. In PN25-Anlagen ist es einsetzbar bis  $t_c = 35$  °C. Die hohen Kondensationsdrücke schränken den Anwendungsbereich dieses Kältemittels heute noch ein. Als Alternative zu Ammoniak ist R410A in der Normal- und Tiefkälteerzeugung sehr gut einsetzbar. R410A weist nach Ammoniak die höchsten Leistungszahlen auf, beim Druckverhältnis werden zudem sehr moderate Werte erreicht. Die volumetrische Kälteleistung ist gar unerreichbar, was zu einer sehr kompakten Bauweise führt. Der Einsatz von R410A dürfte in naher Zukunft mit Beginn von Serienproduktionen von PN40-Komponenten stark zunehmen.

#### ☺☺☺ R507 (CHF<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>/CH<sub>3</sub>CF<sub>3</sub>)

R507 wird in der Normal- und Tiefkühlung eingesetzt. R507 ist ein sehr gutes Retrofit-Kältemittel für R502. Es weist die etwas höheren Leistungszahlen auf als R404A, deshalb wird sich R507 einen Platz im Kältemittelmarkt im Retrofit-Verfahren sichern. Ein Vorteil von R507 ist das tiefe Druckverhältnis auch bei hohen Differenzen  $t_c - t_o$ .

#### ☺☺ R290 (Propan C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)

Der Vorteil von Propan ist, dass es über den gesamten Temperaturbereich eingesetzt werden kann. Über  $t_c = 65$  °C ist es zusammen mit R134a das einzige einsetzbare Kältemittel. Die Leistungszahl liegt etwas über dem Wert von R134a, ist aber rund 5% tiefer als jene von R407C. Wegen den strengen Sicherheitsauflagen wird sich Propan aber nun in kleinen Anlagen realisieren lassen (ausser bei Aussenauflistung). Propan ist das ideale Kältemittel für EFH mit Warmwasseraufbereitung.

#### ☺ R600a (Iso-Butan C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)

Die Leistungszahl von R600a ist bescheiden im Vergleich zu sämtlichen übrigen Kältemitteln. Dazu kom-

men noch die Sicherheitsauflagen bei der Aufstellung und Betrieb. Iso-Butan ist bei sämtlichen untersuchten «Disziplinen» ungünstiger als Propan. Der Vorteil von Iso-Butan ist, dass es bei deutlich höheren Temperaturen eingesetzt werden kann als alle anderen Kältemittel. Dieses Kältemittel dürfte sich daher nur bei  $t_c > 70$  °C sinnvoll einsetzen lassen.

#### ☺☺☺ R717 (Ammoniak NH<sub>3</sub>)

Dieses Kältemittel liefert im Einsatzbereich bis  $t_c = 45$  °C beste Leistungszahlen. Es ist somit im Wärmepumpen-Bereich, in der reinen Kälteanwendung bis  $t_o = -15$  °C wie auch in der Kälteanwendung mit Abwärmenutzung bis  $t_c = 45$  °C sehr gut einsetzbar. Die hohe volumetrische Kälteleistung garantiert zudem kleine Füllmengen. Es resultieren jedoch hohe Verdichtertemperaturen, was den Einsatz von NH<sub>3</sub> bei Temperaturen von  $-15$  °C und tiefer einschränkt. Sicherheitsbedenken bestehen nach heutigem Wissens- und Technologiestand und bei Einhalten der gesetzlichen Anforderungen keine. Ammoniak eignet sich, auch vom wirtschaftlichen Standpunkt her, am besten bei grösseren Anlagen mit indirektem Kältemittelverteilsystem.

#### ☺ R718 (Wasser H<sub>2</sub>O)

Wasser ermöglicht höchste Leistungszahlen und ist ökologisch unbedenklich. Wasser führt aber zu den geringsten volumetrischen Kälteleistungen. Anlagen mit R718 dürften deshalb teuer sein. Die Verdampfungstemperatur kann nicht unter 5 °C liegen. Die Kondensationstemperatur ist nach oben beschränkt durch das hohe Druckverhältnis und die hohe Verdichtertemperatur.

Urban Frei, dipl. Masch.-Ing. ETH, Avireal AG, Fachstelle Energie und Umwelt EMPE, 8058 Zürich-Flughafen

Christoph Schmid, dipl. Masch.-Ing. ETH/SIA, Büro für Energietechnik, Sonnenbergstrasse 97, 8400 Winterthur; Dozent NDS EN Bau ZHW, Fachbereich Haustechnik

Gustav Peter, Dr.sc.nat. ETH, Departement Chemie und Biotechnologie, Zürcher Hochschule Winterthur; Dozent NDS EN Bau ZHW, Fachbereich Bauchemie und -ökologie

#### Literatur

- [1] Frei Urban: Verwendung von Kältemitteln in der Avireal. Diplomarbeit, ZHW, März 1999
- [2] Vergleichende Umweltrelevanz des Einsatzes alternativer Kältemittel. ENET 1996
- [3] Umweltverträgliche und wirtschaftliche Kälteanlagen, Buwal 1996
- [4] Kälte- und Klimatechnik. Solkane-Taschenbuch 1997
- [5] Kältetechnik. Vogel-Verlag 1979
- [6] Kältemittel-Report 5 A-500-5. Bitzer 1996
- [7] Kältemittel und Umwelt. Fachinstitut Gebäude-Klima e.V. 1996
- [8] Grundlagen der Kältetechnik. Verlag Technik GmbH, Berlin 1990
- [9] DuPont Suva Kältemittel Handbuch. 1994
- [10] Hartmann Klaus: Alternativ-Kältemittel für Kältemaschinen. TAB 1/96
- [11] Meyer/Schiffner: Technische Thermodynamik. VCH Verlagsgesellschaft 1986
- [12] Good J., Huber A. et al.: Gekoppelte Kälte- und Wärmeerzeugung mit Erdwärmesonden. Handbuch zum Planungsvorgehen, Schlussbericht Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie, Bern 2001