

# Kälteanlagen in der Industrie

## Die fünf wichtigsten Punkte zur Systemoptimierung

1. Kälteleistung auf tatsächlich erforderliches Niveau auslegen
2. Tages-, Wochen- und Jahresgang des Kältebedarfs klären: Arbeitszahl optimieren
3. Lastgeregelte Kälteerzeugung mit Frequenzumrichter prüfen
4. Effizienten IE4 Antriebsmotor auf die tatsächlich erforderliche Last dimensionieren
5. Geeigneten, effizienten Kälteverdichter für die spezifische Anwendung auswählen



## Ziel und Zielpublikum

Das Topmotors Merkblatt Nr. 27 thematisiert effiziente industrielle Kälteanlagen und Kälteverdichter. Es vermittelt technisch Interessierten (Anwendern, Planern, Installateuren, Energieberatern, etc.) Informationen zur effizienten Kälteerzeugung, das heisst die Planung von Neuanlagen sowie Knowhow bei der Optimierung von bestehenden Anlagen. Richtig dimensionierte und anwendungsorientiert geregelte Kälteanlagen erfüllen bei minimalem elektrischen Energieverbrauch alle Anforderungen des täglichen Betriebs und ermöglichen damit einen möglichst kostengünstigen Einsatz. Der Fokus dieses Merkblatts liegt auf der effizienten Erzeugung und Nutzung von Kälte in der Industrie. Kleinere Anwendungen (Haushaltskühl- und Gefriergeräte), Gewerbliche Kälteanlagen (z.B. Detailhandel) sowie Raumklimaanlagen werden nicht behandelt.

## Energieverbrauch von Kältesystemen

Kälteanlagen haben mit 22% (8 TWh/a)<sup>1</sup> einen wesentlichen Anteil am Energieverbrauch der Motoren in der Schweiz. Sie gehören, neben Pumpen, Ventilatoren, Verdichtern (Druckluft), zu den grössten elektrischen Energieverbrauchern in der Industrie (Abbildung 1). Rund 40% der elektrischen Energie für Kälte wird im Haushalt und Gewerbe (Kühl- und Gefriergeräte, Raumkältegeräte) verwendet und weitere 40% im Dienstleistungsbereich (mittlere und grössere Kälteanlagen für Raumklimatisierung und Prozesse, z.B. in Rechenzentren). In der Industrie sind es 20%, die für Prozesskälte, z.B. im Nahrungsmittelbereich verwendet werden.

<sup>1</sup> BFE: Elektrizitätsbedarf für Kühlen in der Schweiz, Zürich 2012

## Aufgaben der Betreiber und Hersteller

Die optimale Auslegung einer Kälteanlage erfordert ein gutes Zusammenspiel mehrerer Fachdisziplinen. Zuerst muss das effektiv benötigte Temperaturniveau der Prozesskälte, die nötige Kühlleistung (Volumenstrom · spezifische Wärmekapazität · Temperaturdifferenz) sowie der erforderliche Tages-, Wochen- und Jahresgang möglichst genau erhoben werden. Es gilt, die Anlage für alle auftretenden Betriebszustände, Aussentemperaturen und Produktionsanforderungen genau auszulegen und vorab zu simulieren. Wichtig ist, dass die für das Kühlgut zulässigen Grenztemperaturen immer genau beachtet und unabhängig von der Aussentemperatur und der Produktionsmenge nicht überschritten werden. Andernfalls ist mit verdorbenem Material und grossen Kostenfolgen zu rechnen. Im Anschluss kann ein Planungsbüro oder ein Hersteller ein Konzept erarbeiten, das diese Vorgaben möglichst genau und wirtschaftlich erfüllt. Grundsätzlich gilt es unnötige Überdimensionierungen und Betriebszeiten zu vermeiden, um einen optimalen Betriebspunkt zu gewährleisten. Nach der Umsetzung werden interne Fachleute benötigt, die die Anlage verstehen und führen, sowie die in der Lage sind, bei verändertem Bedarf den Betrieb kontinuierlich nachjustieren. Das Aktivieren des Wochenend-Modus an einem produktionsfreien Tag kann ohne viel Aufwand eine beachtliche Menge Energie sparen.

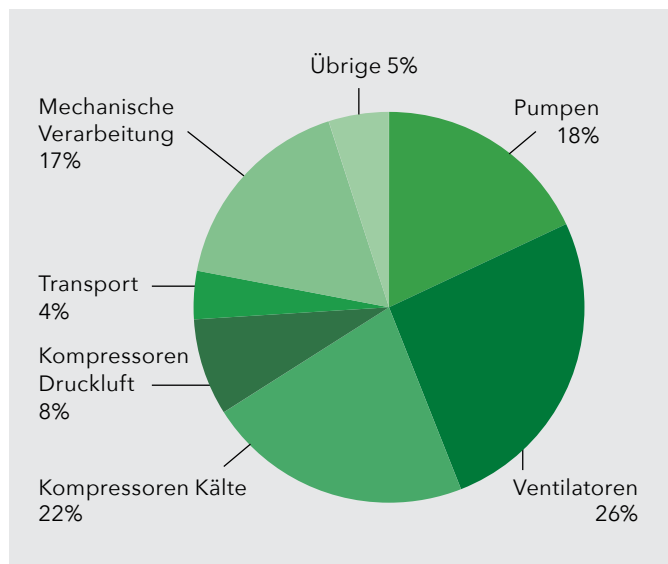


Abbildung 1: Anteile des Strombedarfs von 4142 elektrischen Motoren nach ihrer Anwendung. (Quelle: Easy, 2012)

# Grundlagen

## Definition

Technische Kälteanlagen werden benötigt, um Objekte und Materialien unter die Umgebungstemperatur abzukühlen, indem dem Kühlgut Wärme entzogen und an einem anderen Ort an die Umgebung abgegeben wird. Die Umgebungstemperatur ist diejenige Temperatur, die das zu kühlende Objekt umgibt. Es kann sich dabei um die Raumtemperatur in Produktions- und Lagerhallen oder um die Aussentemperatur handeln. Der für diese Abkühlung erforderliche Energieaufwand hängt von der transportierten Wärmemenge (Kühlleistung), der Temperaturdifferenz und der Energieeffizienz der Kälteanlage ab. Der theoretisch maximal mögliche Wirkungsgrad einer Kälteanlage wird aus dem umgekehrten Carnot-Wirkungsgrad mit den absoluten Temperaturen (Einheit in Kelvin,  $0^{\circ}\text{C} = 273,15\text{K}$ ) berechnet.

$$\epsilon_{\text{th}} = \frac{T_{\text{Kühlung}}}{T_{\text{Umgebung}} - T_{\text{Kühlung}}} = \text{EER}_{\text{th}} \text{ (Energy Efficiency Ratio)}$$

Die Leistungszahl (kurz LZ), oder der Coefficient of Performance (kurz COP) sind Verhältnisse der momentanen Nutzleistung (hier die Kälteleistung, bei Wärmepumpen die Heizleistung) zur aufgewendeten elektrischen Leistung. Sie entsprechen Wirkungsgraden.

Die Begriffe Energy Efficiency Ratio (kurz EER) oder mittlerer COP sind Verhältnisse von Energiewerten über einen gewissen Zeitraum. Sie entsprechen daher mittleren Wirkungsgraden. Bei kurzer Messdauer sind die Zahlenwerte LZ und EER identisch.

Bei Kältemaschinen haben sich die Begriffe EER und der Seasonal EER (kurz SEER) bei den Wärmepumpen der COP, der Seasonal COP (kurz SCOP) und die Arbeitszahl etabliert.

**Definition:** Unter Kühltemperatur versteht man die gewünschte Temperatur des Kühlraums respektive des zu kühlenden Objekts. Die Kühltemperatur ist höher als die Verdampfertemperatur der Kälteanlage, weil eine Temperaturdifferenz (Delta T) für die Wärmeübertragung nötig ist. Je kleiner diese Temperaturdifferenz im Wärmetauscher ist, desto energieeffizienter ist die Anlage.

## Beispiel

Für eine Kühltemperatur ( $T_{\text{Kühlung}}$ ) auf 7°C (280 K) bei einer Umgebungstemperatur ( $T_{\text{Umgebung}}$ ) von 35°C (308 K) ergibt sich eine theoretische Kältezah ( $\varepsilon$ ) von 10.

$$\varepsilon_{\text{th}} = \text{EER}_{\text{th}} = \frac{273\text{K} + 7\text{K}}{(273\text{K} + 35\text{K}) - (273\text{K} + 7\text{K})} = \frac{280\text{K}}{28\text{K}} = 10$$

Eine theoretische Kältezah von 10 bedeutet, dass mit 100 kW elektrischer Leistung theoretisch 1000 kW Kälteleistung erzeugt werden können. Dabei erreichen sehr gute Kälteanlagen etwa 60% Wirkungsgrad, was einer effektiven Kältezah von 6 entspricht. Somit können mit 100 kW elektrischer Leistung tatsächlich 600 kW Kälteleistung erzeugt werden.

## Wo und wie werden Kältesysteme sinnvoll eingesetzt?

Die Anwendungsgebiete von Kälteanlagen sind sehr vielfältig. Die häufigsten Anwendungen sind Lebensmittelkonservierung und Raumklimatisierung. Unter Prozesskühlung versteht man die vielfältigen Kälteanwendungen in der Chemie-, Pharma-, Kunststoff-, Nahrungsmittel- und Maschinenindustrie sowie der Petrochemie und weiteren Branchen (z.B. in Rechenzentren). Kälteanlagen werden aber auch im Bergbau, zur Betonkühlung, für Kunsteisbahnen, in der Medizin und in der Forschung eingesetzt. Oft werden Kälteanlagen suboptimal eingesetzt. Wird eine Produktionsanlage zum Beispiel - nur weil es praktisch ist - an ein vorhandenes Kältenetz angeschlossen, wird die Anlage zwar zuverlässig gekühlt, eine Kühlung mit Umgebungstemperatur wäre aber häufig ausreichend. Beispiele dafür sind Extruder, wassergekühlte Motoren, Druckluftverdichter und viele weitere Anwendungen.

