



LEITFADEN ÜBER KÜHL- UND KÄLTETECHNIK

Copyright 2012 GRUNDFOS A/S. Alle Rechte vorbehalten.

Das Urheberrecht und internationale Verträge schützen dieses Dokument. Kein Teil dieses Dokuments darf ohne vorherige schriftliche Genehmigung von GRUNDFOS Holding A/S in irgendeiner Form oder mit irgendwelchen Mitteln reproduziert werden.

Die inhaltliche Genauigkeit dieses Dokuments wurde mit angemessener Sorgfalt überprüft. GRUNDFOS haftet jedoch nicht für Verluste und Schäden, unabhängig davon, ob es sich um mittelbare oder unmittelbare bzw. Begleit- oder Folgeschäden handelt, die auf die Anwendung der Inhalte dieses Dokuments oder das Vertrauen darauf zurückzuführen sind.





Allgemeines	6
Begriffsbestimmungen	7
Beispielhafte Kühlanwendung	8
Kältetechnik	9
Kältemittel	9
Ein typischer Kältetechnikprozess	9
Kältetechnik in der Praxis.....	10
Prozessbeschreibung (einstufige Anlage).....	11
Prozessbeschreibung (zweistufige Anlage).....	18
Absorptionskühlung	19
Grundfos-Produkte	20
Herkömmliche industrielle Kühlung	24
Kalte Seite	24
Warme Seite	25
Kühlturm	25
Aufbau.....	28
Freie Kühlung.....	30
Wasserbehandlung.....	30
Meerwasserkühlung.....	33
Beschichten der Pumpen.....	34
Regelungsarten und Beispiele	35
Konfigurationsbeispiel von Grundfos	40
Grundfos-Produkte	45
Kühlaggregate	46
Regelverfahren.....	46
Grundfos-Produkte	48
Allgemeine Hinweise zu den Pumpen	49
Glykol.....	49
Ammoniak (NH ₃).....	50
Kohlenstoffdioxid (CO ₂).....	50

Allgemeines

Die Kühlung bzw. Tiefkühlung ist sowohl in der Fertigungsindustrie als auch der Klimabranche ein wachsender Markt. Grundfos ist stolz darauf, bei Kunden aus diesen Bereichen der bevorzugte Pumpenanbieter für Kühlanlagen zu sein.

Die Pumpen von Grundfos sind nicht nur zuverlässig und effizient, sie decken auch einen großen Leistungsbereich ab. Mit unserer umfassenden Erfahrung beraten wir Kunden in Bezug auf die Realisierung von Pumpenanlagen. Dabei pflegen wir eine enge Partnerschaft und treten in einen intensiven Dialog, um die jeweils am besten geeignete Lösung zu finden.

Grundfos ist ein weltweit tätiges Unternehmen mit einem internationalen Servicenetz. Wenn Sie also irgendwo auf der Welt einen fachkundigen oder spontanen Rat benötigen, stehen wir Ihnen mit unserem technischen Wissen jederzeit zur Verfügung.

In diesem Leitfaden für Kühl- und Kältetechnik erklären wir zum einen die Theorie, die der Kühlung zugrunde liegt, und zum anderen, wie sie in der Praxis umgesetzt wird. Darüber hinaus wird beschrieben, wie Kühlanlagen und Kühlaggregate aufgebaut sind. Anschließend erläutern wir, wie die Anlagen/Pumpen gesteuert und geregelt werden und wie sich dies auf den Energieverbrauch auswirkt. Am Ende des Leitfadens finden Sie eine Übersicht über die verschiedenen Pumpentypen, die häufig zum Einsatz kommen. Hier erfahren Sie auch, welche Pumpen für welche Anwendungen am besten geeignet sind.

Da die Pumpen von Grundfos bei vielen verschiedenen Kunden und in unterschiedlichsten Anwendungen zum Einsatz kommen, haben wir diese wie im Folgenden beschrieben in Gruppen unterteilt, sodass unsere Kunden ganz einfach die Teile dieses Leitfadens bestimmen können, die für sie interessant und relevant sind:



Interessenbereich	Thema	Typische Branchen	Kunden
Kältetechnik	Pumpen für CO ₂ , NH ₃ und andere Kältemittel	Gewerbekälte, Industriekälte	OEM, Auftragnehmer, Serviceanbieter
Industrielle Kühlung	Große Pumpen Energieeinsparungen Wasser-Glykol-Gemisch	Kühltürme, industrielle Kühlung (Lebensmittel und Getränke)	Auftragnehmer, Endverbraucher, OEM
Kühlaggregate	Kompakte Pumpen Betriebssicherheit	Kühlung von Windkraftanlagen, Kühlung von Elektronik	Medizintechnik, OEM

Der Begriff „Kühltechnik“ kann je nach Branche und Kunde unterschiedlich definiert sein. Dieser Leitfaden beschäftigt sich mit der mechanischen Kühl- und Kältetechnik.

Die mechanische Kühl- und Kältetechnik ist vor allem eine Anwendung der Thermodynamik, bei der ein Kühlmedium, oder Kältemittel, einen Kreisprozess durchläuft und am Ende wiederverwendet oder zurückgewonnen wird. Der Kalt dampfprozess ist der am häufigsten verwendete grundlegende Kreisprozess. Innerhalb des Kreislaufs gibt es zwei Druckstufen, in denen das Medium zyklisch zwischen Flüssig- und Dampfphase wechselt. Dabei wird Energie freigesetzt und verbraucht.

Im Folgenden werden die Begriffe Kühltechnik, Kältetechnik und Kryotechnik definiert.

Begriffsbestimmungen

Kühltechnik: Das Herabkühlen eines Raums oder eines Stoffs auf eine Temperatur, die höher oder gleich der Umgebungstemperatur ist.

Kältetechnik: Das Herabkühlen eines Raums oder eines Stoffs auf eine Temperatur bis -123 °C.

Kryotechnik: Das Herabkühlen eines Raums oder eines Stoffs auf eine Temperatur unter -123 °C. Auf die Kryotechnik wird in diesem Leitfaden nicht weiter eingegangen.

Beispielhafte Kühlanwendung

Abb. 1



Abb. 1 zeigt den Verdichter (Mitte), in dem der Kälteprozess stattfindet. Links neben dem Verdichter befinden sich vier Pumpen, die das Kühlmedium in die Produktion leiten. Vor dem Verdichter sind zwei weitere Pumpen montiert, die das erwärmte Medium in die Kühltürme transportieren (hinten). An der Wand angebracht sind die Schaltschränke und die Dosierpumpen, die das Kühlwasser aufbereiten.

Kältetechnik

In diesem Abschnitt wird der Kälteprozess beschrieben (d. h. Herabkühlen auf eine Temperatur, die unter der Umgebungstemperatur liegt).

Kältemittel

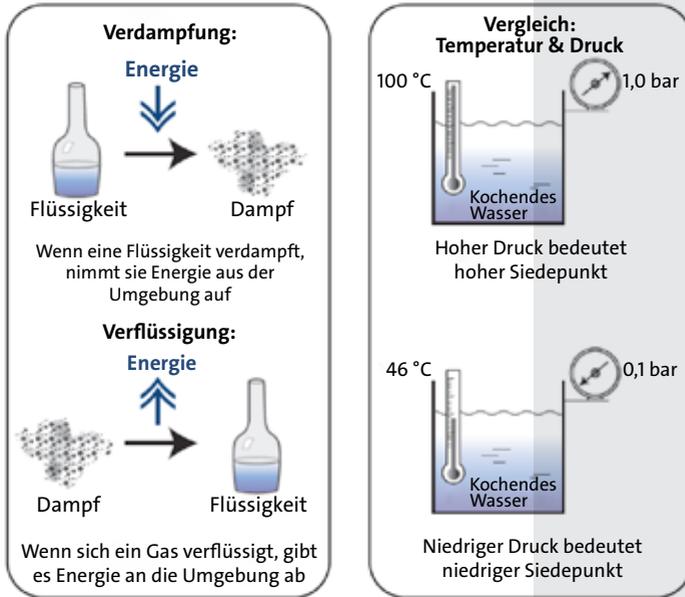
Es kommen verschiedene Fluide als Kältemittel in Frage. Die Auswahl des Kältemittels hängt von mehreren Faktoren ab, wie z. B. der gewünschten Temperatur, der Anlagengröße, dem Standort, dem Alter usw. Heutzutage werden am häufigsten Ammoniak (NH_3), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Kohlenwasserstoff und Fluorkohlenwasserstoff (FKW) als Kältemittel verwendet. Es gibt jedoch auch noch weitere Optionen. Alle Kältemittel besitzen eine Nummer. So ist Ammoniak beispielsweise R-717 und Kohlenstoffdioxid ist R-744. Für alle Kältemittel gibt es ein Log-p-h-Diagramm, aus dem der Aggregatzustand (Flüssigphase, Dampfphase) des Kältemittels bei einer bestimmten Temperatur und bei einem spezifischen Druck sowie der Energiegehalt hervorgehen. Außerdem kann aus dem Diagramm die „Kältewirkung“ des jeweiligen Kältemittels abgelesen werden. Dabei handelt es sich um die spezifische Wärmekapazität: Die Δh_i in Kilojoule, bei der 1 kg des Fluids beim Durchlaufen des Verdampfers absorbiert werden kann. Ein beispielhaftes Log-p-h-Diagramm ist bei der Beschreibung des Prozesses in ein- und zweistufigen Anlagen abgebildet.

In der Praxis wird das Diagramm zum Auslegen der Kühlanlage und Bestimmen der Arbeitsweise der Anlage genutzt. Es hilft auch dabei, die Kältemittelmenge zu bestimmen, die erforderlich ist, um die Temperatur einer gewünschten Wassermenge um eine bestimmte Anzahl an Grad zu senken. Schließlich ist das Diagramm auch beim Festlegen des erforderlichen Förderstroms der Pumpen nützlich.

Ein typischer Kältetechnikprozess

In einem Kälteprozess durchläuft das Kältemittel zwei Phasen: Verdampfung und Kondensation. Die Verdampfung verbraucht Energie und die Kondensation setzt Energie frei (Abb. 2).

Abb. 2



Diese beiden Phasen werden jeweils von einem Kühlkompressor bzw. Absorptionsgerät ermöglicht, da der Siedepunkt einer Flüssigkeit wie in Abb. 2 gezeigt von einem bestimmten Druck abhängig ist.

Kältetechnik in der Praxis

Abb. 3 zeigt eine einfache Kompressionskühlanlage. Im Verdampfungsschritt ist der Druck niedrig, sodass das Kältemittel zu sieden beginnt und Energie aus der Umgebung absorbiert. Im Kondensator wird der Druck mithilfe eines Verdichters erhöht. Dadurch kondensiert das Kältemittel und es wird Energie freigesetzt. In der Praxis bedeutet das: Wird Energie absorbiert, sinkt die Temperatur in einem Raum oder Produkt. Die Temperatur steigt dagegen, wenn Energie freigesetzt wird. Einem Temperaturanstieg kann man mit einem Kühlturm oder einer ähnlichen Vorrichtung entgegenwirken.

A-B (Abb. 5)**Drosselventil**

Bevor das Kältemittel durch das Drosselventil fließt, befindet es sich aufgrund des hohen Drucks in der Flüssigphase. Wenn es durch das Drosselventil zum Verdampfer (Niederdruckseite) fließt, beginnt ein Teil des Kältemittels zu siedeln. Dieser Prozess findet mit einer konstanten spezifischen Wärmekapazität statt. Das bedeutet: Das Kältemittel absorbiert keine Energie und es wird keine Energie an die Umgebung freigesetzt (isenthalpe Zustandsänderung).

Wie weit sich das Drosselventil öffnen muss, wird entweder elektronisch oder mechanisch geregelt.

B-C (Abb. 6.)**Verdampfer**

Das Kältemittel absorbiert im Verdampfer Wärme (Energie) – entweder aus der Luft oder von einem sekundären Kältemittel (z. B. Wasser). Wenn das Kältemittel den Verdampfer verlässt, ist es gasförmig. Der Druck bleibt während des gesamten Prozesses konstant (isobare Zustandsänderung).

Im Grunde funktioniert der Verdampfer wie ein Wärmetauscher. Wenn auf der Sekundärseite Luft zugeführt wird, spricht man von einer direkten Kühlung (siehe Abbildung), und wenn ein anderes Kältemittel zugeführt wird, spricht man von einer indirekten Kühlung. Die indirekte Kühlung kommt oft in der Fertigungsindustrie zum Einsatz, da so kein Kältemittel innerhalb der Gebäude transportiert werden muss.

