

Wärmepumpen

Planung | Optimierung | Betrieb | Wartung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Impressum

Herausgeber: Bundesamt für Energie,
Bereich Aus- und Weiterbildung

Autoren: Peter Kunz (Gesamtkoordi-
nation), Prof. Dr. Thomas Afjei, Prof.
Werner Betschart, Peter Hubacher,
Rolf Löhner, Andreas Müller, Vladimir
Prochaska

Lektorat: Othmar Humm

Seitenherstellung: Christine Sidler

Grafiken: Benjamin Magnin

Die Inhalte dieser Schrift sind auf der
Website von EnergieSchweiz ungekürzt
verfügbar. www.bfe.admin.ch →

Dokumentation → Publikationen

Das Handbuch ist für den privaten
Gebrauch uneingeschränkt nutzbar;
gewerbliche Nutzung nur mit schrift-
licher Genehmigung des Bundesamts für
Energie.

Ein autorisierter Separatdruck ist erhält-
lich beim Faktor Verlag, Zürich.

www.faktor.ch



SVK Schweizerischer Verein
für Kältetechnik

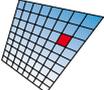
VSEI
USIE


suissetec

s i a


SWKI
SICC
SITC


Proklima


brenet
building and renewable energies network of technology


Fördergemeinschaft
Wärmepumpen Schweiz FWS

Inhalt		
Eine Schlüsseltechnologie	3	
1.		
Grundlagen der Wärmepumpentechnik	5	
1.1 Systemgrenzen und Kennzahlen	5	
1.2 Prozessgrössen	6	
1.3 log p,h-Diagramm	6	
1.4 Kreisprozess	6	
1.5 Carnot-Prozess	8	
2.		
Komponenten der Wärmepumpe	9	
2.1 Verdichter	9	
2.2 Wärmeübertrager	11	
2.3 Drosselorgan	13	
2.4 Sicherheitseinrichtungen	14	
2.5 Weitere Komponenten	15	
2.6 Abtaueinrichtungen	15	
2.7 Bauarten	17	
2.8 Andere Systeme	17	
3.		
Kältemittel	19	
3.1 Eigenschaften	19	
3.2 Wahl des Arbeitsmittels	20	
3.3 Treibhauseffekt und TEWI-Kennwert	21	
4.		
Wärmequellen	23	
4.1 Aussenluft	23	
4.2 Erdwärme	25	
4.3 Grundwasser	29	
4.4 Oberflächenwasser	32	
4.5 Abwärme	33	
4.6 Gebäudekühlung	35	
5.		
Wärmeabgabe	37	
5.1 Warmwasserheizung	37	
5.2 Raumluftheizungsanlagen	41	
5.3 Wassererwärmung	41	
5.4 Andere Systeme	43	
6.		
Einbindung der Wärmepumpe in die Haustechnik	45	
6.1 Grundsatz	45	
6.2 Betriebsarten	45	
6.3 Hydraulik	48	
6.4 Umwälzpumpen	51	
7.		
Akustik und Schallschutz	53	
7.1 Gesetzliche Grenzwerte	53	
7.2 Schallminderungsmaßnahmen	54	
8.		
Projektierung	57	
8.1 Elektrizitätsversorgung	57	
8.2 Heizzentrale	58	
8.3 Wirtschaftlichkeit	58	
8.4 Erfolgskontrolle	59	
9.		
Inbetriebsetzung	61	
9.1 Phase vor der Inbetriebsetzung	61	
9.2 Vorbereitung der Inbetriebsetzung	61	
9.3 Wärmequelle und Wärmeabgabe	62	
9.4 Inbetriebsetzung der Wärmepumpe	62	
9.5 Inbetriebsetzungsprotokoll	63	
9.6 Bedienungsanleitung	63	
9.7 Abnahmeprotokoll	64	
10.		
Betrieb	65	
10.1 Betrieb und Erfolgskontrolle	65	
10.2 Betriebsüberwachung	65	
10.3 Instandhaltung	65	
10.4 Betriebsoptimierung	66	
10.5 Störungen und Störungsbehebung	66	
11.		
Fallbeispiele	67	
Autoren	79	

Eine Schlüsseltechnologie

Grosse Potenziale von Abwärme, Umweltwärme und untiefer Erdwärme sind, von Ausnahmen abgesehen, überall verfügbar. Einziger Nachteil ist in der Regel das Temperaturniveau. Eine direkte Nutzung als Raumwärme kommt deshalb häufig nicht in Betracht. Mit einem motorisch angetriebenen Kreisprozess lässt sich dieses Manko beheben. Daher bildet die klassische Wärmepumpe eine Schlüsseltechnologie zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Und insofern fördert das Bundesamt für Energie im Rahmen des Aktionsprogramms EnergieSchweiz diese Art der Nutzwärmeerzeugung.

Ohne Antrieb läuft gar nichts. Dies gilt auch für die Wärmepumpe. Es gilt aber auch: Mit verbesserten Rahmenbedingungen kann der Temperaturhub – und damit der Aufwand für den Antrieb einer Wärmepumpe – minimiert werden. In erster Linie sind die besseren Häuser zu erwähnen: Gut gedämmte Bauten mit Bodenheizungen sind für den Einsatz von Wärmepumpen ideal und mit ein Grund für den Marktanteil von mehr als 50 Prozent bei Neubauten. Wesentliche Energieeinsparungen können zudem beim Ersatz von konventionellen Heizungsanlagen und von Elektrospeicherheizungen realisiert werden. Eine gleichzeitige Sanierung der Gebäudehülle ermöglicht dabei tiefere Vorlauftemperaturen – ein wichtiges Kriterium für den optimierten Betrieb von Wärmepumpen. Basis von

guten Lösungen bildet in der Regel eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der an der Planung und der Ausführung Beteiligten, insbesondere von Architekten und Ingenieuren, Technikern und Installationsfachleuten. Für Investoren, Hauseigentümerschaften und Verwaltungen von Liegenschaften bieten diese vorbildlichen Bauweisen die besten Argumente.

Die an sich schon Ressourcen schonende Wirkungsweise der Wärmepumpe lässt sich toppen. Durch Verwendung von Strom aus erneuerbaren Quellen oder gar von zertifiziertem Ökostrom wird die Wärmepumpe dem Anspruch einer nachhaltigen Energieversorgung vollends gerecht.

Mit der Schrift «Wärmepumpen: Planung, Optimierung, Betrieb, Wartung» steht der Branche ein aktuelles Standardwerk zur Verfügung, um Funktionsweise, Einsatzmöglichkeiten und Eigenschaften dieser umweltfreundlichen Wärmeerzeuger einem breiten Fachpublikum zu vermitteln. Das Bundesamt für Energie als Herausgeber dankt allen Autoren und Fachverbänden, die zur Realisierung dieses gelungenen Projekts beigetragen haben.

Bundesamt für Energie, Bereich Aus- und Weiterbildung, Daniel Brunner

1. Grundlagen der Wärmepumpentechnik

1.1 Systemgrenzen und Kennzahlen

Die Systemgrenzen und Kennzahlen sind wie folgt definiert:

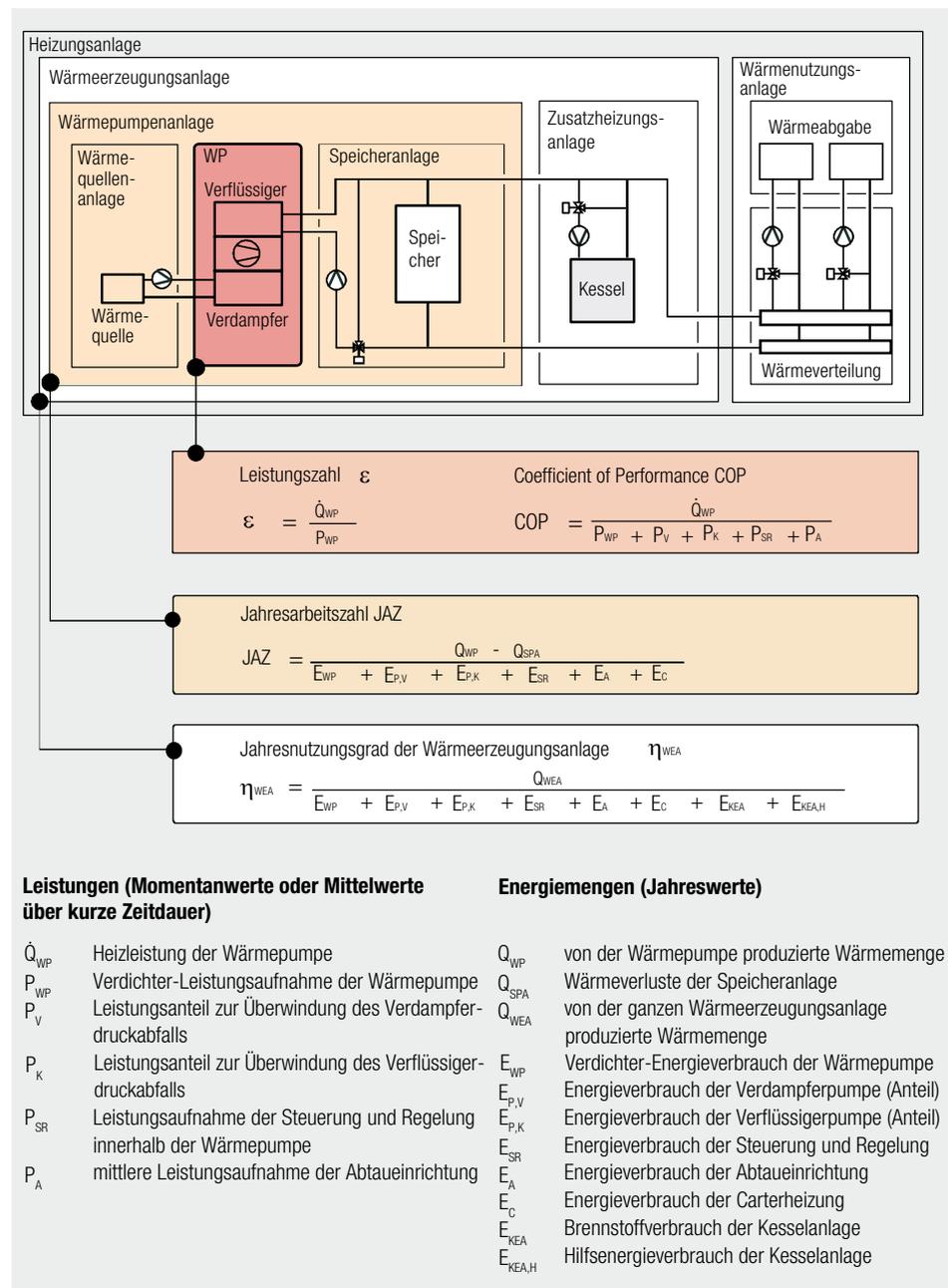


Abbildung 1.1: Systemgrenzen und Kennzahlen in Wärmepumpenanlagen

1.2 Prozessgrößen

Arbeit und Wärme sind Prozessgrößen. Sie stellen die möglichen Formen des Energietransports über die Systemgrenzen dar. Energie E , Arbeit W und Wärme Q haben als Einheit Joule (J).

Innere Energie u : Die spezifische innere Energie stellt als kalorische Zustandsgrösse den Energievorrat eines thermodynamischen Systems dar (kJ/kg).

Enthalpie h : Die spezifische Enthalpie, als kalorische Zustandsgrösse, ist durch $h = u + p \cdot V$ definiert.

Exergie: Energie umfasst Exergie und Anergie. Exergie ist der Teil von Energie, der sich in einer vorgegebenen Umgebung in jede Energieform umwandeln lässt (z. B. Elektrizität für den Verdichter).

Anergie: Anergie ist der Teil von Energie, der sich in einer vorgegebenen Umgebung nicht in jede Energieform umwan-

deln lässt (z. B. Umgebungswärme als Wärmequelle).

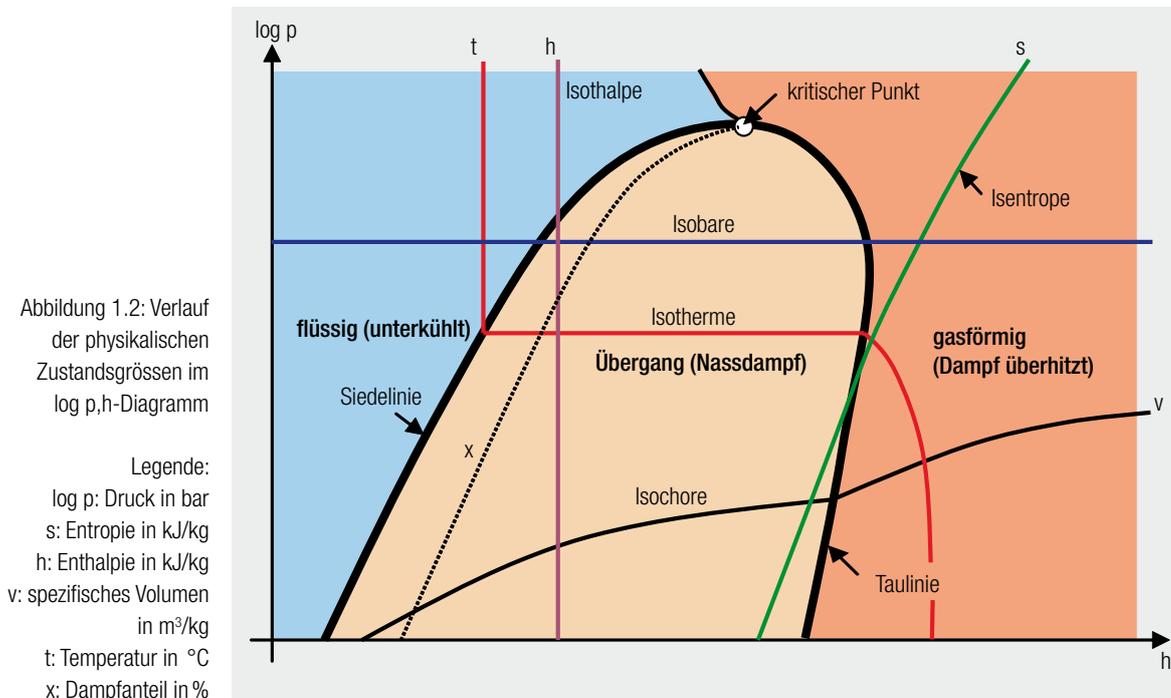
Entropie s : Die Entropie kennzeichnet die Irreversibilität und damit die Energieentwertung in einem Prozess.

1.3 log p,h-Diagramm

Im log p,h-Diagramm kann der Kreisprozess anschaulich dargestellt werden. Die Zustände und Zustandsänderungen des Kältemittels können aber auch der Dampf-tafel des entsprechenden Mittels entnommen werden.

1.4 Kreisprozess

Das derzeit hauptsächlich angewendete Verfahren in der Wärmepumpentechnik ist das Kaltdampf-Kompressions-Verfahren. Ein Kältemittel verdampft dabei auf der kalten Seite unter Aufnahme einer möglichst grossen Verdampfungswärme.



Nach der Verdichtung in einem Verdichter wird es auf der warmen Seite unter Abgabe der Kondensationswärme wieder verflüssigt. In einem Drosselorgan wird es anschliessend wieder auf den Verdampfungsdruck gebracht. Bei allen nach diesem Prinzip arbeitenden Anlagen wird die Abhängigkeit der Verdampfungs- und Verflüssigungs-Temperatur vom Druck ausgenutzt. Vereinfacht kann eine solche Anlage wie in Abbildung 1.3 dargestellt werden.

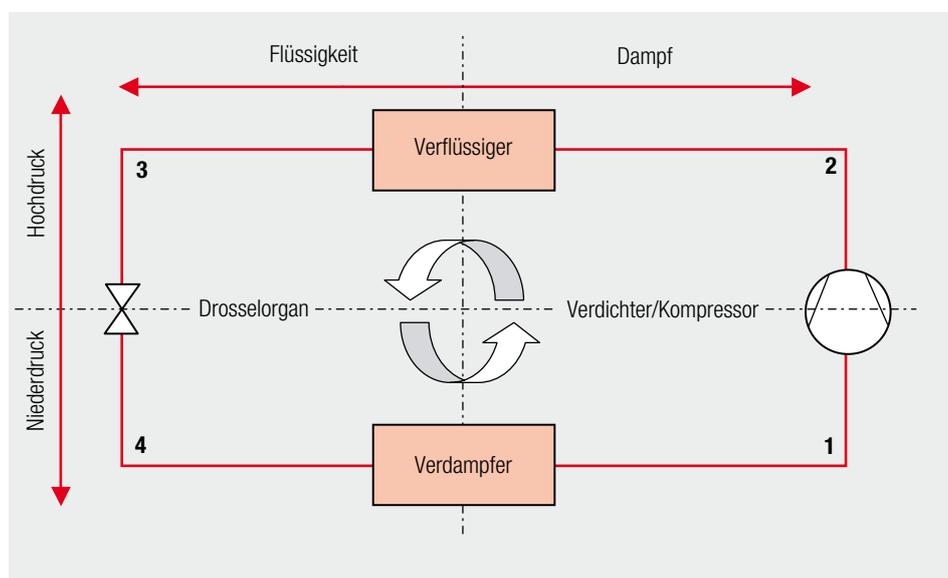


Abbildung 1.3: Prinzip des Kaltampf-Kompressionsverfahrens

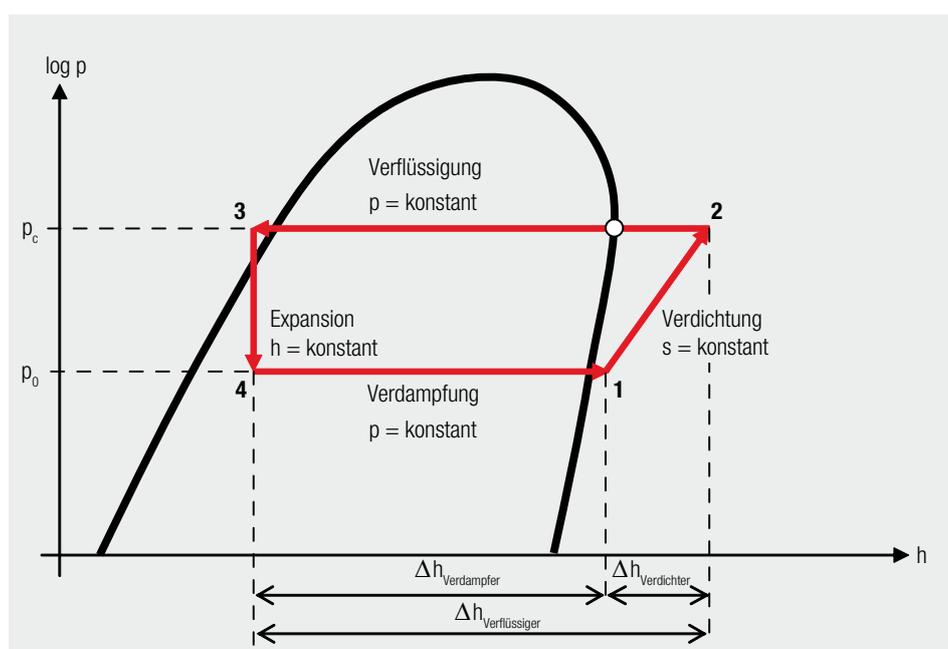


Abbildung 1.4: Der verlustfreie Prozess im log p,h-Diagramm

1.5 Carnot-Prozess

Der ideale Prozess (Carnot'scher Vergleichsprozess) beschreibt den verlustfreien idealen Kreisprozess, ohne Überhitzung und ohne Unterkühlung. Für den Carnot-Prozess erhält man die Carnot'sche Leistungszahl ε_{cw} wie folgt:

$$\varepsilon_c = \frac{\dot{Q}_{WP}}{W_{WP}} = \frac{T_c}{T_c - T_o}$$

\dot{Q}_{WP} Wärmeleistung in kW

W_{WP} zugeführte Leistung in kW

T_o Verdampfungstemperatur in K

T_c Kondensationstemperatur in K

Für einen wirklichen (realen) Prozess ergibt sich folgende Leistungszahl ε_w :

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{WP}}{P_{WP}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

P_{WP} zugeführte Leistung in kW

\dot{Q}_{WP} Wärmeleistung in kW

h_1 Enthalpie des Kältemittels am Verdichter-Eintritt in kJ/kg

h_2 Enthalpie des Kältemittels am Verdichter-Austritt in kJ/kg

h_3 Enthalpie des Kältemittels am Verflüssiger-Austritt in kJ/kg

Das Verhältnis zwischen der wirklichen Leistungszahl und der Carnot'schen Leistungszahl wird als Gütegrad η_{cw} (exergetisch) bezeichnet.

$$\eta_c = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$$

2. Komponenten der Wärmepumpe

Die vier Hauptkomponenten, ohne die kein herkömmlicher Kaldampf-Kreisprozess (Verdichtungskältesystem) funktioniert, sind:

- Verdichter (Kompressor)
- Verflüssiger (Kondensator)
- Drosselorgan (Expansionsventil)
- Verdampfer

2.1 Verdichter

Der Verdichter komprimiert das aus dem Verdampfer angesaugte Kältemittelgas auf den Druck, der zur Verflüssigung des Kältemittels notwendig ist.

Es sind die unterschiedlichsten Verdichterkonstruktionen erhältlich, wobei je nach Anwendungsbereich und Nutzungsart jede Bauart gewisse Vor- und Nachteile aufweist.

Bauarten

Tabelle 2.1 beschränkt sich auf Verdichter, die in der Wärmepumpenbranche hauptsächlich eingesetzt werden. Nicht erwähnt sind unter anderem Flügelzellen-, Rollkolben- und Drehkolbenverdichter.

Bauformen

Je nach Anwendung und unter Berücksichtigung der Kosten unterscheidet man folgende drei Verdichterbauformen.

Offene Verdichter: Motor und Verdichter sind verschiedene Baugruppen. Die Antriebswelle des Verdichters wird gasdicht aus dem Gehäuse geführt, wo sie direkt gekuppelt oder über einen Keilriemen mit dem Antriebsmotor verbunden ist. Nebst Elektromotoren sind auch Verbrennungsmotoren für den Antrieb möglich.

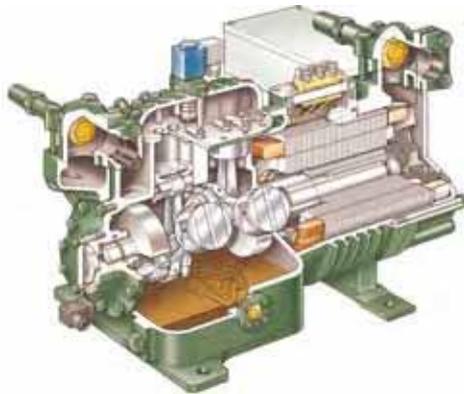
Tabelle 2.1: Bauarten von Verdichtern

Verdichterbauart	Hubkolben	Spiralkolben (Scroll)	Schraube	Turbo
Arbeitsprinzip	Verdränger	Verdränger	Verdränger	Strömungsmaschine
Verdichtung	statisch	statisch	statisch	dynamisch
Hubvolumen	geometrisch	geometrisch	geometrisch	abhängig vom Gegendruck
Förderung	pulsierend	stetig	stetig	stetig
Volumenstrom (Bereich)	bis 1000 m ³ /h	bis 500 m ³ /h	100 bis 10000 m ³ /h	100 bis 50000 m ³ /h
Heizleistung (Bereich bei B0/W35)	bis 800 kW	bis 400 kW	80 bis 8000 kW	80 bis 40000 kW
Druckverhältnis im Regelfall (einstufig)	bis 10	bis 10	bis 30	bis 5
Regelbarkeit bei konstanter Drehzahl	Stufen	schwierig	stufenlos	stufenlos
Drehzahlregelung	möglich	möglich	möglich	möglich
Empfindlichkeit gegen Flüssigkeitsschläge	hoch	gering	gering	gering
verursacht Erschütterungen	ja	nein	nein	nein



Abbildung 2.1: Hermetischer Spiralkolbenverdichter (Scroll)
(Bild: Copeland)

Halbhermetischer Verdichter: Motor und Verdichter bilden eine Einheit. Die Antriebswelle ist komplett im Gehäuse mit dem Motor verbunden. Die Kühlung des Elektromotors erfolgt entweder durch das angesaugte Kältemittelgas (Sauggaskühlung) oder über das Gehäuse mit Luft oder Wasser.



Hermetischer Verdichter: Motor und Verdichter bilden eine Einheit. Im Gegensatz zur halbhermetischen Ausführung sind hermetische Verdichter in einem vollverschweissten Gehäuse montiert. Die Motorkühlung erfolgt in der Regel über das angesaugte Kältemittelgas (Sauggaskühlung). Bei einem Defekt muss der komplette Verdichter ersetzt werden.

Abbildung 2.2: Halbhermetischer Hubkolbenverdichter
(Bild: Bitzer)

Ölfreie Verdichter: Mit offenen, halbhermetischen oder hermetischen Verdichtern sind Verdichter gemeint, die dank spezieller Lagerung ohne Ölschmierung arbeiten. Der wesentliche Vorteil dieser Verdichter liegt darin, dass kein Öl im Kältekreislauf mitzirkuliert und somit die Problematik der Ölrückführung aus dem System entfällt. Dies ergibt vor allem bei überfluteten Verdampfern und bei Verbundsystemen (mehrere Verdichter je Kältekreislauf) wesentliche Vorteile.

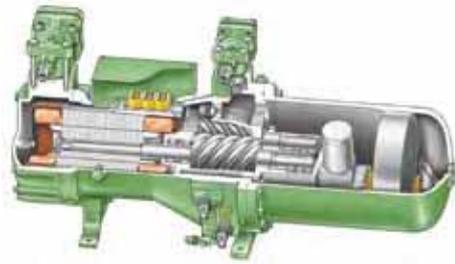


Abbildung 2.3: Halbhermetischer Schraubenverdichter
(Bild: Bitzer)

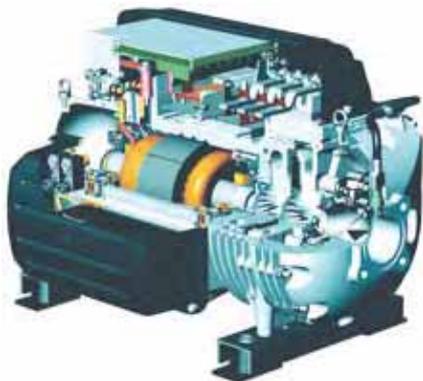


Abbildung 2.4: Halbhermetischer Turboverdichter (ölfrei)
(Bild: Turbocor)



Abbildung 2.5: Offener Hubkolbenverdichter (Industrierausführung)
(Bild: Grasso)

2.2 Wärmeübertrager Verdampfer

Im Verdampfer wird der Umgebung (Luft, Wasser, Sole, etc.) Wärme entzogen. Das Kältemittel nimmt diese Wärme auf und verdampft. Die Wärme wird vom Medium (Wärmequelle) an das Kältemittel übertragen.

Es ist grundsätzlich zwischen trockener und überfluteter Verdampfung zu unterscheiden, wobei es auch Kombinationen der beiden Varianten gibt.

Trockene Verdampfung: Das Kältemittel wird über ein Expansionsventil dem Verdampfer zugeführt. Die Kältemittelmenge wird anhand der Differenz zwischen der Gas- und Sättigungstemperatur (Sauggasüberhitzung) geregelt. Am Verdampferaustritt ist das Kältemittelgas überhitzt und somit «trocken».

Überflutete Verdampfung: Das Kältemittel wird über eine Hoch- oder Niederdruck-Schwimmerregulierung in den Verdampfer geführt. Die Kältemittelmenge wird anhand des Flüssigkeitsspiegels auf der Hoch- oder Niederdruckseite geregelt. Am Verdampferaustritt ist das Kältemittelgas kaum überhitzt und somit «nass». In den meisten Fällen ist deshalb ein Flüssigkeitsabscheider vorzusehen, der den Verdichter vor Flüssigkeitsschlä-

gen schützt. Der wesentliche Vorteil der überfluteten Verdampfer liegt darin, dass keine minimalen Temperaturdifferenzen zwischen Kältemittel- und Mediumseite notwendig sind, d.h. die Verdampfungstemperatur kann höher ausgelegt werden respektive steigt im Teillastbereich stärker an. Die Folge ist ein besserer Wirkungsgrad des Gesamtsystems.

Verflüssiger

Im Verflüssiger wird unter Wärmeabgabe an Anlagen zur Wärmenutzung (Senke) das vom Verdichter kommende Kältemittelgas enthitzt, verflüssigt und unterkühlt.

Die Wärmeabgabe kann auch über mehrere Wärmeübertrager und damit auf unterschiedlichen Temperaturniveaus erfolgen. Diese Anwendung mit Enthitzer, Verflüssiger und Unterkühler wird aus betriebswirtschaftlichen Gründen bei grösseren Anlagen sowie bei Systemen mit grossen Temperaturunterschieden zwischen Mediumeintritt und -austritt interessant, z. B. Fernwärmeversorgung, Wassererwärmung und industrielle Anwendungen.

