

# Wärmepumpen

Planung, Bau und Betrieb von  
Elektrowärmepumpenanlagen

RAVEL im Wärmesektor  
Heft 3



Impulsprogramm RAVEL  
Bundesamt für Konjunkturfragen

«RAVEL im Wärmesektor» in 5 Heften

Gesamtleitung: Hans Rudolf Gabathuler

Energieeffiziente Techniken werden in nächster Zukunft stark an Bedeutung gewinnen. Über dieses Thema ist heute erst wenig in Lehrbüchern zu finden. In drei RAVEL-Kursen – «Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung», «Wärmepumpen» sowie «Wärmekraftkopplung» – können sich deshalb Planerinnen und Planer auf diesem zukunftssträchtigen Gebiet weiterbilden. Die dazu erscheinende Publikationsreihe «RAVEL im Wärmesektor» besteht aus fünf Heften. Diese können bei der Eidgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern, bezogen werden.

Heft 1: Elektrizität und Wärme – Grundlagen und Zusammenhänge (Best.-Nr. 724.357d)

Heft 2: Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung (Best.-Nr. 724.355d)

Heft 3: Wärmepumpen (Best.-Nr. 724.356d)

Heft 4: Wärmekraftkopplung (Best.-Nr. 724.358d)

Heft 5: Standardschaltungen (Best.-Nr. 724.359d)

Autoren

Thomas Baumgartner, Ingenieurbüro für Hautechnik,  
Bettlistrasse 35, 8600 Dübendorf  
Hans Rudolf Gabathuler, Gabathuler AG,  
Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen  
Hans Mayer, Gabathuler AG, Kirchgasse 23,  
8253 Diessenhofen  
Gyula Szokody, Hoval Herzog AG,  
General-Wille-Strasse 201, 8706 Feldmeilen

Redaktion und Gestaltung

Hans Rudolf Gabathuler, Gabathuler AG,  
Kirchgasse 23, 8253 Diessenhofen

Grafik

Monika Ehrat, 8240 Thayngen

Druckkoordination

APUI, Hochfeldstrasse 113, 3000 Bern 26

Trägerorganisationen

INFEL Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung,  
Lagerstrasse 1, 8021 Zürich

SSIV Schweizerischer Spenglermeister- und  
Installateur-Verband, Auf der Mauer 11,  
8023 Zürich



Wichtige Merkmale



Hinweise innerhalb der Reihe «RAVEL  
im Wärmesektor» (siehe oben)



Weiterführende Literatur



Softwarehinweise



Berechnungsbeispiele



Benennungen, Formelzeichen und  
Abkürzungen auf Seite 59

## INDEX

Index auf Seite 60/61

Copyright © Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern,  
Juni 1993. Auszugsweiser Nachdruck unter  
Quellenangabe erlaubt. Zu beziehen bei der Eidgenössischen  
Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern. (Best.-Nr. 724.356d)

Form. 724.356d 6.93 2000 U11757

Das Aktionsprogramm «Bau und Energie» ist auf 6 Jahre befristet (1990-1995) und setzt sich aus den drei Impulsprogrammen (IP) zusammen:

- BAU – Erhaltung und Erneuerung
- RAVEL – Rationelle Verwendung von Elektrizität
- PACER – Erneuerbare Energien

Mit den Impulsprogrammen, die in enger Kooperation von Wirtschaft, Schulen und Bund durchgeführt werden, soll der qualitative Wertschöpfungsprozess unterstützt werden. Dieser ist gekennzeichnet durch geringeren Aufwand an nicht erneuerbaren Rohstoffen und Energie sowie abnehmende Umweltbelastung, dafür gesteigerten Einsatz von Fähigkeitskapital.

Im Zentrum der Aktivität von RAVEL steht die Verbesserung der fachlichen Kompetenz, Strom rationell zu verwenden. Neben den bisher im Vordergrund stehenden Produktions- und Sicherheitsaspekten soll verstärkt die wirkungsgradorientierte Sicht treten. Aufgrund einer Verbrauchsmatrix hat RAVEL die zu behandelnden Themen breit abgesteckt. Neben den Stromanwendungen in Gebäuden kommen auch Prozesse in der Industrie, im Gewerbe und im Dienstleistungsbereich zum Zuge. Entsprechend vielfältig sind die angesprochenen Zielgruppen: Sie umfassen Fachleute auf allen Ausbildungsstufen wie auch Entscheidungsträger, die über stromrelevante Abläufe und Investitionen zu befinden haben.

Kurse, Veranstaltungen, Publikationen, Videos

Umgesetzt werden sollen die Ziele von RAVEL durch Untersuchungsprojekte zur Verbreiterung der Wissensbasis und – darauf aufbauend – Aus- und Weiterbildung sowie Informationen. Die Wissensvermittlung ist auf die Verwendung in der täglichen Praxis ausgerichtet. Sie baut hauptsächlich auf Publikationen, Kursen und Veranstaltungen auf. Es ist vorgesehen, jährlich eine RAVEL-Tagung durchzuführen, an der jeweils – zu einem Leitthema – umfassend über neue Ergebnisse, Entwicklungen und Tendenzen in der jungen faszinierenden Disziplin der rationellen Verwendung von Elektrizität informiert und diskutiert wird. Interessenten können sich über das breitgefächerte, zielgruppenorientierte Weiterbildungsangebot in der Zeitschrift IMPULS informieren. Sie erscheint zwei- bis dreimal jährlich und ist (im Abonnement) beim Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, gratis erhältlich. Jedem Kurs- oder Veranstaltungsteilnehmer wird jeweils eine Dokumentation abgegeben. Diese besteht zur Hauptsache aus der für den entsprechenden Anlass erarbeiteten Fachpublikation. Die Publikationen können auch un-

abhängig von Kursbesuchen bei der Eidgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 3000 Bern, bezogen werden.

Zuständigkeiten

Um das ambitionöse Bildungsprogramm bewältigen zu können, wurde ein Organisations- und Bearbeitungskonzept gewählt, das neben der kompetenten Bearbeitung durch Spezialisten auch die Beachtung der Schnittstellen im Bereich der Stromanwendung sowie die erforderliche Abstützung bei Verbänden und Schulen der beteiligten Branchen sicherstellt. Eine aus Vertretern der interessierten Verbände, Schulen und Organisationen bestehende Kommission legt die Inhalte des Programmes fest und stellt die Koordination mit den übrigen Aktivitäten, die den rationellen Einsatz der Elektrizität anstreben, sicher. Branchenorganisationen übernehmen die Durchführung der Weiterbildungs- und Informationsangebote. Für deren Vorbereitung ist das Programmleitungsteam (Dr. Roland Walthert, Werner Böhi, Dr. Eric Bush, Jean-Marc Chuard, Hans Rudolf Gabathuler, Jürg Nipkow, Ruedi Spalinger, Dr. Daniel Spreng, Felix Walter, Dr. Charles Weinmann sowie Eric Mosimann, BfK) verantwortlich. Die Sachbearbeitung wird im Rahmen von Ressorts durch Projektgruppen erbracht, die inhaltlich, zeitlich und kostenmässig definierte Einzelaufgaben (Untersuchungs- und Umsetzungsprojekte) zu lösen haben.

Dokumentation

Nach einer Vernehmlassung und dem Anwendungstest in einem Pilotkurs ist die vorliegende Dokumentation sorgfältig überarbeitet worden. Dennoch hatten die Autoren freie Hand, unterschiedliche Ansichten über einzelne Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen und zu berücksichtigen. Sie tragen denn auch die Verantwortung für die Texte. Unzulänglichkeiten, die sich bei der praktischen Anwendung ergeben, können bei einer allfälligen Überarbeitung behoben werden. Anregungen nehmen das Bundesamt für Konjunkturfragen und der Redaktor (siehe Seite 2) entgegen. Für die wertvolle Mitarbeit zum Gelingen der vorliegenden Publikation sei an dieser Stelle allen Beteiligten bestens gedankt.

Juni 1993

Dr. H. Kneubühler  
Stv. Direktor des Bundesamtes  
für Konjunkturfragen

# Inhaltsverzeichnis

1.	Wärmepumpentechnik.....	5	3.	Auslegung.....	29
1.1.	RAVEL und die Wärmepumpentechnik .....	5	3.1.	Standardschaltungen .....	29
	Wie funktioniert eine Wärmepumpe? .....	5	3.2.	Drei Formeln .....	29
	Was hat die Wärmepumpentechnik mit RAVEL zu tun? .....	5	3.3.	Fehlervermeidung .....	30
	Abgrenzung.....	5	3.4.	Speicher .....	35
1.2.	Definitionen .....	7		Hydraulische Entkopplung .....	35
	Bilanzgrenzen und Kennzahlen .....	7		Technischer Speicher, Wärmespeicher .....	35
	Elektro-Thermo-Verstärkung .....	7		Stufenladung, Schichtladung .....	35
	Bauarten .....	7		Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger, Ein- und Ausschaltpunkt .....	36
1.3.	Bauteile.....	8	4.	Fallbeispiel.....	41
	Verdichter .....	8	4.1.	Ausgangslage .....	41
	Verdampfer .....	9	4.2.	Temperatur-Leistungs-Diagramm .....	42
	Verflüssiger .....	10	4.3.	Wärmepumpe.....	42
	Expansionsventil.....	10		Auswahl der Wärmepumpe .....	42
	Sicherheitseinrichtungen .....	10		Verflüssigerpumpe .....	43
	Abtauvorrichtung.....	11		Verdampferpumpe .....	43
1.4.	Arbeitsmittel.....	12	4.4.	Speicher .....	44
1.5.	Spezielle Anwendungen .....	13		Speicherinhalt.....	44
	Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung.....	13		Fehlzirkulation über den Speicher verhindern! .....	44
	Wärmepumpen-Wassererwärmer .....	13	4.5.	Heizkessel.....	44
	Kleinwärmepumpe.....	13		Kesselleistung .....	44
	Wärmepumpen-Entfeuchter .....	13		Regelventil, Kesselpumpe .....	45
1.6.	Entwicklungstendenzen .....	14	4.6.	Kennzahlen .....	45
				Leistungszahl $\epsilon$ (Momentanwert).....	45
2.	Planungshinweise .....	15		COP (Momentanwert) .....	45
2.1.	Betriebsverhalten .....	15		Jahresarbeitszahl JAZ.....	46
2.2.	Temperatur-Leistungs-Diagramm .....	15		Elektro-Thermo-Verstärkung ETV .....	46
2.3.	Betriebsarten .....	16	4.7.	Wirtschaftlichkeit .....	47
	Monovalenter Betrieb .....	16	4.8.	Computerberechnung.....	48
	Bivalent-paralleler Betrieb .....	16	5.	Bewilligungsverfahren.....	49
	Bivalent-alternativer Betrieb .....	17	5.1.	Elektrizitätswerk .....	49
	Sonderfall «monoenergetischer Betrieb» .....	17		Anschlussgesuch .....	49
2.4.	Einsatzbedingungen .....	18		Anlaufstrombegrenzung .....	49
	Direkt- oder Indirektnutzung? .....	18	5.2.	Wärmequelle .....	50
	Gleitende oder konstante Verflüssiger- austrittstemperatur? .....	18	5.3.	Weitere Vorschriften .....	52
	Wahl des Arbeitsmittels .....	19		Schallschutz.....	52
	Wahl des Frostschutzmittels .....	19		Raumbelüftung .....	52
2.5.	Wärmequellen .....	20		Aufstellung und Zugänglichkeit .....	52
	Grundwasser.....	20	6.	Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle.....	53
	Oberflächengewässer .....	21	6.1.	Instrumentierung .....	53
	Erdreich .....	22	6.2.	Manuelle Datenaufzeichnung und Auswertung .....	55
	Aussenluft .....	23	6.3.	Automatische Datenaufzeichnung und Auswertung .....	55
	Geothermische Wärme .....	23	6.4.	Erfolgskontrolle .....	57
	Abwärme .....	24	6.5.	Betriebsüberwachung.....	57
	Welches ist die beste Wärmequelle? .....	24			
2.6.	Planungszielwerte .....	25		Benennungen, Formelzeichen, Abkürzungen.....	59
	Einflussgrösse «Produkttoleranz» .....	25		Index .....	60
	Einflussgrösse «Druckverlust von Verdampfer und Verflüssiger» .....	25			
	Einflussgrösse «Druckverlust der Erdwärme- sonden» .....	26			
	Einflussgrösse «Betriebsart» .....	26			
2.7.	Kosten.....	28			
	Investitionskosten .....	28			
	Elektrizitätstarife .....	28			



# 1. Wärmepumpentechnik

## 1.1. RAVEL und die Wärmepumpentechnik

Wie funktioniert eine Wärmepumpe?

Die Wärmepumpe (Abkürzung: WP) ist eine Einrichtung, die einen Wärmestrom bei niedriger Temperatur aufnimmt und mittels Zufuhr hochwertiger Energie bei höherer Temperatur wieder abgibt. Sie arbeitet nach dem Kreisprozess-Prinzip. Dabei erfolgt der Wärmetransport mit einem Arbeitsmittel, das während des Kreisprozesses seinen Aggregatzustand (flüssig, gasförmig) ändert.

 Kreisprozess und Funktionsweise der Wärmepumpe werden ausführlich in Heft 1, Abschnitte 2.1 und 3.2, beschrieben

Was hat die Wärmepumpentechnik mit RAVEL zu tun?

Wärmepumpen brauchen doch zusätzlichen Strom! Das stimmt nur bedingt, denn RAVEL sieht die Wärmepumpentechnik als Teil eines Gesamtkonzepts zur effizienteren Wärme- und Stromproduktion. Dies bedeutet einerseits, dass elektrische Widerstandsheizungen – überall dort, wo es mit vernünftigem Aufwand möglich ist – durch Wärmepumpen ersetzt werden. Und andererseits soll beim Bau von Wärmekraftkopplungsanlagen eine Umweltstrategie verfolgt werden, das heisst, trotz Stromproduktion mit fossilen Energieträgern, soll die Umwelt weniger belastet werden als bisher. Dies ist möglich, wenn ein Teil des WKK-Stromes in Elektro-Thermo-Verstärkern eingesetzt wird (Bild 1). Und die Wärmepumpe ist der klassische Fall eines Elektro-Thermo-Verstärkers: sie macht aus 1 Teil Elektrizität 3 Teile Wärme.

 Diese Zusammenhänge werden in Heft 1, Abschnitte 2.5 und 3.4, beschrieben

Abgrenzung

Diese Publikation befasst sich ausschliesslich mit mechanisch angetriebenen Elektromotor-Wärmepumpen mit hermetisch oder halbhermetisch gebautem Motor und Verdichter. Also anschlussfertige Wärmepumpen, die in der Fabrik serienmässig hergestellt, geprüft und lediglich aus Versand- oder Montagegründen getrennt werden.

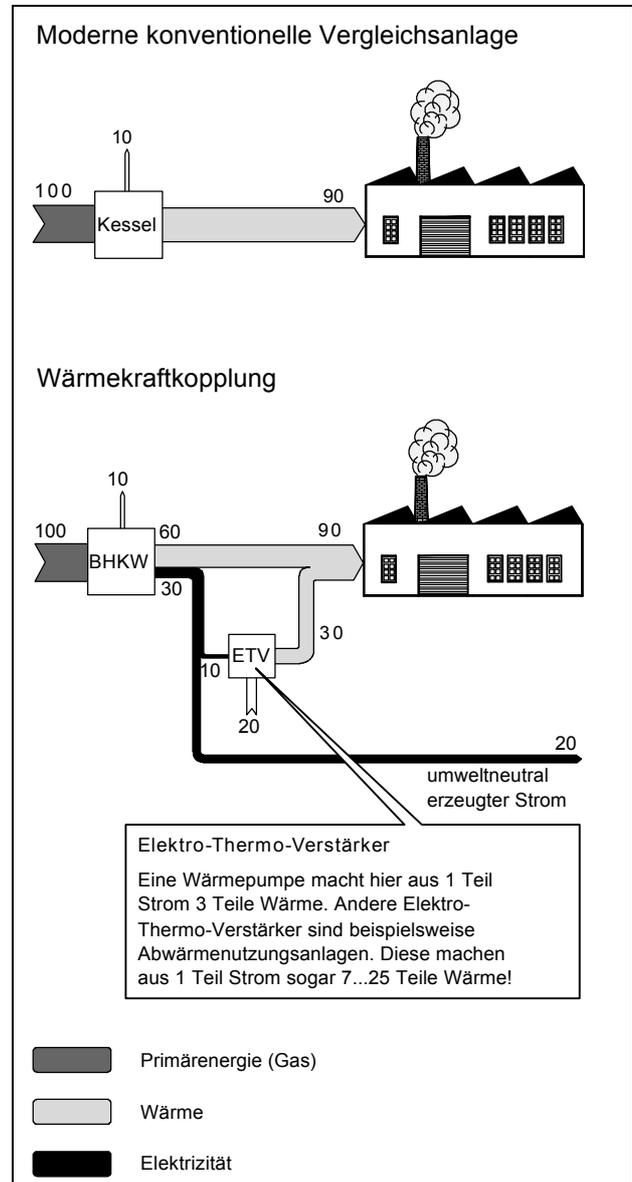
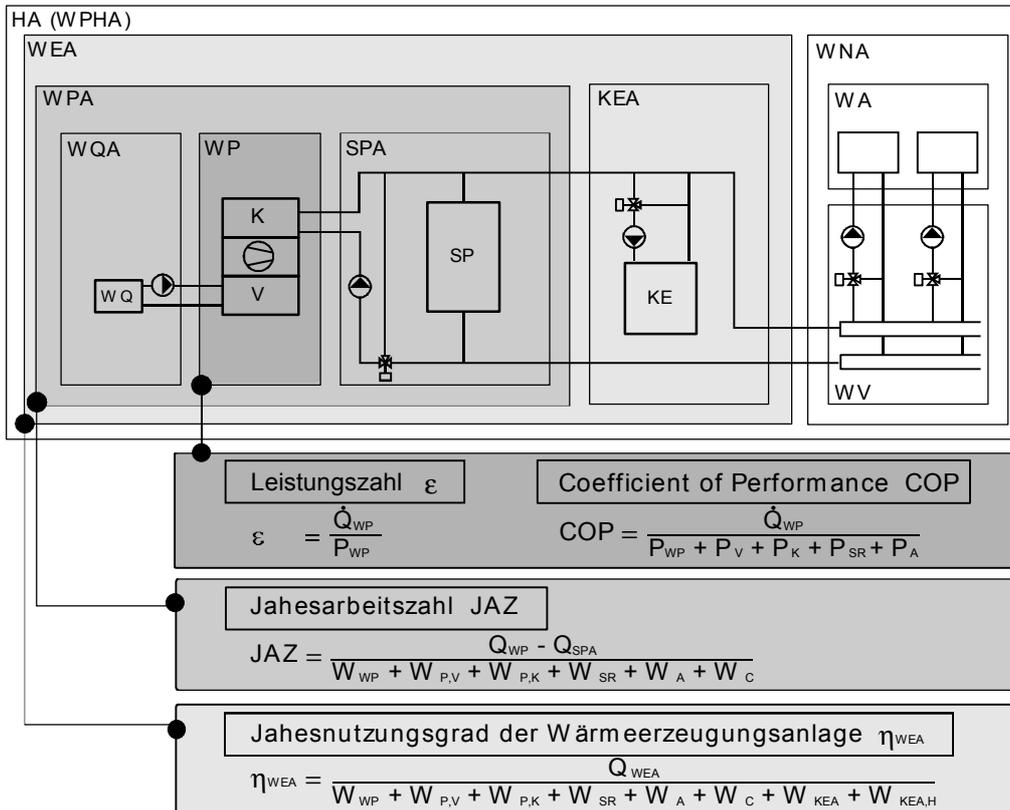


Bild 1: Mit Blockheizkraftwerken in Verbindung mit Elektro-Thermo-Verstärkern – hier eine Wärmepumpe – kann praktisch umweltneutral Strom produziert werden. Dabei müssen Blockheizkraftwerk und Wärmepumpe nicht zwingend am gleichen Ort gebaut werden.



**Bilanzgrenzen**

- HA Heizungsanlage; auch WPHA für Wärmepumpenheizungsanlage (diese Bezeichnung ist aber nur sinnvoll für eine monovalente Anlage)
- WEA Wärmeerzeugungsanlage
- WPA Wärmepumpenanlage
- WQA Wärmequellenanlage
- WP Wärmepumpe
- SPA Speicheranlage
- KEA Kesselanlage
- WNA Wärmenutzungsanlage
- WV Wärmeverteilung
- WA Wärmeabgabe

**Weitere Abkürzungen**

- WQ Wärmequelle
- V Verdampfer
- K Verflüssiger (Kondensator)
- SP Speicher
- KE Kessel

**Leistungen (Momentanwerte oder Mittelwerte über kurze Zeitdauer)**

- $Q_{WP}$  Heizleistung der Wärmepumpe
- $P_{WP}$  Verdichter-Leistungsaufnahme der Wärmepumpe
- $P_V$  Leistungsanteil zur Überwindung des Verdampferdruckabfalls
- $P_K$  Leistungsanteil zur Überwindung des Verflüssigerdruckabfalls
- $P_{SR}$  Leistungsaufnahme der Steuerung und Regelung innerhalb der Wärmepumpe
- $P_A$  mittlere Leistungsaufnahme der Abtaueinrichtung

**Energiemengen (Jahreswerte)**

- $Q_{WP}$  von der Wärmepumpe produzierte Wärmemenge
- $Q_{SPA}$  Wärmeverluste der Speicheranlage
- $Q_{WEA}$  von der ganzen Wärmeerzeugungsanlage produzierte Wärmemenge
- $W_{WP}$  Verdichter-Energieverbrauch der Wärmepumpe
- $W_{P,V}$  Energieverbrauch der Verdampferpumpe
- $W_{P,K}$  Energieverbrauch der Verflüssigerpumpe
- $W_{SR}$  Energieverbrauch der Steuerung und Regelung
- $W_A$  Energieverbrauch der Abtaueinrichtung
- $W_C$  Energieverbrauch der Carterheizung
- $W_{KEA}$  Brennstoffverbrauch der Kesselanlage
- $W_{KEA,H}$  Hilfsenergieverbrauch der Kesselanlage

Bild 2: Bilanzgrenzen und Definition der Kennzahlen

## 1.2 Definitionen

### Bilanzgrenzen und Kennzahlen

Da in einschlägigen Normen, Richtlinien und Publikationen unterschiedliche und teilweise auch unzweckmässige Definitionen vorliegen, hat RAVEL Bilanzgrenzen und Kennzahlen praxisgerecht neu definiert (Bild 2). Bisherige Bezeichnungen wurden übernommen und Widersprüche konnten weitgehend vermieden werden. Die Europäische Norm über Wärmepumpen EN 255 wurde berücksichtigt (diese enthält allerdings nur Definitionen innerhalb der Bilanzgrenze «Wärmepumpe»).

### Elektro-Thermo-Verstärkung

Eine neue Kennzahl ist die Elektro-Thermo-Verstärkung ETV (siehe Bild 1), die zur Beurteilung eines Gesamtkonzepts zur effizienteren Wärme- und Stromproduktion herangezogen wird. Für Wärmepumpen wird sie folgendermassen definiert:

$$ETV = \frac{\text{Substitution fossil erzeugter Wärme}}{\text{Elektrizitäts-Mehraufwand für diese Substitution}}$$

Mit genügender Genauigkeit für die Praxis kann in den meisten Fällen

$$ETV = \text{Jahresarbeitszahl JAZ}$$

angenommen werden. (Bei bivalenten Anlagen ergibt sich damit ein kleiner Fehler, da nicht berücksichtigt wird, dass der Kessel einer konventionellen Anlage mehr Strom brauchen würde als der kleinere Kessel der Wärmepumpenanlage.)

### Bauarten

Wärmepumpen werden nach den gewählten Wärmeträgermedien bezeichnet. Eine Zusammenstellung mit einem Beispiel zur Kurzbezeichnung zeigt die Tabelle 3.

