

# Pumpen in Kälte- und Klimaanlage

## 1 Einleitung

Der Bedarf an Klimatisierung von Gebäuden in Deutschland steigt. Gründe hierfür sind u.a. steigende Ansprüche der Investoren und Mieter an die thermische Behaglichkeit sowie ein ausgeprägter Trend zu Gebäuden mit transparenten Fassaden. Zudem hat der klimatische Wandel in den letzten Jahren zu einer Erhöhung der mittleren Temperatur im Sommer von 2 K in Deutschland geführt. „Die Temperaturbegrenzung in Gebäuden ist nur noch in Ausnahmefällen ohne Kälte- und Klimatechnik möglich.“ [Pfeiffenberger, 2004] Würden heutige Gebäude nicht mehr klimatisiert werden, läge die Raumtemperatur im Sommer 16 K oberhalb der Außenlufttemperatur. [Schulz, 2004]

Als Folge davon sind bei der Klimatisierung höhere Leistungen



Dr.-Ing. Sönke Biel, WILO AG

und vor allem deutlich längere Betriebszeiten als bisher einzuplanen. Die wassergebundene Gebäudekühlung bietet hier baulich und energetisch bestmögliche Lösungen. Der Einfluss von Pumpen auf den Energieaufwand und die Regelung der Gebäudekühlung ist dabei nicht außer Acht zu lassen. Der folgende Artikel stellt das Potenzial der wassergebundenen Kühlung dar und erläutert grundlegende Anforderungen, die einen erfolgreichen Einsatz von Pumpen in der Klimatechnik ermöglichen.

## 2 Energietransport mit Wasser

Die Mehrzahl aller größeren Kälteanlagen in der Klimatechnik arbeitet nach dem System der indirekten Kühlung mit Kaltwasserverteilung. Die Vorteile des wassergebundenen Wärme- bzw. Kälte transportes liegen auf der Hand:

In klimatechnischen Systemen ist der Aufwand zum Transport gleicher Kälteleistung mit Wasser bis zu 40fach kleiner im Vergleich zu luftgebundenen Systemen. Analog dazu sind bei Luftkanälen bis zu 20fach größere Querschnitte als bei Wasserrohrlei-

tungen vorzuhalten. Zudem bieten wassergebundene Systeme die Möglichkeit der Kältespeicherung. Dies führt zu erhöhter Planungssicherheit und Reduktion der Nennleistung der Kältemaschine. Bei optimierter Auslegung der Pumpen innerhalb des Verteilsystems beträgt die aus dem hydraulischen Bedarf resultierende Anschlussleistung der Pumpen zwischen 1 % und 4 % der thermischen Kälteleistung im Auslegungsfall. Bei diesen optimierten Systemen ist die Leistungszahl der Wasserkühlsätze inklusive der Pumpen nur wenige Prozentpunkte schlechter als die der Kältemaschine allein.

Neben den bautechnischen und energetischen Vorteilen lassen sich mit wassergebundenen Raumkühlssystemen behagliche Klimatisierungslösungen in großer Variantenvielfalt realisieren. Wird die Abfuhr der thermischen Lasten allein durch Erhöhung der Luftumwälzung bzw. Absenken der Lufttemperatur realisiert, führt dies nicht selten zu Störungen durch Strömungsgeräusche und Zugerscheinungen beim Nutzer. Wassergebundene Raumkühlssysteme bieten hier geeignete Alternativen und garantieren maximale thermische Behaglichkeit. Auf den hygienisch erforderlichen Luftwechsel darf dabei jedoch nicht verzichtet werden.

Der Einsatz wassergebundener Kühlssysteme verspricht somit höchsten Komfort bei gleichzeitig kleinem energetischem Aufwand und maximaler Flexibilität.

## 3 Merkmale von Kaltwasserverteilsystemen

Die offenkundigen Vorteile der Kaltwasserverteilsysteme führen in der Praxis bisweilen dazu, dass der Energieaufwand von Pumpen und deren Einfluss auf die Regelstabilität des Gesamtsystems unterschätzt wird. Dies beginnt bei der Planung und setzt sich im Betrieb der gebäudetechnischen Anlage fort. Ein renommiertes Fachbuch nennt als Vorteil der indirekten, wassergebundenen Kühlung, dass



Bild 1: Modernes Bürogebäude.

| Merkmal |                                                                | Charakteristik <sup>1</sup> |                                                                                                                     |
|---------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                                                                | Heizung                     | Kühlung                                                                                                             |
| 1       | Temperaturdifferenz zwischen der Heiz-/Kühlfläche und der Luft | 5 bis 70 K                  | 5 bis 10 K                                                                                                          |
| 2       | Temperaturspreizung zw. Vor- und Rücklauf                      | 5 bis 20 K                  | 2 bis 6 K                                                                                                           |
| 3       | Variationen der Vorlauf-temperatur zur Leistungsregelung       | $\pm 5$ bis $\pm 15$ K      | Absenkung nicht zulässig wegen Kondensations- bzw. Einfriergefahr. Anhebung führt zu erheblichen Leistungseinbußen. |

**Tabelle 1: Merkmale von Kaltwasser- und Warmwasserverteilsystemen.**

1. eine „eindeutige Abgrenzung der Leistungsgarantien zwischen Klimatechnik und Kältetechnik“ [Recknagel, 2001] besteht und

2. das „Kaltwasserverteilsystem praktisch gleich dem Warmwasserverteilsystem und damit dem Klimatechniker vertraut“ [Recknagel, 2001] ist.

Zu Punkt 1 ist zu sagen, dass dies aus kommerzieller Sicht richtig ist. Im Betrieb der Anlage beeinflussen sich beide Systeme jedoch maßgeblich und ein einwandfreier Betrieb ist nur bei Abstimmung beider Gewerke möglich.

Die weitläufig verbreitete Annahme Warmwasserhydraulik = Kaltwasserhydraulik aus Punkt 2 erscheint auf den ersten Blick logisch. Bei näherer Betrachtung lassen sich jedoch große Unterschiede zwischen beiden Systemen feststellen. Vernachlässigt man diese, führt dies nicht selten zu einem unwirtschaftlichen Betrieb der Kälteanlage und einer Unterversorgung von Verbrauchern in Kaltwassersystemen. Wesentliche Unterschiede zwischen Kaltwasser- und Warmwasserverteilsystemen in Gebäuden sind in Tabelle 1 (oben) gegenübergestellt.

Die Veränderung der absoluten Wassertemperaturen und der Differenztemperaturen ist bei Heizungssystemen deutlich stärker ausgeprägt als bei Kühlsystemen. Geringe Temperatur-

differenzen sind in allen Anwendungsfeldern der Kältetechnik die Regel. Die Folge ist, dass die Anlagen bei gleicher Wärme-/Kälte-Leistung mit einem um den Faktor 2-8 größeren Volumenstrom ausgelegt werden müssen.