Bauarten

Plattenwärmeübertrager: kompakte Konstruktion in gelöteter, geschweisster oder gedichteter Ausführung zur Wärmeübertragung von flüssigen und – in Spezial-

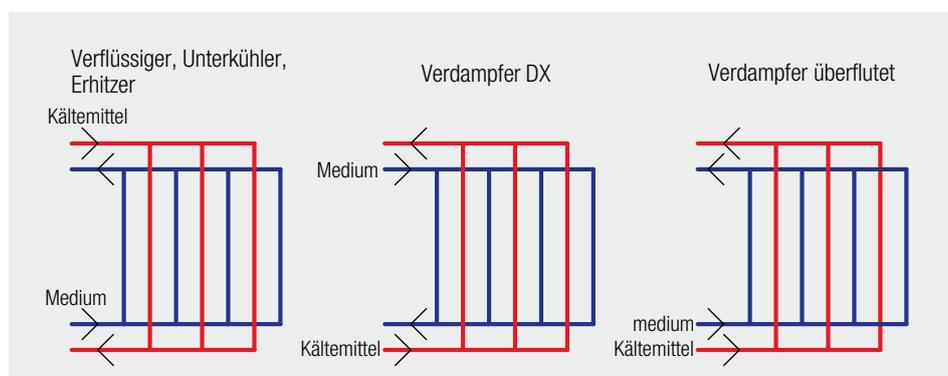


Abbildung 2.6: Schema Plattenwärmeübertrager



Abbildung 2.7: Plattenwärmübertrager (Bild: BMS)



Abbildung 2.8: Rohrbündelwärmübertrager (Bild: Bitzer)



Abbildung 2.9: Koaxialwärmübertrager (Bild: Wieland)

anwendungen – gasförmigen Medien. Plattenapparate haben den Vorteil von kleinen Inhalten, grossen Übertragungsflächen auf kleinstem Raum und einer hohen Modularität in der Herstellung. Sie sind für trockene und überflutete Verdampfung geeignet.

Rohrbündelwärmübertrager sind die klassische Konstruktion aus Rohrbündel und Kesselmantel zur Wärmeübertragung von flüssigen und vereinzelt auch gasförmigen Medien. Rohrbündelapparate zeichnen sich durch eine hohe Materialvielfalt, eine geringere Schmutz- und Frostanfälligkeit sowie ein träges Regelverhalten aus. Sie sind für trockene und überflutete Verdampfung geeignet, wobei bei der überfluteten Variante eine mehrfach grössere Kältemittelmenge benötigt wird.

Bei **Koaxialwärmübertragern** erfolgt die Wärmeübertragung in einem wendelförmig gebogenen Doppelrohr, meist aus Kupfer oder Edelstahl gefertigt. Einsatz mehrheitlich bei kleinsten Anlagen oder aus konstruktionstechnischen Gründen.

Registerwärmübertrager bestehen aus Rohrschlangen oder Plattenpaketen in verschiedenen Materialqualitäten, die in offenen und geschlossenen Behältern sowie in festen Umgebungen eingebaut

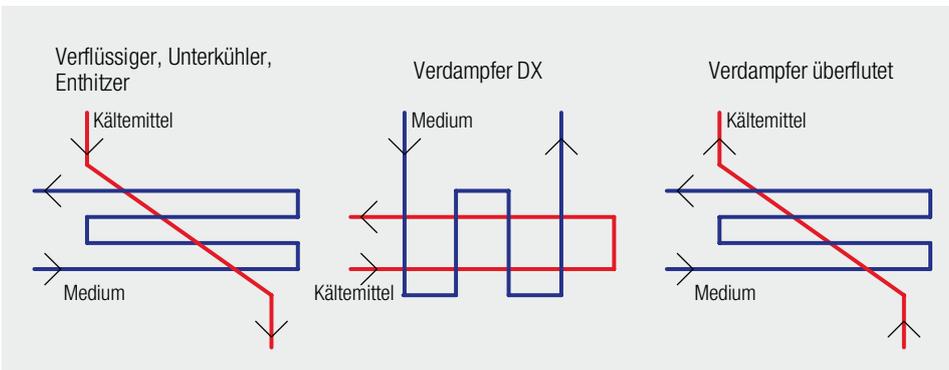


Abbildung 2.10: Schema Rohrbündelübertrager

werden. Einsatz vor allem bei stark verschmutzten Medien, wie z.B. Abwasser und im Erdreich.

Lamellenwärmeübertrager bestehen in der Hauptsache aus einzelnen oder mehreren parallelen Rohren mit aufgepressten Lamellen. Sie sind zur Wärmeübertragung von gasförmigen Medien (z.B. Luft) geeignet. Es sind verschiedene Materialkombinationen und Schaltungen möglich. Speziell zu beachten ist ein für den Betrieb optimaler Lamellenabstand, da Verschmutzung, Vereisung, etc. zu deutlichen Leistungseinbussen führen können. Beim Einsatz unter ca. 5 °C Lufttemperatur setzt der Wärmetauscher Reif und Eis an, deren Abtauung den effizienten Betrieb stark beeinträchtigt (siehe 2.6).



Abbildung 2.11: Registerwärmeübertrager (Plattenpaket) (Bild: Omega)

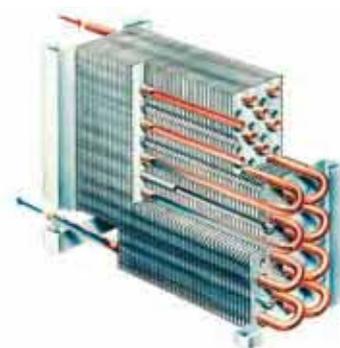


Abbildung 2.12: Lamellenwärmeübertrager (Batterie ohne Ventilator, Gehäuse, etc.) (Bild: Günter)

2.3 Drosselorgan

Das Drosselorgan entspannt (expandiert) das verflüssigte Kältemittel von der Hochdruck- zur Niederdruckseite des Kältekreislaufs. Weiter regelt das Drosselorgan den Kältemittelfluss zum Verdampfer.

Bauarten

Expansionsventile regeln den Kältemittelfluss zum Verdampfer anhand der Sauggasüberhitzung am Verdampferaustritt und werden ausschliesslich in Systemen mit trockener Verdampfung eingesetzt. Es sind **thermostatische** Expansionsventile mit innerem und äusserem Druckausgleich sowie **elektronische** Expansionsventile zu unterscheiden. Wesentlicher Vorteil der elektronischen Variante ist die nicht wirksame, bei thermostatischen Ventilen konstruktionsbedingte minimale Sauggasüberhitzung und der grössere Leistungsbereich eines Ventils. Dies



Abbildung 2.13: Thermostatisches Expansionsventil (Bild: Danfoss)



Abbildung 2.14: Hochdruckschwimmerregler (Bild: TH-Witt)

bringt Vorteile bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und im Teillastverhalten.

Hochdruckschwimmerregler leiten den Kältemittelfluss in Abhängigkeit des Flüssigkeitsniveaus auf der Hochdruckseite des Schwimmerreglers dem Verdampfer zu. Die Hochdruckschwimmerregler müssen nicht einreguliert werden und regeln im gesamten Leistungsbereich der Anlage sehr stabil.

Niederdruckschwimmerregler funktionieren ähnlich wie ihre Verwandten auf der Hochdruckseite. Der Kältemittelfluss wird jedoch in Abhängigkeit des Flüssigkeitsniveaus im Verdampfer geregelt. Elektronische Varianten von Schwimmerregulierungen sind ebenfalls verfügbar.

2.4 Sicherheitseinrichtungen

Damit Apparate, Komponenten, Leitungen und Betriebsstoffe des Kältemittelkreislaufs nicht unzulässigen Belastungen ausgesetzt werden, sind Sicherheitseinrichtungen notwendig. Die Art und Form der Absicherung gibt der Gesetzgeber, bezogen auf Anlagengrösse, Kältemittel und Standort, vor. Nachfolgend eine Auswahl der häufigsten Sicherheitsgeräte und Sicherheitsarmaturen:

- **Sicherheitsdruckbegrenzer** respektive **Hochdruckpressostat** (Abschaltung bei steigendem Druck) zum Schutz des Verdichters und aller Komponenten auf der Hochdruckseite. Dieser Apparat muss ab einer bestimmten Verdichter- respektive Anlagengrösse zwingend mechanisch arbeiten und direkt den Strom zum Hauptschutz

des Verdichters unterbrechen.

- **Niederdruck:** Abschaltung bei sinkendem Druck zum Schutz des Verdichters und aller Komponenten auf der Niederdruckseite.
- **Öldifferenzdruck:** Abschaltung bei sinkendem Differenzdruck zur Überwachung der Verdichterschmierung.
- **Druckgasüberhitzung:** Abschaltung bei steigender Temperatur zur Überwachung der Heissgastemperatur.
- **Frostschutz:** Abschaltung bei sinkender Temperatur zum Schutz des Verdampfers vor dem Einfrieren.
- **Strömung:** Abschaltung bei sinkender Sekundärströmung zum Schutz des Verdampfers vor Verschmutzung respektive Vereisung und des Verflüssigers und Enthitzers vor Überhitzung.
- **Wicklungsschutz, Klixon, Wärmepaket und Motorschutz** zum Schutz der Elektromotoren (Verdichter, Ventilatoren, Pumpen, etc.).
- **Sicherheitsventile, Berstscheiben, Sollbruchstellen, etc.** zum Schutz vor zu grossen Systemdrücken im Betrieb und Stillstand, z. B. aufgrund von Feuer.
- **Niveau-, Kältemittelüberwachung, etc.** zur Überwachung des Kältemittelinhalts (Überfüllung, Leckagen, Verlagerungen, etc.).

2.5 Weitere Komponenten

Zur Anlagenfunktion notwendige oder zumindest vorteilhafte Einbauten sind unter anderem folgende Komponenten und Apparate:

Filtertrockner zur Aufnahme von Restfeuchte im Kältesystem. Diese Feuchte kann zur Vereisung des Expansionsventils, zu Veränderungen der Betriebsstoffqualität und zu Wicklungsschäden führen.

Schauglas mit Feuchtigkeitsindikator zur visuellen Kontrolle der Systemfeuchtigkeit und Flashgasbildung (Gasbläschen) als Indiz für Kältemittelmangel, verschmutzten Filtertrockner, etc.

Saugfilter zum mechanischen Schutz des Verdichters.

Magnetventil zur automatischen Ab- und Umschaltung respektive Absaugung einzelner Wärmetauscher.

Druckregler zur Druckkonstant-, Druckhoch- und Drucktiefhaltung einzelner Systembereiche.

Vibrationsabsorber zur Entkopplung schwingender Anlagenteile, z.B. Verdichter.

Druckgasschalldämpfer (Heissgasmuffler) zur Dämpfung der Gaspulsationen von Kolbenverdichtern.

Kältemittelsammler zur Kältemittelaufnahme bei unterschiedlichen Betriebszuständen oder im Absaugbetrieb.

Ölabscheider zur Verhinderung von grossen Ölverlagerungen im System und Verölung des Verdampfers. Einsatz bei allen Schraubenverdichtern, Mehrverdichteranlagen und überfluteten Verdampfern.

Absperrventile und Messarmaturen zur einfachen Wartung und Kontrolle der Anlagen (Schraderventile).

2.6 Abtaueinrichtungen

Lamellenwärmeübertrager können bei tiefen Lufttemperaturen Reif und Eis ansetzen. Die Wärmeübertragung wird dadurch immer schlechter. Die Oberfläche muss deshalb bei Bedarf abgetaut werden.

Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen haben sich die beiden folgenden Abtausysteme durchgesetzt.

Heissgas-Bypass (Abbildung 2.15)

Während des Abtauvorganges wird der Verflüssiger mit einem Bypassventil umgangen und das Druckgas vom Verdichter direkt dem Verdampfer zugeführt. Wichtig dabei ist, dass der Druck nach dem Verdichter hochgehalten wird. Die Abtauleistung entspricht knapp der durch den Verdichter aufgenommenen elektrischen Leistung.

Prozessumkehr (Abbildung 2.16)

Mittels 4-Weg-Magnetventil respektive Ventilkombinationen wird der Prozess umgekehrt. Der Verflüssiger dient als Verdampfer und der Verdampfer als Verflüssiger. Zu beachten gilt, dass während des Abtauprozesses genügend Energie auf der Wärmenutzungsseite verfügbar ist, da während der Abtauerung Wärme entzogen wird. Die Abtauleis-

tung entspricht ca. dem 2- bis 3-fachen der elektrischen Leistungsaufnahme des Verdichters.

Die Abtauung mit dem Ventilator ist über ca. 2°C bis 3°C die schnellste und effizienteste Möglichkeit für das Abtauen des Verdampfers. Diese Art Abtauung lässt sich problemlos mit anderen Systemen kombinieren.

Abbildung 2.15: Prinzipschema Heissgas-By-pass-Abtauung

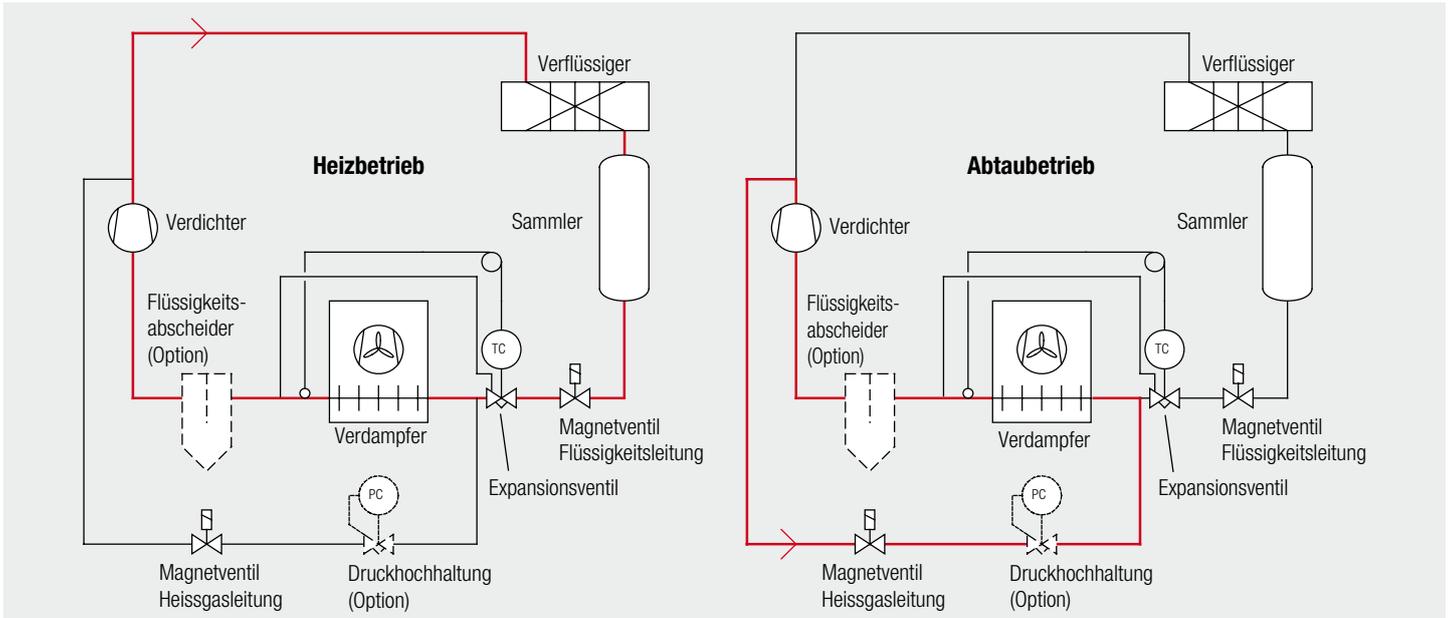
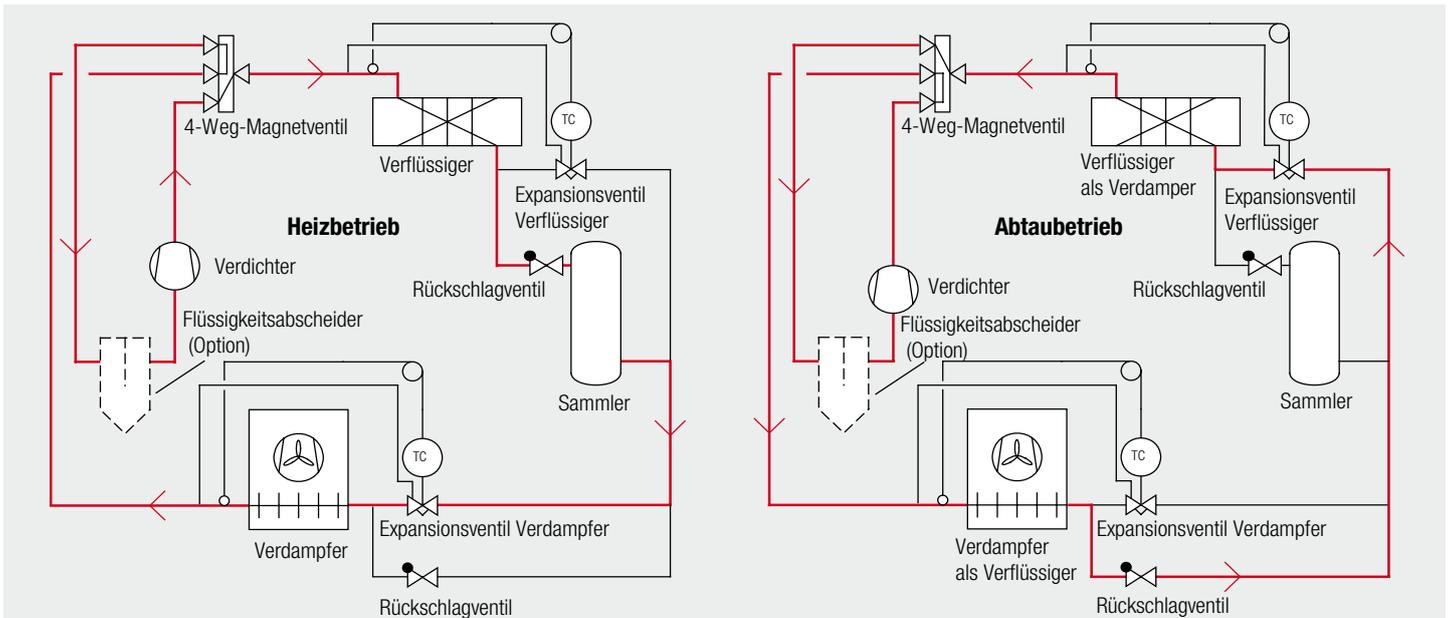


Abbildung 2.16: Prinzipschema Prozessumkehr



2.7

Bauarten

In der Wärmepumpenbranche wird zwischen den folgenden Bauarten unterschieden.

Kompakt: Alle Anlagenteile sind werkseitig oder vor Ort kompakt in einem Gehäuse, in einem Maschinenraum oder auf einem Chassis aufgebaut.

Split: Wesentliche Teile der Wärmepumpe befinden sich ausserhalb der eigentlichen Energiezentrale, z. B. der Verdampfer einer Luft-Wasser-Wärmepumpe befindet sich im Freien und die Verdichter-Verflüssiger-Gruppe im Inneren des Gebäudes.

2.8

Andere Systeme

Neben dem Kaltdampf-Kreisprozess (Verdichtungskältesystem) gibt es noch weitere Prozesse, die als Wärmepumpen genutzt werden können, z. B. Absorptionsanlagen, thermoelektrische Kühlung (Peltier-Effekt), Stirling-Kreisprozess, Kaltdampfinjektions- und Kaltgasmaschinen.

Im kommerziellen Bereich der Wärmezeugung hat sich aber nur noch die Absorptionstechnik durchgesetzt. Die Heizzahl dieser Anlagen liegt unter jener der Verdichtungs-Kältesysteme. Dieser Prozess kommt vor allem dort zur Anwendung, wo nutzbare Wärme (Abwärme usw.) möglichst kostenlos und stetig zur Verfügung steht.

3. Kältemittel

3.1 Eigenschaften

Als Kältemittel wird das Arbeitsmittel einer Kaldampfmaschine bezeichnet. Häufig wendet man diesen Begriff generell auf alle Kältemaschinen oder beliebige Prozesse der Kälteerzeugung an, wie z. B. Wärmepumpen.

Jedes Kältemittel sollte nach Möglichkeit die folgenden Eigenschaften haben:

- gute thermodynamische Eigenschaften
- hohe volumetrische Kälteleistung (→ kleiner Verdichter)
- für Anwendungsbereich geeignetes Druckniveau (→ kritische Temperatur genügend hoch und Erstarrungstemperatur ausreichend tief)
- niedrige Druckverluste bei der Strömung
- chemisch und thermisch stabil
- nicht giftig
- nicht brennbar
- gute Mischbarkeit mit Schmiermitteln
- kein Ozonabbaupotenzial und kein oder geringes Treibhauspotenzial
- kostengünstig

Die meisten Kältemittel sind entweder Ozonschicht abbauend oder in der Luft stabil, d. h. klimaaktiv (→ Treibhauseffekt), wie Abbildung 3.1 zeigt. Beispiele für in der Luft stabile Kältemittel sind R-134a und die Serie R-404A, R-407C, R-410A, R-417A, usw. Zu den Ozonschicht abbauenden Kältemitteln gehören R-22, R-12, R-502 und die Service-

Gemische der Serie R-401, R-402 usw. Die in der Schweiz zulässigen Kältemittel sind gesetzlich geregelt [ChemRRV] (www.cheminfo.ch).

Aus Umweltschutzgründen ist die Kältemittelmenge zu minimieren und es sind möglichst natürliche Kältemittel zu verwenden, wie z. B. Ammoniak (R-717), 60 % Ammoniak und 40 % Dimethyläther (R-723), Kohlenwasserstoffe (R-600a, R-290), CO₂ (R-744) oder Wasser (R-718).

Es wird zwischen vier Kältemittel-Gruppen unterschieden:

- FCKW (vollhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe), wie z. B. R-12 und R-502 sind stark Ozonschicht abbauend und klimaaktiv. Sie sind in der Schweiz verboten.
- H-FCKW (teilhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe), wie z. B.

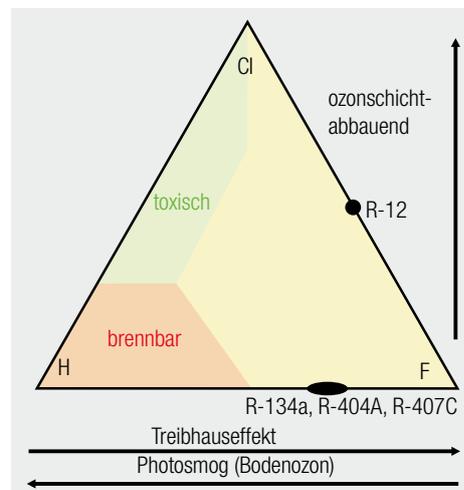


Abbildung 3.1: Synthetische Kältemittel (Halogen-Derivate des Methans und Ethans)

R-22 sind Ozonschicht abbauend und klimaaktiv. Sie sind in der Schweiz für Neuanlagen verboten (www.cheminfo.ch).

- **H-FKW** (teilhalogenierte Fluor-Kohlenwasserstoffe), wie z. B. R-134a, R-404A, R-407C, R-410A und R-507A sind klimaaktiv (www.cheminfo.ch).
- **Natürliche Kältemittel**, wie z. B. R-717 (Ammoniak), R-744 (CO₂), R-290 (Propan), R-600a (Isobutan) und R-718 (Wasser) sind weder Ozonschicht abbauend noch klimaaktiv (www.cheminfo.ch).

3.2 Wahl des Arbeitsmittels

Ozonschicht abbauende Kältemittel sind in Wärmepumpen und Kälteanlagen nicht mehr zulässig. Wenn Leistung und Effizienz vergleichbar sind, dann sollte ein Kältemittel mit geringem Treibhauspotenzial (GWP) verwendet werden.

Kältemittel	GWP _{100a} (CO ₂ =1,0)	Praktischer Grenzwert (kg/m ³)	Angaben zur Sicherheit	Kritische Temperatur (°C)	Temperaturgleit bei 1 bar _a (K)	Siede-Temperatur bei 1 bar _a (°C)
R-134a	1200	0,25	–	101	0	–26
R-407C	1520	0,31	–	87	7,4	–44
R-404A	3260	0,48	–	73	0,7	–47
R-410A	1720	0,44	–	72	<0,2	–51
R-417A	1950	0,15	–	90	5,6	–43
R-507A	3300	0,52	–	71	0	–47
<i>R-290 (Propan)</i>	<i>3</i>	<i>0,008</i>	<i>brennbar</i>	<i>97</i>	<i>0</i>	<i>–42</i>
<i>R-717 (NH₃)</i>	<i>0</i>	<i>0,00035</i>	<i>giftig</i>	<i>133</i>	<i>0</i>	<i>–33</i>
<i>R-723 (NH₃&DME)</i>	<i>8</i>	–	<i>giftig</i>	<i>131</i>	<i>0</i>	<i>–37</i>
<i>R-744 (CO₂)</i>	<i>1</i>	<i>0,07</i>	<i>hoher Druck</i>	<i>31</i>	<i>0</i>	<i>–57*</i>
<i>R-718 (H₂O)</i>	<i>0</i>	–	–	<i>374</i>	<i>0</i>	<i>100</i>

Kursiv: Natürliche Kältemittel

*CO₂ muss wegen Eisbildung über 5,3 bar betrieben werden (Tripelpunkt)

«GWP_{100a}» bezeichnet den Treibhauseffekt bezogen auf CO₂ = 1, der über einen Zeitraum von 100 Jahren verursacht wird.

Der «Praktische Grenzwert» bezeichnet den maximal zulässigen Grenzwert des Kältemittels in der Luft. Darin sind Sicherheitsmargen für ungleichmässige Konzentrationen (Schichtung) bereits berücksichtigt.

Die «Kritische Temperatur» bezeichnet die Temperatur, oberhalb der es unmöglich ist, ein Gas unter Anwendung noch so hoher Drücke zu verflüssigen.

Der «Temperaturgleit» bezeichnet die Differenz zwischen Siede- und Taupunkttemperatur bei konstantem Druck.

Tabelle 3.1: Tabelle mit Kältemittelkennwerten

3.3 Treibhauseffekt und TEWI-Kennwert

TEWI (Total Equivalent Warming Impact) ist ein Verfahren zur Abschätzung der globalen Erwärmung durch Erfassen sowohl des direkten Beitrags der Kältemittlemissionen in die Atmosphäre als auch des indirekten Beitrags der Kohlendioxidemissionen, verursacht durch die Erzeugung der für den Betrieb der Kälteanlage benötigten Energie während ihrer Lebensdauer. Bei einer gegebenen Anlage umfasst TEWI:

- die direkte Auswirkung auf den Treibhauseffekt durch Kältemittelverlust unter bestimmten Bedingungen;
- die indirekte Auswirkung auf den Treibhauseffekt durch das CO₂, das bei der Erzeugung der zum Betrieb der Anlage erforderlichen Energie freigesetzt wird.

Das Wichtigste zum TEWI-Kennwert:

- Es ist möglich, durch das Anwenden von TEWI die wirkungsvollsten Massnahmen zur Abschwächung des tatsächlichen Einflusses einer Kälteanlage auf den Treibhauseffekt zu finden.
- Der TEWI-Faktor kann mit der Formel im unten aufgeführten Kasten errechnet werden.
- Der TEWI könnte stark reduziert werden, wenn die Wärmepumpe mit Ökostrom betrieben würde, der vollständig aus erneuerbaren Energiequellen stammt.
- Der TEWI hat einen Einfluss auf die Betriebskosten.

Berechnungsverfahren für TEWI

TEWI = Total Equivalent Warming Impact

$$\text{TEWI} = (\text{GWP} \cdot \text{L} \cdot \text{n}) + (\text{GWP} \cdot \text{m} [1 - \alpha_{\text{recovery}}]) + (\text{n} \cdot \text{E}_{\text{annual}} \cdot \beta)$$

|← Leckage →| ← Rückgewinnungsverluste → |← Energiebedarf →|
 |← direkter Treibhauseffekt → |← indirekter Treibhauseffekt →|

GWP_{100a} = Treibhauspotenzial als CO₂-Äquivalent pro kg Kältemittel (kg_{KM})

L = Leckrate pro Jahr in kg_{KM}/a

n = Betriebszeit der Anlage in Jahren

m = Anlagenfüllmasse in kg Kältemittel

α_{Rückgewinnung} = dimensionslos

E_{Jahr} = Energiebedarf pro Jahr in kWh_{el}/Jahr

β = CO₂-Emission pro kWh_{el} gemäss Strommix [CO₂-Äquivalent/kWh_{el}]

4. Wärmequellen

Folgende Wärmequellenarten können mit Wärmepumpen genutzt werden:

- Aussenluft
- Erdwärme
- Grund- und Oberflächenwasser
- Abwärme

Grundsätzlich gilt, je tiefer das Temperaturniveau der Wärmequelle, desto schlechter ist die Effizienz (COP) der Wärmepumpe.

4.1 Aussenluft

Die Aussenluft steht uns in unbeschränkter Menge als Wärmequelle zur Verfügung und erfordert keine behördliche Bewilligung.

Nachteilig ist, dass die Wärmequellentemperatur gegenläufig zur Heizsystemtemperatur ist.

Systeme. Man unterscheidet folgende Bauarten:

- Kompakt-Anlage für Innenaufstellung
- Kompakt-Anlage für Aussenaufstellung
- Split-Anlage

Die kompakte Bauart für Innenaufstellung wird in der Regel für kleinere und mittlere Anlagen eingesetzt. (Heizleistung: 5 kW bis 50 kW). Die kompakte Bauart für Aussenaufstellung kommt dort zum Einsatz, wo im Gebäude kein Platz vorhanden ist.

