

Unterkühlung: Der Schlüssel für Effizienz und Betriebssicherheit

Gewiefte Maschinenbauer und Planer unterkühlen gezielt das Kältemittel. Sie erhöhen so die Betriebssicherheit und verbessern die Energieeffizienz von Kälteanlagen um bis zu 25 Prozent. Eine Studie der ZHAW beleuchtet die verschiedenen Unterkühlungsarten. Ob interner Wärmetauscher, Economiser oder externer Unterkühler: Richtig ausgelegt und integriert erhöhen sie alle die Effizienz.

Genauso, wie viele Leistungssportler mit einem klirrenden Eisbad eine körperliche Leistungssteigerung anstreben, nutzt auch die Kältetechnik aktiv die Unterkühlung. Gewiefte Maschinenbauer und Planer unterkühlen gezielt das Kältemittel und erhöhen so die Betriebssicherheit und die Energieeffizienz der Kälteanlage.

EnergieSchweiz wollte genau wissen, welchen Nutzen eine Unterkühlung bringt, welche Schaltungen sich in welcher Situation eignen und wie gross die möglichen Effizienzgewinne bei Kälteanlage sind.

Das Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering der ZHAW hat mit einer Grundlagenstudie die Fragestellung für EnergieSchweiz untersucht. In diesem Faktenblatt finden sich die wichtigsten Ergebnisse der Studie knapp und verständlich zusammengefasst. Kälteexpertinnen und Kälteexperten, die es genau wissen wollen, können alle Berechnungen und Ergebnisse in der Grundlagenstudie nachlesen (siehe Seite 14).



Was ist Unterkühlung?

Unterkühlung

Im Verflüssiger (Kondensator) entzieht der kühle Wärmeträger (Luft oder Wasser) dem heissen, gasförmigen Kältemittel Energie ($2 \rightarrow 3'$). Dabei kühlt das Kältemittel ab und kondensiert – es wechselt seinen Aggregatzustand von dampfförmig zu flüssig. Wird das Kältemittel an der Siedelinie nach der vollständigen Kondensation weiter abgekühlt, bezeichnet man dies als Unterkühlung ($3' \rightarrow 3$).

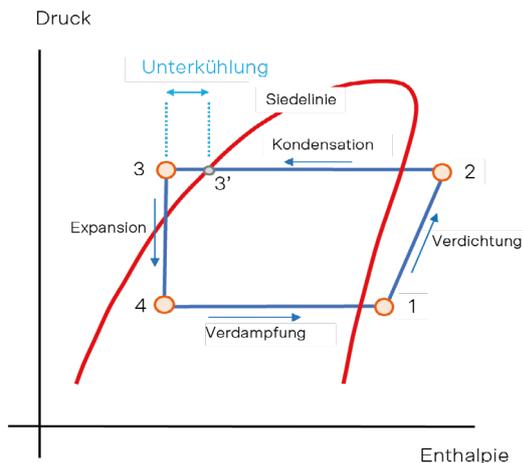


Bild: Unterkühlung im log p-h-Diagramm

Warum wird das Kältemittel unterkühlt?

Die Unterkühlung ist notwendig, um vor dem Expansionsventil (3) Dampfblasen im Kältemittel zu vermeiden. Dies ist für einen stabilen und sicheren Betrieb der Anlage unerlässlich. Denn zu viele Gasblasen – sogenanntes Flash-Gas – führen zu einem instabilen Betrieb und können sogar das Expansionsventil beschädigen. Zudem reduzieren sie die Kälteleistung und senken so die Energieeffizienz der Anlage.

Grundsätzlich braucht jede Anlage für einen reibungslosen Betrieb eine minimale Unterkühlung. Ob die Unterkühlung zu einer Steigerung der Effizienz führt, ist zuerst einmal sekundär.

Betriebssicherheit und Energieeffizienz

Wie stark das Kältemittel für die Betriebssicherheit unterkühlt werden muss, ist stark abhängig von der Bauart der jeweiligen Kälteanlage. Zudem spielen folgende Punkte eine wichtige Rolle:

- Druckverluste und Höhendifferenz
z.B. durch grosse Höhenunterschiede zwischen Verflüssiger (Sammler) und Verdampfer (Kühlstelle) in Gebäuden
- Wärmeeintrag im Kältekreislauf
(z.B. über Leitungen und Armaturen).

Wird das Kältemittel über diesen Punkt hinaus unterkühlt, lässt sich die Energieeffizienz der Kälteanlage steigern. Dabei gibt es klare Grenzen, innerhalb derer die Unterkühlung sinnvoll ist.

Grenzen der Unterkühlung

Eine zu starke Unterkühlung verhindert allerdings nicht nur Flash-Gas vor dem Expansionsventil, sondern auch Gasblasen nach dem Expansionsventil (4). Doch diese Gasblasen – respektive ein minimaler Dampfgehalt nach der Expansion – ist für einen störungsfreien Betrieb des Expansionsventils zwingend notwendig. Denn der Dampf dämpft beim Einschalten den Prozess und verhindern so hydraulische Schläge in den Ventilen und Rohrleitungen.