Bei der Leistungsanpassung der Kaltwassersysteme kann nicht oder nur sehr eingeschränkt auf Temperaturregelung (z. B. durch Variationen der Vorlauftemperatur bzw. der Temperaturspreizung) zurückgegriffen werden. Voraussetzung ist der Einsatz einer sehr genauen Mess- und Regelungstechnik. Dies verdeutlicht folgendes Beispiel: Die Absenkung der mittleren Heizflächentemperatur eines statischen Konvektors (70/55°C) um 2 K bewirkt eine Reduktion der Heizleistung von ca. 9 %. Die Erhöhung der mittleren Kühlflächentemperatur einer Kühldecke (16/18°C) um 2 K bewirkt im Vergleich dazu eine Reduktion der Kühlleistung um ca. 30 %. Die Leistungseinbußen sind also bei gleicher Änderung der Randbedingungen in Kühlsystemen um den Faktor 3 größer. Analog dazu reagieren Kühlsysteme bei verringerter Wasserdurchströmung mit einer deutlich höheren Leistungsreduktion als Heizungssysteme.

Als Folge dessen sind die Leistungsreserven von Kaltwassersystemen deutlich knapper. Schwächen in der Ausführung von Kaltwasserverteilkreisen er-

<sup>1</sup> Die angegebenen Werte sind abhängig von der Art des eingesetzten Heiz- und Kühlsystems.

zeugen sehr schnell Abweichungen zwischen gewünschter und realer Prozesstemperatur. Die Kaltwasserhydraulik ist eindeutig empfindlicher als die Warmwasserhydraulik und bedarf daher einer sehr gründlichen Planung und Ausführung. In existierenden Anlagen mit Problemen bei der Kälteversorgung versucht man häufig die fehlenden Leistungsreserven durch Erhöhung der Pumpenleistung auszugleichen. Die Maßnahme führt jedoch nicht selten zur Schaffung weiterer Schwierigkeiten, wie z.B. der Anhebung der Rücklauftemperatur. Dies kann Instabilitäten in der Regelung des Gesamtsystems und ein häufiges Ein- und Ausschalten der Verdichter herbeiführen.

#### 4 Pumpen in Kaltwasserverteilsystemen

Pumpen in kälte- und klimatechnischen Anlagen haben folgende Aufgaben:

- Sicherstellung der Kälteversorgung in allen Gebäudезonen.
- Realisierung des einwandfreien, regelungstechnischen Betriebs der Kälteanlage und des Kaltwasserverteilsystems.

Diese Aufgaben sollen mit möglichst geringem Kostenaufwand erfüllt werden. In ausgeführten

Kaltwassersystemen zur Gebäudekühlung findet man zum Teil folgendes Bild bezüglich der Pumpeninstallation wieder:

1. Die Pumpen werden zu groß ausgelegt. Die Gründe dafür sind meist nicht in der Unwissenheit des Ausführenden sondern in den Begleitumständen zu suchen:
  - Unzureichende Definition der Schnittstellen zwischen den betroffenen Gewerken (Kälteanlagenbauer, Installateur, MSR-Techniker, etc.).
  - Die Anlagenkennlinie ist zum Zeitpunkt der Planung oft nur überschlägig bekannt. Gründe sind der hohe Kostendruck, der zur Reduktion der Planungskosten und -zeit führt sowie häufige Änderungen während Planungs- und Ausführungsphase, sodass die tatsächlichen Anforderungen nicht fixiert werden können.
  - Wegen knapper Leistungsreserven des Systems (s.o.) werden bei der Auslegung der Pumpen oft große Sicherheitsreserven eingeplant. Motto: „Bigger is better“.
2. Die Pumpenauswahl erfolgt ohne Beachtung der Pumpenbauart und des Wirkungsgrades der Pumpe im Betriebspunkt der Anlage.
3. Die Laufzeiten der Pumpen überschreiten deutlich die Zeit mit Kühlbedarf des Gebäudes.
4. Die Pumpen werden ohne eine leistungsadaptierende Regelung betrieben.

Die genannten Fehler führen in Summe zu einer deutlichen Verschlechterung des Energieaufwandes der klimatechnischen Anlage. Ein weiterer Punkt der häufig unterschätzt wird, ist der Einfluss der Kaltwasserhydraulik auf den Betrieb der Kälteanlage. So wirken sich überdimensionierte und schlecht an den Lastfall adaptierbare Hydrauliken negativ auf den Anlagenbetrieb (häufiges Takten der Kälteanlage) und auf den Komfort des Nutzers (Schwankungen der Raumtemperatur sowie Strömungsgeräusche) aus.

Erweitert man den Blick von den Pumpen auf das gesamte hydraulische System, ergeben sich weitere Punkte, die in Kaltwasserverteilkreisen zu deutlichen Einbußen bei der Kälteversorgung und Erhöhung der Betriebskosten führen:

Darunter fällt der fehlende hydraulische Abgleich der Verteilerstränge und der Verbraucher untereinander. Die Folge ist in der Regel eine Unterversorgung der Verbraucher am „Schlechtpunkt“. Als solchen bezeichnet man Verbraucher, die infolge ihrer räumlichen Lage und der resultierenden Netzverluste keinen ausreichenden Wassermassenstrom über den Wärmeübertrager zur Verfügung haben.

Des Weiteren sind die sich im System ergebenden Druckverluste der Wärmeübertrager, Ventile und Rohrleitungen kritisch zu beurteilen. In der Kältetechnik werden höhere Strömungsgeschwindigkeiten in den Rohren toleriert. Dies resultiert u.a. aus der Absicht, geringe Kosten bei der Verrohrung insbesondere der diffusionsdichten Wärmedämmung zu erreichen. Auch bei den Wärmeübertragern sind höhere wasserseitige Druckverluste (20 kPa bis 50 kPa) als in der Heizungstechnik die Regel.

Fehlender hydraulischer Abgleich, Sicherheitsreserven bei der Planung und Pumpenbetrieb weit außerhalb des Nennpunktes der Pumpe kann in ausgeführten Kaltwassersystemen dazuführen,

dass die installierte Pumpenleistung um den Faktor 2 oberhalb des erforderlichen Bedarfs liegt. Die Pumpenleistung der Kaltwasserverteilung kann dann mitunter 25% der installierten Verdichterleistung betragen. Dies würde bei einer Leistungszahl der Kältemaschine von 4,0 auf eine Leistungszahl von 3,2 für das Gesamtsystem führen. Dieses theoretische Beispiel deckt sich mit einer Studie an klimatechnischen Systemen: Wird neben der installierten Leistung auch die meist deutlich höhere Laufzeit der Pumpen berücksichtigt, kann der Energiebedarf für den Pumpenantrieb in Wasserkühlsätzen bis zu 150% der elektrischen Energie zur Kälteerzeugung liegen. [Wurm, 2001]

## 5 Leistungsregelung in Kaltwassersystemen

Die Möglichkeiten der Leistungsanpassung von Kälteerzeugung und -verteilung auf den aktuellen Kühlbedarf sind immer im Kontext des Gesamtsystems zu bewerten. Die Art der Kälteerzeugung und deren Regelung sowie die Kaltwasserhydraulik und die angeschlossenen Verbraucher sind immer als Ganzes zu betrachten. Die Kaltwasserhydraulik umfasst den Aufbau der Verteilkreise, die Regelung der Pumpen und die Leistungsregelung der Verbraucher. Bei der Gestaltung der Kaltwasserkreise unterscheidet man zwei hydraulische Grundkonzepte, das