Prinzip	Verfahren	Bemerkungen
<b>Kühlung</b>	<b>Umgebungsluft.</b> Wärme wird über einen Rückkühler an die Umgebungsluft abgegeben. Dieser Effekt kann durch eine Berieselung des Rückkühlers mit Wasser noch verstärkt werden.	Im Sommer hohe Kühltemperatur von über 30°C möglich. In der kalten Jahreszeit aber eine Alternative zur Kälteanlage (Free Cooling)
	<b>Grundwasser.</b> Je nach geografischer Lage kann auch Oberflächenwasser (Fluss- und Seewasser) für die Wärmeabfuhr verwendet werden.	Je nach Standort nicht möglich oder erlaubt, Kühltemperatur bei Grundwasserkühlung unter 10°C. Bei einer Kühlung mit Oberflächenwasser kann die Kühltemperatur höher liegen.
	<b>Erdwärme.</b> Wärmeeintrag ins Erdreich	Teure Bohrungen (30 W und 70 Fr. pro m), Kühltemperatur etwa 10°C
	<b>Kältenetz.</b> Anschluss an lokale Kälteversorgung, ähnlich der Fernwärmeversorgung	Je nach Standort und Quelle Kühltemperatur oft 7°C
<b>Verdampfung</b>	<b>Freie Verdunstung von Flüssigkeit</b> (Adiabatische Kühlung)	Im Raum steigt die Luftfeuchtigkeit.
	<b>Kältekompressor.</b> Der für das Verdampfen des Kältemittels erforderliche Saugdruck wird mit einem Kompressor erzeugt.	Übliche Methode zur Kälteerzeugung, Kühltemperatur beliebig. Teilweise problematische Kältemittel (gesundheitlich-, umweltschädlich, etc.)
	<b>Sorbtionstechnik.</b> Der für das Verdampfen des Kältemittels erforderliche Saugdruck wird mit einem Lösungsmittel erzeugt, welches danach mit hoher Temperatur wieder regeneriert werden muss.	Verbreitete Alternative zum Kältekompressor, sinnvoll bei grosser vorhandener Abwärmeleistung von über 80°C.
<b>Expansion</b>	<b>Linde-Verfahren.</b> Gasverflüssigung mit Joule-Thomson-Effekt	Grossanlagen, sehr tiefe Temperaturen
	<b>Druckluftkühlung.</b> Wirbelrohr mit Expansionsdüse für Druckluft, eine Seite kalt, andere heiss	Leistung < 2 kW, bis etwa 40 K Temperaturdifferenz, Kältezah etwa 0,1
	<b>Stirlingmotor.</b> Wenn man einen Stirlingmotor antreibt, wird die eine Seite heiss, die andere kalt.	Leistungen < 10 kW, kein Kältemittel erforderlich
<b>Spezielle Effekte</b>	<b>Peltier-Element.</b> Halbleiterelement, das bei Stromdurchfluss auf der einen Seite heiss und auf der anderen Seite kalt wird.	Kleine Leistung < 100 W, bis etwa 15 K Temperaturdifferenz
	<b>Magnetokalorischer Effekt</b> von Gadolinium und Mangan	Noch in Entwicklung

Tabelle 1: Verschiedene Kühlmethoden. (Quelle: energie.ch, 2017)

## Alternative Systeme: Absorption, Free Cooling, Verdunstung

Obwohl Kälteanlagen mit elektrisch angetriebenen Kälteverdichtern am häufigsten vorkommen, gibt es je nach Situation (Tabelle 1) auch interessante alternative Kühlsysteme.

### Der Kompressionskälte-Kreislauf

Abbildung 2 stellt das Funktionsprinzip einer Kältemaschine dar und zeigt die vier wesentlichen Elemente des Kompressionskälte-Kreislaufs:

- 1. Verdampfer:** In ihm verdampft das flüssige Kältemittel bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur. Dabei wird der Umgebung Wärme entzogen, womit «Kälte» entsteht, die für den Kühlprozess genutzt werden kann.
- 2. Verdichter:** Im Verdichter wird das gasförmige Kältemittel auf einen hohen Druck komprimiert und infolge auf hohe Temperatur erwärmt.
- 3. Verflüssiger (Kondensator):** Im Verflüssiger kühlt sich das gasförmige Kältemittel zuerst von der höheren Temperatur wieder ab (Enthitzung), bevor es sich dann auf einem konstanten Temperaturniveau wieder vollständig verflüssigt (kondensiert).
- 4. Expansionsorgan (Entspannungsventil):** Im Expansionsorgan wird das unter Druck stehende flüssige Kältemittel aus dem Kondensator in den Verdampfer geleitet und verdampft dort durch die Druckveränderung wieder.

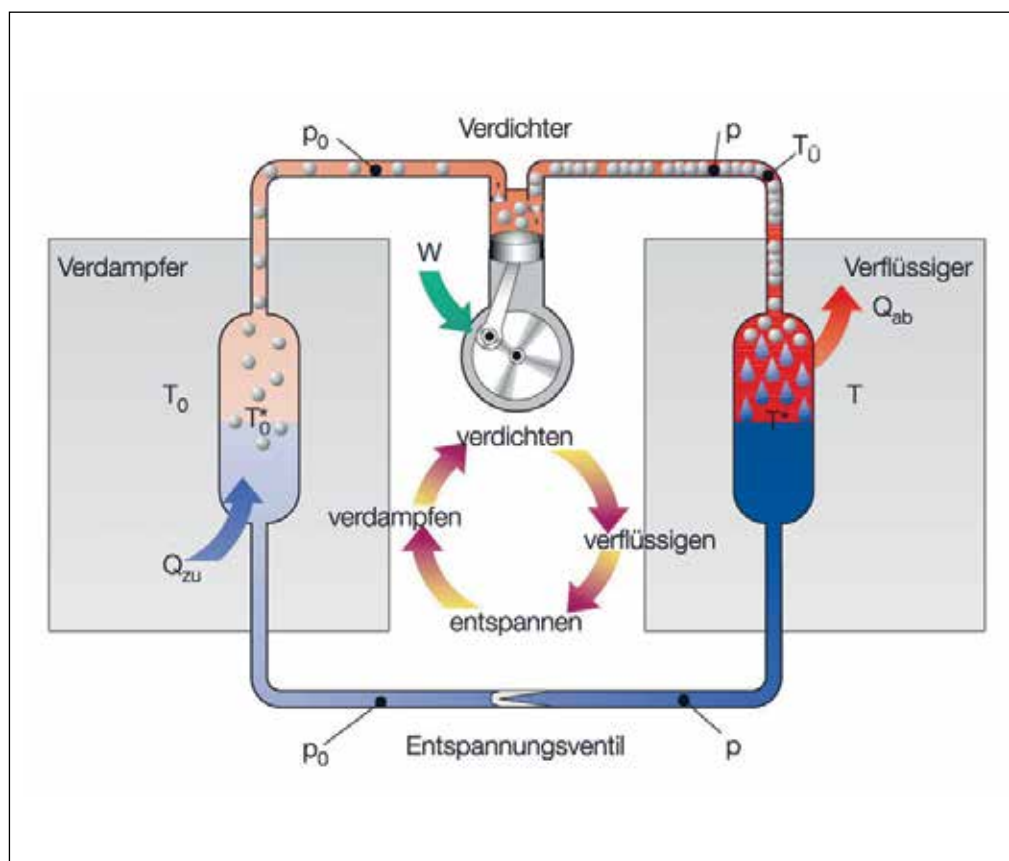


Abbildung 2: Der Kompressionskälte-Kreislauf (Quelle: MHG Heiztechnik GmbH, 2017)

## Checkliste für effiziente Kälteanlagen

Energieeffizienz: Die Energieoptimierung einer Kälteanlage beginnt mit der Kälteanwendung.

Bereich	Massnahmen
Kühlstelle	Minimale Raumbooberfläche, Unterteilung des Raumes nach Zonen
	Optimale Wärmedämmung, Vermeidung von Wärmebrücken
	Minimale Lüftungsverluste, geringer Feuchtigkeitseintritt, Kondensatablass mit Siphon
	Minimale Wärmeeinstrahlung, Storen
	Reduktion von inneren Wärmequellen (effiziente geregelte Beleuchtung, Motoren, etc.)
Kühlung von Massen	Berechnungsgrundlagen überprüfen (Masse pro Zeit mal spezifische Wärmekapazität mal Temperaturdifferenz)
	Reduktion der Zusatzkühlung: Verpackungs- und Transportmaterial, Wasser, Luft, etc.
	Massenstrom konstant? Speichermöglichkeiten?
	Vorkühlung mit Umgebungswärme möglich oder sinnvoll?
	Kann der Wärmebedarf der Massen nach der Kühlung genutzt werden?
Kühltemperatur	Welche Kühltemperatur und Kühlleistung ist wann erforderlich? Je höher die Kühltemperatur, desto weniger Verdichterleistung
Kälteübertragung	Luftkühlung mit optimierter Strömung, effiziente geregelte Ventilatoren
	Wasserkühlung mit minimalen Druckverlusten, effiziente geregelte Pumpen
	Eiskühlung mit Rückgewinnung von Eis und Schmelzwasser
	Direktkontakt und Strahlung mit Optimierung der Oberflächen
	Wärmetauscher mit geringem Temperaturverlust (grosse Oberfläche, guter Wärmeübergang, Dämmung zum Raum)
Kälteverteilung: Kältenetz Kälteverluste = Energieverluste	100% dicht schliessende Ventile zu den einzelnen Anwendungen
	Geringe Druckverluste in den Wärmetauschern (< 0,2 bar) und den Kälteleitungen (Geschwindigkeit unter 2 m/s)
	Kältespeicher zur Reduktion der Lastspiele am Verdichter, Betrieb in der kühlen Nacht
	Energieeffiziente regelbare Pumpen, kein Drosselventil und Bypass
Kälteverdichter	Systemwahl: Mehrere Kältenetze nach erforderlichem Temperaturniveau (zum Beispiel eines mit Umweltwärme), mehrere Kompressoren, drehzahlvariable Kompressoren
	Bei kühler Witterung: Free Cooling
	Energieeffiziente Verdichter
	Energieeffiziente Motoren (IE3 oder höher) je nach Laufzeit
Rückkühler	Direkte Nutzung der Abwärme: Warmwasser-Vorwärmung, Schwimmbad, Verbund mit Nachbarn. Nutzung der Abwärme auf höherem Temperaturniveau mit Wärmepumpe, eventuell für Heizung.
	Grundwasser, Seewasser, Erdwärme, Wärmespeicher
	Luftkühlung, geregelte energieeffiziente Ventilatoren
	Wärmetauscher mit geringem Temperaturverlust
Überwachung	Erfassung des Kältebedarfs der Anwendungen (Massenstrom, Innen- und Aussentemperatur) und des Leistungsbedarfs der Kälteanlage, daraus abgeleitet laufende Kontrolle des Wirkungsgrades. Wenn in einem Pfad keine Kälte benötigt wird, dann soll er nicht gekühlt werden.
	Regelmässige Überprüfung der Temperaturanforderungen und des Systems
	Installation eines eigenen Stromzählers für die Kälteanlage

Tabelle 2: Energieoptimierung einer Kälteanlage

## Energiefluss einer Kälteanlage

Abbildung 3 zeigt und vergleicht den Energiefluss zweier Kälteanlagen. Beide Anlagen liefern 50 kW Nutzkühlung, bedürfen dafür aber unterschiedlich viel elektrischer Energie. Die rote Anlage zeigt den Energiefluss einer suboptimalen Anlage mit unpassender Dimensionierung und Komponenten mit mässigen Wirkungsgraden. Die grüne Anlage zeigt dagegen den Energiefluss einer richtig dimensionierten Anlage mit effizienten Komponenten. Die Leistungsaufnahme der roten Anlage ist mit 100 kW doppelt so hoch wie die der grünen Anlage mit 50 kW.