Zudem verbessern die Gasblasen den Wärmedurchgang im Verdampfer ($4 \rightarrow 1$) und somit die Energieeffizienz der Anlage. Darum darf nur so stark unterkühlt werden, dass der minimal nötige Dampfgehalt den Vorgaben des Herstellers des Expansionsventils entspricht.

Arten der Unterkühlung

Permanente und temporäre Unterkühlung

Bei der permanenten Unterkühlung wird das Kältemittel dauernd zusätzlich unterkühlt. Dies geschieht beispielsweise mit Kaltwasser (Wärmesenke). In diesem Fall kann der Verdichter, die Expansionsventile und Leitungen kleiner dimensioniert werden.

Die kleineren Komponenten sind günstiger und dank der Unterkühlung arbeitet die Kälteanlage effizienter. Hingegen steigen die Betriebskosten als Folge des Aufwandes für die Unterkühlung (z.B. Kosten für das Kaltwasser und Strom für die Pumpen).

Bei einer temporären Lösung arbeitet die Unterkühlung hingegen zeitweise – beispielsweise, wenn beim Warmwasserspeicher der kalte Bereich im unteren Drittel für die Unterkühlung genutzt wird. Die Komponenten im Kältekreis müssen deshalb so dimensioniert werden, dass die Anlage ohne Unterkühlung funktioniert.

Vor allem bei permanenten Unterkühlungen mit einem internen Wärmetauscher ist zu beachten, dass die zusätzliche Unterkühlung die Überhitzung und Kälteleistung erhöht. Dies kann bei überdimensionierten Anlagen zu Problemen führen. Dies äussert sich beispielsweise in einer Überhitzung des Öles, was zu einer Verkokung führen kann.

Interne und externe Unterkühlung

Neben der «zeitlichen» Komponenten (permanent, temporär) unterscheidet sich die Unterkühlung danach, ob sie interne oder extern erfolgt.

Interne Unterkühlung

Bei der internen Unterkühlung wird das eigene Kältemittel für die Unterkühlung genutzt. Es wird keine Energie von aussen zu- resp. abgeführt. Die wichtigsten Schaltungen:

- Interner Wärmetauscher IWT
- Interner Wärmetauscher IWT mit Flüssigbypass
- Economiser
- Eigenunterkühlung

Externe Unterkühlung

Die externe Unterkühlung benötigt immer eine Wärmesenke, welche die Wärme abführt.

- Externer Unterkühler
- Booster mit externem Gaskühler / Unterkühler
- Kombination von Plus- und Minuskühlung

Im Folgenden werden die wichtigsten Schaltungen für die Unterkühlung beschrieben.

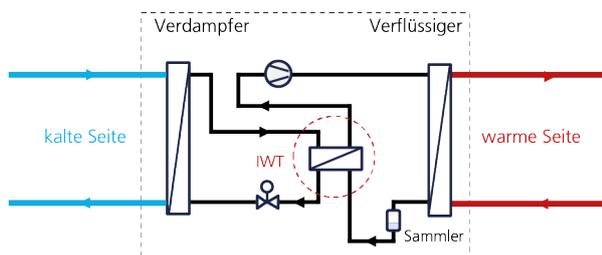
Kältemittel-Sammler

Um eine wirksame Unterkühlung zu erreichen, wird nach dem Verflüssiger ein Kältemittel-Sammler eingebaut. Dieser dient zum Zwischenspeichern von nicht benötigtem Kältemittel bei variablen Kältebelasten. Falls das Kältemittel bereits im Verflüssiger unterkühlt wird, erwärmt es sich im Sammler wieder und verliert so seine «Unterkühlung».

Eine Unterkühlung ohne Sammler ist nur möglich, wenn sichergestellt wird, dass das Kältemittel vor dem Unterkühler vollständig kondensiert ist (kein Gas mehr enthält). Bei einigen Split-Anlagen wird dies mit einem sehr gross dimensionierten Direktverflüssiger umgesetzt.

Interner Wärmetauscher IWT

Ein interner Wärmetauscher (IWT) entzieht dem Kältemittel nach dem Verflüssiger zusätzlich Wärme. So wird das Kältemittel vor dem Expansionsventil unterkühlt und gleichzeitig vor dem Verdichter (Sauggas) überhitzt.



Der interne Wärmetauscher ist eine sehr einfache Lösung, die bei allen Verdichterbauarten umgesetzt werden kann. Meist wird der IWT daher zur Optimierung der Betriebssicherheit eingesetzt. Bei bestimmten Konstellationen bringt der IWT auch energetische Vorteile. Allerdings geben die Überhitzung und die Verdichtungsendtemperatur, die durch den IWT beeinflusst werden, zusätzliche Einsatzgrenzen vor.

Effizienzsteigerung mit einem IWT

Ob und wie stark mit einem IWT die Effizienz der Kälteanlage gesteigert werden kann, hängt hauptsächlich von drei Faktoren ab:

1. Isentropenexponent des Kältemittels
2. Druckabfall im IWT
3. Verdampfungstemperatur

Isentropenexponent

Besonders Kältemittel mit einem Isentropenexponenten¹ nahe bei 1 (siehe Tabelle) eignen sich, um mit einem IWT auch die Effizienz der Kälteanlagen zu steigern.