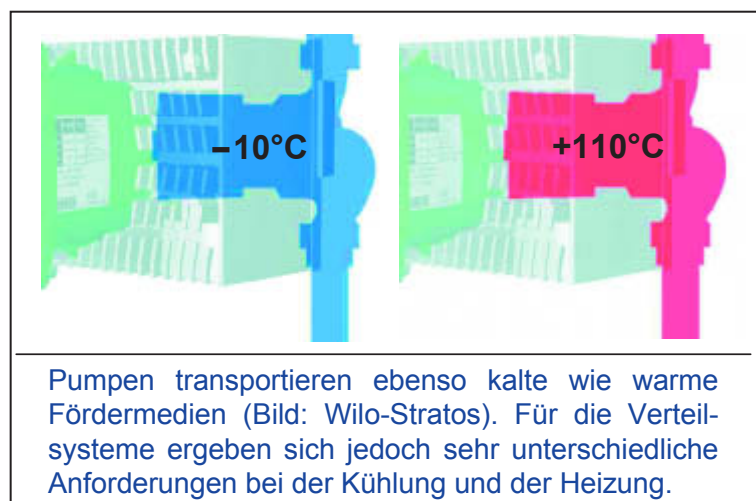


Bild 2: Pumpen für Kühlung und Heizung.

Einkreisssystem und das Mehrkreis- bzw. Mehrpumpensystem. In Einkreisystemen werden Kälteerzeuger und -verbraucher von ein und derselben Pumpe versorgt. Bei Mehrkreisystemen werden Erzeuger- und Verbraucherteil hydraulisch getrennt.

#### Kälteerzeugung

Von den möglichen Kälteerzeugungsvarianten, wie Kompressions- und Absorptionskältemaschine sowie freie Kühlung und Verdunstungskühlung wird im Folgenden allein auf die Anforderung der Kompressionskältemaschinen eingegangen.

Unabhängig vom hydraulischen Grundkonzept besteht bei den meisten Kälteanlagen die Forderung, dass der Wassermassenstrom durch den Verdampfer um höchstens 10% vom Nennwassermassenstrom abweichen darf. „Anderenfalls sind Schwierigkeiten in der Regelung der Kältemaschinen zu erwarten, bei zu niedrigem Durchsatz besteht außerdem Einfriergefahr. Die Forderung nach konstantem Verdampfer-Wasserstrom muss also erfüllt werden bei allen durch die Klimaregelung bedingten Veränderungen im Verbraucherteil“ [Recknagel, 2001]. Trotz dieser strikten Forderung nach einem konstanten Wasservolumenstrom im Verdampfer sind

in jüngerer Vergangenheit Kältemaschinen entwickelt worden, die einen variablen Volumenstrom zulassen. So können auch im Primärkreis energiesparende, drehzahlgeregelte Pumpen eingesetzt werden.

#### Systemtrennung in Mehrpumpensystemen

Um einen störungsfreien Betrieb von Kaltwassernetzen mit mehreren Erzeugern und Verbrauchern zu realisieren, teilt man das Netz in Primär- und Sekundärkreise auf. Die Systemtrennung zwischen dem Erzeugerteil und dem Verbraucherteil kann, wie in Bild 3 dargestellt, z.B. durch einen parallel zum Verdampfer geschalteten Pufferspeicher erfolgen. Andere Arten der Systemtrennung können durch Wärmeübertrager, hydraulische Weichen oder Verteiler-Sammler-Schaltungen realisiert werden. Im Betrieb der Anlage ist immer darauf zu achten, dass der Massenstrom des Primärkreises (Kälteerzeugung) auf den Kältebedarf der Verbraucher abgestimmt ist. Eine Überströmung vom Vorlauf in den Rücklauf des Primärkreises und damit die Absenkung der Rücklauftemperatur ist unbedingt zu vermeiden. Überströmungen erhöhen die Ein- und Ausschalthäufigkeit der Verdichter und tragen damit zu einer Verkürzung der Lebens-

dauer der Anlage sowie einer instabilen Systemregelung bei.

#### Kälteverteilung zu den Verbrauchern

Die Gestaltung des Verbraucherteils bzw. des Sekundärkreises richtet sich nach der Größe des Objektes, den Typen der angeschlossenen Nutzer und der Art der Leistungsregelung der Verbraucher. Grundsätzlich findet man im Verbraucherteil eine Vielzahl von unterschiedlichen hydraulischen Grundschaltungen, die meist miteinander kombiniert werden. Für die zentrale Raumluftechnik (RLT) wird das Kaltwasser meist mit einer Vorlauftemperatur von 6°C bzw. 8°C (abhängig von der angestrebten Luftentfeuchtung) bei einer Spreizung von 6 K zur Verfügung gestellt. Bei der dezentralen Kühlung in den Gebäudezonen beträgt die Vorlauftemperatur ca. 16°C bei einer Spreizung zwischen 2 K bis 4 K. Für die Leistungsregelung der Wärmeübertrager im Verbraucherteil wird entweder eine Massenstromregelung oder Temperaturregelung verwendet (Bild 4).

Beide Regelungsarten greifen auf die Formel für den Wärmestrom zurück, variieren jedoch jeweils eine andere Größe.

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Mit der Massenstrom- bzw. Mengenregelung erzielt man die Reduktion der Kälteleistung durch Drosselung (2-Wege-Ventil) oder Umlenkung (3-Wege-Ventil) des Wassermassenstromes ( $\dot{m}_w$ ) über den Verbraucher. Bei Verwendung der Umlenk-schaltung ist zudem, unabhängig vom Lastfall, ein konstanter Massenstrom und eine permanente „Kalthaltung“ im Verteilkreis realisierbar. Dies geschieht jedoch zu Lasten der Energiekosten für die Pumpen, welche immer bei konstantem Volumenstrom arbeiten. Bei beiden Verfahren ist die Vorlauftemperatur über den Wärmeübertrager nicht veränderbar.

Die Temperatur- bzw. Beimischregelung ermöglicht die

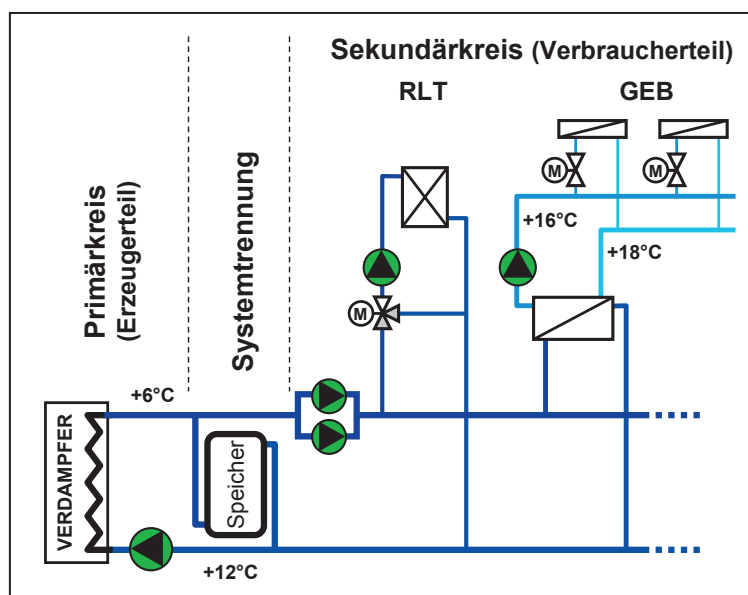


Bild 3: Beispiel eines Kaltwasserkreislaufes zur Komfortklimatisierung.