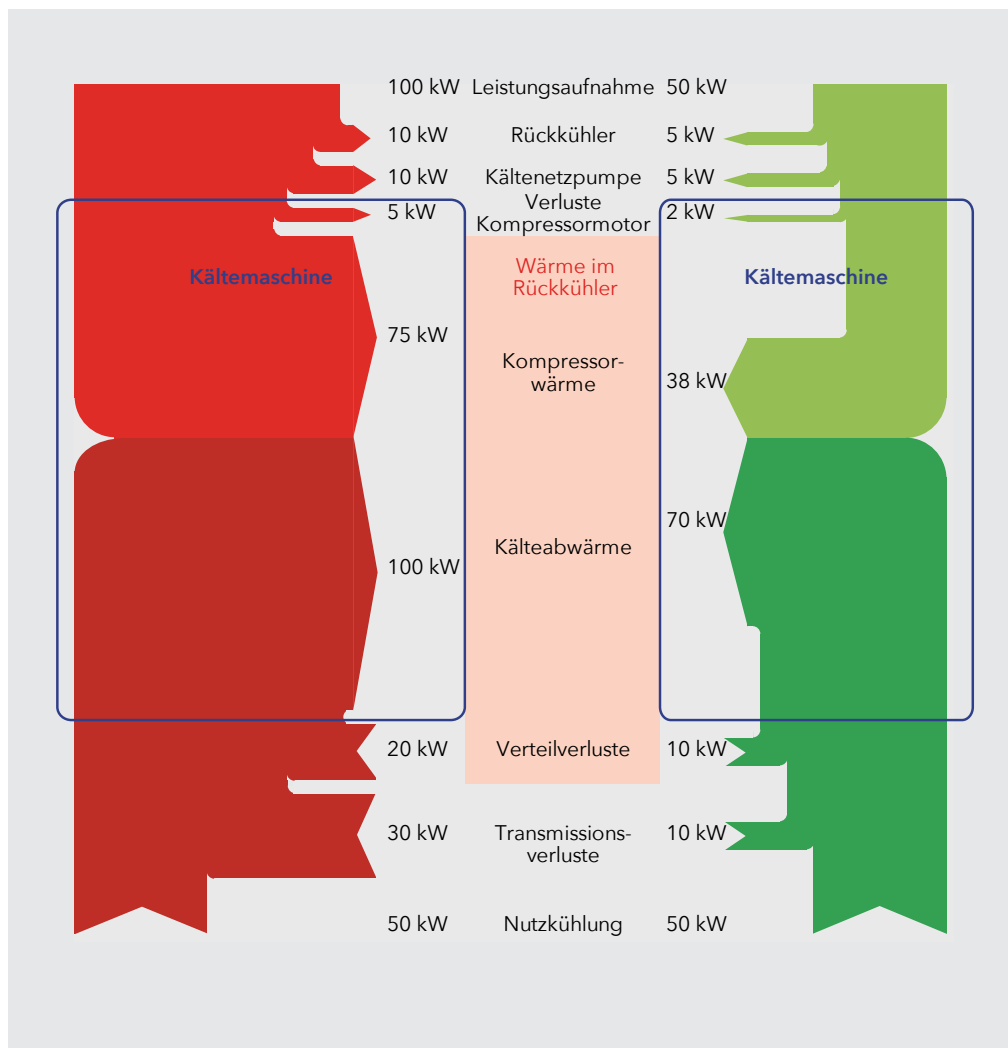


Abbildung 3: Energiefluss einer suboptimalen (rot, links) und optimalen (grün, rechts) Kälteanlage.  
(Quelle: energie.ch, 2017)

## Effiziente Kompressionssysteme

Wie bei vielen anderen rotierenden Maschinen (Pumpen, Ventilatoren, Motoren, etc.) gibt es auch bei Kältemaschinen erhebliche herstellerspezifische Unterschiede in der Energieeffizienz im Bereich von  $\pm 20\%$ .

Abbildung 4 zeigt die Untersuchung von Eurovent an 1295 Kälteanlagen. Sie veranschaulicht die Streuung der Kältezahl je Kälteleistung. Sie macht deutlich, dass unterschiedliche Hersteller für eine Kälteleistung Effizienzunterschiede von  $\pm 20\%$  anbieten. Daher sind vergleichbare Kriterien bei der Ausschreibung einer Anlage unerlässlich, um Anlagen, Wirkungsgrade und Preise miteinander vergleichen zu können. Schlechte Wirkungsgrade wirken sich während der gesamten Lebensdauer negativ aus und lassen sich nach Inbetriebnahme nur sehr aufwendig und kostenintensiv korrigieren.

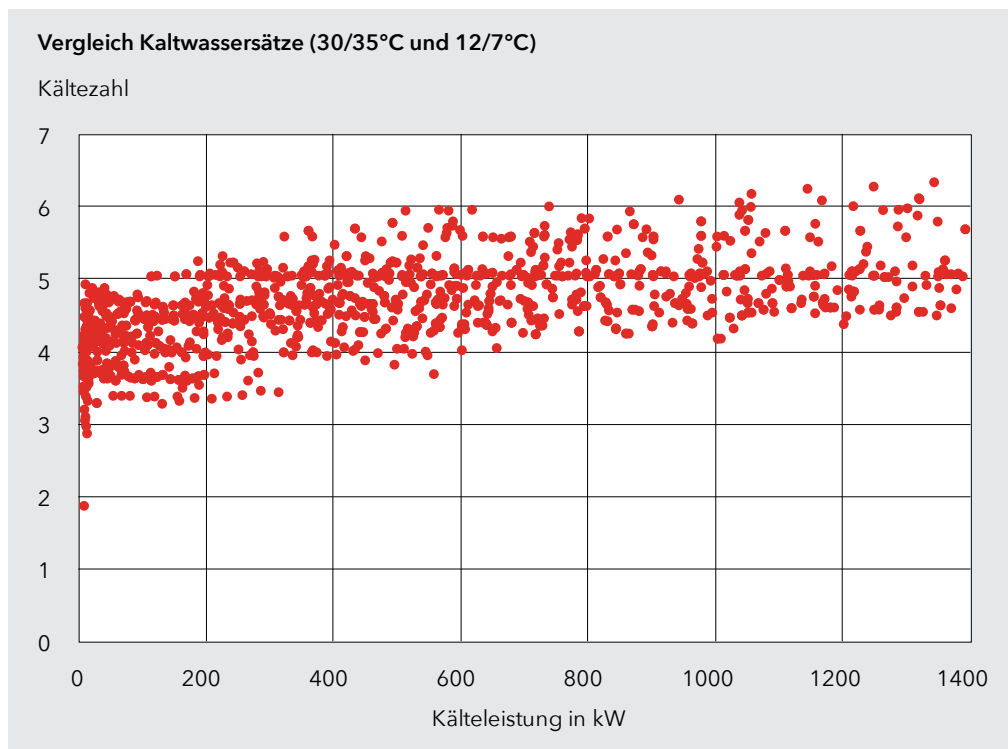


Abbildung 4: Vergleich von 1295 Kaltwassersätzen. Die theoretisch maximale Kältezahl liegt bei  $(273 \text{ K} + 7 \text{ K}) / 28 \text{ K} = 10$ . (Quelle: Eurovent, Darstellung: energie.ch, 2017)

# Verschiedene Kompressortechnologien

**Hardware** (Standardmaschinen, kundenspezifische Anlagen)

- Hubkolbenverdichter
- Scroll-Verdichter
- Schraubenverdichter
- Turboverdichter

Die verschiedenen Verdichterbauarten kommen je nach der geforderten Kälteleistung/Fördervolumen und Druckverhältnis in Frage.

Der Einsatz ist abhängig von Kälteleistung, Betriebsbedingungen, Einsatzgrenzen, Energie-Effizienz, Kältemittel, Betriebssicherheit, usw.

## Hubkolbenverdichter

- Kleine bis mittelgrosse Leistungen
- Universell einsetzbar
- Hohe Effizienz
- Sehr zuverlässig
- Einfache Wartung

## Scroll-Verdichter

- Kleine bis mittlere Leistungen
- Hauptsächlich Normalkühlung und Anwendungen für Klimakälte
- Tiefkühlung-Anwendungen, sehr aufwändig
- Kann nur in Spezialwerkstatt gewartet werden.

## Schraubenverdichter

- Grosse gewerbliche Anlagen und Industrie-Kälte
- Grosser Anwendungsbereich
- Flexibel bei Kältemitteln
- Hohe Effizienz
- Sehr zuverlässig
- Sollte nur in Spezialwerkstatt gewartet werden.

## Turboverdichter

- Sehr zuverlässig
- Grosse bis sehr grosse Leistungen
- Beschränktes Einsatzfeld
- Sehr zuverlässig
- Durch Spezialisten relativ einfach zu warten.

Verschiedene Bauarten sind möglich.

■ **Hermetische Bauart:** Verdichter und Motor sind in einem Metallgehäuse verschweisst (kleine Kompressoren, z. B. Kühlschrank)

■ **Halbhermetische Bauart:** Verdichter und Motor sind in einem Gehäuse, welches zu Wartungszwecken zerlegt werden kann (mittlere Kompaktkälteanlagen).

■ **Offene Bauart:** Verdichter und Motor voneinander getrennt, mit Wellen-Abdichtung (grosse Kälteanlagen).

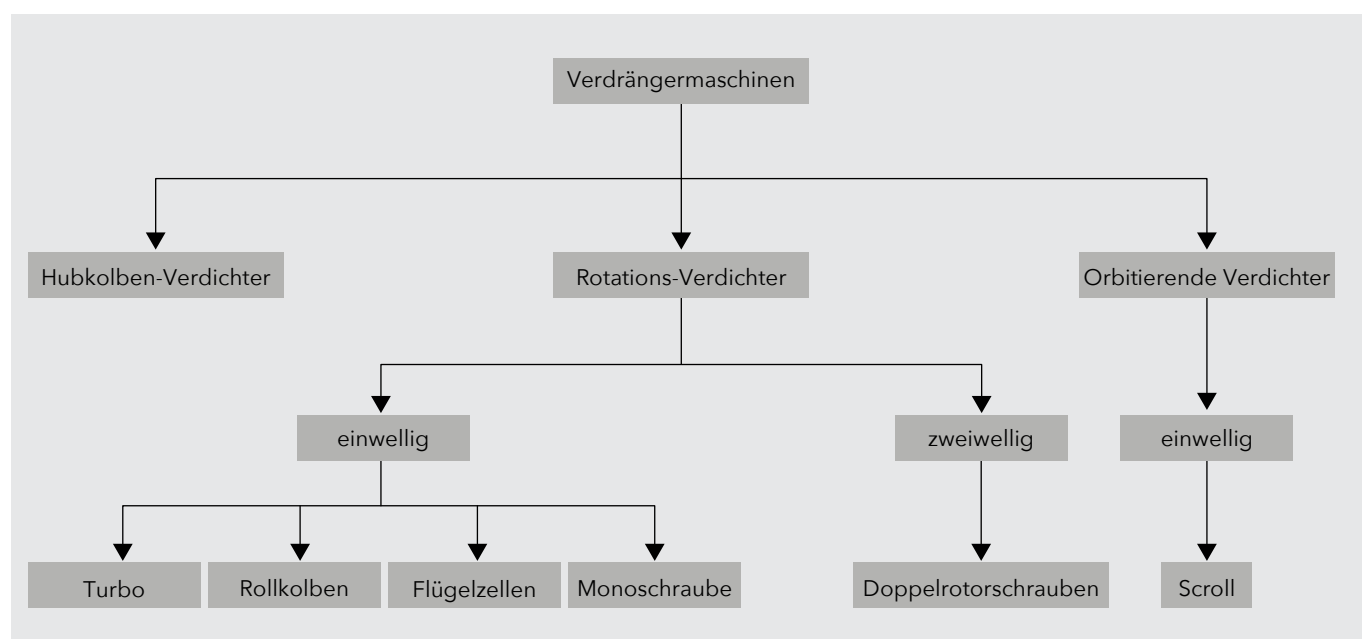


Abbildung 5: Übersicht Kompressortechnologien. (Quelle: Karl Breitenbach, 2017)



# Kältemittel

Stratosphärischer Ozonabbau sowie atmosphärischer Treibhauseffekt durch Kältemittel-Emissionen führten seit Anfang der 90er-Jahre zu grossen Veränderungen in der Kälte- und Klimatechnik. Eines der grossen Ziele in diesem Jahrhundert ist die deutliche Reduzierung von direkten Emissionen durch Kältemittelverluste sowie von indirekten Emissionen durch besonders effiziente Anlagentechnik. Obwohl die indirekten Emissionen durch Energieerzeugung höher sind als die direkten (CO<sub>2</sub>-äquivalenten) Emissionen durch HFKW-Kältemittel (Hydrogen-Fluor-Kohlen-Wasserstoff, teilhalogeniert), wird es künftig zu Verwendungsbeschränkungen bzw. Verboten von Kältemitteln mit hohem Treibhauspotenzial (GWP, Global warming potential) kommen (Tabelle 3). Um diesen Sachverhalt korrekt beurteilen zu können, wurde eine Berechnungsmethode entwickelt, mit der die gesamte Auswirkungen auf den Treibhauseffekt bewertet werden kann (TEWI = Total Equivalent Warming Impact).