Split-Anlagen kommen dort zum Einsatz, wo die Aussenluft aufgrund der erforderlichen Luftvolumenstrommenge nicht direkt dem im Gebäude platzierten Aggregat zugeführt werden kann. Der Verdampferteil wird im Freien aufgestellt und der Verdichter und Verflüssiger im Gebäude.

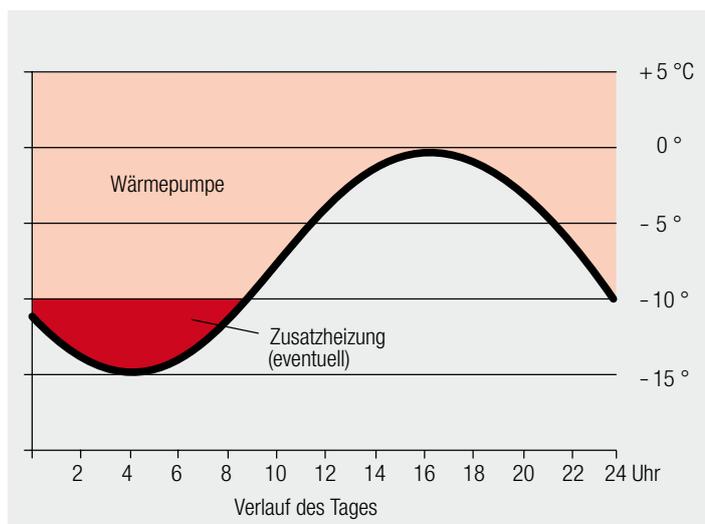


Abbildung 4.1: Beispiel eines Aussenluft-Temperatur-Tagesganges

Planungshinweise

- Die Nutzung von Aussenluft als Wärmequelle ist nicht bewilligungspflichtig.
- Der Elektroanschluss ist jedoch durch das zuständige Elektrizitätswerk zu bewilligen.
- Die Heizsystemtemperatur ist aufgrund der zeitweise tiefen Quellentemperatur eingeschränkt.
- Bei Aussentemperaturen unter ca. $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und entsprechender Luftfeuchtigkeit vereist der Verdampfer. Es ist eine automatische Abtauung notwendig.
- Durch die Abkühlung unter den Taupunkt der Luft entsteht Kondenswasser. Dieses muss gesammelt und in einer frostsicheren Leitung abgeführt werden.
- Es ist zu beachten, dass die abgekühlte Luft der Wärmepumpe nicht vom Aussenluftstrom erfasst wird (Kurzschluss).
- Mit dem Einsatz von Erdluftwärmetauschern oder durch Luftfassung an «warmen» Standorten (Autoeinstellhalle, Gebäudeabluftanlage) kann die Energieeffizienz der Wärmepumpe gesteigert werden.
- Die Wärmepumpe ist vor Beschädigung durch Personen sowie Schnee, Laub, Staubpartikeln und Kleintieren zu schützen.
- Eine feste Installation von Aussengeräten bedingt eine Baubewilligung.
- Bei der Planung einer Split-Anlage sind die kältetechnischen Grundregeln besonders zu beachten.
- Grosse Beachtung ist dem Thema Schallemissionen zu widmen. (Kapitel 7).



Abbildung 4.2: Kompakt-Anlage für Innenaufstellung (Bild: Hoval)



Abbildung 4.3: Kompakt-Anlage für Aussenaufstellung (Bild: Hoval)



Abbildung 4.4: Erdwärmesonde (Bild: Hoval)

4.2 Erdwärme

Das Erdreich ist ein idealer Wärmelieferant. Bereits etwa 10 m unter der Erdoberfläche weist das Erdreich eine über das ganze Jahr annähernd konstante Temperatur auf. Mit zunehmender Tiefe erhöht sich die Temperatur im Untergrund um ca. 3 K pro 100 m. Die jahreszeitliche Konstanz bildet eine ideale Voraussetzung zur Nutzung von Erdwärme zu Heizzwecken. Erdwärmesonden werden normalerweise zwischen 50 m bis zu 350 m tief gebohrt.

Erdwärmesonden (EWS)

Zur Wärmegewinnung aus dem Erdreich werden heute in der Regel mit Wasser oder einem Wasser-Glykol-Gemisch gefüllte EWS oder EWS-Felder eingesetzt.

Systeme: Es handelt sich praktisch durchwegs um PE-Kunststoffrohre, die in verschiedenen Anordnungen eingesetzt werden können. Durchgesetzt haben sich vor allem die Anordnung mit zwei Doppelrohren. In der Mitte ist ein zusätzliches Rohr angeordnet, durch welches das Bohrloch mit einem Bentonit-Zement-Wasser-Gemisch von unten ausgefüllt wird und welches sicherstellt, dass die wasserführenden Rohre nicht von der Bohrwand wegrutschen.

EWS-Anlagen sind unter folgenden energierelevanten Aspekten auszulegen:

- Untergrund
- Anzahl Sonden
- Sondenlänge
- Sondenabstand
- Rohrdurchmesser
- Druckverlust des Systems

Planungshinweise

- EWS-Anlagen sind bewilligungspflichtig (Zuständigkeit: Kantone). Folgende Werte sollten nicht überschritten werden: Jahresenergiemenge von 100 kWh pro Meter sowie ca. 2000 Vollbetriebsstunden pro Jahr bei einer EWS-Belastung von 50 W/m.
- Wird die EWS-Anlage auch als «Kältequelle» für Kühlzwecke (Freecooling) eingesetzt, kann das Erdreich durch den Wärmeeintrag teilweise «regeneriert» werden. Die Auswirkungen auf die EWS-Dimensionierung sind abzuklären.
- EWS-Anlagen dürfen nicht zur Bauaustrocknung eingesetzt werden, da die erwähnten Rahmenbedingungen in der Regel überschritten werden.
- Die EWS-Anlage sollte ausschliesslich durch eine zertifizierte Bohrfirma ausgeführt werden.
- Die Zufahrt zur Bohrstelle mit dem Bohrgerät ist sicherzustellen. Zudem sind die Anforderungen an den Bohrplatz zu beachten.
- Die Sondenzuleitungen zur Erdwärmesonde ab dem Verteiler sind in genügender Tiefe (ausserhalb Frostbereich) zu verlegen. Ist dies nicht möglich, sind diese mit einer Wärmedämmung zu versehen.
- Bei einer optimalen Auslegung ist der Betrieb nur mit Wasser als Wärmeträger möglich. Die Verdampfungstem-

Tabelle 4.1: Länge und Inhalt von Sonden sowie Bohrl Lochdurchmesser. Annahme: Doppel-U-Rohr.

* Spühlbohrungen in grundbruchgefährdetem Untergrund (Siltsande etc.) erfordern grössere Durchmesser (4 3/4" bis 7 5/8"), je nach EWS-Durchmesser und Bodenverhältnissen.

EWS-Rohr-durchmesser	Inhalt pro Meter	Bohrlochdurch-messer*	Maximale Länge
32 mm	2,12 Liter	112 bis 115 mm	ca. 150 m
40 mm	3,34 Liter	127 bis 135 mm	ca. 300 m
50 mm	5,18 Liter	152 mm	über 300 m

peratur darf nur so tief gewählt werden, dass keine Eisbildung möglich ist.

- Der Abstand zwischen den einzelnen EWS ist objektbezogen zu betrachten.
- Grössere Anlagen (EWS-Felder) sind durch ausgewiesene Spezialisten zu berechnen. Es wird empfohlen, eine Simulationsrechnung durchzuführen.

Erdwärmesonde mit Kohlendioxid-Technik

Als Alternative zur Erdwärmesonde mit einer Wasser- oder Wasser-Glykol-Füllung kann die Sonde mit CO₂ betrieben werden. Die CO₂-Sonde funktioniert nach dem Prinzip des Wärmerohres (heat pipe). Ungiftiges CO₂ (Kohlendioxid) zirkuliert in der Erdwärmesonde. Das CO₂ wird in flüssigem Zustand unter Druck in die Erdwärmesonde gefüllt. Es sinkt ab und erwärmt sich mit der steigenden Temperatur im Erdreich. Dabei verdampft die Flüssigkeit und kondensiert wieder an der kältesten Stelle, das heisst im Verdampfer der Wärmepumpe, und überträgt so die Erdwärme zur Wärmepumpe. Das CO₂ zirkuliert im Gegensatz zum Wärmeträger einer herkömmlichen Erdwärmesonde ohne Hilfsenergie, wodurch sich Energieeinsparungen ergeben. Allerdings kann so eine Sonde im Sommer durch Wärmeeintrag von der Wärmepumpe nicht regeneriert werden. Eine Gebäudekühlung ist mit dieser Sonde nicht möglich.

Erdwärmeregister

Anstelle von EWS werden auch Erdwärmeregister verwendet. Diese bestehen aus horizontal verlegten Rohrschlangen im Erdreich, 1,2 bis 1,5 Meter unter der Terrainoberfläche. Die Erdwärmeregister entziehen dem Erdreich mehrheitlich jene Wärme, welche durch Sonnenein-



Abbildung 4.6: Bohrpfahl
(Bild: enercret Röthis)



Abbildung 4.7: Ramm-pfahl
(Bilde: enercret Röthis)

strahlung und Regen eingetragen wird. In der Regel wird ein Frostschutz-Gemisch als Wärmeträger verwendet.

Systeme: Erdwärmeregister werden in der Regel aus Kunststoffrohren oder kunststoffummantelten Kupferrohren verlegt, die im Gebäude, oder in einem Schacht ausserhalb des Gebäudes, auf einem Verteiler respektive Sammler zusammengefasst werden.

Planungshinweise

- Erdwärmeregister können bewilligungspflichtig sein (Zuständigkeit: Kantone).
- Die maximale Entzugsleistung (Kälteleistung) beträgt pro m² Erdregisterfläche ca. 25 W bis 30 W oder ca. 60 kWh während der Heizperiode.
- Bei Eindeckung des Erdwärmeregisters muss das System unter Druck sein, um allfällige Beschädigungen zu erkennen. (Steine, Bauschutt etc. sind für das Überdecken nicht geeignet.)

Energiepfähle

Energiepfähle kommen in der Regel an Orten mit instabilem Baugrund als Fundationspfähle zum Einsatz. Der Energiepfahl wird also primär als statisches Element eingesetzt. Anordnung und Umfang richtet sich nach den Anforderungen, die an das Gebäude respektive den Baugrund gestellt werden. Der Energiegewinn ist demnach von den geologischen Verhältnissen und den statisch bedingten Massnahmen (Länge und Anordnung) abhängig. In der Regel wird ein Frostschutz-Gemisch als Wärmeträger verwendet.

Systeme: Man unterscheidet zwei Bauarten – Bohrpfahl und Rammpfahl.

Bohrpfähle bestehen aus Armierungskörben, an denen Rohre befestigt werden. Sie werden in ein Bohrloch versenkt und anschliessend wird das Bohrloch mit Beton aufgefüllt.

Rammpfähle sind vorgefertigte Betonpfähle, bei denen im Werk die Rohre verlegt und eingegossen werden. Beim Einrammen muss sichergestellt werden, dass die Leitungsanschlüsse am Pfahlende nicht beschädigt werden.

Planungshinweise

- Energiepfähle sind bewilligungspflichtig (Zuständigkeit: Kantone).
- Sie sind durch ausgewiesene Spezialisten zu berechnen.
- Die Zufahrt zur Bohr- respektive Rammstelle mit dem Arbeitsgerät ist sicherzustellen. Zudem sind die Anforderungen an den Arbeitsplatz zu beachten.

Abbildung 4.8: Erdwärmekörbe
(Bild: Calmotherm)



- Die Zuleitungen ab Energiepfahl zum Verteiler sind in genügender Tiefe zu verlegen und mit einer Wärmedämmung zu versehen.
- Je nach Untergrund und Auslegung ist der Betrieb nur mit Wasser als Wärmeträger möglich.

Erdwärmekörbe

Erdwärmekörbe sind spiralförmig aufgerollte Kunststoffrohre, die in einer Tiefe von 1,5 m bis 3,5 m eingebracht werden. Sie werden wie Erdwärmeregister durch die Witterung an der Erdoberfläche beeinflusst.

Erdwärmegraben

In 1 m bis 1,5 m tiefen Gräben werden Kunststoffrohre horizontal verlegt. Sie sind ebenfalls durch die Witterung an der Erdoberfläche beeinflusst.

Schlitzwände

Schlitzwände werden je nach Boden oder Tiefe mit einem Greifer oder einer Fräse abgeteuft. In das ausgehobene Schlitzsegment wird der Armierungskorb mit den befestigten Kunststoffrohren eingebracht und anschliessend mit Beton aufgefüllt.

Anbindung des Erdwärmenutzungssystems

Nebst der richtigen Auslegung der Wärmequelle sollte immer auch der Hydraulik des Primärkreises genügend Beachtung geschenkt werden.

Wärmeträger

Üblicherweise werden Erdwärmeentzugssysteme mit einem Frostschutz-Gemisch betrieben. Erdwärmeentzugssysteme können aber bei entsprechender Auslegung (z. B. durch Simulationsrechnung), mit Wasser ohne Zusätze betrieben werden. Dabei darf die Verdampfungstemperatur nur so tief gewählt werden, dass keine Eisbildung möglich ist.

Die Konzentration des Frostschutz-Gemisches sollte den Hersteller-Vorschriften entsprechen (Korrosionsschutz). Die physikalischen Eigenschaften des Frostschutzgemisch ändern sich je nach Temperatur und Wärmekapazität.

Umwälzpumpen

Die Umwälzpumpe ist immer anlagenspezifisch auszulegen und zu berechnen. Je nach Länge und Anordnung der EWS ist der Druckverlust beträchtlich. Eine über- oder unterdimensionierte Umwälzpumpe kann den Wirkungsgrad der Gesamtan-

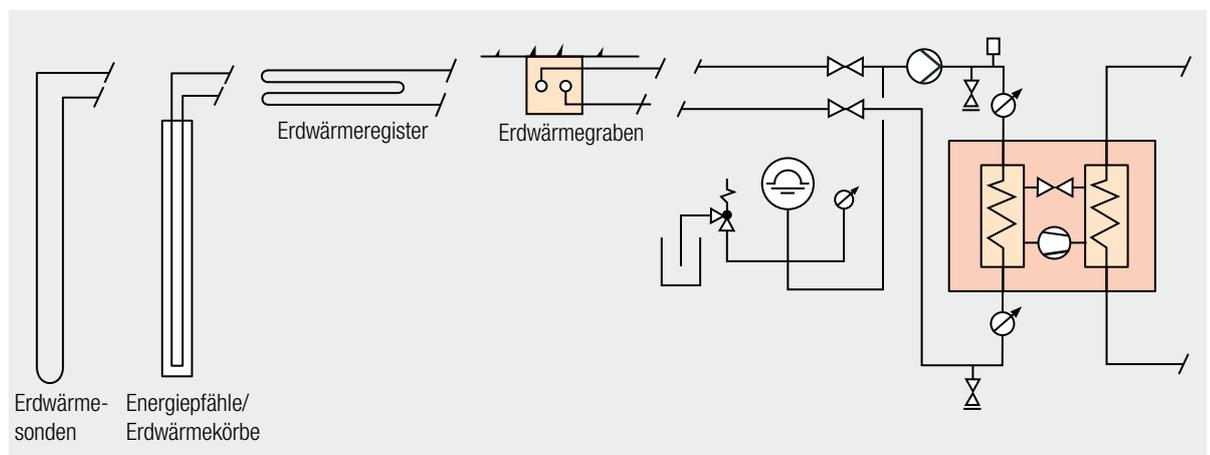


Abbildung 4.9: Anbindung an Erdwärmenutzungssystem

lage wesentlich verschlechtern. Generell ist ein möglichst hoher Wirkungsgrad der Umwälzpumpe anzustreben. Bei leistungsregulierten Wärmepumpen ist auch die Leistung der Umwälzpumpe im Sondenkreislauf dem Bedarf anzupassen. Der Schwitzwasserbildung ist Rechnung zu tragen.

Sicherheitseinrichtungen

- Die Drucküberwachung schaltet die Wärmepumpenanlage bei einem Druckabfall im Primärkreis aus.
- Das Expansionsgefäß kompensiert die Druckveränderungen im System, die sich durch Temperaturänderung und Veränderungen am Material (z. B. Kriechen der Kunststoffrohre) ergeben.
- Um die Anlage vor Überdruck zu schützen, ist ein Sicherheitsventil einzubauen. Der Überlauf ist in ein Auffanggefäß zu führen.

Rohrsysteme

- Es sind korrosionsbeständige Materialien wie Kunststoff, Chromstahl oder gegen Korrosion behandelter Stahl zu verwenden. Es dürfen keine verzinkten Rohre oder Fittinge verwendet werden.
- Im Gebäude ist das Leitungsnetz inkl. Armaturen dampfdicht zu dämmen, um Schwitzwasser zu vermeiden.

Hydraulischer Abgleich

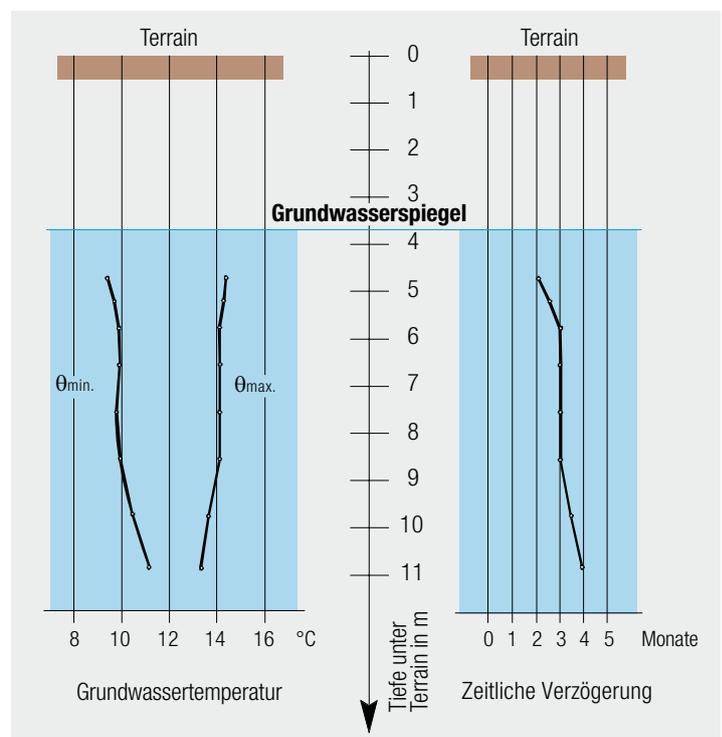
Die einzelnen EWS-Kreise sind untereinander hydraulisch abzugleichen. Am EWS-Verteiler sind entsprechende Regulierarmaturen einzubauen.

4.3 Grundwasser Grundwasservorkommen

Wasser, welches im Untergrund Gesteinsporen, Risse oder Klüfte füllt, wird als Grundwasser bezeichnet. Es fließt unter Einwirkung der Schwerkraft vorwiegend entlang der durchlässigeren Zonen in Locker- und Festgesteinen (kies- und sandreiche Lagen, Sandstein, geklüfteter oder verkarsteter Fels). Oberflächennahes Grundwasser wird meist aus Tiefen von wenigen Metern bis mehreren 10 Metern vorwiegend aus kiesreichen Lockergesteinsvorkommen (Schotter) gefördert.

Die mittlere Jahrestemperatur von oberflächennahem Grundwasser liegt in der Regel bei 9 °C bis 11 °C und damit über dem Mittelwert von Aussenluft. Die Temperatur kann durch zusickerndes Oberflächenwasser oder durch die Lufttemperatur beeinflusst werden. Ist der

Abbildung 4.10: Grundwasser-Temperaturen



Einfluss durch Oberflächengewässer relativ gering und liegt die Fördertiefe mehrere Meter unter Terrain, sind die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen jedoch sehr gering. Auch steigt die Verzögerung der Maximal- und Minimalwerte mit zunehmender Tiefe. Die maximale Temperaturschwankung liegt bei etwa 5 K (Abbildung 4.10).

Aufgrund des relativ hohen und konstanten Temperaturniveaus ist Grundwasser eine ideale und zuverlässige Wärmequelle für Wärmepumpen.

Grundwasserqualität

Die Qualität von Grundwasser kann durch Infiltration aus Oberflächengewässern entscheidend beeinflusst werden (Abbildung 4.11). Neben der thermischen Beeinflussung ist auch der Beeinflussung der Grundwasserqualität Beachtung zu schenken. Grundwasser ist in den meisten Fällen nicht aggressiv. Insbesondere der Eintrag von organischem Material oder Sauerstoff durch Zutritt von Oberflächenwasser kann zu unerwünschten Reaktionen führen. Aus diesen Gründen ist eine einfache Analyse der Grundwasserqualität empfehlenswert. Folgende Grenzwerte sollten eingehalten werden:

- pH-Wert: ≥ 7
- Eisen (gelöst): $\leq 0,15 \text{ mg/l}$
- Mangan (gelöst): $\leq 0,1 \text{ mg/l}$

Verunreinigungen durch Sand, welche in der Anlage mechanische Schäden verursachen können, sollten bei einer fachgerecht erstellten Anlage weder durch Oberflächenwassereinfluss noch durch die Förderung im Filterbrunnen auftreten. Um dies zu gewährleisten soll sowohl der Entnahme- als auch der Rückgabebrunnen unter fachkundiger Aufsicht geplant und erstellt werden.

Abbildung 4.11: Infiltration von Oberflächenwasser

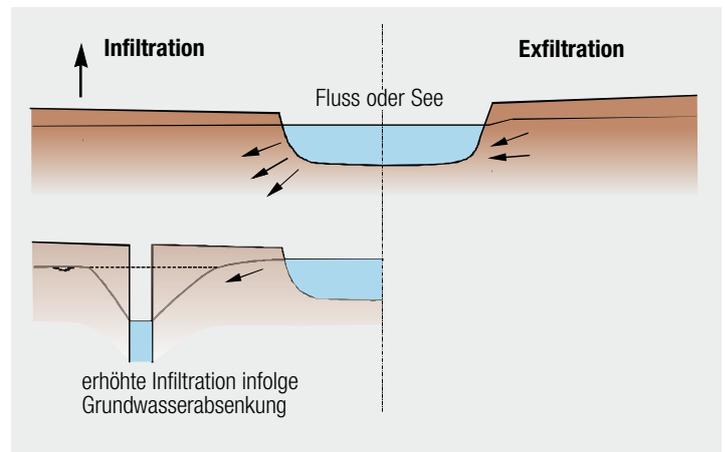
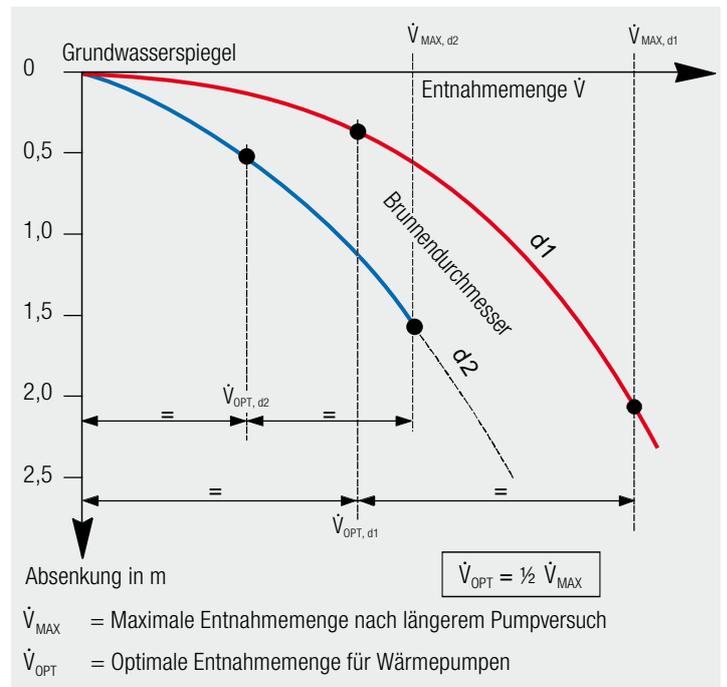


Abbildung 4.12: Dimensionierung einer Grundwasserfassung



Grundwasserfassung und Rückgabe

Die Dimensionierung des Entnahme- und Rückgabebrunnens (Abbildung 4.15) richtet sich vor allem nach den Eigenschaften des wasserführenden Gesteins sowie der von der Wärmepumpe benötigten Fördermenge. Die optimale Entnahmemenge aus einem Förderbrunnen liegt im Bereich der halben maximalen Entnahmemenge (Abbildung 4.12). Die benötigte Fördermenge pro kW Wärmebedarf liegt in der Regel zwischen 150 l/h und 200 l/h. Mit steigender Entnahmemenge sind in der Regel grössere Bohrdurchmesser notwendig. Die Dimensionierung der Bohrungen hängt aber stark von den lokalen Gegebenheiten ab und sollte durch eine Fachperson erfolgen.

Die Rückgabe erfolgt oft auch über einen untiefen Versickerungsschacht. Dazu muss die Sickerfähigkeit des Untergrundes abgeklärt werden. Fallweise kann die Rückgabe in ein nahe liegendes Oberflächengewässer erfolgen.

Planung und Umsetzung

Folgende Punkte sind bei der Planung und Umsetzung zu beachten:

- Planung und Umsetzung sollten unter Einbezug eines beratenden Geologen oder Hydrogeologen erfolgen.
- Bei Fassungen in der Nähe von Oberflächengewässern ist eine mögliche Infiltration durch diese zu beachten.
- Bei der Lokalisierung von Entnahme und Rückgabestelle ist die Grundwasserströmung zu berücksichtigen (keine Rückgabe im Anströmbereich der Entnahme).
- Eine einfache Wasseranalyse ist empfehlenswert.
- Die Leistung der Förderpumpe sollte auf den niedrigsten zu erwartenden Grundwasserstand ausgelegt werden.

Abbildung 4.13: Register im Fließgewässer

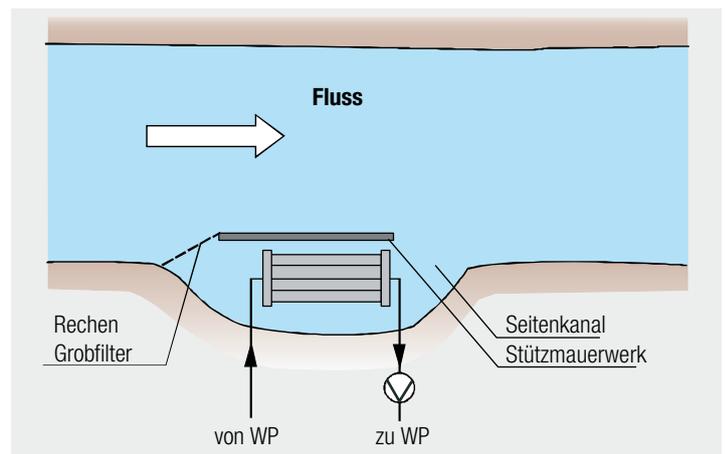
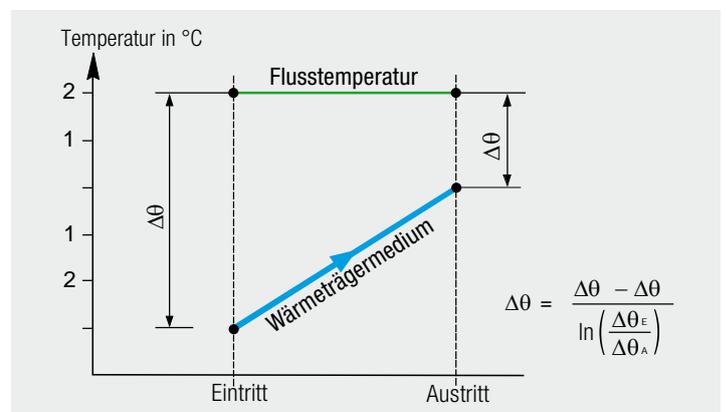


Abbildung 4.14: Temperaturen Fluss und Wärmeträgermedium



- Eine Temperatur- und Strömungsüberwachung bietet Schutz vor Abkühlung des genutzten Wassers unter den Gefrierpunkt sowie vor Übernutzung der Fassung.
- Für eine Grundwassernutzung ist eine amtliche Bewilligung notwendig. Die Bewilligungspraxis ist kantonally unterschiedlich.

4.4 Oberflächenwasser

Die relativ grossen Temperaturschwankungen von Oberflächengewässern (Fluss-, See- oder Bachwasser) lassen einen monovalenten Betrieb mit Direktnutzung in der Regel nicht zu. Es findet deshalb meist eine indirekte Nutzung statt: Die Wärmequelle gibt ihre Wärme an einen Wärmetauscher ab, der durch einen Zwischenkreislauf mit der Wärmepumpe verbunden ist. Der Zwischenkreislauf enthält ein Frostschutzgemisch, damit die Verdampfungstemperatur unter 0°C sinken darf.

Der Wärmeentzug aus Oberflächengewässern ist grundsätzlich auf zwei Arten möglich:

- **Register im Fließgewässer** (Abbildung 4.13): Es fliesst eine sehr grosse Wassermenge durch das Register, die Abkühlung ist entsprechend klein. (Abbildung 4.14)
- **Filterbrunnenlösung** (Abbildung 4.16): Das Wasser wird in einem Filterbrunnen direkt neben dem Oberflächengewässer gesammelt und von hier aus zu einem Wärmetauscher gepumpt.