Reduktion der Kälteleistung über den Verbraucher durch Verringerung der Temperaturdifferenz ( $\Delta T$ ) zwischen Vor- und Rücklauf. Dies geschieht durch eine lokale Anhebung der Vorlauftemperatur am Verbraucher. Die Beimischregelung wird z. B. genutzt, um eine kontrollierte Luftentfeuchtung mit Oberflächenkühlern durchzuführen oder um einer Taupunktunterschreitung bei Raumkühlsystemen entgegenzuwirken. Vorteil dieser Schaltung ist die bei jedem Lastfall garantierte Durchströmung des Wärmeübertragers mit konstantem Massenstrom. Somit ist bei Anwendung der Beimischregelung stets ein homogenes Temperaturprofil in der Regelzone garantiert. Nachteilig ist, dass eine Leistungsreduktion stets die Anhebung der Prozesstemperatur zur Folge hat.

In der Gebäudetechnik sind ausgeprägte Tages- und Jahreslastprofile und damit die Adaption der Kälteleistung am Verbraucher üblich. Eine entsprechende Leistungsregelung der Pumpen reduziert die zu erwartenden Energiekosten erheblich. Dies wird u. a. in den nun folgenden Berechnungsbeispielen aufgezeigt.

## 6 Energieaufwand von Pumpen

Die folgenden Berechnungen stellen am Beispiel der Kaltwasserhydraulik aus Bild 3 die wesentlichen Parameter mit Einfluss auf den Energieaufwand von Pumpen dar. Der Energieaufwand ergibt sich aus der installierten Pumpenleistung, der Möglichkeit der Leistungsregelung der Pumpen und ihrer jährlichen Betriebszeit.

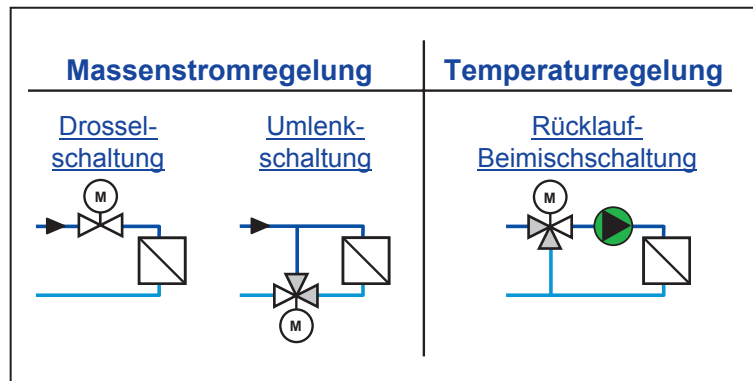


Bild 4: Regelung der Kälteleistung im Verbraucherteil.

### Auslegung der Hydraulik

Die Auslegung der Pumpen erfolgt für drei mögliche Varianten der Kaltwasserhydraulik (Fall 1 bis 3). Die Klimatisierungsaufgabe und somit die Kälteleistung im Auslegungsfall ist in allen Fällen gleich. Für den Wirkungsgrad der Pumpen (Energiewandlung) wurde eine einheitliche Approximation entsprechend des erforderlichen hydraulischen Bedarfes angenommen. Die Berechnungsergebnisse werden jeweils für die sich ergebende Pumpenleistung des Primärkreises (PK), der Hauptverteilerpumpen (HVP), der Pumpen für die zentrale Raumlufthtechnik (RLT) und der Pumpen für die Gebäudedekühlung (GEB) dargestellt. Für die Auslegung werden im jeweiligen Verteilkreis allein die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf, der Druckverlust sowie die Art der Adaption des Betriebspunktes der Pumpe verändert (Tabelle 2). Die optimale Übereinstimmung zwischen Anlagenbetriebspunkt und Nennpunkt der Pumpe ist mit (opt) abgekürzt. Das Kürzel (drz) bezeichnet die Anpassung über die Drehzahl der Pumpe. Für den Fall einer nicht an den Betriebspunkt adaptierten Pumpe (–) wird an-

genommen, dass die Pumpe um 20 % überdimensioniert ist. Die Regelung der Pumpe hat keinen Einfluss auf die installierte Pumpenleistung. Die Informationen zur Pumpenregelung in Tabelle 2 sind im Weiteren jedoch zur Bestimmung des Energieaufwands erforderlich.

Neben den variablen Parametern gibt Tabelle 2 den Anteil der über den Verteilkreis zu transportierenden Kälteleistung (%-Kälte) an.

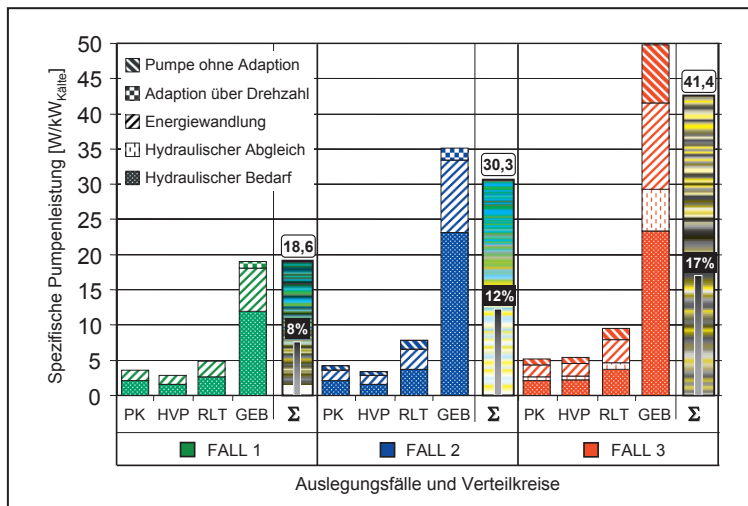
### Pumpenleistung

Bild 5 zeigt den Vergleich der installierten, spezifischen Leistung der Kaltwasserverteilerpumpen für die Auslegungsfälle 1 bis 3. Die spezifische Leistung wird mit der Einheit Watt-Pumpenleistung pro Kilowatt thermischer Kälteleistung  $[W/kW_{\text{Kälte}}]$  beschrieben. Zudem ist der Anteil der Pumpenleistung an der Verdichterleistung der Kältemaschine (schmale, schwarze Balken) angegeben. Die Leistungszahl der Kältemaschine (Coefficient Of Performance) wird dabei mit  $COP = 4$  angenommen.