Der GWP berücksichtigt einen Zeithorizont von 100 Jahren. Das bedeutet z. B., dass die Emission von 1 kg des Kältemittels R134a etwa gleichzusetzen ist mit 1430 kg CO<sub>2</sub> (GWP100 = 1430).

Der höchste Anteil am Treibhauseffekt einer Kälteanlage ist die indirekte CO<sub>2</sub>-Emission durch Energieerzeugung. Bedingt durch den hohen Anteil fossiler Brennstoffe in Kraftwerken liegt die freigesetzte CO<sub>2</sub>-Masse im europäischen Durchschnitt bei etwa 0,45 kg pro kWh elektrischer Energie (β = 0,45 kg CO<sub>2</sub>/kWh).

Um den TEWI zu minimieren, müssen die Kältemittelfüllmengen reduziert und vor allem hocheffiziente Verdichter verwendet werden, die einen geringen Energiebedarf haben. Der Einfluss der Energieaufnahme bei der Kälteerzeugung ist bedeutsamer für den TEWI als die Kältemittelfüllmenge.

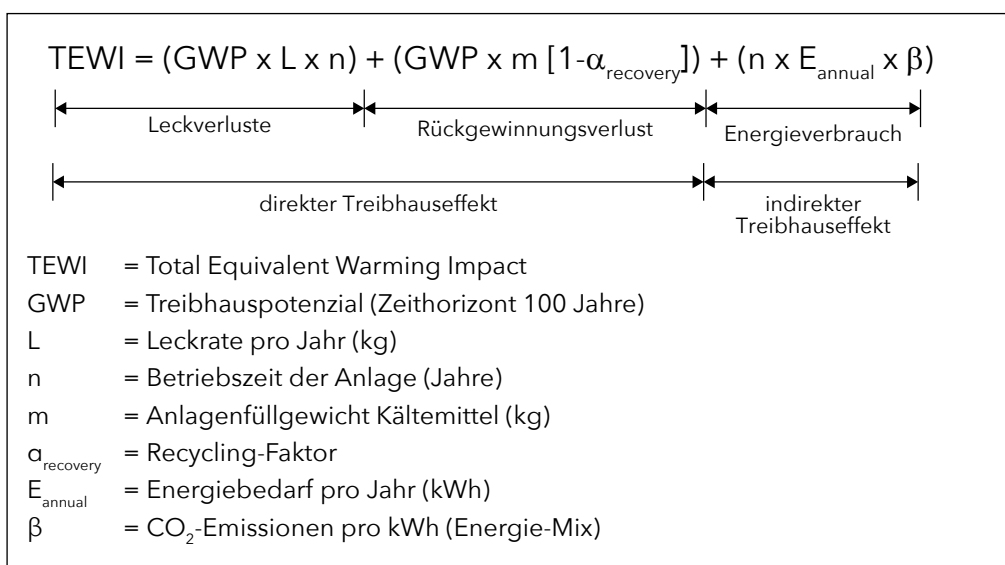


Abbildung 6: Berechnungsmethode für TEWI-Kennwerte, SN EN 378. (Quelle: Bitzer, 2017)

Übersicht über die wichtigsten Kältemittel (Liste nicht abschliessend)								
Kältemittel Kategorie			Kältemittel (Beispiele)	ODP <sup>1</sup>	GWP <sup>2</sup>	Sicherheitsgruppe <sup>3</sup>	Vorgaben der ChemRRV zu Anlagen mit Kältemitteln	
Ozon-schicht-abbauende Kältemittel	FCKW (Fluorchlor-kohlenwasserstoffe, vollständig halogeniert)	Einstoff-Kältemittel	R-11	1.000	4750	A1	Inverkehrbringen: verboten Nachfüllen: verboten Meldepflicht und Wartungsheft: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg Dichtigkeitskontrolle: Anlagen mit > 3 kg Füllmenge	
			R-12	1.000	10900	A1		
	R-13		1.000	14400	A1			
	R-13B1		10.000	7140	A1			
	HFCKW (chlorhaltig, teilweise halogeniert)	Gemische (Blends)	R-502	0.334	4657	A1		
		Einstoff-Kältemittel	R22	0.055	1810	A1		
Gemische (Blends), überwiegend R22-haltig	R-401A (MP39)		0.037	1182	A1			
	R-402A (HP80)		0.021	2788	A1			
	R-402B (HP81)		0.033	2416	A1			
	R-408A (FX-10)	0.021	3152	A1				
R-409A (FX-56)	0.048	1585	A1					
HCFO (teilweise halogenierte Fluorchlorolefine)	Einstoff-Kältemittel	R-1233zd(E)	<0.0004	3.7	A1	Inverkehrbringen: Verbot mit Ausnahme, wenn nach dem Stand der Technik ein Ersatz fehlt und Massnahmen zur Vermeidung von Emissionen der Kältemittel getroffen wurden. Nachfüllen: zulässig Meldepflicht und Wartungsheft: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg Dichtigkeitskontrolle: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg		
		R-1233zd(Z)	<0.0004	0.4	A1			
		R-1224yd(Z)	0.00023	0.8	A1			
In der Luft stabile Kältemittel	FKW/HFKW (vollständig oder teilweise halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe)	Einstoff-Kältemittel	R-23	0	14800	A1	Inverkehrbringen: eingeschränkt zulässig in Abhängigkeit von Kälteleistung, Treibhauspotenzial und Sekundärkreisläufen. Ausnahmebewilligung, wenn nach dem Stand der Technik die Sicherheitsanforderungen gemäss SN EN 378-1, -2 und -3 ohne in der Luft stabile Kältemittel nicht eingehalten werden können. Nachfüllen von Anlagen ≥ 40 Tonnen CO <sub>2</sub> -Äquivalent und GWP des Kältemittels ≥ 2500: nur regeneriertes Kältemittel. Ab 1. Januar 2030 Nachfüllen verboten. Meldepflicht und Wartungsheft: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg Dichtigkeitskontrolle: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg oder > 5 Tonnen CO <sub>2</sub> -Äquivalent	
			R-32	0	675	A2L		
			R-125	0	3500	A1		
			R-134a	0	1430	A1		
			R-143a	0	4470	A2L		
		Gemische (Blends)	R-404A	0	3922	A1		
			R-407C	0	1774	A1		
			R-407F	0	1825	A1		
			R-410A	0	2088	A1		
			R-413A	0	2053	(A2)		
			R-417A	0	2346	A1		
			R-422A	0	3143	A1		
			R-422D	0	2729	A1		
			R-437A	0	1805	A1		
			R-507A	0	3985	A1		
			R-508A	0	13214	A1		
			R-508B	0	13396	A1		
			Gemische mit HFO (Blends)	R448A	0	1386		A1
				R449A	0	1397		A1
R450A	0	601		A1				
R-452A	0	2140		A1				
R-454C	0	146		A2L				
R-455A	0	146	A2L					
R513A	0	630	A1					
Nicht ozon-schicht-abbauende und in der Luft nicht stabile Kältemittel	natürliche Kältemittel	Einstoff-Kältemittel	R-170 (Ethan)	-	6	A3	Inverkehrbringen: zulässig Nachfüllen: zulässig Meldepflicht und Wartungsheft: Anlagen mit Füllmenge > 3 kg Dichtigkeitskontrolle: keine Vorgaben	
			R-290 (Propan)	0	3	A3		
			R-717 (NH <sub>3</sub> )	-	0	B2L		
			R-718 (H <sub>2</sub> O)	-	0	A1		
			R-744 (CO <sub>2</sub> )	0	1	A1		
			R-600 (Butan)	0	4	A3		
			R-600a (Isobutan)	0	3	A3		
			R-1270 (Propen)	0	2	A3		
			Gemische (Blends)	R-290/R-600a	0	3		A3
		R-290/R-170		0	3	A3		
		R-723 (DME/NH <sub>3</sub> )		0	8	-4		
		HFO (teilweise halogenierte Fluorolefine)		R-1234yf	0	<1		A2L
R-1234ze	0			<1	A2L			
R-1336mzz(Z)	0			2	A1			

Tabelle 3: Die wichtigsten Kältemittel. Quelle: Bundesamt für Umwelt BAFU, Stand September 2020, die Erläuterungen zur Tabelle sind hier nicht wiedergegeben. Vollständige Information: [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) → «Kältemittel» und «Übersicht wichtigste Kältemittel».

# Auslegung von neuen Kälteanlagen

## Aufstellungsort, Bedingungen, Betriebsanforderungen

- Bedarf Kälteniveau und Systemkennlinie ermitteln
- Flexibilität für Bedarfsänderungen gewährleisten
- Verteilnetz, Speicher und Wärmedämmung ausreichend dimensionieren
- Regelung und übergeordnete Steuerung für Bedarf auslegen
- Kompressor passend für Anwendung wählen
- Motor: Effiziente Motoren werden heute nach IED 60034-30-1 (2014) in die Effizienzklassen IE1 bis IE4 kategorisiert. Gerade bei Anlagen mit vielen Betriebsstunden pro Jahr lohnen sich die Mehrkosten für effizientere Motoren in der Regel recht schnell. Weitere Informationen zu Wirkungsgraden finden Sie im kostenlosen Topmotors-Merkblatt 13: Wirkungsgrade.
- Frequenzumrichter: Der Einsatz von Frequenzumrichtern (FU) zur Drehzahlregulierung kann den Energieverbrauch der Anlage senken. Es bedarf aber einer gründlichen Abklärung, da FU Eigenverluste mit sich bringen und sich negativ auf den Motorenwirkungsgrad auswirken können. Je nach Kompressortyp gibt es zum Teil eingeschränkte Möglichkeiten der Drehzahlreduktion. Weitere Informationen zu FU finden Sie im kostenlosen Topmotors-Merkblatt 25: Frequenzumrichter.
- Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung im Gesamtkonzept berücksichtigen
- In der Ausschreibung klare Effizienz-Vorgaben stellen
- Abnahmekriterien inkl. Effizienz-Messungen festlegen
- Abtaubetrieb vermeiden
- Temperaturanforderungen an eingehendes Kühlgut definieren
- Schleusen für Tiefkühllager
- Enge Zusammenarbeit von Planer und Lieferant unerlässlich

Die nachfolgenden Hinweise orientieren sich an den einschlägig bekannten Normen SIA und SN EN 378:2017 und Empfehlungen des BFE. Hinweis: SN EN 378:2017 wurde unterdessen durch SN EN 378-1+A1:2021-02 abgelöst. Die Hinweise richten sich in erster Linie an industrielle Betreiber. Deren Umsetzung sind teilweise anspruchsvoller, können aber nach heutigem Stand der Technik problemlos realisiert werden. Die Investitionskosten für effizienzsteigernde Massnahmen und Komponenten sind in der Regel höher als wenn nur die minimalen gesetzlichen Vorgaben erfüllt werden. Die Mehrkosten amortisieren sich gerade bei vielen Betriebsstunden pro Jahr innerhalb eines betriebswirtschaftlich sinnvollen Zeitrahmens durch

tieferen Energiekosten. Die Hersteller sind heute deutlich mehr in der Pflicht, energetisch gute Anlagen zu bauen und werden durch entsprechende Kontrollen verpflichtet, ihre zum Teil euphorischen Angaben auch einzuhalten.