Für die Register-Lösung ist es empfehlenswert, mit einer mittleren loga-



Abbildung 4.15: Entnahme- und Rückgabebrunnen (Bild: Hoval)

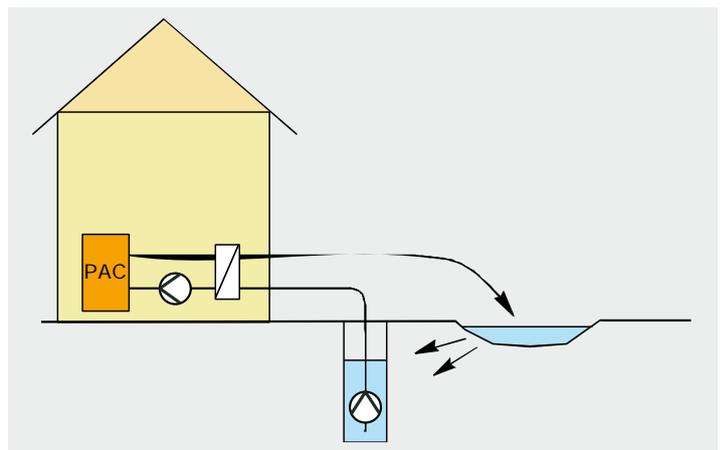


Abbildung 4.16: Filterbrunnen

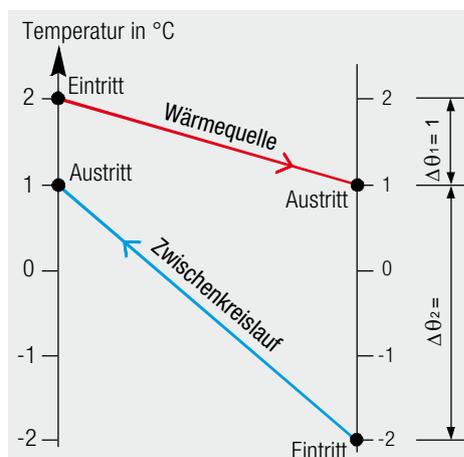


Abbildung 4.17: Temperaturen Wärmequellen und Zwischenkreislauf

rhythmischen Temperaturdifferenz von maximal 5 K bis 6 K zu rechnen. Zur Dimensionierung der Wärmetauscherfläche kann man U-Werte von 200 bis 300 W/m² K annehmen (Strömungsgeschwindigkeit > 0,5 m/s). Es ist empfehlenswert, einen Sicherheitszuschlag von etwa 25% für eine mögliche Verschmutzung des Registers zu machen. Die rasch nachfliessende Wärmequelle (Bach- und Flusswasser) verhindert eine Eisbildung. Der Rohrabstand muss im Minimum 4 cm betragen. Zudem muss das Register durch bauliche Massnahmen gegen Geröll geschützt werden und gut zu reinigen sein. Bei stehenden Gewässern ist diese Lösung nur bedingt brauchbar. Der Vorteil der Filterbrunnen-Lösung ist die praktisch verschmutzungsfreie Wasserentnahme. Ein monovalenter Betrieb ist häufig möglich.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Ein Zwischenkreislauf ergibt tiefere Verdampfungstemperaturen und damit schlechtere Leistungszahlen.
- Das Wasserangebot ist oft schwankend (z.B. Bach).
- Pro kW Wärmebedarf liegt der Wasserbedarf in der Regel bei ca. 300 l/h bis 400 l/h.
- Die Realisierung ist eher schwierig (insbesondere die Register-Lösung).
- Zur Nutzung von Oberflächengewässern ist eine amtliche Bewilligung notwendig. Das Bewilligungsverfahren und der Unterhalt können insbesondere bei der Registerlösung sehr aufwendig sein.
- Eine Wasseranalyse ist unbedingt empfehlenswert.
- Behördliche Bewilligung ist nötig (wird nur erteilt, wenn keine Trinkwassernutzung erfolgt).

- Verschmutzungen oder Verstopfungen durch Wandermuscheln beachten.

4.5 Abwärme

Abwärme sollte, wenn immer möglich, direkt genutzt werden. Ist eine Direktnutzung aufgrund der geforderten Nutzungstemperaturen nicht möglich, so kann die vorhandene Abwärme mittels einer Wärmepumpe auf das notwendige Temperaturniveau angehoben werden.

Abwasser

Abwasser ist in verschiedenen Formen vorhanden, z.B. ungereinigt in der Kanalisation, vorgereinigt in Industriebetrieben mit hohem Frischwasserbedarf oder gereinigt am Ende der Kläranlage. Die Wassertemperaturen bewegen sich zwischen 10°C und 25°C in der Kanalisation und der Kläranlage respektive bis über 60°C in Industriebetrieben.

Die Abkühlung des Abwassers ist bei richtig geplanten und entsprechend den Vorgaben der Kläranlagenbetreiber dimensionierten Anlagen kein Problem und ist weder für die Abwasserreinigung noch für Gewässer von Nachteil.

Systeme

Kanalwärmeübertrager: Die Energiegewinnung erfolgt über einen Wärmeübertrager, der in die Sohle des Abwasserkanals integriert wird. Bei neuen Abwasserkanälen werden auch direkt im Abwasserkanal einbetonierte Rohre zum Wärmeentzug eingesetzt.

Wärmeübertrager im Bypass: Der Einbau erfolgt parallel zum Abwasserkanal. Dies hat den Vorteil, dass während der Bauzeit fast keine Beeinträchtigung des Abwasserkanals stattfindet.

Energieentnahme ohne Kanalwärmetauscher: Dies ist bei grossen Anlagen, bei denen der Einsatz von Kanalwärmetauschern an technische Grenzen stösst, von Vorteil. Hier wird mit dem Abwasser mit oder ohne Zwischenkreislauf über den Verdampfer der Wärmepumpe gefahren. Damit der Verdampfer respektive der Wärmeübertrager nicht verschmutzt, ist entweder eine Vorreinigung des Abwassers nötig oder die Apparate sind konstruktiv auf die Abwasserqualität auszuweisen.

Abwasser-Wärmepumpen: Der Energieentzug erfolgt direkt im oder neben dem Gebäude bevor das Abwasser der Kanalisation zugeleitet wird. Es sind verschiedene herstellereigenspezifische Systeme erhältlich.

Planungshinweise

- Diese Anlagen erfordern aus technischen und wirtschaftlichen Gründen eine Mindestwassermenge.
- Beim Einsatz von Kanalwärmeübertragern kann mit einer spezifischen Entzugsleistung von ca. 2 kW/m² kalkuliert werden.
- Hohe Abwassertemperaturen erlauben eine grössere Abkühlung und damit einen grossen Energieentzug. Ideale Voraussetzungen sind bei Abwassertemperaturen gegeben, die im schlechtesten Fall über 10 °C liegen.
- Eine wichtige Voraussetzung ist ein kontinuierlicher Abwasseranfall. Auch nachts und an den Wochenenden sollten die betriebstechnisch notwendigen Mindestwassermengen eingehalten werden.
- Die Zugänglichkeit muss für den Einbau und die spätere Wartung gewährleistet sein.

- Die Distanz zwischen der Wärmequelle und dem Standort der Wärmepumpe sollte möglichst kurz sein, da sonst für den Transport der gewonnenen Energie viel Transportenergie verbraucht wird, die sich auf die JAZ negativ auswirkt.

- Solche Anlagen sind von Spezialisten mit entsprechender Erfahrung zu planen.

Kälteanlagen

Systeme: Jede Kälteanlage produziert Abwärme. Bei grossen und neueren Anlagen wird die Abwärme meist über ein Rückkühlsystem der Umgebung zugeführt. Das Rückkühlsystem kann somit optimal als Wärmequelle genutzt werden und als Nebeneffekt führt eine tiefere Rückkühltemperatur zu einem tieferen Energiebedarf der Kälteanlagen.

Bei ausgeschalteten Kälteanlagen kann der Rückkühler bei geeigneter Auslegung die Energie aus der Umgebungsluft beziehen. Die Wärmepumpe arbeitet dann als indirekte Luft-Wasser-Wärmepumpe.

Planungshinweise

- Die Auslegung und die Definition der Einsatzgrenzen sowie die hydraulische und regeltechnische Schnittstelle ist zwingend mit dem Hersteller oder Lieferanten der Kälteanlage zu klären.
- Der Wärmebedarf muss mit dem zeitgleichen Lastverlauf der Kälteanlagen übereinstimmen.
- Der Wärmedämmung (Schwitzwasser) des Rückkühlsystems ist ebenfalls Beachtung zu schenken.

Lüftungs- und Klimaanlage

Systeme: Der Einsatz von Wärmepumpen ist auch bei Lüftungs- und Klimaanlage sinnvoll. Die Wärmepumpe stellt eine ideale Komponente für die Wärmerückgewinnung (WRG) dar. Damit ist es möglich, sowohl die sensible, wie auch die latente Wärme aus einem Abluftstrom zurück zu gewinnen und diese Wärmeenergie samt dem dazu benötigten Kraftbedarf wieder in den Kreislauf zurück zu bringen.

Standardisierte Lösungen findet man z. B. bei Hallenbad-Lüftungsgeräten und bei Gebäuden mit kontrollierter Lüftung.

In Hallenbädern steht vor allem die Entfeuchtung der Raumluft im Vordergrund. Bei diesen Geräten wird der Luftstrom zuerst über den Verdampfer (Entfeuchtung) und anschliessend über den Verflüssiger (Wiedererwärmung des Luftstroms) geleitet. Die überschüssige Wärme wird oft zur Badwassererwärmung genutzt.

Eine weitere Anwendung ist bei dezentralen Lüftungsanlagen zu finden. Bei kleineren Anlagen mit einer Distanz zwischen Fort- und Zuluftanlagen von weniger als 25 m wird direkt der Verdampfer in den Fortluft- respektive der Verflüssiger in den Zuluft-Monobloc eingebaut. Bei grossen Anlagen oder grossen Distanzen ist ein Zwischenkreislauf empfehlenswert. Bei einem Wärmeüberschuss können die Anlagen zur Gebäudeheizung oder ausserhalb der Heizperiode zur Warmwasserbereitung genutzt werden.

Planungshinweise

- Die Wärmeübertrager in den Lüftungsanlagen müssen für eine regelmässige Reinigung gut zugänglich sein. Weiter ist eine geeignete Wärme-

dämmung vorzusehen (Schwitzwasser).

- Die beiden Energieströme (Quelle und Senke) sollten möglichst gleichzeitig verfügbar sein, da sonst eine Energiespeicherung benötigt wird, die sehr schnell hohe Kosten verursachen kann.

4.6

Gebäudekühlung

In vielen Fällen kann das Gebäude direkt, durch die Nutzung von Erdwärme, Grund- oder Oberflächenwasser, gekühlt werden. In diesem Fall spricht man von Freier Kühlung (Free Cooling).

Der Wärmeentzug erfolgt ohne Verdichterbetrieb

Reicht diese nicht aus, kann eine Kältemaschine oder eine umschaltbare Wärmepumpe ins System integriert werden. Die Abwärme dieser Anlagen kann zur Beheizung oder zur Warmwasserproduktion genutzt werden. Die nicht verwendbare Wärme wird dem Erdreich, der Luft, dem Grund-, Oberflächen- oder Abwasser zugeführt.

Der Wärmeentzug erfolgt mit Verdichterbetrieb

Systeme. Prinzipiell unterscheidet man folgende Systeme:

- Kältegeführte Anlagen (Kältemaschine)
- Wärmegeführte Anlagen (Wärmepumpe)

Das heisst die Führungsgrösse entscheidet, ob es sich um eine Kältemaschine oder eine Wärmepumpe respektive um eine kombinierte Anlage handelt.

Die Energie kann grundsätzlich über dasselbe Verteilsystem dem Verbraucher zu-

geführt oder entzogen werden. Im Kühlbetrieb muss das System entweder gegen zu tiefe Betriebstemperaturen (Schwitzwasserbildung) geschützt werden oder ist entsprechend der Einsatzbedingungen zu dämmen und gegen Korrosion zu schützen.

Heizsysteme in üblicher Ausführung werden im Kühlfall mit einer Mediumtemperatur von mindestens 17°C bis 20°C betrieben, sodass sich im Normalfall kein Schwitzwasser bilden kann.

Beispiele: Wird zur Wassererwärmung Energie aus dem Gebäude und nicht über eine Wärmequelle gewonnen, handelt es sich um eine **Wärmepumpe mit Verdampfernutzung**.

Wird ein Niedertemperatur-Heizsystem zur Gebäudekühlung verwendet und wird Energie, z. B. mittels Wärmeübertrager, direkt der Erdsondenanlage zugeführt, handelt es sich um **Freie Kühlung**. Die Kühlung der Zuluft erfolgt mittels Verdichterbetrieb, entweder mit einer Kältemaschine oder einer auf Kältebetrieb umschaltbaren Wärmepumpe. Die Abwärme wird im Gebäude zumindest teilweise genutzt, die Restwärme wird über die Aussenluft abgeführt. Hierbei handelt es sich um eine **Kältemaschine mit Abwärmenutzung**.

Planungshinweise

- Bewilligungspflicht beachten (Zuständigkeit: Kantone).
- Der Wärme- und Kältebedarf des Gebäudes mit den zugehörigen Medientemperaturen ist in einer frühen Phase zu definieren. Das Verteilsystem muss entsprechend der verschiedenen Ansprüche konzipiert werden.
- Bei Erdwärmesondenanlagen ist bei der Wahl der Sondenlänge die primäre Nutzung zu berücksichtigen.

- Bei Grund-, Oberflächen- und Abwassernutzungen sind die maximalen Rückgabetemperaturen mit den zuständigen Behörden unbedingt zu klären.
- Speziell zu beachten ist die richtige Wahl der regeltechnischen Schnittstellen zwischen Erzeugung, Verteilung und Verbraucher. Eine klare und zweckmässige Trennung erleichtert die Planung und Realisierung sowie den Betrieb, vor allem bei komplexen Anlagen.

5. Wärmeabgabe

Mit der Wärmeabgabe wird das System bezeichnet, mit dem die von der Wärmeerzeugung bereitgestellte und von der Wärmeverteilung transportierte Wärme an den Raum abgegeben wird.

Die Temperaturen des Wärmeabgabesystems sind von der Norm-Heizlast (Wärmeleistungsbedarf) des Gebäudes und damit von dessen energetischen Konstellation (Aufstellungsort, Lage, Geometrie, Konstruktion, Nutzung) abhängig. Da Wärmepumpen bei kleineren Temperaturhuben zwischen Verdampfer und Kondensator die eingesetzte Kompressorenergie effizienter nutzen, ist eine möglichst tiefe Kondensatortemperatur und damit Vorlauftemperatur im Heizsystem anzustreben. Im Besonderen ist im Teillastfall, die gleitende Vorlauftemperatur der konstanten Betriebsweise vorzuziehen. Unnötig mit hohen Temperaturen betriebene Wärmepumpen verschwenden hochwertige elektrische Energie und belasten das Betriebsbudget des Betreibers.

Wärmepumpen unterliegen in ihrer Funktion thermodynamischen und konstruktiven Gesetzmässigkeiten. Dabei sind einer Auslegung auch Grenzen gesetzt. Im Gegensatz zu einer Kesselanlage, bei der die Brennerleistung und damit die Kesselleistung in begrenztem Rahmen angehoben werden kann, ist dies bei der Wärmepumpe nicht möglich. Daher sind Wärmepumpen beispielsweise sehr schlecht geeignet, um mit einer erhöhten

Vorlauftemperatur eine Bauaustrocknung zu bewältigen oder eine Nachtabsenkung energetisch auszugleichen.

5.1 Warmwasserheizung

Systeme: Wärmeabgabesysteme bei Warmwasserheizungen beziehen sich vorwiegend auf Fussboden- und Heizkörperheizungen oder Kombinationen der beiden Systeme. In den vergangenen Jahren sind vermehrt, vor allem in Niedrigenergiebauten, thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) eingesetzt worden.

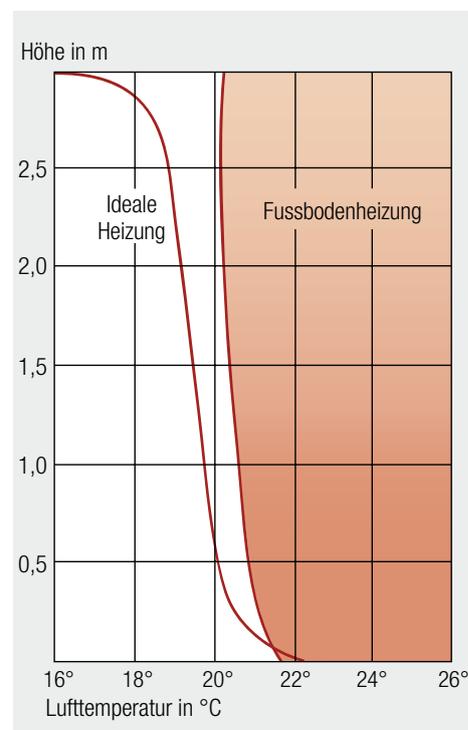


Abbildung 5.1: Temperaturverlauf mit Fussbodenheizung

Fussbodenheizung

Vorteile

- + Grosse Wärmeabgabe bei tiefen Vorlauftemperaturen aufgrund der Kompensation durch die grosse Fussbodenfläche
- + Gute Temperaturverteilung über die Raumhöhe
- + Unterlagsboden (Estrich) kann als Speicher benutzt werden.

Nachteile

- Trägheit durch den Einbau im Unterlagsboden
- Wärmeabgabesystem ist nach der Erstellung nicht mehr zugänglich.

Die Reduktion des Energiebedarfs durch die seit den 80-er Jahren eingeführten Energiegesetze hat einen direkten Einfluss auf den Wärmeleistungsbedarf und die Auslegung von Raumheizungssystemen. In der Folge können die Vorlauftemperaturen zum Teil massiv gesenkt werden.

Mit der tiefen Vorlauftemperatur erreichen wir bei der Wärmepumpe einen effizienteren Energieeinsatz.

Die gängige Vorstellung von «Fussbodenheizung gleich warmer Fussboden» entspricht nicht der Realität. Es ist die Pflicht der Planer und Installateure, Architekten und Bauherrschaften darüber zu informieren, dass die tiefen Vorlauftemperaturen für die Materialwahl des Fussbodenbelages eine nicht zu unterschätzende Bedeutung hat. Denn Fussbodenheizungen führen häufig aufgrund kalter Oberflächen zu Reklamationen (siehe Abbildung 5.3).

Abbildung 5.2 zeigt sehr eindrücklich, den Wärmefluss aus dem Fuss bei unterschiedlichen Materialien der Fussbodenoberfläche.

Selbstregeleffekt: Unter Selbstregeleffekt eines Wärmeabgabesystems versteht man die automatische Abnahme der Heizleistung, wenn dem Raum Fremdwärme zugeführt wird. Die analytische Betrachtung des Selbstregeleffektes ist in Abbildung 5.4 für den heizungstechnisch relevanten Bereich aufgetragen.

Aus diesen Überlegungen folgt, dass die Übertemperatur nicht zu hoch gewählt

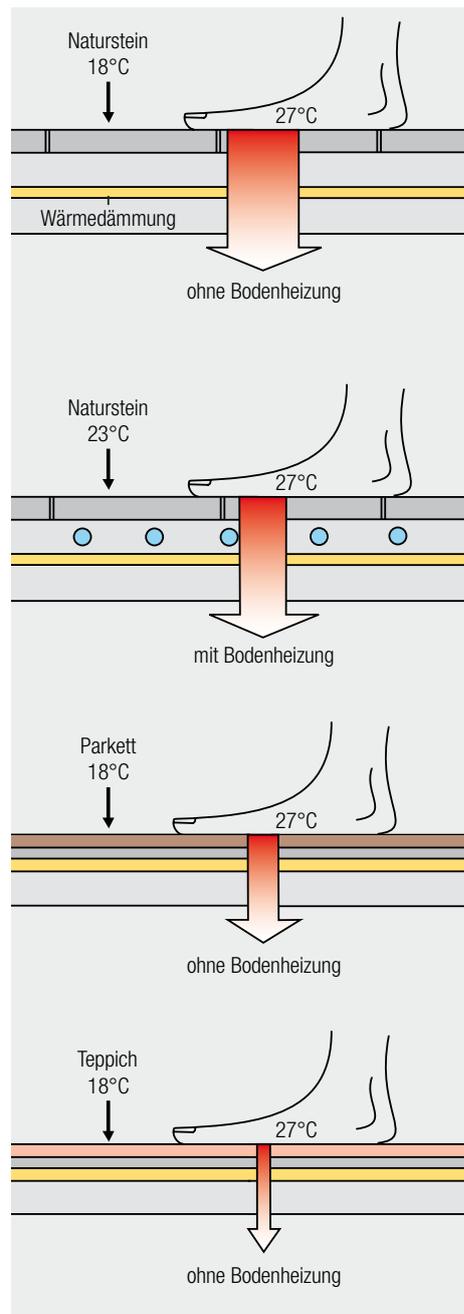


Abbildung 5.2: Wärmefluss vom Fuss bei unterschiedlichen Bodenbelägen

werden darf, wenn der Selbstregeleffekt ausgenutzt und eine Überschwingung der Raumlufttemperatur vermieden werden soll.

Thermoaktive Bauteilsysteme

Thermoaktive Bauteilsysteme sind Bauteile, die als Teil der Raumumschließungsflächen über ein integriertes Rohrsystem mit einem Heiz- oder Kühlmedium beaufschlagt werden können und so die Beheizung oder Kühlung des Raumes ermöglichen. Die Konstruktionsvielfalt reicht nach diesem Verständnis von Heiz- bzw. Kühldecken über Geschosstrenndecken mit kernintegrierten Rohren bis hin zu Fussbodenheizungen. Die darin enthaltenen extrem trägen Systeme werden bewusst eingesetzt, um Energieangebot und Raumenergiebedarf unter dem Aspekt der rationellen Energieanwendung zeitlich zu entkoppeln, z. B. aktive Bauteilkühlung in der Nacht, passive Raumkühlung über den kühlen Bauteil am Tage. Gebäude- und Anlagenkonzepte, die träge reagierende thermoaktive Bauteilsysteme vorsehen, setzen im kompetenten und verantwortungsvollen Planungsprozess den Einsatz von modernen Gebäudesimulationswerkzeugen voraus, um fundierte Aussagen über Behaglichkeit und Energiebedarf treffen zu können.

Abbildung 5.3: Prozentsatz unzufriedener Personen, die leichte Hausschuhe tragen, in Funktion der Fussbodenoberflächentemperatur

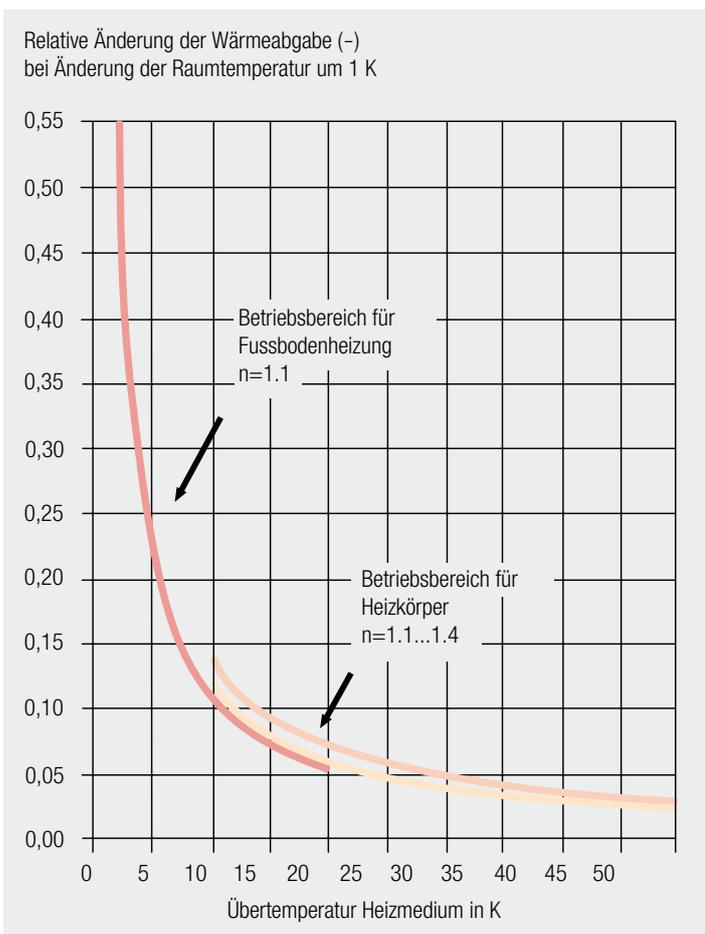
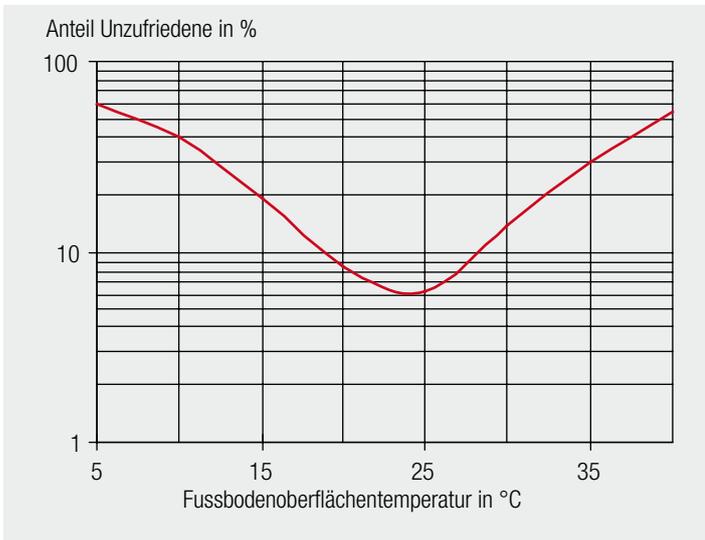


Abbildung 5.4: Selbstregeleffekt von Wärmeabgabesystemen

m²K, jener durch Strahlung ca. 5 W/m²K). Das ergibt bei einem typischen Temperaturunterschied zwischen Bauteiloberfläche und Raumluft von 6 K (Bauteiloberflächentemperatur von 19 °C und einer Raumlufttemperatur von 25 °C) einen Wärmeübergang von rund 50 W/m². Wirkt eine Wärmeleistung von 50 W/m² während 24 Vollbetriebsstunden der Bauteilkonditionierung, so ergibt sich eine Wärmemenge von 1,2 kWh/m², die pro Tag an den Raum abgegeben werden kann.

Heizkörperheizung

Vorteile

- + Reagiert schnell auf Laständerungen
- + Wärmeabgabesystem ist jederzeit zugänglich
- + Kaltluftabfall an kalten Oberflächen kann je nach der Platzierung des Heizkörpers vermieden werden

Abbildung 5.5: Detailschnitt
Abbildung 5.6: Verwaltungsgebäude mit 6000 m² thermoaktiver Bauteile (Bild: Vescal)

Nachteile

- Kleinere Wärmeleistung bei tiefen Vorlauftemperaturen
- Schlechtere Temperaturverteilung über die Raumhöhe
- Kalter Boden bei Steinplatten
- Benötigt relativ grosse Heizkörperflächen

Auch bei den Heizkörperheizungen verändern sich die Heizflächen (Fläche, die aktiv zur Wärmeabgabe beiträgt) in Abhängigkeit der Systemtemperaturen und des Heizbedarfs, wobei hier Grenzen bezüglich Ansichtsfläche (Fläche, mit der die Heizfläche von vorne wahrgenommen wird) und Materialeinsatz gesetzt werden.

Planungshinweise

- Tiefstmögliche Vorlauftemperaturen wählen
- Kleine Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur wählen

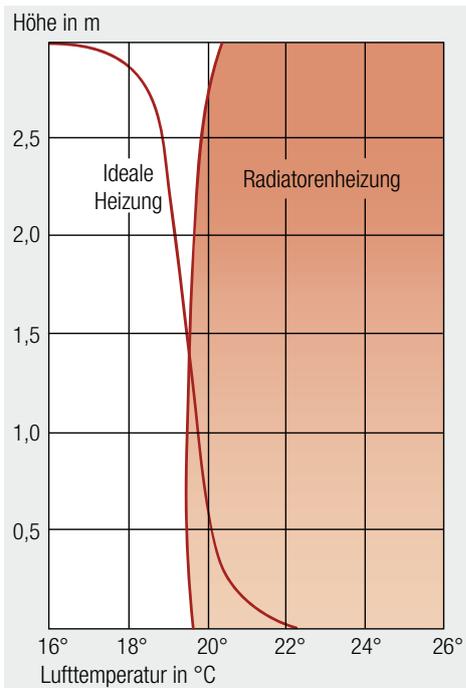
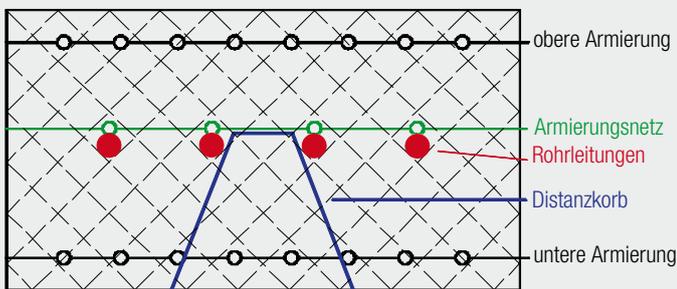


Abbildung 5.7: Temperaturverlauf mit Radiatorenheizung

- Bei der Kältemittelwahl muss die Temperaturdifferenz berücksichtigt werden (Temperaturleit)
- Bei Parkettbelag maximale Vorlauf-temperatur der im Estrich verlegten Leitungen beachten (Schüsselung)

5.2 Raumluftheizungsanlagen Luftheizung

Systeme: Die Luftheizung ist für Minergie-P- und Passivhäuser eine mögliche Alternative zu den wasserführenden Wärmeabgabesystemen. Voraussetzung ist eine sorgfältige Planung.