Die Pumpenleistung wird maßgeblich durch den hydraulischen Bedarf bestimmt. Bei den Primärkreis- und Hauptvertei-

| Verteilkreis (%-Kälte)       | PK (100 %) |     |     | HVP (100 %) |     |     | RLT (44 %) |     |     | GEB (56 %) |     |     |
|------------------------------|------------|-----|-----|-------------|-----|-----|------------|-----|-----|------------|-----|-----|
| Fall                         | 1          | 2   | 3   | 1           | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   |
| $\Delta T$ Vor-/Rücklauf [K] | 6,0        | 6,0 | 6,0 | 6,0         | 6,0 | 6,0 | 6,0        | 6,0 | 6,0 | 3,0        | 2,0 | 2,0 |
| Druckverlust in [bar]        | 0,5        | 0,5 | 0,5 | 0,4         | 0,4 | 0,6 | 0,7        | 1,0 | 1,0 | 1,5        | 2,0 | 2,0 |
| Adaption Betriebspunkt       | opt        | –   | –   | opt         | –   | –   | opt        | –   | –   | drz        | drz | –   |
| Regelung der Pumpe           | ✓          | –   | –   | ✓           | –   | –   | ✓          | –   | –   | ✓          | –   | –   |

Tabelle 2: Variable Parameter bei der Berechnung der Pumpenleistung und -energie.



**Bild 5: Spezifische Leistung der Kaltwasserverteilung in [W/kW<sub>kälte</sub>] und Anteil der Pumpenleistung an der Verdichterleistung.**

lerpumpen mit vergleichsweise „großem“  $\Delta T$  (6 K) und Druckverlusten unter 0,6 bar liegt der spezifische Leistungsaufwand der Pumpen unter 5,0 W/kW<sub>kälte</sub>. Obwohl bei dem gewählten Berechnungsbeispiel für die Gebäudekühlung nur 56 % der Kälteleistung benötigt werden, dominiert dieser Verteilkreis die installierte Pumpenleistung. Die geringere Temperaturspreizung (2 bzw. 3 K) bewirkt eine signifikante Erhöhung des Volumenstromes, welche in der Regel größere Druckverluste nach sich zieht. Erfolgt dann, wie in Fall 3 aufgezeigt, weder ein hydraulischer Abgleich, noch eine sorgfältige Anpassung des Pumpenbetriebspunktes an den Anlagenbetriebspunkt, ergeben sich schnell spezifische Pumpenleistungen von 50 W/kW<sub>kälte</sub> in dem entsprechenden Verteilkreis.

In der Summe errechnen sich für das Gesamtsystem spezifische Pumpenleistungen von 18,6 W/kW<sub>kälte</sub> im Fall 1, von 30,3 W/kW<sub>kälte</sub> im Fall 2 und von 41,4 W/kW<sub>kälte</sub> im Fall 3. Die erforderlichen Pumpenleistungen liegen somit zwischen 8 % und 17 % der installierten Verdichterleistung. Die Auswertung von Objektdaten zeigt, dass die spezifische Pumpenleistung von Kaltwassersystemen in der Praxis zwischen 10 und 40 W/kW<sub>kälte</sub>, in Ausnahmefällen bis zu 55 W/kW<sub>kälte</sub> beträgt. Die Unterschiede ergeben sich durch die Art der Kältenutzung

und die beschriebenen Variationen bei der Ausführung der Kaltwasserhydraulik.

#### Pumpenbetrieb

Neben der Pumpenauslegung entscheidet die Betriebszeit und die Möglichkeit der Leistungsregelung der Pumpen über den zu erwartenden Energieaufwand. Die Betriebszeit der Pumpen in den Verteilkreisen ist abhängig vom Anlagenkonzept und kann größer sein als die Bedarfszeit zur Kühlung des Gebäudes. Dies ist u.a. dann der Fall, wenn die technischen Voraussetzungen zur bedarfsgesteuerten An- und Abschaltung der Pumpen nicht gegeben ist, bzw. permanente Kältebereithaltung in Verbrauchernähe gefordert wird. Für die Betriebszeit wird im Folgenden zwischen bedarfsgesteuertem, intermittierendem und saisonalem Betrieb der Kaltwasserverteilerpumpen unterschieden.

Bei bedarfsgesteuertem Betrieb (Bedarf) entspricht die Pumpenlaufzeit exakt der Zeit mit Kühlbedarf innerhalb des Gebäudes

bzw. der Klimaanlage. Als technische Voraussetzung muss dafür eine vollautomatische Pumpenan- und -abschaltung unter Beachtung des aktuellen Kühlbedarfs, z.B. durch die Kältemaschine, über Regelverfahren oder die Gebäudeautomation, erfolgen.

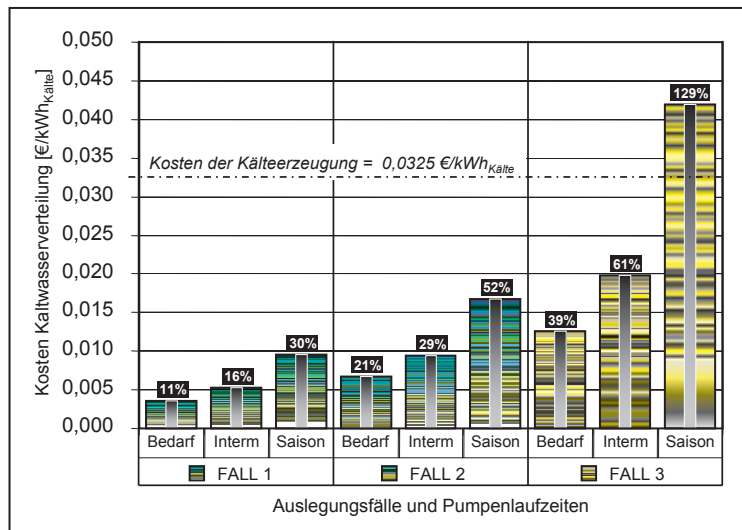
Der intermittierende Pumpenbetrieb (Interm) ermöglicht die Nacht- und Wochenendabschaltung sowie die Abschaltung der Pumpen in Monaten ohne Kühlbedarf. Voraussetzung für diesen Betrieb sind externe An- und Abschaltung der Pumpen z.B. durch eine Zeitschaltung oder Gebäudeautomation. Das vorliegende Berechnungsbeispiel geht von einer 10-stündigen Nacht- und einer 24-stündigen Wochenendabschaltung aus.

Im saisonalen Betrieb (Saison) wird davon ausgegangen, dass die Pumpen zu Beginn der Kühlperiode eingeschaltet und erst am Ende der Kühlperiode wieder abgeschaltet werden. Für diese Betriebsart muss eine externe An- und Abschaltung der Pumpen, z.B. von Hand oder automatisiert, möglich sein. Der Fall, dass Pumpen ganzjährig nicht abgeschaltet werden, ist hier nicht betrachtet. Bei der Berechnung des Energieaufwands wurde ein durchgehender Betrieb von April bis Oktober angenommen.