## Leistungs- und Systemgarantie

Die definierten Leistungswerte der Hersteller verstehen sich als verbindliche Definition der Kälteanlage. Weichen diese Werte in der Praxis negativ ab, so hat der Lieferant oder Hersteller die Anlage auf seine Kosten nachzubessern bzw. die Kosten für eine Anpassung durch Dritte zu übernehmen.

Der COP-/EER-Wert ist als absoluter Mindestwert anzugeben. Die Hersteller- oder Fertigungstoleranzen sowie die Messtoleranzen sind hierbei bereits in Abzug gebracht. Zur Ermittlung des COP-/EER-Wertes werden die Messwerte der fest installierten Energiezähler herangezogen.

## Optimaler Anlagenbetrieb

Der Lieferant ist verpflichtet, alle nötigen Aufwendungen zur Erreichung des ausgeschriebenen optimalen Betriebes zu veranlassen. Der Anlagenbetrieb wird aufgezeichnet. Bei Abweichungen zum optimalen Betrieb werden Nachbesserungen von Seiten des Lieferanten fällig. Dies kann eine mehrmalige Nachregulierung und Neueinstellung der Anlage in Zusammenarbeit mit der Regelfirma, dem Tableau-Lieferanten und dem Elektriker zur Folge haben.

## Effizienz-Messung

Die Daten werden bei stabiler Dauervollast ermittelt. Der Beginn der Garantiemessungen erfolgt 15 Minuten nach dem Start der Kälteanlage oder der Wärmepumpe und dauert mindestens eine Stunde. Der Nachweis der Garantiedaten erfolgt soweit wie möglich mit den installierten Betriebsinstrumenten, wobei diese eine bekannte Genauigkeit aufweisen müssen. Dafür sollten fest installierte Messstellen bei der Planung der Anlage bereits vorgesehen werden. Die Messgenauigkeit der Versuchsergebnisse kann zum Beispiel nach VDI 2048 berechnet werden.

Kann das Erreichen der garantierten Leistungen respektive Daten mit den vorhandenen oder vom Auftragnehmer zusätzlich eingesetzten Messgeräten und unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten nicht plausibel nachgewiesen werden, sollte ein unabhängiges Institut mit der Nachweisführung beauftragt werden. Der Lieferant übernimmt die Kosten der Nachweisführung, die Kosten für die Nachmessung nach einer Nachbesserung der Anlage und die Mehrkosten aus dem Betrieb der Anlage bis zur Mangelbehebung bei Nichterreichen der Garantiedaten.

## Probetrieb und Begleitung während 4 Wochen

Nach Inbetriebnahme muss die gesamte Anlage durch eine Fachperson des Betreibers betreut werden. Dies ist notwendig, um einen reibungslosen 24h-Betrieb sicherzustellen.

In der Nacht und am Wochenende ist die Fachperson in Rufbereitschaft und muss innerhalb einer Stunde auf der Anlage sein können. Am Ende der Probezeit sind eine protokollierte Nachkontrolle und weitere Instruktionen des Betriebspersonals vorzunehmen.

## Optimierung bestehender Kältesysteme

### Allgemein

Eine Kälteanlage arbeitet dann optimal und effizient, wenn sie zum Erreichen ihrer Kälteleistung die geringste Antriebsleistung benötigt. Dies wiederum bedeutet, dass es bei einer Kälteanlage nicht auf die Motorleistung, sondern auf die Kälteleistung ankommt.

### A) Bauart der Kältemittelverdichter

Es gibt für die verschiedensten Anwendungen eine Vielzahl verschiedener Bauarten von Verdichtern (Abbildung 5). Abhängig von den Anforderungen (Druck, Volumen, Kälteleistung, Betriebsstunden, etc.) eignen sich die einzelnen Verdichter unterschiedlich gut. Es gilt daher, gemeinsam mit dem Hersteller zu überprüfen, ob die in Betrieb stehende Verdichter-Bauart die aktuellen und zukünftigen Anforderungen ideal erfüllen kann. Gerade bei älteren Anlagen, bei denen grössere Revisionen anstehen, ist eine grundlegende Untersuchung sinnvoll.

### B) Anforderung an Elektromotoren in der Kältetechnik

Elektromotoren, deren Energieeffizienz nicht unabhängig vom Produkt erfasst werden kann, müssen seit Juli 2021 das Effizienzniveau IE3 (ab 0.75 kW) oder IE2 (bis 0.75 kW) und ab Juli 2023 IE4 (75 bis 200 kW) erreichen. Bei Anwendung offener Verdichter-Bauarten müssen die Antriebsmotoren den Anforderungen der EnV SR 730.02 entsprechen. Mindestanforderungen an Motoren und FU werden auf der Website [www.topmotors.ch/de/normen](http://www.topmotors.ch/de/normen) ausführlich beschrieben.

Für den gleichen Kältemittelverdichter sind je nach Drehfrequenz und Betriebsbedingungen verschiedene Motoren mit unterschiedlicher Leistung erforderlich. Bei allen Verdichtertypen dürfen der vom Hersteller angegebene Bereich der Drehzahlen weder unter- noch überschritten werden.

### C) Einsatz der Kältemittelverdichter bezogen auf den Saugvolumenstrom in m<sup>3</sup>/h

Hubkolbenverdichter	bis 1500 m <sup>3</sup> /h
Spiralkolben (Scroll)	bis 500 m <sup>3</sup> /h
Schraubenverdichter	von 100 - 10 000 m <sup>3</sup> /h
Turboverdichter	von 250 - 50 000 m <sup>3</sup> /h

### D) Einflüsse auf die Energieeffizienz der Kältemittelverdichter

■ **Kältemittel:** Je nach Stoffdaten des Kältemittels (Dichte, molekulare Masse, spezifische Wärmekapazität) ergeben sich unterschiedliche Wirkungsgrade, die Auswirkung auf die EER- oder COP-Werte haben.

■ **Bauart der Verdichter:** Bei gleichem Kältemittel und gleichen Betriebsbedingungen kann der COP (EER) um 10% bis 20% variieren (Werkstoffe, Schadraum, Konstruktion) (Abbildung 4).

■ **Das Druckverhältnis,** beziehungsweise das Verhältnis Verflüssigungstemperatur zu Verdampfungstemperatur, ist massgebend für die Effizienz eines Verdichters.

■ **Allgemein kann festgehalten werden:** Je tiefer die Verflüssigungstemperatur und je höher die Verdampfungstemperatur ist, desto effizienter arbeitet der Verdichter.

■ **Unterkühlung des Kältemittels:** Eine Kältemittelflüssigkeit ist unterkühlt, wenn ihre Temperatur tiefer als die Verflüssigungstemperatur ist. Eine Unterkühlung kann sowohl mit Wärmeübertrager und externer Wärmeabfuhr, als auch mit Kältekreis-interner Wärmeübertragung und der Economizer-Schaltung erreicht werden.

**Beispiel:** Eine Unterkühlung des Kältemittels R134a um 3K bei einer Verflüssigungstemperatur von 45°C und einer Verdampfungstemperatur von 3°C erhöht den EER um 3,4%, bei 5K um 5,4%.

■ **Auslegung der Komponenten:** Der Anwendungsbereich, der Druckabfall und die Einbauart haben direkten Einfluss auf die Energieeffizienz.

### E) Komponenten, die zur Effizienz beitragen

Verdichter oder Turboverdichter

■ Frequenzumrichter (Invertertechnologie)

■ Regelung des Volumenstromes

■ Magnetventil (Zylinderabschaltung zur Mengenregelung)

■ Economiser

■ Vordrallregelung (Turbo)

Verflüssigerventilatoren bzw. Rückkühler druck- oder aussentemperaturabhängig

■ Frequenzumrichter

■ Elektronisch kommutierte Motoren (EC Motoren)

Wärmetauscher-Grädigkeit gemäss Leitfaden mit Massnahmen zur Optimierung von Kälteanlagen, [www.pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/6478](http://www.pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/6478) (Seite 15).

## F) Beobachtungen vor Ort

Welche Parameter und sichtbaren Effekte deuten auf eine schlechte Effizienz des Motorverdichters?

- Typenschild oder Aufkleber vorhanden?
- Braune Verfärbung der Zylinderdeckel am Verdichter
- Abbröckeln der Farbe am Verdichter
- Vereiste Saugleitung
- Dunkel verfärbtes Öl im Schauglas
- Blasenbildung im Kältemittelschauglas vor dem Expansionsventil
- Kurzes Ein-Aus-Schalten des Verdichters; üblich sind max. 6 bis 10 Ein-Aus-Schaltungen pro Stunde
- Laufgeräusche oder Vibrationen
- Temperaturdifferenz zwischen Verdampfungstemperatur und Kälteträgeraustritt  $\geq 5$  K
- Temperaturdifferenz zwischen Verflüssigungstemperatur und Wärmeträgeraustritt  $\geq 5$  K
- Temperaturdifferenz zwischen Lufteintritt und Verflüssigungstemperatur  $\leq 13$  K sind in Ordnung. Anzustreben sind 8 K
- Anwendungstemperaturen der Verbraucher sind zu tief.
- Heizen und Kühlen gleichzeitig im gleichen Raum
- Leerstehende Räume oder stehende Prozesse werden weiterhin gekühlt.
- Stromaufnahme des Verdichters mehr als 10% höher als bei Inbetriebsetzung (Verflüssigungstemperatur höher).
- Stromaufnahme des Verdichters mehr als 10% höher als bei Inbetriebsetzung (Verdampfungstemperatur tiefer).
- Abwärmenutzung wird auf zu hohem Temperaturniveau betrieben.
- Kältemitteldrücke zu hoch (Ursache: Verschmutzung der Wärmetauscher, falsches oder gemischte Kältemittel, Luft oder Fremdgas in der Anlage).

## Was darf nicht sein

- Auf korrekte Speicherdimesionierung achten: wenn der Durchmesser des Speichers zu gross gewählt wird, ist die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers im Speicher praktisch Null. Dies führt zu Fehlzirkulationen und zu einer fehlerhaften Regelung.

KWS (Kaltwassersatz, Kaltwassererzeugung)

- Mangel der Dämmung der Saugleitungen
- Mangel der Dämmung der Hochdruckleitung bei AWN
- Mangel der Dämmung von Kalt- und Warmwasserspeicher, deren Leitungen und Verteiler

■ Vorverdampfung von Kältemittel im Sammler, Rohrbündelverflüssiger, Leitungsnetz. Die Verdampfung darf erst im Verdampfer selber erfolgen, da eine Vorverdampfung des Kältemittels die Effizienz der Anlage negativ beeinflusst.

■ Mangel an Wartung, die Folgen (siehe Artikel 58 Obligationenrecht OR)

# Praxisbeispiele

## Beispiel 1

Vergleich der Energy Efficiency Ratio (EER) einer Anlage mit den Kältemitteln NH<sub>3</sub>, R407C, R134A und R410A bei 30°C und 45°C Verflüssigungstemperatur. Die Auslegung erfolgte mit Software von Copeland und Bitzer.