Vorteile

- + Reagiert schnell auf Laständerungen
- + Wärmeabgabesystem ist bei nicht einbetonierten Systemen jederzeit zugänglich
- + Nur ein Heizsystem

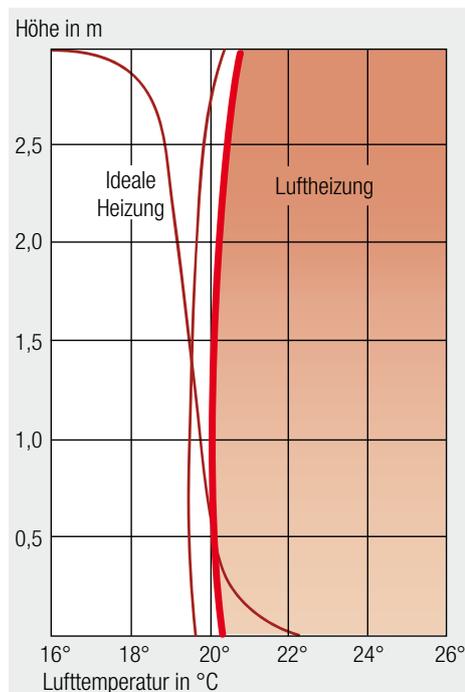


Abbildung 5.8 Temperaturverlauf mit Luftheizung

Nachteile

- Kleinere Wärmeabgabe bei tiefen Vorlauftemperaturen
- Schlechtere Temperaturverteilung über die Raumhöhe
- Kalter Boden bei Steinplatten
- Möglicher Kaltluftabfall an den kalten Oberflächen
- Hygiene im Luftkanalnetz
- Höhere Verflüssigungstemperatur notwendig (schlechterer COP)

Planungshinweise

- Tiefstmögliche Zulufttemperaturen wählen
- Bei der Kältemittelwahl muss die Temperaturdifferenz berücksichtigt werden (Temperaturleit)
- Zuluftöffnung in den Aufenthaltsbereich meiden

5.3 Wassererwärmung

Systeme: Die Wassererwärmung mittels Wärmepumpe kann grundsätzlich in zwei Systeme unterteilt werden.

Indirekte Nutzung: Das Wasser wird indirekt durch einen oder mehrere Wärmeübertrager vom Heizsystem erwärmt.

Direkte Nutzung: Das Wasser wird direkt durch einen oder mehrere Wärmeübertrager vom Kältekreislauf erwärmt.

Selbstverständlich sind auch beide Systeme kombinierbar.

Indirekte Nutzung

Vorteile

- + Einfache Einbindung mit standardisierten hydraulischen Schaltungen
- + Hohe Verfügbarkeit von Standardkomponenten

Nachteile

- Parallelbetrieb Heizung und Wassererwärmung nur bei tieferem Gesamtwirkungsgrad der Anlage möglich
- Tieferer Wirkungsgrad
- Tiefere Wassertemperaturen

Typische Beispiele für indirekte Nutzung sind:

- Speicher mit aussen liegendem Wärmeübertrager
- Register-Speicher
- Kombi- oder Spiro-Speicher

Direkte Nutzung**Vorteile**

- + Höherer Wirkungsgrad
- + Temperaturgerechte Wärmenutzung durch Enthitzen, Verflüssigen und Unterkühlen des Kältemittels

Nachteile

- Kältemittelseitig sind getrennte Wärmeübertrager für Heizung und Trinkwassererwärmung von Vorteil
- Grössere Kältemittelinhalte
- Höhere Kalkausscheidung, dadurch häufigere Reinigung der Wärmeübertrager (Enthitzer, Verflüssiger)
- Öl-Kälte-Kreislauf muss lebensmittel-tauglich ausgeführt sein

Temperaturgerechte Wärmeauskopplung:

Der Temperaturhub bei der Wassererwärmung ist im Vergleich zur Heizungserwärmung meistens wesentlich höher. Dieser Umstand kann insofern genutzt werden, als dass bei der Auslegung der Wärmepumpe und der hydraulischen Einbindung die Enthitzungs-, Verflüssigungs- und Unterkühlungswärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus entnommen werden.

Diese Optimierung der Wärmeentnahme kann mit unterschiedlichen Systemen umgesetzt werden.

- Getrennte Wärmeübertrager (Enthitzer, Verflüssiger, Unterkühler).
- Konstruktive Massnahmen zur Nutzung der Unterkühlung und Enthitzung im Verflüssiger.

Typische Beispiele für indirekte Nutzung sind:

- Speicher mit aussen liegendem Verflüssiger und Unterkühler
- Speicher mit getrennten Register-Zonen für Enthitzung, Verflüssigung und Unterkühlung
- Speicher mit einfachem Register

Planungshinweise

- Bei monovalenten Systemen ist der Einsatz einer elektrischen Notheizung zu prüfen.
- Zur Verhinderung von Legionellen sind im ganzen Warmwassernetz die notwendigen Vorkehrungen zu treffen.
- Die Wassererwärmung sollte ganzjährig über die Wärmepumpe erfolgen und nicht nur in der Heizsaison. Bei der Auslegung von Erdwärmesonden ist dies zu berücksichtigen.
- Zu hohe Temperaturen auf den Wärmeübertrager-Oberflächen fördern die Kalkausscheidung im zu erwärmenden Wasser.
- Dem Einfluss der Zirkulation ist Rechnung zu tragen.
- Die Schichtung im Warmwasserspeicher muss gewährleistet sein (bei bestehenden Speichern prüfen).
- Die Wärmetauscher im Warmwasserspeicher müssen auf die maximale Leistung der Wärmepumpe ausgelegt werden. (Luft-Wasser-Wärmepumpen

haben im Sommer fast die doppelte Leistung.)

- Es sind die allgemeinen und örtlichen Vorschriften für Warmwasserinstallationen zu beachten.

5.4 Andere Systeme

Wärmepumpen-Wassererwärmer

Der Wärmepumpen-Wassererwärmer (Wärmepumpen-Boiler) ist eine kompakte Einheit, bestehend aus Luft-Wasser-Wärmepumpe und Speicher. Die benötigte Energie aus der Luft kann dem Aufstellungsraum, einem benachbarten Raum oder aus der Abluft usw. entzogen werden. Die Luft wird abgekühlt und entfeuchtet, d.h. der Raum eignet sich

zum Beispiel als Vorrats- oder Trocknungsraum.)

Planungshinweise

- Die Energiebilanz muss sehr gut abgeklärt werden, damit kein Wärmediebstahl aus beheizten Räumen entsteht.
- Sehr gute Wärmedämmung gegen beheizte Räume vorsehen.
- Für Notfälle ist ein zusätzlicher Elektroheizstab vorzusehen.
- Zur Verhinderung von Legionellen sind im ganzen Trinkwassernetz die notwendigen Vorkehrungen zu treffen.
- Kondensatablauf erforderlich

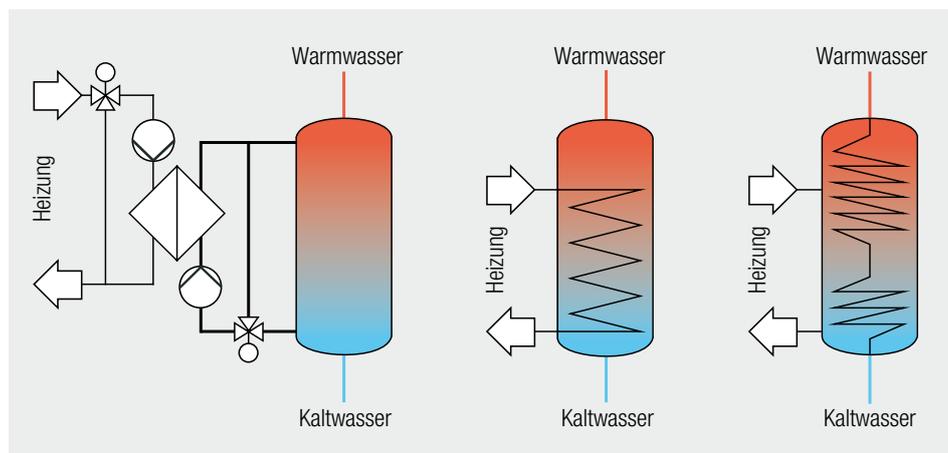


Abbildung 5.9: Indirekte Systeme der Wassererwärmung

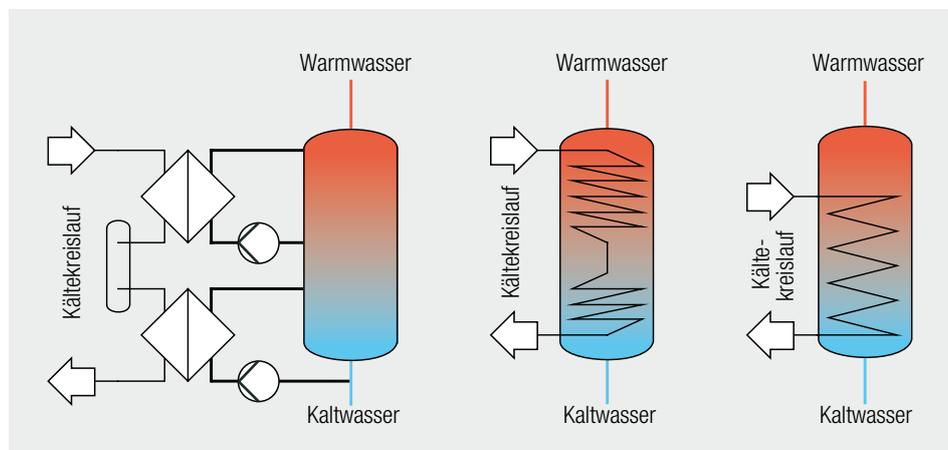


Abbildung 5.10: Direkte Systeme der Wassererwärmung

Schwimmbadwasser-Wärmepumpe

Luft-Wasser-Wärmepumpe für die Beheizung von Aussenschwimmbädern in der warmen Jahreszeit.

Planungshinweise

- Materialwahl bei den Komponenten beachten.
- Aufstellungsort bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (Akustik, Verschmutzung, Grenzabstände) beachten.
- Vorschriften beachten (Bewilligungen)

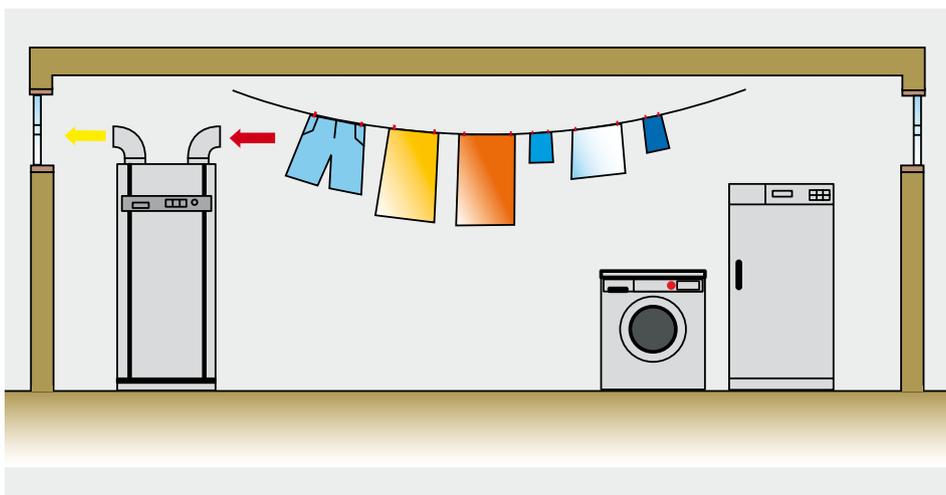
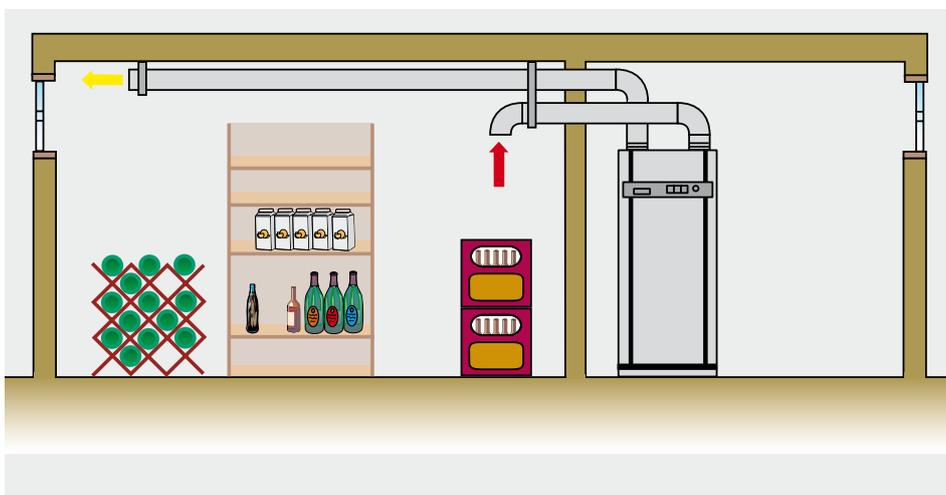


Abbildung 5.11 und 5.12:
Beispiele für die Aufstellung von Wärmepumpen-Wassererwärmer zur Raumkühlung (oben) und zur Raumentfeuchtung (unten)

6.

Einbindung der Wärmepumpe in die Haustechnik

6.1

Grundsatz

Die Wärmepumpe wird an das hydraulische System in die Haustechnik eingebunden. Dabei soll die Schnittstelle so gestaltet werden, dass ein energieeffizienter, ökonomischer und störungsarmer Betrieb gewährleistet wird. Folgende Punkte sind dabei zu beachten:

- Hydraulische Einbindung
- Spülen der Anlage vor dem Anschluss der Wärmepumpe
- Wärmeleistungsabgabe
- Deckungsgrad der Wärmepumpe
- Möglicher Luftvolumenstrom bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Abtauprozess bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Maximale Vorlauftemperatur
- Einsatzgrenzen
- Anpassung an die Teillastfälle
- Die verfügbare Leistung aus der Umwelt
- Die Vorschriften für die Belüftung der Heizzentrale sowie die räumliche Trennung von Kessel und Wärmepumpe ist abhängig von Art und Menge des Kältemittels sowie des Zusatzenergieträgers.
- Schallschutz

6.2

Betriebsarten

Monovalenter Betrieb

Beim **monovalenten Betrieb** stellt die Wärmepumpe in allen möglichen Betriebszuständen die erforderliche Heizleistung zur Verfügung. Die Wärmepumpe muss somit auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes sowie für die maximal notwendige Vorlauftemperatur ausgelegt werden. (Abbildung 6.1)

Bivalent-alternativer Betrieb

Die Wärmepumpe deckt den Wärmeleistungsbedarf bei höheren Aussenlufttemperaturen (über dem Bivalenzpunkt) ab. In der Zeit mit tiefen Aussenlufttemperaturen übernimmt ein alternativer Wärmeerzeuger (Holz-, Gas- oder Ölkessel) die Deckung des Wärmeleistungsbedarfs alleine. Die Wärmepumpe muss auf den Bivalenzpunkt und der zweite Wärmeerzeuger auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes ausgelegt werden. (Abbildung 6.2)

Der **Bivalenzpunkt** ist von verschiedenen Kriterien abhängig:

- Die erforderliche oder mögliche elektrische Anschlussleistung
- Vermeiden des Abtauprozesses
- Maximale Vorlauftemperatur

Platzbedarf Zusatzheizung: Für den Öltank, Heizkessel, Speicher und Kamin ist zusätzlicher Platz notwendig.

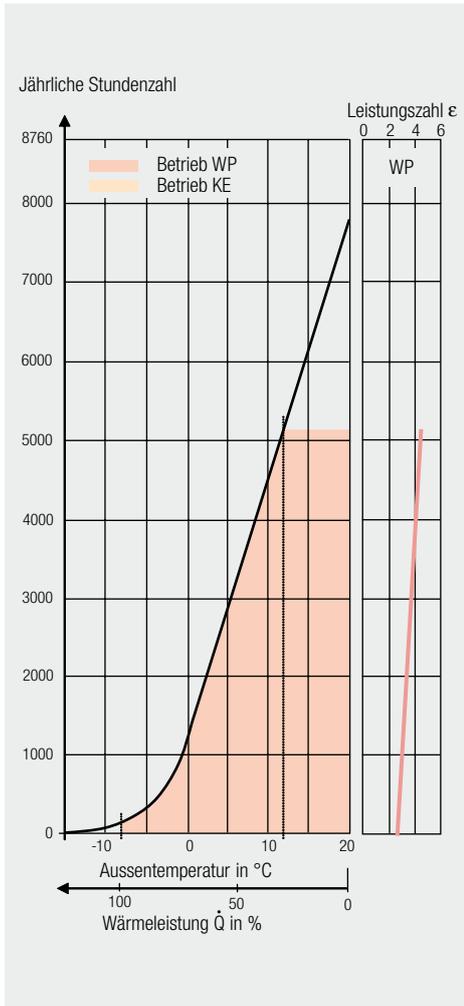


Abbildung 6.1: Monovalenter Betrieb

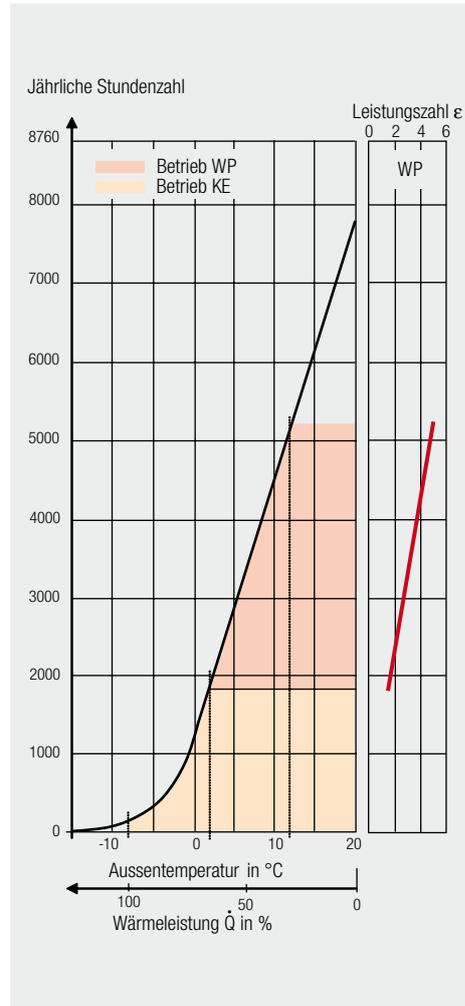
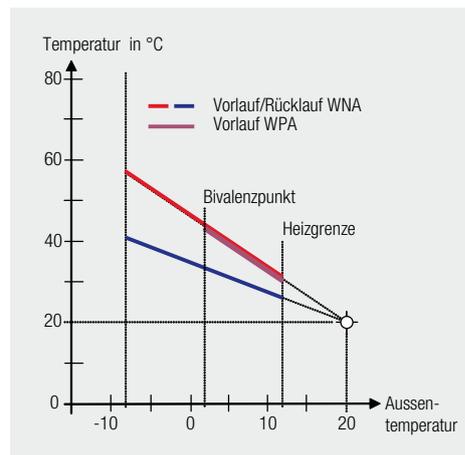
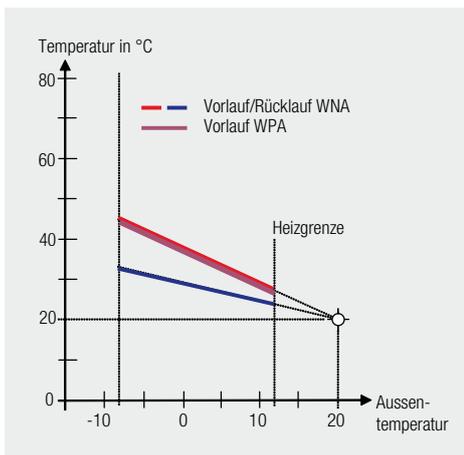


Abbildung 6.2: Bivalent-alternativer Betrieb



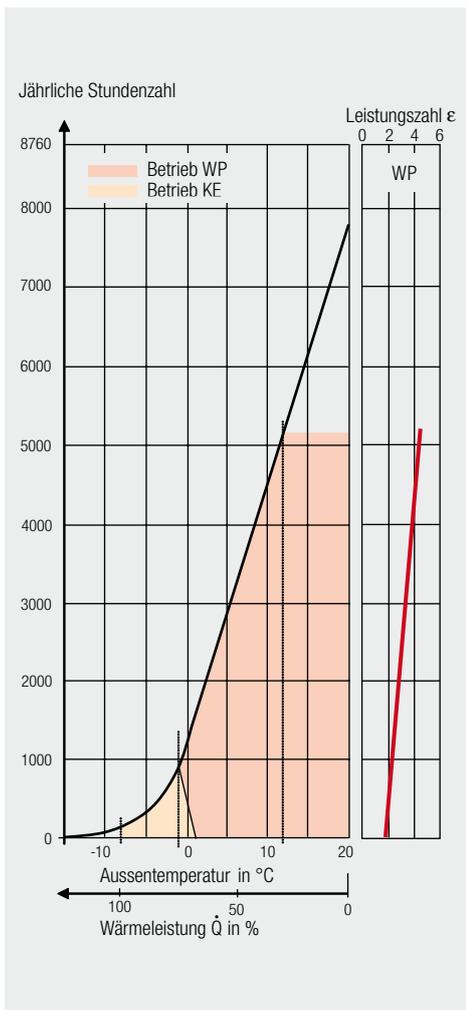
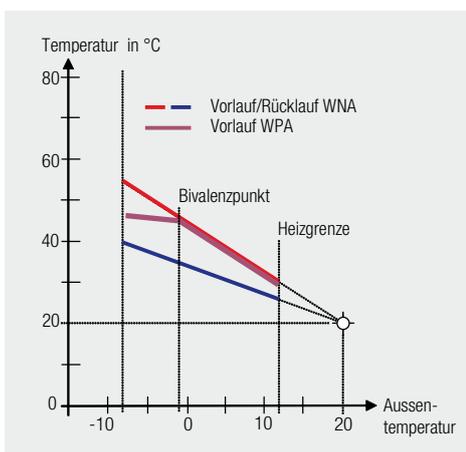


Abbildung 6.3: Bivalent-paralleler oder bivalent-teilparalleler Betrieb



Bivalent-paralleler oder bivalent-teilparalleler Betrieb

Bei der **bivalent-teilparallelen Betriebsweise** arbeiten die Wärmeerzeuger zeitweise gemeinsam. Die Wärmepumpe deckt den Wärmeleistungsbedarf bei höheren Aussentemperaturen (über dem Bivalenzpunkt) ab.

Unterhalb des Bivalenzpunktes, das heisst bei tieferen Aussentemperaturen, wird der zweite Wärmeerzeuger (Holz-, Gas- oder Ölkessel) zugeschaltet. In dieser Phase arbeiten die beiden Wärmeerzeuger im Parallelbetrieb. (Abbildung 6.3)

Bei teilparallelem Betrieb wird die Wärmepumpe ab einer bestimmten Aussentemperatur ganz abgestellt. Dieses gilt vor allem für Luft-Wasser-Wärmepumpen. Der zweite Wärmeerzeuger (Kessel) muss nur bei teilparallelem Betrieb somit auf die Auslegeleistung ausgelegt werden.

Monoenergetischer Betrieb

Da die maximale Leistung einer Kleinanlage nur während relativ kurzer Zeit zur Verfügung stehen muss, wird für Einfamilienhäuser gelegentlich eine Luft-Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer elektrischen Zusatzheizung zur Spitzenlastdeckung gewählt. Dabei ist aber die Wärmepumpe immer in Betrieb. Monoenergetischer Betrieb ist ein Parallel-Betrieb von Wärmepumpe und Elektroheizeinsatz. (Abbildung 6.4)

Planungshinweise

- Ein Speicher ist nur erforderlich, wenn wenig oder keine Wärmespeicherkapazität im Gebäude verfügbar ist (zum Beispiel Heizkörperheizung mit wenig Wasserinhalt).

Der **Bivalenzpunkt** bei einer Sole-Wasser oder Wasser-Wasser-Wärmepumpe wird nur indirekt durch die Aussenlufttemperatur bestimmt. Die Festlegung des Bivalenzpunktes ist von verschiedenen Kriterien abhängig:

- Erforderliche oder mögliche elektrische Anschlussleistung
- Die verfügbare Leistung aus der Umwelt
- Die notwendige Vorlauftemperatur
- Der Anteil des Elektroheizeinsatzes sollte möglichst gering gehalten werden.

6.3 Hydraulik

Temperaturdifferenz und Volumenstrom über den Wärmeübertragern

Die Temperaturdifferenz über Wärmeübertragern bestimmt die Fördermenge, die Förderhöhe und den Stromverbrauch der zugeordneten Umwälzpumpen oder Ventilatoren.

Wärmeabgabesysteme werden je nach erforderlicher Heizmitteltemperatur zwischen maximal 50/40°C bei Heizkörpern (bei Sanierungen 60°C möglich) und mindestens 25/22°C bei Flächenheizungen ausgelegt.

Die immer häufiger eingesetzten selbstregelnden Bodenheizungen haben keine Thermostatventile und benötigen daher keine hydraulische Entkopplung.

Hydraulische Entkopplung: Durch die Reduktion der Gebäudelast, zum Beispiel bei höheren Aussenlufttemperaturen, verringert sich der Verbrauchermassenstrom. Um dem veränderlichen Verbrauch gerecht zu werden, ist bei Wärmepumpen ohne modulierenden Betrieb eine hydraulische Trennung in Form

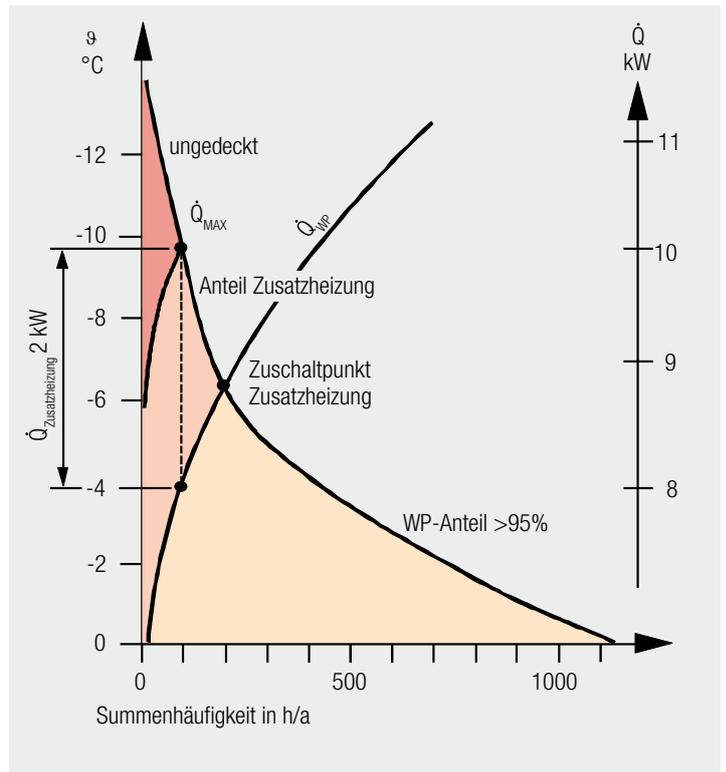


Abbildung 6.4: Mono-energetischer Betrieb einer Luft-Wasser-Wärmepumpe für ein Einfamilienhaus

eines Speichers, Bypass oder eines Überströmventils erforderlich. Wärmepumpen mit modulierendem Betrieb können ohne hydraulische Entkopplung betrieben werden. (Abbildung 6.5)

Wärmespeicher: Mit einem Wärmespeicher können Sperrzeiten des Elektrizitätsversorgungsunternehmens überbrückt werden. Damit kann mit dem Unternehmen ein günstigerer Stromtarif vereinbart werden. Es ist zweckmässig, die Speicher wie folgt zu unterscheiden:

Technischer Speicher zur hydraulischen Trennung und zur Gewährleistung einer maximal zulässigen Schalthäufigkeit.

Energie-Wärmespeicher zur Speicherung von Wärmeenergie zur Spitzenabdeckung und Überbrückung von Sperrzeiten und damit minimalen Vergrößerung des Anlageinhaltes (Speichermasse).

Ladestrategien für Speicher

Stufenladung: Bei einer Stufenladung des Wärmespeichers ist der Massenstrom über den Wärmeerzeuger konstant. Der Wärmeerzeuger kann die Rücklauftemperatur nur um eine bestimmte Temperaturdifferenz anheben. Damit wird die Speichertemperatur bei jedem Durchgang um eine kleine Differenz angehoben.