Eignung	Kältemittel	Isentropenexponent ²
Oft geeignet	R290 (Propan)	1,07
	R1234ze	1,11
	R513A	1,12
Eignung prüfen	R449A	1,20
	R32	1,20
	R454B	1,21
In der Regel nicht geeignet	R744 (CO ₂)	1,30
	R717 (NH ₃)	1,31

Veränderung des EER in %

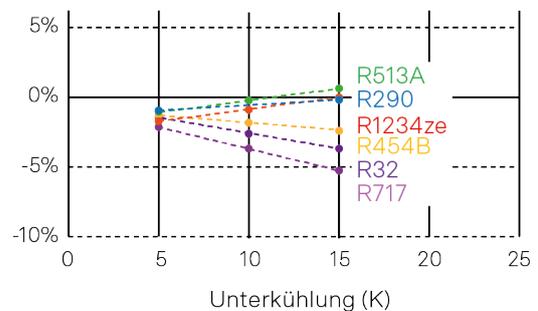


Bild: Veränderungen des EER einer Klimakälteanlage mit Kälte-träger ($T_0 = 5\text{ °C}$) bei unterschiedlichen Unterkühlungswerten. Druckabfall IWT 0,05 bar.

¹ Der Isentropenexponent ist das Verhältnis der Wärmekapazität des gasförmigen Kältemittels bei einem konstanten Druck zur Wärmekapazität des Kältemittels bei konstantem Volumen.

² Werte bei 1,013 bar und 0 °C

Verdampfungstemperatur

Der IWT wird umso effizienter, je tiefer die Verdampfungstemperatur ist. Dies trifft vor allem auf gewerblichen Anwendungen zu. Hier lohnt es sich, den Einbau eines IWT zu prüfen.

Besonders bei gewerblichen Kälteanwendungen lohnt es sich, einen IWT zu prüfen.

Druckabfall im IWT

Wird eine Steigerung der Effizienz angestrebt, sollte der Druckabfall im IWT im Bereich von 0,05 bar resp. bei 0,3 bis 0,5 K (äquivalenter Druckabfall) liegen. IWT mit einem Druckabfall von 0.1 bar und mehr sind zwar in der Anschaffung günstiger. Dafür verschlechtern sie den EER schnell einmal um 5 bis 30%, was zu entsprechend höheren Betriebskosten führt.

Zu gross dimensionierter IWT

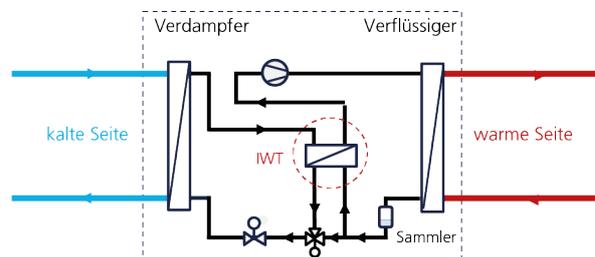
Zu gross dimensionierte IWT unterkühlen das Kältemittel übermässig. Die starke Unterkühlung verursacht eine Überhitzung des Kältemittels vor dem Verdichter, was wiederum zu Problemen bei der Verdichtung führen kann (Verdichtungsendtemperatur, Heissgastemperatur).

Bei der Dimensionierung des IWT müssen daher immer mehrere Betriebspunkte – und nicht nur der Auslegungspunkt – betrachtet werden.

Bei der Dimensionierung des IWT müssen immer beide Seiten beachtet werden – die Unterkühlung und die Überhitzung.

IWT mit Flüssigbypass

Die IWT-Schaltung mit Flüssigbypass hat ähnliche Eigenschaften wie die IWT-Schaltung ohne Bypass. Der Vorteil des Flüssigbypasses ist, dass die Überhitzung reguliert werden kann. Allerdings ist der Aufbau etwas aufwendiger.



Ein kritischer Blick

Einige Hersteller und Institutionen bieten Tools an, mit denen der Effizienzgewinn durch den IWT berechnet werden kann. Nutz man diese Tools ist folgendes zu beachten:

1. Berücksichtigt das Tool den Druckabfall über den IWT und wie gross ist dieser? Der Druckabfall ist eine der zentralen Grössen, welche die Effizienz beeinflusst. Tools, bei denen mit einem Druckabfall von 0 bar rechnen, dürften einen zu hohen Effizienzgewinn versprechen.
2. In der Regel wird der Effizienzgewinn im Auslegungspunkt ermittelt. Bei Anlagen, welche oft im Teillastbereich arbeiten – wie Klimakälteanlagen – müssen die Werte zwingend auch in den Teillastpunkten ermittelt und entsprechend gewichtet werden. Nur so kann eine Aussage über die Effizienz über das Jahr gemacht werden.

Economiser

Bei einer Economiser-Schaltung wird ein Teil des Kältemittels nach dem Verflüssiger abgezweigt und expandiert. Anschliessend wird im Economiser der Hauptstrom des Kältemittels unterkühlt und der Nebenstrom auf Mitteldruck in den Verdichter eingespeist.