Kompakt-Wärmepumpen (Bild 4 oben) werden im Herstellerwerk anschlussfertig zusammengebaut, mit Arbeitsmittel gefüllt und betriebsbereit zum Aufstellungsort geliefert. Vorteile sind:

- Einfache Installation
- Zur Erstellung der Wärmepumpenanlage braucht es keine spezielle Fachbewilligung
- Keine besondere Dichtigkeitskontrolle des Arbeitsmittelkreislaufes an Ort und Stelle nötig

Split-Wärmepumpen (Bild 4 unten) sind Geräte, bei denen ein Teil der Wärmepumpe separat aufgestellt wird

Bezeichnung	Verdampfer	Verflüssiger
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	Wasser	Wasser
Luft-Wasser-Wärmepumpe	Luft	Wasser
Sole-Wasser-Wärmepumpe	Sole	Wasser
Luft-Luft-Wärmepumpe	Luft	Luft
Beispiel zur Kurzbezeichnung		
Bauart	Wasser-Wasser	
Verdampfeintrittstemperatur	10°C	
Verflüssigeraustrittstemperatur	45°C	
Kurzbezeichnung	W10/W45	

Tabelle 3: Gebräuchliche Wärmepumpenbauarten

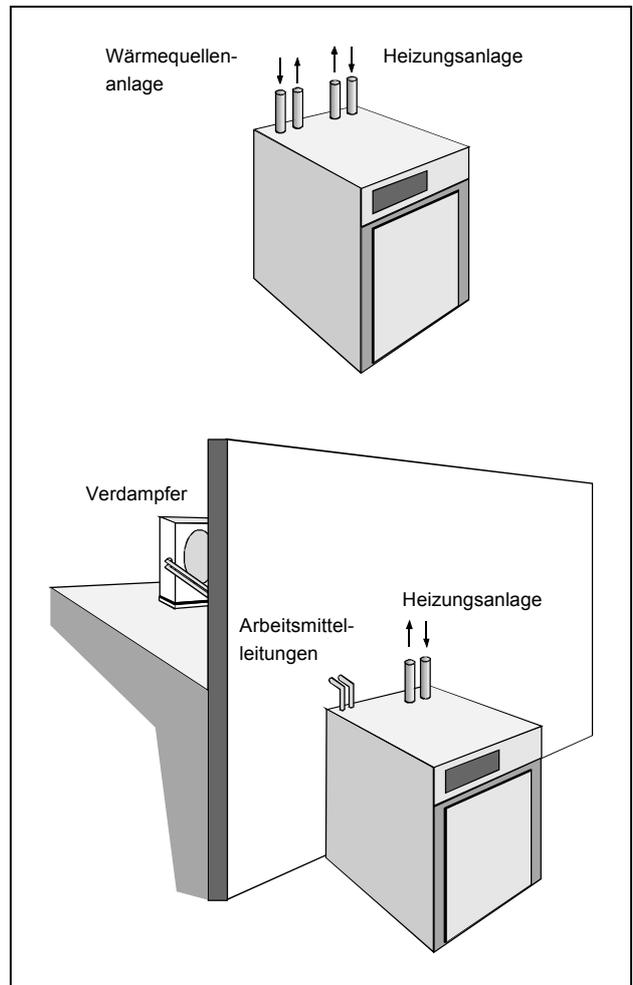
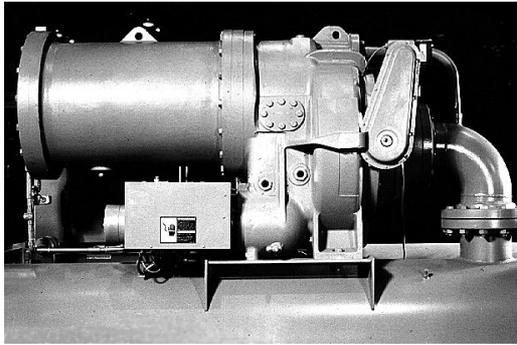
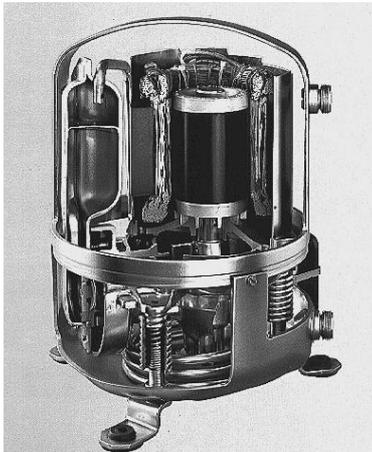


Bild 4: Kompakt-Wärmepumpe (oben) und Split-Wärmepumpe (unten)



Einsatzbereich: ab etwa 500 kW Heizleistung

Bild 5: Turboverdichter



Hauptsächliche Einsatzbereiche:

- hermetisch bis etwa 50 kW Heizleistung
- halbhermetisch 30 bis 200 kW Heizleistung

Bild 6: Hubkolbenverdichter hermetisch (oben) und halbhermetisch (unten)

(z.B. der Verdampfer einer Luft-Wasser-Wärmepumpe) und durch Arbeitsmittelleitungen vor Ort mit dem Rest der Anlage verbunden wird. Vorteile sind:

- Optimale Platzierung
- Leichter Transport und Einbringung

Nachteilig ist, dass eine Fachbewilligung für die Ortsmontage der Arbeitsmittelleitungen nötig ist und dass Planungsabweichungen Nichterfüllung von Herstellerangaben zur Folge haben können.

### 1.3 Bauteile

#### Verdichter

Turboverdichter (Bild 5), werden vorwiegend für grössere Leistungen gebaut. Sie gelten als gut erprobt und zuverlässig. Charakteristisch ist ein grosser Volumenstrom bei einem kleinen Verdichtungsverhältnis. Sie sind kompakt gebaut, verschleiss- und schwingungsarm und haben einen hohen Wirkungsgrad. Für grössere Verdichtungsverhältnisse werden mehrere Laufräder hintereinander geschaltet. Entwicklungstrends sind verbesserte Laufräder für höhere Drehzahlen, für doppelseitige Gasansaugung und für das Arbeitsmittel R22 bzw. für R12-Ersatzstoffe.

Hermetische Hubkolbenverdichter (Bild 6 oben) sind wohl die meisteingesetzten Verdichter in der Haustechnik – erprobt und millionenfach bewährt. Die Hauptgründe hierfür sind die günstigen Kosten und Leistungsgrössen. Weitere Merkmale sind:

- Kompakte Bauart
- Praktisch keine Arbeitsmittelverluste
- Geringe Schallemissionen
- Einfache Montage
- Bei Defekt ist allerdings ein Ersatz des ganzen Verdichters notwendig

Halbhermetische Hubkolbenverdichter (Bild 6 unten) sind ebenfalls bewährt und erprobt. Sie wurden nur aus Kostengründen bei den kleineren Leistungsgrössen von der hermetischen Bauart verdrängt. Vorteilhaft ist:

- Leistungsregelung mittels Zylinderabschaltung
- Bei Defekt können sowohl der Elektromotor (z.B. Wicklung) als auch der Verdichterteil (z.B. Dichtungsringe, Ventilplatten) einfach revidiert werden

Hubkolbenverdichter sind laufend optimiert worden. Sie sind zwar für eine bestimmte Drehzahl konstruiert, lassen sich aber auch mit zwei Drehzahlen betriebssicher einsetzen. Sie werden im Bereich zwischen 50 und 150 kW Heizleistung mittelfristig gesehen kaum ersetzt

werden. Wesentliche Verbesserungen der letzten Jahre sind:

- Optimierung des Elektromotors
- Verminderung des Totraumes
- Reduktion des inneren Druckabfalls (neue Ventil- und Austrittskonstruktionen)

Die wichtigsten Rotationsverdichter sind in Bild 7 zusammengestellt. Es sind dies Rollkolben-, Spiral- und Schraubenverdichter. Merkmale sind:

- Wenige Einzelteile dank einfacher Bauart
- Vibrationsarmer Lauf, weil keine oszillierenden Bewegungen auftreten
- Besserer Wirkungsgrad wegen kontinuierlicher Verdichtung
- Stetige Leistungsregelung mittels Drehzahlsteuerung gibt höhere Leistungszahlen und längere Nutzungszeit infolge kleinerer Energieverluste und geringerer Materialabnutzung durch kontinuierlichen Betrieb
- Hohe Betriebssicherheit, weil keine Flüssigkeitsschläge auftreten

Die Rollkolbenverdichter und Spiralverdichter sind als Ersatz für die hermetischen Hubkolbenverdichter vorgesehen. Der Scroll-Verdichter (ein Spiralverdichter) dürfte zurzeit die fortschrittlichste Verdichterbauart sein. Dank moderneren Fertigungsmethoden wird er zukünftig vermehrt angeboten werden.

Schraubenverdichter besitzen in der Regel ein fest vorgegebenes Druck-Volumen-Verhältnis. Merkmale sind:

- Hoher Wirkungsgrad
- Ruhiger Lauf
- Kleine Abmessungen
- Wenig rotierende Teile, d.h. geringer Verschleiss
- Aufwendigere Schmierölkühlung

#### Verdampfer

Der Verdampfer überträgt die von der Wärmequelle gelieferte Wärme auf den internen Arbeitsmittelkreislauf (Bild 8). Für flüssige Wärmequellen werden Rohrbündel-, Koaxial- und Platten-Wärmetauscher eingesetzt, und für Luft sind es meist lamellierte Röhren-Wärmetauscher.

 Ausführliche Beschreibung aller Wärmetauscherbauarten in Heft 2, Kapitel 2

Es gibt grundsätzlich zwei Verdampfungsarten, nämlich Trockenexpansion und Überflutung. Die meisten Verdampfer werden als Trockenexpansionsverdampfer betrieben. Der Rohrbündel-Wärmetauscher wird aber in einigen Fällen auch als überflutender Verdampfer gebaut. Für das Prinzip entscheidend ist lediglich die Arbeitsmittel-

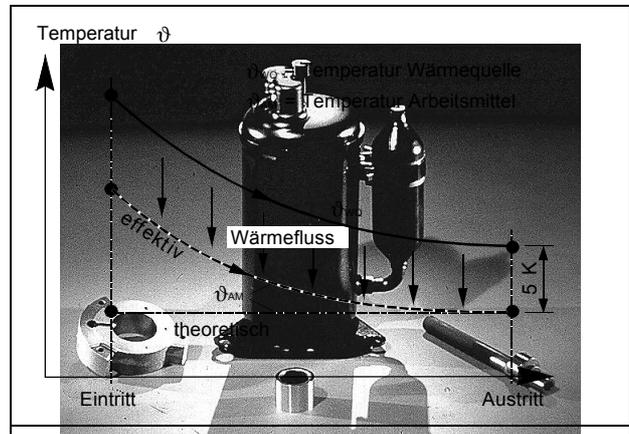
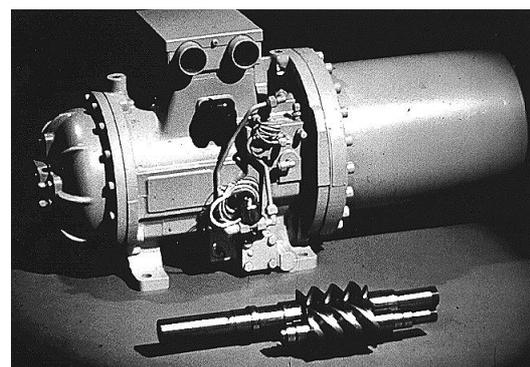
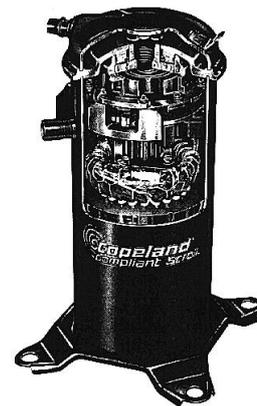


Bild 8: Temperaturverlauf in einem Koaxial-Verdampfer



Hauptsächliche Einsatzbereiche:

- Rollkolbenverdichter bis 12 kW Heizleistung
- Spiralverdichter 12 bis 60 kW Heizleistung
- Schraubenverdichter 100 bis 500 kW Heizleistung

Bild 7: Rotationsverdichter

führung. Beim überflutenden Verdampfer strömt das Wärmeträgermedium durch die Rohre und das Arbeitsmittel befindet sich im Mantelraum. Bei der Trockenexpansion ist es umgekehrt.

#### Verflüssiger

Der Verflüssiger (oft auch «Kondensator» genannt) überträgt die Wärme des Arbeitsmittelkreislaufes an den Wärmeträger der Wärmenutzungsanlage (Bild 9). Es werden die gleichen Wärmetauscherbauarten wie beim Verdampfer verwendet.

#### Expansionsventil

Das Expansionsventil regelt den Arbeitsmittelzufluss zum Verdampfer. Welche Parameter auch immer benutzt werden – Druckabfall, effektiver Druck, Temperatur oder eine Kombination dieser Parameter – die Aufgabe bleibt stets dieselbe: die kontinuierliche Regelung des Arbeitsmittelflusses. Da in der Wärmepumpentechnik mit stets schwankenden Betriebszuständen zu rechnen ist, wird – abgesehen von Sonderfällen – in der Praxis das thermostatische Expansionsventil eingesetzt (Bild 10). Es kann eine relativ konstante Überhitzung am Verdampferausgang aufrechterhalten und ist justierbar. Nachteilig ist, dass bei grossen Leistungsschwankungen nicht in allen Betriebszuständen ein sicherer Betrieb möglich ist (zu grosse Überhitzung oder Flüssigkeitsschläge). Trotzdem ist es aus Preisgründen bei Kleinanlagen heute noch nicht wegzudenken.

#### Sicherheitseinrichtungen

Verschiedene Sicherheitseinrichtungen sorgen für die Einhaltung der zugelassenen Betriebsgrenzen (Bild 11):

- Hoch- und Niederdruckpressostaten zur Überwachung der Grenzwerte in Verflüssiger und Verdampfer
- Öldrucksicherheitsschalter zur Überwachung der Schmierung
- Heissgasthermostat zur Überwachung der Heissgastemperatur
- Druckentlastungsventil, Sollbruchstellen, Brechplatten zum Schutze vor Explosion bzw. extrem hohen Drücken
- Wicklungschutzthermostat (Klixon) zur Temperaturüberwachung des Elektromotors
- Frostschutzthermostat zum Schutze des Verdampfers vor örtlicher Vereisung

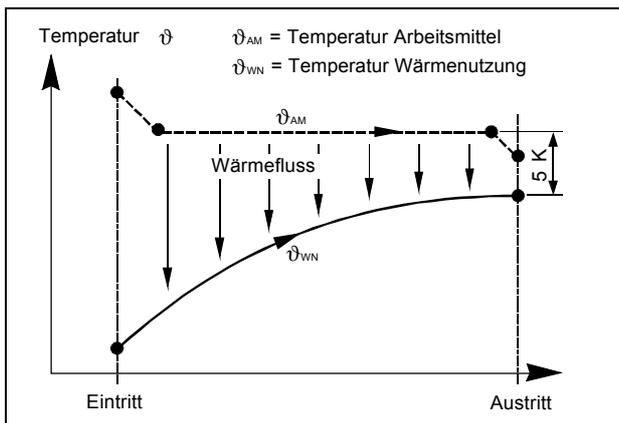


Bild 9: Temperaturverlauf in einem Verflüssiger

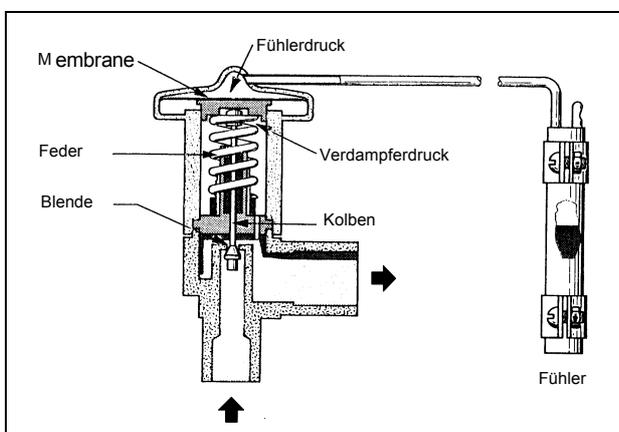


Bild 10: Thermostatisches Expansionsventil

- Strömungswächter zum Schutze des Verdampfers vor örtlicher Vereisung und des Verflüssigers vor Überhitzung

Sicherheitseinrichtungen sollen immer als Sicherheits- und nie als Schaltorgan dienen. Dabei muss ein genügend grosser Abstand zwischen den Sollwerten von Steuerung/Regelung und den Sicherheitseinrichtungen gewährleistet sein.

Weitere Einrichtungen im Arbeitsmittelkreislauf sind Filtertrockner und Feuchtigkeitsanzeiger (als Schutz vor Rückständen bzw. Feuchtigkeit) sowie Arbeitsmittelsammler und Sauggasakkumulator.

#### Abtauvorrichtung

In der Praxis werden zwei Arten der Abtauung angewandt:

- Die Heissgasbypass-Abtauung, bei der ein Teil des Heissgases dem Verdampfer zugeführt wird
- Die Umkehrung der Kreislaufrichtung durch Vierwegeventil (Bild 12)

Je nach Abtauprinzip kann die Abtauung die Nettdeistung und/oder den Betrieb der Wärmepumpe erheblich beeinflussen. Energetisch gesehen ist die Umkehrung vorteilhafter. Die Heissgasabtauung braucht unbedingt eine gegebene minimale Druckdifferenz, die Umkehrabtauung eine grössere momentane Wärmeentnahmeleistung.

Die Abtaudauer und der Abtauzyklus hängen von der Luftverteilung über dem Verdampfer, dem Lamellenabstand, der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und dem Verflüssigungsdruck ab. Bei der Aufstellung des Verdampfers ist unbedingt darauf zu achten, dass der Abtaubetrieb nicht durch Kaltluftzufuhr via Schwerkraftzirkulation beeinflusst wird.

## 1.4 Arbeitsmittel

Die Stoffverordnung des Bundes regelt die Zulassung und den Umgang mit Arbeitsmitteln (häufig auch «Kältemittel» genannt):



Verordnung über umweltgefährdende Stoffe. Änderung vom 14. August 1991. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern)

Obwohl die Wärmepumpe diese Stoffe in einem hermetisch abgeschlossenen Kreislauf praktisch verlustlos verwendet, kann das Arbeitsmittel im Betrieb durch Materialermüdung oder bei urfachgemässer Stilllegung

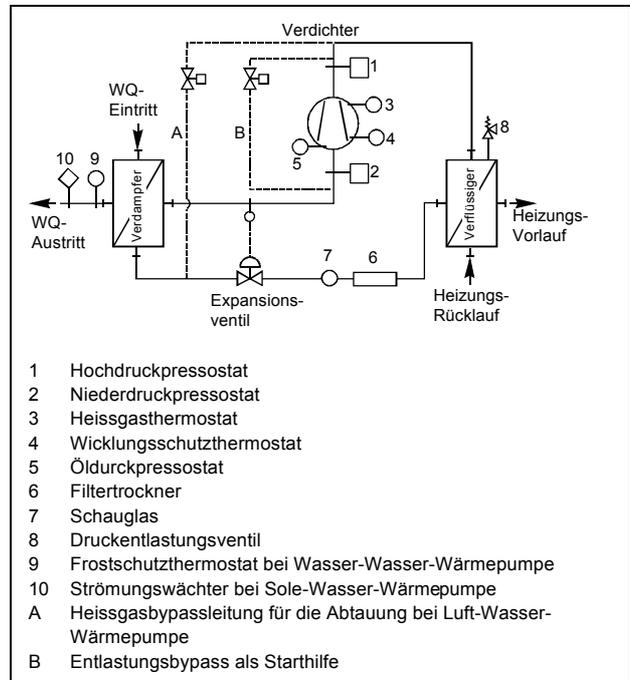


Bild 11: Sicherheitseinrichtungen

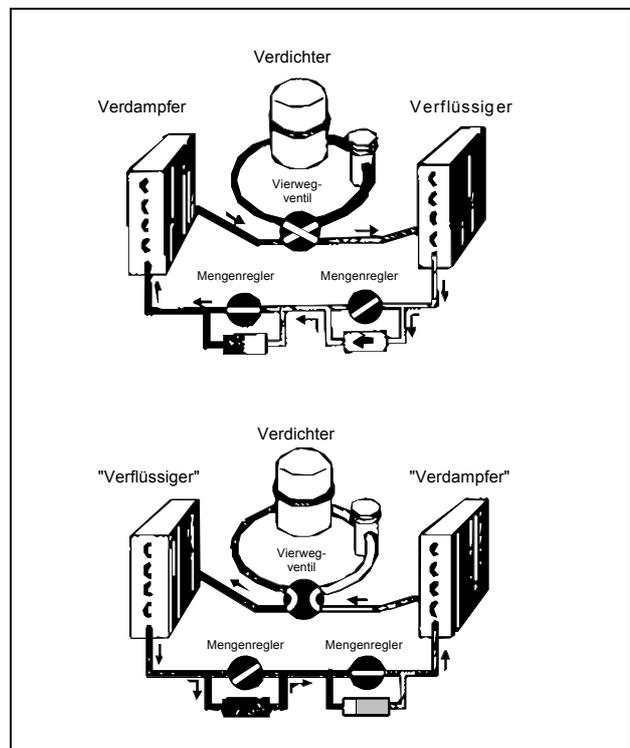


Bild 12: Abtauung nach dem Umkehrprinzip. Oben: Heizbetrieb. Unten: Abtaubetrieb.

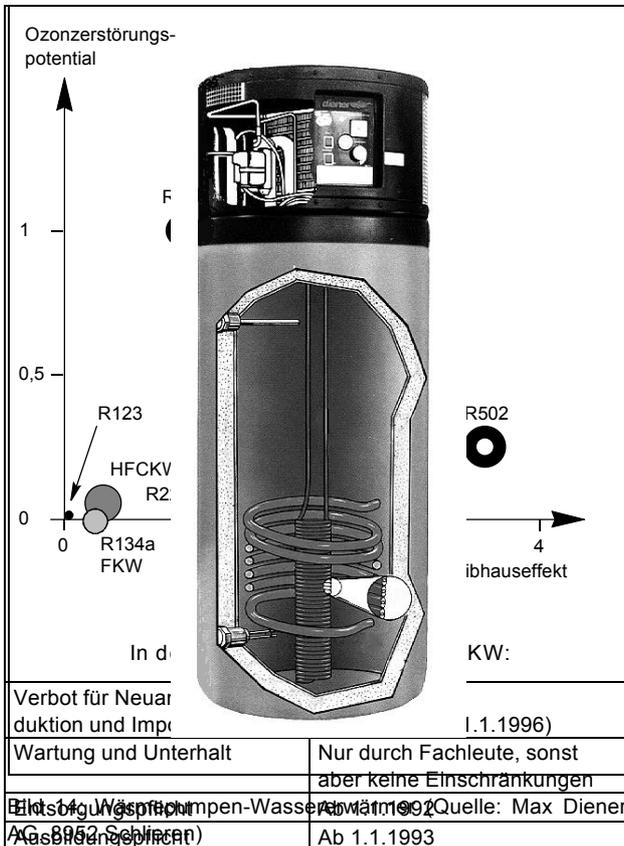


Bild 13: Arbeitsmittel und Umweltbelastung

unkontrolliert entweichen und die Umwelt belasten. Eine Übersicht gibt Bild13.

Die Umstellung auf weniger umweltbelastende Stoffe ist nötig, weil vollhalogenierte Kohlenwasserstoffe, sogenannte FCKW, ab 1.1.1994 in der Schweiz nicht mehr in Neuanlagen verwendet werden dürfen. Ihr Vorteil lag vor allem darin, dass höhere Vorlauftemperaturen (R12) oder tiefe Verdampfungstemperaturen (R502) erreicht werden konnten.

Die chemische Industrie ist weltweit daran, Ersatzstoffe zu entwickeln und möglichst rasch anzubieten. Heute steht vor allem R134a als R12-Ersatz mit geringer Umweltbelastung im Vordergrund. Eine vom Bundesamt für Energiewirtschaft finanzierte Untersuchung zeigte, dass ein Austausch von R12 gegen R134a bei bestehenden Anlagen mit sauberer Arbeitsweise ohne grosse Leistungsänderung und ohne Probleme mit der Materialverträglichkeit möglich ist.

Das lange bewährte Arbeitsmittel R22 (HFCKW, teilhalogeniert) ist in der Schweiz weiterhin ohne Einschränkung zugelassen. Dieses Arbeitsmittel ist aber bei tiefen Verdampfungstemperaturen (z.B. Luft-Wasser-Wärmepumpe im monovalenten Betrieb) und gleichzeitig hohen Verflüssigungstemperaturen infolge stoffspezifisch bedingter hoher Austrittsgastemperatur instabil. Deshalb ist es notwendig, einerseits die Betriebsrandbedingungen der Hersteller unbedingt einzuhalten, und andererseits ist es wichtig, Anlagen in monovalenter Betriebsweise mit tiefen Vorlauftemperaturen zu planen (möglichst unter 45°C).

## 1.5 Spezielle Anwendungen

### Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung

Hier gilt es besonders, die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Anwendung zu berücksichtigen (insbesondere wärmequellenseitig). Oft ist es sinnvoller, die Wärmequelle zur Wärmepumpe zu führen als umgekehrt. «Massgeschneiderte» Split-Anlagen sind teuer und bergen mehr Risiken (grosse Füllmengen, Leckgefahr, Leistungsabweichungen).

### Wärmepumpen-Wassererwärmer

Als Wärmequelle für Wärmepumpen-Wassererwärmer (Bild 14) ist nicht weiter nutzbare Abwärme vorgesehen. Dies ist leider oft falsch interpretiert worden, und deshalb

ist der Wärmepumpen-Wassererwärmer als «Wärmedieb» in Verruf geraten. Es gibt aber zahlreiche sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten (z.B. Restaurants, Metzgereien usw.). Zu berücksichtigen ist, dass diese Geräte in der Regel keine Abtaug besitzen.

#### Kleinwärmepumpe

Die Kleinwärmepumpe ist heute praktisch seriereif. Mit 4 kW Wärmeleistung substituiert sie beispielsweise in einem Einfamilienhaus mit 8 kW Wärmeleistungsbedarf mehr als 70% fossile Brennstoffe. Mit Aussenluft als überall zur Verfügung stehender Wärmequelle und dank der geringen elektrischen Leistungsaufnahme von 1,3 kW aus einer 230-Volt-Steckdose, ist eine einfache Realisierung möglich. Im Kanton Zürich muss dafür der bestehende Heizkessel nicht an die Luftreinhalteverordnung angepasst werden.

Das Herzstück bildet eine kompakte Verdichter- und Verflüssigereinheit (z.B. Rollkolbenverdichter und Koaxial-Rippenrohrverflüssiger) mit geringen Abmessungen. Die Kleinwärmepumpe wird beispielsweise an der Wand neben dem Heizkessel montiert und an der Rücklaufleitung angeschlossen (Bild 15). Die Regeleinheit ist vorverdrahtet und steckerfertig.

#### Wärmepumpen-Entfeuchter

Raumluftentfeuchter oder Wäschetrockenschränke mit einer Wärmepumpe sind ein spezielles Einsatzgebiet. Betreffend Jahresnutzungsgrad und Wirtschaftlichkeit ist noch wenig Erfahrung vorhanden. Das Gesamtgebiet der Wäschetrocknung wird ausführlich behandelt in:



Nipkow, Jürg und Werner Gygli: Wäschetrocknen im Mehrfamilienhaus. Bern: Bundesamt für Konjunkturfragen, 1992. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Best.-Nr. 724.397.23.52 d)

## 1.6 Entwicklungstendenzen

Einerseits stammen alle Komponenten, die man in der Wärmepumpentechnik verwendet, aus der Kälte- und Klimatechnik. Es sind also meist bewährte und langlebige Produkte. Andererseits weicht der Einsatzbereich der Wärmepumpe von diesen Geräten ab. Seit 1974 – dem Jahr der «Wiederentdeckung» der Wärmepumpe – galt deshalb die Devise, die Randbedingungen so zu gestalten, dass die Einsatzgrenzen eingehalten werden konnten. Neue Erkenntnisse gab es deshalb vielmehr aus

#### Entwicklungen auf der Komponentenebene

Effizientere Wärmetauscher (verbesserte Wärmeübertragung durch berippte Rohrbündel oder Plattentauscher) ergeben kompaktere Bauweise und kleinere Arbeitsmittelfüllung.