Es kann dazu entweder ein gefluteter Verdampfer oder ein Verdampfer mit Trockenexpansion verwendet werden. Bei der Trockenexpansion ist das Kältemittel beim Verlassen des Verdampfers vollständig verdampft. Diese Variante kommt in der Regel in kleineren Anlagen zum Einsatz. Es ist sehr wichtig, dass das gesamte Kältemittel verdampft, da Flüssigkeitstropfen zu Schäden am Verdichter führen können. Zudem sollte auch eine Überhitzung verhindert werden, weil sich zu hohe Temperaturen negativ auf das Kältemittel und den Verdichter auswirken können. In einem gefluteten Verdampfer ist das Kältemittel beim Verlassen des

Abb. 5. Herkömmliches Drosselventil

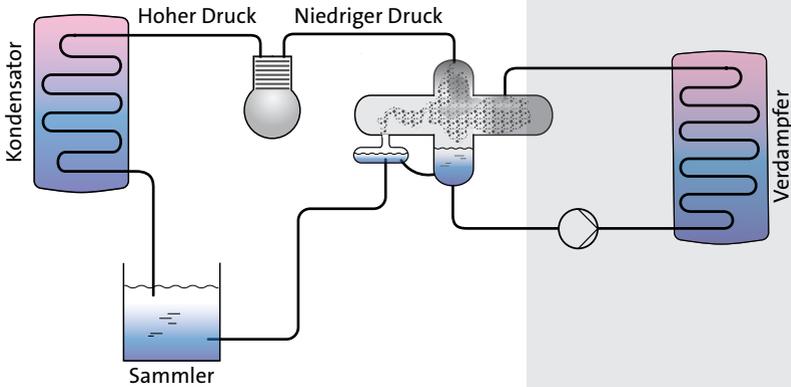


Abb. 6. Beispiel eines Verdampfers in einem Kühlraum



Verdampfers teils gasförmig und teils flüssig. Es kann daher nicht direkt an den Verdichter weitergeleitet werden. Stattdessen wird es in einem Flüssigkeitsabscheider gesammelt, in dem der Dampf und die Flüssigkeit voneinander getrennt werden (Abb. 7).

Abb. 7: Kühlanlage mit geflutetem Verdampfer



Wie in der Abbildung gezeigt verlässt das Kältemittel den Verdampfer in teils gasförmiger und teils flüssiger Form.

Im Vergleich zur einstufigen Anlage bietet diese Anlage folgende Vorteile:

- Die Verdichter sind geflutet. Dadurch kann das Kältemittel nicht überhitzen, wodurch auch die gesamte Anlage vor einer unnötigen Überhitzung geschützt wird.
- Der Verdichter zieht den Dampf oben aus dem Flüssigkeitsabscheider, sodass keine Flüssigkeit in den Verdichter gelangen kann.

Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass bei diesen Anlagen eine Umwälzpumpe integriert ist, die das Kältemittel in die Verdampfer transportiert. Je nach Kältemittel eignet sich hierfür zum Beispiel eine CRN-Pumpe mit Magnetkupplung oder eine RC-Pumpe. In diesem Beispiel haben wir auch auf der Primärseite der Anlage eine Pumpe. Die Pumpen von Grundfos werden normalerweise nicht auf der Primärseite eingesetzt. Weitere Informationen hierzu finden Sie im Abschnitt „Pumpen“ in diesem Leitfaden.

C-D (Abb. 8)**Verdichter**

Das Kältemittel wird durch den Verdichter transportiert. Dabei wird der Druck vom Verdampferniveau auf das Verdichterniveau erhöht. Es handelt sich hierbei um eine isentrope Zustandsänderung.

Im Verdichter wird dem Kältemittel aufgrund des Verdichter-Wirkungsgrads mehr Wärme oder Energie hinzugefügt. Bei einem idealen Prozess würde sich der Druck wie bei einem Expansionsventil erhöhen, ohne Energie zu absorbieren.

Verdichtertypen

Die drei am häufigsten verwendeten Verdichtertypen sind Hubkolbenverdichter, Schraubenverdichter und Scrollverdichter.

Hubkolbenverdichter (Abb. 9)

In der Fertigungsindustrie kommen am häufigsten Hubkolbenverdichter zum Einsatz. Ein solcher Verdichter ist mit bis zu zwölf Zylindern ausgestattet. Die Abbildung zeigt einen Hubkolbenverdichter mit typischem Aufbau.

Geregelt wird der Verdichter meist anhand der Umdrehungen oder durch Ausschalten einiger der Zylinder. Beim Anlaufen des Verdichters sind normalerweise die meisten Zylinder ausgeschaltet, um den Anlaufstrom für den Motor zu verringern.

Schraubenverdichter (Abb. 10)

Schraubenverdichter sind in der Fertigungsindustrie weit verbreitet. Ihre Größe ist ein wichtiger Vorteil: Sie sind kompakt, bieten aber dennoch eine hohe Leistung. Außerdem sind sie mit fast allen Kältemitteln kompatibel. Ihre Leistung lässt sich mit einem Schieber einfach zwischen 10 und 100 % regeln.

Abb. 8. Beispielhafter Verdichterraum



Abb. 9. Kolbenverdichter

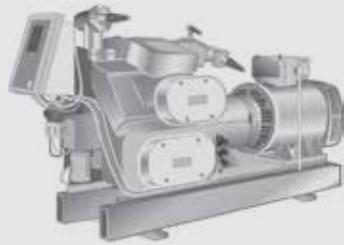
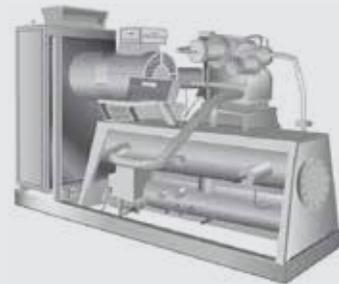
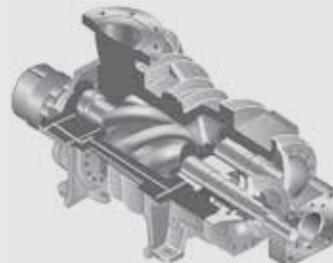


Abb. 10. Beispielhafter Schraubenverdichter



Schnittzeichnung eines Schraubenverdichters



Scrollverdichter (Abb. 11)

Scrollverdichter sind kleinere Verdichter, die meist in Anlagen zur Beheizung und Wasserkühlung zum Einsatz kommen. Diese sehr schlichten Verdichter besitzen fast keine beweglichen, mechanischen Bauteile und sind daher wartungsfrei. Die Verdichtung erfolgt über zwei Spiralen: eine feste und eine rotierende (Abb. 11).

Das untere Bild zeigt einen Scrollverdichter. Es hätte aber auch ein Kolbenverdichter sein können, weil diese sehr ähnlich aussehen.

D-A**Kondensator (Abb. 12)**

Die Wärme, die das Kältemittel im Verdampfungsprozess und im Verdichter aufgenommen hat, muss im Kondensator wieder entfernt werden. Im oberen Teil des Kondensator wird nur die Überhitzungsenergie abgeführt. Auf dem Weg durch den Kondensator verflüssigt sich das Kältemittel immer mehr.

Ähnlich wie der Verdampfer arbeitet auch der Kondensator wie ein Wärmetauscher. Es kann entweder auf der Sekundärseite Luft zugeführt werden (siehe Abbildung) oder es kann eine andere Flüssigkeit (z. B. Wasser) verwendet werden, wie es häufig in der Fertigungsindustrie der Fall ist.

Abb. 11. Funktionsprinzip eines Scrollverdichters

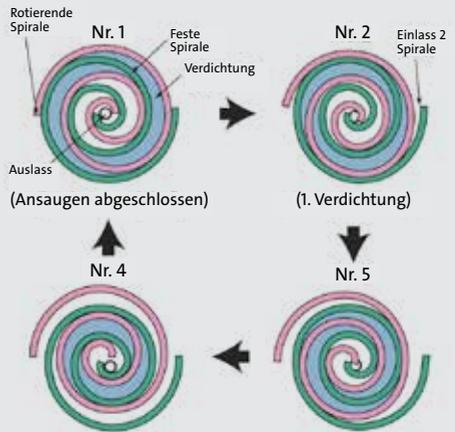
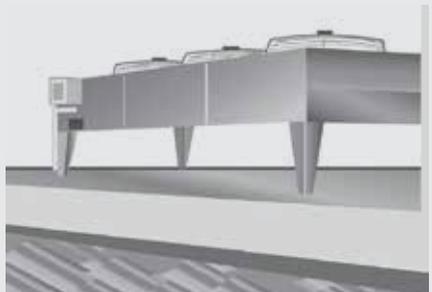
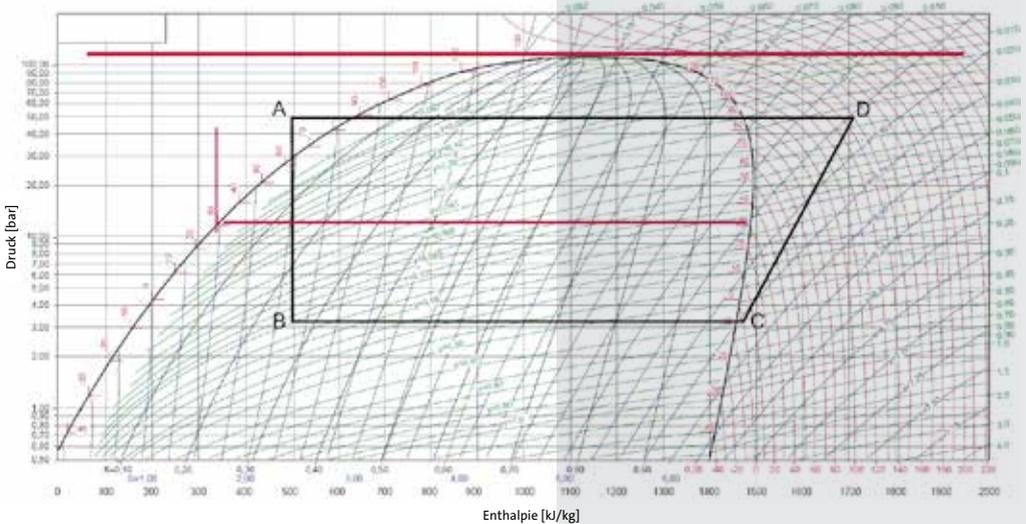


Abb. 12. Beispielhafter luftgekühlter Kondensator



Log-p-h-Diagramm (einstufige Anlage)



Die Y-Achse zeigt den Kältemitteldruck. Die X-Achse zeigt den Energiegehalt von 1 kg Kältemittel. Die dünne rote, vertikale Linie ist die Temperatur des Kältemittels. Oberhalb der langen roten Linie befindet sich das Kältemittel im sogenannten subkritischen Bereich. Dieser ist für uns normalerweise nicht relevant (Bei der Verwendung von CO_2 erreicht das Kältemittel diesen Bereich. Dieser Prozess wird jedoch nicht in diesem Leitfaden beschrieben).

Wenn wir uns den Kühlprozess im Diagramm ansehen, wird Folgendes deutlich:

A-B: Druck und Temperatur nehmen am Düsenventil ab, das sich in der Anlage zwischen der Hochdruck- und Niederdruckseite befindet. Ein Teil des Kältemittels verdampft auf dem Weg von dem Bereich, in dem es vollständig flüssig vorliegt, in den Bereich mit teils flüssigem und teils gasförmigem Kältemittel.

B-C: Im Verdampfer wird Energie zugeführt, sodass das Kältemittel immer mehr verdampft. Am Ausgang des Verdampfers liegt das Kältemittel nur noch als Dampf vor und ist etwas überhitzt. Die Temperatur steigt an dieser Stelle um etwa 8°C .

C-D: Im Verdichter steigt der Druck wieder an, sodass die Kältemitteltemperatur aufgrund des Wirkungsgradverlusts im Verdichter noch weiter steigt.

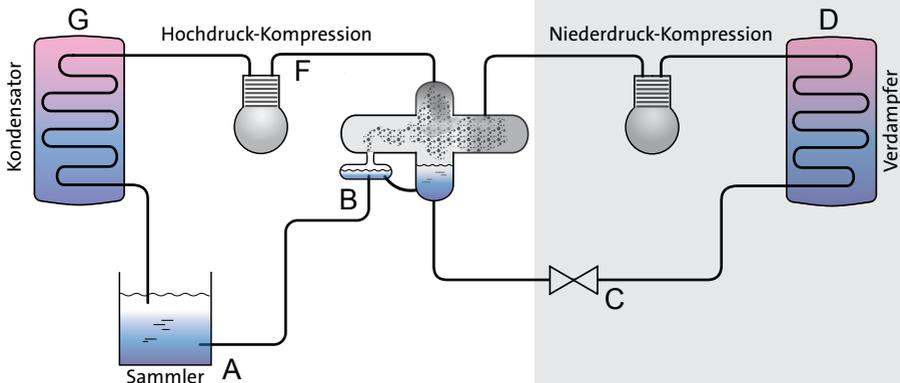
D-A: Das überhitzte Kältemittel wird im Kondensator gekühlt und verflüssigt sich dadurch wieder.