Werden die Kaltwasserpumpen betrieben ohne dass Kühlbedarf besteht (z.B. im intermittierenden oder saisonalen Pumpenbetrieb), ist zur Vermeidung eines verstärkten Pumpenverschleißes die Aufrechterhaltung eines minimalen Volumenstromes im Verteilkreis ratsam. Dies erreicht man z.B. durch die Installation von Überströmeinrichtungen. Solche Einrichtungen werden

| Verteilkreis         | Betriebszeit in [h/a] |        |        |
|----------------------|-----------------------|--------|--------|
|                      | Bedarf                | Interm | Saison |
| Primärkreispumpen    | 1277                  | 1277   | 1277   |
| Hauptverteilerpumpen | 1320                  | 2226   | 5136   |
| RLT-Pumpen           | 1116                  | 2226   | 5136   |
| GEB-Pumpen           | 1320                  | 2226   | 5136   |

**Tabelle 3: Betriebszeiten der Kaltwasserverteilerpumpen in [h/a].**



**Bild 6: Spezifische Stromkosten der Kaltwasserverteilung in [€/kWh<sub>Kälte</sub>] und Anteil der Pumpenarbeit an der Verdichterarbeit.**

außerdem zur Sicherstellung einer Mindestdurchlaufwassermenge (z. B. am Verdampfer), zur Begrenzung der Druckdifferenz am Verbraucher oder zur permanenten Kältebereithaltung im Verteilnetz eingesetzt. Auch der parallel geschaltete Speicher oder die hydraulische Weiche stellen Überströmeinrichtungen dar. Überströmungen erhöhen immer den Energieaufwand für die Pumpen im System und verringern die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf. Sie sollten wenn möglich vermieden bzw. weitestgehend reduziert werden.

Die Anpassung der Pumpenleistung an den hydraulischen Bedarf volumensvariabler Verteilkreise kann durch folgende Maßnahmen erreicht werden:

- Interne Drehzahlregelung, z.B.:  $\Delta p$ -konstant oder  $\Delta p$ -variabel
- Externe Drehzahlregelung anhand geeigneter Regelgrößen
- Teilabschaltung paralleler Pumpen (z.B. Doppelpumpen).

#### Energieaufwand Pumpen

Am Beispiel der Auslegungsfälle 1 bis 3 wird nun der Einfluss der Betriebszeit und der Leistungsregelung der Pumpen (siehe Tabelle 2) auf die zu erwartenden Energiekosten für die Kaltwasserverteilung aufgezeigt. Den Berechnungen liegen dabei

Betriebsstunden aus Tabelle 3 zugrunde.

Der Energieaufwand wird über die Kosten der Kaltwasserverteilung in €/kWh<sub>Kälte</sub> in Bild 6 dargestellt. Dabei wurden Stromkosten von 0,13 €/kWh angenommen. Zudem ist in Bild 6 der Anteil der Pumpenarbeit an der Verdichterarbeit zur Kälteerzeugung (schwarze Balken) aufgezeigt. Die Leistungszahl der Kältemaschine wird dabei als ganzjährig konstant mit COP = 4 angenommen. Dies stellt bei der Verwendung von Schraubenverdichtern mit Schieberregelung eine realistische Annahme dar.

Die korrekte Auslegung der Pumpen bildet die Grundlage für einen minimalen Energieaufwand. Für den Auslegungsfall 1 ergeben sich bei bedarfsgesteuertem Betrieb Kosten von 0,004 €/kWh<sub>Kälte</sub>. Dies entspricht einem Anteil von 11 % an den Kosten zur Kälteerzeugung, die mit 0,0325 €/kWh<sub>Kälte</sub> berechnet wurden.

Unter der Annahme gleicher jährlicher Betriebszeiten (Bedarf, Interm oder Saison) beobachtet man vom Fall 1 zum Fall 2 jeweils annähernd eine Verdopplung des Energieaufwands, gegenüber einer Erhöhung der installierten Leistung (vgl. Bild 5) von 60 %. Von Fall 1 zu Fall 3 ist bei gleicher Betriebsart jeweils etwa eine Vervielfachung des

Energieaufwandes zu erwarten, gegenüber einer um rund 120 % größeren Pumpenleistung. Im schlechtesten Fall überschreiten die Kaltwasserpumpen mit Leistungen deutlich oberhalb des hydraulischen Bedarfs und nicht angepassten Betriebszeiten die Kosten zur Kälteerzeugung um ca. 30 %.

Bei Anlagen mit hoher spezifischer Pumpenleistung hat eine Verlängerung der Betriebszeit die stärksten Auswirkungen auf den Energieaufwand. Im Fall 3 lassen sich die Kosten bei Wechsel von saisonalem auf bedarfsgesteuertem Betrieb von 129 % auf 39 % der Kosten zur Kälteerzeugung senken. Bei einer durchschnittlich ausgeführten Anlage (Fall 2) liegen die Kosten der Kaltwasserverteilung zwischen 0,005 €/kWh<sub>Kälte</sub> und 0,015 €/kWh<sub>Kälte</sub>. Dies sind 20 % bis 50 % der Kosten der Kälteerzeugung. Durch geeignete Maßnahmen zur Pumpenabschaltung und den Einsatz geregelter Pumpen können die Kosten der Kälteverteilung in der Regel deutlich unter 30 % der Kälteerzeugungskosten gehalten werden.

Je nach Ausführung der Kaltwasserhydraulik ergeben sich große Unterschiede für den Energieaufwand der Kaltwasserpumpen. Eine allein auf die Auslegungsleistung der Kältemaschine oder den Energieaufwand der Kältemaschine bezogene Bewertung der zu erwartenden Pumpenenergie ist daher nicht zulässig. Die reale Betriebszeit und die Leistungsregelung der Pumpen sind maßgebliche Faktoren, die immer in die Bestimmung des Energieaufwands einbezogen werden müssen.

#### **7 Anforderungen an die Kaltwasserverteilung**

Aus den vorgestellten Untersuchungen lassen sich folgende, wesentliche Forderungen ableiten, die zu einer Reduktion des Energieaufwands der Kaltwasserverteilung führen:

##### **a) Minimierung des hydraulischen Bedarfs**

Dies erreicht man durch die Realisierung geringer



**Bild 7: Mehrpumpensystem zur Versorgung von Verbrauchergruppen.**

Druckverluste, kurze Leitungslängen in Verteilkreisen mit kleinen Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  (z.B. durch verbrauchernahe Unterverteiler), die Durchführung des hydraulischen Abgleichs und die Vermeidung von Überströmeinrichtungen.

#### **b) Aufsplittung der Kaltwasserhydraulik**

Verteilkreise mit gleicher Versorgungsaufgabe, gekennzeichnet durch gleichartige Kälteverbraucher und Lastprofile, sowie räumliche Nähe werden jeweils separat von Kaltwasserpumpen versorgt (Mehrpumpensysteme). Diese Maßnahme schafft u.a. die Voraussetzung für den nächsten Punkt.

#### **c. Reduktion der Pumpenlaufzeit**

Die Betriebszeit der Pumpen muss der tatsächlichen Zeit mit Kühlbedarf in dem Verteilkreis angepasst werden.

#### **d. Einsatz hocheffizienter Pumpentechnik**

Dazu zählt die Auswahl einer an den jeweiligen Anlagenbetriebspunkt angepassten Pumpe mit einem hohen Wirkungsgrad.

#### **e. Regelung der Pumpenleistung**

Über 95 % der Zeit befinden sich gebäudetechnische Anlagen im Teillastbetrieb. Pumpenregelung in volumenvariablen Verteilkreisen minimiert die Drosselverluste und reduziert die Energiekosten maßgeblich.

Neben der Reduzierung des Energieaufwands wirken sich alle genannten Maßnahmen positiv auf die Regelung des gesamten Systems und den einwandfreien Betrieb des Wasserkühlsatzes aus. Des Weiteren versprechen diese Maßnahmen ein Maximum an Flexibilität bezogen auf mögliche Veränderungen oder Erweiterung der Klimatisierungsaufgaben innerhalb des Gebäudes.