Dies führt vor allem im ersten Ladezyklus zu besseren Leistungszahlen als bei der Schichtladung. Es stehen damit aber nur variable Vorlauftemperaturen zur Verfügung. (Abbildung 6.6)

Schichtladung: Bei der Schichtladung des Wärmespeichers wird die Wärmeerzeugertemperatur, unabhängig von der Rücklauftemperatur des Verbrauchers, mit einer Laderegulierung auf einen bestimmten Sollwert geregelt. Die Sollwerttemperatur kann auf einen konstanten Wert eingestellt oder gleitend, z. B. nach Aussenlufttemperatur, geregelt werden. Die Schichtladung hat den Vorteil, dass der Speicher mit einer definierten Temperatur geladen wird und somit für den Verbraucher eine definierte Temperatur zur Verfügung steht. (Abbildung 6.7)

Planungshinweise

- Um die Laufzeit der Wärmepumpe zu verlängern, ist eine genügende Speichermasse erforderlich. Diese kann in der Baumasse (Bodenheizung, TABS) oder durch einen Wärmespeicher vorhanden sein.
- Ein technischer Speicher (kleiner Wasserinhalt) wird vor allem als hydraulische Trennung eingesetzt (Beispiel: mehrere Heizgruppen).
- Hydraulische Wärmespeicheranschlüsse sind wenn möglich mit einem

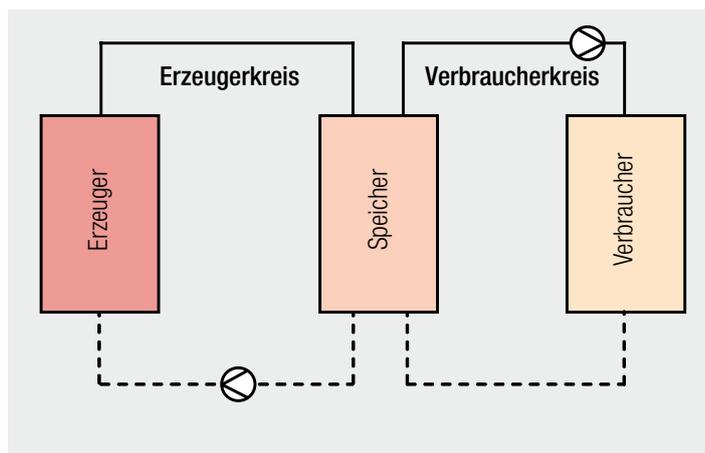


Abbildung 6.5: Der Massenstrom über dem Erzeugerkreis muss immer grösser dimensioniert sein als der Massenstrom über den Verbrauchern:
 $m_{WE} > m_{Verbraucher}$

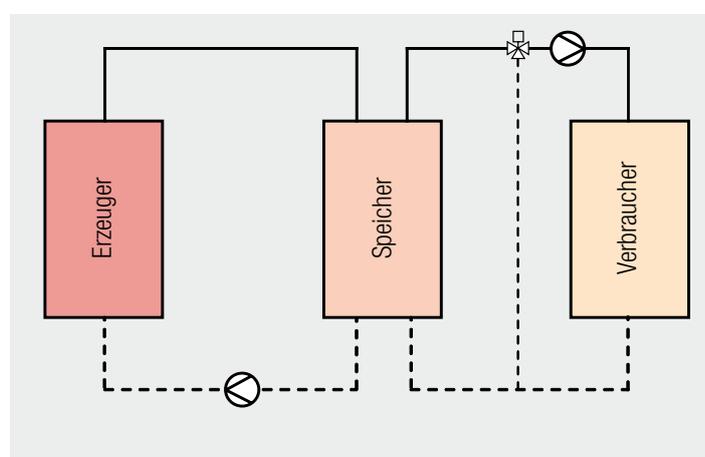


Abbildung 6.6: Hydraulische Schaltung für Stufenladung

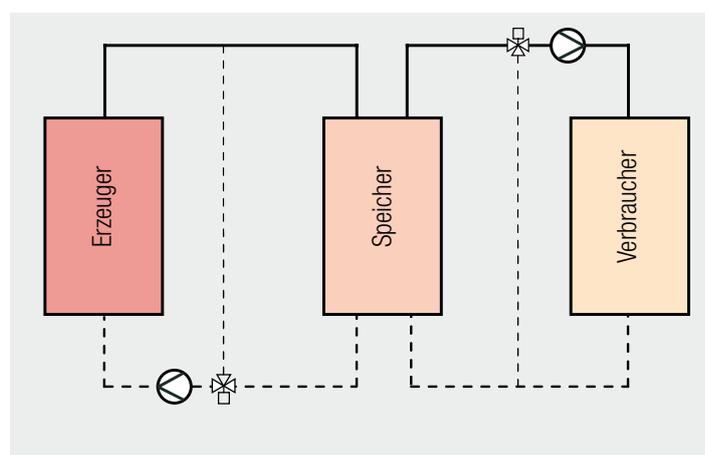


Abbildung 6.7: Hydraulische Schaltung für Schichtladung

Thermosiphon anzuschliessen und zu dämmen.

Hydraulik bei Kühlbetrieb

Direkte Kühlung mit Erdwärmesonden:

Da das Erdreich im Sommer kälter ist als die Umgebungstemperatur, kann damit über eine Wand- oder Fussbodenheizung respektive über ein TABS-System (thermoaktives Bauteilsystem) eine Raumkühlung erzielt werden.

Funktion: In den Solekreislauf wird ein Plattenwärmeübertrager eingebaut. Die Mindestkühltemperatur (Taupunkttemperatur) wird über einen 3-Weg-Mischer geregelt und die Umwälzpumpe über einen Raumtemperaturfühler ein- und ausgeschaltet. Um Schwitzwasserbildung (Taupunktunterschreitung) an den Kühlflächen zu vermeiden, ist eine Vorlauf-temperaturüberwachung erforderlich.

Vorteile

- + Einfacher Aufbau
- + Zusätzliche Regeneration des Erdreiches
- + Geringste Betriebskosten

Nachteile

- Eingeschränkte Kühlleistung (bei Erdwärmesonden)

Richtwerte für Kühlleistungen Wärmerückgabe.

- Aus Erdwärmesonde ca. 30 W/m²: Die Erdwärmesonde muss auf die erforderliche Kühlleistung dimensioniert werden.

Richtwerte für Kälteleistungen Wärmeaufnahme-system.

- Bei Wandheizungen ca. 50 W/m²
- Bei Fussbodenheizung ca. 25 W/m²
- Bei Deckenheizungen (TABS) ca. 30 bis 40 W/m²

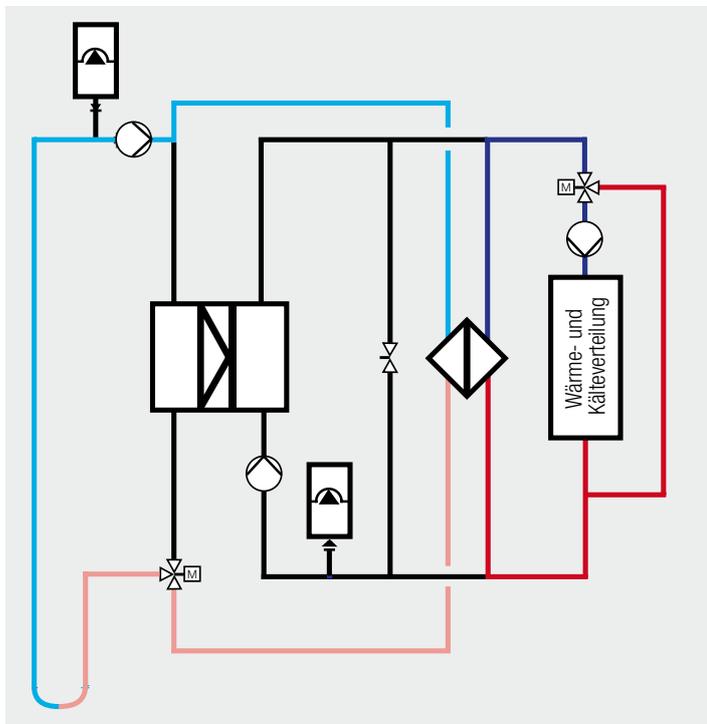
Kühlung durch Prozessumkehr in der Wärmepumpe: Bei Solewärmepumpen ist eine Raumkühlung durch Prozessumkehr möglich.

Funktion: Durch ein 4-Weg-Umschaltventil kann die Wärmepumpe im Sommer als Kühlmaschine betrieben werden. Dazu wird ein Kältespeicher benötigt. Die Mindestkühltemperatur (Taupunkttemperatur) wird über einen 3-Weg-Mischer geregelt und die Umwälzpumpe über einen Raumtemperaturfühler ein- und ausgeschaltet.

Vorteile

- + Geringer Aufwand, da Wärmepumpe vorhanden
- + Grosse Kühlleistung

Abbildung 6.8: Direkte Kühlung mit Erdwärmesonden



- + Zusätzliche Regeneration des Erdreiches

Nachteile

- Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe
- Eine spezielle Wärmepumpenausführung ist erforderlich.

Kühlung durch Prozessumkehr in der Hydraulik

Funktion: Durch Umschalt-Amaturen wird der Heizkreis über den Verdampfer und der Wärmequellenkreis über den Kondensator geführt.

Vorteile

- + Konventionelle Wärmepumpe
- + Geringer Aufwand
- + Grosse Kühlleistung
- + Zusätzliche Regeneration des Erdreiches

Nachteile

- Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe

Planungshinweise: Es werden spezielle Thermostatventile benötigt, die für Heiz- und Kühlbetriebe geeignet sind. Übliche Thermostatventile für Heizungen schliessen bei tiefen Raumtemperaturen.

6.4 Umwälzpumpen

Die Auslegung von Umwälzpumpen wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- Volumenstrom
- Druckverlust
- Auslegungsbetriebspunkt
- Laufzeit

Volumenstrom

Der Volumenstrom wird berechnet mit der Formel:

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}}{\rho \cdot c \cdot (\theta_{VL} - \theta_{RL})}$$

darin bedeuten:

\dot{V} = Volumenstrom in m³/s

\dot{Q} = Wärmeleistung in W (J/s)

ρ = Dichte des Medium in kg/m³

c = Spezifische Wärmekapazität in J/kg K

θ = Mediumtemperatur in °C

Druckverlust

Der Druckverlust in einem Kreislauf wird bestimmt durch die Grösse (Ausdehnung und Länge) des Netzes, dem Umwälzvolumenstrom, den Rohrleitungsdurchmessern und den Einbauten. Es müssen sämtliche Anlagenteile berücksichtigt werden, die im entsprechenden Kreislauf einen Druckverlust verursachen. Die Pumpendiagramme geben vielfach die Förderhöhe der Pumpe an. Mit folgender Formel kann der Druckverlust (Pa) in eine Förderhöhe (m) umgerechnet werden:

$$H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g}$$

H = Förderhöhe in m

Δp = Druckverlust in Pa

ρ = Dichte des Medium in kg/m³

g = Erdbeschleunigung in m/s²

Laufzeit

Umwälzpumpen sollen nur in der Zeit, in der eine Wärmeleistung gefördert werden muss, in Betrieb sein (soweit es die Regelung erlaubt). Jede unnötige Betriebszeit der Umwälzpumpe benötigt elektrische Energie, reduziert die Energieeffizienz und verursacht unnötige Energiekosten.

Die Pumpen können über die Regulierung elektronisch oder über eine Schaltuhr angesteuert werden.

Wenn es die Hydraulik erlaubt, können Umwälzpumpen drehzahlreguliert werden. Damit wird nur der benötigte Massenstrom umgewälzt und Energie sowie Energiekosten eingespart.

7. Akustik und Schallschutz

7.1

Gesetzliche Grenzwerte

Geräuschemissionen in der Nachbarschaft

In der Schweiz regelt die Lärmschutzverordnung (LSV) die Ermittlung und Beurteilung der Aussenlärmmissionen anhand von Belastungsgrenzwerten. Lärmmissionen, verursacht durch Wärmepumpen, werden nach Anhang 6 der LSV beurteilt. Für ortsfeste Neuanlagen oder Ersatz bestehender Anlagen (LSV → Artikel 7) sind die Planungswerte massgebend.

Empfindlichkeitsstufe II (ES II) gilt für Zonen, in denen keine störenden Betriebe zugelassen sind, namentlich in Wohnzonen sowie Zonen für öffentliche Bauten und Anlagen.

Empfindlichkeitsstufe III gilt für Zonen, in denen mässig störende Betriebe zugelassen sind, namentlich in Wohn- und Gewerbezone (LSV → Artikel 43).

Zuständig für die Zuordnung zu den Stufen sind die Gemeinden.

Anforderungen für Räume in denen sich Menschen aufhalten, wie Wohn- und Schlafzimmer, Büros usw.

Die gesetzlichen Schall-Grenzwerte sind einzuhalten. Speziell bei der Aussenanstellung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ist auf die umliegenden Gebäude und deren Schlaf- und Wohnraum-Ausrichtung zu achten.

Durch Kombination von akustischen Messdaten (Pegel) mit empirischen Re-

Tabelle 7.1: Belastungsgrenzwerte für Industrie- und Gewerbelärm (ES: Empfindlichkeitsstufe).

Planungswerte L_p in dB(A)	
	Nacht (19 Uhr bis 7 Uhr)
Wohnzone (ES II)	45
Mischzone (ES III)	50

Beurteilungspegel $L_{r,H}$ in dB(A)	
	Nacht (22 Uhr bis 6 Uhr)
Mindestanforderungen	30
erhöhte Anforderungen	25

Tabelle 7.2: Anforderungen an den Schutz gegen Geräusche von haustechnischen Anlagen in Mehrfamilienhäusern und Bürogebäuden (SIA-Norm 181)

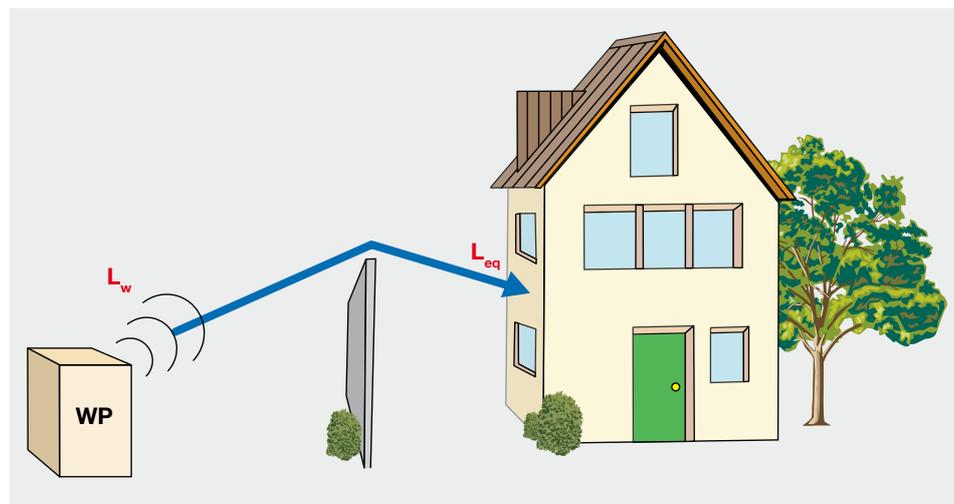


Abbildung 7.1:
 L_w ist der Schalleistungspegel der Schallquelle.
 L_{eq} ist der Mittelungspegel (Schalldruckpegel), im offenen Fenster gemessen.
 L_r ist der Beurteilungspegel unter Berücksichtigung von Pegelkorrekturen.

geln über die Lästigkeit spezifischer Geräusche (Korrekturen) gelingt es, Massstäbe für die Beurteilung von Lärm-situationen zu definieren, welche die Durchschnittsreaktion angemessen beschreiben. Das Ergebnis ist eine Grösse, die Beurteilungspegel L_r genannt wird und in dB angegeben wird.

7.2 Schallminderungs-massnahmen

Bei der Planung von Wärmepumpenanlagen ist eine sorgfältige Beurteilung der Schallemissionen erforderlich. Lärmmin-derungs-massnahmen, die bereits früh im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden, verursachen die geringsten zu-sätzlichen Kosten. Nachträgliche Mass-nahmen erfordern oft einen extrem ho-hen Zusatzaufwand und viele Umtriebe.

Schallemissionen

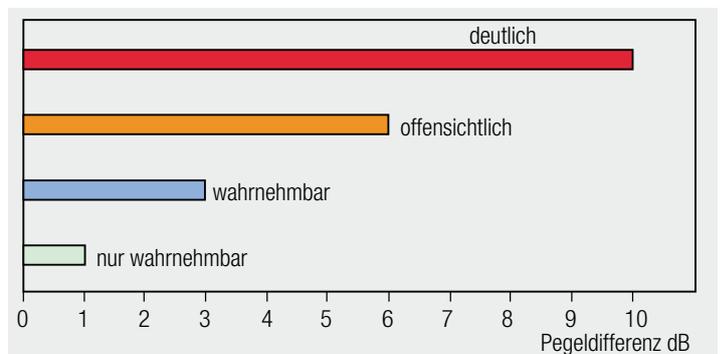
Luftschall: Ein schalldämmendes Ge-häuse der WP oder bei Grossanlagen schalldämmende Abkapselung respek-tive schalldämmende Verkleidung des Raumes sind vorzusehen. Eventuell ist der Einbau von Kulissenschalldämpfern für Luftein- und Luftaustrittsöffnungen zu prüfen.

Körperschall: Durch konsequenten Ein-satz von flexiblen Anschlüssen (Schläu-che, Kompensatoren, elastische Man-schetten, flexible elektrische Anschlüsse) ist Körperschall zu verhindern. Es ist eine Schwingungsminderung der Wär-mepumpe durch Einsatz von Schwin-gungsdämpfern zwischen WP und WP-Sockel oder zwischen WP-Sockel und Betonboden vorzusehen.

Schallpegel	Schallquelle	Schalldruck
170 dB		
	Sturmgewehr	
160 dB		
	Pistole 9 mm	1 000 000 000 μ Pa (1 kPa)
150 dB		
	Bolzensetzgerät	
140 dB		
	Jetprüfstand	100 000 000 μ Pa (100 Pa)
130 dB		
	Schmerzschwelle	
120 dB		
	Bohrjumbo	10 000 000 μ Pa (10 Pa)
110 dB		
	Presslufthammer	
100 dB		
	Diskotheek	1 000 000 μ Pa (1 Pa)
90 dB		
	Montageband	
80 dB		
	Strassenverkehr	100 000 μ Pa (100 mPa)
70 dB		
	Unterhaltung	
60 dB		
	Büro	10 000 μ Pa (10 mPa)
50 dB		
	Wohnzimmer	
40 dB		
	Leseraum	1000 μ Pa (1 mPa)
30 dB		
	Schlafzimmer	
20 dB		
	Radiostudio	100 μ Pa
10 dB		
	Hörschwelle	
0 dB		20 μ Pa

Tabelle 7.3: Typische Werte für den Schalldruck, den das Gehör über einen ausserordentlich grossen Bereich wahrnehmen kann.

Abbildung 7.2: Für die Schallwahrnehmung, respektive die deutlich hörbare Zunahme einer Pegeldifferenz, ist eine Änderung von 8 dB bis 10 dB erforderlich. Die kleinste wahrnehmbare Änderung beträgt ca. 1 dB.



Lärmursachen

Bei Luft-Wasser-Wärmepumpenanlagen wird das in der Nachbarschaft wahrnehmbare Geräusch in den meisten Fällen durch den Ventilator verursacht. Die Luftöffnung, welche direkt am Ventilator angeschlossen ist, strahlt dabei meistens deutlich mehr Schall ab als die Luftöffnung auf der Verdampferseite. Trotz der im allgemeinen wichtigen Bedeutung des Ventilatorlärms dürfen jedoch die anderen Lärmquellen nicht vernachlässigt werden, wie die Schallemission des Kompressors, Strömungsgeräusche, Unwuchterregung, elektrische Geräusche und Umschaltgeräusche beim Abtauen.

Schallverteilung

Auch die sorgfältige Aufstellung der Wärmepumpe ist wichtig. Ein Wäscheabwurfschacht zwischen Schlafräumen und der Waschküche, in der die Wärmepumpe steht, lässt sich kaum ausreichend dämmen.

Auch die Anschlussleitungen (Wärmequelle, Wärmeverteilung sowie Elektrokabel) müssen flexibel sein und vom Baukörper getrennt (schalldämmende Befestigungen) montiert werden.

Lärminderungsmaßnahmen

Alle in der Abbildung 7.3 dargestellten Lärminderungsmaßnahmen sind bei der Planung und Ausführung zu berücksichtigen.

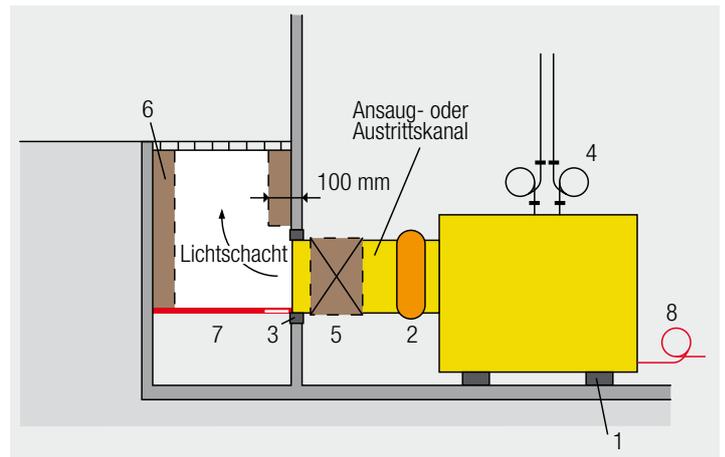


Abbildung 7.3 Lärminderungsmaßnahmen

- 1: Körperschalltrennung zwischen Wärmepumpe und Kellerboden
- 2: Körperschalltrennung zwischen Wärmepumpe und Kanal (Faltenbalg darf nicht gestreckt sein)
- 3: Körperschalltrennung zwischen Luftkanal und Gebäude
- 4: Körperschalltrennung zwischen Wärmepumpe und Heizleitungen
- 5: Absorptionsschalldämpfer in den Luftkanälen für erhöhte Anforderungen
- 6: Absorbierend ausgekleidete Umlenkung
- 7: Tieftonschalldämpfer für erhöhte Anforderungen (Resonanzschalldämpfer)
- 8: Körperschalltrennung zwischen Wärmepumpe und elektrischen Anschlüssen

Quelle: «Schallschutz bei der Aufstellung von Wärmepumpen», Vertrieb FWS

8. Projektierung

8.1 Elektrizitätsversorgung

Bei Wärmepumpen werden grössere Asynchronmotoren im Bereich der Haushaltstromversorgung eingesetzt. Deren Anlauf kann in schwach ausgelegten Netzen zu unzulässigen Spannungseinbrüchen führen. Wärmepumpen sind deshalb bewilligungspflichtig. Da jedes Elektrizitätswerk für sein Netz verantwortlich ist, sind die Anschlussbestimmungen des zuständigen Netzbetreibers frühzeitig in Erfahrung zu bringen.

Anschluss und Bewilligungen

Je nach Energielieferant und verfügbarer Leistung respektive Tarif werden dem Wärmepumpenbetreiber Auflagen gemacht, z.B. Sperrzeiten oder Leistungsbegrenzung von bis zu mehreren Stunden in den Spitzenzeiten, Anlaufstrombegrenzung, Anzahl Einschaltungen pro Stunde etc.

Bei grösseren Anlagen kann es für den Betreiber auch wirtschaftlich sein, die Wärmepumpe mit einer Blindstromkompensation auszurüsten, da etliche Energieversorger bei einem zu tiefen elektrischen Leistungsfaktor (meistens bei einem $\cos\varphi$ unter 0,92) die entsprechende Blindleistung zusätzlich verrechnen respektive die elektrische Zuleitung kleiner und somit günstiger gewählt werden kann.

Tarifinformationen (allenfalls spezieller WP-Tarif) mit Sperrzeitentabellen und

Gesuchsformulare können beim zuständigen Elektrizitätswerk bezogen werden.

Anlaufstrombegrenzung

Die meisten Netzbetreiber verlangen ab einer bestimmten Motorenleistung (meistens ab 3 kW) eine Anlaufstrombegrenzung. Nachfolgend einige Beispiele zur Anlaufstromreduktion:

- Widerstandsanlasser (kleinere Verdichter)
- Softstarter, auch Sanftanlasser genannt (bei den meisten Kleinwärmepumpen serienmässig eingebaut)
- Teilwicklungsanlauf (Standardwicklung bei halbhermetischen Verdichtern ab ca. 3 kW Motorenleistung)
- Stern-Dreieck-Anlauf (bei offenen und sehr grossen halbhermetischen Verdichtern)
- Bei Verbundanlagen (Mehr-Verdichter-Systeme) ist immer ein gestaffelter Anlauf der einzelnen Verdichter zu wählen.

Mit diesen Anlaufarten oder Kombinationen davon sind die Anforderungen der Elektrizitätswerke in der Regel erfüllt. Die Preisunterschiede können vor allem bei grösseren Anlagen erheblich sein, deshalb ist eine frühe Abklärung der örtlichen Bedingungen unerlässlich.

8.2 Heizzentrale

Die Anforderungen an die Heizzentrale bezüglich Standort, Absicherung, Belüftung, etc. können vor allem bei bivalenten und grösseren Anlagen äusserst komplex sein.

Aufstellung und Zugänglichkeit

- Der Aufstellungsraum von Klein-WP mit Heizleistungen unter 20 kW kann meistens wie ein üblicher Heizraum geplant werden. Beim Einsatz von brennbaren Kältemitteln ist das Wärmepumpengehäuse oder der Aufstellungsraum ins Freie zu entlüften.
- Im Falle von Installationen einer Luft-Wasser-Wärmepumpe innerhalb des Hauses ist immer ein Kondensatablauf vorzusehen.
- Nur eine gut zugängliche Installation kann instandgehalten und gewartet werden. Die entsprechenden Herstellerangaben sind unbedingt zu beachten.

Sicherheit

- Der Personenschutz steht an erster Stelle. Heute marktübliche Kältemittel sind teilweise giftig (toxisch) respektive brennbar. Je nach Anlagenkonstellation sind Löschmittel, Einrichtungen und Ausrüstungen für den Personenschutz, Fluchtwege, Brandabschnitte, etc. mit den örtlichen Behörden zu klären sowie in einigen Fällen eine Risikoanalyse zu erstellen.
- Alle Anlagen sind gegen zu hohe Systemdrücke abzusichern. Je nach Anlageart und Anlagegrösse müssen die Abblasleitungen der Sicherheitsventile direkt ins Freie oder einen speziellen Auffangbehälter geführt werden, hierbei gilt es die entspre-

chenden Vorschriften und Richtlinien zu beachten.

- Ob und wie die Belüftung des Aufstellungsraumes der Wärmepumpenanlage in Bezug auf Personen- respektive Umweltgefährdung auszuführen sind, ist in entsprechenden Vorschriften und Richtlinien geregelt. Im Zweifelsfall sind die zuständigen Behörden zu kontaktieren.

Technische Bedingungen

- Dem Schallschutz und im speziellem dem Körperschall ist bei der Planung und der Installation Rechnung zu tragen. Die geografische Lage in Bezug auf lärmkritische Räume (Schlafzimmer, Büro, etc.) und zu benachbarten Liegenschaften ist bereits bei der Gebäudeplanung durch den Architekten respektive den Bauherrn zu berücksichtigen.
- Bei bivalenten Anlagen mit Heizkesseln ist bei der Raumbelüftung zu beachten, dass die Belüftung der Wärmepumpe keinen Einfluss auf die Verbrennungsluftzufuhr der Öl-, Gas- oder Holzheizung hat.

8.3 Wirtschaftlichkeit Allgemeine Hinweise

Die Wirtschaftlichkeit von energietechnischen Anlagen hängt von den üblichen Einflussfaktoren ab: Kapitalkosten (Abschreibung und Verzinsungen der Geräte- und der Installationskosten), Energiekosten (z. B. Strom für Wärmepumpe), Bedienungs- und Wartungskosten. Folgende Grössen sind bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung massgebend:

Investitionskosten: Als Investitionskosten gelten alle Ausgaben, welche für die Realisierung einer Anlage erforderlich sind.

Nutzungsdauer und Betrachtungsperiode: Mit der Nutzungsdauer wird die effektiv zu erwartende Dauer zwischen Inbetriebnahme und dem Ersatz des Anlageteils bezeichnet.

Jährliche Kosten: Die jährlichen Kosten bei Energiesystemen sind (abgesehen von den Kapitalkosten) Energie-, Wartungs-, Bedienungs- und Unterhaltskosten.

Kalkulationszinssatz: Der Kalkulationszinssatz ist die wichtigste Grösse für Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Er soll dem marktüblichen Zinssatz für die Verzinsung des in der Anlage gebundenen Kapitals entsprechen.

Externe Kosten: Für die externen Kosten (auch Umweltkosten oder kalkulatorischer Energiepreiszuschlag KEPZ genannt) sind Werte gemäss den besten im Zeitpunkt der Erstellung der Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Erkenntnissen oder von den Bundesbehörden anerkannten Werte zu wählen.

Vergleich von Wärmepumpen-Angeboten: Beim Angebotsvergleich von Wärmepumpen sind folgende Kriterien zu beachten.