Mikroprozessortechnik ermöglicht bessere Leistungszahlen und grössere Betriebssicherheit: Wegfall störungsanfälliger Kapillarleitungen; schnellere Sensoren und Regler überwachen sowohl Temperatur- als auch Druckseite.

Elektronische Expansionsventile sorgen für bessere Leistungszahlen: Überwachung der Zustandsgrössen im Kreisprozess, dadurch Verkleinerung der Überhitzung und bessere Ausnutzung der Verdampferfläche.

Der Rotationsverdichter – insbesondere der Scroll-Verdichter im Kleinleistungsbereich – wird zukünftig den Hubkolbenverdichter immer mehr verdrängen (letzterer ist zwar preisgünstig und millionenfach bewährt, aber technisch ausgereizt). Die Rotationsverdichter eignen sich für kontinuierliche Drehzahlsteuerung, und dies verspricht einen noch effizienteren Energieeinsatz, obwohl noch zahlreiche Fragen nicht beantwortet sind (z.B. Auswirkungen im Arbeitskreis bei Fördermengenänderungen, Ölrückführung, Netzeinfluss des Inverters).

Kasten 16

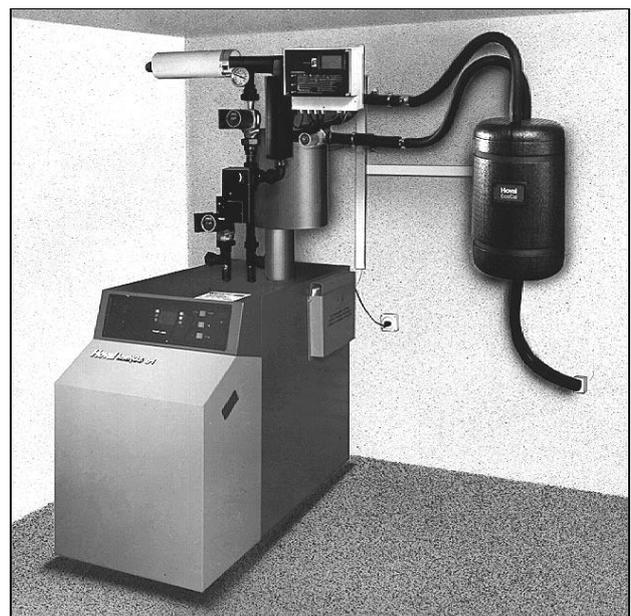


Bild 15: Bivalente Kleinwärmepumpe für bestehende Einfamilienhäuser (Quelle: Hoval Herzog AG, 8706 Feldmeilen)

dieser Sicht als aus derjenigen der eigentlichen Wärmepumpentechnik. Wenn von neuen Entwicklungen die Rede ist, ist es deshalb wohl richtig, in erster Linie Entwicklungstendenzen der Komponentenhersteller zu betrachten. Kasten 16 zeigt eine Zusammenstellung.

## 2. Planungshinweise

### 2.1 Betriebsverhalten

Im Gegensatz zum Heizkessel ist die Wärmepumpe ein «dynamischer Wärmeerzeuger». Bei gegebener Apparategrösse ändern sich – je nach Randbedingung – Heiz-, Kühl- sowie Aufnahmeleistung und damit natürlich auch die Leistungszahl. Hauptursache dafür ist der Umstand, dass sich die Temperaturen von Wärmequelle und Wärmenutzung laufend ändern:

- Je niedriger die Verdampfungstemperatur, desto niedriger die Heizleistung (Bild 17)
- Je höher die Verflüssigungstemperatur, desto niedriger die Heizleistung (Bild 18)
- Je kleiner der Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmenutzung, desto besser die Leistungszahl



Ein Grad Verdampfungstemperaturänderung ergibt 3...4% Heizleistungsänderung. Ein Grad Verflüssigungstemperaturänderung ergibt 1...2% Heizleistungsänderung.

Die wichtigste Aufgabe der Planung ist es, das dynamische Verhalten der Wärmepumpe zu berücksichtigen und die Anlage so auszulegen, dass die Einsatzgrenzen nicht überschritten werden. Die Wärmepumpe darf nie für sich allein betrachtet werden, sondern sie muss immer als Teil des Gesamtsystems gesehen werden. Durch Berechnung «von Hand» oder mit Hilfe von Rechenprogrammen können heute Wärmepumpenanlagen mit guter Genauigkeit berechnet und auch optimiert werden.

 Fallbeispiel in Kapitel 4

### 2.2 Temperatur-Leistungs-Diagramm

Das Betriebsverhalten einer Wärmepumpenanlage kann übersichtlich im Temperatur-Leistungs-Diagramm dargestellt werden. Dieses zeigt oben die Heizkurven und weitere Temperaturen, und unten werden Wärmeleistungsbedarf und Heizleistung der Wärmepumpe in Funktion der Aussentemperatur dargestellt (Bild 19). Bezüglich der Aussentemperatur ergeben sich folgende wichtigen Betriebspunkte:

- Auslegepunkt: auf diese Temperatur ist das Wärmeabgabesystem dimensioniert
- Bivalenzpunkt: bei dieser Temperatur wird bei bivalentem Betrieb der Heizkessel freigegeben

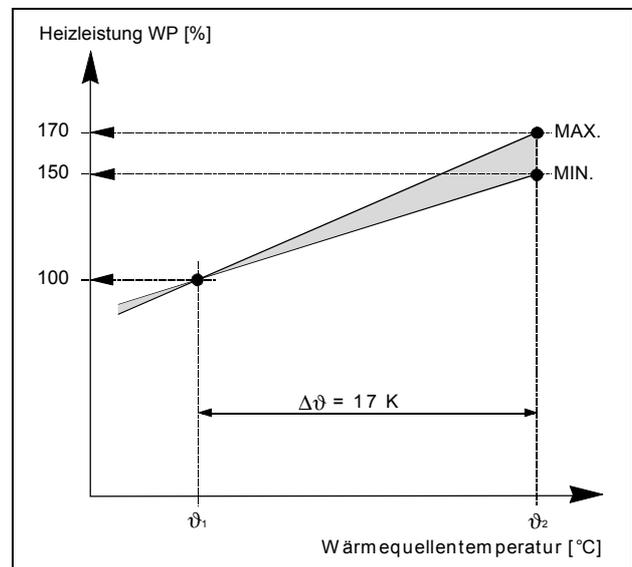


Bild 17: Leistungsänderung wärmequellenseitig 3...4% pro Kelvin Verdampfungstemperaturänderung

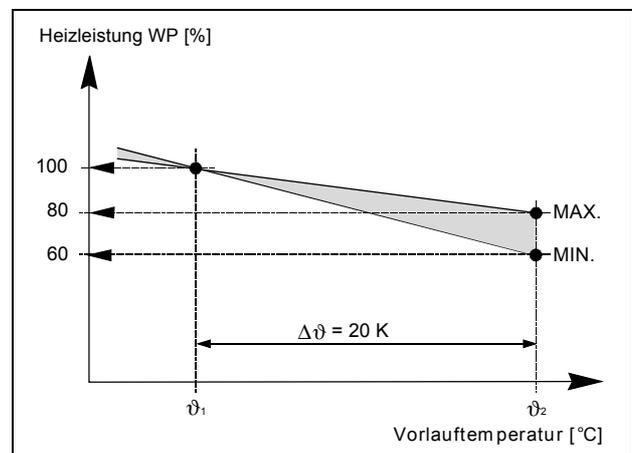


Bild 18: Leistungsänderung wärmenutzungsseitig 1...2% pro Kelvin Verflüssigungstemperaturänderung

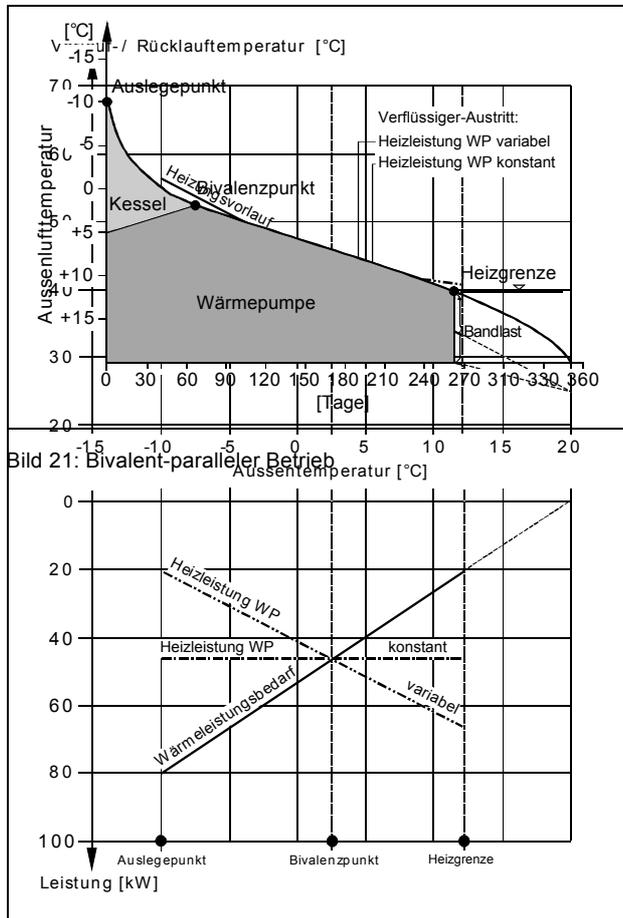


Bild 19: Temperatur-Leistungs-Diagramm für bivalent-parallel Betrieb mit annähernd konstanter (z.B. Grundwasser) und stark variabler Wärmepumpen-Heizleistung (z.B. Ausenluft)

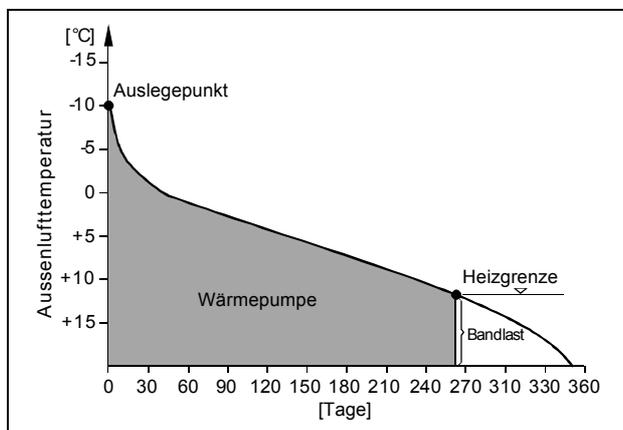


Bild 20: Monovalenter Betrieb

– Heizgrenze: ab dieser Temperatur ist ein Heizbetrieb notwendig

Bild 19 zeigt das Temperatur-Leistungs-Diagramm für bivalent-parallel Betrieb (siehe nächster Abschnitt) bei zwei grundsätzlich verschiedenen Wärmequellen (Auslegung auf Bivalenzpunkt):

- Annähernd konstante Heizleistung: die resultierende Verflüssiger-Austrittstemperatur verläuft parallel zur Rücklauftemperatur (z.B. Grundwasser als Wärmequelle)
- Stark variable Heizleistung: die Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger wird mit steigender Aussentemperatur grösser (z.B. Ausenluft als Wärmequelle)

### 2.3 Betriebsarten

#### Monovalenter Betrieb

Beim monovalenten Betrieb (Bild 20) ist die Wärmepumpe der einzige Wärmeerzeuger. Die maximal mögliche Heizsystemtemperatur ist deshalb durch die maximal zulässige Verflüssigeraustrittstemperatur von Arbeitsmittel und Wärmepumpe gegeben.

#### Bivalent-parallel Betrieb

Beim bivalent-parallel Betrieb (Bilder 19 und 21) ist neben der Wärmepumpe noch ein zusätzlicher Wärmeerzeuger vorhanden (in der Regel ein Heizkessel). «Parallel» bedeutet, dass unterhalb des Bivalenzpunktes beide Wärmeerzeuger parallel arbeiten. Mit einem Bivalenzpunkt bei 50% der erforderlichen Heizleistung kann 80...90% des Jahreswärmebedarfs durch die Wärmepumpe gedeckt werden. Es müssen folgende Anforderungen erfüllt sein:

- Die maximale Rücklauftemperatur des Heizsystems darf die maximal zugelassene Verflüssiger-eintrittstemperatur nicht überschreiten
- Die Vorlauftemperatur des Heizsystems darf im Bivalenzpunkt nicht höher sein als die maximale Verflüssigeraustrittstemperatur
- Die hydraulische Schaltung und die Durchflüsse müssen so ausgelegt sein, dass die Leistung in jedem Betriebszustand abgegeben und die maximal zulässige Verflüssigeraustrittstemperatur nie überschritten werden kann

#### Bivalent-alternativer Betrieb

Beim bivalent-alternativen Betrieb (Bild 22) erfolgt im Bivalenzpunkt eine eindeutige Umschaltung von der Wärmepumpe auf den Kessel und umgekehrt. Damit liegen für jede Betriebsart klare Verhältnisse vor, die die Auslegung eher etwas einfacher machen als beim bivalent-parallelen Betrieb. Es müssen folgende Anforderungen erfüllt sein:

- Die Vorlauftemperatur des Heizsystems darf im Bivalenzpunkt nicht höher sein als die maximale Verflüssigeraustrittstemperatur
- Beim Umschalten muss der jeweils nicht benötigte Wärmeerzeuger hydraulisch abgetrennt werden
- Die Rückschaltung muss mit einem einstellbaren Sicherheitsabstand erfolgen

#### Sonderfall «monoenergetischer Betrieb»

Da die maximale Leistung einer Anlage nur während relativ kurzer Zeit zur Verfügung stehen muss, wird für Einfamilienhäuser oft als Lösung eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit elektrischer Zusatzheizung zur Spitzenlastdeckung empfohlen (elektrische Gesamtleistung < 10 kW). Bild 23 zeigt die Zusammenhänge.

Die monoenergetische Betriebsweise ist einerseits wegen der niedrigen Investitionskosten interessant, andererseits aber lastmässig nicht ganz unproblematisch. Trotz der Annahme, dass die elektrische Zusatzheizleistung mit dem elektrischen Anschlusswert der Wärmepumpe ( $P_{NT}$ -Wert) gekoppelt ist und bei sinkender Aussentemperatur auch die Leistungsaufnahme der Wärmepumpe sinkt, kann im Winter bei extremen Aussentemperaturzuständen das bereits stark belastete Netz noch zusätzlich belastet werden.

Die Auslegung der Spitzendeckung erfolgt auf den  $P_{NT}$ -Wert entsprechend L2W35. Wenn eine solche Lösung gewählt wird, sollte unbedingt die Handschaltung bevorzugt werden, da die automatische Zuschaltung naturgemäss mehr Energie braucht. Zudem sollte an sehr kalten Tagen auf die Nachtabsenkung verzichtet werden, damit keine Schnellaufheizung erforderlich ist (bei jeder Wärmepumpenheizungsanlage empfehlenswert).

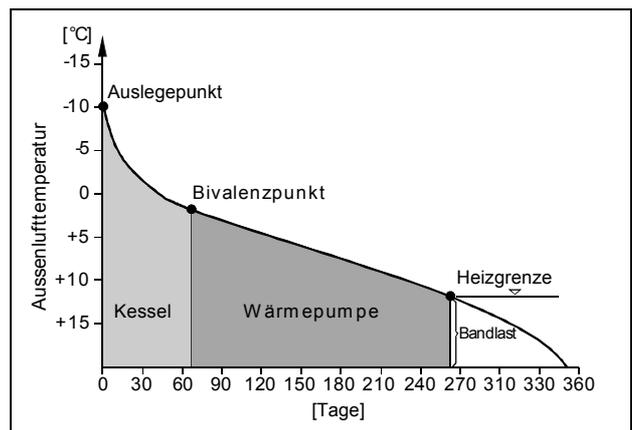


Bild 22: Bivalent-alternativer Betrieb

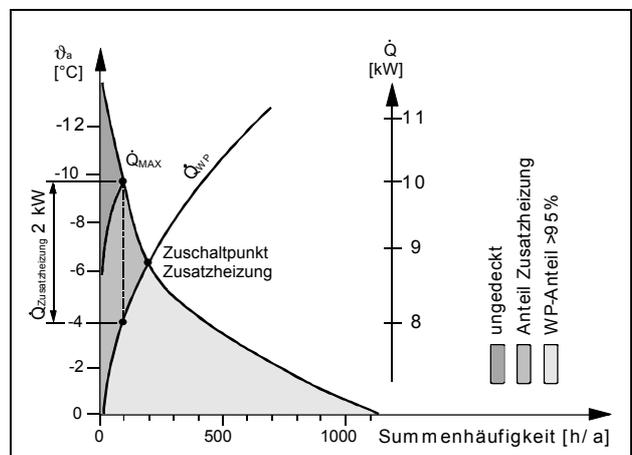


Bild 23: Monoenergetischer Betrieb einer Luft-Wasser-Wärmepumpe für ein Einfamilienhaus

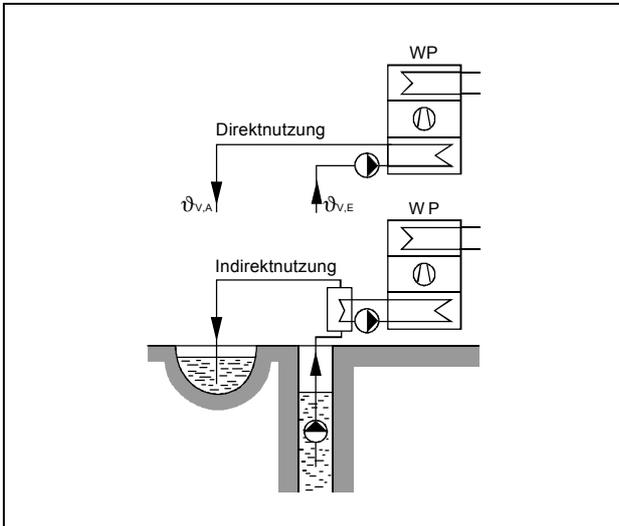


Bild 24: Direktnutzung und Indirektnutzung der Wärmequelle

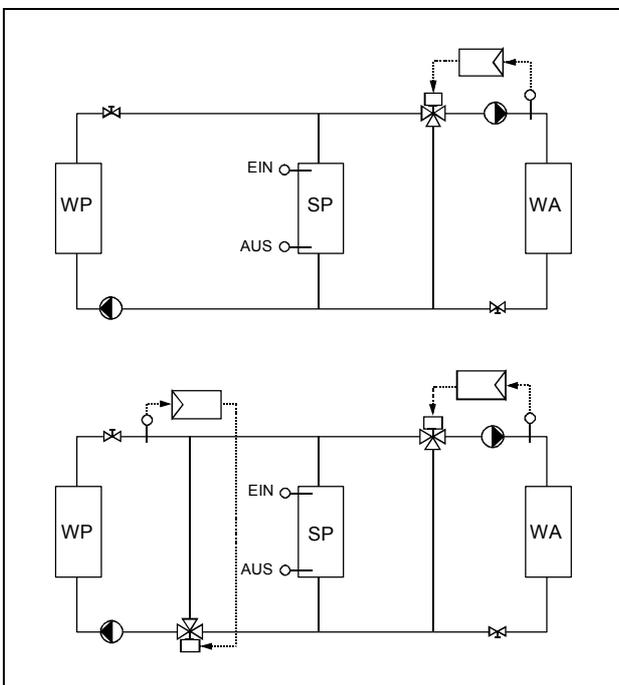


Bild 25: Stufenladung (oben) und Schichtladung (unten)

## 2.4 Einsatzbedingungen

Direkt- oder Indirektnutzung?

Die Direktnutzung (Bild 24 oben) hat den grossen Vorteil, dass das Temperaturniveau der Wärmequelle voll genutzt werden kann. Es muss aber Verunreinigung, Verschlammlung, Erosion und Korrosion im Verdampfer wie folgt verhindert werden:

- Fachmännische Entsandung des Brunnens
- Filter in der Zuleitung zur Wärmepumpe
- Maximale und minimale Durchflussgeschwindigkeiten beachten zur Vermeidung von Erosion, Ablagerungen, Vereisung und Schwingungsbrüchen an den Verdampferrohren
- Für korrosive Abluft (z.B. Stallabwärme) ist ein korrosionsbeständiger Verdampfer zu verwenden; in bestimmten Fällen ist zudem eine Filterung der Abluft notwendig

Natürlichen Wärmequellen können mit der Zeit ihre Qualität ändern. Auch durch eine einmalige Wasseanalyse kann auf die Dauer keine absolute Garantie gegeben werden. Es ist deshalb empfehlenswert, wenn keine langjährigen praktischen Erfahrungen vorliegen, eine Indirektnutzung mit Zwischenkreislauf vorzusehen (Bild 24 unten). Falls ein aggressives Medium als Wärmequelle dient, ist ein Wärmetauscher aus korrosionsbeständigem Material zu wählen, der problemlos gereinigt werden kann. Ferner gilt es zu beachten, dass die Zwischenkreislauf-temperatur unter 0°C fallen kann. Die richtige Wahl des Frostschutzmittels ist deshalb von grosser Bedeutung.

☞ Wärmetauscher-Auslegung siehe Heft 2, Abschnitt 3.2

Gleitende oder konstante Verflüssigeraustrittstemperatur?

Die Steuerung und Regelung der Verflüssigeraustrittstemperatur kann gleitend oder konstant erfolgen. Dies ist einerseits durch die Art der Ladung möglich:

- Bei Stufenladung (Bild 25 oben) des Speichers mit konstantem Durchfluss wird die aktuelle Verflüssigereintrittstemperatur stufenweise mit jedem Durchgang um die Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger angehoben
- Bei Schichtladung (Bild 25 unten) des Speichers wird mit einer Laderegulierung die Verflüssigeraustrittstemperatur – unabhängig von der aktuellen Rücklauf-temperatur – auf einen bestimmten Sollwert geregelt

Andererseits kann noch zusätzlich eine Witterungsführung erfolgen:

- Ein- und Ausschaltpunkt bei Stufen- und Schichtladung
- Ladetemperatur bei der Schichtladung

Der Einfluss auf die Jahresarbeitszahl ist ziemlich komplex, weil neben der Verflüssigeraustrittstemperatur auch der grössere Hilfsenergieverbrauch und die kleinere Temperaturdifferenz im Verflüssiger bei der Stufenladung berücksichtigt werden muss. Der Unterschied zwischen gleitender und konstanter Verflüssigeraustrittstemperatur beträgt sicher weniger als 10%.

 Abschnitte 2.6 und 3.4

#### Wahl des Arbeitsmittels

Die Wahl des Arbeitsmittels erfolgt anlagenspezifisch durch die Planerin oder den Planer. Die Bestimmung der Einsatzgrenze des verwendeten Arbeitsmittels ist hingegen Sache des Herstellers. Ein angemessener Sicherheitsabstand zwischen Betriebs- und Sicherheitsbereich muss durch die Planung sichergestellt werden.

 Abschnitt 1.4

#### Wahl des Frostschutzmittels

Mit Erdreich als Wärmequelle und bei indirekter Nutzung von Gewässern ist ein Zwischenkreislauf notwendig. Hier werden Frostschutzmittel eingesetzt. Der Bund veröffentlicht eine Liste der zugelassenen Stoffe. Das in der Wärmepumpentechnik heute meistens verwendete Äthylenglykol hat wesentlich bessere Eigenschaften als die früher oft verwendeten Stoffe auf Propylenbasis.

Die Konzentration muss entsprechend der Anwendung gewählt werden. Den Frostschutzmitteln werden vom Hersteller Inhibitoren beigegeben, welche die metallischen Werkstoffe vor Korrosion schützen. Deshalb ist die vom Hersteller angegebene minimale Konzentration unbedingt einzuhalten. Die von Wasser stark abweichenden Stoffwerte des Wasser-Glykol-Gemisches müssen bei der Auslegung berücksichtigt werden. Bild 26 gibt Korrekturfaktoren für Förderhöhe und Förderstrom an, die auf neueren Erfahrungen basieren.