Zweistufige Anlage

Der zuvor beschriebene einstufige Kältekreislauf und einige der Daten beziehen sich auf eine typische kleine Anlage, wie sie beispielsweise in einem Supermarkt zum Einsatz kommt. Bei Kälteanlagen für die Fertigungsindustrie wird in der Regel ein zweistufiger Kreislauf angewendet. Anlagen dieser Art können ganz unterschiedlich ausgeführt sein (Abb. 13).

Zweistufige Anlagen sind geeignet, wenn die gewünschten Temperaturen sehr niedrig sind. Dazu wird die Verdichtung zunächst unterbrochen. Anschließend wird das Gas gekühlt und erneut verdichtet. Die für die Verdichtung aufgewendete Gesamtenergie ist beim zweistufigen Kreislauf niedriger. Außerdem ist die Temperatur des Gases, das aus dem Hochdruck-Verdichter kommt, geringer, als wenn die Verdichtung nur einmal stattfindet. Dadurch ist auch das Öl, mit dem der Verdichter geschmiert und gekühlt wird, länger haltbar.

Abb. 13. Zweistufige Anlage



Prozessbeschreibung (zweistufige Anlage)

A-B: Das Kältemittel ist flüssig und wird über ein Expansionsventil mit Füllstandsregelung in einen Zwischenspeicher transportiert. Dabei verdampft ein Teil des Kältemittels. Die Blasen steigen auf und werden in den Hochdruck-Verdichter gezogen. Der Großteil des Kältemittels verbleibt jedoch in flüssiger Form im Zwischenspeicher.

B-C: Die Flüssigkeit im Sammler siedet, sodass die Flüssigkeit mit Sättigungstemperatur in Düse C gelangt.

C-D: Der Prozess im Verdampfer ist derselbe wie in einer einstufigen Anlage. Das gesamte Kältemittel verdampft und wird dann in den Niederdruck-Verdichter transportiert.

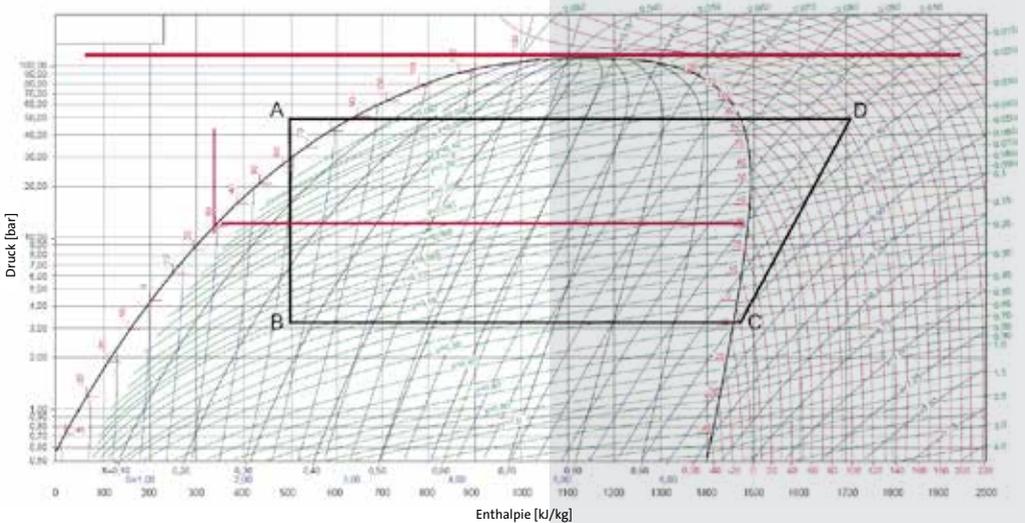
D-E: Der Verdichter überhitzt das Kältemittel und drückt es unterhalb des Flüssigkeitsspiegels zurück in den Sammler (nicht wie in der Abbildung dargestellt). Im Sammler wird das Kältemittel wieder auf die Sättigungstemperatur herabgekühlt. Ein Teil davon verdampft und gelangt in den Hochdruck-Verdichter.

F-G: Hier findet derselbe Prozess statt wie in den einstufigen Anlagen statt. Allerdings ist die Auslasstemperatur des Kältemittels im zweistufigen Kreislauf niedriger.

G-A: Hier findet derselbe Prozess statt wie in den einstufigen Anlagen. Da aber die Kältemitteltemperatur niedriger ist, muss die Leistung des Kondensators nicht so hoch sein wie in einstufigen Anlagen.



Log-p-h-Diagramm (zweistufige Anlage)



Vergleicht man die zweistufigen mit den einstufigen Anlagen, wird deutlich, dass in einer zweistufigen Anlage mehr Energie aus dem Verdampfer (C-D) entzogen werden kann. Die Temperatur des Kältemittels, das aus dem Hochdruck-Verdichter (F) der zweistufigen Anlage kommt, ist etwa 35 °C geringer. Dies ist ein Vorteil für den Verdichter und der Kondensator benötigt weniger Energie, um das Kältemittel zu kühlen.

Absorptionskühlung

Eine Absorptionskälteanlage produziert Kälte aus Wärme. Die Kombination aus Beheizung und Kühlung ist für die Bereiche der Fertigungsindustrie interessant, die sowohl heizen als auch kühlen müssen, wie zum Beispiel Schlachthäuser. Um die Beheizung und Kühlung in das richtige Gleichgewicht zu bringen, sodass beide Anforderungen optimal erfüllt werden können, stellt eine Absorptionskälteanlage eine kostengünstigere Lösung dar als eine herkömmliche Kompressionskälteanlage.

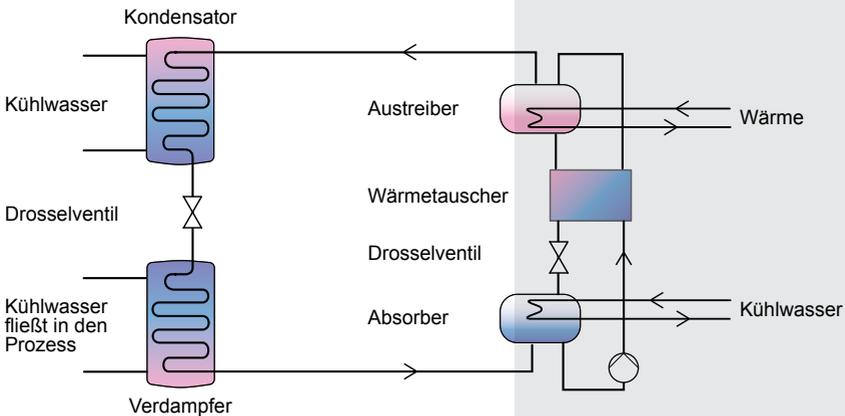
Absorptionskühlung: technischer Aufbau

Eine Absorptionskälteanlage besteht in der Regel aus vier Hauptbestandteilen:

- Austreiber
- Kondensator
- Verdampfer
- Absorber

An sich sind die Prozesse, die in Absorptions- und Kompressionskälteanlagen stattfinden, nahezu gleich. Allerdings kommt bei der mechanischen Kühlung ein mechanischer Verdichter zum Einsatz, wohingegen bei der Absorptionskühlung ein thermischer Verdichter verwendet wird, der aus einem Austreiber, einem Absorber und einem Drosselventil aufgebaut ist (Abb. 14).

Abb. 14: Zeichnung einer Absorptionskälteanlage



Beim Betrieb der Anlage muss dem Austreiber Wärme aus einer externen Quelle (Turbine, Gasmaschine, Abwärme usw.) zugeführt werden. Diese Wärme muss durch einen Kühlturm entfernt werden.

Der Kühlprozess wird eingeleitet, indem dem Austreiber Wärme zugeführt wird. Dadurch beginnt die Lösung zu siedeln und das Kältemittel darin (z. B. Wasser in einer H_2O -LiBr-Absorptionskälteanlage) wird in den Verdichter geleitet. In einem weiteren Kreislauf wird die übrige Lösung, die nur noch wenig

Kältemittel enthält („arme Lösung“), vom Austreiber über einen Wärmetauscher und ein Drosselventil in den Absorber (Druckreduktion) geleitet.

Das verdampfte Kältemittel vom Austreiber wird im Kondensator wieder verflüssigt und gelangt über ein Expansionsventil (Druckreduktion) in den Verdampfer. Anschließend findet derselbe Prozess statt wie in einer Kompressionskälteanlage.

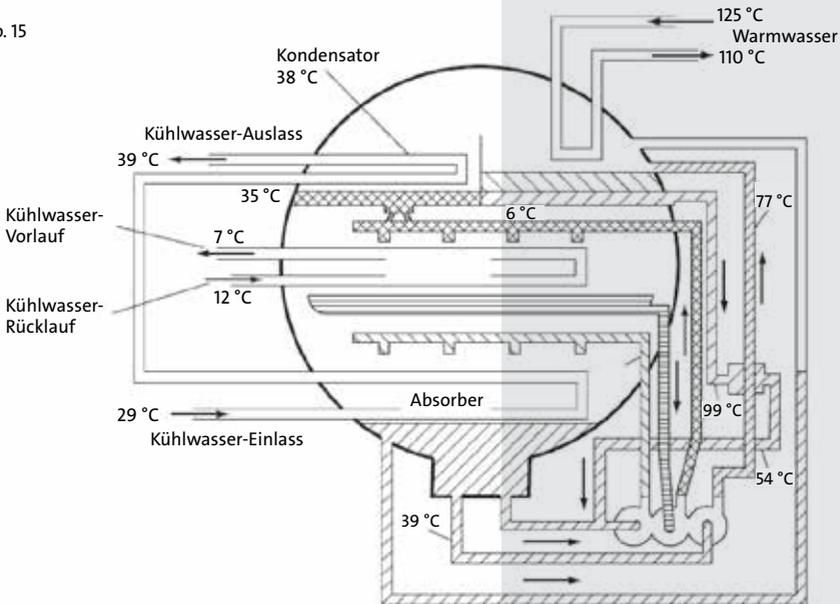
Das vollständig verdampfte Kältemittel gelangt nun vom Verdampfer in den Absorber. Hier wird das Kältemittel von der Lösung absorbiert, wobei Wärme freigesetzt wird.

Die Lösung, die nun wieder eine größere Menge des Kältemittels enthält, wird über den Wärmetauscher zurück in den Austreiber transportiert.

Damit schließt sich der Kreislauf und der Prozess beginnt von vorn.

Abb. 15 zeigt eine typische Absorptionskälteanlage.

Abb. 15



Bauarten

Auf dem Markt sind im Grunde zwei Arten von Absorptionskälteanlagen erhältlich: Die eine basiert auf einer Lösung aus Lithiumbromid und Wasser. Bei der anderen wird Wasser und Ammoniak verwendet. In Wasser-Ammoniak-Anlagen fungiert das Ammoniak als Kältemittel und das Wasser als Sorptionsmittel. Diese Art von Anlagen können die Temperatur auf ein sehr niedriges Niveau ($< -30\text{ }^{\circ}\text{C}$) senken. In der Fertigungsindustrie wird diese Lösung standardmäßig verwendet.

Im Allgemeinen ist jedoch die $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ -Absorptionskälteanlage die am häufigsten eingesetzte Anlagenart. Mit dieser Lösung, bei der Wasser als Kältemittel und Lithiumbromid als Sorptionsmittel fungiert, kann die Temperatur auf etwa $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ gesenkt werden. Sie wird meist für die Raum- oder Lebensmittelkühlung genutzt.

Wie bei den Kompressionskälteanlagen gibt es auch bei den Absorptionskälteanlagen ein- und zweistufige Ausführungen.

Regelverfahren

Um den Kälteprozess wirtschaftlich und sicher zu gestalten, müssen Automatisierungs- und Überwachungseinrichtungen installiert werden. Die Komplexität der automatischen Regelung hängt stark von der Größe der Anlage und ihrem Aufstellungsort ab. Die wichtigsten Regelaufgaben sind folgende:

Kalte Seite

- Druckregelung am Verdampfer
- Regelung der Verdichterleistung
- Durchflussregelung (weniger häufig angewendet)

Warme Seite

- Die Vorteile einer Regelung der warmen Seite hängen von der Anwendung ab.



Sonstige

- Korrekte Verteilung des Kältemittels in der Anlage
- Regelung des Sekundärkältemittels für den Kondensator (Wasser oder Luft)
- Abtauung des Verdampfers, wenn auf der Sekundärseite Luft als Medium verwendet wird
- Überwachung der Geräte (Überdruck, Unterdruck und Öldruck)
- Schutz der Elektromotoren

Grundfos-Produkte

Grundfos bietet in der Regel keine Produkte für die Primärseite dieser Anlagen an, da das Medium hier immer ein Kältemittel ist. Wir bieten jedoch die RC-Pumpe an, die speziell für CO₂ entwickelt wurde und bei Bedarf auch für andere Kältemittel genutzt werden kann.