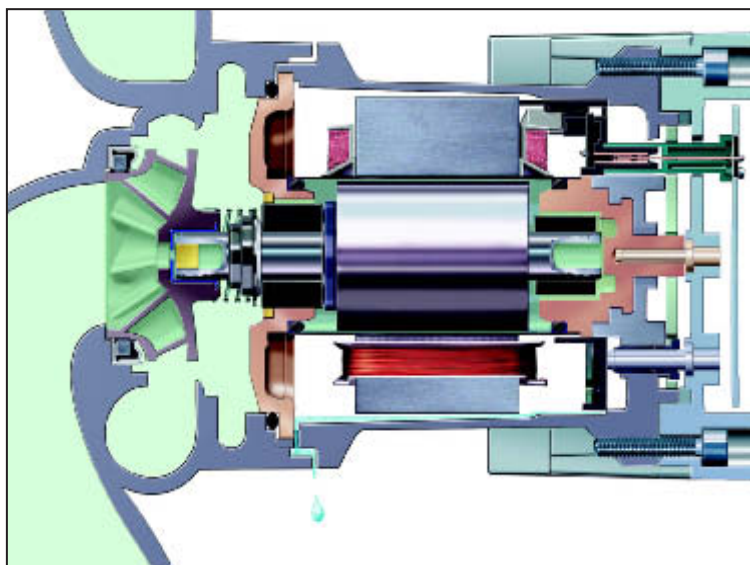
### **8 Pumpentechnik**

Die speziellen Anforderungen in Kaltwasserverteilkreisen erfüllt die Pumpentechnik heute in

besonderem Maße. In der Klimatechnik kommen Kreiselumpen in Nassläufer- und Trockenläufertechnik zum Einsatz. Bei den Nassläufern läuft der Rotor des Motors im Wasserraum (Bild 8). Diese Technik ermöglicht einen wartungs- und verschleißarmen Betrieb der Pumpe. Zudem zeichnen sich diese Pumpen durch einen sehr geräuscharmen Betrieb aus und können daher ohne Probleme in Verbraucherkreisen installiert werden. Die asynchrone Motortechnik (AC-Motor) wird heute durch speziell für Nassläuferpumpen entwickelte, elektrisch kommutierte Motoren (EC-Motoren) ergänzt. Vorteile der EC-Pumpen sind höhere Wirkungsgrade vor allem im Teillastbetrieb. Mit hocheffizienten Nassläuferpumpen werden heute Gesamtwirkungsgrade über 55 % erreicht.

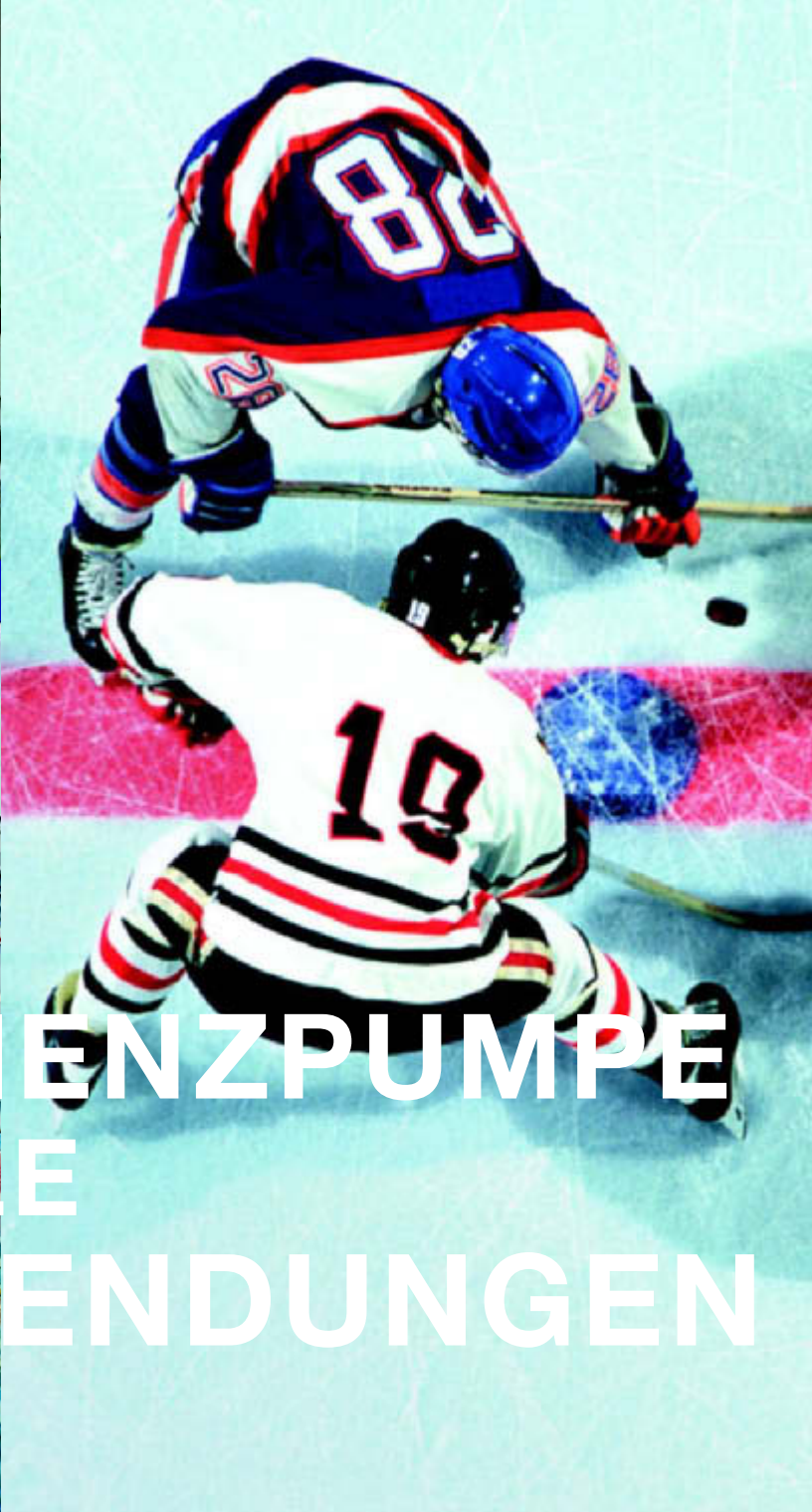
Trockenläufer werden vor allem für größere Kälteleistungen eingesetzt. Bei Trockenläufern sind der hydraulische Teil der Pumpe und der Motor getrennt (Bild 9). Die Abdichtung der rotierenden Welle erfolgt in der Regel über eine dynamische Gleitringdichtung. Neben den eingesetzten Standardgleitringdichtungen die Anwendungen von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+140^{\circ}\text{C}$  ermöglichen, können auch Sondergleitringdichtungen z.B. für Wasser-Glykol-Gemische verwendet werden. Dadurch sind Einsätze der Pumpe bis zu  $-30^{\circ}\text{C}$  möglich. Mit Trockenläuferpumpen lassen sich Gesamtwirkungsgrade über 75 % erzielen.