## 2.5 Wärmequellen

Die Eigenschaften der Wärmepumpe mit der temperatur- und mengenmässigen Verfügbarkeit der Wärmequelle zu koordinieren, ist die wichtigste Aufgabe der Planung. Eine

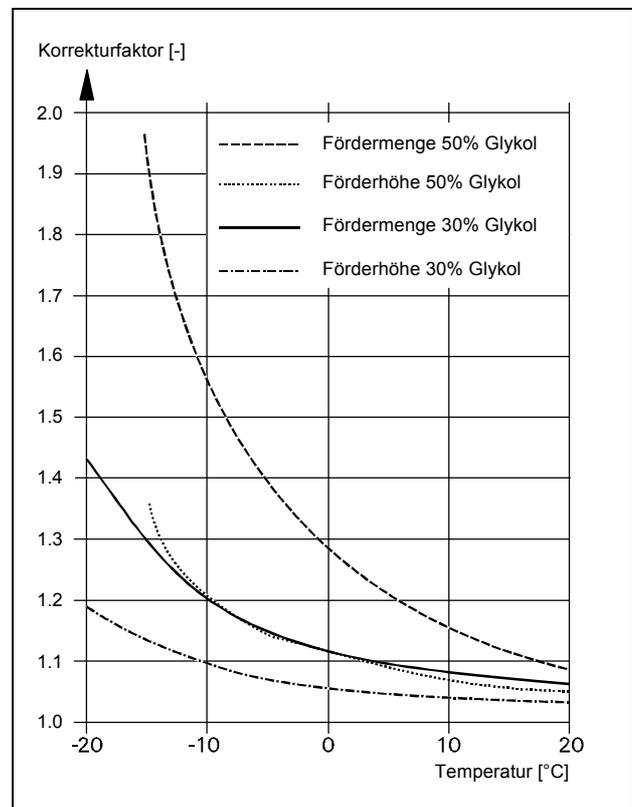


Bild 26: Korrekturfaktoren für Förderstrom und Förderhöhe eines Wasser-Glykol-Gemisches (Quelle: Bieri Pumpenbau AG, 3110 Münsingen)

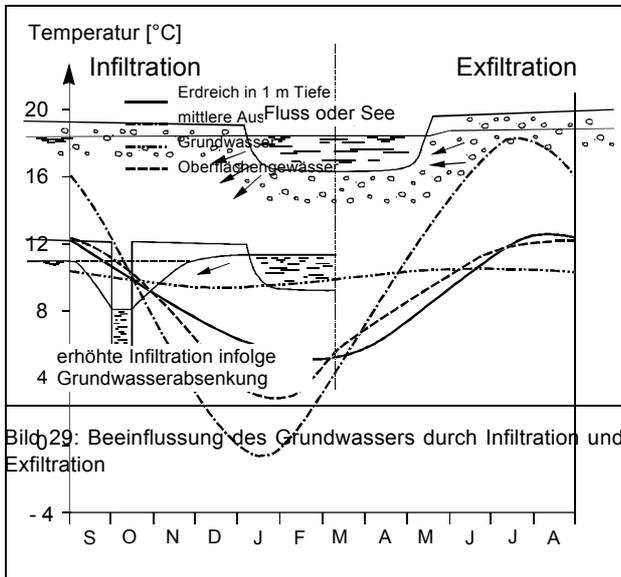


Bild 27: Temperaturverläufe von unbeeinflussten Wärmequellen (ohne Wärmeentzug)

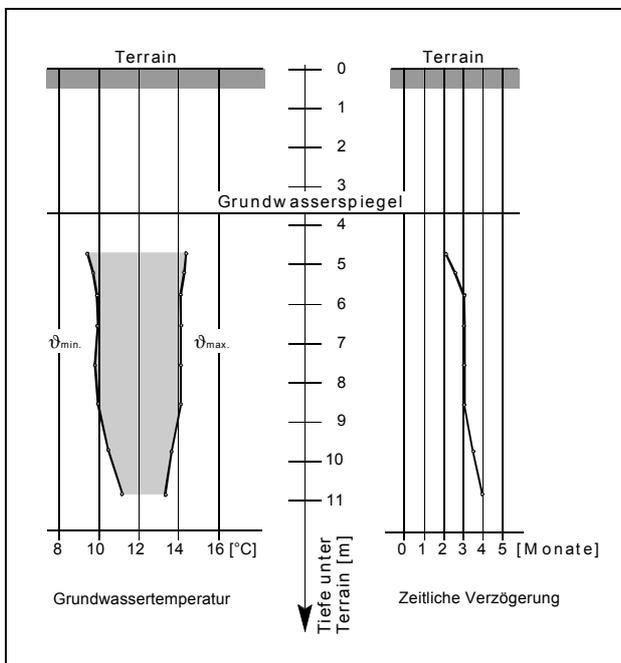


Bild 28: Temperaturverlauf des Grundwassers

falsch dimensionierte Wärmequelle hat katastrophale Auswirkungen auf Betriebssicherheit, Leistung und Wärmeertrag. Bild 27 zeigt typische Temperaturverläufe gebräuchlicher Wärmequellen.

Eine Einteilung der Wärmequellen ist grundsätzlich nach deren Herkunft (natürliche Wärmequellen und Abwärmenutzung) und nach deren Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) möglich.



Die physikalischen Eigenschaften sprechen eindeutig für flüssige Wärmequellen. Der Wärmegewinn aus 1 m<sup>3</sup> Wasser, das um 5 K abgekühlt wird, beträgt beispielsweise 5,8 kWh. Für einen gleich grossen Wärmegewinn müssten vergleichsweise rund 3500 m<sup>3</sup> Luft um 5 K abgekühlt werden!

#### Grundwasser

Als Grundwasser bezeichnet man alle unter der Erdoberfläche vorkommenden Gewässer. Es zirkuliert in porösem Gestein (Schotter, Sand) und gilt aus folgenden Gründen als ideale Wärmequelle:

- «Ideales» Temperaturniveau für Wärmepumpen
- Relativ konstante Temperatur
- Mächtigkeit der Grundwasservorkommen
- Sauberkeit

Grundwasser, welches nicht durch Infiltration eines Oberflächengewässers beeinflusst wird, weist in der Regel eine mittlere Temperatur von 9...11°C auf und ist damit wärmer als das Jahresmittel der Aussenlufttemperatur. Diese höhere Temperatur ist vorwiegend durch Sonneneinstrahlung und die isolierende Wirkung der Schneedecke bedingt. Die geothermische Wärmestrahlung aus dem Erdinnern kann praktisch vernachlässigt werden. Die Lufttemperatur beeinflusst die Grundwassertemperatur mit zunehmender Tiefe weniger. Die jahreszeitliche Verzögerung der Maximal- und Minimalwerte nimmt mit zunehmender Tiefe zu. Die maximale Schwankung beträgt nur etwa 5 K (Bild 28). Grundwasser kann aber durch Infiltration von Oberflächengewässern entscheidend beeinflusst werden (Bild 29). Darauf ist unbedingt zu achten.

Grundwasser ist in den meisten Fällen nicht aggressiv. Eine Wasseranalyse ist aber trotzdem empfehlenswert. Folgende Grenzwerte sind einzuhalten:

- pH-Wert (freies CQ)  $\geq 7$
- Eisenoxydgehalt  $\leq 0,15$  mg/l
- Mangangehalt  $\leq 0,1$  mg/l

Mechanische Verunreinigung (Sand) tritt nur bei unfachmännisch erstellten Filterbrunnenanlagen auf. Nur

fachmännisch erstellte Brunnen garantieren einen einwandfreien Betrieb (Bild 30). Praxisrichtwerte für Bohrdurchmesser sind:

- 150 mm für 50...150 l/min
- 300 mm für 150...300 l/min
- 800 mm für 600...1200 l/min

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Bei Fluss- oder Seenähe muss eine mögliche Infiltration beachtet werden
- Wasserefassung und Rückgabe muss hydrologischen Grundsätzen entsprechen
- Eine Wasseranalyse ist unbedingt empfehlenswert
- Behördliche Bewilligung nötig (wird nur erteilt, wenn keine Trinkwassernutzung erfolgt)

#### Oberflächengewässer

Die relativ grossen Temperaturschwankungen von Oberflächengewässern (Fluss-, See- und 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 (Bild 31); es fliesst eine sehr grosse Wassermenge durch das Register und die Abkühlung ist entsprechend sehr klein
- Das Wasser wird in einem Filterbrunnen gesammelt und zu einem Wärmetauscher gepumpt (Bild 32)

Für die Register-Lösung ist es empfehlenswert, mit einer mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz von maximal 5...6 K zu rechnen. Zur Dimensionierung der Wärmetauscherfläche kann man k-Werte von 200...300 W/m<sup>2</sup>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. 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:

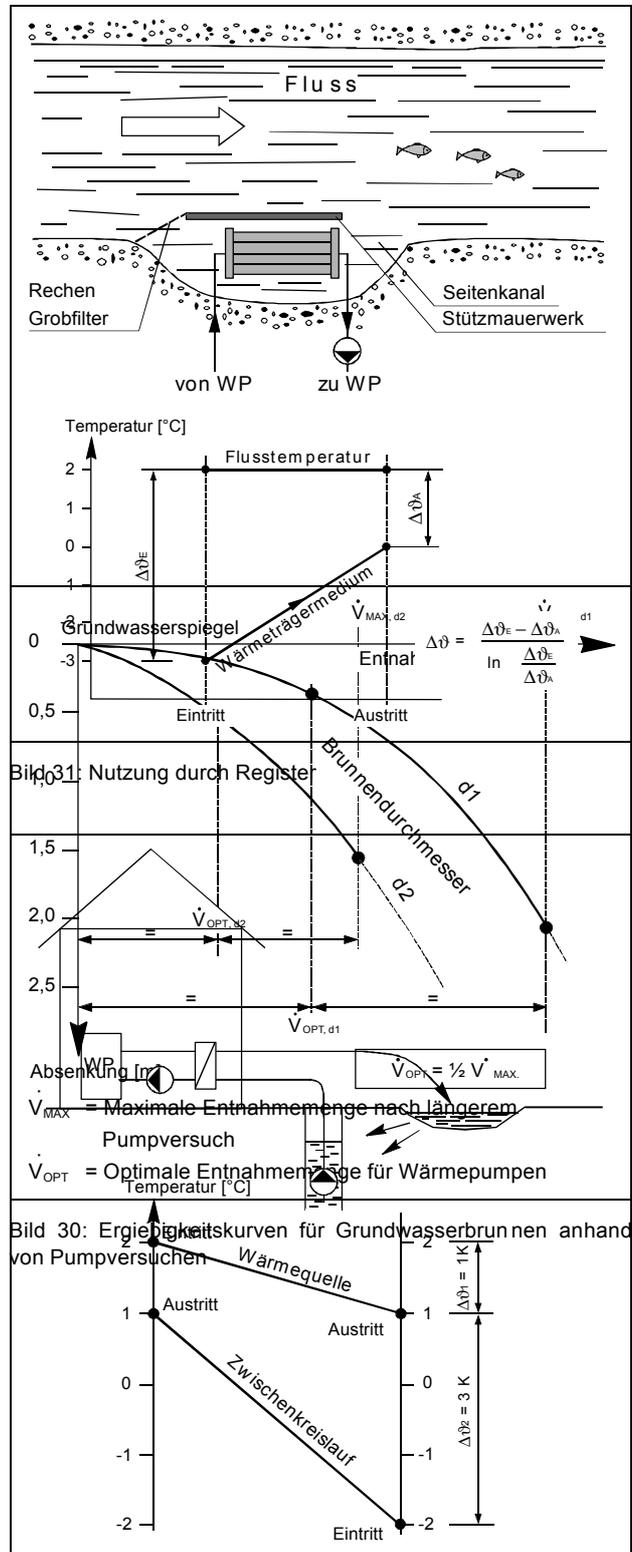


Bild 32: Nutzung mit Filterbrunnen und Zwischenkreis

- Ein Zwischenkreislauf ergibt tiefere Verdampfungstemperaturen und damit schlechtere Leistungszahlen
- Angebot oft schwankend (z.B. Bach)
- Realisierung eher schwierig (speziell die Registerlösung)
- Bewilligungsverfahren und Unterhalt sind bei der Registerlösung möglicherweise sehr aufwendig

#### Erdreich

Die Wärme des Erdreichs bis etwa 2 m Tiefe liefert vorwiegend die Sonne. Die geothermische Wärme beträgt lediglich einige Prozente. Die Wärmekapazität des Erdreichs hängt von dessen Beschaffenheit und Wassergehalt ab. Die Nutzung kann auf zwei Arten erfolgen:

- Horizontal mit Erdregister (Bild 33)
- Vertikal mit Erdwärmesonden (Bild 34)

Erdregister sind eher als «Sonnenkollektoren» zu qualifizieren, die auch die Wärmespeicherkapazität des Erdreichs nutzen. Bodenbeschaffenheit und Witterung sind dabei bezüglich Wärmeentzug massgebend. Bei stetigem Energieentzug sinkt die Erdreichtemperatur relativ stark. Falls die Erdkollektorfläche nicht genügend gross gemacht wird, ist die Kombination mit einer Entlastungseinrichtung sinnvoll (z.B. unverglaster Solarabsorber, Dachregister).

Bei Erdwärmesonden entsteht durch die Auskühlung des Erdreichs eine Art «Temperaturtrichter» (Bild 35), der von der spezifischen Sondenleistung (W/m) abhängt. Intensive Entnahme bedeutet steilen Trichter Verlauf und tiefe Sondentemperatur. Die Jahresarbeitszahl ist umso besser, je geringer der Wärmeentzug pro Meter Sondenlänge ist. In den Betriebspausen erholt sich das Erdreich in der Sondenumgebung wieder. Diese ist zwingend notwendig, weil der geringe Wärmenachfluss aus dem Erdinnern nicht ausreicht, um die Dimensionierungsbedingungen aufrecht zu halten.

Beide Systeme – obwohl grundsätzlich verschieden – haben sich in mehrheitlich kleineren Anlagen gut bewährt. Die Erdwärmennutzung – ohne wesentliche Nutzung der geothermischen Wärme – ist speziell für monovalenten Betrieb geeignet. Besonders wichtig sind nämlich genügend lange Erholungsperioden für das Erdreich. Deshalb ist der bivalent-parallele Betrieb, wegen der langen ununterbrochenen Betriebszeiten, nicht sinnvoll. Ein bivalent-alternativer Betrieb ist denkbar, bedeutet aber einen wesentlich kleineren Anteil am Gesamtwärmebedarf. Es bleibt also nur der monovalente Betrieb oder allenfalls eine bivalente Anlage, bei welcher der

Heizkessel nicht mehr als etwa 10% des Gesamtwärmebedarfs übernehmen muss.

#### Aussenluft

Aussenluft als Wärmequelle hat den grossen Vorteil, dass sie überall verfügbar ist und keine Bewilligung braucht. Sie hat jedoch einige Nachteile, die ihre Nutzung im monovalenten Betrieb in Frage stellen:

- Gegenläufigkeit von Wärmequellentemperatur und Heizsystemtemperatur
- Kondenswasserbildung ab 6...7°C Aussentemperatur führt zu Eisbildung und macht eine Abtauung notwendig
- Geräuschprobleme infolge der grosse Luftmengen
- Relativ grosser Platzbedarf

Ausnahmen für monovalenten Betrieb können dichte und gut wärmegeämmte Bauten mit kleinem Wärmeleistungsbedarf (weniger als 10 kW) oder eine Vorwärmung der Aussenluft über einen Kieselpeicher sein.

Ausserordentlich wichtig sind sorgfältige schalltechnische Abklärungen, unabhängig davon, ob es sich um eine Innen- oder Aussenaufstellung handelt. Die Lärmschutzverordnung und örtliche Vorschriften sind unbedingt zu beachten. Nötigenfalls ist ein Akustiker beizuziehen.

#### Geothermische Wärme

Mit Tiefbohrungen kann geothermische Wärme höherer Temperatur gewonnen werden. Dieses Wasser kann, je nach Temperaturniveau, direkt genutzt oder durch eine Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau angehoben werden. Damit eine wirtschaftlich vertretbare Nutzung möglich ist, darf die Arbeitszahl kaum unter 4,0 liegen. Die geothermische Wärmenutzung gehört in den Bereich der Grosstechnologie (Bild 36) und wird hier deshalb nicht weiter behandelt.

#### Abwärme

Da Abwärmefall und Wärmebedarf oft nicht übereinstimmen, ist eine genaue Analyse erforderlich. Dabei entscheidet sich, ob das Problem mit einem Speicher (Kälte- und/oder wärmeseitig) gelöst werden kann. Eine sinnvolle Speicherbewirtschaftung erlaubt eine optimale Nutzung im Teillastbereich und kann zudem zur Leistungsspitzenbegrenzung benutzt werden (ergibt finanzielle Vorteile).

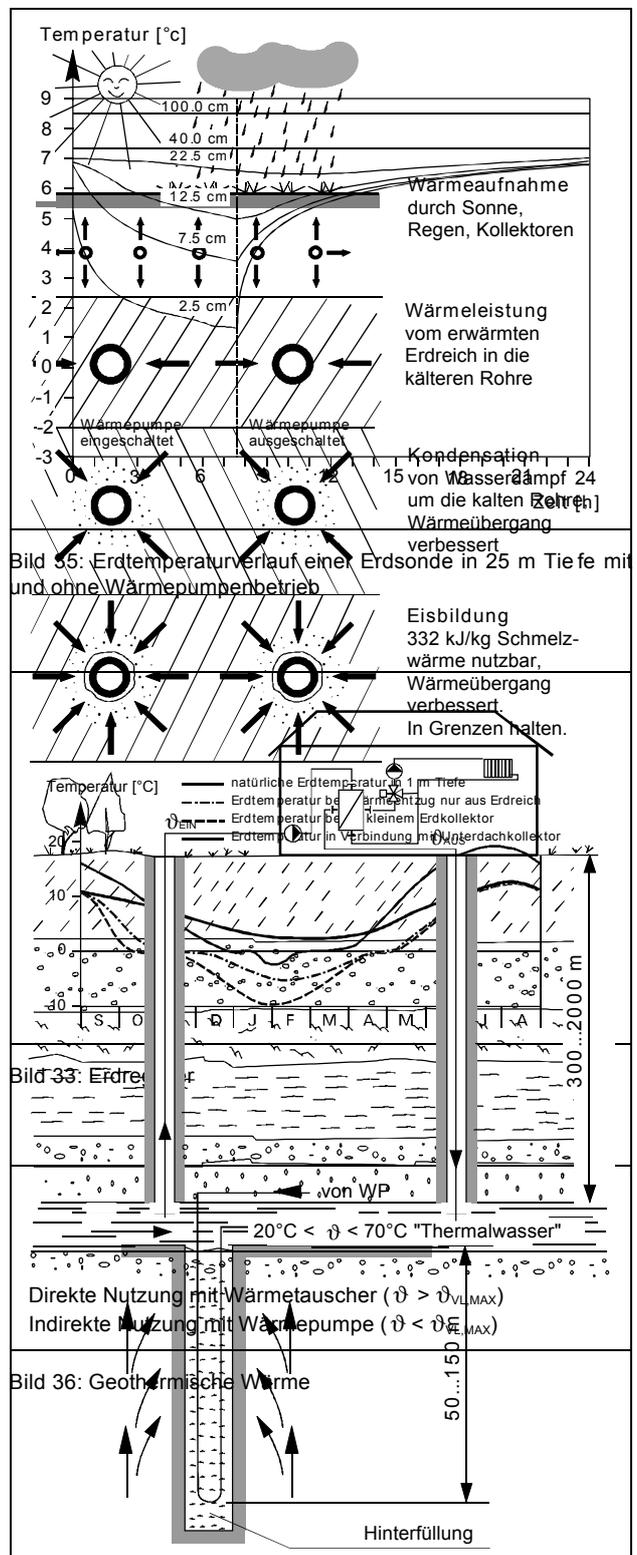


Bild 34: Erdwärmesonde



Bild 37: Welches ist die beste Wärmequelle?

Eine besonders interessante Wärmequelle ist Abwasser, vor allem wegen der relativ hohen Temperatur. Folgendes muss dabei beachtet werden:

- Wegen Verunreinigung meistens nur indirekt nutzbar (entsprechende Materialwahl, automatisiertes Reinigungsverfahren vorsehen)
  - Oft mengenmässig zu geringes Angebot für eine lohnende Nutzung
  - Für öffentliche Abwässer ist eine Bewilligung notwendig
- Abluft als Wärmequelle mit direkter Nutzung ohne Wärmepumpe begegnet man sehr oft bei Wärmerückgewinnungsanlagen. Für eine indirekte Nutzung über eine Wärmepumpe ist sie vor allem zur Wassererwärmung interessant. Abluft kann korrosiv oder verunreinigt sein (Landwirtschaft, Industrie).

Welches ist die beste Wärmequelle?

Diese Frage lässt sich nur schwer beantworten, weil unterschiedliche Beurteilungskriterien möglich sind. Im Sinne des Energiesparens und des Umweltschutzes ist eigentlich nur das Temperaturniveau massgebend. Demnach liesse sich folgende Rangliste erstellen (Bild 37): 1. Abwärme – 2. Grundwasser – 3. Erdwärme – 4. Aussenluft. (Geothermische Wärme würde eigentlich an die erste Stelle gehören, wird hier aber, als Grosstechnologie, nicht berücksichtigt.)

Jede Wärmequelle hat ihre Vor- und Nachteile. Deshalb kann nur durch eine sorgfältige, objektbezogene Analyse eine konkrete Antwort geben werden. Bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung sollten unbedingt zusätzliche Einflüsse wie Umweltschutz, Ressourcen, Recycling und graue Energie mitberücksichtigt werden.

## 2.6 Planungszielwerte

Die Berechnung von Wärmepumpenanlagen ist anspruchsvoll. Dies sollte aber die Planerin oder den Planer nicht dazu verleiten, die Wärmepumpe als «unberechenbar» zu taxieren. Es sollte vielmehr eine Herausforderung sein, alles daran zu setzen, gute Anlagen zu bauen. Die Kennzahlen in Tabelle 39 sollen dabei als Zielwerte dienen. Die Leistungsdaten gelten für die Auslegung bei bestimmten Randbedingungen und sind vom Hersteller zu garantieren. Die Jahresarbeitszahlen gelten für den Betrieb unter wechselhaften Bedingungen und sind vom Planer zu garantieren.

Verschiedene Grössen, welche die Jahresarbeitszahl beeinflussen, führen immer wieder zu Diskussionen. Einige dieser Einflussgrössen werden nachfolgend besprochen und deren Auswirkungen auf eine kleinere und eine grössere Anlage berechnet (Tabelle 38).

 Die verwendeten Zahlenwertformeln werden in Abschnitt 3.2 erklärt. Der Einfachheit halber wird mit der Leistungsdifferenz  $\Delta P$  gerechnet (nicht mit der Druckdifferenz  $\Delta p$  verwechseln!).

#### Einflussgrösse «Produkttoleranz»

Es ist unbedingt empfehlenswert, Serienprodukte mit gesicherten Leistungsangaben zu verwenden. Bei kleinen Serien, deren Leistungszahl im Praxiseinsatz nicht überwacht und gegebenenfalls korrigiert werden kann, ist üblicherweise mit einer Produkttoleranz von  $\pm 10\%$  zu rechnen.

#### Einflussgrösse «Druckverlust von Verdampfer und Verflüssiger»

Oft weisen Wärmepumpen gleicher Leistung sehr unterschiedliche Druckverluste über den Wärmetauschern auf. Dabei kann es sich um Produkte unterschiedlicher Hersteller handeln, aber auch beim gleichen Hersteller sind grössere Unterschiede innerhalb einer Baureihe, je nach Leistungsgrösse, möglich. Es ist deshalb wichtig, dass immer verschiedene Wärmepumpen miteinander verglichen werden.

 Wie verändert sich die Jahresarbeitszahl, wenn in den beiden Anlagen gemäss Tabelle 38 je ein Wärmepumpe mit einem um 40 kPa grösseren Druckabfall über Verdampfer bzw. Verflüssiger eingesetzt wird? Für die kleinere Anlage ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Verd.-Pumpe}} &= 40 \text{ kPa} \cdot 1,2 \text{ m}^3/\text{h} / (3600 \cdot 0,10) \\ &= 0,133 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Verfl.-Pumpe}} &= 40 \text{ kPa} \cdot 0,9 \text{ m}^3/\text{h} / (3600 \cdot 0,10) \\ &= 0,100 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W &= 2500 \text{ h} \cdot (0,133 + 0,100) \text{ kW} \\ &= 583 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} JAZ_{\text{klein}} &= 25'000 \text{ kWh} / (8333 + 583) \text{ kWh} \\ &= 2,80 \end{aligned}$$

Analog gerechnet für die grössere Anlage:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Verd.-Pumpe}} &= 40 \text{ kPa} \cdot 12 \text{ m}^3/\text{h} / (3600 \cdot 0,25) \\ &= 0,533 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Verfl.-Pumpe}} &= 40 \text{ kPa} \cdot 9 \text{ m}^3/\text{h} / (3600 \cdot 0,25) \\ &= 0,400 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\Delta W = 2500 \text{ h} \cdot (0,533 + 0,400) \text{ kW}$$

Wärmequelle	Kleinere Anlage	Grössere Anlage	Ergebnis
Betriebsart	Zahl*	Arbeitszahl	Stufenladung
Betriebsart	Monovalent, konstante Temperatur von JAZ °C	Schichtladung, Verflüssiger Austrittstemperatur von JAZ °C	η <sub>WEA</sub>
Erdwässer	10 kW	100 kW	
Jahreswärmebedarf	25'000 kWh	250'000 kWh	
Direktnutzung	2500 h/a	3,0...3,5	JAZ
Indirektnutzung	8333 kWh	2,8...3,3	JAZ
Jahresarbeitszahl JAZ	3,0		3,0
Verdampferdurchfluss	3,2...3,6 m³/h	2,6...3,1	m³/h = JAZ
Abwasserverflüssigerdurchfluss	0,9 m³/h		9 m³/h
Druckabfall Verflüssiger	3,4...3,9 kPa	2,9...3,4	kPa = JAZ
Pumpenwirkungsgrad	0,10		0,25
Tablette	Die beiden Vergleichsanlagen sind so ausgelegt, dass die Erdsonden mit unterschiedlichen Randbedingungen auf die gleichen Jahresarbeitszahl von 3,0 kommen. Damit können sehr einfach, nur nachrechnen, die Leistungsdaten an beliebigen Stellen abgelesen werden.	3,0...3,2	2,3...2,7
– bivalent-alternativ****	3,0...3,4	2,5...2,9	1,5...2,5

\* Bezogen auf die Jahresmittelwerte der entsprechen den Verdampfer Eintrittstemperatur und 40...45°C Verflüssiger-austrittstemperatur

\*\* Bei Verflüssiger austrittstemperatur 40...45°C

\*\*\* Bilanzgrenze = Wärmeerzeugungsanlage; Kessel im Jahresnutzungsgrad enthalten, je nach Deckungs grad ergeben sich sehr unterschiedliche Werte

\*\*\*\* Bivalenzpunkt 0...3°C

Tabelle 39: Zielwerte für die Kennzahlen von Elektromotorwärmepumpen im schweizerischen Mittelland. Bei monovalentem Betrieb sind Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage und Jahresnutzungsgrad der Wärmeerzeugungsanlage identisch. Als Wert für die Elektro-Thermo-Verstärkung ETV kann in der Praxis die Jahresarbeitszahl verwendet werden.

$$\begin{aligned}
 &= 2333 \text{ kWh} \\
 \text{JAZ}_{\text{gross}} &= 250'000 \text{ kWh} / (83'333 + 2333) \text{ kWh} \\
 &= 2,92
 \end{aligned}$$

Einflussgrösse «Druckverlust der Erdwärmesonden»

Bei Anlagen mit Erdwärmesonden sind die Druckverluste für unterschiedliche Sondendurchmesser, Sondenlängen, Sondenzahlen usw. sorgfältig zu optimieren. Unterschiede von 100 kPa zwischen zwei Varianten sind keine Seltenheit.