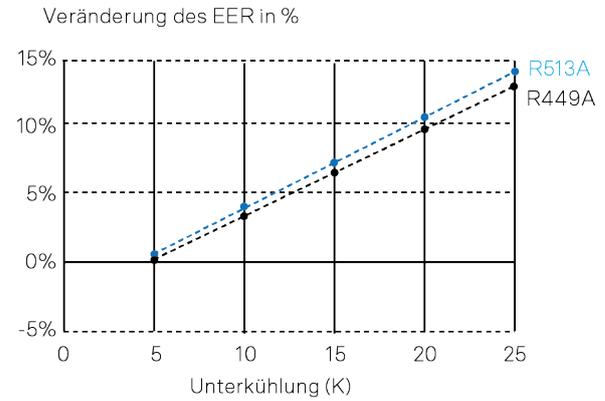
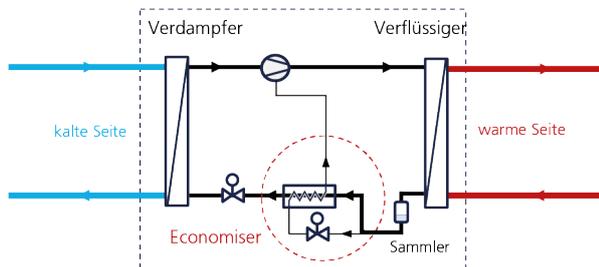


Bild: Veränderungen des EER bei einer Unterkühlung mit einem Economiser einer Pluskälte-Anlage ($T_0 = -10\text{ °C}$) bei unterschiedlichen Unterkühlungswerten.

Die zusätzliche Unterkühlung mit dem Economiser führt zu einer leichten Erhöhung der Kälteleistung. Zudem reduziert sich die Aufnahmeleistung des Verdichters, da ein Teil des Gesamtmassenstroms einen geringen Druckhub benötigt. Der Economiser erhöht somit die Effizienz einer Kältemaschine.

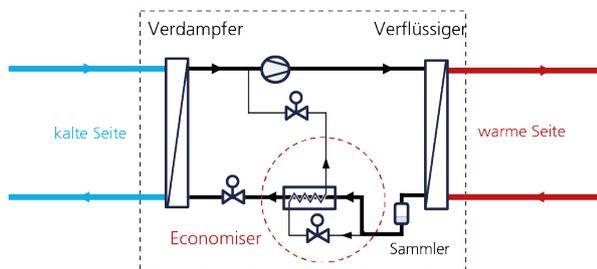
Zudem haben Kältemaschinen mit einem Economiser eine konstante Überhitzung und die Verdichtungsendtemperatur sinkt spürbar, was aus Sicht der Betriebssicherheit positiv ist.

Die Umsetzung der Schaltung ist etwas aufwendiger. Zudem können Economiser nur bei zweistufigen Prozessen oder bei Verdichtern gebaut werden, bei denen eine Einspeisung bei Mitteldruck möglich ist:

- Scroll-Verdichter
- Schrauben-Verdichter
- Turbo-Verdichter

Eigenunterkühlung

Bei der Eigenunterkühlung wird – wie beim Economiser – ein Teil des Kältemittels abgezweigt und damit der hauptsächlich Kältemittelstrom unterkühlt. Dazu wird mit einem Expansionsventil und einem Saugdruckregler (Verdampferdruckregler) ein «künstlicher» Mitteldruck erzeugt, bevor der Teilstrom nach dem Verdampfer dem Hauptstrom wieder zugeführt wird.



Die Eigenunterkühlung hat keinen Einfluss auf die Überhitzung und die Verdichtungsendtemperatur. Zudem kann sie bei allen Verdichterbauarten eingesetzt werden.

Sie hat aber (leider) auch keinen Einfluss auf die Effizienz der Anlage. Sie wird dann eingesetzt, wenn die minimal notwendige Unterkühlung nicht ohne zusätzliche Massnahmen erreicht werden kann. Dies kann beispielsweise bei einer Kälteanlage der Fall sein, bei der der Verflüssiger respektive der Sammler im Keller und die Kühlstellen (Verdampfer) in der 1., 2. und 3. Etage platziert werden.

Da diese Unterkühlungsart keinen Einfluss auf die Energieeffizienz hat, wurde sie in der Grundlagenstudie der ZHAW nicht genauer untersucht.

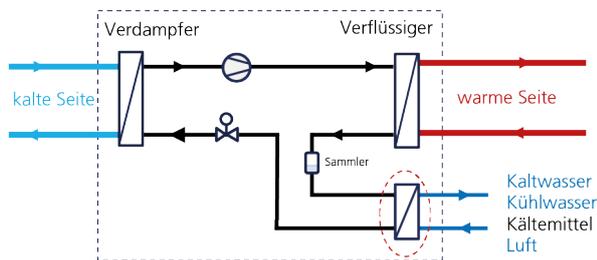
Spezialfall NH₃ (Ammoniak)

Ammoniak ist eines der besten Kältemittel – so-wohl aus Sicht der Energieeffizienz wie auch aus Sicht der Umwelt. Doch aufgrund seiner stofflichen Eigenschaften wie beispielsweise des hohen Isentropenexponenten (siehe Seite 4), eignet sich NH₃ nicht für die Unterkühlung mit einem IWT. Bei Economiser-Schaltungen ist der Effizienzgewinn gering. Und auch beim externen Wärmetauscher ist die Verbesserung des EER aufgrund einer zusätzlichen Unterkühlung nur halb so gross wie bei den anderen Kältemitteln.