Die CR-Pumpe mit Magnetkupplung oder doppelter Wellendichtung eignet sich ebenfalls für einige Kältemittel – jedoch nicht für alle.

RC-Pumpe



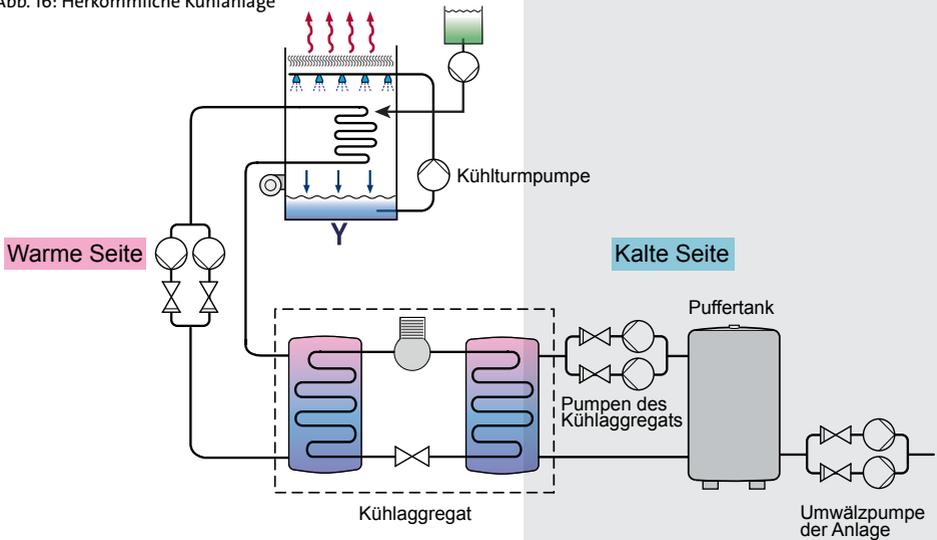
CR mit Magnetkupplung



Herkömmliche industrielle Kühlung

Im vorherigen Abschnitt haben wir erläutert, wie der Kälteprozess auf der Primärseite der Kühlanlage funktioniert. Wie aber in Abb. 16 zu sehen ist, befinden sich die Pumpen normalerweise auf der Sekundärseite (warme und kalte Seite). Daher sehen wir uns als Nächstes diese Seite an.

Abb. 16: Herkömmliche Kühlanlage



Kalte Seite

Was auf der Sekundärseite des Verdampfers geschieht, hängt stark von der Branche ab, in der die jeweilige Anlage eingesetzt wird.

Für Temperaturen zwischen 0 °C und -30 °C wird meist eine Wasser-Glykol-Mischung verwendet.

Anwendung sind zum Beispiel:

- Brauereien
- Molkereien
- Schlachthäuser
- Gebäude mit Belüftungsanlagen
- Luftentfeuchtung in Industriegebäuden (auch mit Belüftung)
- Maschinenkühlung
- usw.

Abb. 17: Sekundäre kalte Seite

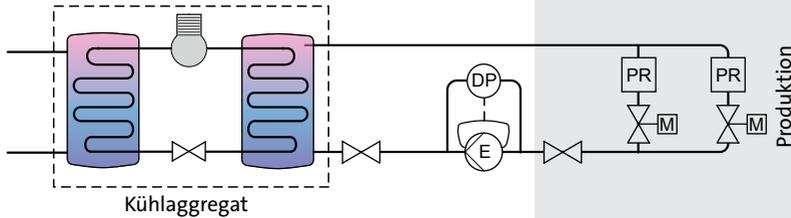
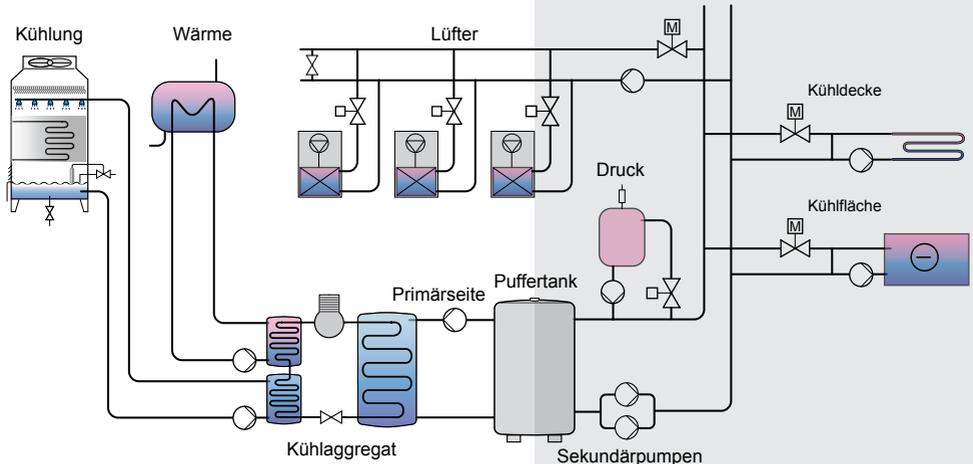


Abb. 17 zeigt eine beispielhafte Lösung. Es sind aber auch viele andere Konfigurationen möglich.

In großen Anlagen (Abb. 18), wie z. B. Klimaanlage oder Industrieanlagen, können mehrere Pumpen auf verschiedenen Ebenen eingesetzt werden. Puffertanks werden ebenfalls verwendet, um die Kühlleistung aufzubauen. Puffertank sind in verschiedensten Größen erhältlich: von kleinen Behältern bis hin zu sehr großen Tanks. Sie können auf dem Boden aufgestellt oder eingegraben werden. Bei den Pumpen handelt es sich in der Regel um einstufige Pumpen, aber auch mehrstufige Pumpen sind möglich. Auch ihre Größen variieren: von den größten NB/NK-Primärpumpen bis hin zu den kompakten UPS-Pumpen für kleine Kühlkreise.

Abb. 18: Anlage mit primärer, sekundärer kalten und warmen Seite sowie tertiären Seite



Warme Seite

Auf der Sekundärseite des Kondensators wird immer Luft oder Wasser in Kombination mit einem Frostschutzmittel verwendet.

Luft kommt normalerweise in kleineren Anlagen zum Einsatz (z. B. Gebäudekühlung).

Wasser kommt in der Fertigungsindustrie zum Einsatz. Hier wird es in der Regel vom Kondensator an einen Kühlturm geleitet, der ihm Wärme entzieht.

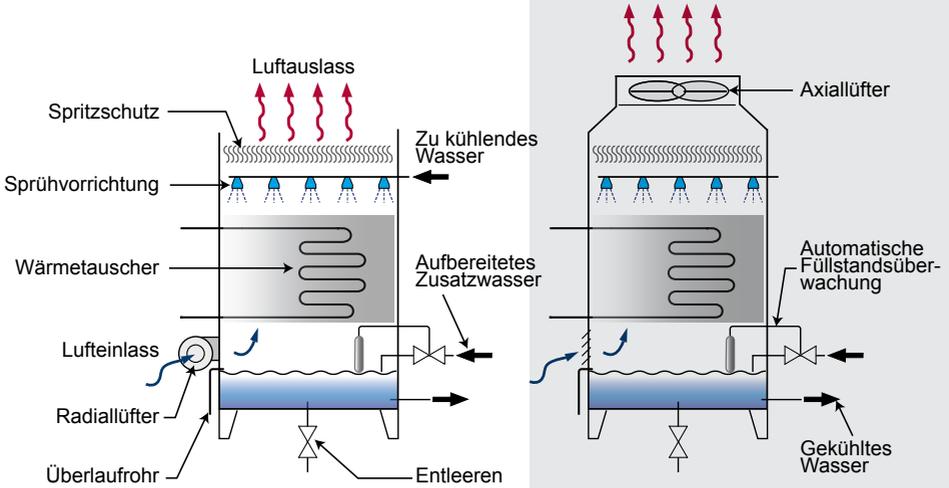
Wenn sich die Anlage auf einem Schiff oder in der Nähe eines Sees oder des Meeres befindet, kann der Kondensator direkt mit dem Wasser aus diesen Quellen gekühlt werden.

Kühlturm

Das Funktionsprinzip von Kühltürmen ist sehr einfach: Ein kleiner Teil des Kühlwasser in ihrem Kreislauf verdampft und entzieht dabei einem anderem Medium Wärme. Im Kühlturm kommt das zirkulierende Kühlwasser direkt mit der Umgebungsluft in Kontakt. Um die Effizienz zu steigern, ist es wichtig, dass das Wasser so gut wie möglich belüftet wird, weil dadurch die Kontaktfläche zwischen Wasser und Luft maximiert wird. Dadurch verdampft ein Teil des Wassers. Dieser Prozess verbraucht Energie (siehe auch Funktionsweise des Verdampfers), sodass die Wassertemperatur sinkt. Da ein Teil des Wassers verdampft, muss in Kühltürmen immer auch Wasser nachgefüllt werden. In Dänemark beträgt die durchschnittliche Jahresmenge an Zusatzwasser etwa $1,12 \text{ m}^3/\text{h}$ pro MW Kühlleistung.

In Abb. 19 sind zwei Kühltürme zu sehen. Der einzige Unterschied ist der Montageort des Lüfters. Folgendes ist dabei zu beachten: Wenn der Lüfter wie im rechten Beispiel angebracht ist, sind Motor und Lüfter immer von Dampf umgeben.

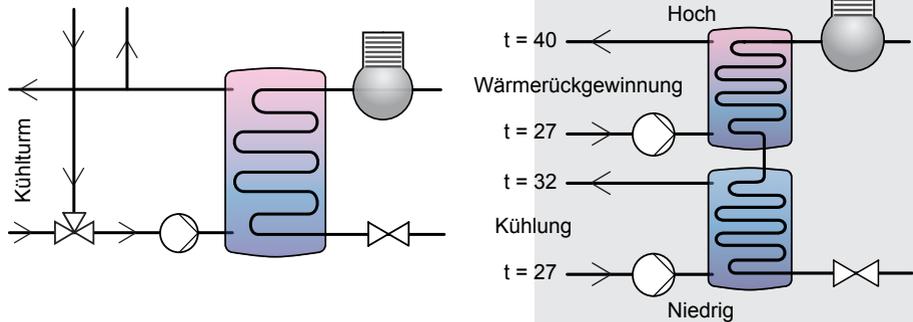
Abb. 19: Verschiedene Typen von Kühltürmen



Je nach Anwendung kann ein Teil der Wärme aus dem Kondensator wiederverwendet werden (siehe Abb. 20).

Abb. 20: Beispielhafte Darstellungen, wie die Wärme im Kondensator genutzt werden kann

Wärmerückgewinnung



Aufbau

Abb. 21

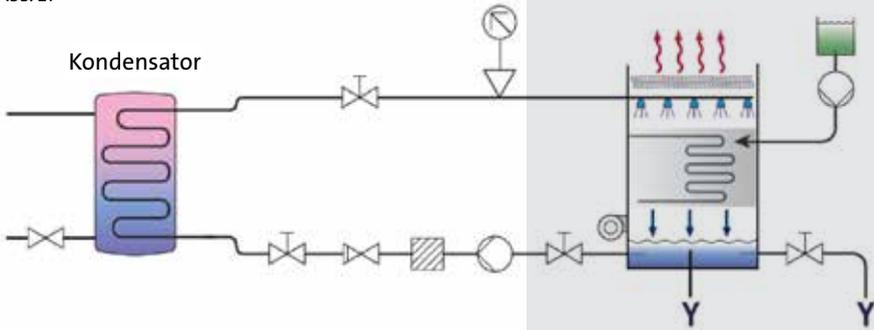
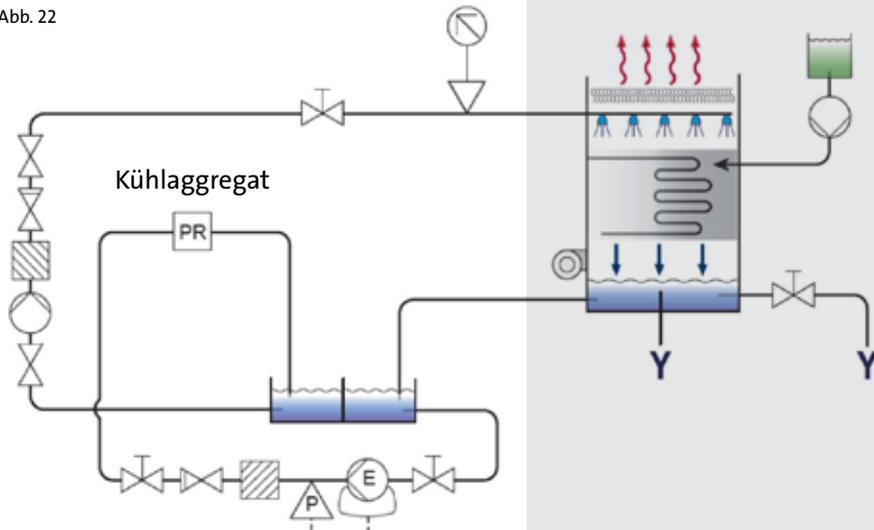


Abb. 21 zeigt eine einfache Zeichnung eines Kühlturms, der mit einem Kondensator verbunden ist. Außerdem ist ein Lüfter zu sehen, der Luft entgegen der Fließrichtung des Wassers in die Anlage bläst. In dieser Anlage werden auch Korrosionsschutzmittel im Kühlturm hinzugefügt.