 Wie verändert sich die Jahresarbeitszahl, wenn in den beiden Anlagen gemäss Tabelle 38, je eine Erdsondenanlage mit 100 kPa mehr Druckabfall eingebaut wird? Für die kleinere Anlage ergibt sich folgendes Bild:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\text{Verd.-Pumpe}} &= 100 \text{ kPa} \cdot 1,2 \text{ m}^3/\text{h} / (3600 \cdot 0,10) \\
 &= 0,333 \text{ kW} \\
 \Delta W &= 2500 \text{ h} \cdot 0,333 \text{ kW} = 833 \text{ kWh} \\
 \text{JAZ}_{\text{klein}} &= 25'000 \text{ kWh} / (8333 + 833) \text{ kWh} \\
 &= 2,73
 \end{aligned}$$

Und für die grössere Anlage:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{\text{Verd.-Pumpe}} &= 100 \text{ kPa} \cdot 12 \text{ m}^3/\text{h} / (3600 \cdot 0,25) \\
 &= 1,333 \text{ kW} \\
 \Delta W &= 2500 \text{ h} \cdot 1,333 \text{ kW} = 3333 \text{ kWh} \\
 \text{JAZ}_{\text{gross}} &= 250'000 \text{ kWh} / (83333 + 3333) \text{ kWh} \\
 &= 2,88
 \end{aligned}$$

Einflussgrösse «Betriebsart»

Stufenladung und in bestimmten Fällen auch eine Witterungsführung bei Schichtladung ergeben theoretisch eine bessere Jahresarbeitszahl als bei Schichtladung auf einen konstanten Festwert, weil mit tieferen Verflüssiger austrittstemperaturen gefahren werden kann (siehe Abschnitt 2.4). Das ganze funktioniert aber nur, wenn die Anlage auf eine wesentlich kleinere Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger ausgelegt wird. In der Regel ist dazu etwa der doppelte Durchfluss erforderlich, was den Druckabfall über dem Verflüssiger vervierfacht – und dies muss unbedingt berücksichtigt werden.

 Wie verändert sich die Jahresarbeitszahl, wenn in den beiden Anlagen gemäss Tabelle 38 – anstelle von 2500 h mit 47 °C entsprechend einem ε = 3,4 – wie folgt gefahren wird:

- 500 h mit 45°C entsprechend ε = 3,5
- 1000 h mit 42 °C entsprechend ε = 3,75
- 1000 h mit 39 °C entsprechend ε = 4,0

Das entsprechend gewichtete durchschnittliche ε wird dadurch von 3,4 auf 3,8 verbessert. Die JAZ dürfte also

auch etwa um 0,4 Punkte besser ausfallen, also 3,4 anstatt 3,0

Durch die Verdoppelung des Durchflusses wird aber der Druckabfall über dem Verflüssiger vervierfacht. (Vereinfachend wird angenommen, dass der Wegfall des Ladeventils durch den erhöhten Druckverlust im Ladekreis kompensiert wird.) Somit ergibt sich für die kleinere Anlage:

$$\Delta P_{\text{Verfl.-Pumpe}} = \frac{(100 \text{ kPa} \cdot 1,8 \text{ m}^3/\text{h}) - (25 \text{ kPa} \cdot 0,9 \text{ m}^3/\text{h})}{3600 \cdot 0,10}$$

$$= 0,438 \text{ kW}$$

$$\Delta W = 2500 \text{ h} \cdot 0,438 \text{ kW} = 1095 \text{ kWh}$$

$$\text{JAZ}_{\text{klein}} = \frac{25'000 \text{ kWh}}{25'000/3,4 \text{ kWh} + 1095 \text{ kWh}} = 2,96$$

Und für die grössere Anlage:

$$\Delta P_{\text{Verfl.-Pumpe}} = \frac{(100 \text{ kPa} \cdot 18 \text{ m}^3/\text{h}) - (25 \text{ kPa} \cdot 9 \text{ m}^3/\text{h})}{3600 \cdot 0,25}$$

$$= 1,750 \text{ kW}$$

$$\Delta W = 2500 \text{ h} \cdot 1,750 \text{ kW} = 4375 \text{ kWh}$$

$$\text{JAZ}_{\text{gross}} = \frac{250'000 \text{ kWh}}{250'000/3,4 \text{ kWh} + 4375 \text{ kWh}} = 3,21$$



Ob mit Stufenladung tatsächlich eine bessere Jahresarbeitszahl erzielt wird, muss sehr sorgfältig geprüft werden. Der höhere Pumpenstromverbrauch schmälert den Gewinn der tieferen Verflüssigeraustrittstemperatur (Beispiel). Ausserdem führt die kleinere Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger noch zu einer zusätzlichen Verschlechterung der Leistungszahl.

## 2.7 Kosten

### Investitionskosten

Für erste Abklärungen ist es praktisch, wenn spezifische Investitionskosten bekannt sind. In Tabelle 40 sind Zahlen für Wärmepumpen, Erdwärmesonden und Grundwasserbrunnen zusammengestellt.

 Wie eine seriöse Wirtschaftlichkeitsrechnung gemacht wird, wird in Abschnitt 4.7 gezeigt

### Elektrizitätstarife

Erklärtes Ziel von RAVEL ist eine Umweltstrategie. Dies bedeutet, dass rund ein Drittel des in Wärmekraftkoppelungsanlagen produzierten Stromes zum Antrieb von Elektrowärmepumpen eingesetzt werden soll (Bild 1). Daneben sollten auch bestehende Elektroheizungen nach und nach, wo immer dies möglich ist, durch Elektrowärmepumpen ersetzt werden. Es ist also

Wärmepumpe			
Nennheizleistung [kW]	Luft-Wasser L2W35 [Fr./kW]	Sole-Wasser S0W35 [Fr./kW]	Wasser-Wasser W10W35 [Fr./kW]
bis 20	900...1300	700...1100	600...900
21...50	800...1000	550...800	400...600
51...100	750...900	450...600	350...450
101...200	650...800	350...450	250...350
201...300	550...600	250...400	200...300
301...500	400...450	230...260	180...200
Erdwärmesonden inkl. Verbindungsleitungen			
Benötigte Sondenlänge [m/kW]		Spezifische Kosten [Fr./m]	
ca. 15		110...130	
Entnahme- und Rückgabebrunnen für Grundwasser			
Nennheizleistung [kW]	Brunnen-Ø [mm]	Spez. Kosten [Fr./m]	
bis 70	150	400...500	
71...140	300	600...800	
141...550	800	700...1000	

Tabelle 40: Spezifische Kosten von Wärmepumpen und Wärmequellen bezogen auf Nennheizleistung bzw. Laufmeter (Preisbasis 1992)

Berechnungsbeispiel					
Grundpreis (Zählergebühr)	25 Fr./Monat				
Arbeitspreis (Winter):					
– Hochtarif (6.00-22.00 h)	13 Rp./kWh				
– Niedertarif (22.00-6.00 h)	9 Rp./kWh				
Leistungspreis je Monat	12 Fr./kW				
Betriebsdaten:					
– Leistungsaufnahme	20 kW				
– Heizleistung	60 kW				
– Energieverbrauch im HT	30'000 kWh				
– Energieverbrauch im NT	15'000 kWh				
Energiekosten:					
– Grundpreis (12 Monate x 25 Fr.)	300 Fr./a				
– Stromkosten					
HT (0,13 Fr. x 30'000 kWh)	3900 Fr./a				
NT (0,09 Fr. x 15'000 kWh)	1350 Fr./a				
– Leistungspreis (Spitzensperre)	entfällt				
Total Energiekosten:					
– Pro Jahr	5550 Fr./a				
– Pro kWh (555'000 Rp./45'000 kWh)	12,3 Rp./kWh				
Mehrkosten mit Leistungspreis:					
– Pro Jahr (8 Mt. x 20 kW x 12 Fr.)	+1920 Fr./a				
– Pro kWh (192'000 Rp./45'000 kWh)	+4,3 Rp./kWh				
Entwicklung der Elektrizitätstarife in der Schweiz in Rp./kWh (Erhebung bei 162 Elektrizitätswerken):					
1985	1986	1987	1988	1989	1990
13,50	13,78	13,85	14,00	14,17	14,44

Kasten 41

eine energie- und umweltpolitische Notwendigkeit, dass Elektrowärmepumpen gebaut werden. Dies sollte durch einen angemessenen Elektrizitätstarif honoriert werden. Die Schweizerischen Elektrizitätswerke sind in Ihrer Tarifgestaltung heute grundsätzlich autonom. Weder Bund noch Kantone haben die Tarife gesetzlich geregelt. Auf Bundesebene besteht seit 1989 die «Empfehlung für Tarife von leitungsgebundenen Energien», welche jedoch nicht verbindlich ist. Gewisse Tarifvorschriften sind im Rahmen des Energienutzungsbeschlusses von 1990 vorgesehen. Die Elektrizitätstarife unterstehen zudem der Kontrolle des Preisüberwachers. Die folgenden Überlegungen können deshalb nur einen Diskussionsbeitrag zur zukünftigen Tarifgestaltung liefern. Für eine konkurrenzfähige Wärmeversorgung sollte die Kilowattstunde Wärme aus einer Wärmepumpenanlage nicht mehr kosten als eine Kilowattstunde konventionell erzeugter Wärme. Heute ergäbe dies, mit einer Jahresarbeitszahl von 3,0 und einem Gaspreis von 4 Rp./kWh gerechnet, einen mittleren Elektrizitätspreis von 12 Rp./kWh. Als «Gegenleistung» zum günstigen Tarif könnte mit einer unterbrechbaren Stromversorgung gearbeitet werden, da eine 1- bis 2stündige Sperre der Wärmepumpe keine nennenswerte Komforteinbuße ergibt. Kasten 41 zeigt das Wünschbare an einem Beispiel.



## 3. Auslegung

### 3.1. Standardschaltungen

Die speziellen Eigenschaften der Wärmepumpe erlauben es nicht – wie es in der Heizungstechnik leider oft üblich ist – bei Sanierungen und Erweiterungen die neuen Teile der Anlage für sich allein zu betrachten und dementsprechend mit geringstem Aufwand einzubauen. Die Einflüsse der Anlage auf die Randbedingungen der Wärmepumpe sind so vielfältig, dass zwar eine beschränkte Funktionstüchtigkeit mit vielen Kompromissen erreicht werden kann, die optimale Funktionstüchtigkeit der Gesamtanlage aber weit verfehlt wird. Deshalb ist es wichtig, alle Einzelteile der Anlage und deren Auswirkungen sorgfältig zu prüfen und immer die Gesamtanlage als Einheit zu betrachten. Dies ist mit erheblichem Arbeitsaufwand verbunden und man läuft trotzdem Gefahr, irgend eine «Kleinigkeit» zu übersehen.



Standardschaltungen zu verwenden ist der sicherste Weg, um gute Anlagen zu bauen und durch zufriedene Besitzer Erfolg zu haben. Experimentieren lohnt sich nicht! RAVEL hat deshalb einen Katalog bewährter Standardschaltungen zusammengestellt und veröffentlicht:

Heft 5 «Standardschaltungen»

Dort sind auch weitere wichtige Hinweise zu Themen zu finden, die hier nicht weiter behandelt werden, insbesondere:

- Hydraulik mit Dimensionierungsrichtlinien
- Messinstrumente und vorbereitete Messstellen zur Qualitätssicherung
- Freigabekriterien für bivalente Anlagen
- Wassererwärmung

### 3.2 Drei Formeln

Bei der Auslegung einer Anlage interessieren immer wieder die gleichen drei Fragen: «Wie gross muss der Durchfluss sein?», «Wie gross ist die Druckdifferenz bei diesem Durchfluss?» und schliesslich «Wie gross ist der Leistungsbedarf, um diesen Durchfluss zu bewerkstelligen?». Die drei vereinfachten Formeln in Kasten 42 beantworten diese Fragen mit genügender Genauigkeit.

Durchfluss

$$\dot{V} \text{ [m}^3\text{/h]} = 0,86 \frac{\dot{Q} \text{ [kW]}}{\Delta\vartheta \text{ [K]}}$$

Druckdifferenz

$$\Delta p \text{ [kPa]} = 100 \cdot \left( \frac{\dot{V} \text{ [m}^3\text{/h]}}{k_v \text{ [m}^3\text{/h]}} \right)^2$$

oder umgestellt:

$$\dot{V} \text{ [m}^3\text{/h]} = 0,1 \cdot k_v \text{ [m}^3\text{/h]} \cdot \sqrt{\Delta p \text{ [kPa]}}$$

Pumpenleistung

$$P_{\text{hydraul.}} \text{ [kW]} = \frac{\Delta p \text{ [kPa]} \cdot \dot{V} \text{ [m}^3\text{/h]}}{3600}$$

oder mit  $\eta_{\text{Pumpe}} = P_{\text{hydraul.}} / P_{\text{Pumpe}}$ :

$$P_{\text{Pumpe}} \text{ [kW]} = \frac{\Delta p \text{ [kPa]} \cdot \dot{V} \text{ [m}^3\text{/h]}}{3600 \cdot \eta_{\text{Pumpe}} \text{ [-]}}$$

Formelzeichen und Benennungen

$\dot{V}$	= Durchfluss [m <sup>3</sup> /h]
$\dot{Q}$	= Wärmeleistung [kW]
$\Delta\vartheta$	= Temperaturdifferenz [K]
$\Delta p$	= Druckdifferenz [kPa]
$k_v$	= $k_v$ -Wert [m <sup>3</sup> /h]
$P_{\text{hydraul.}}$	= hydraulische Leistung der Pumpe [kW]
$P_{\text{Pumpe}}$	= Leistungsaufnahme der Pumpe [kW]
$\eta_{\text{Pumpe}}$	= Pumpenwirkungsgrad [-]

Wichtiger Hinweis: Diese Formeln gelten für Wasser von 5...95°C. Es handelt sich um Zahlenwertgleichungen, deren Einheiten mathematisch nur aufgehen, wenn auch die Faktoren mit allen Einheiten eingesetzt werden, was in der Praxis aber kaum je gemacht wird.

Der Faktor «0,86» berücksichtigt die spezifische Wärmekapazität und die Dichte von Wasser:

$$0,86 \text{ [m}^3\text{K/kWh]} = \frac{3600 \text{ [s/h]} \cdot 1000 \text{ [W/kW]}}{4190 \text{ [Ws/kgK]} \cdot 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}}$$

Die beiden Faktoren «100» bzw. «0,1» berücksichtigen den Referenzdruck von 1 bar, bei dem die  $k_v$ -Werte messtechnisch bestimmt werden:

$$100 \text{ [kPa]} = 1 \text{ [bar]}$$

$$0,1 \text{ [1/\sqrt{kPa}]} = \sqrt{1/100} \text{ [kPa]}$$

Und schliesslich rechnet der Faktor «3600» noch Stunden in Sekunden um:

$$3600 \text{ [s/h]} = 3600 \text{ [s]} / 1 \text{ [h]}$$

Kasten 42

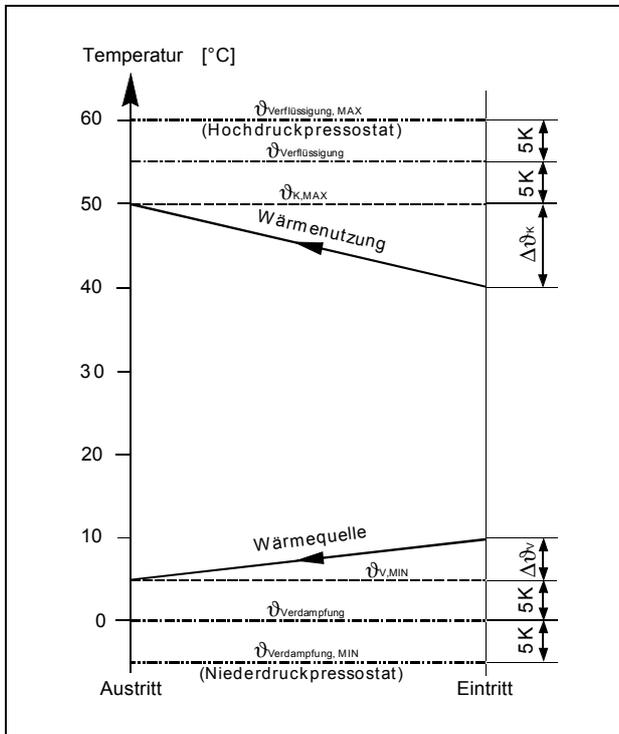


Bild 43: Temperaturniveaus einer Wärmepumpe

### 3.3 Fehlervermeidung

Die Planungsannahmen dienen lediglich der Festlegung der erforderlichen Leistungsdaten in den gegebenen Auslegungspunkten (z.B. Aussenlufttemperatur und dazugehörige Vorlauftemperatur im Auslegungspunkt, im Bivalenzpunkt oder an der Heizgrenze). In der Betriebsrealität sieht die Sache dann ganz anders aus als man es sich in der Planung eigentlich vorgestellt hat. Es ist deshalb wichtig, möglichst alle Einflüsse der Anlage auf die Auslegedaten hin zu überprüfen. Es sollte bereits im voraus der Einfluss veränderter Randbedingungen erkannt und allfällige Korrekturen in Betracht gezogen werden.

Am einfachsten können diese Zusammenhänge anhand von Bild 43 erklärt werden. An den beiden Enden der Temperaturskala stehen die beiden Grenztemperaturen:

- Maximal mögliche Verflüssigungstemperatur, gegeben durch die Einstellung des Hochdruckpressostaten
- Minimal mögliche Verdampfungstemperatur, gegeben durch die Einstellung des Niederdruckpressostaten

Die Überschreitung dieser Temperaturen führt zu einer Hochdruck- bzw. Niederdruckstörung, welche sich aus Sicherheitsgründen nicht selbsttätig aufhebt, sondern von Hand zurückgestellt werden muss. Um dies zu vermeiden, wird die tatsächliche Verflüssigungs- bzw. Verdampfungstemperatur der Anlage mit einem definierten Sicherheitsabstand von etwa 5 K auf diese Grenztemperaturen ausgelegt. Damit ein Wärmetransport stattfindet, ist weiter eine Temperaturdifferenz von etwa 5 K zwischen Verflüssigungstemperatur und Verflüssigeraustrittstemperatur bzw. zwischen Verdampfungstemperatur und Verdampferaustrittstemperatur notwendig.

Die geschilderten Temperaturniveaus sind im tatsächlichen Betrieb nicht so schön konstant wie in Bild 43, sondern sie bewegen sich auf und ab und beeinflussen sich gegenseitig. Die Kunst der Planung besteht nun darin, dafür zu sorgen, dass die beiden Grenztemperaturen in keinem Betriebsfall über- bzw. unterschritten werden. In den Tabellen 44 bis 47 sind die wichtigsten Fehler und deren Vermeidung für die am häufigsten eingesetzten Wärmequellen zusammengestellt.

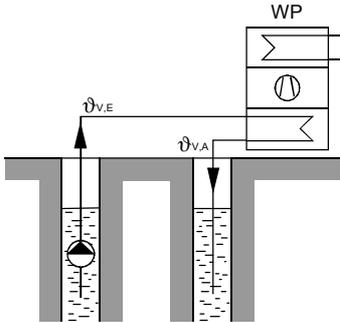
GRUNDWASSER	Planungsannahmen	Betriebsrealität
	<p>Grundwassertemperatur = konstant = 10°C</p> <p>Verdampferaustrittstemperatur = konstant = 4°C (Auflage Bewilligung)</p> <p>Verdampferleistung = konstant</p> <p>Heizleistung = konstant</p> <p>Konstante Grundwassermenge von konstant guter Qualität</p>	<p>Grundwassertemperatur ist ortsabhängig (6...15°C)</p> <p>Verdampferaustrittstemperatur ändert sich je nach Grundwassereintrittstemperatur und Verflüssigeraustrittstemperatur</p> <p>Verdampferleistung = variabel</p> <p>Heizleistung = variabel</p> <p>Nicht optimal ausgeführte Entnahmebrunnen, Wasserspiegelsenkungen und Umwelteinflüsse können diese Annahmen gefährden</p>
Auswirkungen	Ursachen	Beispiele
<p>Niederdruckstörung, Einfrieren des Grundwassers im Verdampfer bzw. im Zwischenwärmetauscher</p> <p>Hochdruckstörung</p> <p>Geforderte Raumtemperatur wird nicht erreicht</p>	<p>Notwendige Verdampferleistung kann nicht zugeführt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Zu kleiner Verdampferdurchfluss infolge Auslegungsfehler oder Verschmutzung</li> <li>– Höhere Verdampferleistung als erwartet infolge tieferer Vorlauftemperatur (Beispiel 1)</li> <li>– Tiefere Wärmequellentemperatur als erwartet (Beispiele 1 und 3)</li> </ul> <p>Verflüssigerleistung kann nicht abgeführt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Zu kleiner Verflüssigerdurchfluss infolge Auslegungsfehler oder Verschmutzung</li> <li>– Höhere Verflüssigerleistung als erwartet infolge höherer Wärmequellentemperatur (Beispiel 2)</li> </ul> <p>Wegen zu tiefer Wärmequellentemperatur kann die erforderliche Heizleistung bzw. Vorlauftemperatur nicht erreicht werden (Beispiel 3)</p>	<p>Auslegungsdaten (W10/W50):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Verdampferleistung = 225 kW</li> <li>– Verflüssigerleistung = 300 kW</li> <li>– Vorlauf-/Rücklauftemperatur = 50/40°C</li> <li>– Eintritts-/Austrittstemperatur Verdampfer = 10/4°C</li> <li>– Verflüssigungstemperatur = 55°C</li> </ul> <p>Beispiel 1: Bei Vorlauftemperatur 35°C steigt die Verdampferleistung auf 269 kW. Damit sinkt die Verdampferaustrittstemperatur auf <math>10 - (6 \cdot 269/225) = 2,8^\circ\text{C}</math> anstatt der geforderten 4°C. Wenn nun noch zusätzlich die Grundwassertemperatur unter 10°C sinkt, sieht das Resultat noch schlimmer aus.</p> <p>Beispiel 2: Bei Wärmequellentemperatur 15°C steigt die Verflüssigerleistung auf 353 kW. Damit kann die Vorlauftemperatur auf <math>40 + (10 \cdot 353/300) = 52^\circ\text{C}</math> ansteigen, d.h. Sicherheitsabstand nur noch 3 K!</p> <p>Beispiel 3: Bei Verdampferaustrittstemperatur 6°C wird nur eine Verdampferleistung von 184 kW bzw. eine Verflüssigerleistung von 252 kW erreicht, entsprechend einer Vorlauftemperatur von <math>40 + (10 \cdot 252/300) = 48^\circ\text{C}</math> anstatt 50°C. Zudem beträgt dann die Verdampferaustrittstemperatur gerade noch <math>6 - (6 \cdot 184/225) = 1,1^\circ\text{C}</math>.</p>
Empfehlungen	Faustregeln	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Verdampferseitig speziell beachten: maximal mögliche Wärmequellenleistung, minimal auftretende Wärmequellentemperatur, minimal zugelassene Verdampferaustrittstemperatur</li> <li>– Verflüssigerseitig speziell beachten: quellen- und verbraucherseitige Leistungsschwankungen, Sicherheitsabstand zur maximal zugelassenen Verflüssigungstemperatur mindestens 5 K</li> <li>– Bei Neuanlagen Wärmeabgabesystem aufgrund der Forderungen der Wärmepumpe auslegen – und nicht umgekehrt!</li> <li>– Verdampferaustrittsregelung empfehlenswert bei Temperaturschwankungen der Wärmequelle &gt; 8 K</li> <li>– Bei fehlender Langzeiterfahrung eine Indirektnutzung vorsehen (eine Wasseranalyse ist immer eine «Momentaufnahme»)</li> <li>– Entnahmebrunnen durch qualifizierte Fachfirma bauen lassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fördermenge der Grundwasserfassung auf weniger als 50% der maximal möglichen Filterbrunnenleistung auslegen</li> <li>– Verdampferdurchfluss nach W10/W35 auslegen</li> <li>– Wärmetauscherlegung bei Indirektnutzung ebenfalls nach W10/W35</li> <li>– Grundwasserabkühlung &lt; 8 K, Erfahrungswert 4...5 K</li> </ul>	