Bei Ammoniak-Anlagen soll daher der Fokus der Unterkühlung bei der Betriebssicherheit liegen und nicht primär bei der Energieeffizienz.

Externer Unterkühler

Bei einer externen Unterkühlung wird das Kältemittel nach dem Verflüssiger und dem Sammler über einen zusätzlichen Wärmetauscher unterkühlt. Die Unterkühlung kann mit Kaltwasser, Kühlwasser, Kältemittel (2. Kältekreis) oder Luft erfolgen.

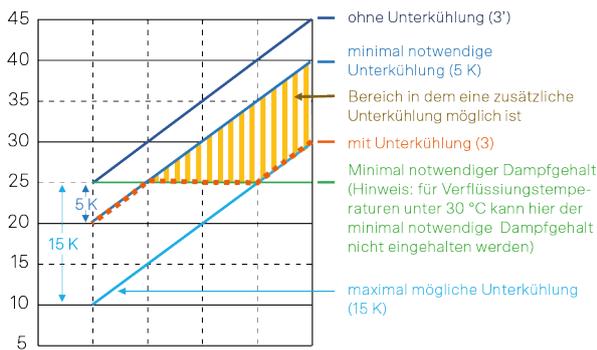


Der grosse Vorteil der externen Unterkühlung ist, dass sie nicht direkt auf den Verdichter einwirkt. Dadurch führt die zusätzliche Unterkühlung weder zu einer zusätzlichen Überhitzung noch zum Überschreiten der zulässigen Verdichtungs- endtemperatur. Zudem kann eine externe Unterkühlung bei allen Verdichterbauarten eingesetzt werden.

Grenzen bei der externen Unterkühlung

Die maximal mögliche zusätzliche Unterkühlung wird von der vorhandenen Wärmesenke vorgegeben (z.B. 15 K). Dieser Wert wird nach oben durch den minimal notwendigen Dampfgehalt im Kältemittel nach dem Expansionsventil begrenzt ($T_c \text{ min.} = 25 \text{ K}$). Nach unten erfolgt die Begrenzung durch die minimal notwendige Unterkühlung (5 K).

Temperatur des Kältemittels nach dem Unterkühler (Punkt 3') in °C



Temperatur des Kältemittels vor dem Unterkühler (Punkt 3) in °C

Effizienzsteigerung von 10 bis 15% möglich

Durch einen externen Unterkühler kann die Kälteleistung der Kälteanlage signifikant vergrössert werden. Dabei erhöht sich die Effizienz der Kälteanlage je nach Betriebspunkt und Kältemittel um bis zu 25%. Über das ganze Jahr entspricht dies einer Verbesserung der Energieeffizienz von 10 bis 15%.

Auch hier zeigt sich, dass Kältemittel mit einem kleinen Isentropenexponenten sich tendenziell besser für eine effiziente Unterkühlung eignen.

Veränderung des EER in %

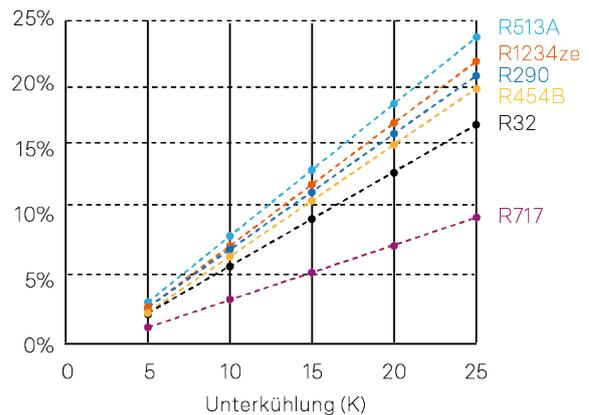


Bild: Veränderungen des EER einer Klimakälte Anlage mit Kälte- träger ($T_o = 5 \text{ °C}$) bei unterschiedlichen Unterkühlungswerten und verschiedenen Kältemitteln.

Beispiele von Wärmesenken

Welche Wärmesenken eignen sich?

Als Wärmesenken für die Unterkühlung eignen sich alle Medien, die eine tiefere Temperatur haben als das Kältemittel nach dem Verflüssiger. In der Praxis trifft man folgende Wärmesenken an:

Aussenluft

Die meisten Anlagen können mit Aussenluft unterkühlt werden. Aufgrund der Temperaturschwankungen garantiert dies jedoch keine permanente Unterkühlung mit fixen Temperaturen. Zudem sinkt der Beitrag der Unterkühlung im Teillastbetrieb. Doch besonders bei Kälteanlagen, die das ganze Jahr in Betrieb sind, kann die Aussenluft eine interessante Wärmesenke sein.

Trinkwasser (Kaltwasser)

Das Trinkwasser hat das ganze Jahr eine Temperatur von 10 bis 14 °C und würde sich gut für eine permanente Unterkühlung eignen. Will man mit Trinkwasser unterkühlen, müssen unbedingt die anfallenden Wasser- und Abwasserkosten sowie die jährlichen Zuschlagtaxten ermittelt und bei der Beurteilung einbezogen werden. Zudem muss in einigen Gemeinden eine Bewilligung eingeholt werden.