In größeren Anlagen kommt meist noch ein Puffer-tank hinzu. Eine solche Anlage kann wie in Abb. 22 dargestellt aufgebaut sein.

Abb. 22



Der Puffertank ist in eine kalte und eine warme Seite aufgeteilt. Der Kühlturm zirkuliert das Wasser von der warmen Seite des Tanks durch den Kühlturm und zurück zur kalten Seite des Tanks. Im Kühler oder Kondensator verläuft die Zirkulation in die entgegengesetzte Richtung: von der kalten Seite des Tanks durch den Kondensator und wieder zurück zur warmen Seite des Tanks.

Die Darstellung des Puffertanks ist in der Abbildung etwas ungenau. Eigentlich ist die Wand in der Mitte des Tanks nicht so hoch, dass sie über das Wasser hinausragt. Stattdessen ist sie niedrig genug, dass das Wasser von der einen auf die andere Seite fließen kann.

Ein herkömmlicher Kühlturm aus der Fertigungsindustrie



Zwei Kühltürme eines Kraftwerks



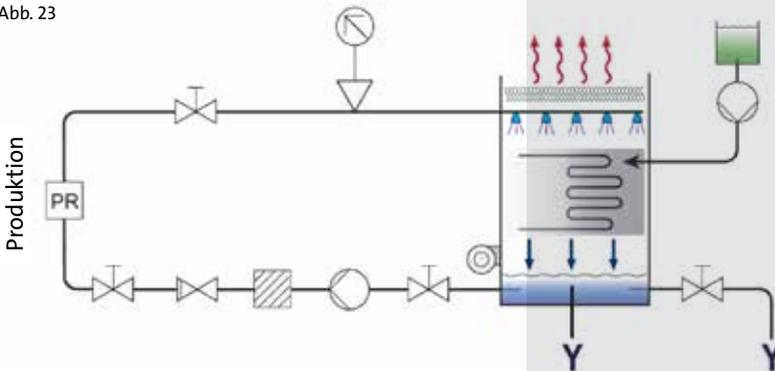
Kühltürme eines Kohlekraftwerks



Freie Kühlung

Der Energieverbrauch gewinnt in der Kältebranche zunehmend an Bedeutung. Auch die freie Kühlung wird immer beliebter. Im Prinzip ist damit eine natürliche Kühlung gemeint, die ohne mechanische Kühlung auskommt. In Abb. 23 ist der Aufbau einer Anlage für die freie Kühlung dargestellt.

Abb. 23



Wie in der Abbildung gezeigt wird das zu kühlende Medium direkt vom Prozess zum Kühlturm geleitet. Es ist nicht überraschend, dass dieser Prozess von den Außentemperaturen abhängt. Wie weit die Temperatur gesenkt werden kann, unterliegt daher starken Einschränkungen. Denn letztendlich entscheidet darüber immer die Umgebungstemperatur.

Die freie Kühlung wird häufig genutzt, um Büros oder ähnliche Gebäude zu kühlen.

Wasserbehandlung

In Wasserkühlanlagen geht Wasser durch Verdampfung, Leckagen und Verlagerung verloren. Um dieses Wasser zu ersetzen und die Kühlfunktion zu erhalten, muss dem Kühlturm Zusatzwasser zugeführt werden. Wenn das Wasser im Kühlturm verdampft, bleiben die darin gelösten Feststoffe zurück. Das neue Zusatzwasser enthält ebenfalls gelöste Feststoffe, sodass diese sich schnell in der Anlage ansammeln. Darüber hinaus bietet das Kühlwasser auch gute Bedingungen für das Wachstum von Mikroben und Biofilm.

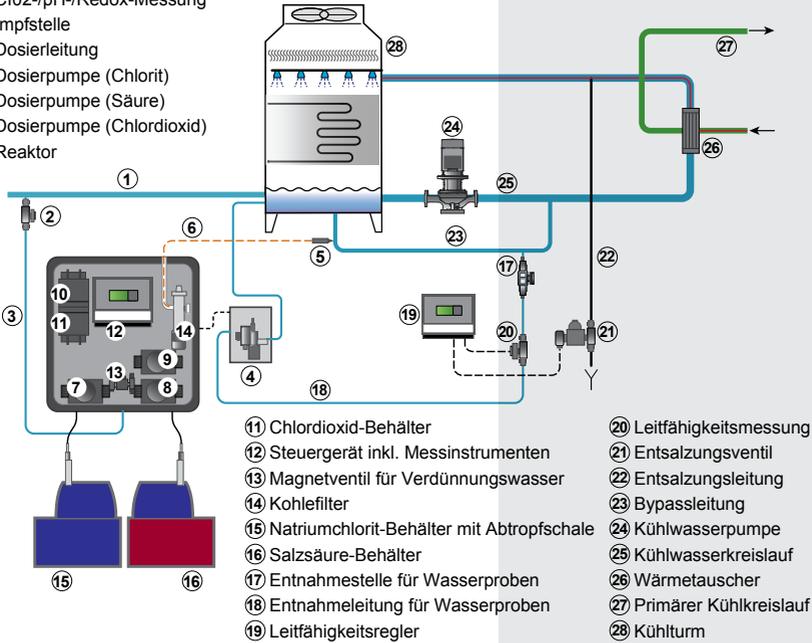
In Kraftwerken kommen zwei verschiedene Kühlkreisläufe zum Einsatz, die sich auch hinsichtlich der Wasserbehandlung unterscheiden:

- Kraftwerke mit geschlossenem Kühlkreislauf (57 % in den USA) nutzen die Verdampfung, um Wärme in großen Kühltürmen abzuführen, und verwenden das Wasser innerhalb des Kraftwerks wieder. Der Wasserverbrauch ist hier gering, da nur das bei der Verdampfung verloren gegangene Wasser nachgefüllt werden muss. Anlagen mit geschlossenem Kühlkreislauf sind kostspieliger als Anlagen mit Durchlaufkühlung.
- Kraftwerke mit Durchlaufkühlung (43 % in den USA) nehmen kaltes Wasser aus einer externen Quelle auf. Nach der Verwendung wird es aufbereitet und in die Quelle zurückgeleitet. Das Wasser ist dann zwar ultrarein, weist aber eine höhere Temperatur auf als vor dem Prozess. Der Wasserbedarf von Anlagen mit Durchlaufkühlung ist 30- bis 50-mal höher als der von Anlagen mit geschlossenem Kühlkreislauf, weil Letztere das Wasser innerhalb der Anlage wiederverwenden.

Qualitätssicherung: 3 Faktoren der Wasseranalyse

- Bei allen Kühlwasseranlagen müssen drei Faktoren strengstens überwacht werden: Mikrobewachstum, Ablagerungen und Korrosion. Bei offenen Anlagen mit Verdampfung ist das Risiko für Verunreinigungen und eine hohe Salzkonzentration jedoch höher als bei anderen. Die Einheiten der Wasserbehandlung hängen von der Wassermenge, der Anlagengröße und den verwendeten Geräten ab.
- Bei einer herkömmlichen chemischen Wasserbehandlung wird ein Wasserbehandlungsprogramm entweder vom Unternehmen selbst oder von einem Serviceanbieter durchgeführt. Im Rahmen eines solchen Programms wird ein oxidierendes Biozid sowie eine Kombination aus Kesselstein- und Korrosionshemmer in die Wasseranlage gegeben. Die chemische Behandlung muss überwacht werden, um ihre Wirksamkeit zu gewährleisten. Auf diese Weise können schwerwiegende Betriebsprobleme in der Anlage verhindert werden.

- ① Wasserleitung
- ② Stelle zum Ablassen des Verdünnungswassers
- ③ Verdünnungswasserleitung
- ④ ClO₂-pH-/Redox-Messung
- ⑤ Impfstelle
- ⑥ Dosierleitung
- ⑦ Dosierpumpe (Chlorit)
- ⑧ Dosierpumpe (Säure)
- ⑨ Dosierpumpe (Chlordioxid)
- ⑩ Reaktor



- ⑪ Chlordioxid-Behälter
- ⑫ Steuergerät inkl. Messinstrumenten
- ⑬ Magnetventil für Verdünnungswasser
- ⑭ Kohlefilter
- ⑮ Natriumchlorit-Behälter mit Abtropfschale
- ⑯ Salzsäure-Behälter
- ⑰ Entnahmestelle für Wasserproben
- ⑱ Entnahmeleitung für Wasserproben
- ⑲ Leitfähigkeitsregler
- ⑳ Leitfähigkeitsmessung
- ㉑ Entsalzungsventil
- ㉒ Entsalzungsleitung
- ㉓ Bypassleitung
- ㉔ Kühlwasserpumpe
- ㉕ Kühlwasserkreislauf
- ㉖ Wärmetauscher
- ㉗ Primärer Kühlkreislauf
- ㉘ Kühlturm

Hinweise für die Praxis

Die Wirksamkeit der Behandlung mit Korrosionsschutzmitteln wird von den folgenden Faktoren beeinflusst:

- Eigenschaften des Wassers: Ein höherer PH-Wert und ein höherer Langelier-Sättigungsindex hemmen die Korrosion. Bei einem sauren pH-Wert (< 4) löst sich die Eisenoxidschicht kontinuierlich auf. Bei Kühlwasser führt ein höherer pH-Wert und eine höhere Alkalität zu einer verstärkten Ausbildung von Calciumcarbonat. Dadurch sinkt die Korrosionsrate etwas, da der pH-Wert von 4 auf 10 erhöht wird. Bei einem pH-Wert über 10 bildet das Eisen eine Schutzschicht, die es vor Korrosion schützt.
- Bei der Konstruktion zu berücksichtigende Parameter: Eine niedrige Fließgeschwindigkeit des Wassers auf der Mantelseite führt verstärkt zu Ablagerungen. Dies muss bereits bei der Konstruktion der Anlage berücksichtigt werden.

- Verhindern von Mikrobenwachstum: Es ist ein wirksames Programm zum Verhindern von Mikrobenwachstum erforderlich, um schwerwiegende Probleme durch Ablagerungen (Fouling) zu verhindern. Fouling, das durch ungehindertes Mikrobenwachstum entsteht, kann auf unterschiedliche Weise die Korrosion verstärken.
- Systemsteuerung: Selbst die beste Aufbereitungstechnik ist auf eine gute Steuerung angewiesen. Die Systemsteuerung muss sorgfältig durchdacht werden, damit der pH-Wert, die Menge an Korrosionsschutzmitteln und andere Eigenschaften des Wassers möglichst genau eingestellt werden können.
- Vorbehandlung: Fett und/oder Korrosionsprodukte aus den vorherigen Behandlungsschritten müssen entfernt werden. Außerdem muss die Anlage mit einer ausreichenden Menge an Korrosionsschutzmitteln behandelt werden, bevor der normale Betrieb aufgenommen wird.
- Verunreinigungen: Verunreinigungen können ebenfalls ein Problem darstellen. Sulfide, Ammoniak und Kohlenwasserstoffe gehören zu den wichtigsten Schmutzstoffen. Sulfide haben eine korrodierende Wirkung auf Stahl und Kupferlegierungen. Ammoniak wirkt bei Messing korrodierend und fördert das Mikrobenwachstum. Kohlenwasserstoffe tragen zum Fouling und Mikrobenwachstum bei.

Meerwasserkühlung

In manchen Fällen wird die Wärme mithilfe von Meerwasser abgeführt anstatt über einen Kühlturm. Da Meerwasser gegenüber zahlreichen Materialien äußerst aggressiv ist, müssen bei seiner Verwendung verschiedene Faktoren berücksichtigt werden.

Meerwasser wirkt aggressiv, weil es einen hohen Salzgehalt aufweist (vor allem Chlorid, meist > 3 %).