Tabelle 44: Hinweise zur Fehlervermeidung bei Grundwasser als Wärmequelle

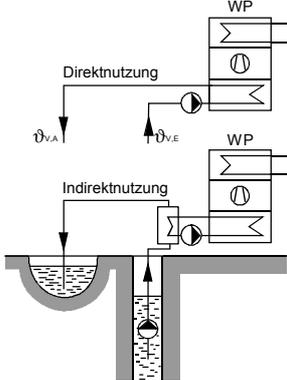
OBERFLÄCHENWASSER	Planungsannahmen	Betriebsrealität
	<p>Oberflächenwassertemperatur = in etwa konstant</p> <p>Verdampferaustrittstemperatur = konstant <math>\geq 2^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Verdampferleistung = konstant</p> <p>Heizleistung = konstant</p> <p>Konstante Oberflächenwassermenge von konstant guter Qualität</p>	<p>Grosse Temperaturschwankung des Oberflächenwassers (wesentlich grösser als bei Grundwasser)</p> <p>Minimal zulässige Verdampferaustrittstemperatur von <math>2^{\circ}\text{C}</math> wird bei zu tiefer Oberflächentemperatur unterschritten (auch bei zu tiefer Verflüssigeraustrittstemperatur)</p> <p>Verdampferleistung = variabel (stärker variabel als Grundwasser)</p> <p>Heizleistung = variabel (stärker variabel als Grundwasser)</p> <p>Mengenschwankungen, Erosion, Korrosion, Algenbildung, Wandermuscheln, Geröll usw. gefährden diese Annahmen</p>
<p><b>Auswirkungen</b></p> <p>Niederdruckstörung, Einfrieren des Oberflächenwassers im Verdampfer bzw. im Zwischenwärmetauscher</p> <p>Hochdruckstörung</p> <p>Geforderte Raumtemperatur wird nicht erreicht</p>	<p><b>Ursachen</b></p> <p>Notwendige Verdampferleistung kann nicht zugeführt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zu kleiner Verdampferdurchfluss infolge Auslegungsfehler oder Verschmutzung</li> <li>- Höhere Verdampferleistung als erwartet infolge tieferer Vorlauftemperatur</li> <li>- Tiefere Wärmequellentemperatur als erwartet (Beispiel 1)</li> </ul> <p>Verflüssigerleistung kann nicht abgeführt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zu kleiner Verflüssigerdurchfluss infolge Auslegungsfehler oder Verschmutzung</li> <li>- Höhere Verflüssigerleistung als erwartet infolge höherer Wärmequellentemperatur (Beispiel 2)</li> </ul> <p>Wegen zu tiefer Wärmequellentemperatur kann die erforderliche Heizleistung bzw. Vorlauftemperatur nicht erreicht werden (Beispiel 1)</p>	<p><b>Beispiele</b></p> <p>Auslegungsdaten (W10/W50):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verdampferleistung = 225 kW</li> <li>- Verflüssigerleistung = 300 kW</li> <li>- Vorlauf-/Rücklauftemperatur = <math>50/40^{\circ}\text{C}</math></li> <li>- Eintritts-/Austrittstemperatur Verdampfer = <math>10/4^{\circ}\text{C}</math></li> <li>- Verflüssigungstemperatur = <math>55^{\circ}\text{C}</math></li> </ul> <p>Beispiel 1: Bei Verdampfer Eintrittstemperatur <math>4^{\circ}\text{C}</math> wird nur eine Verdampferleistung von 173 kW bzw. eine Verflüssigerleistung von 240 kW erreicht, entsprechend einer Vorlauftemperatur von <math>40 + (10 \cdot 240/300) = 48^{\circ}\text{C}</math> anstatt <math>50^{\circ}\text{C}</math>. Zudem beträgt dann die Verdampferaustrittstemperatur gerade noch <math>4 - (6 \cdot 173/225) = -0,6^{\circ}\text{C}</math>, d.h. akute Frostgefahr!</p> <p>Beispiel 2: Bei Wärmequellentemperatur <math>15^{\circ}\text{C}</math> steigt die Verflüssigerleistung auf 353 kW. Damit kann die Vorlauftemperatur auf <math>40 + (10 \cdot 353/300) = 52^{\circ}\text{C}</math> ansteigen, d.h. Sicherheitsabstand nur noch 3 K!</p>
<p><b>Empfehlungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ohne langfristig gesicherte Daten und grosse praktische Erfahrung ist eine Realisierung problematisch</li> <li>- Monovalenter Betrieb mit Direktnutzung ist in der Regel nicht möglich</li> <li>- Indirektnutzung mit Filterbrunnen ist die sicherste Lösung</li> <li>- Verdampferseitig speziell beachten: maximal mögliche Wärmequellenleistung, minimal auftretende Wärmequellentemperatur, minimal zugelassene Verdampferaustrittstemperatur</li> <li>- Verflüssigerseitig speziell beachten: quellen- und verbraucherseitige Leistungsschwankungen, Sicherheitsabstand zur maximal zugelassenen Verflüssigungstemperatur mindestens 5 K</li> <li>- Bei Neuanlagen Wärmeabgabesystem aufgrund der Forderungen der Wärmepumpe auslegen – und nicht umgekehrt!</li> <li>- Verdampferaustrittsregelung empfehlenswert bei Temperaturschwankungen der Wärmequelle <math>&gt; 8\text{K}</math> (bei Flusswasser immer der Fall)</li> <li>- Verflüssigeraustrittsregelung empfehlenswert</li> <li>- Filterbrunnen durch qualifizierte Fachfirma bauen lassen</li> <li>- Gewährleistung der Betriebssicherheit erfordert einen relativ grossen Aufwand</li> </ul>	<p><b>Faustregeln</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verdampferdurchfluss im Zwischenkreis nach W10/W35 auslegen</li> <li>- Wärmetauscher auslegung bei Indirektnutzung ebenfalls nach W10/W35</li> </ul>	

Tabelle 45: Hinweise zur Fehlervermeidung bei Oberflächenwasser als Wärmequelle

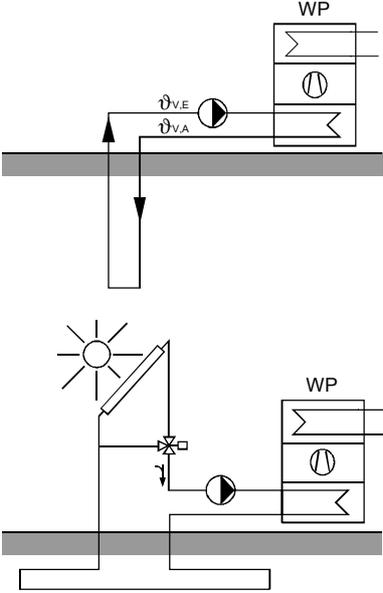
ERDREICH (Erdwärmesonden, Erdregister)	Planungsannahmen	Betriebsrealität
 <p>Erdregister mit solarer Nachladung: Sonnenkollektor vor Erdregister nicht empfehlenswert, weil dann das Erdregister um die Rohre zu stark austrocknet und so die Entzugsleistung verschlechtert</p>	<p>Unbegrenzte, konstante Wärmequellenleistung</p> <p>Angeblich besonders leistungsfähige Sonden werden bevorzugt</p> <p>Auslegung auf möglichst lange Laufzeiten</p> <p>Möglichst knappe Auslegung allein aufgrund von Leistungsdaten</p>	<p>In Wirklichkeit ist</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– die Wärmeflussdichte gering</li> <li>– die Entzugsdauer beschränkt</li> <li>– das Jahresangebot konstant gegeben</li> </ul> <p>Messungen ergaben keine wesentlichen Unterschiede</p> <p>Zu lange Laufzeiten führen zu Überbelastung des Erdreichs infolge zu kurzer Erholungszeiten</p> <p>Nicht die Leistungsdaten, sondern die Nutzungszeiten sind letztendlich entscheidend</p>
Auswirkungen	Ursachen	Beispiel
<p>Niederdruckstörung</p> <p>Hochdruckstörung</p> <p>Geforderte Raumtemperatur wird nicht erreicht</p>	<p>Notwendige Verdampferleistung kann nicht zugeführt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Erdreich «erschöpft» (siehe Beispiel)</li> <li>– Zu kleiner Verdampferdurchfluss infolge Auslegungsfehler oder falscher Frostschutzmittel-Konzentration</li> </ul> <p>Verflüssigerleistung kann nicht abgeführt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Zu kleiner Verflüssigerdurchfluss infolge Auslegungsfehler oder Verschmutzung</li> </ul> <p>Infolge «erschöpftem» Erdreich kann die erforderliche Heizleistung bzw. Vorlauftemperatur nicht erreicht werden</p>	<p>Auslegungsdaten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Verdampferleistung = 6 kW</li> <li>– Verflüssigerleistung = 10 kW</li> <li>– Zulässige Entzugsleistung der Erdwärmesonden = 6 kW während maximal 16 Betriebsstunden bei 8 h Erholungszeit</li> </ul> <p>Ein Tageswärmebedarf von mehr als 160 kWh führt zu mehr als 16 Betriebsstunden pro Tag. Dadurch wird das Erdreich zu stark belastet und Permafrostbildung kann die Folge sein.</p>
Empfehlungen	Faustregeln	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Wärmepumpenleistung nicht zu knapp auslegen (genügend lange Erholungszeiten)</li> <li>– Entzugsleistung niedrig halten</li> <li>– Bei Erdwärmesonden Länge, Anzahl und Durchmesser auf möglichst geringen Druckverlust optimieren</li> <li>– Bei Erdregister Stranglänge und Anzahl der Stränge auf möglichst geringen Druckverlust optimieren</li> <li>– Bei Neuanlagen Wärmeabgabesystem aufgrund der Forderungen der Wärmepumpe auslegen – und nicht umgekehrt!</li> <li>– Erdwärmesonden durch qualifizierte Fachfirma bauen lassen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Jährliche Entzugsdauer maximal 2000 h</li> <li>– Entzugsleistung aufgrund S0W35 bestimmen</li> </ul> <p>Für Erdwärmesonden gilt (schweizerisches Mittelland):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Entzugsleistung pro Laufmeter Sonde 50 W/m</li> <li>– Sondenlänge pro Kilowatt Heizleistung 15 m/kW</li> </ul> <p>Für Erdregister gilt (schweizerisches Mittelland):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Maximale Jahresentzugsmenge pro Quadratmeter Erdregisterfläche 70 kWh/m<sup>2</sup>a</li> <li>– Entzugsleistung pro Quadratmeter Erdregisterfläche ohne solare Nachladung 15...20 W/m<sup>2</sup>, mit solarer Nachladung 30...40 W/m<sup>2</sup></li> <li>– Erdregisterfläche pro Kilowatt Heizleistung ohne solare Nachladung 42...55 m<sup>2</sup>, mit solarer Nachladung 20...27 m<sup>2</sup></li> </ul>	

Tabelle 46: Hinweise zur Fehlervermeidung beim Erdreich als Wärmequelle (Erdwärmesonden, Erdregister)

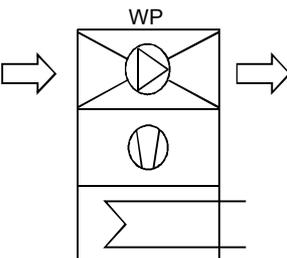
AUSSENLUFT	Planungsannahmen	Betriebsrealität
	<p>Heizleistung = konstant</p> <p>Rechnerische minimale Aussentemperatur im Auslegepunkt ist die tiefste je vorkommende Aussentemperatur</p> <p>Wärmequellenanlage wird mit der Wärmepumpe geliefert und stellt deshalb keine Ansprüche an die Planung</p> <p>Unterbrechung bei Abtaubetrieb kann vernachlässigt werden</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Heizleistung an der Heizgrenze etwa 2,5mal grösser als im Auslegepunkt</li> <li>– Heizleistungsabnahme durch Vereisung des Verdampfers</li> <li>– Beeinflussung durch örtlich erhöhte Luftfeuchtigkeit</li> <li>– Beeinträchtigung durch Abtaubetrieb</li> </ul> <p>Kurzfristig können wesentlich tiefere Aussentemperaturen vorkommen und während dieser Zeit kann die Wärmepumpe die geforderte Heizleistung nicht erbringen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Sekundärmassnahmen (Kanäle, Schalldämpfer) reduzieren die Nennluftmenge</li> <li>– Kondensatbildung, Abtauwasserrückstau, Vereisung, Aufstellungsräume mit «Waschküchenklima» usw. führen zu unerwarteten Problemen</li> </ul> <p>Längere Abtauzeiten als erwartet (z.B. infolge zu kleiner Druckdifferenz bei Heissgasabtauung)</p>
Auswirkungen	Ursachen	Beispiel
<p>Niederdruckstörung</p> <p>Hochdruckstörung</p> <p>Heissgastemperaturstörung</p> <p>Geforderte Raumtemperatur wird nicht erreicht</p>	<p>Notwendige Verdampferleistung kann nicht zugeführt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Aussentemperatur zu tief (falsche Auslegung oder fehlender Ausschaltbefehl bei bivalentem Betrieb)</li> <li>– Zu kleiner Verdampferdurchsatz infolge Auslegungsfehler, Vereisung, Verschmutzung oder zu hohem Druckabfall im Kanal</li> </ul> <p>Verflüssigerleistung kann nicht abgeführt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Viel höhere Verflüssigerleistung als erwartet (bis zu 2,5fach, siehe Beispiel)</li> <li>– Zu kleiner Verflüssigerdurchfluss infolge Auslegungsfehler oder Verschmutzung</li> </ul> <p>Falsche Auslegung oder fehlender Ausschaltbefehl führt zu Störung infolge unzulässig tiefer Aussentemperatur</p> <p>Wegen zu tiefer Aussentemperatur kann die erforderliche Heizleistung bzw. Vorlauftemperatur nicht erreicht werden.</p>	<p>Auslegungsdaten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Verdampferleistung = 75 kW bei L-10/W50</li> <li>– Verdampferleistung = 161 kW bei W15/W35</li> <li>– Vorlauf-/Rücklauftemperatur = 50/40°C</li> <li>– Verflüssigungstemperatur = 55°C</li> </ul> <p>Bei 15°C Aussentemperatur ergibt sich eine Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger von: 10 K -161 kW / 75 kW = 22 K</p> <p>Wenn der Ausschaltpunkt fest auf die tiefste Rücklauftemperatur von 40°C eingestellt ist, führt dies im Extremfall zu einer Vorlauftemperatur von 62°C, was zwangsläufig eine Hochdruckstörung zur Folge hat.</p> <p>Abhilfe: Auslegung auf kleinere Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger und niedrigere Vorlauf-/Rücklauftemperatur oder witterungsgeführte Ausschalttemperatur</p>
Empfehlungen	Faustregeln	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– In der Regel nur für bivalenten Betrieb geeignet</li> <li>– Monovalenter Betrieb kann in Kleinanlagen mit weniger als 10 kW Heizleistung und sehr niedriger Vorlauf-/Rücklauftemperatur geprüft werden (dasselbe gilt für den monoenergetischen Betrieb, siehe Abschnitt 2.3)</li> <li>– Art der Abtauung und deren Auswirkungen sorgfältig prüfen</li> <li>– Frühzeitig Schallschutzmassnahmen berücksichtigen</li> <li>– Bei der Auslegung unbedingt berücksichtigen, dass die Verflüssigerleistung ausserordentlich grossen Schwankungen unterworfen ist (bis zu 2,5fach!)</li> <li>– Auslegung auf kleine Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger und niedrige Vorlauf-/Rücklauftemperatur sowie witterungsgeführte Ausschalttemperatur vorsehen</li> </ul>	<p>Wegen der stark variablen Heizleistung ist die Aufstellung von Faustregeln gefährlich. Tendenziell am wenigsten Probleme ergeben sich, bei:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– möglichst kleiner Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger, d.h. möglichst grossem Durchfluss (bedeutet aber hohen Pumpenstromverbrauch!)</li> <li>– Auslegung der Wärmeabgabe auf möglichst tiefe Vorlauf-/Rücklauftemperatur (bei Sanierungen nicht mehr beeinflussbar!)</li> </ul>	

Tabelle 47: Hinweise zur Fehlervermeidung bei Aussenluft als Wärmequelle

### 3.4 Speicher

#### Hydraulische Entkopplung

Auf der Wärmepumpenseite und der Verbraucheseite sind Kreisläufe mit unterschiedlichen Durchflüssen. Diese müssen voneinander entkoppelt werden. Im einfachsten Fall geschieht dies durch einen Bypass. Um auch noch gleichzeitig den Leistungsüberschuss aufnehmen zu können, wird bei der Wärmepumpe im Normalfall ein sehr «dicker» Bypass in Form eines Speichers gebaut (Ausnahme: siehe Kasten 48).

#### Technischer Speicher, Wärmespeicher

Der Verflüssiger hat nur einen sehr kleinen Wasseinhalt. Seine Verhaltensweise gleicht einem Durchlauferhitzer. Dies würde, infolge Überleistung während der meisten Zeit der Heizperiode, zu einer viel zu hohen Schalthäufigkeit führen. Deshalb ist eine minimale Speichergrösse erforderlich. In bestimmten Fällen ist auch noch eine grössere Speicherfähigkeit zur Überbrückung betrieblich bedingter Unterbüche wünschenswert. Es ist zweckmässig, wie folgt zu unterscheiden:

- Technischer Speicher – gewissermassen als «notwendiges Übel» – zur Gewährleistung einer maximal zulässigen Schalthäufigkeit
  - Wärmespeicher zur Speicherung grösserer Wärmemengen über einen längeren Zeitraum
- Funktionen, Definitionen und Berechnungshinweise enthält Tabelle 51.

#### Stufenladung, Schichtladung

Ferner muss nach der Art der Speicherladung unterschieden werden:

- Bei der Stufenladung geschieht die Ladung stufenweise in mehreren Durchgängen mit steigender Verflüssigeraustrittstemperatur. Sie wird bevorzugt bei kleineren Anlagen mit einer Heizgruppe angewandt (siehe auch Kasten 49).
- Bei der Schichtladung erfolgt die Ladung schichtweise in einem einzigen Durchgang mit konstanter Verflüssigeraustrittstemperatur.

Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale und Auslegungsempfehlungen sind in Tabelle 52 zusammengestellt.

#### Anlagen ohne Speicher

Dem technischen Speicher werden bei Klein- und Kleinstanlagen oft die Investitionskosten, der Platzbedarf und die Wärmeverluste vorgeworfen. Ein technischer Speicher hat aber so viele Vorteile, dass ein Verzicht nur in seltensten Fällen gerechtfertigt ist.



Auf einen technischen Speicher sollte nur verzichtet werden, wenn die folgenden Voraussetzungen vollständig erfüllt sind:

- Annähernd konstante Wärmequellenleistung (maximal 5 K Temperaturschwankung)
- Heizwasservolumen der Anlage grösser als 15 l/kW
- Gute Speicherfähigkeit des Wärmeabgabesystems (z.B. träge Fussbodenheizung)
- Keine oder nur wenige Thermostatventile (im Einfamilienhaus möglich, steht aber bei mehr als vier Parteien im Widerspruch zur verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung, die eine individuelle Raumtemperaturregelung vorschreibt)
- Steuerung, Regelung und Hydraulik müssen von der Quelle bis zur Abgabe als Gesamtsystem ausgelegt, einreguliert und optimiert werden
- Ein hydraulischer Abgleich ist unabdingbar notwendig

Kasten 48

#### Wann ist Stufenladung sinnvoll?

Stufenladung ist billig und ergibt eher eine etwas bessere Jahresarbeitszahl als Schichtladung. Dem stehen aber verschiedene schwer kalkulierbare Faktoren gegenüber (siehe Tabellen 52 bis 55):

- Zusätzlicher Pumpenstromverbrauch (siehe letztes Beispiel in Abschnitt 2.6)
  - Vorlauftemperaturschwankungen
  - Rückwirkung auf Verdampfer beim Anfahren
  - Unterdeckung beim ersten Durchgang
- Insbesondere der letztgenannte Punkt könnte nur verhindert werden, wenn die Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger entsprechend der Auslegtemperaturdifferenz gewählt würde. Damit würde aber die Stufenladung so gut wie sinnlos, weil sich im besten Fall nur an der Heizgrenze wenigstens zwei Durchgänge ergäben.



Eine Stufenladung ist nur unter den folgenden Voraussetzungen zu empfehlen:

- Kleinanlage (vor allem wegen des Preisvorteils!)
- Eine einzige Heizgruppe
- Nur für technische Speicher

Kasten 49

Formelzeichen	
$Q_{SP}$	= Speicherkapazität [kWh]
$Q_K$	= Heizleistung Verflüssiger [kW]
$V_{SP}$	= Speicherinhalt [m <sup>3</sup> ]
$V_K$	= Verflüssigerdurchfluss [m <sup>3</sup> /h]
$\vartheta_{EIN}$	= Einschalttemperatur [°C]
$\vartheta_{AUS}$	= Ausschalttemperatur [°C]
$\vartheta_{VL/RL}$	= Vorlauf-/Rücklauftemperatur [°C]
$\vartheta_{K,MAX}$	= max. Verflüssigeraustrittstemperatur [°C]
$\vartheta_{Ladung}$	= Ladetemperatur [°C]
$\Delta\vartheta_K$	= Temperaturdifferenz über Verflüssiger [K]
$\Delta\vartheta_{Bivalenz}$	= Temperaturdiff. VL-RL Bivalenzpunkt [K]
$\Delta\vartheta_{Auslegung}$	= Temperaturdiff. VL-RL Auslegepunkt [K]

Kasten 50

Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger, Ein- und Ausschaltpunkt

Nachdem festgelegt wurde, welcher Speichertyp (technischer Speicher oder Wärmespeicher?) und welche Ladungsart (Stufenladung oder Schichtladung?) eingesetzt werden soll, müssen vor allem drei Grössen festgelegt werden:

- Die Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger bestimmt Fördermenge, Förderhöhe und Stromverbrauch der Verflüssigerpumpe
- Der Einschaltpunkt des oberen Speicherfühlers bestimmt, wann der Speicher «leer» ist und die Wärmepumpe eingeschaltet werden muss
- Der Ausschaltpunkt des unteren Speicherfühlers (oder Fühler im Rücklauf zur Wärmepumpe) legt fest, wann der Speicher «voll» ist und die Wärmepumpe ausgeschaltet werden muss

Auslegungsempfehlungen und Beispiele sind in den Tabellen und Bildern 52 bis 55 zusammengestellt. Als Auslegtemperaturdifferenz der Wärmenutzungsanlage wurde generell 15 K gewählt (Fussbodenheizungen werden oft auf 10 K ausgelegt).

Technischer Speicher	Wärmespeicher
<b>Funktionen</b> – Hydraulische Entkopplung – Reduzierte Schalzhäufigkeit (Anforderung Elektrizitätswerk, längere Lebensdauer des Verdichters) – Wärmequelle für die Abtauung (nur bei Luft-Wasser-Wärmepumpe)	<b>Funktionen</b> Als zusätzliche Funktionen gegenüber dem technischen Speicher erfolgt eine Wärmespeicherung über einen längeren Zeitraum: – Grösserer Anteil Niedertarifstrom – Überbrückung längerer Sperrzeiten (dazu muss allerdings der Zeitpunkt bekannt sein) – Überbrückung von Angebotslücken der Wärmequelle (speziell bei Abwärmenutzung)
<b>Definition</b> Maximale Schalzhäufigkeit $n = 2 \dots 3$	<b>Definition</b> Maximale Schalzhäufigkeit $n < 2$
Speicherinhalt $V_{SP,MIN}$ für eine bestimmte maximale Schalzhäufigkeit $n$ $V_{SP,MIN} [m^3] = 0,22 \frac{Q_K [kW]}{n [-] \cdot \Delta\vartheta [K]}$ $\Delta\vartheta_{Stufenladung} = \left( \frac{\vartheta_{K,MAX} - \vartheta_{AUS}}{2} + \vartheta_{RL} \right) [K]$ $\Delta\vartheta_{Schichtladung} = \vartheta_{Ladung} - \vartheta_{RL} [K]$ $Q_K$ und $\Delta\vartheta$ sind auf 50% Last zu beziehen (grösste Schalzhäufigkeit). Wenn diese auf den Auslegepunkt (monovalente Anlagen) bzw. auf den Bivalenzpunkt (bivalente Anlagen) bezogen werden, ist man meist auf der sicheren Seite.	Speicherinhalt $V_{SP}$ für eine bestimmte Speicherkapazität $Q$ $V_{SP} [m^3] = 0,86 \frac{Q [kWh]}{\Delta\vartheta [K]}$ Für $\Delta\vartheta$ ist die für das Speichervermögen massgebende Temperaturdifferenz im betrachteten Betriebspunkt einzusetzen, in der Regel: $\Delta\vartheta_{Stufenladung} = \left( \frac{\vartheta_{K,MAX} - \vartheta_{AUS}}{2} + \vartheta_{RL} \right) [K]$ $\Delta\vartheta_{Schichtladung} = \vartheta_{Ladung} - \vartheta_{RL} [K]$ $V_{SP}$ muss als nutzbarer Speicherinhalt zur Verfügung stehen. Der tatsächliche Speicherinhalt ist deshalb um das Volumen über dem Einschaltfühler, das Volumen unter dem Ausschaltfühler und evtl. die Mischzone zu vergrössern.