Grundwasser

Die Grundwassertemperaturen in der Schweiz liegen zwischen 5 und 15 °C und eignet sich für eine permanente Unterkühlung. Die Nutzung des Grundwassers ist bewilligungspflichtig. Zudem ist die Nutzung mit einem gewissen Aufwand (Bohrung) und allenfalls mit Nutzungskosten verbunden.

Warmwasserspeicher

Der Warmwasserspeicher wird mit 12 °C kaltem Trinkwasser gespeisen, das anschliessend auf 60 °C erwärmt wird. Dabei unterkühlt die tiefe Temperatur des Kaltwassers das Kältemittel, womit das Wasser im Speicher vorerwärmt wird (z.B. von 12 °C auf 25 °C). Bei der Vorerwärmung von Warmwasser handelt es sich meist um temporäre Unterkühlungen, da nicht zu jedem Zeitpunkt das Kaltwasser zuverlässig garantiert werden kann.

Erdwärmesonden

Kälteanlagen, die in ein System mit Erdwärmesonden eingebunden sind, können diese als Senke nutzen. Das 15 °C kalte Wasser aus der Erdwärmesonde unterkühlt die Kälteanlage und verbessert ihre Effizienz. Die Kälteanlage leistet im Gegenzug einen Beitrag an die Regeneration der Erdwärmesonde.

Anergie-Netz

Anergie-Netze arbeiten mit Temperaturen von 10 bis 20 °C. Sie eignen sich, sofern sie sich in unmittelbarer Nähe befinden, gut als Senke für eine permanente Unterkühlung. Allerdings sollten bei der Evaluation die Anschluss- und Betriebskosten genau bestimmt werden. So gibt es keine Überraschungen bei der Wirtschaftlichkeit.

Wirtschaftlichkeit

Eine gut geplante Unterkühlung führt zu tieferen Energiekosten. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung müssen jedoch auch zwingend die Investitions- und Betriebskosten mit einbezogen werden.

Investitionskosten

- Zusätzliche Aufwendungen im Kältekreis wie IWT, Leitungen, Ventile etc.: Bei einer permanenten Unterkühlung lassen sich auch Einsparungen erzielen.
- Zusätzliche Wärmetauscher (Verflüssiger, Warmwasserspeicher etc.)
- Anschlussleitungen Grundwasser, Anergie-Netz

Betriebskosten

- Kosten für Trinkwasser und Abwasser
- Stromkosten für die zusätzliche Ventilatoren und Pumpen
- Kosten für Grundwassernutzung
- Kosten für die Nutzung von Energie aus Anergie-Netzen

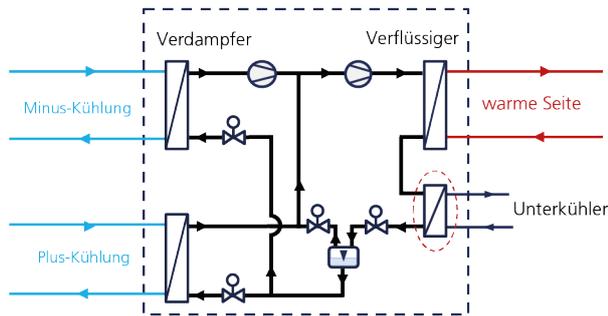
Die zusätzlichen Betriebskosten werden oft unterschätzt.

Nur wenn der Effizienzgewinn der Kältemaschine grösser ist als die zusätzlich benötigten Hilfsenergien, verbessert sich die Effizienz des Gesamtsystems.

Spezielle Lösungen

CO₂-Boosteranlage mit externem Unterkühler

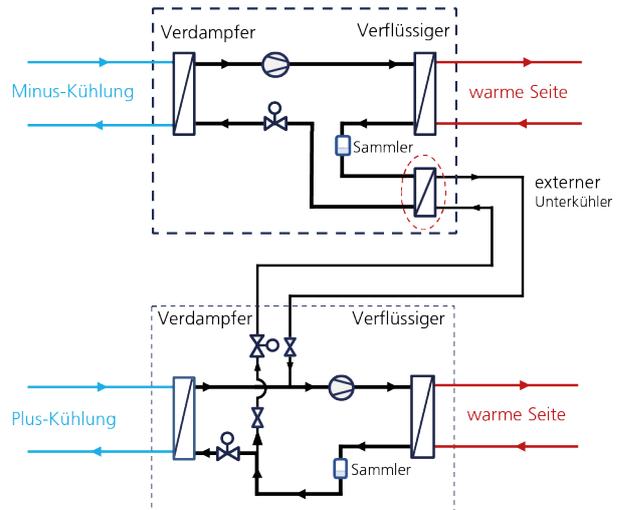
Bei einer CO₂-Boosteranlage kann mit dem externen Unterkühler die Effizienz von Plus- oder Minus-Kühlungen gesteigert werden.



Mit der Unterkühlung kann auf die Plus- wie auch auf die Minuskühlung eingewirkt werden. Aufgrund des Temperaturhubes verbesserte die zusätzliche Unterkühlung der Pluskühlung die Effizienz etwas mehr als eine zusätzliche Unterkühlung der Minuskühlung.