Weitere Faktoren:

- Bildung von Biofilm
- Anstieg der Temperatur
- Stehendes Wasser
- Anstieg des Chloridgehalts (weniger bedeutend als die vorherigen Faktoren)
- Verschmutzung (Küstennähe)
- Kontinuierliche Chlorierung



Faustregeln: Werkstoffe, die für Meerwasser geeignet sind Werkstoffe von Grundfos:

- Gusseisen ist nicht geeignet
- EN 1.4408/1.4401 (CF8M/316) ist nicht geeignet
- EN 1.4517 (Duplexstahl) ist mit Einschränkungen geeignet (max. 25 °C) (Grundfos-Pumpen sind in der Regel als R-Ausführung gekennzeichnet)

Sonstige Werkstoffe:

- Bronze eignet sich für geringe Fördermengen
- Superduplex-/austenitische Stähle (PREN-Wert > 40) eignen sich für mittlere Temperaturen
- Titanium ist beständig
- Kunststoffe und Beschichtungen sind beständig
- Nickellegierungen sind geeignet

Wenn Pumpen aus EN 1.4517 oder die Grundfos-Pumpen in R-Ausführung verwendet werden, können die folgenden Parameter dabei helfen, Korrosionsprobleme zu vermeiden.

- Zulässige Meerwassertemperatur: max. 25 bis 30 °C*
- Dauerbetrieb: max. Stillstandsdauer von 6 bis 8 Stunden
- Ausreichende Entfernung zwischen Entnahmestelle und Küste
- Mit einer niedrigen Temperatur beginnen und in den ersten Wochen keine oder nur eine sporadische Chlorierung vornehmen
- * Bei mehr als 25 °C sollte die Anlage regelmäßig mit Süßwasser gespült werden (im Idealfall täglich – dies ist aber in Kühlanwendungen häufig nicht machbar).

Beschichten der Pumpen

Einige Pumpentypen sind mit einer Keramikbeschichtung erhältlich. Diese stellt eine Alternative zu anderen teuren Werkstoffen dar oder in Fällen, in denen die gewünschte Pumpe nicht im erforderlichen Werkstoff verfügbar ist.

Grundfos verwendet eine Beschichtung von Chesteron, um Pumpen vor Korrosion durch Meerwasser zu schützen.

Regelungsarten und Beispiele

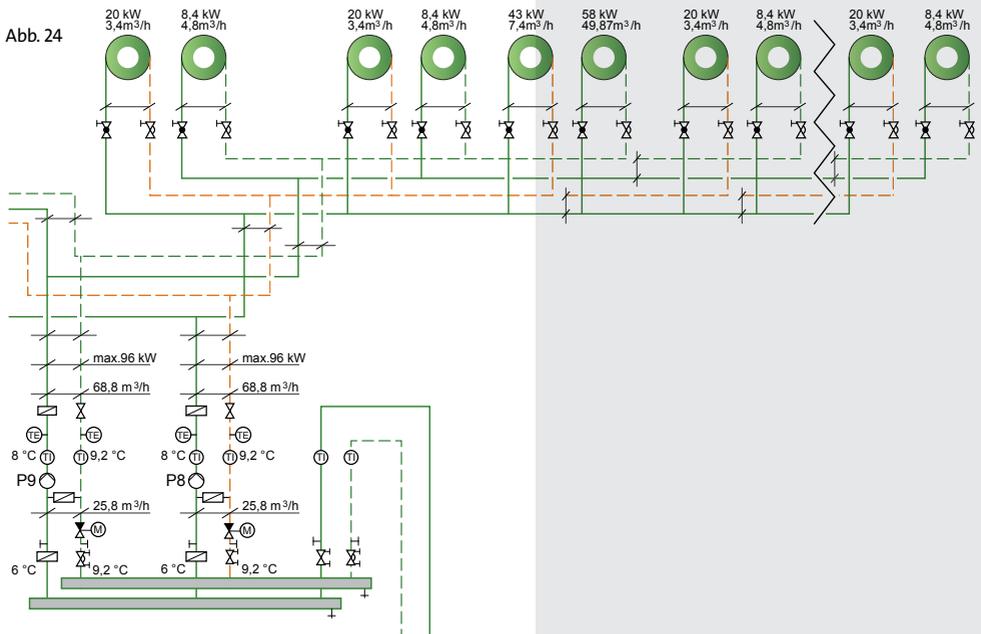
Im Folgenden sind einige Beispiele dazu aufgeführt, wie unterschiedliche Kühlkreise geregelt werden können. Zudem wird aufgezeigt, wie man ihren Betrieb verbessern und dadurch Energie einsparen kann.

Beschichtete Pumpen



Fallbeispiel 1:

Eine Anlage zur Kühlwasserversorgung mehrerer Endverbraucher (in diesem Fall Gießmaschinen) mit zwei Hauptpumpen (Abb. 24).



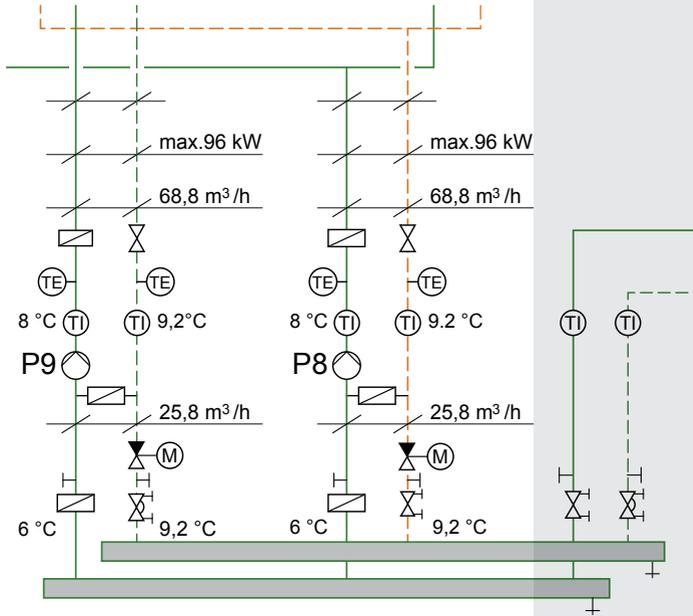
Die Anlage betreibt die Pumpen mit voller Drehzahl. Die einzelnen Kreisläufe werden über Drosselventile und ein Ein/Aus-Ventil geregelt. Das Drosselventil wird bei der Inbetriebnahme einmalig eingestellt. Dadurch wird viel Energie verschwendet. Außerdem ist der Durchfluss durch die einzelnen Kreisläufe uneinheitlich, da er davon abhängt, wie viele Kreisläufe jeweils aktiv sind.

Die Empfehlung von Grundfos für die Konfiguration einer solchen Anlage ist in den folgenden drei Szenarien beschrieben:

Szenario 1:

Im ersten Szenario empfehlen wir, sich auf die beiden Hauptpumpen zu konzentrieren, da hier die meiste Energie verbraucht wird. Diese werden im Beispiel ohne Regelung betrieben, sodass je nach Lastprofil der Durchfluss für die einzelnen Maschinen anders ausfällt.

Abb. 25



Es sollten daher Frequenzumrichter an jeder Pumpe montiert werden. Denn so kann mithilfe einer Drehzahlregelung ein konstanter Differenzdruck aufrechterhalten werden. Der Sensor muss so montiert werden, dass er den Differenzdruck direkt an der Pumpe misst (Abb. 26). Die perfekte Lösung wäre, die Messung zwischen der Auslass- und der Rücklaufleitung am weitesten von der Pumpe entfernten Punkt vorzunehmen (Abb. 27). Häufig ist dieser Punkt jedoch nur schwer zu bestimmen und die Installation von über 100 Meter langen Messkabeln kann sehr kostspielig sein.

Abb. 26: An der Pumpe installierter Differenzdrucksensor

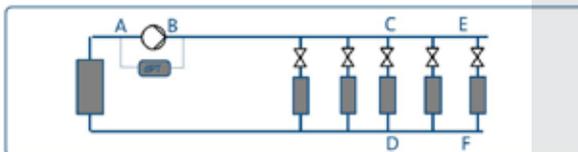
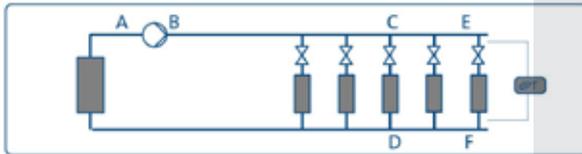


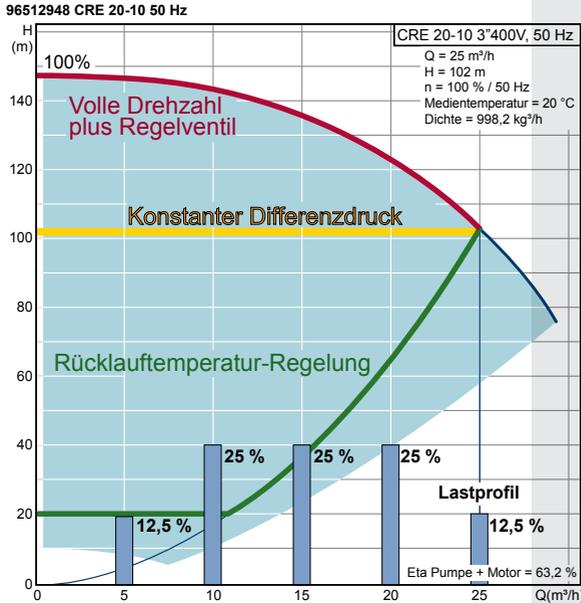
Abb. 27: Am Ende der Anlage installierter Differenzdrucksensor



Wenn der Sensor wie oben beschrieben montiert ist, kann jederzeit das erforderliche Druckniveau am Eingang jeder Gießmaschine gewährleistet werden. Abb. 28 verdeutlicht, was geschieht, wenn keine Regelung stattfindet. Ohne Drehzahlregelung entspricht der Pumpenbetrieb der roten Linie. Wird ein Ventil in der Anlage geschlossen, bewegt sich der Betriebspunkt der Pumpe auf der roten Kennlinie nach links, sodass die Pumpe immer mehr Druck als nötig erzeugt. Dadurch steigt der Durchfluss zu den übrigen Maschinen und die Differenztemperatur sinkt. Ein konstanter Differenzdruck stellt dagegen sicher, dass der Druck in der Anlage immer gleich bleibt – unabhängig davon, wie viele Ventile geöffnet oder geschlossen sind. Der Betrieb mit konstantem Differenzdruck wird durch die gelbe Linie dargestellt.

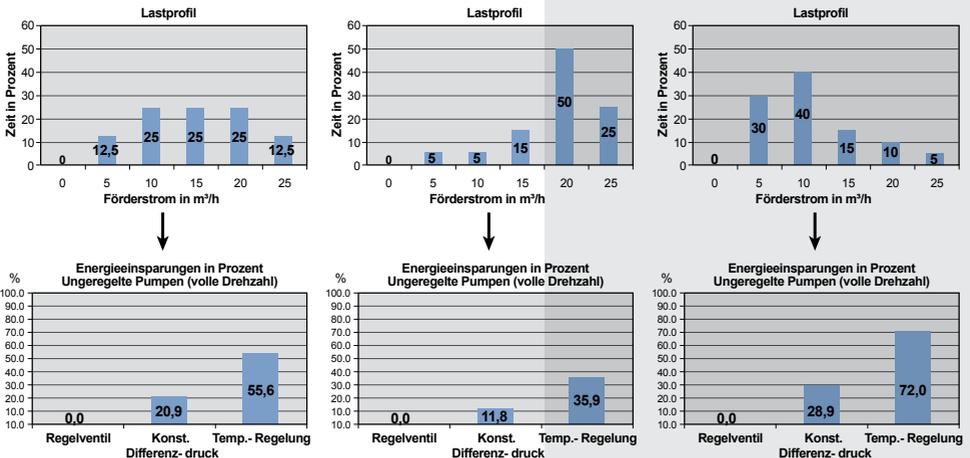
Die grüne Kennlinie verdeutlicht die Betriebsweise der Pumpe, wenn die Anlage in Abhängigkeit von der Temperatur geregelt wird. Auch wenn diese Option häufig die wirtschaftlichste ist, kann sie in einer Anlage wie dieser nicht genutzt werden. Denn sie eignet sich nur für Anlagen mit jeweils einem „Verbraucher“.

Abb. 28: Verschiedene Regelungsarten und Lastprofile



Wie oben beschrieben soll Szenario 1 sicherstellen, dass die richtige Kühlwassermenge in der Anlage verfügbar ist und dass Energie eingespart wird. Abb. 29 zeigt einen Vergleich der drei Regelungsarten bei unterschiedlichen Lastprofilen.

Abb. 29



Der Vergleich zeigt, dass bei einem durchschnittlichen Lastprofil Energieeinsparungen von etwa 20,9 % erreicht werden können, wenn man die Pumpe auf einen konstanten Differenzdruck einstellt.

Die Energieeinsparungen in dieser spezifischen Konfiguration mit den Pumpen P8 und P9 (siehe Abb. 25) kann wie folgt berechnet werden. Bei den folgenden Werten handelt es sich um Schätzwerte auf Grundlage des Diagramms in Abb. 28.