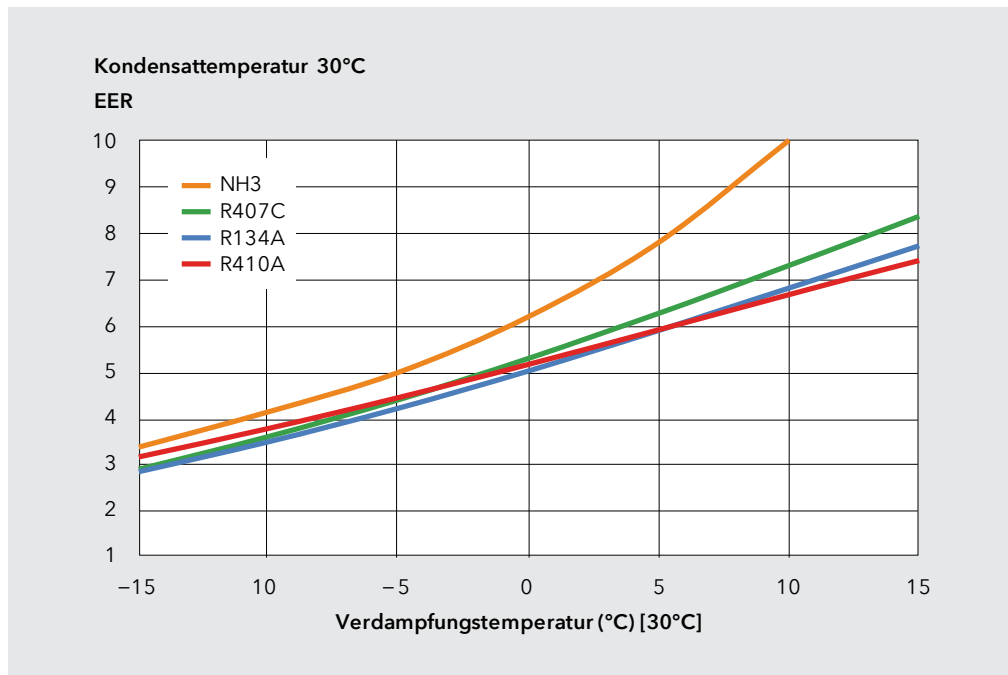


Abbildung 7: Vergleich von Wirkungsgraden mit unterschiedlichen Kältemitteln, 30°C. (Quelle: Clima Net AG, 2017)

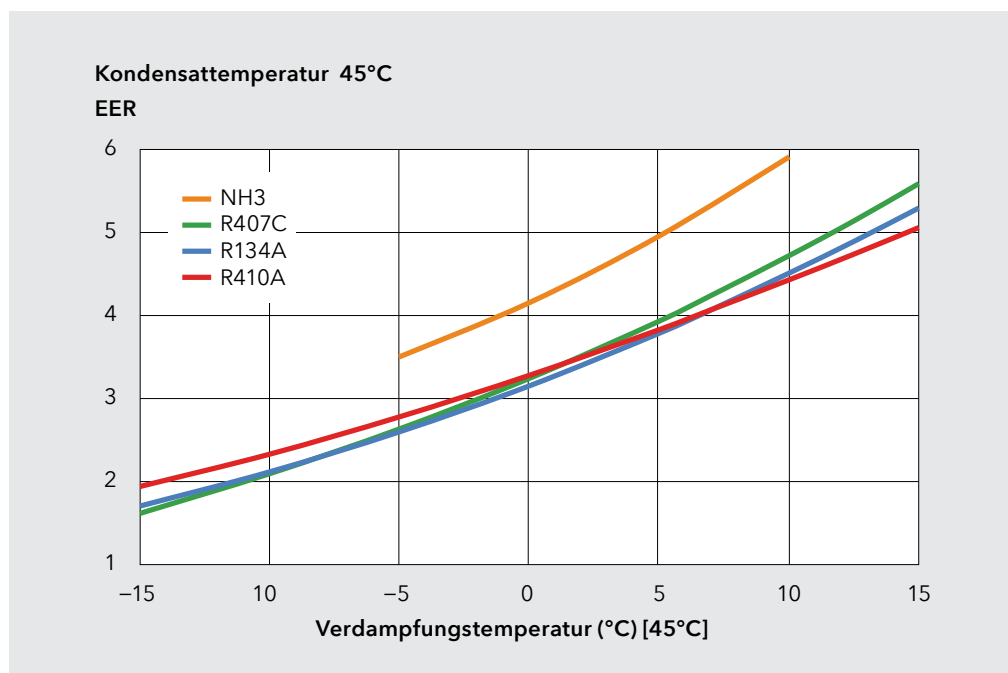


Abbildung 8: Vergleich von Wirkungsgraden mit unterschiedlichen Kältemitteln, 45°C. (Quelle: Clima Net AG, 2017)

## Beispiel 2

Mit log-p-h-Diagramm für Kältemittel R410A

	Anlage I	Anlage II
Verflüssigungstemperatur $t_c$	48,0°C	40°C
Unterkühlung des Kältemittels $t_u$	1,0°C	5,0°C
Verdampfungstemperatur $t_o$	1,0°C	4,0°C
Druckabfall Verdampfer (kältemittelseitig)	1,00 bar	0,50 bar
Druckabfall Verflüssiger (kältemittelseitig)	1,00 bar	0,50 bar
Druckabfall in Saugleitung	0,30 bar	0,02 bar
Druckabfall in Druckleitung	0,50 bar	0,30 bar
Druckabfall in Flüssigkeitsleitung	0,05 bar	0,02 bar
Isentropeneffizienz	0,9	0,9
EER	3,52	5,54

### Ergänzungsbericht zum log-p-h-Diagramm

Durch welche Massnahmen hätte die Energieeffizienz der Anlage I an Anlage II angepasst werden können?

#### Verflüssigungstemperatur

■ Vergrößerung der Verflüssigerfläche durch eine kleinere Temperaturdifferenz zwischen Lufteintritt in den Verflüssiger und Verflüssigungstemperatur.

■ Regelung der Verflüssigungstemperatur angepasst an

die Aussentemperatur (aussentemperaturgeführte Sollwertverschiebung).

■ Die Unterkühlung sichert ein blasenfreies Kältemittel vor dem Expansionsorgan durch:

■ Stehender Kältemittelsammler

■ Zusätzliche Unterkühlungsschlange im luftgekühlten Verflüssiger (bis zu 10K)

■ Je nach Kältemittel sinnvoll: innere Wärmetauscher-Unterkühlung der KM-Flüssigkeit und Überhitzung des Saugdampfes

■ Im BWW-Speicher (Abwärmenutzung) durch einen zusätzlichen Wärmetauscher

#### Verdampfungstemperatur

■ Grössere Verdampferfläche durch kleineres Delta T zwischen Verdampfungstemperatur und Kaltwasser-Austrittstemperatur

■ Anpassung der Nutzttemperatur

#### Druckabfall

■ Druckabfall im Verdampfer und Verflüssiger kältemittelseitig minimieren. Konstruktionsbedingt lässt sich der Druckabfall zum Beispiel durch ideale Einspritzverteilung, optimalen Kältemittelmassenstrom und geringe Strömungsturbulenz verbessern.

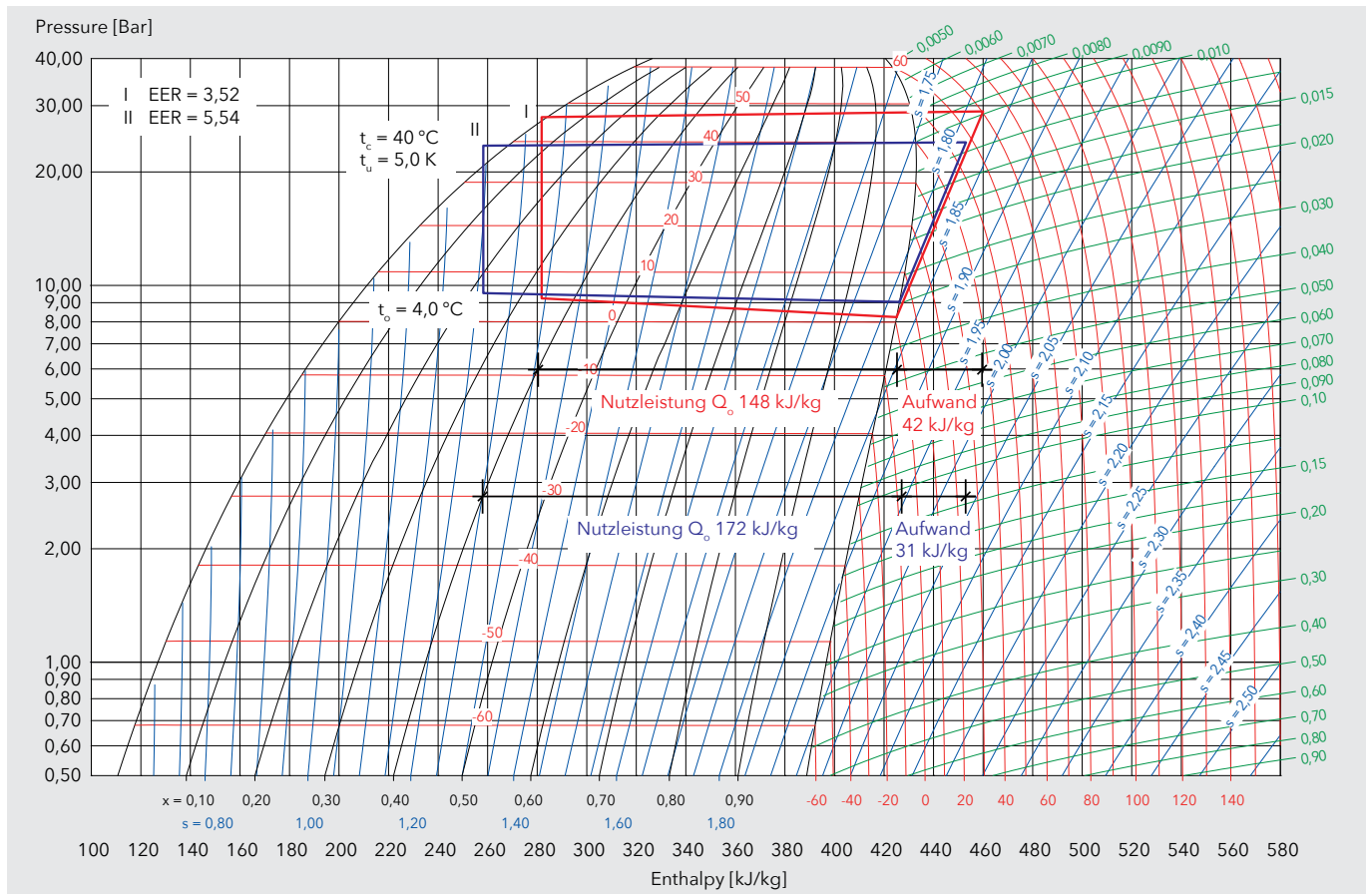


Abbildung 9: Vergleich zweier Kälteanlagen mit dem Kältemittel R410a. (Quelle: Robert Dumortier), 2017

### Beispiel 3: Serverraum (Free Cooling)

In grösseren Serverräumen (Abbildung 10) wird die Zuluft über einen Hohlraumboden unten in den Serverschrank zugeführt und die warme Abluft oben an Decke abgesaugt. Dieses Grundprinzip ist gut. Schlecht ist, wenn die Luft zu kalt ist (24 °C wäre richtig), die Umluftmenge nicht auf eine Temperaturdifferenz von zum Beispiel 10 K eingestellt ist und dass die Kühlung nicht über die Aussenluft erfolgt. Erst bei Aussentemperatur über 22 °C sollte eine Kältemaschine in den Kreis geschaltet werden.