Kombination Plus- und Minuskühlung

Bei einer Plus-Minuskühlanlage kann die Pluskühlanlage als Wärmesenke verwendet werden, um die Minuskühlanlage zusätzlich zu unterkühlen.



Aufgrund des grösseren Druckhubes der Minusanlage, wird mit dieser Schaltung die Effizienz des Gesamtsystems leicht verbessert. Der Vorteil der Schaltung liegt jedoch hauptsächlich darin, dass sie die Kälteleistung und die Betriebssicherheit der Minusanlage vergrössert.

Details dazu siehe Bericht «Kältemittelunterkühlung: Grundlagen und Leitfaden zum Effizienz- und Kältengewinn» der ZHAW auf Seite 128.

Übersicht Unterkühlung

Die wichtigsten Unterkühlungsarten und deren Eigenschaften. Die Unterkühlung ...

... beeinflusst die Verdichtungsendtemperatur (Heissgastemperatur)					
... führt zu einer zusätzlichen Überhitzung					
... eignet sich für folgenden Verdichterbauarten					
... benötigt eine externe Wärmesenke					
... erhöht die Energieeffizienz					
	↓	↓	↓	↓	↓

Interne Unterkühlung

Interner Wärmetauscher IWT	nur bei Kältemitteln mit kleinen Isentropenexponenten	keine Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	erhöht die Überhitzung	erhöht die Heissgastemperatur deutlich
Interner Wärmetauscher IWT mit Flüssigbypass	nur bei Kältemitteln mit kleinen Isentropenexponenten	keine Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	erhöht die Überhitzung	erhöht die Heissgastemperatur
Economiser	erhöht die Effizienz bis zu 15%	keine Wärmesenke notwendig	nur für Scroll-, Schrauben- und Turbo-Verdichter oder zweistufige Prozesse	kein Einfluss auf die Überhitzung	reduziert die Heissgastemperatur
Eigenunterkühlung	keinen Einfluss auf die Effizienz	keine Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	kein Einfluss auf die Überhitzung	kein Einfluss auf die Heissgastemperatur

Externe Unterkühlung

Externer Unterkühler	erhöht die Effizienz bis zu 30%	Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	kein Einfluss auf die Überhitzung	kein Einfluss auf die Heissgastemperatur
CO ₂ -Booster mit externer Unterkühlung	erhöht die Effizienz bis zu 15%	Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	kein Einfluss auf die Überhitzung	kein Einfluss auf die Heissgastemperatur
Kombination Plus-Minuskühlung	geringer Einfluss auf die Effizienz	Wärmesenke notwendig	für alle Bauarten geeignet	kein Einfluss auf die Überhitzung	kein Einfluss auf die Heissgastemperatur

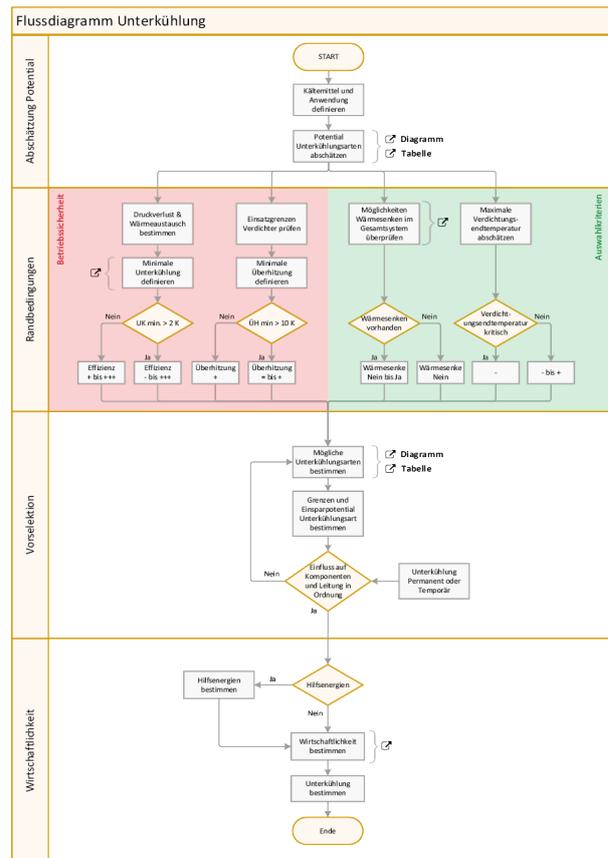
Unterkühlungsart bestimmen

Sieben Punkte zur Unterkühlung

Welche Unterkühlungsart die beste Lösung ist und wie stark unterkühlt werden soll ist abhängig von folgenden sieben Punkten:

1. Der Kälteanwendung, bei der die Unterkühlung erfolgen soll: Handelt es sich um eine Klimakälteanlage, eine Plus- oder eine Minuskühlanlage?
2. Das Kältemittel und seine Stoffeigenschaften (Isentropenexponent).
3. Die minimal notwendige Unterkühlung für einen störungsfreien Betrieb. Diese wird durch den Druckverlust zwischen Sammler und Expansionsventil bestimmt.
4. Die minimal notwendige Überhitzung (gemäss Hersteller des Verdichters) vor dem Verdichter für einen störungsfreier Betrieb.
5. Wärmesenken (Kaltwasser, kalte Luft, etc.), die vorhanden sind und kostengünstig genutzt werden können. Stehen die Wärmesenken temporär oder permanent zur Verfügung?
6. Maximale Verdichtungsendtemperatur, die mit dem gewählten Kältemittel nicht überschritten werden darf?
7. Die Wirtschaftlichkeit der zusätzlichen Unterkühlung: Dafür müssen die Zusatzinvestitionen und die Betriebskosten der Hilfsenergien und Ressourcen (Wasser) berechnet und mit den Einsparungen aufgrund der besseren Effizienz verglichen werden.