Gesamtdurchfluss:	87,55 m ³ /h
Förderhöhe:	7,5 bar
Betriebsstunden im Jahr	4800 Stunden

Ungeregelter Betrieb:

$$P_1 = \frac{\text{Durchfluss} \times \text{Förderhöhe} \times 2,72 \times \text{Stunden}}{\text{"Pumpe + Motor"}} = \frac{87,55 \times 75 \times 2,72 \times 4800}{0,8 \times 1000} = 107.161 \text{ kWh}$$

Einsparungen mit konstantem Differenzdruck:

$$P_1 = x \text{ Diff.-Drucktyp} \rightarrow 107.161 \times 0,209 = 22.397 \text{ kWh pro Jahr}$$

Die Berechnungen sind selbstverständlich nur als Orientierung gedacht. Wenn der Druck niedriger sein darf und die Betriebsstunden höher sind, fallen die Einsparungen beispielsweise viel höher aus.

Zu bedenken ist auch: Wenn die Belastung des Motors durch die Regelung reduziert werden kann, senkt dies auch die Wartungskosten.

Szenario 2:

Die Ausgangssituation in Bezug auf die Regelung der Hauptpumpen ist identisch mit Szenario 1. In diesem Szenario sollen die Kreisläufe für die einzelnen Maschinen jedoch in Abhängigkeit von der Auslasstemperatur geregelt werden. Dadurch wird nicht nur Energie eingespart. Auch die Temperaturdifferenz entlang jeder Maschine wird konstanter. Außerdem kann der erforderliche Durchfluss durch jede Maschine aufrechterhalten werden. Letztendlich bedeutet das: Unabhängig vom Lastprofil der einzelnen Maschinen wird stets ein optimaler Betrieb gewährleistet.

Szenario 3:

Die Ausgangssituation in Bezug auf die Regelung der Hauptpumpen ist identisch mit Szenario 1. In diesem Szenario werden jedoch andere Pumpen verwendet, die einen geringeren Druck liefern. Anstatt einen Druck von 7,5 bar zu erzeugen, liefern sie nur den Druck, der zum Überwinden der Verluste in den Hauptrohren erforderlich ist. Anders als im Szenario 2 sollte hier eine Pumpe anstelle eines Regelventils für jeden Maschinenkreislauf montiert werden. Diese Pumpe muss mit einer Drehzahlregelung ausgestattet sein, die den Druckverlust innerhalb der Maschine ausgleichen kann.

Das bedeutet: Die Hauptpumpen können bei Mindestdrehzahl betrieben werden und in den Gießmaschinen kann der jeweils erforderliche Druck oder Durchfluss mithilfe der einzelnen Pumpen aufrechterhalten werden. Die kleinen Pumpen der Maschinen müssen entweder in Abhängigkeit der Auslasstemperatur der Maschinen oder gemäß einem konstanten Differenzdruck entlang der Maschinen geregelt werden. Welche Regelungsart ausgewählt wird, hängt davon ab, wie viele Kühlkreisläufe es pro Maschine gibt und wie unterschiedlich der Druckverlust in den einzelnen Maschinen ausfällt.

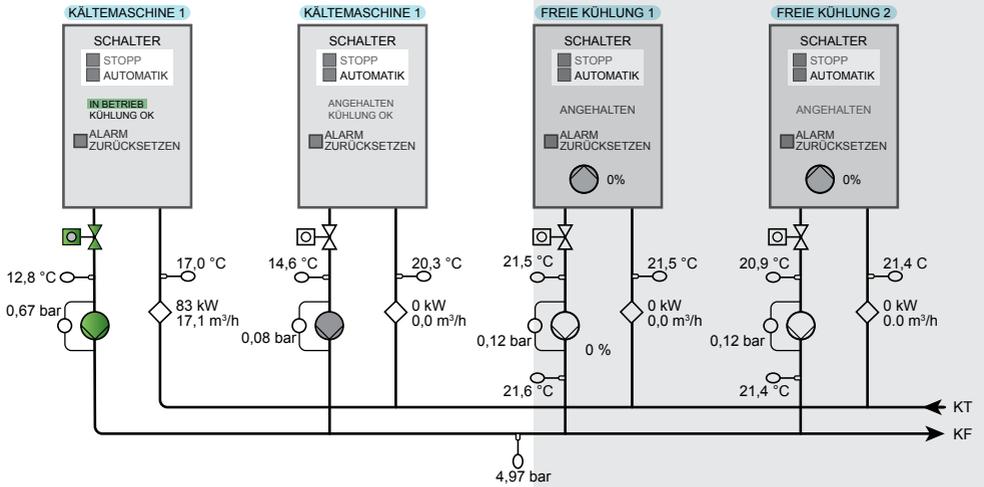
Konfigurationsbeispiel von Grundfos

Wir bei Grundfos stellen viele unserer Gießmaschinen selbst her. Abb. 30 zeigt, wie unsere Maschinen mit Kühlwasser versorgt werden.

Betrachten wir zunächst die Primärseite der Anlage: Sie besteht aus Kältemaschinen und Geräten für die freie Kühlung. Bei optimalen Außentemperaturen kommt die freie Kühlung zum Einsatz. Andernfalls werden die Kompressionskältemaschinen verwendet.

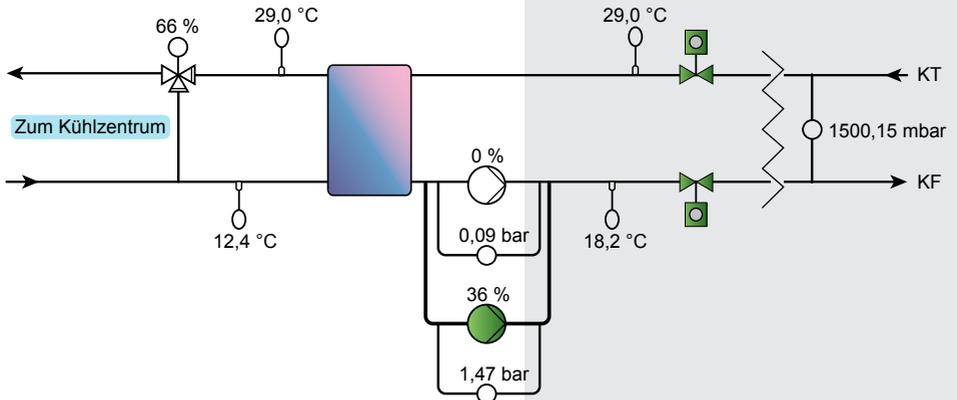


Abb. 30 Kühlanlage in der Produktion von Grundfos



Das Glykol-Wasser-Gemisch wird von den Pumpen in einen Wärmetauscher geleitet (Abb. 31).

Abb. 31: Kühlanlage in der Produktion von Grundfos



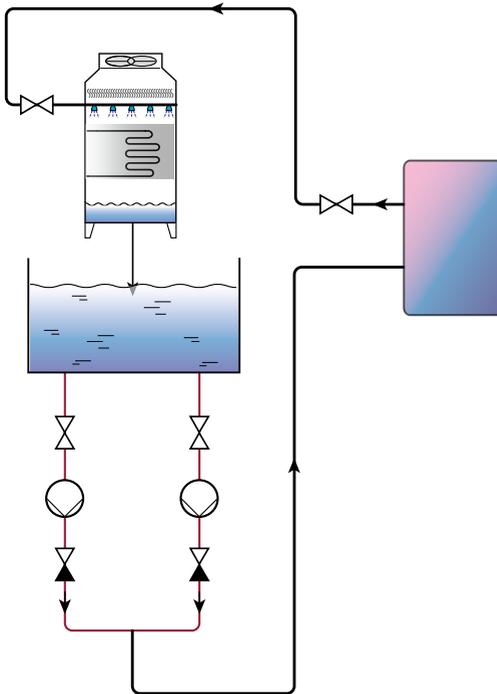
Der Druck des Kühlwassers, das in die Maschinen geleitet wird, wird von den Pumpen aufrechterhalten. Die Pumpen werden dabei mithilfe eines Differenzdrucksensors geregelt.

Das in die Maschinen geleitete Kühlwasser wird in den einzelnen Maschinen für die Sekundärprozesse verwendet. Bei der ersten Inbetriebnahme wird jeder Kreislauf manuell eingestellt. Der Primärkreis (die Gussform) verfügt über eine separate Thermoeinheit, da die erforderliche Temperatur von Form zu Form unterschiedlich ausfällt.

Fallbeispiel 2:

Dieses Beispiel stammt aus einer chinesischen Lebensmittelfabrik, in der zwei Pumpen Wasser von einem Kondensator in ein Kühlaggregat und anschließend in einen Kühlturm leiten (Abb. 32).

Abb. 32



Herkömmliche Thermoeinheit für die Kühlung



Die Pumpen sollen eigentlich abwechselnd als Betriebs- und Reservepumpen betrieben werden. Tatsächlich läuft im Winter nur eine der Pumpen und im Frühjahr wird die zweite Pumpe zugeschaltet, sodass im Sommerbetrieb beide Pumpen laufen. Die Produktion läuft 350 Tage im Jahr jeweils 4 Stunden am Tag.

In der folgenden Tabelle sind die Spezifikationen der Pumpen aufgeführt.

Pumpe Nr. 1:	Pumpe Nr. 2:
P2: 18,5 kW, 4-poliger Motor	P2: 18,5 kW, 4-poliger Motor
Förderstrom: 200 m ³ /h	Förderstrom: 200 m ³ /h
Förderhöhe: 20 mV	Förderhöhe: 20 mV
Alter: über 10 Jahre	Alter: über 10 Jahre

Die Temperaturdifferenz in dieser Anlage war bei der letzten Inspektion sehr niedrig. Sie lag bei etwa 2,5 °C.

Berechnung des Energieverbrauchs der vorhandenen Pumpen:

$$P_1 = \frac{\text{Tage im Jahr} \times \text{Stunden pro Tag} \times \text{Förderstrom in } \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \text{Förderhöhe} \times \text{Dichte} \times \text{Gravitation}}{\eta \text{ Motor} \times \eta \text{ Pumpe} \times 3600} = x \cdot 3$$

$$P_1 = \frac{350 \times 0,5 \times 24 \times 200 \times 32 \times 9,81 \times 1000}{(0,926 - 0,1) \times (0,854 - 0,15) \times 3600} = x \cdot 3 = 389.752 \text{ kW/h pro Jahr}$$

Berechnung des Energieverbrauchs bei Verwendung neuer Grundfos-Pumpen:

$$P_1 = \frac{\text{Tage im Jahr} \times \text{Stunden pro Tag} \times \text{Förderstrom in } \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \text{Förderhöhe} \times \text{Dichte} \times \text{Gravitation}}{\eta \text{ Motor} \times \eta \text{ Pumpe} \times 3600} = x \cdot 3$$

$$P_1 = \frac{350 \times 0,5 \times 24 \times 200 \times 32 \times 9,81 \times 1000}{0,926 \times 0,854 \times 3600} = x \cdot 3 = 384.444 \text{ kW/h pro Jahr}$$

Potenzielle Einsparungen durch einen Austausch der Pumpen:

$$P_{\text{Einsparungen}} = 389.725 - 284.444 = 105.307 \frac{\text{kW}}{\text{h}} \text{ pro Jahr}$$

Den Wirkungsgrad der vorhandenen Motoren und Pumpen haben wir auf Basis von Erfahrungswerten geschätzt. Bei einer Grundfos-Pumpe für diese Aufgabe liegt der Wirkungsgrad des Motors bei etwa 92,6 % und der Wirkungsgrad der Pumpe bei etwa 85,4 %. Da die meisten Pumpen 0,5 bis 1,5 % pro Jahr einbüßen (je nach Wartung und Fördermedium) haben wir den Wirkungsgrad der alten Pumpen in der Berechnung um 15 % reduziert. Die Entwicklung der Motorbauteile hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Darum und weil die Grundfos-Motoren die Anforderungen der Ökodesign-Richtlinie der EU erfüllen, schätzen wir, dass der Wirkungsgrad einer zehn Jahre alten Pumpe mindestens 10 % geringer ist als der einer neuen. In Anbetracht des Erscheinungsbilds dieser Pumpen und unserer Erfahrungen mit „alten Effizienzkennezeichnungen“ ist es wahrscheinlich, dass der Wirkungsgrad der alten Bauteile tatsächlich noch viel geringer war als in der Berechnung angenommen.

Auch wenn das Einsparpotenzial in diesem Beispiel erheblich ist, würden wir dennoch empfehlen, nicht nur die beiden Pumpen durch neue auszutauschen. Denn noch besser wäre eine Druckerhöhungsanlage aus drei oder vier Pumpen, deren Drehzahl mit Frequenzumrichtern geregelt werden kann.