Kosten

- Investitionskosten
- Wartungskosten
- Betriebskosten (siehe Leistungen)

Lieferumfang

- Vollständigkeit
- Schnittstellen (Wahl und Zweckmässigkeit)
- Bauseitige Aufwendungen
- Garantiezeit und Garantiebedingungen

Leistungen

- Jahresarbeitszahl (JAZ) bei definierten Rahmenbedingungen
- Leistungszahl (COP) bei 3 bis 4 verschiedenen Bedingungen, bezogen auf Teil- und Volllastbetrieb
- Heizleistung
- Einsatzgrenzen
- Druckverluste der Wärmeübertrager
- TEWI-Kennwert (Kapitel 3.3)

Qualität

- Serviceorganisation des Lieferanten (365 Tage, 24 Stunden)
- Ersatzteilverfügbarkeit
- Qualitätssicherungssystem
- Referenzen

8.4

Erfolgskontrolle

Allgemeine Hinweise

Um eine Erfolgskontrolle durchzuführen, ist schon bei der Planung der Wärmepumpenanlage ein Messkonzept festzulegen. Nur wer sich zu diesem frühen Zeitpunkt über den Ablauf und die notwendige Instrumentierung im klaren ist, kann später eine einwandfreie Erfolgskontrolle durchführen.

Messkonzept

Das Messkonzept sollte folgende Messeinrichtungen respektive Messstellen beinhalten:

- Elektrozähler für Verdichter

- Betriebsstunden und Impulszähler für Verdichter
- Wärmezähler je Wärmeerzeuger
- Messstutzen (wenn möglich Twinlock-Messnippel), zur Erfassung der Ein- und Austrittstemperaturen im Verdampfer- und Verflüssigerkreis

Bei grösseren und komplexen Anlagen zusätzlich:

- Temperaturen an jedem Wärmeübertrager Ein- und Austritt
- Raumlufttemperatur
- Aussentemperatur
- Leistungsstellung der Verdichter
- Betriebsstundenzähler für Pumpen, Lüfter, Zusatzheizungen, etc.
- Wärmezähler je Wärmequelle
- Ventilstellungen

Datenerfassung

Die Datenerfassung kann manuell oder automatisch erfolgen. Bei der manuellen Datenerfassung – vorzugsweise für kleinere, einfache Anlagen – ist ein entsprechendes Messprotokoll zu erstellen. Die Daten sollten während der Messperiode möglichst immer zur selben Zeit erfasst werden. Je nach Betriebs- und Lastphasen sind die Daten von mehrmals täglich bis einmal monatlich zu erfassen. Bei grösseren oder komplexen Anlagen ist die Datenerfassung nur mit Hilfe einer Intensivmessung mit dichten Aufzeichnungsintervallen sinnvoll. Damit können die dynamischen Zusammenhänge und Funktionsabläufe erfasst werden. Ist ein Gebäudeleitsystem vorhanden, kann die Aufzeichnung der Daten über dieses System erfolgen. Im anderen Fall sind die Daten mit einer portablen Einrichtung (z.B. Datenlogger) zu erfassen.

9.

Inbetriebsetzung

Nach der Ausführungsphase folgt die Vorbereitung und Durchführung der Inbetriebsetzung. Anschliessend folgen die Abnahme und der Betrieb. Bei der Abnahme wird kontrolliert, ob und wie die Anlage mit dem Werkvertrag und mit den Fachregeln übereinstimmt. Nach der Inbetriebsetzung wird jeweils empfohlen, nach 2 bis 3 Monaten Betrieb die Einstellungen unter Last nochmals zu überprüfen und den Betrieb entsprechend zu optimieren.

9.1

Phase vor der Inbetriebsetzung

Montagekontrolle

Am Ende der Ausführungsphase, vor der Füllung des Hydraulik-Systems mit Medien, ist eine genaue Montagekontrolle der installierten Anlage erforderlich. Dabei ist zu prüfen, ob die Installation mit den spezifizierten Vorgaben übereinstimmt und die Anlagekomponenten richtig montiert wurden. Es ist darauf zu achten, dass alle Apparate und Anlagenteile mit Bezeichnungsschildern mit entsprechenden Positionsnummern in Übereinstimmung mit dem Anlageschema und anderen Dokumenten montiert sind.

Kontrolle der Mess- und Regeleinrichtungen

Bereits bei der Planung der Anlage ist zu überlegen, welche Messgrössen für Inbetriebsetzung, Abnahme, Betriebsoptimierung und Betrieb der Anlage erfasst

werden müssen. Nachträgliche Installation der Tauchhülsen und der Messinstrumente ist in der Regel aufwendig. Die Montagekontrolle bietet die letzte Gelegenheit, um entsprechende Korrekturmassnahmen ohne grossen Mehraufwand einzuleiten. Vor dem Füllen der Anlage mit der Wärmeträgerflüssigkeit sollen deshalb die Messeinrichtungen und die Stellglieder, welche im Hydraulikkreislauf eingebaut sind, besonderer Kontrolle unterzogen werden. Für die zuverlässige Messgrössenerfassung ist die richtige Position und korrekte Montage der Einrichtungen wichtig.

9.2

Vorbereitung der Inbetriebsetzung

Vor der Inbetriebsetzung muss die Installationsphase inklusive Elektro- und MSR-Installationen abgeschlossen sein. Damit die Inbetriebsetzung effizient durchgeführt werden kann, sind vorgängig die folgenden Vorbereitungen zu treffen:

- Programm der Inbetriebsetzung erstellen, Termine mit den Beteiligten festlegen; die Verfügbarkeit der Medien und Räumlichkeiten sicherstellen.
- Die folgenden Dokumente sind auf der Anlage zur Verfügung zu stellen:
 - Prinzipschema der Installation
 - Technisches Datenblatt mit Angaben der Einstellparameter, der Sollwerte und Regelkurven. Diese müssen,

sofern festgelegt, mit den Vertragswerten übereinstimmen.

- Schema der Stromspeisung, der elektrischen Steuerung und Regelung (Regelschema)
- Leistungszusammenstellung für Elektromotoren
- Funktionsbeschreibungen
- Datenlisten für Massenströme, Druckdifferenzen, Netztemperaturen, usw.
- Installationspläne
- Für die Inbetriebsetzung muss mindestens ein Entwurfsexemplar der Bedienungsanleitung für alle Anlagen bzw. Anlagenteile zur Verfügung stehen, damit während der Inbetriebsetzung allfällige Korrekturen und Ergänzungen eingebracht werden können.

9.3

Wärmequelle und Wärmeabgabe

Vor der eigentlichen Inbetriebnahme der Wärmepumpe müssen die Wärmequelle und die Wärmeabgabe kontrolliert und entsprechend vorbereitet werden.

- Installation auf Vollständigkeit prüfen
- Wassersysteme gespült, gefüllt und gründlich entlüftet (die Druckprobe wird während der Installationsarbeiten, vor der Anbringung der Dämmung, durchgeführt)
- Volumenströme überprüft, hydraulischer Abgleich vorgenommen
- Konzentration der Frostschutzfüllung prüfen (falls vorhanden)
- Tauchhülsen mit Kontaktflüssigkeit füllen
- Bei Pumpen- und Ventilatormotoren und anderen Antrieben (ausgenommen der Verdichtermotor) die Drehrichtungskontrolle durchführen.

- Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen muss das System auf der Wärmequellenseite überprüft werden.

9.4

Inbetriebsetzung der Wärmepumpe

Es ist vorgängig sicherzustellen, dass vor der Inbetriebsetzung alle zugehörigen Anlagenteile wie Verbraucherkreis, Rückkühlung etc. betriebsbereit sind, die Versorgung mit Elektrizität funktioniert und genügend Last vorhanden ist.

Die Inbetriebsetzung erfolgt in der Regel unter der Leitung des Haustechnikplaners. Dieser kennt die Funktionsweise der elektrischen, der hydraulischen bzw. der lufttechnischen Seite der Anlage. Er wird entsprechend durch den Spezialisten der Regelfirma, durch den Elektriker sowie durch die Inbetriebsetzungsspezialisten der Komponentenlieferanten unterstützt. Die Vorgehensweise kann wie folgt aussehen:

- Sichtkontrolle, Installationskontrolle
- Elektroanschlüsse bei allen Apparaten kontrollieren, die elektrischen Verbindungen anhand von Elektroschema überprüfen.
- Thermorelais (Wärmepakete) auf korrekte Einstellung gemäss Typenschilder der Motoren prüfen, Einstellungen der elektrischen Schutzeinrichtungen kontrollieren.
- Verdichter vom Netz elektrisch trennen
- Hauptschalter einschalten
- Ölheizungen (Carter- bzw. Ölabscheiderheizung) falls vorhanden einschalten
- Sicherheitsfunktionen soweit möglich kontrollieren und überprüfen.
- Verdichter-Drehrichtung kontrollieren. Diese darf nur durch den Fach-

mann der Lieferfirma durchgeführt werden.

- Funktionskontrolle von Steuerung und Regelung durchführen, gespeicherte Werte auf Richtigkeit kontrollieren.
- Alle Regel- und Steuerverbindungen einem Funktionstest unterziehen
- Regelparameter (P-Bereich, Nachstellzeit, Vorhaltezeit), Heizkurven, Sollwerte usw. auf die berechneten bzw. empfohlenen Werte einstellen

9.5 Inbetriebsetzungsprotokoll

Am Ende der Inbetriebsetzung sind die diversen Parameter wie Sollwerte, Regelkurven und Sicherheiten gemäss den im Vertrag definierten Werten (sofern festgelegt) einzustellen. Allfällige Abweichungen und Mängel sind entsprechend festzuhalten.

Alle wichtigen Einstellparameter sind im Inbetriebsetzungsprotokoll zu dokumentieren (siehe auch Punkt 9.2).

Abweichungen bzw. Änderungen sind in den Dokumenten von Hand einzutragen.

9.6 Bedienungsanleitung

Während der Inbetriebsetzung werden in der Regel kleine Änderungen und Korrekturen an der Anlage vorgenommen. Vor allem Anpassungen im Elektroschema müssen in der definitiven Version nachgetragen werden. Der Entwurf der Bedienungsanleitung (siehe auch Kapitel 9.2) muss entsprechend bereinigt werden.

Die Bedienungsanleitung beschreibt die Funktion und Regelung der einzelnen

Anlagenteile. Diese soll verständlich und übersichtlich aufgebaut sein. Nachfolgend einige Punkte, welche bei der Anfertigung der Bedienungsanleitung zu beachten sind:

- Adressen und Telefonnummern der zuständigen Servicestellen
- Einheitliche Bezeichnungen, Symbole nach den gültigen Normen verwenden
- Übereinstimmung mit der Beschriftung auf der Anlage
- Keine fremdsprachigen Unterlagen verwenden
- Gültiges Elektroschema mit den eingetragenen Änderungen aus der Inbetriebsetzungsphase
- Beizulegen ist das Inbetriebsetzungsprotokoll mit den wichtigen Angaben wie z. B.:
 - Ablesungen der Anlagedaten während des Anlagebetriebes
 - Sämtliche Einstellwerte, welche durch den Betreiber geändert werden können
 - Allfällige Grenzwerte
- Massnahmen bei Betriebsstörungen
- Verzeichnis der Aufgaben, welche das Betriebspersonal erledigen muss
- Leeres Protokoll mit der Liste der Ablese-Daten
- Wartungsbuch (Wärmepumpe)

9.7 Abnahmeprotokoll

Nach dem Abschluss der Inbetriebsetzungsarbeiten erfolgt eine Kontrolle der Anlage unter Einbezug der Beteiligten. Ziel dieser Kontrolle ist ein allseitig unterzeichnetes Protokoll, welches die Ab-

nahme der Anlage bestätigt und allfällige Vorbehalte festhält. Bei der Abnahme ist durch den Planer ein Abnahme-Protokoll auszufüllen und von den Parteien zu unterschreiben. Dieses enthält:

- Die vertraglich festgelegten Daten
- Checkliste über den Lieferumfang und Qualität der Ausführung
- Die effektiven Anlagedaten
- Allfällige Mängel

Mit der Abnahme übernimmt die Bauherrschaft die Verantwortung über die Anlage und die Garantiefrist beginnt zu laufen.

10. Betrieb

10.1 Betrieb und Erfolgskontrolle

Die auf der Anlage installierten Messgeräte sollen eine Kontrolle der Betriebsparameter ermöglichen. Die Inbetriebsetzung wird im Normalfall bei bestimmten Randbedingungen durchgeführt. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Anlage bei veränderten Bedingungen entsprechend auf die Funktionalität und Energieeffizienz zu kontrollieren. Dies gilt nicht nur für die Phase direkt nach der Inbetriebsetzung – allfällige Veränderungen an der Anlage sollen nicht unentdeckt bleiben.

10.2 Betriebsüberwachung

Das Betriebspersonal soll regelmässige Betriebskontrollen durchführen. In regelmässigen Abständen sind Ablesungen der Anlagedaten im Betriebsprotokoll festzuhalten. Dieses dient als nützliches Instrument für die Überprüfung der Leistungszahl (COP) sowie als Grundlage für die Durchführung von Wartungsarbeiten. Das wichtigste Beurteilungskriterium für die Erfolgskontrolle einer Wärmepumpenanlage stellt die Jahresarbeitszahl (JAZ) und der Jahresnutzungsgrad (JNG) für WP und Zusatzheizung dar. Dies kann allerdings nur dann eruiert werden, wenn die entsprechenden Messdaten über den Energieverbrauch der Wärmepumpe inklusive Hilfsaggre-

gate sowie die gelieferte Heizenergie vorliegen.

10.3 Instandhaltung Allgemein

Für einen sicheren und störungsfreien Betrieb der Wärmepumpenanlage ist eine periodische Instandhaltung zu prüfen. Diese kann umgesetzt werden durch:

- Instandhaltungsvereinbarung oder
- Garantieverlängerung (mit den entsprechenden Serviceleistungen)

Es ist zu beachten, dass für die Wartung der Anlagenteile, bei denen man mit dem Kältemittel in Berührung kommt, das Personal eine «Fachbewilligung für den Umgang mit Kältemitteln» benötigt.

Wartungsheft

Bei allen Geräten und Anlagen mit mehr als 3 kg Kältemitteln, unabhängig von der Art des Kältemittels, muss ein Wartungsheft geführt werden.

Dichtigkeitskontrolle

Eine regelmässige Dichtigkeitskontrolle muss bei allen Geräten und Anlagen mit mehr als 3 kg Ozonschicht abbauenden oder in der Luft stabilen Kältemitteln durchgeführt werden (siehe auch Wegleitung «Stationäre Geräte und Anlagen mit Kältemitteln, Wartungsheft, Dichtigkeitskontrolle, Meldepflicht»).

Für dauerhaft geschlossene Kompaktanlagen gelten längere Fristen.

10.4 Betriebsoptimierung

Nach der Abnahme muss man weiterhin der Anlage entsprechende Aufmerksamkeit schenken. Eine Anlage, welche optimal betrieben wird, hat in der Regel keine Störungen und braucht dazu noch weniger Energie. Bei der Inbetriebsetzung wird oft ein Betriebszustand einreguliert und einige Einstellungen (z.B. Heizkurve) nur nach Erfahrungswerten vorgenommen. Erst während des Betriebes können die Einstellungen der Anlage optimiert werden. Mit der Betriebs-

optimierung können Kosten gespart und die Umwelt geschont werden.

Massnahmenkatalog: Siehe «Grundlagen für die Betriebsoptimierung von komplexen Haustechnikanlagen». Massnahmen pro Fachgebiet/Nr. 4 – Wärmepumpen.

10.5 Störungen und Störungsbehebung

Jede Wärmepumpe muss gegen unerwünschte Zustände entsprechend abgesichert werden. Die wichtigsten Ursachen von Störungen sind in Abbildung 10.1 dargestellt.

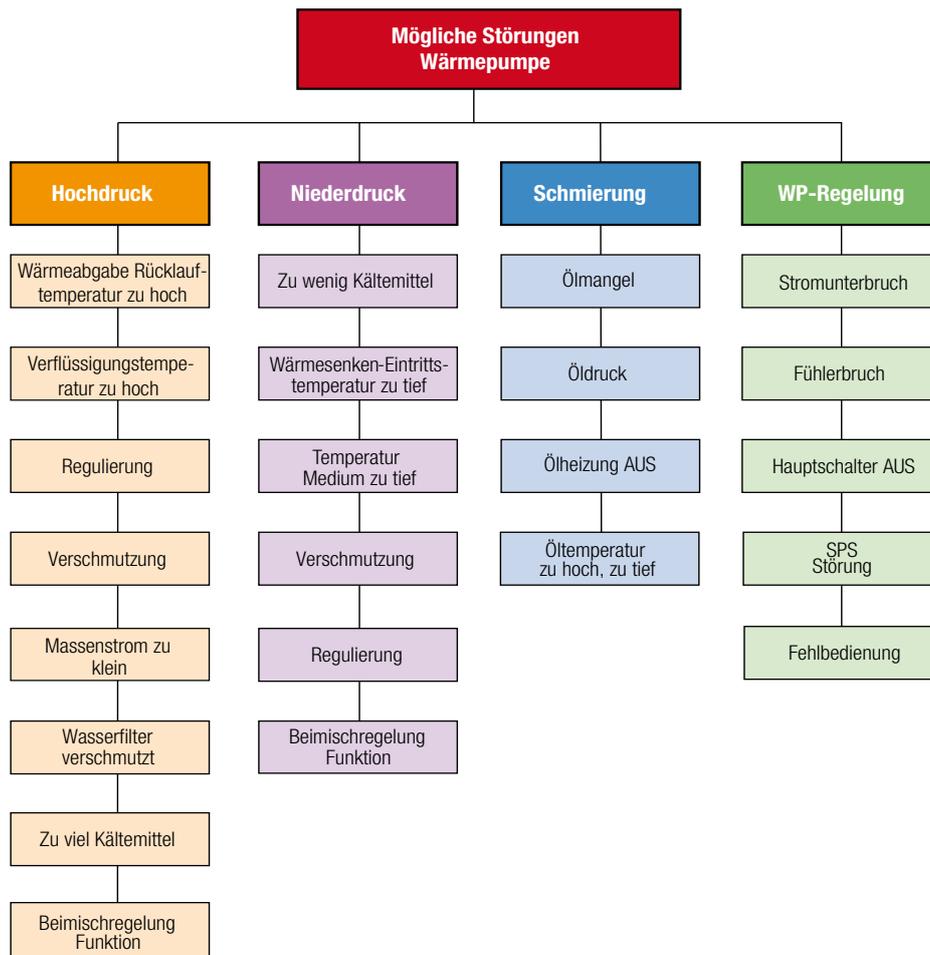


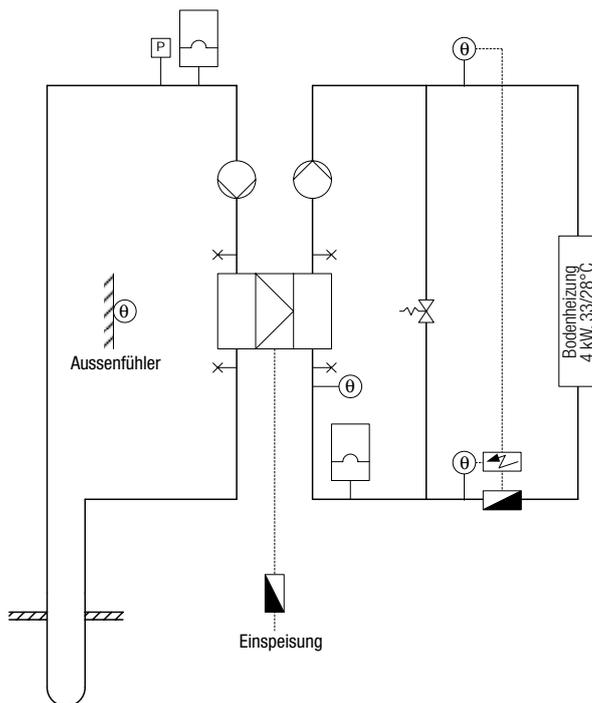
Abbildung 10.1: Mögliche Störungen und Störungsursachen bei Wärmepumpenanlagen

11.

Fallbeispiele

11.1 Erdwärmesonden- Wärmepumpenanlage (Einfamilienhaus)	68	11.7 Bivalente Abwasser- Wärmepumpenanlage	74
11.2 Erdwärmesonden- Wärmepumpenanlage (Bürogebäude)	69	11.8 Abwärmenutzung zur Trinkwassererwärmung	75
11.3 Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage	70	11.9 Wärme- und Kälteerzeugung	76
11.4 Grundwasser-Wärmepumpenanlage mit Ölheizkessel	71	11.10 Wärmepumpen-Kompaktgerät mit Heiz- und Kühlbetrieb	77
11.5 Abwasser-Wärmenutzung zur Trinkwassererwärmung	72	11.11 Wärmepumpen-Kompaktgerät	78
11.6 Luft-Wasser-Wärme- pumpenanlage mit Stückholzkessel	73		

11.1: Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage



Objekt: Einfamilienhaus

Systemwahl: Das Einfamilienhaus wird mit einer Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage beheizt. Die Wärmeabgabe erfolgt über eine Bodenheizung. Das Gebäude wird zudem mit einer kontrollierten Wohnungslüftung ausgerüstet.

Besonders zu beachten

- Die Zufahrt zur Bohrstelle und der Standort der Bohrstelle
- Die Dimensionierung der Erdwärmesonden

Berechnung TEWI

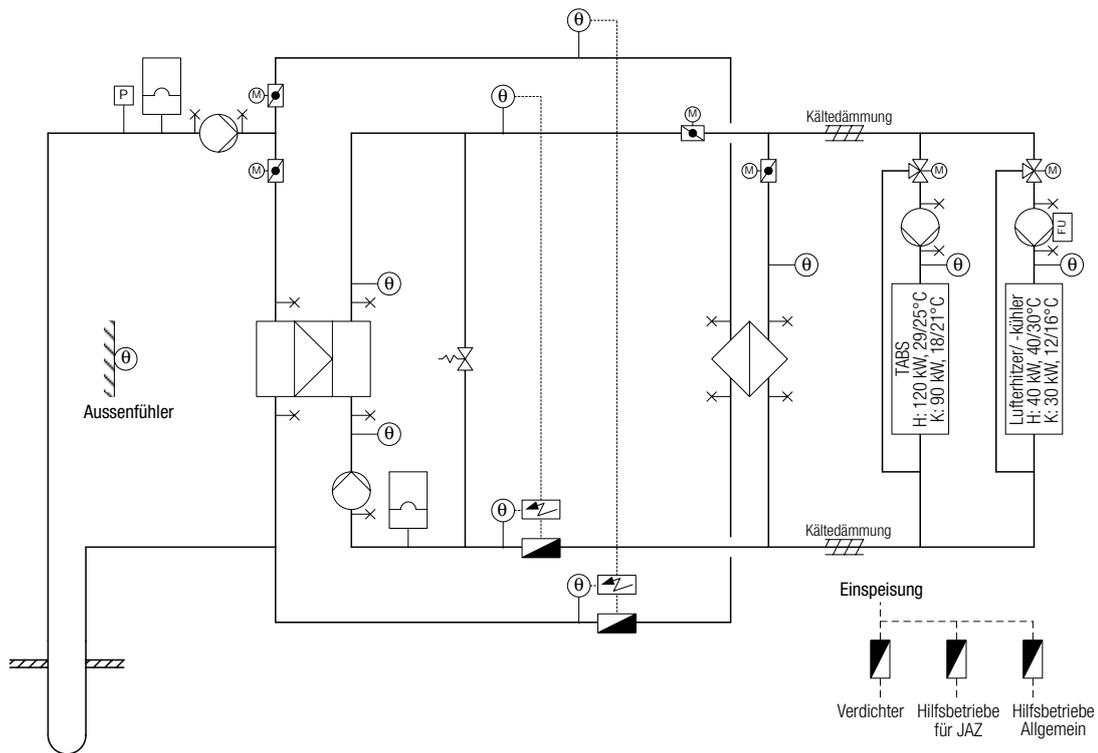
Sole-Wasser-Wärmepumpe, Nennleistung: 5,90 kW (B0/W35), Kältemittel: R-410a:

- | | |
|---|---|
| ■ GWP: 1720 CO ₂ -Äquivalent/kg _{KM} | ■ Rückgewinnungsgrad: 0,8 (im gesamten Recyclingablauf) |
| ■ Leckage pro Jahr: 0,05 kg _{KM} /a (hermetische Systeme 2 % bis 3 %, lösbare Systeme 4 % bis 6 % der Füllmenge) | ■ Energiebedarf: 2340 kWh _{el} (1,3 kW x 1800 h/a) |
| ■ Betriebszeit der Anlage : 20 Jahre | ■ Spezifische CO ₂ -Emission: 0,15 CO ₂ -Äquivalent/kWh _{el} |
| ■ Anlagenfüllmasse: 1,7 kg _{KM} | |

$$\text{TEWI} = (1720 \times 0,05 \times 20) + (1720 \times 1,7 \times (1,0 - 0,8)) + (20 \times 2340 \times 0,15) = 9\,325 \text{ CO}_2\text{-Äquivalent}$$

Der TEWI könnte erheblich reduziert werden, wenn die Wärmepumpe mit Ökostrom betrieben würde, der vollständig aus erneuerbaren Energiequellen stammt.

11.2: Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage



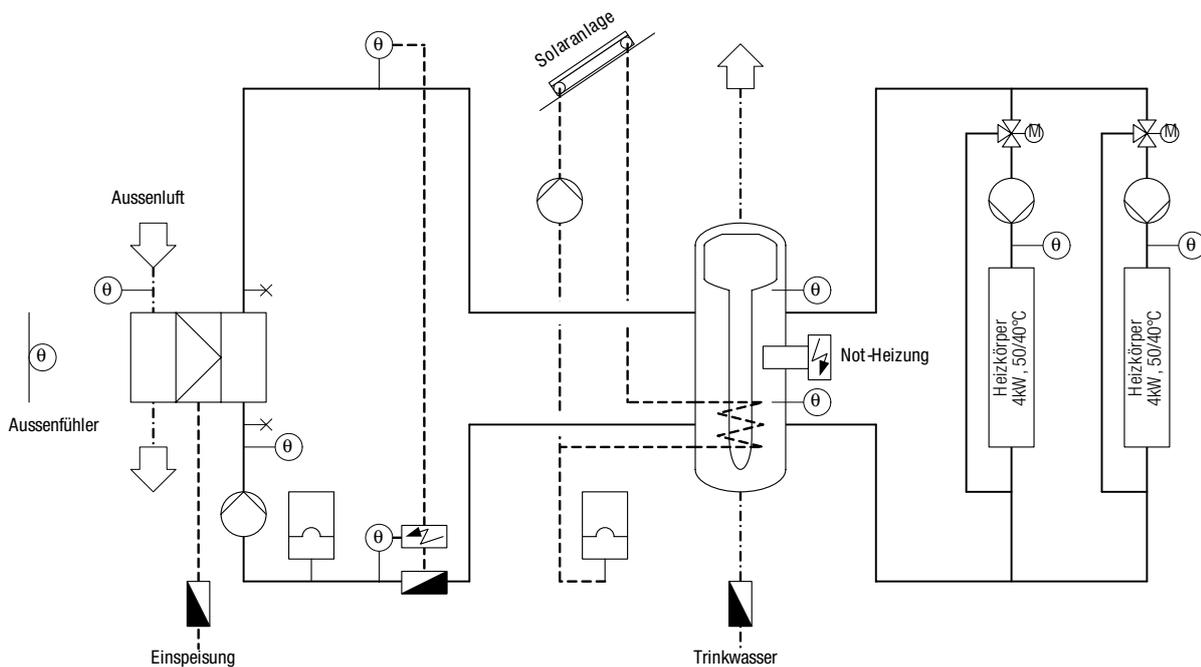
Objekt: Bürogebäude

Systemwahl: Der Heizwärmebedarf wird über eine Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage gedeckt. Die Wärmeabgabe erfolgt über ein thermoaktives Bauteilsystem (TABS). Über das gleiche System wird das Bürogebäude gekühlt. Die Gebäudekühlung erfolgt im Free-Cooling-Betrieb über die Erdwärmesonden.