Die Studie der ZHAW enthält ein Flussdiagramm, das den Weg zur «optimalen» Unterkühlung beschreibt. Zudem liefern diverse Grafiken und Tabellen die notwendigen Entscheidungsgrundlagen für die Wahl der Unterkühlungsart.



Stolpersteine

In der Praxis zeigen sich bei Unterkühlungen immer wieder die gleichen Fehler.

Zu geringe Unterkühlung

Eine zu geringe Unterkühlung des Kältemittels zwischen Sammler und Expansionsventil führt zu einer Flashgasbildung mit den entsprechenden Schäden. Insbesondere bei langen Steigleitungen – wenn die Kühlstellen oberhalb des Verflüssigers/ Sammlers angeordnet sind – wird die Bedeutung einer ausreichenden Unterkühlung gern übersehen.

IWT mit zu grosser Unterkühlung

Eine Unterkühlung mit einem IWT führt zu einer höheren Überhitzung des Kältemittels vor dem Verdichter. Wird zu stark unterkühlt, dann kann – je nach Kältemittel und Verdichtertyp – die Verdichtungsendtemperatur überschritten werden. Der Verdichter muss dann abgeschaltet werden, damit er keinen Schaden nimmt.

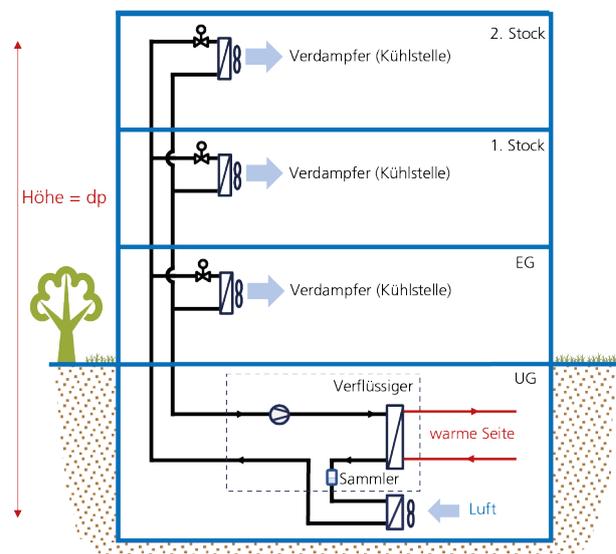
Teillastbetrieb vernachlässigt

Besonders Klimakälteanlagen laufen 98% der Zeit im Teillastbereich. Bei der Auslegung ist dabei der Beitrag der zusätzlichen Unterkühlung bei Teillast entscheidend. Je nach Situation sind der Unterkühlung Grenzen gesetzt (z.B. durch den Arbeitsbereich des Expansionsventils).

Die Teillastsituation muss besonders auch bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt werden.

IWT mit zu grossem Druckabfall

Wird aus Kostengründen ein IWT mit einem zu grossen Druckabfall eingebaut, kann zwar die minimale Überhitzung sichergestellt werden. Doch gleichzeitig verschlechtert sich die Effizienz der Anlage spürbar. Je nach Kältemittel sinkt der EER bei einer Kälteanlagen mit einem IWT, der einen Druckabfall von stolzen 0,6 bar erzeugt, um bis zu 10%.



Nur wenn der Druckabfall des IWT im Bereich von 0,05 bar liegt ist eine Effizienzsteigerung zu erwarten.

Weiterführende Informationen

Kältemittelunterkühlung: Grundlagen und Leitfa-
den zum Effizienz- und Kältegewinn
ZHAW, 20. Juli 2022

- Grundlagen zur Unterkühlung
- Beschreibung der Simulation
- Resultate der Kreislaufsimulationen für folgen-
de Unterkühlungsarten
 - Interner Wärmetauscher
 - Interner Wärmetauscher mit flüssig Bypass
 - Economiser
 - Externer Unterkühler
 - Booster mit externem Unterkühler
 - Kombination Plus- und Minuskühlung
- Flussdiagramm: Weg zur optimalen Unterküh-
lung
- Planungsempfehlungen
- Häufige Fehler

Kostenloser Download der Grundlagenstudie unter
<https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11031>

Bildquellen:

Bild Titelseite: shutterstock.com

Illustrationen, Tabellen und Schemas: zweiweg

EnergieSchweiz
Bundesamt für Energie BFE
Pulverstrasse 13
CH-3063 Ittigen
Postadresse: CH-3003 Bern

Infoline 0848 444 444
infoline.energieschweiz.ch

energieschweiz.ch
energieschweiz@bfe.admin.ch
twitter.com/energieschweiz