Die Drehzahlregelung der Pumpe sollte dabei von der Differenztemperatur abhängen, die wie bereits erwähnt etwa 2,5 °C betrug. Im Idealfall sollte die Differenztemperatur auf etwa 6 °C erhöht werden. Denn dadurch könnte der Förderstrom in der Anlage mindestens halbiert werden.

Berechnung der Kühlenergie bei der alten Differenztemperatur:

$$Q = x_{\text{durchschnittlicher Durchfluss im Jahr}} \times C \times \Delta t = 300 \times 1000 \times 4,2 \times 2,5 = 3150 \text{ MJ}$$

Berechnung der Kühlenergie bei einer Differenztemperatur von 6 °C:

$$Q = x_{\text{durchschnittlicher Durchfluss im Jahr}} \times C \times \Delta t = \frac{3150000}{4,2 \times 6 \times 1000} = 125 \text{ m}^3/\text{h}$$

Leistungsaufnahme bei verändertem Förderstrom:

$$P_1 = \frac{350 \times 0,5 \times 24 \times 200 \times 32 \times 9,81 \times 1000}{0,926 \times 0,854 \times 3600} = x \cdot 3 = 173.352 \text{ kW/h pro Jahr}$$

Durch das Austauschen der Pumpen, Regeln der Drehzahl und Optimieren des Kühlturbetriebs sind folgende Energieeinsparungen möglich:

$$P_{\text{Einsparungen}} = 389.725 - 173.352 = 216.399 \frac{\text{kW}}{\text{h}} \text{ pro Jahr}$$

Auch wenn die oben aufgeführten Berechnungen theoretisch sind, stellen die Werte sehr konservative Schätzungen dar. Die tatsächlichen Einsparungen würden sehr wahrscheinlich noch höher ausfallen, weil die neuen Pumpen nur dann laufen, wenn es wirklich erforderlich ist. Darüber hinaus könnte der Druckverlust in der Anlage drastisch gesenkt werden, weil der Durchfluss durch die Rohrleitungen geringer wäre. Dies würde ebenfalls zu Energieeinsparungen beitragen. Ein letzter Aspekt, der die Energieeinsparungen erhöht, ist das Kühlaggregat, da es mit einer konstanteren Differenztemperatur betrieben werden könnte.

Grundfos-Produkte

Pumpen

In Bezug auf die Pumpen auf der Sekundärseite (die in den Beispielen oben verwendeten Pumpen) gibt es einige Anforderung, die vor allem von Q und h abhängen. Beachten Sie bitte die Hinweise im Abschnitt „Allgemeine Hinweise zu den Pumpen“. Bei den Pumpen könnte es sich zum Beispiel um die Modelle NB/NK, TP, CR usw. handeln.

Die Größe der Pumpen kann je nach Anwendung erheblich variieren. Alle Pumpentypen kommen zum Einsatz: von den kleinen UP-Pumpen über die CR für hohe Drücke und Drehzahlen bis hin zu den leistungsstarken HS-Pumpen.

Industrielle Standard-Kühltürme benötigen beispielsweise Förderströme zwischen 25 und 2000 m³/h und für den größten Kühlturm eines 700-MW-Kohlekraftwerks sind sogar bis zu 71.600 m³/h erforderlich.

Kühlaggregate

Wenn wir bei Grundfos von Kühlaggregaten sprechen, meinen wir in der Regel die von OEM-Kunden hergestellten Geräte. Diese werden zum Beispiel zum Kühlen von Laserschweißgeräten, Gießmaschinen, Elektronik usw. verwendet. Sie kommen aber auch zum Kühlen des Hydrauliköls von Windkraftanlagen zum Einsatz.

Die wichtigsten Anforderungen dieser Kunden sind meist die Betriebssicherheit und der Platzbedarf der Geräte.

Regelverfahren

Ein energiesparender Betrieb ist bei diesen Geräten meist keine Priorität. Sie müssen vor allem kompakt und betriebssicher sein. Dennoch können in Bezug auf die Energiekosten und die Regelkomponenten erhebliche Einsparungen erzielt werden, indem das richtige Regelverfahren ausgewählt wird.

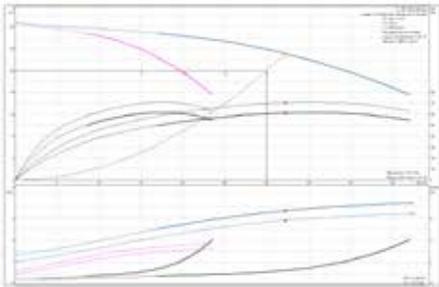
In der folgenden Tabelle sehen Sie ein Beispiel dazu, wie viel Energie mit kleinen Pumpen eingespart werden kann. Das Lastprofil stammt von einem Kühlaggregat für eine Windkraftanlage. Die Tabelle zeigt einige beispielhafte Lastprofile mit unterschiedlichen Betriebsstunden und Förderströmen in Abhängigkeit von der Windturbinen-Last.

Lastprofil		
Q: Förderstrom	h: Förderhöhe	Betriebsstunden
30 m ³ /h	20 m	1760 Stunden/Jahr
25 m ³ /h		2500 Stunden/Jahr
20 m ³ /h		2500 Stunden/Jahr
15 m ³ /h		2000 Stunden/Jahr

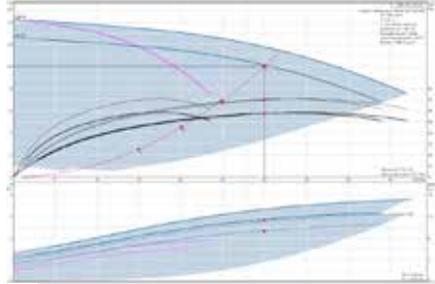


In Windkraftanlagen werden in der Regel CR-Pumpen eingesetzt. Diese können als Einzelpumpen montiert oder als Doppelpumpen in Form einer kleinen Druckerhöhungsanlage ausgeführt sein. Die folgenden Diagramme und die Tabelle zeigen vier Beispiele mit unterschiedlichen Konfigurationen, die alle den benötigten Förderstrom liefern können.

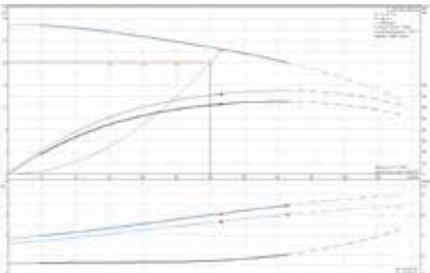
Konfiguration 1: 2 x CR15-2
(2 ungeregelte Pumpen im Parallelbetrieb)



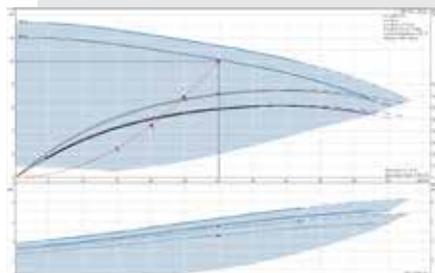
Konfiguration 2: 2 x CRE15-2
(2 drehzahlgeregelte Pumpen im Parallelbetrieb)



Konfiguration 3: 1 x CR45-1 (ungeregelte Pumpe)



Konfiguration 4: 1 x CRE45-1 (drehzahlgeregelte Pumpe)



	Jährlicher Stromverbrauch in kW/h			
	Konfiguration 1	Konfiguration 2	Konfiguration 3	Konfiguration 4
Betriebspunkt 1	6625	5704	6095	5532
Betriebspunkt 2	7869	4299	7151	4078
Betriebspunkt 3	7316	2453	6661	2228
Betriebspunkt 4	2953	870	4319	749
Gesamt	24267	13326	24226	12587

Aus der Tabelle geht hervor, dass nur halb so viel Energie notwendig ist, wenn die Pumpen über Frequenzumrichter geregelt werden. Wie bereits oben erwähnt können durch den Einsatz von Frequenzumrichtern auch weitere Einsparungen in Bezug auf andere Bauteile und die Wartung erzielt werden.

Ob eine Einzel- oder Doppelpumpe benötigt wird, hängt meist von den Sicherheitsanforderungen ab. Bei Konfiguration 2 können drei der Betriebspunkte mit nur einer Pumpe erreicht werden. Bei einem Ausfall einer Pumpe könnte die Windkraftanlage also weiter Strom erzeugen – wenn vielleicht auch nur mit verringerter Last. Falls nur eine Pumpe vorhanden ist, wäre dies natürlich nicht möglich.

Grundfos-Produkte

In Aggregaten kommen am häufigsten die CR, die MTR und die kompakte CM von Grundfos zum Einsatz.

MTR



CME



CRNE



Allgemeine Hinweise zu den Pumpen

Bei der Auswahl einer Pumpe für eine Kühlanwendungen müssen die folgenden Aspekte berücksichtigt werden, bevor die Pumpe ausgelegt wird:

- Förderstrom
- Förderhöhe
- Fördermedium
- Temperatur des Fördermediums
- Konzentration des Fördermediums
- Viskosität
- Dichte
- Zusätze im Fördermedium
- Umgebungstemperatur

Wenn ein bestimmtes Medium gefördert werden soll, ist es ratsam, es im **Fördermedien-Leitfaden von Grundfos** nachzuschlagen. Darin sind nahezu alle Fördermedien aufgeführt, die jemals mit Pumpen von Grundfos transportiert wurden. Dazu finden Sie hier Empfehlungen dazu, was bei den jeweiligen Medien beachtet werden sollte. Viele Glykol-Gemische, die in Kälte- und Kühlanwendungen zum Einsatz kommen, sind auch in WinCaps oder WebCaps verfügbar, wenn Sie die Pumpe auslegen.

Informationen und Empfehlungen zu den am häufigsten verwendeten Fördermedien finden Sie auch im Folgenden.

Glykol

- Die Dichte und Viskosität variieren je nach Konzentration und Temperatur des Mediums stark. Unter Umständen ist ein überdimensionierter Motor erforderlich.
- Wenn eine NB/NK- oder TP-Pumpe verwendet wird, empfiehlt sich in der Regel eine Wellendichtung mit reduzierter Dichtungsfläche. Die Standard-Patronendichtung der CR-Pumpe eignet sich ebenfalls für den Einsatz mit Glykol.
- Meist werden Pumpen aus Gusseisen ausgewählt. Sollten jedoch Zusätze zum Kühlwasser hinzugegeben werden, sind Pumpen aus nichtrostendem Stahl erforderlich.

- Die Glykoltemperatur ist in der Regel niedrig. In manchen Fällen kann das Glykol aber auch warm sein. Die Pumpe muss daher jeweils für die vorherrschende Medientemperaturen geeignet sein.
- Glykol wird manchmal auch als Reinigungsmittel genutzt. In diesem Fall können die Öle und Fette in der Anlage innerhalb der ersten Betriebsstunden Dichtungsprobleme verursachen, falls die Anlage vorher nicht gründlich durchgespült wurde.

Ammoniak (NH₃)

- Ammoniak weist nicht dieselbe Dichte und Viskosität wie Wasser auf. Die Pumpe muss daher für eine Viskosität von etwa 0,3 mm²/S ausgelegt und ausreichend geschmiert werden. Für Ammoniak kann die CR-Pumpe ausgewählt werden.
- Der Siedepunkt von Ammoniak ist niedrig, sodass es am Einlass der Pumpe leicht zu Kavitation kommen kann. Daher muss sichergestellt sein, dass der Zuluftdruck ausreichend hoch ist.
- Da Ammoniak giftig ist, wird eine Wellendichtung mit Back-to-Back-Anordnung oder eine Magnetkupplung empfohlen.
- In Kälteanlagen wird Ammoniak stets unverdünnt verwendet. Ammoniak-Wasser-Gemische werden häufig als Reinigungsmittel im Haushalt oder zur Herstellung verschiedener Produkte (z. B. Textilien, Kunstfasern, Gummi, Dünger oder Kunststoffe) verwendet. Kupfer und Kupferlegierungen sind gegenüber Ammoniumhydroxid nur bedingt beständig.

Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Die Viskosität von Kohlenstoffdioxid ist so niedrig, dass eine Normpumpe aufgrund der niedrigen Schmier Eigenschaften nicht infrage kommt. Daher sollten RC-Pumpen ausgewählt werden (siehe letzte Seite).



GRUNDFOS GmbH

Schlüterstr. 33
D-40699 Erkrath
Tel. +49 211 929 690
infoservice@grundfos.com
www.grundfos.de

GRUNDFOS PUMPEN VERTRIEB GES.M.B.H.

Grundfosstr. 2
A-5082 Grödig
Tel. +43 6246 883 0
www.grundfos.at

GRUNDFOS PUMPEN AG

Bruggacherstrasse 10
CH-8117 Fällanden
Tel. +41 44 806 81 11
www.grundfos.ch

GRUNDFOS 