Tabelle 51: Unterscheidung technischer Speicher und Wärmespeicher (Formelzeichen siehe Kasten 50)

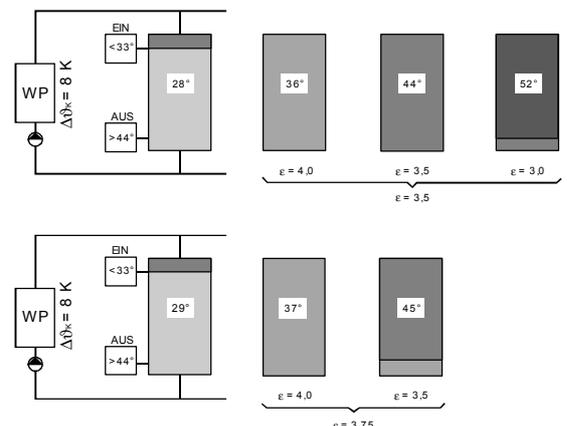
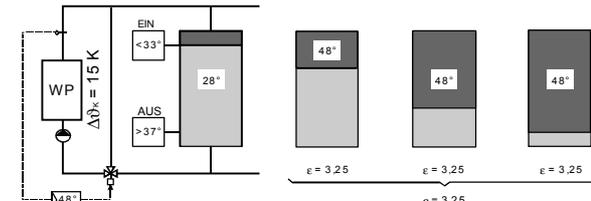
Stufenladung		Schichtladung	
			
<p><b>Beschreibung</b> Der Speicher wird stufenweise in mehreren Durchgängen mit steigender Verflüssigeraustrittstemperatur geladen. Der Speicher kann nicht auf eine exakte Endtemperatur geladen werden. Diese schwankt um die Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger.</p> <p><b>Vorteile:</b> Tiefere Verflüssigungstemperatur Geringere Kosten (keine Laderegelung)</p> <p><b>Nachteile:</b> Speichertemperatur schlechter beherrschbar Vorlauftemperaturschwankungen beim Laden Unterdeckung im ersten Durchgang Grössere Verflüssigerpumpeleistung Speicherkapazität nicht maximal genutzt Schlechtere Schichtung Rückwirkung auf Verdampfer (spez. Anfahren!)</p>		<p><b>Beschreibung</b> Der Speicher wird in einem Durchgang mit konstanter Verflüssigeraustrittstemperatur schichtend geladen. Es kann exakt auf einen bestimmten Sollwert geladen werden. Dieser Sollwert kann witterungsgeführt sein.</p> <p><b>Vorteile:</b> Exakte Beherrschung der Speichertemperatur Konstante Vorlauftemperatur garantiert Keine Unterdeckung Kleinere Verflüssigerpumpeleistung Maximale Nutzung der Speicherkapazität Bessere Schichtung Keine Rückwirkung auf den Verdampfer</p> <p><b>Nachteile:</b> Höhere Verflüssigungstemperatur Höhere Kosten (Laderegelung)</p>	
<p><b>Verflüssigerdurchfluss <math>V_K</math></b> <math>V_K [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \cdot Q_K [\text{kW}] / \Delta\vartheta_K [\text{K}]</math> Es muss ein Kompromiss getroffen werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Möglichst grosser Durchfluss, damit Verflüssigungstemperatur tief, Speichertemperaturschwankung klein und Speicherkapazität gross</li> <li>– Möglichst kleiner Durchfluss, damit Verflüssigerpumpeleistung klein</li> </ul> <p>Empfehlung Auslegetemperaturdifferenz Verflüssiger <math>\Delta\vartheta_K</math>:</p>		<p><b>Verflüssigerdurchfluss <math>V_K</math></b> <math>V_K [\text{m}^3/\text{h}] = 0,86 \cdot Q_K [\text{kW}] / \Delta\vartheta_K [\text{K}]</math> Im allgemeinen gilt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Bei annähernd konstanter Wärmequellenleistung kann auf minimalen Durchfluss dimensioniert werden (bei Witterungsführung evtl. höherer Durchfluss sinnvoll)</li> <li>– Bei variabler Wärmequellenleistung muss in der Regel mit höherem Durchfluss gefahren werden</li> </ul> <p>Empfehlung Auslegetemperaturdifferenz Verflüssiger <math>\Delta\vartheta_K</math>:</p>	
<p>Wärmequelle annähernd konstant</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– monovalent</li> <li>– bivalent-parallel</li> <li>– bivalent-alternativ</li> </ul>	<p><math>\Delta\vartheta_K = 0,5 \cdot \Delta\vartheta_{\text{Auslegung}}</math> <math>\Delta\vartheta_K = 0,7 \cdot \Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}}</math> <math>\Delta\vartheta_K = 0,7 \cdot \Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}}</math></p>	<p>Wärmequelle annähernd konstant</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– monovalent</li> <li>– bivalent-parallel</li> <li>– bivalent-alternativ</li> </ul>	<p><math>\Delta\vartheta_K = \Delta\vartheta_{\text{Auslegung}}</math> <math>\Delta\vartheta_K = \Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}}</math> <math>\Delta\vartheta_K = \Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}}</math></p>
<p>Wärmequelle stark variabel</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– monovalent</li> <li>– bivalent-parallel</li> <li>– bivalent-alternativ</li> </ul>	<p><math>\Delta\vartheta_K = 0,5 \cdot \Delta\vartheta_{\text{Auslegung}}</math> <math>\Delta\vartheta_K = 0,5 \cdot \Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}}</math> <math>\Delta\vartheta_K = 0,5 \cdot \Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}}</math></p>	<p>Wärmequelle stark variabel</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– monovalent</li> <li>– bivalent-parallel</li> <li>– bivalent-alternativ</li> </ul>	<p><math>\Delta\vartheta_K = 0,5 \cdot \Delta\vartheta_{\text{Auslegung}}</math> <math>\Delta\vartheta_K = 0,7 \cdot \Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}}</math> <math>\Delta\vartheta_K = 0,7 \cdot \Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}}</math></p>
<p><b>Einschalttemperatur <math>\vartheta_{\text{EIN}}</math></b> Damit auf der Wärmenutzungsseite kein «Leerdurchgang» auf Rücklaufniveau erfolgt, muss <math>\vartheta_{\text{EIN}}</math> mindestens so hoch wie die maximale Rücklauftemperatur sein. Durch Speicherverluste kann nach längerem Unterbruch eine zu tiefe Vorlauftemperatur auftreten, was sich aber normalerweise kaum störend auswirkt (Ausnahmen: Lüftung ohne WRG, Wassererwärmung). Bei Stufenladung kann eine zeitweilige Unterdeckung infolge zu tiefer Rücklauftemperatur während des ersten Durchgangs nicht verhindert werden.</p>			
<p><b>Ausschalttemperatur <math>\vartheta_{\text{AUS}}</math></b> <math>\vartheta_{\text{AUS}} \leq \vartheta_{\text{K,MAX}} - \Delta\vartheta_K</math> mit der Bedingung <math>\vartheta_{\text{AUS}} &gt; \vartheta_{\text{EIN}}</math> (sonst kann Wasser zwischen <math>\vartheta_{\text{AUS}}</math> und <math>\vartheta_{\text{EIN}}</math> nicht aus dem Speicher!) Mit Aussenluft als Wärmequelle ist <math>\Delta\vartheta_K</math> stark variabel. Es muss der grösste vorkommende Wert eingesetzt werden. Wenn dabei die Bedingung <math>\vartheta_{\text{AUS}} &gt; \vartheta_{\text{EIN}}</math> nicht eingehalten werden kann, muss der Ausschaltpunkt (und evtl. auch der Einschaltpunkt) witterungsgeführt werden.</p>			
		<p>Ladetemperatur <math>\vartheta_{\text{Ladung}}</math> Damit die Ausschaltung funktioniert, gilt: <math>\vartheta_{\text{Ladung}} &gt; \vartheta_{\text{AUS}}</math></p>	

Tabelle 52: Zusammenfassung Speicherladung (Formelzeichen siehe Kasten 50)

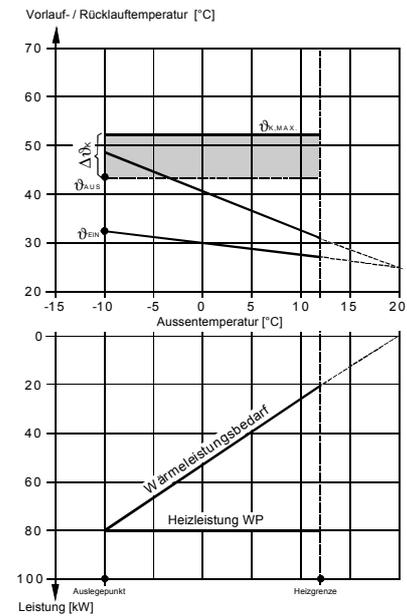
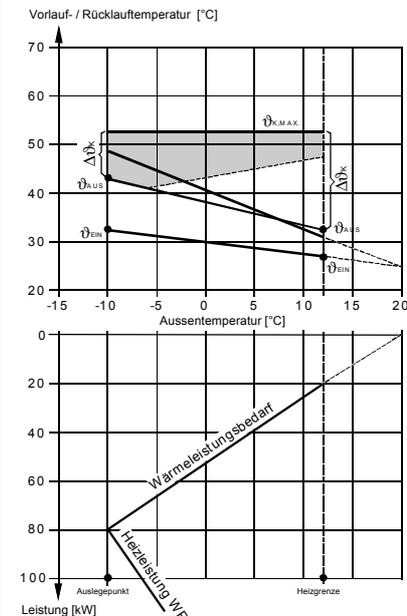
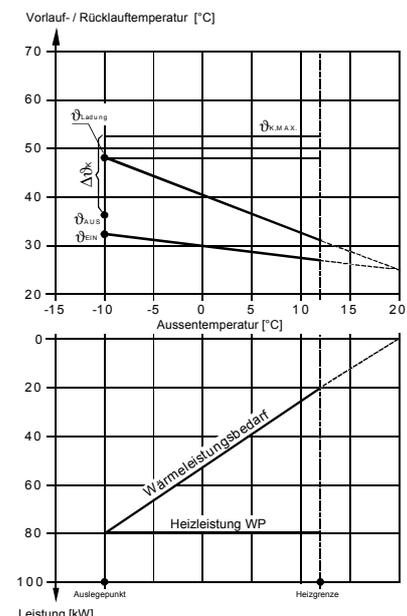
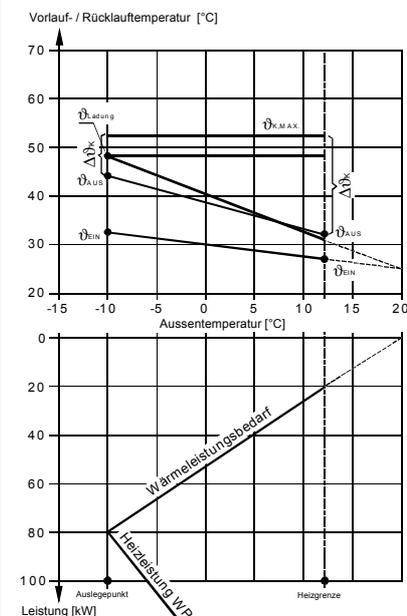
	Wärmequelle annähernd konstant	Wärmequelle stark variabel
<p><b>Stufenladung, monovalent</b></p> <p>Auslegung der Wärmenutzungsanlage:  <math>\vartheta_{VL/RL} = 48/33^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf im Auslegepunkt:  <math>\Delta\vartheta_{\text{Auslegung}} = 15\text{ K}</math></p> <p>Max. Verflüssigeraustrittstemperatur  <math>\vartheta_{K,MAX} = 52^{\circ}\text{C}</math>                      d.h. Sicherheitsabstand gemäss Bild 43 nur 3 K!</p> <p>Die Endtemperatur des Speichers ist zufällig und befindet sich innerhalb der bezeichneten Fläche.</p> <p>Bei stark variabler Wärmequelle ist eine Witterungsführung der Ein- und Ausschalttemperaturen notwendig, damit <math>\vartheta_{\text{AUS}} &gt; \vartheta_{\text{EIN}}</math> immer erfüllt ist.</p> <p>➔ Während des ersten Durchgangs kann bei tiefer Aussentemperatur eine Unterdeckung infolge zu tiefer Vorlauf-temperatur nicht verhindert werden (siehe Kasten 49).</p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 0,5 \cdot 15\text{ K} = 8\text{ K}</math>  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 33^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 44^{\circ}\text{C}</math> Festwert                 </p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 0,5 \cdot 15\text{ K} = 8\text{ K}</math> (8...20 K)  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 33...27^{\circ}\text{C}</math> witterungsgeführt  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 44...32^{\circ}\text{C}</math> witterungsgeführt                 </p>
<p><b>Schichtladung, monovalent</b></p> <p>Auslegung der Wärmenutzungsanlage:  <math>\vartheta_{VL/RL} = 48/33^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf im Auslegepunkt:  <math>\Delta\vartheta_{\text{Auslegung}} = 15\text{ K}</math></p> <p>Die vorgegebene zulässige Verflüssigeraustrittstemperatur  <math>\vartheta_{K,MAX} = 52^{\circ}\text{C}</math>                      wird sicher nicht überschritten, weil Ladetemperatur  <math>\vartheta_{\text{Ladung}} = 48^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Bei stark variabler Wärmequelle ist eine Witterungsführung der Ein- und Ausschalttemperaturen notwendig.</p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 15\text{ K}</math>  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 33^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 37^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{Ladung}} = 48^{\circ}\text{C}</math> Festwert                 </p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 0,5 \cdot 15\text{ K} = 8\text{ K}</math> (8...20 K)  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 33...27^{\circ}\text{C}</math> witterungsgeführt  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 44...32^{\circ}\text{C}</math> witterungsgeführt  <math>\vartheta_{\text{Ladung}} = 48^{\circ}\text{C}</math> Festwert                 </p>

Bild 53: Beispiele zur Auslegung monovalenter Anlagen

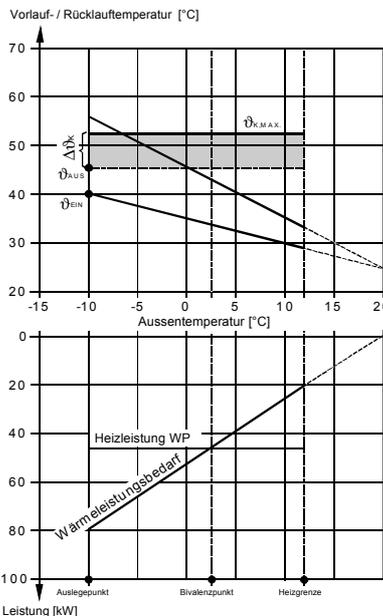
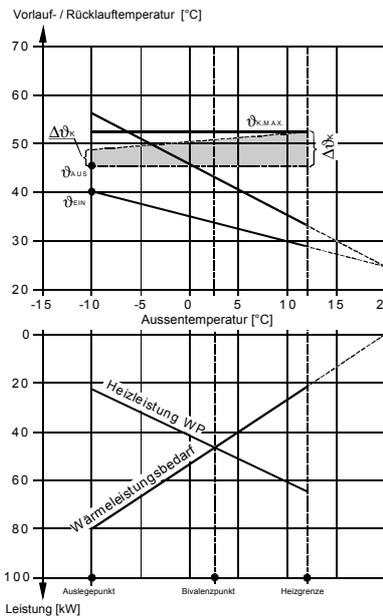
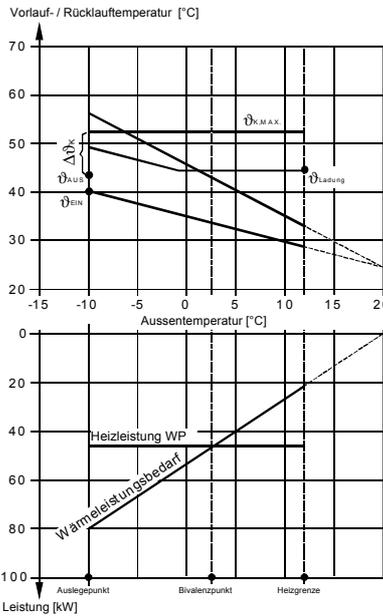
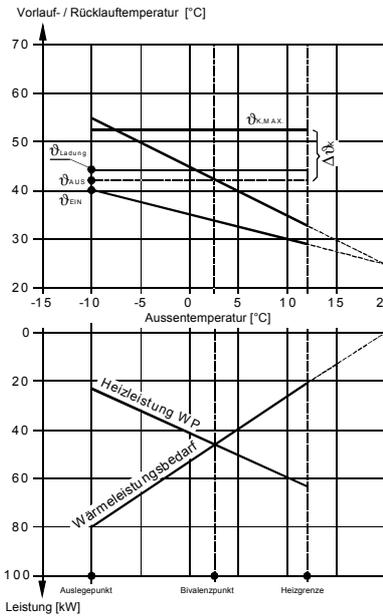
	Wärmequelle annähernd konstant	Wärmequelle stark variabel
<p>Stufenladung, bivalent-parallel</p> <p>Auslegung der Wärmenutzungsanlage:  <math>\vartheta_{VL/RL} = 55/40^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf im Bivalenzpunkt:  <math>\Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}} = 9\text{ K}</math></p> <p>Max. Verflüssigeraustrittstemperatur  <math>\vartheta_{K,\text{MAX}} = 52^{\circ}\text{C}</math>                      d.h. Sicherheitsabstand gemäss Bild 43 nur 3 K!</p> <p>Die Endtemperatur des Speichers ist zufällig und befindet sich innerhalb der bezeichneten Fläche.</p> <p>➔ Während des ersten Durchgangs kann in der Nähe des Bivalenzpunktes eine Unterdeckung infolge zu tiefer Vorlauftemperatur nicht verhindert werden (siehe Kasten 49).</p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 0,7 \cdot 9 = 7\text{ K}</math>  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 40^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 46^{\circ}\text{C}</math> Festwert                 </p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 0,5 \cdot 9 = 5\text{ K (3...8 K)}</math>  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 40^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 44^{\circ}\text{C}</math> Festwert                 </p>
<p>Schichtladung, bivalent-parallel</p> <p>Auslegung der Wärmenutzungsanlage:  <math>\vartheta_{VL/RL} = 55/40^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf im Bivalenzpunkt:  <math>\Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}} = 9\text{ K}</math></p> <p>Die vorgegebene zulässige Verflüssigeraustrittstemperatur  <math>\vartheta_{K,\text{MAX}} = 52^{\circ}\text{C}</math>                      wird sicher nicht überschritten, weil Ladetemperatur  <math>\vartheta_{\text{Ladung}} = 44^{\circ}\text{C}</math></p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 9\text{ K}</math>  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 40^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 43^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{Ladung}} = 44^{\circ}\text{C}</math> Festwert (<math>&gt; 43^{\circ}\text{C}</math>)                 </p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 0,7 \cdot 9 = 7\text{ K (4...10 K)}</math>  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 40^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 42^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{Ladung}} = 44^{\circ}\text{C}</math> Festwert (<math>&gt; 42^{\circ}\text{C}</math>)                 </p>

Bild 54: Beispiele zur Auslegung bivalent-paralleler Anlagen

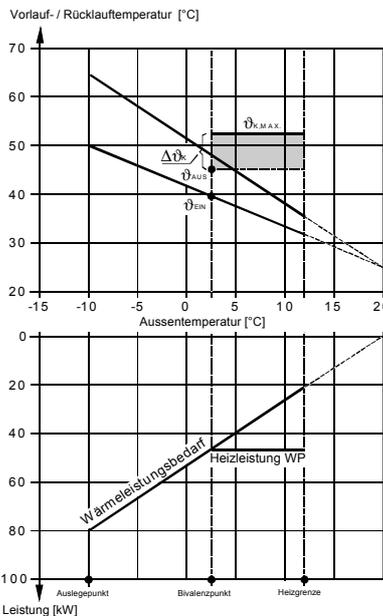
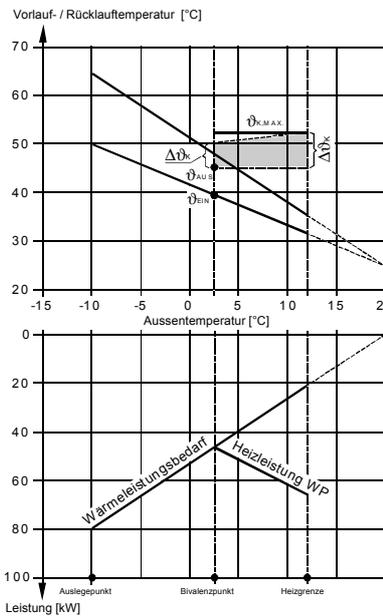
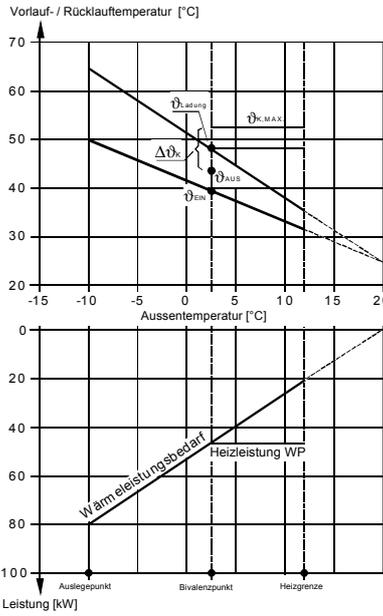
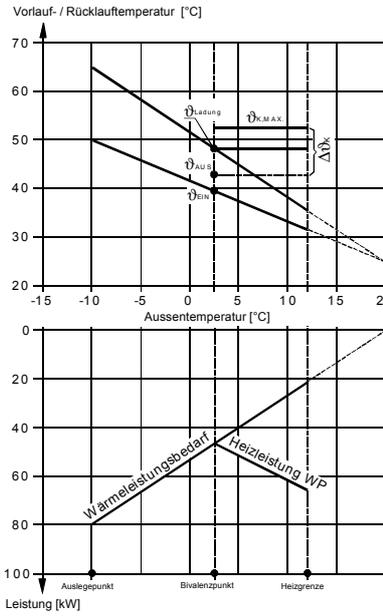
	Wärmequelle annähernd konstant	Wärmequelle stark variabel
<p>Stufenladung, bivalent-alternativ</p> <p>Auslegung der Wärmenutzungsanlage:  <math>\vartheta_{VL/RL} = 65/50^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf im Bivalenzpunkt:  <math>\Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}} = 9 \text{ K}</math></p> <p>Max. Verflüssigeraustrittstemperatur  <math>\vartheta_{K,MAX} = 52^{\circ}\text{C}</math>                      d.h. Sicherheitsabstand gemäss Bild 43 nur 3 K!</p> <p>Die Endtemperatur des Speichers ist zufällig und befindet sich innerhalb der bezeichneten Fläche.</p> <p>➡ Während des ersten Durchgangs kann in der Nähe des Bivalenzpunktes eine Unterdeckung infolge zu tiefer Vorlauftemperatur nicht verhindert werden (siehe Kasten 49).</p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 0,7 \cdot 9 \text{ K} = 7 \text{ K}</math>  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 40^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 45^{\circ}\text{C}</math> Festwert                 </p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 0,5 \cdot 9 \text{ K} = 5 \text{ K} (5 \dots 7 \text{ K})</math>  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 40^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 44^{\circ}\text{C}</math> Festwert                 </p>
<p>Schichtladung, bivalent-alternativ</p> <p>Auslegung der Wärmenutzungsanlage:  <math>\vartheta_{VL/RL} = 65/50^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf im Bivalenzpunkt:  <math>\Delta\vartheta_{\text{Bivalenz}} = 9 \text{ K}</math></p> <p>Die vorgegebene zulässige Verflüssigeraustrittstemperatur  <math>\vartheta_{K,MAX} = 52^{\circ}\text{C}</math>                      wird sicher nicht überschritten, weil Ladetemperatur  <math>\vartheta_{\text{Ladung}} = 48^{\circ}\text{C}</math></p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 9 \text{ K}</math>  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 40^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 43^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{Ladung}} = 48^{\circ}\text{C}</math> Festwert                 </p>	 <p> <math>\Delta\vartheta_K = 0,7 \cdot 9 \text{ K} = 7 \text{ K} (7 \dots 10 \text{ K})</math>  <math>\vartheta_{\text{EIN}} = 40^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{AUS}} = 42^{\circ}\text{C}</math> Festwert  <math>\vartheta_{\text{Ladung}} = 48^{\circ}\text{C}</math> Festwert                 </p>

Bild 55: Beispiele zur Auslegung bivalent-alternativer Anlagen



## 4. Fallbeispiel

### 4.1 Ausgangslage

In einem Wohn- und Geschäftshaus im schweizerischen Mittelland soll eine Wärmepumpe mit Grundwasser als Wärmequelle gebaut werden. Die Auslegedaten der einzelnen Gruppen sind in Tabelle 56 zusammengestellt. Bei  $-10^{\circ}\text{C}$  Aussentemperatur beträgt die maximal vorkommende Vorlauftemperatur  $55^{\circ}\text{C}$ . Dies ist für einen monovalenter Betrieb mit R22 als Arbeitsmittel zu hoch. Der Entscheid fiel deshalb auf eine bivalent-parallele Anlage mit einem Bivalenzpunkt von etwa  $2...5^{\circ}\text{C}$ . Das Prinzipschema zeigt Bild 57.

Die in Tabelle 56 zusammengestellten Zahlen gelten für die Pumpen-, aber nicht für die Ventil-Durchflüsse, wie oft fälschlicherweise angenommen wird. Für die Ventile gelten nämlich teilweise höhere Temperaturdifferenzen und damit werden natürlich deren Durchflüsse und Druckabfälle (wichtig zur Bestimmung der Ventilautorität) entsprechend kleiner! Auch für den Gesamtdurchfluss und die sich daraus ergebenden Temperaturen gelten selbstverständlich die Ventil- und nicht die Pumpen-Durchflüsse. Die Ergebnisse sind in Tabelle 58 zusammengestellt.