Besonders zu beachten

- Der Energieverbrauch Heizung/Kühlung ist separat zu erfassen
- Die Dimensionierung des Lufterhitzers und des Lufterhitzers
- Das Kältenetz ist dampfdicht zu dämmen um Schwitzwasser zu vermeiden
- Die Zufahrt zur Bohrstelle und der Standort der Bohrstelle
- Die Erdwärmesonden sind bezüglich Kühl- und Heizfall zu dimensionieren
- Für Heiz- und Kühlbetrieb umschaltbare Thermostatventile verwenden

11.3: Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage



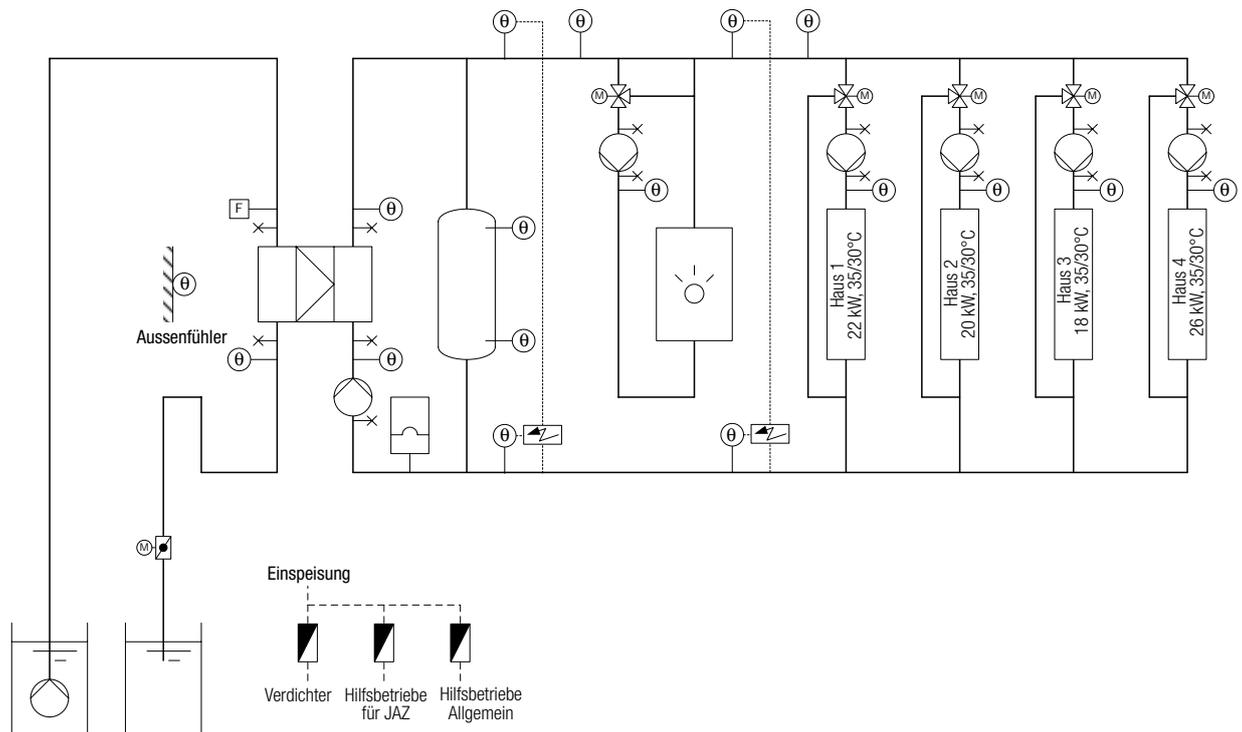
Objekt: Doppel-Einfamilienhaus

Systemwahl: Das Doppel-Einfamilienhaus wird mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage kombiniert mit einer Solaranlage beheizt. Die von der Wärmepumpe produzierte Heizenergie wird über einen Energiespeicher an die Wärmeverteilung abgegeben. Das Trinkwasser wird im Energiespeicher erwärmt. Jedes Einfamilienhaus wird mit einer eigenen Heizgruppe betrieben. Die Wärmeabgabe erfolgt über Heizkörper.

Besonders zu beachten

- Die Problematik des Trinkwarmwasser-Zirkulationssystems bezüglich einer guten Speicherschichtung
- Die beschränkte kurzfristige Trinkwarmwasserbezugsmenge
- Das Modell der Heizkostenabrechnung

11.4: Grundwasser-Wärmepumpenanlage mit Ölheizkessel



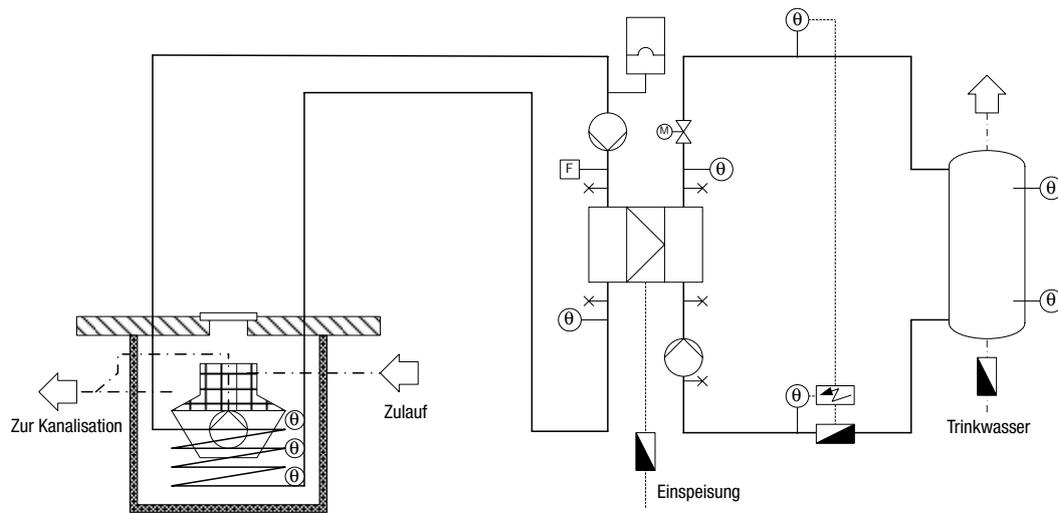
Objekt: Wohnüberbauung

Systemwahl: Die Wohnüberbauung besteht aus 4 Mehrfamilienhäusern mit je 6 Wohnungen. Da sich das Grundstück in der Grundwasserzone befindet, soll für die Wärmeerzeugung eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe eingesetzt werden. Zur Spitzenlastdeckung, (Bivalent-parallel-Betrieb), wird ein Ölheizkessel eingesetzt. Die Wärmeabgabe erfolgt über Bodenheizungen.

Besonders zu beachten

- Die notwendige Zeit für das Bewilligungsverfahren
- Die Qualität des Grundwassers bezüglich der physikalischen und chemischen Parameter sowie der Feststoffe etc.
- Die Auslegung Grundwasserumwälzpumpe

11.5: Abwasser-Wärmenutzung zur Trinkwassererwärmung



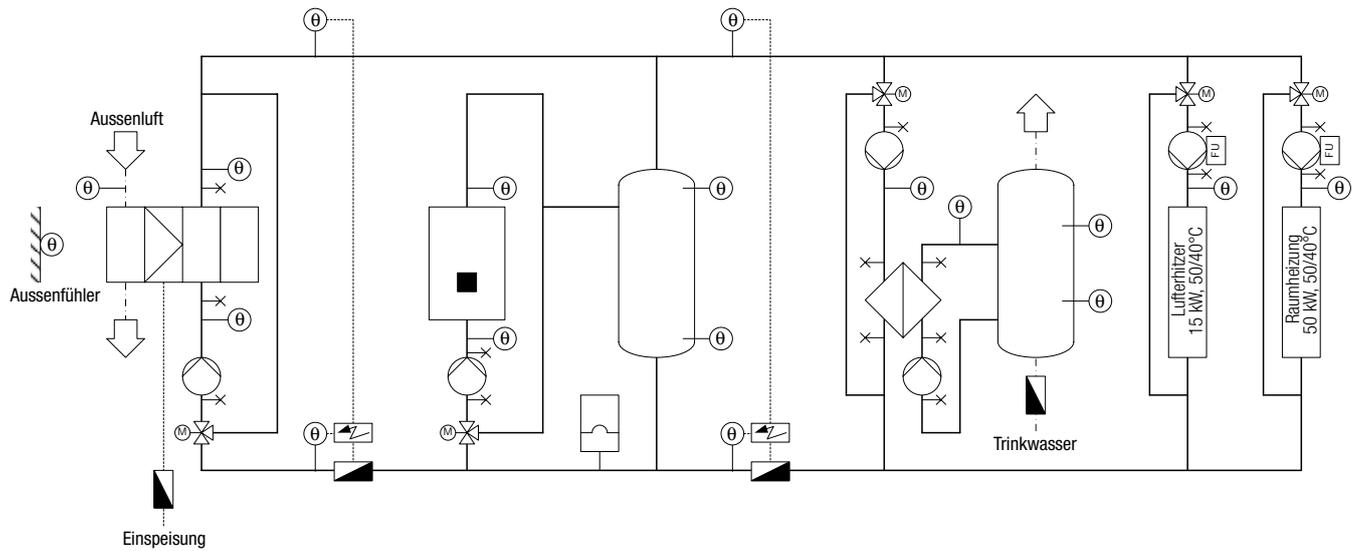
Objekt: Altersheim

Systemwahl: Die Trinkwassererwärmung erfolgt primär mit einer Wärmepumpenanlage und einer Abwasser-Wärmerückgewinnung. Der Abwasserschacht mit dem Wärmeübertrager und den Pumpen befindet sich unterflur ausserhalb des Gebäudes.

Besonders zu beachten

- Die Abwassermengen und die Abwasserqualität
- Die zeitliche Verteilung des Abwasseranfalls und des Trinkwarmwasserbedarfs
- Die Frostsicherheit aller Anlagenteile, die ausserhalb der Gebäudehülle liegen
- Die Zugänglichkeit für Reinigungs- und Servicearbeiten

11.6: Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage mit Stückholzkessel



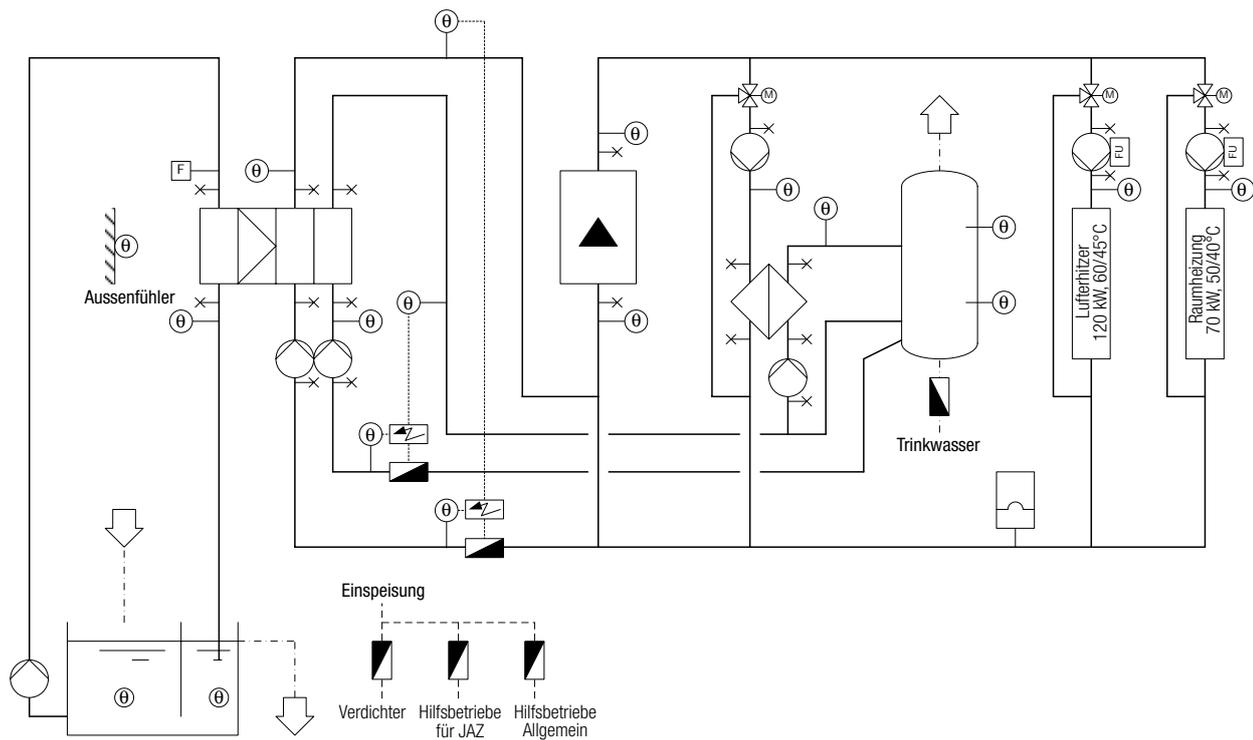
Objekt: Landwirtschaftliche Schule

Systemwahl: Die Landwirtschaftliche Schule soll mit erneuerbarer Energie beheizt werden. Da die Schule über einen eigenen Wald verfügt, soll der Heizwärmebedarf über eine Stückholzfeuerung gedeckt werden. Für die Übergangszeit ist zusätzlich eine Luft-Wasser-Wärmepumpe für bivalent-alternativen Betrieb vorgesehen.

Besonders zu beachten

- Die hydraulische Trennung der Wärmeerzeuger und der Speicheranlage
- Die Schall- und übrigen Emissionen

11.7: Bivalente Abwasser-Wärmepumpenanlage



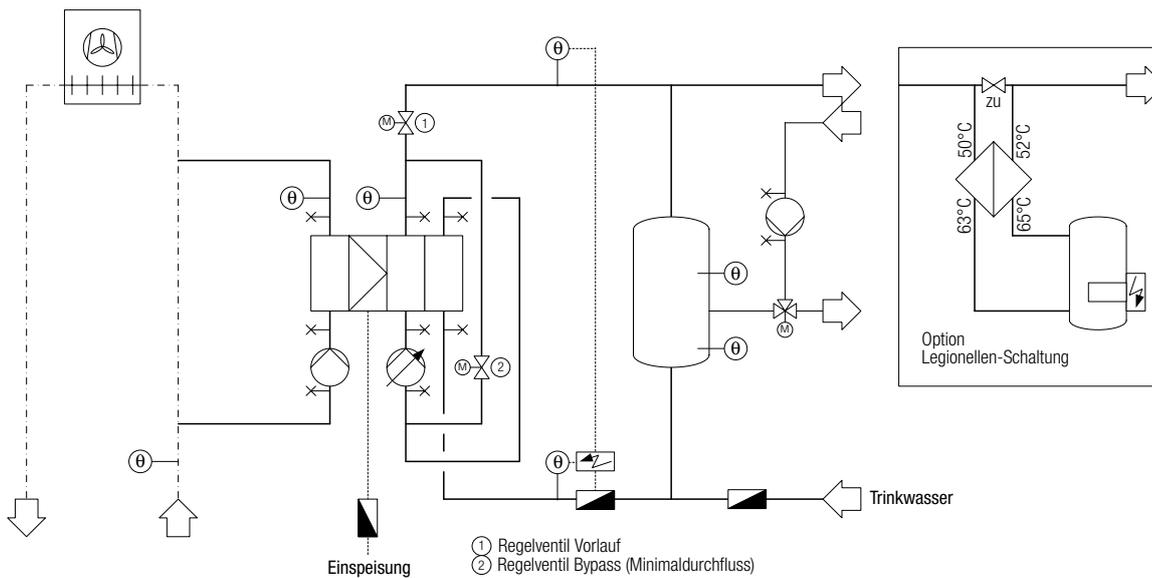
Objekt: Textilfärberei, Altbau

Systemwahl: Als Wärmequelle wird Prozessabwasser (keine Fäkalien) genutzt. Da das Prozessabwasser nur während den Produktionszeiten anfällt, wurde eine bivalente Lösung mit einem Gaskessel gewählt. Mit einem Unterkühler wird erreicht, dass die Leistungszahl der Wärmepumpe angehoben wird.

Besonders zu beachten

- Die Qualität des Abwassers bezüglich der physikalischen und chemischen Parameter und eventueller Feststoffe
- Die zeitliche Verteilung des Abwasseranfalls und des Heizwärmebedarfs
- Die Grösse und die Aufteilung der Abwasserbecken
- Die Zugänglichkeit für Reinigungs- und Servicearbeiten
- Die Wahl des Heizkesseltyps für die vorgesehene hydraulische Schaltung mit variablem Durchfluss für den Heizkessel

11.8: Abwärmenutzung zur Trinkwassererwärmung



Objekt: Supermarkt

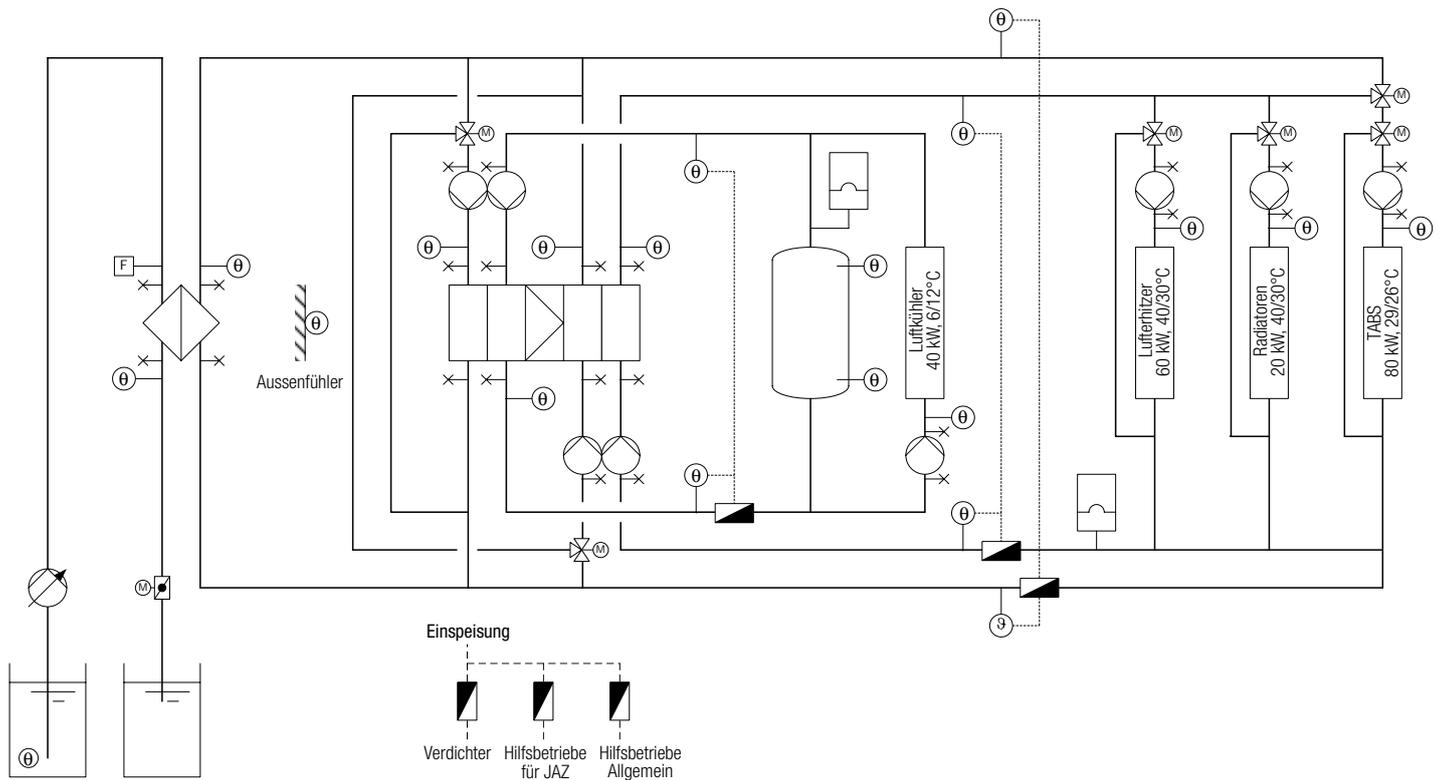
Systemwahl: Zur Trinkwassererwärmung wird die Abwärme der gewerblichen Kälteanlagen genutzt. Mit einem variablen Volumenstrom über den Kondensator und Unterkühler der Wärmepumpe kann die Eintrittstemperatur in den Unterkühler tief gehalten werden.

Optional kann, als Legionellenschutz, in der Trinkwarmwasserleitung oder in der Zirkulationsleitung eine thermische Desinfektionsanlage eingebaut werden. Mit dieser Anlage wird das Trinkwarmwasser permanent desinfiziert.

Besonders zu beachten

- Der minimal notwendige Trinkwarmwasser-Volumenstrom über den Kondensator und den Unterkühler der Wärmepumpe
- Die variable Temperatur auf der Wärmequellenseite

11.9: Wärme- und Kälteerzeugung



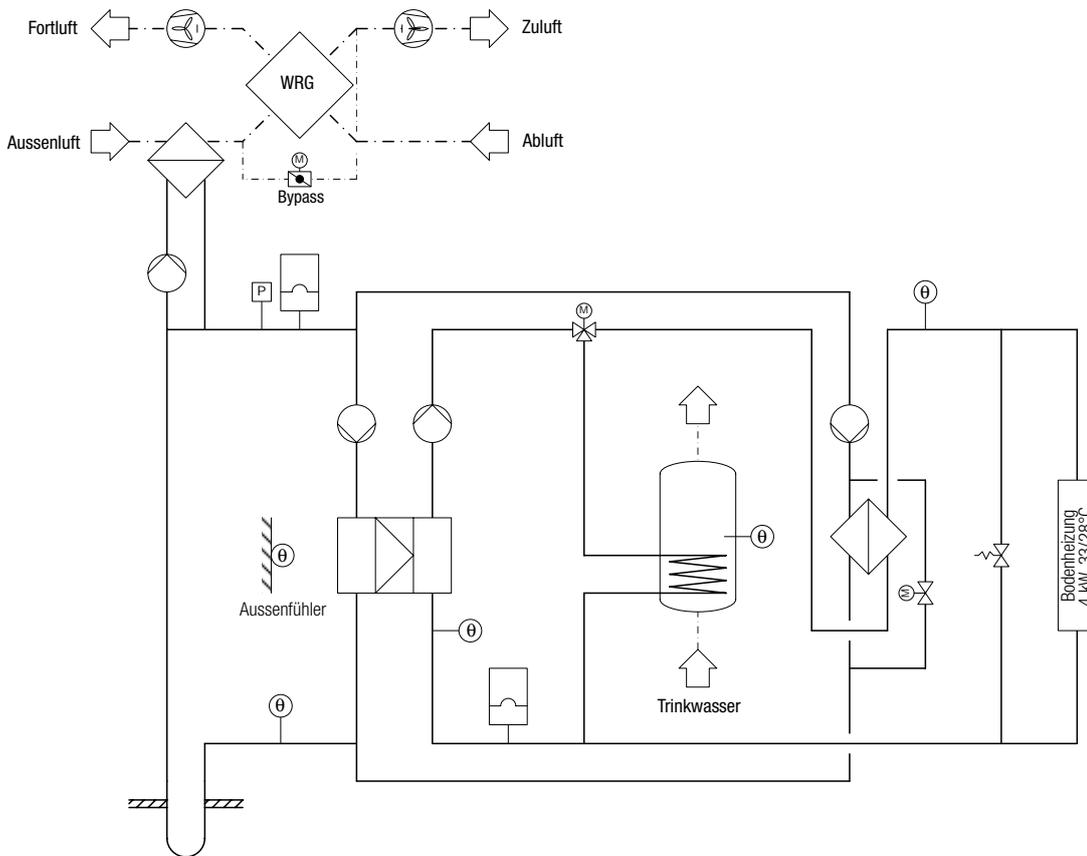
Objekt: Museum

Systemwahl: Als Wärmequelle und zur Abführung von überschüssiger Wärme, einer Wärme- und Kälteerzeugung, dient Grundwasser. Mit der Anlage sind verschiedene Betriebsarten parallel gewährleistet (technische Kälte, Klimakälte über TABS, technische Wärme, Heizwärme)

Besonders zu beachten

- Die notwendige Zeit für das Bewilligungsverfahren
- Die Qualität des Grundwassers bezüglich der physikalischen und chemischen Parameter sowie der Feststoffe etc.
- Die Auslegung Grundwasserumwälzpumpe
- Alle möglichen Betriebszustände der hydraulischen Schaltung
- Die Schnittstellen

11.10: Wärmepumpen-Kompaktgerät mit Heiz- und Kühlbetrieb



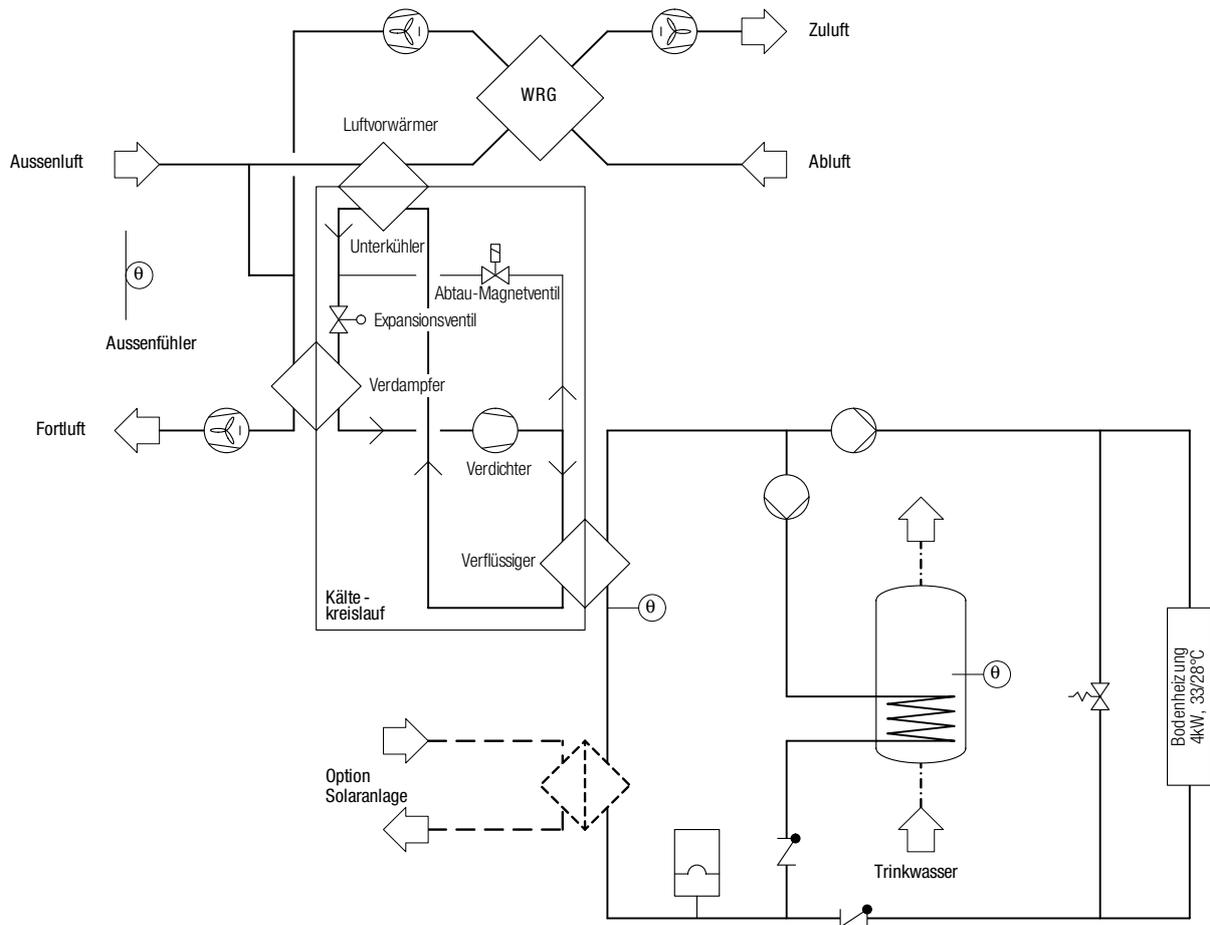
Objekt: Wohnobjekt

Systemwahl: Mit einem Wärmepumpen-Kompaktgerät mit Luft-Wärmerückgewinnung und Erdwärmesondenanschluss wird die Wärme für die Bodenheizungen und für die Trinkwassererwärmung erzeugt. Bei Kühlbedarf ist eine freie Kühlung über die Lüftungsanlage und die Bodenheizung möglich. Die abzuführende Wärme wird dann den Erdwärmesonden zugeführt. Die Einbindung einer Solaranlage ist ebenfalls möglich.

Besonders zu beachten

- Die zulässigen System-Temperaturen im Kühlbetrieb, damit keine Kondensatprobleme auftreten können
- Die Herstellerangaben des Kompaktgerätes
- Die Zufahrt zur Bohrstelle und der Standort der Bohrstelle

11.11: Wärmepumpen-Kompaktgerät



Objekt: Wohnobjekt

Systemwahl: Mit einem Wärmepumpen-Kompaktgerät mit Luft-Wärmerückgewinnung und Erdwärmesondenanschluss wird die Wärme für die Bodenheizungen und für die Trinkwassererwärmung erzeugt. Luftseitig sind verschiedene Betriebsarten möglich. Dabei wird der Fortluftvolumenstrom je nach Bedarf variiert. Die Einbindung einer Solaranlage ist ebenfalls möglich.

Besonders zu beachten

- Die Herstellerangaben des Kompaktgerätes
- Der Aussenluft-/Fortluftvolumenstrom über die WP muss der Wärmepumpenleistung angepasst sein, damit möglichst auf eine Zusatzheizung verzichtet werden kann.

Autoren

Peter Kunz, Kunz-Beratungen, Dietlikon (Gesamtkoordination)

Prof. Dr. Thomas Afjei, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz

Prof. Werner Betschart, Hochschule Luzern – Technik und Architektur, Horw

Peter Hubacher, Hubacher Engineering, Engelburg

Rolf Löhner, Scheco AG, Winterthur

Andreas Müller, Müller + Pletscher AG, Winterthur

Vladimir Prochaska, Hochschule Luzern – Technik und Architektur, Horw

Projektbegleitung

Fabrice Rognon, Bereichsleiter Wärmepumpen, WKK, Kälte, Bundesamt für Energie BFE

Daniel Brunner, Bereichsleiter Aus- und Weiterbildung, Bundesamt für Energie BFE

Angebote des Faktor Verlags

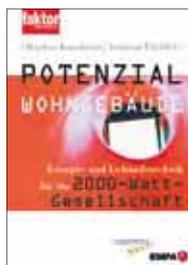
Einzelhefte



Bücher



■ Wohnungslüftung



■ Potenzial Wohngebäude



■ Minergie-P



■ Faktor Skript
Komfortlüftung

■ Faktor Verlag AG ■ Postfach ■ 8050 Zürich ■ Tel. 044 316 10 60 ■ Fax 044 316 10 61 ■ info@faktor.ch ■ www.faktor.ch



Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen, Postadresse: CH-3003 Bern
Telefon 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00
contact@bfe.admin.ch, www.bfe.admin.ch