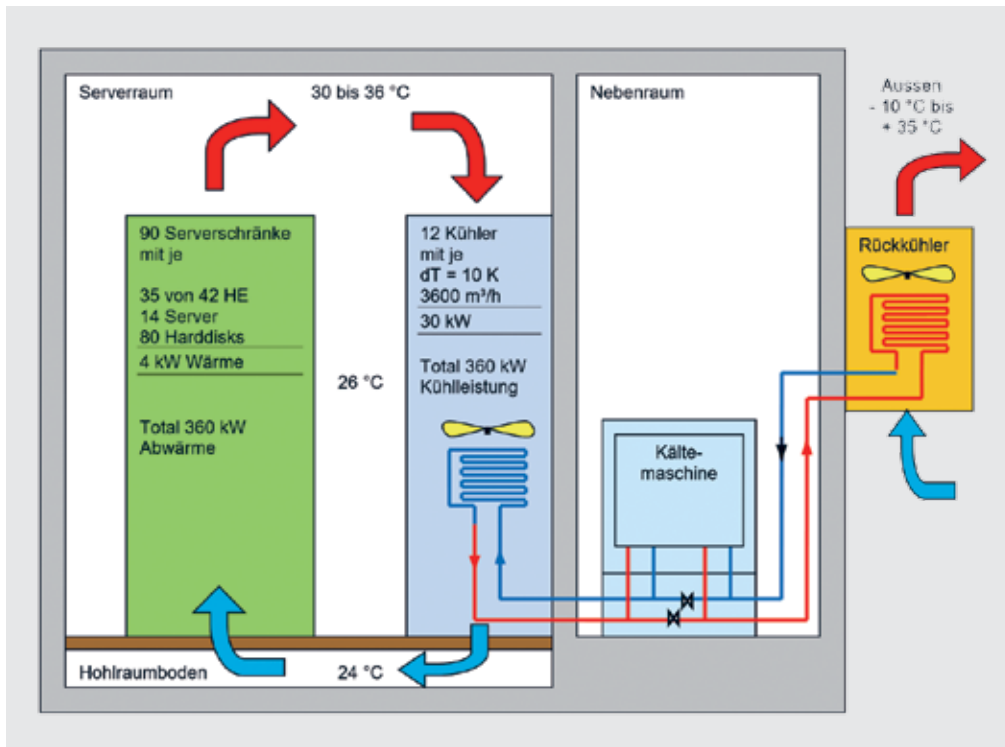


Abbildung 10: Free Cooling Serverraum. (Quelle: energie.ch, 2017)



## Beispiel 4: Kompressionskreislauf

### Schritt 1: Verdampfer

In Abbildung 11 wird das Kältemittel im Verdampfer bei einem Druck von 1 bar auf einem Temperaturniveau von  $-20^{\circ}\text{C}$  verdampft. Um etwas zu kühlen, muss der Verdampfer kälter als das Kühlgut sein. In diesem Beispiel hat das Kühlobjekt eine Temperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$ . So kann die Wärme über eine Temperaturdifferenz von 10 K (zwischen Verdampfer und Kühlobjekt) vom Verdampfer aufgenommen werden. Das Kühlobjekt kühlt somit ab. Auf der unteren Skala ist die Veränderung der spezifischen Enthalpie (Wärmeinhalt pro Masse) von 270 kJ/kg auf 420 kJ/kg ersichtlich, was eine Differenz von 150 kJ pro kg Kältemittel im Umlauf ergibt.

### Schritt 2: Verdichter

Im Verdichter steigt durch die Komprimierung des gasförmigen Kältemittels auf 10 bar die Temperatur auf  $80^{\circ}\text{C}$ . Dabei erhöht sich die Enthalpie von 420 kJ/kg auf 470 kJ/kg, also um 50 kJ/kg. Somit ergibt sich für die Kältemaschine eine Kältezahl von 3,0 ( $\text{EER} = (150 \text{ kJ/kg}) / (50 \text{ kJ/kg}) = 3$ ). Theoretisches Maximum wäre eine Kältezahl von 6,6 ( $\text{EER} = (263 \text{ kJ/kg}) / (40 \text{ kJ/kg}) = 6,6$ ). Eine Kältezahl von 3 entspricht somit einem Gütegrad von 45% (ohne Berücksichtigung der weiteren Verluste im Antriebsmotor und Zubehör).

### Schritt 3: Verflüssiger

Im Verflüssiger kühlt (enthitzt) sich das gasförmige Kältemittel von  $80^{\circ}\text{C}$  auf  $40^{\circ}\text{C}$  ab und verflüssigt sich wieder - es kondensiert. Die Enthalpie nimmt im Kondensator von

470 kJ/kg auf 270 kJ/kg ab, was der Summe der vorherigen Anstiege der Enthalpie im Verdampfer und Kompressor entspricht. Damit das Kältemittel kondensiert und Wärme abgeben kann, muss der Kondensator wärmer als die Umgebungstemperatur sein. In diesem Beispiel liegt die Kondensationstemperatur mit  $40^{\circ}\text{C}$  10 K über der Umgebungstemperatur von  $30^{\circ}\text{C}$  (Abbildung 11). Man sieht in dieser Darstellung auch, dass bei steigender Kondensationstemperatur die Wärmeabgabe abnimmt, bis sich das Kühlmittel überhaupt nicht mehr verflüssigen kann und die Kältemaschine nicht mehr kühlt.

### Schritt 4: Expansionsorgan

In Abbildung 12 ist die Umgebungstemperatur  $50^{\circ}\text{C}$  und die Verflüssigungstemperatur entsprechend den Annahmen aus Abbildung 11 um 10 K höher, also bei  $60^{\circ}\text{C}$ . Man sieht, dass dadurch die Kühlung im Verdampfer wie bisher bei  $-20^{\circ}\text{C}$  weiter rechts beginnt. Die Wärmeaufnahme (Kühlung) beträgt nun 290 kJ/kg auf 420 kJ/kg, was eine Differenz von 130 kJ/kg ergibt. Der Verdichter muss auf einen Druck von 20 bar verdichten und erhöht die Enthalpie von 420 kJ/kg auf 480 kJ/kg, eine Differenz von 60 kJ/kg. Die Kältezahl verschlechtert sich dadurch auf einen Wert von 2,2 ( $\text{EER} = (130 \text{ kJ/kg}) / (60 \text{ kJ/kg}) = 2,2$ ). Theoretisches Maximum wäre eine Kältezahl von 4,4 ( $\text{EER} = (263 \text{ kJ/kg}) / (60 \text{ kJ/kg}) = 4,4$ ). Eine Kältezahl von 2,2 entspricht somit einem Gütegrad von 50% (ohne Berücksichtigung der weiteren Verluste).

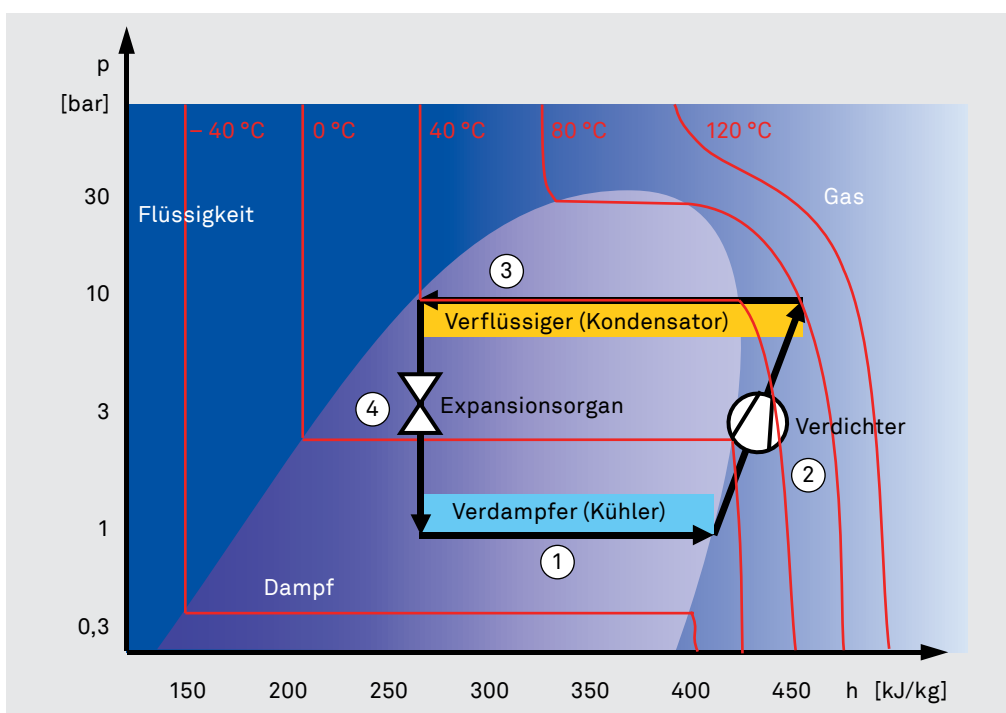


Abbildung 11: Enthalpie-Druck-Diagramm einer Kältemaschine mit  $-10^{\circ}\text{C}$  Kühltemperatur und  $30^{\circ}\text{C}$  Umgebungstemperatur. (Quelle: energie.ch, 2017)

## Unterkühlung

Wenn Kühlwasser zur Verfügung steht, besteht die Möglichkeit, nach der Verflüssigung mit Umgebungswärme das Kühlmittel zusätzlich mit Kühlwasser weiter abzukühlen. Man nennt diese Möglichkeit «Unterkühlung», welche in Abbildung 13 (basiert auf Abbildung 11) dargestellt wird. Dadurch beginnt die Kühlung im Verdampfer wie bisher bei  $-20^{\circ}\text{C}$ , weiter links. Die Wärmeaufnahme (Kühlung) beträgt nun  $240\text{ kJ/kg}$  auf  $420\text{ kJ/kg}$ , was eine Dif-

ferenz von  $180\text{ kJ/kg}$  ergibt. Der Kompressor muss wie in Abbildung 11 auf einen Druck von  $10\text{ bar}$  verdichten und erhöht dabei die Enthalpie um  $50\text{ kJ/kg}$  (von  $420\text{ kJ/kg}$  auf  $470\text{ kJ/kg}$ ).

Die Kältezahl verbessert sich dadurch auf einen Wert von  $3,6$  ( $\text{EER} = (180\text{ kJ/kg}) / (50\text{ kJ/kg}) = 3,6$ ). Theoretisches Maximum wäre, bezogen auf die Umgebungswärme, eine Kältezahl von  $6,6$  ( $\text{EER} = (263\text{ kJ/kg}) / (40\text{ kJ/kg}) = 6,6$ ). Eine

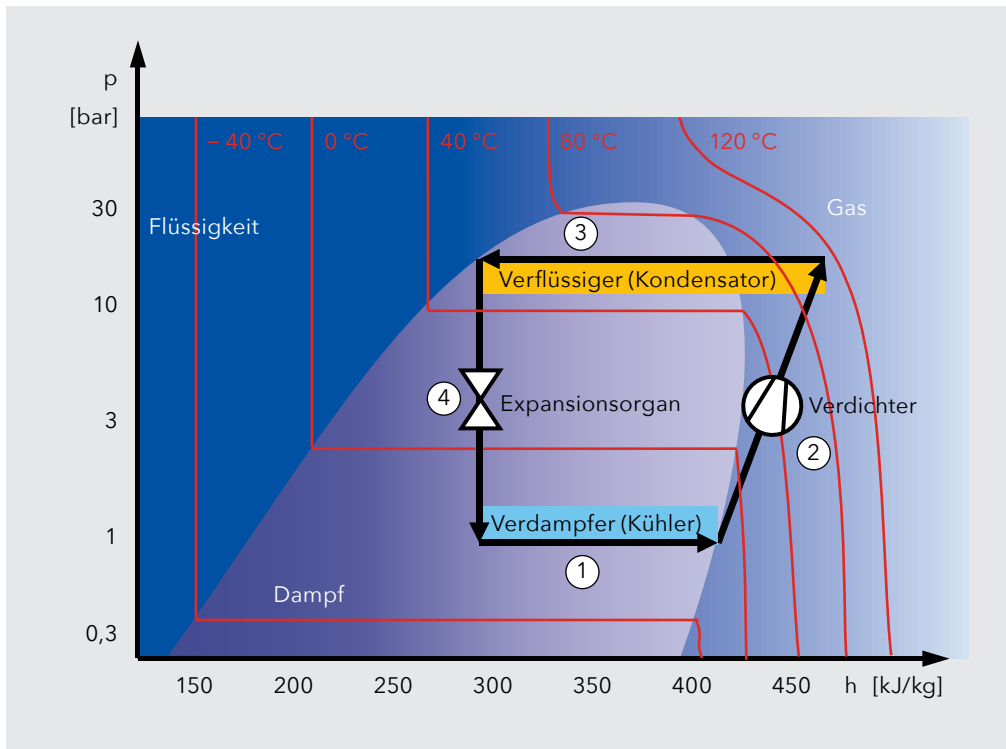


Abbildung 12: Enthalpie-Druck-Diagramm einer Kältemaschine mit  $-10^{\circ}\text{C}$  Kühltemperatur und  $50^{\circ}\text{C}$  Umgebungstemperatur. (Quelle: energie.ch, 2017)