Die Gehäuse der Nass- und Trockenläuferpumpen für die Gebäudetechnik werden in der Regel aus Grauguss gefertigt. Werden besonders aggressive Medien, etwa bei Industrieanwendungen, eingesetzt, kommt Edelstahl zum Einsatz. In Kaltwasserkreisen mit Temperaturen unterhalb der Taupunkttemperatur ist mit Kondensat zu rechnen. In diesen Fällen sollte besonders auf das Vorhandensein einer korrosionsbeständigen Außenbeschichtung geachtet werden. Hier bietet z. B. eine serienmäßige



**Bild 8: Schnitt durch eine Nassläuferpumpe mit Kondensatablauf.**

Weltweit einmalig. \*



# DIE HOCHEFFIZIENZPUMPE FÜR ALLE KÄLTEANWENDUNGEN

\* Sie wollen sehr kalte oder sehr heiße Flüssigkeiten hocheffizient bewegen? Mit der Wilo-Stratos decken Sie das Spektrum zwischen  $-10^{\circ}\text{C}$  und  $+110^{\circ}\text{C}$  komplett ab. Dies ist möglich, weil sich innerhalb der Wilo-Stratos im Kaltwasserbetrieb kein Schweißwasser bildet.

Diese Flexibilität in der Anwendungsbreite gibt es weltweit nur bei der Wilo-Stratos.



Weitere Infos: [www.wilo.de](http://www.wilo.de)

Pumpen-Perfektion  
und mehr...

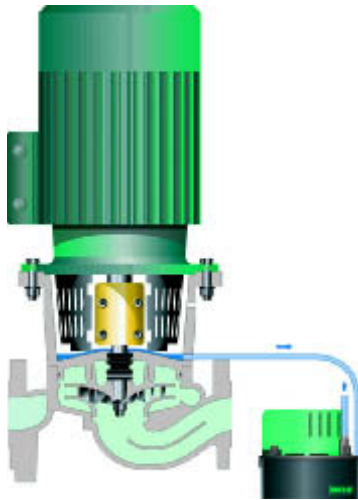
**WILO**

ge kathodische Tauchlackierung einen ausgezeichneten, lang anhaltenden Korrosionsschutz bei Schwitzwasserbildung.

Die Konstruktion der Pumpe muss derart gestaltet sein, dass das Kondensat frei ablaufen kann. In Nassläuferpumpen wird dies durch ein spezielles Kondensatablauflabyrinth gelöst (Bild 8). Dieses System ermöglicht den Abfluss des Kondensats durch Ablaufbohrungen. Schäden an elektrischen Teilen können so gar nicht erst entstehen. Bei Trockenläuferpumpen führt eine spezielle Laternenkonstruktion in der Pumpe anfallendes Kondensat durch Bohrungen ab. Un-erheblich ist dabei, ob die Pumpe waagrecht oder senkrecht in die Rohrleitung eingebaut wird. Mit Hilfe einer Kondensathebeanlage kann dann das Kondensat automatisch über die mitgelieferte Saugleitung entsorgt werden.

Pumpen werden als Standardpumpen (Motor mit konstanter Drehzahl) und Elektronikpumpen (Motor mit integriertem Frequenzumrichter) für variable Drehzahlen angeboten. Das variable Zeit-Last-Verhalten in der Klimatechnik stellt höchste Ansprüche an eine Pumpe. Elektronisch geregelte Pumpen sind in der Lage, das Druckniveau selbsttätig oder den Volumenstrom anhand einer gewünschten Regelgröße zu regulieren. Sie lassen sich zudem sehr gut zur Leistungsadaption bei Überdimensionierung verwenden. Die Anbindung an eine Gebäudeautomation, z.B. für den bedarfs-gesteuerten Betrieb, erfolgt bei modernen Pumpen problemlos über BUS-Systeme oder analoge Schnittstellen.

Für die Auslegung der Pumpen steht Planungssoftware zur Verfügung. Zu beachten ist, dass bei der Verwendung von Kälte-trägern mit Viskositäten  $> 4 \text{ mm}^2/\text{s}$  bzw. Flo-Ice die Pumpenkennlinien zu korrigieren sind. Durch die zum Teil sehr unterschiedlichen Anforderungen in der Kaltwasserverteilung, ist die Einbeziehung eines Fachberaters des Pumpenherstellers zu empfehlen.



**Bild 9: Trockenläufer mit Kondensatpumpe.**

## 9 Zusammenfassung

Bei unsachgemäßer Planung von Kaltwasserverteilsystemen können die Kosten der Klimatisierung maßgeblich von den Pumpen beeinflusst werden. Zurzeit werden für den Bereich der energetischen Bewertung von Gebäuden nationale (DIN 18599) und Europäische Normen (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) auf den Weg gebracht [Händel, 2004]. Die Energieeffizienz von Gebäuden, d.h. die zu erwartenden Betriebskosten, werden spätestens ab dem Jahr 2006 bereits in der Planungsphase zu bestimmen sein. Eine solche Vorausberechnung der Lebenszykluskosten wird auch immer mehr seitens der Investoren gefordert.

Die Vorteile der Kaltwassersysteme, wie kleine Leitungsquerschnitte, hoher Komfort, geringer Energiebedarf und große Flexibilität, sind bei ganzheitlicher Planung ohne Einschränkungen zu nutzen. Fehler bei der Auslegung der Kaltwasserverteilkreise und der Pumpen sind in den meisten Fällen in mangelndem Informationsaustausch zwischen den beteiligten Gewerken begründet. Durch eine eindeutige Definition der Anforderungen an die Schnittstellen zu der Kälteerzeugung, der Pumpentechnik, der Regelungstechnik und den Wärmeverbrauchern ergibt sich ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung des Anlagenbetriebs und

Reduktion des Gesamtenergieaufwandes.

Eine sorgfältige Auslegung der Kaltwasserhydraulik inklusive der Pumpen bildet die Basis dafür. Wesentlich sind Leistungsreduktion und -adaption sowie die Anpassung der Betriebszeit der Pumpen an den Bedarf. Um eine erfolgreiche Energie- und Kostenreduktion zu erzielen, müssen Investoren, Architekten, Planer, ausführende Gewerke und Betreiber frühzeitig gemeinsam in die Diskussion gehen. Pumpensystemen, die bis zu 100 % des Energietransportes in Gebäuden übernehmen, kommt dabei eine wesentliche, heute oftmals unterschätzte Bedeutung zu. ◀

## 10 Referenzen

- Händel, C.: Europäische und nationale Normung in der Raumlufttechnik. KI Luft- und Kälte-technik. 11/2004.
- Pfeiffenberger, U.: Anforderungen an die Klimatechnik aus Sicht des planenden Ingenieurs, FGK-Kongress. 2004
- Recknagel, H.; Schramek, E. et al: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 2001
- Schulz, M.: Leben im Schwitzkasten, DER SPIEGEL. 47/2004
- Wurm, H.; Schmalfuß, H.: Betriebserfahrung bei Einsatz elektronisch geregelter Pumpen in Klima- und Kälteanlagen.AA.IV.8. DKV Tagung 2001.