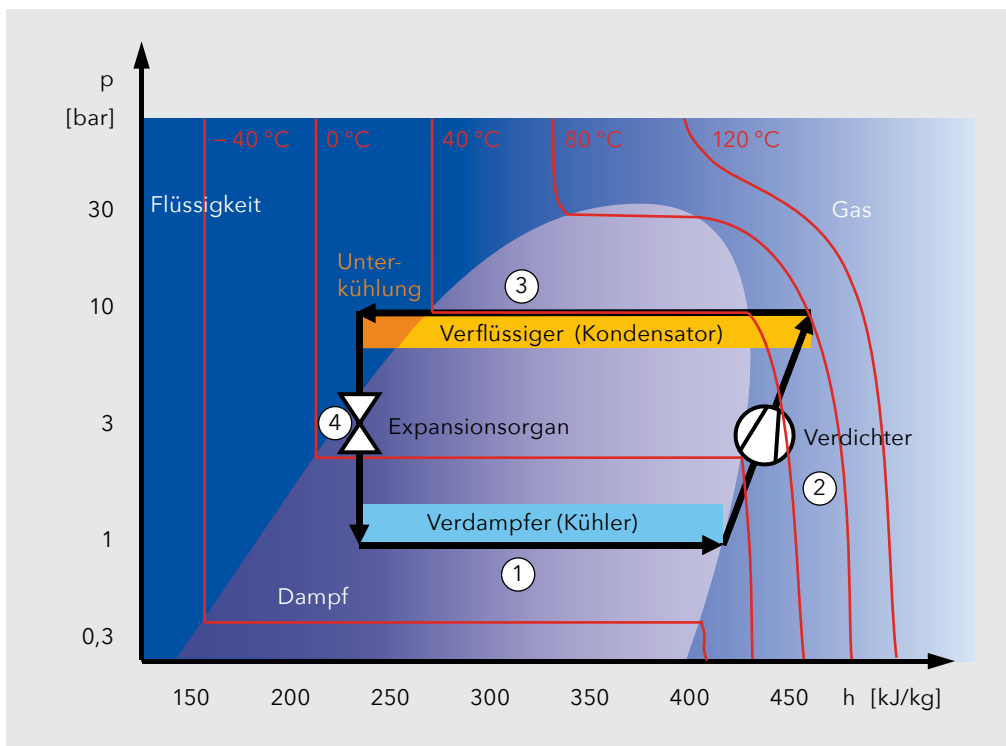


Abbildung 13: Enthalpie-Druck-Diagramm einer Kältemaschine mit  $-10^{\circ}\text{C}$  Kühltemperatur,  $30^{\circ}\text{C}$  Umgebungstemperatur und Kühlwasser mit  $15^{\circ}\text{C}$ . (Quelle: energie.ch, 2017)

Kältezahle von 3,6 entspricht somit einem Wirkungsgrad von 55 % des theoretischen Maximums. Bezogen auf das Temperaturniveau des Kühlwassers von 15 °C ergibt sich aber eine Kältezahle von 10,5 ( $EER = (263 \text{ kJ/kg}) / (25 \text{ kJ/kg}) = 10,5$ ) was noch einen Gütegrad von 34% entspricht. Da aber der grosse Teil der Kühlung (470 kJ/kg auf 270 kJ/kg = 200 kJ/kg) mit Umgebungswärme und nur ein kleiner Teil (270 kJ/kg auf 240 kJ/kg = 30 kJ/kg) mit dem Kühlwasser erfolgt, ist die Unterkühlung eine effiziente Massnahme, vor allem, wenn Kühlwasser nur in beschränkter Menge zur Verfügung steht.

Hebt man die Kühltemperatur an, erhöht sich die Kältezahle auch. Eine weitere Verbesserung bewirkt eine Reduktion der Temperaturverluste in den beiden Wärmetauschern (Verdampfer und Kondensator) (Abbildung 14).

Je näher die Kühltemperatur an der Umgebungstemperatur liegt, desto bedeutender wird der Temperaturverlust in den Wärmetauschern. Der Temperaturverlust eines Wärmetauschers hängt von den Strömungsverhältnissen, dem Wärmedurchgangswiderstand und der Wärmetauscherfläche ab. Je grösser die Übertragungsfläche des Wärmetauschers, desto besser ist zwar sein Wirkungsgrad, aber desto teurer ist er in der Regel auch.

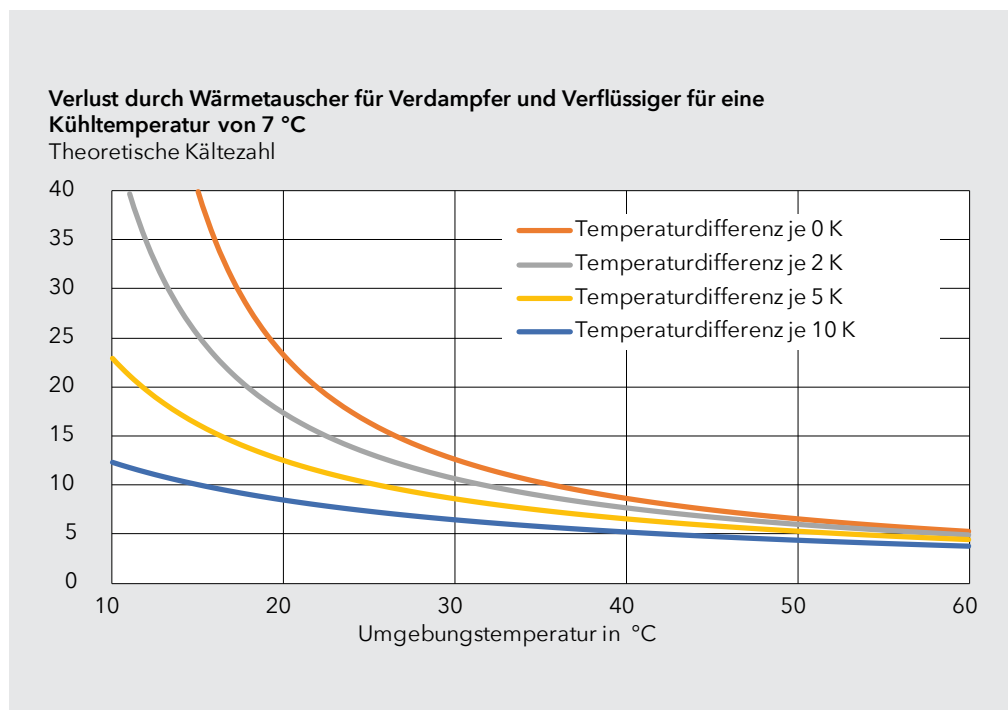


Abbildung 14: Theoretische maximale Kältezahle für 7 °C Kühltemperatur in Funktion der Umgebungstemperatur und für verschiedene Wärmetauscher (Verdampfer und Verflüssiger) 0 K, 2 K, 5 K und 10 K Temperaturdifferenz. (Quelle: energie.ch, 2017)

# Weiterführende Infos

## Begriffe und Einheiten

Abkürzung	Bezeichnung
AUL	Aussenluft
AWN	Abwärmenutzung
BoN	Betrieb ohne Nutzen
COP	Coefficient of Performance
EER	energy efficiency ratio
FOL	Fortluft
KVS	Kreislaufverbundsystem
KWS	Kaltwassersatz
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
WRG	Wärmerückgewinnung

## Normen, Gesetze und Quellen

- Verordnung (EU) 2019/1781 vom 1. Oktober 2019, Geltungsbeginn betreffend die Energieeffizienz von Motoren und FU: 1. Juli 2021, siehe Art. 12. Die Verordnung (EG) Nr. 640/2009 wird per 1. Juli 2021 aufgehoben.
- Energieeffizienzverordnung EnEV SR 730.02 vom 1. November 2017 (Stand 1. Juli 2021), Anhang 2.7 Elektromotoren und FU
- VDI 2048 Blatt1:2017 Kontrolle und Verbesserung der Qualität von Prozessdaten und deren Unsicherheiten mittels Ausgleichsrechnung bei Betriebs- und Abnahmemessungen
- VDI 2048 Blatt 1 Berichtigung:2019
- VDI 2048 Blatt 2:2018 Kontrolle und Verbesserung der Qualität von Prozessdaten und deren Unsicherheiten mittels Ausgleichsrechnung bei Betriebs- und Abnahmemessungen - Beispiele, insbesondere Retrofitmassnahmen
- VDI 2048 Blatt 3:2012 Messunsicherheiten bei Abnahmemessungen an energie- und kraftwerkstechnischen Anlagen - Beispiele, insbesondere Vorbereitung der Abnahme einer Kombi-Anlage
- IEC 60034-30-1:2014 Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code)
- EnergieSchweiz: Kälteanlagen, [www.energieschweiz.ch/prozesse-anlagentechnik/kaelteanlagen](http://www.energieschweiz.ch/prozesse-anlagentechnik/kaelteanlagen), zuvor BFE-Kampagne: Effiziente Kälte
- SN EN 378-1+A1:2021-02 Kälteanlagen und Wärmepumpen (SN EN 378-1:2017 wurde zurückgezogen)

- Übersicht über die wichtigsten Kältemittel: [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch) → «Kältemittel» und «Übersicht wichtigste Kältemittel»
- Energieeffizienzverordnung EnEV SR 730.02, 2018, Anhang 1.14: Prozesskühler, Verflüssigungsätze
- Ecodesign Verordnung EU 2015/1095 (Geltungsbereich/Anwendungsfall beachten!)
- Ecodesign Verordnung EU 2016/2281, Luftheizprodukte, Kühlungsprodukte und Prozesskühler (Geltungsbereich/Anwendungsfall beachten, heute noch nicht in der EnEV erwähnt)

## Editorischer Vermerk

Das Merkblatt Kälteanlagen in der Industrie wurde von Impact Energy im Rahmen des Umsetzungsprogrammes für effiziente Antriebssysteme Topmotors erstellt. Es wurde von Conrad U. Brunner (iE), Oliver Gässler (E&P), Denis Pereira und Daniel Keller (Clima Net), Robert Dumortier, Rolf Gloor (Gloor Engineering) und Rolf Tieben (iE) 2017 erarbeitet und 2021 von Christoph Messmer (FHNW), Viktor Hangartner und Rolf Tieben (iE) teilweise aktualisiert (insb. Normen, Gesetze und Quellen). Lektorat und graphische Umsetzung: Faktor Journalisten AG