Auslegung und Abgleich der Gruppen				
Gruppe	Leistung SIA 384/2 [kW]	Vorlauf-temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Rücklauf-temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Durchfluss Pumpe [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
A	10	55	45	0,86
B	30	45	35	2,58
C	25	55	40	1,43
D	20	45	35	1,72

Weitere Vorgaben:

- Jahresenergiebedarf gemäss SIA 380/1 mit effektiver Nutzung berechnet 172'000 kWh/a
- Auslegetemperatur  $-10^{\circ}\text{C}$
- Bivalenzpunkt  $2...5^{\circ}\text{C}$
- Heizgrenze  $12^{\circ}\text{C}$
- Grundwassertemperatur  $10^{\circ}\text{C}$  konstant
- Temperaturdifferenz Verdampfer 5 K
- Schalthäufigkeit 2mal pro Std.
- Ladetemperatur konstant oder witterungsgeführt

 SIA-Empfehlung 384/2: Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), 1982. – SIA-Empfehlung 380/1: Energie im Hochbau. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), 1988. – (Bezugsquelle: SIA, Postfach, 8039 Zürich)

Tabelle 56: Zusammenfassung der Ausgangslage

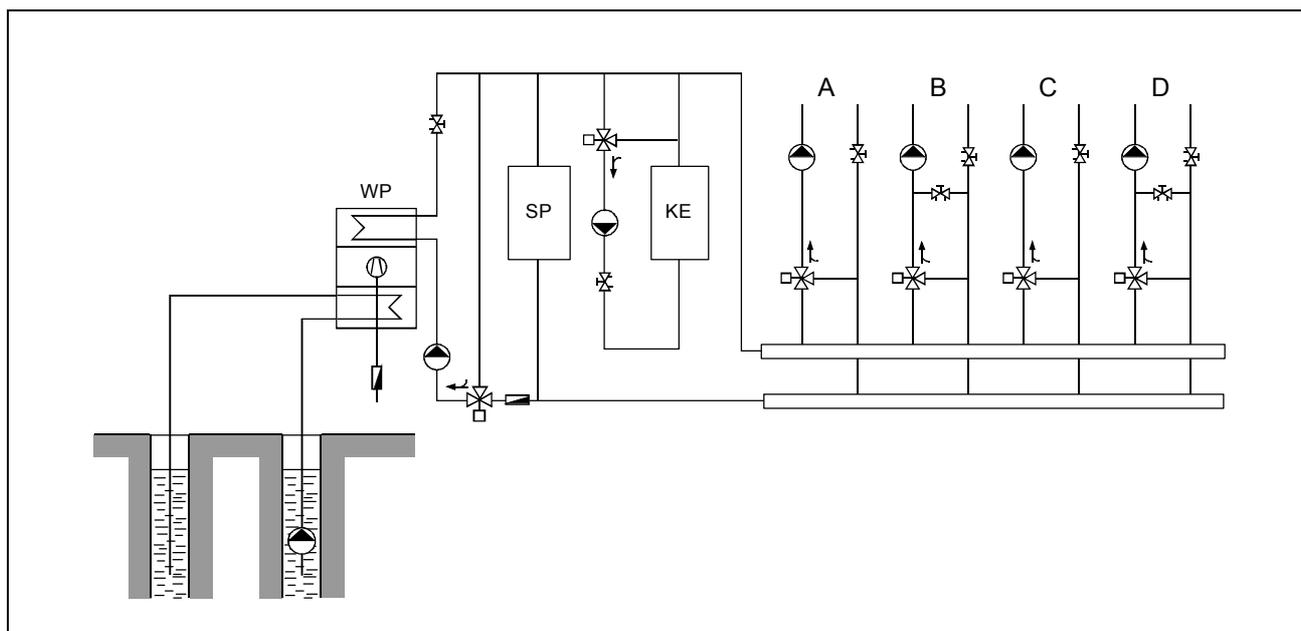


Bild 57: Prinzipschema zum Fallbeispiel

Gruppe	Leistung [kW]	Vorlauf- tempe- ratur [°C]	Rücklauf- tempe- ratur [°C]	Durch- fluss Ven- til [m³/h]
A	10	55	45	0,86
B	30	55	35	1,29
C	25	55	40	1,43
D	20	55	35	0,86
Gesamt	85	55	38,5	4,44

Tabelle 58: Ventil-Durchflüsse und Gesamtdurchfluss im Auslegepunkt bei  $-10^{\circ}\text{C}$  Aussentemperatur; die resultierende Hauptrücklauftemperatur beträgt  $38,5^{\circ}\text{C}$

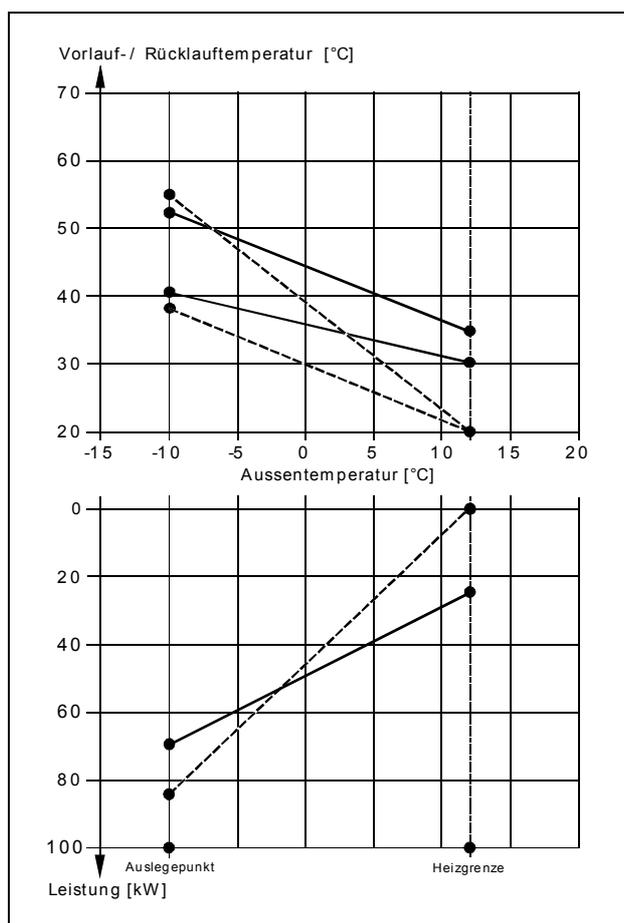


Bild 59: Statisch berechnete (gestrichelt) und tatsächlich gemessene Heizkurven und Energiekennlinien (ausgezogen) sind sehr unterschiedlich

## 4.2 Temperatur-Leistungs-Diagramm

Der maximal erforderliche Wärmeleistungsbedarf ergibt sich aus der Berechnung gemäss SIA 384/2, und an der Heizgrenze ist der Wärmebedarf gemäss gängiger Theorie null. Entsprechend variiert die Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf zwischen der Auslegtemperaturdifferenz und null. Diese statische Betrachtungsweise deckt sich erfahrungsgemäss nicht mit dem dynamischen Betrieb der Praxis. Messungen an bestehenden Anlagen zeigen folgendes Verhalten: An der Heizgrenze ergibt sich ein beachtlicher Sprung auf eine Bandlast und auf der anderen Seite wird die Maximalleistung gemäss SIA 384/2 meist nicht erreicht (Bild 59)!



Bei bestehenden Wärmeabgabesystemen sollten Energiekennlinie und Heizkurven immer messtechnisch bestimmt werden. Bei Neuanlagen müssen die Werte der statischen Berechnung möglichst gut den tatsächlich in der Praxis auftretenden dynamischen Verläufen angepasst werden.

Eine in der Praxis oft angewandte Methode zur Dimensionierung von Neuanlagen zeigt Bild 60: Alle Kurven werden auf  $20^{\circ}\text{C}$  Aussentemperatur bezogen und der Heizkurven-Fusspunkt wird mit  $25^{\circ}\text{C}$  Vorlauftemperatur angenommen (ergibt hier eine realistische Heizkurvensteilheit von  $-1,0$ ). Damit können folgende Fixpunkte sofort eingezeichnet werden:

- Vorlauftemperatur  $-10/55^{\circ}\text{C}$  und  $20/25^{\circ}\text{C}$
- Rücklauftemperatur  $-10/38,5^{\circ}\text{C}$  und  $20/25^{\circ}\text{C}$
- Wärmeleistungsbedarf  $-10^{\circ}\text{C} / 85 \text{ kW}$  und  $20^{\circ}\text{C} / 0 \text{ kW}$

## 4.3 Wärmepumpe

Auswahl der Wärmepumpe

Die passende Wärmepumpe muss aus dem Datenblatt des Herstellers ausgesucht werden. Aufgrund der Vorgabe einer annähernd konstanten Wärmequellentemperatur von  $10^{\circ}\text{C}$  und einem Bivalenzpunkt von etwa  $2...5^{\circ}\text{C}$  fiel im vorliegenden Fall die Wahl auf die Wärmepumpe, deren Datenblatt vereinfacht in Tabelle 61 zusammengefasst ist. Durch iteratives Vorgehen kann der exakte Bivalenzpunkt und die entsprechenden Temperaturen und Leistungen im Temperatur- und Leistungsdiagramm eingetragen werden

(Verfüssigeraustrittstemperatur witterungsgeführt angenommen):

- Definitiver Bivalenzpunkt = 4°C
- Wärmepumpen-Heizleistung im Bivalenzpunkt entsprechend 4°C Aussentemperatur und 41°C Vorlauftemperatur: 44 kW
- Wärmepumpen-Heizleistung im Auslegepunkt entsprechend -10°C Aussentemperatur und 47°C Vorlauftemperatur: 43 kW

#### Verflüssigerpumpe

Aus der Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger und der dazugehörigen Heizleistung kann der Durchfluss der Verflüssigerpumpe im Bivalenzpunkt und der Druckabfall über dem Verflüssiger berechnet werden (siehe Abschnitt 3.2 und Bild 60):

$$\dot{V}_{P,K} = 0,86 \cdot 44 \text{ kW} / (41^\circ\text{C} - 32,3^\circ\text{C}) = 4,4 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\Delta p_K = 100 \cdot (4,4 \text{ m}^3/\text{h} / 8,6 \text{ m}^3/\text{h})^2 = 26 \text{ kPa}$$

Für die Förderhöhe der Pumpe muss noch der Druckabfall der Ladeeinrichtung hinzugezählt werden (Annahme: 10 kPa):

$$\Delta p_{P,K} = 26 \text{ kPa} + 10 \text{ kPa} = 36 \text{ kPa}$$

#### Verdampferpumpe

Der Durchfluss der Verdampferpumpe und der Druckabfall über dem Verdampfer ergibt sich aus der gewählten Temperaturdifferenz über dem Verdampfer von 5 K und der Wärmequellenleistung (Heizleistung minus Antriebsleistung des Kompressors für W10/W35):

$$\dot{V}_{P,V} = 0,86 \cdot (44,9 - 10,5 \text{ kW}) / 5 \text{ K} = 5,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\Delta p_V = 100 \cdot (5,9 \text{ m}^3/\text{h} / 8,6 \text{ m}^3/\text{h})^2 = 47 \text{ kPa}$$

Für die Förderhöhe der Pumpe kommt noch der Druckabfall der Wärmequellenanlage hinzu (Annahme: 20 kPa):

$$\Delta p_{P,V} = 47 \text{ kPa} + 20 \text{ kPa} = 67 \text{ kPa}$$

Im vorliegenden Fallbeispiel wurde Grundwasser als Wärmequelle gewählt. Damit ist die Heizleistung der Wärmepumpe praktisch konstant. Im Falle einer Luft-Wasser-Wärmepumpe wäre sie hingegen stark variabel (Bild 62 und Kasten 63).

## 4.4 Speicher

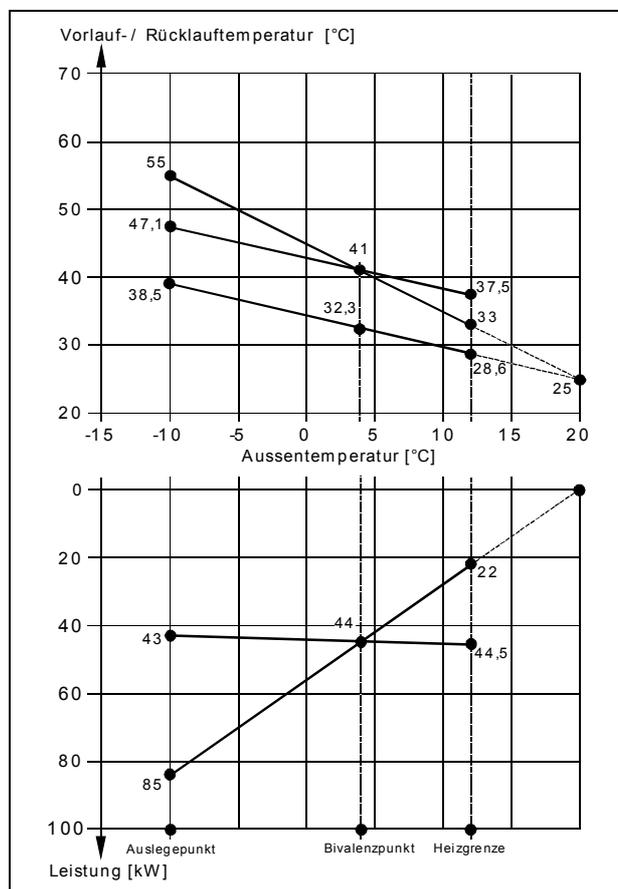


Bild 60: Temperatur- und Leistungsdiagramm für das Fallbeispiel; die Wasser-Wasser-Wärmepumpe entspricht dem Datenblatt gemäss Tabelle 61

Eintritts-temperatur Wärme- quelle	Heizleistung/Verdichterleistung bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen [°C bzw. kW]			
	35	40	45	50
10	44,9/10,5	44,1/11,4	43,3/12,3	42,5/13,3
12	46,0/10,6	45,3/11,4	44,5/12,3	44,0/13,3
14	47,6/10,7	46,9/11,5	46,2/12,4	45,5/13,3
16	49,2/10,8	48,4/11,5	47,7/12,4	47,3/13,4
18	50,7/10,8	50,0/11,6	49,4/12,5	48,7/13,5
20	52,3/11,0	51,5/11,7	50,8/12,5	50,3/13,5

Berechnung der Druckabfälle:  
 $\Delta p \text{ [kPa]} = 100 \cdot (\dot{V} \text{ [m}^3/\text{h}] / k_V \text{ [m}^3/\text{h}])^2$   
 $k_V$ -Werte:  
 – Verdampfer 8,6 m<sup>3</sup>/h  
 – Verflüssiger (Kondensator) 8,6 m<sup>3</sup>/h

Tabelle 61: Vereinfachtes Datenblatt einer handelsüblichen Wärmepumpe

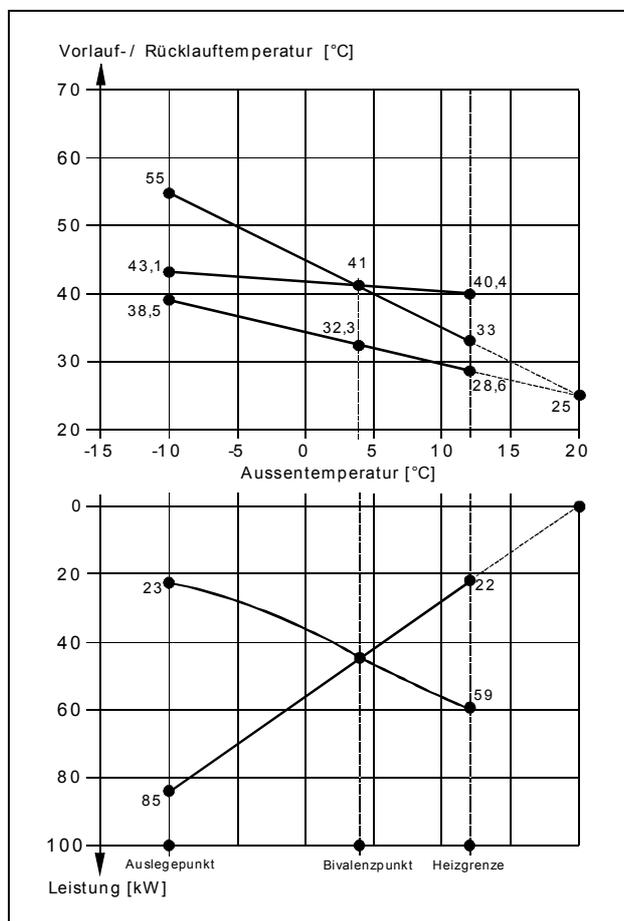


Bild 62: Exkurs – Temperatur- und Leistungsdiagramm für das Fallbeispiel mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe

#### Exkurs: Luft-Wasser-Wärmepumpe

In Bild 62 sind die Temperatur- und Leistungsverhältnisse für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe dargestellt. Die Wärmepumpe wurde dabei so ausgewählt, dass die Heizleistung im Bivalenzpunkt von 4°C ebenfalls 44 kW beträgt. Durch die starke Variation des Temperaturhubes zwischen Verflüssigeraustritt (witterungsgeführt) und Verdampfeintritt ist die Heizleistung nicht nur stark variabel, sondern dem gefordereten Wärmeleistungsbedarf exakt entgegengesetzt. Damit verbunden ist auch eine massive Verschlechterung der Leistungszahl bei tiefen Aussentemperaturen. Deshalb ist der Einsatz einer Luft-Wasser-Wärmepumpe weit unter dem Bivalenzpunkt in der Regel weniger interessant.

Kasten 63

#### Speicherinhalt

Der Speicherinhalt ergibt sich gemäss Abschnitt 3.4 aus der Wärmepumpenleistung (44 kW im Bivalenzpunkt), der Schalthäufigkeit (2mal pro Stunde) und der für das Speichervermögen massgebenden Temperaturdifferenz im Bivalenzpunkt (41°C - 32,3°C = 8,7 K):

$$V_{\text{MIN}} = 0,22 \frac{44 \text{ kW}}{2 \cdot 8,7 \text{ K}} = 0,56 \text{ m}^3$$

Fehlzirkulation über den Speicher verhindern!

Der maximale Durchfluss des Hauptvorlaufs beträgt 4,4 m³/h (siehe Tabelle 56). Der Durchfluss der Verflüssigerpumpe beträgt ebenfalls 4,4 m³/h (siehe Abschnitt «Verflüssigerpumpe»). Wenn der Durchfluss des Hauptvorlaufes grösser würde als der Ladedurchfluss zum Speicher, entstünde eine Fehlzirkulation über den kalten Speicher und die geforderte Vorlauftemperatur könnte nicht erreicht werden. Dies muss unter allen Umständen verhindert werden.



Es ist ein sorgfältiger hydraulischer Abgleich der Anlage notwendig. Bei Gleichheit von Verflüssigerdurchfluss und Hauptvorlaufdurchfluss kann der Verflüssigerdurchfluss sicherheitshalber um 10% höher eingestellt werden.

## 4.5 Heizkessel

### Kesselleistung

Aus Bild 60 kann sofort die notwendige Kesselleistung herausgelesen werden. Sie beträgt

$$85 \text{ kW} - 43 \text{ kW} = 42 \text{ kW}.$$

Der ausgewählte Kessel hat folgende Daten:

- Kesselleistung 35...50 kW (die Brennerleistung wird auf die geforderten 42 kW eingestellt)
- Kesseltemperatur 50...90°C (der Kesselthermostat wird auf 60°C eingestellt, also 5 K höher als die maximal geforderte Vorlauftemperatur)
- Minimal zulässige Rücklauftemperatur 38°C

### Regelventil, Kesselpumpe

Das Regelventil im Kesselkreis dient einerseits der Rücklaufhochhaltung und andererseits wird damit die Vorlauftemperatur auf den geforderten Wert geregelt. Der Durchfluss des Regelventils berechnet sich aus der

Kesselleistung (42 kW), der Kesseltemperatur (60°C) und der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe (47°C) wie folgt:

$$\dot{V}_{s,p} = 0,86 \cdot 42 \text{ kW} / (60^\circ\text{C} - 47^\circ\text{C}) = 2,8 \text{ m}^3/\text{h}$$



Die Einspritzung in den Hauptvorlauf ist heikel. Durch laminare Strömung entstehen leicht Fehlmessungen. Deshalb muss durch geeignete Massnahmen ein turbulenter Durchfluss erzwungen werden (z.B. durch Schikanen vor dem Fühler). Auch Regler (möglichst PID) und Ventil (kurze Laufzeit, kleiner Mengensprung im Öffnungsbereich) müssen sehr sorgfältig ausgelegt werden.

Die minimal zulässige Vorlauftemperatur von 38°C wird im vorliegenden Fall praktisch nur in der Arheizphase unterschritten. Ältere Kessel erfordern aber oft wesentlich höhere Rücklauftemperaturen und entsprechend höher muss dann auch der Kesselthermostat eingestellt werden. Ein Beispiel zeigt Kasten 64.

Exkurs: Älterer Kessel mit Kesseltemperatur 70°C und minimal zulässiger Rücklauftemperatur von 60°C

Der Durchfluss des Regelventils berechnet sich aus der Kesselleistung (42 kW), der Kesseltemperatur (70°C) und der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe (47°C) wie folgt:

$$\dot{V} = 0,86 \cdot 42 \text{ kW} / (70^\circ\text{C} - 47^\circ\text{C}) = 1,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Der Durchfluss der Kesselpumpe ergibt sich aus der Kesseltemperatur (70°C) und der minimal geforderten Rücklauftemperatur (60°C).

$$\dot{V} = 0,86 \cdot 42 \text{ kW} / (70^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}) = 3,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Der gegenüber dem Ventildurchfluss wesentlich grössere Pumpendurchfluss muss über einen Bypass zwischen Ventil und Pumpe abgeglichen werden!

Kasten 64

## 4.6 Kennzahlen

Leistungszahl  $\epsilon$  (Momentanwert)

In der Praxis wird üblicherweise mit der Leistungszahl  $\epsilon$  gerechnet, die sich aus dem Verhältnis der Momentanwerte von abgegebener Heizleistung zu aufgenommener Verdichterleistung ergibt. Als Randbedingung muss immer die Verdampfeintrittstemperatur und die Verflüssigeraustrittstemperatur angegeben werden. Beispielsweise für W10/W47 ergibt sich mit interpolierten Zahlen aus Tabelle 61:

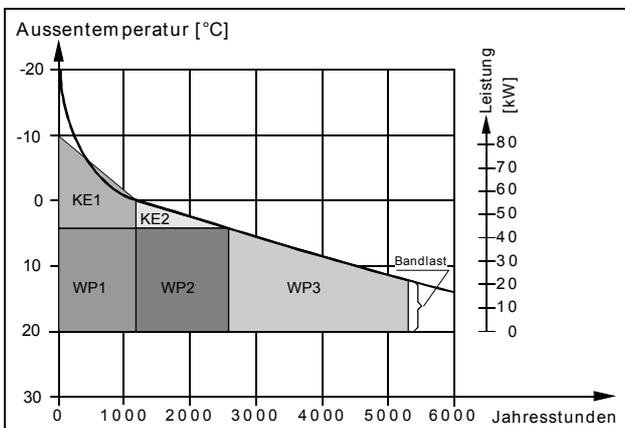
$$\epsilon = 43,0 \text{ kW} / 12,7 \text{ kW} = 3,39$$

COP (Momentanwert)

Gemäss Europäischer Norm EN 255 wird – anstelle der Leistungszahl gemäss obiger Definition – der Coefficient of Performance, kurz COP, definiert. Dabei wird – neben der Verdichterleistung – auch die Leistungsaufnahme von Abtaueinrichtung, Steuerung/Regelung und Fördereinrichtungen (Wirkungsgrad Pumpe = 0,2; Ventilator = 0,3) berücksichtigt. Dies gilt allerdings nur für Bauteile innerhalb der Wärmepumpe. Damit ergibt sich für W10/W47:

$$P_{\text{Verdampferpumpe}} = \frac{47 \text{ kPa} \cdot 5,9 \text{ m}^3/\text{h}}{3600 \cdot 0,2} = 0,385 \text{ kW}$$

$$P_{\text{Verflüssigerpumpe}} = \frac{26 \text{ kPa} \cdot 4,4 \text{ m}^3/\text{h}}{3600 \cdot 0,2} = 0,159 \text{ kW}$$



Grösse	KE1 KE2	WP1	WP2	WP3
t [h]	1200 1400	1200	1400	2700
Q [kW]	12...42 0...12	43	43	22...43
Q [kWh] integriert	32400 8400	51600	60200	87750
f [-]	0,72	0,72	0,72	0,72
Q [kWh] korrigiert	29000	37000	43000	63000
θ <sub>K,A</sub> [°C]	41...55	43...47	41...43	37,5...41
η <sub>KE,J</sub> bzw. ε	0,9	3,5	3,7	3,9
W [kWh] gleitend	32220 Öl	10570 Strom	11620 Strom	16150 Strom
W [kWh] konstant	32220 Öl	42060 Strom (gerechnet mit ε = 3,4 = konst.)		
Speicherverluste	5300 h · 0,115 kW = 610 kWh			
Verdampferpumpe	3325 h · 0,6 kW = 1995 kWh			
Verflüssigerpumpe	3325 h · 0,22 kW = 732 kWh			
Carterheizung	(5300-3325) h · 0,06 kW = 119 kWh			
Steuerung/Regelung	5300 h · 0,1 kW = 530 kWh			
JAZ <sub>gleitend</sub>	$\frac{(143000 - 610) \text{ kWh}}{41716 \text{ kWh}} = 3,41$			
JAZ <sub>konstant</sub>	$\frac{(143000 - 610) \text{ kWh}}{45436 \text{ kWh}} = 3,13$			

t = Jahresstunden  
 Q = Wärmeleistungsbedarf  
 Q = Wärmemenge  
 f = Korrekturfaktor  
 θ<sub>K,A</sub> = Verflüssigeraustrittstemperatur  
 η<sub>KE,J</sub> = Jahresnutzungsgrad Kessel  
 ε = Leistungszahl Wärmepumpe  
 W = Energiemenge  
 JAZ = Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage

Bild 65: Summenhäufigkeitskurve und daraus abgeleitete Energiebedarfsanteile und Kennzahlen. Der Korrekturfaktor «f» ist mit grösseren Unsicherheiten behaftet (siehe Text).

$$P_{\text{Steuerung/Regelung}} = 0,1 \text{ kW}$$

$$\text{COP} = \frac{43,0 \text{ kW}}{(12,7 + 0,385 + 0,159 + 0,1) \text{ kW}}$$

$$\text{COP} = 3,22$$

Jahresarbeitszahl JAZ

Die Jahresarbeitszahl ist die wichtigste Kenngrösse für die Beurteilung einer Wärmepumpenanlage. Es werden alle zugeführten und produzierten Energiemengen eines Jahres miteinander verglichen. Sie kann mit Hilfe der Summenhäufigkeitskurve (Bild 65) berechnet werden. Dabei ergeben sich aber wieder die gleichen Probleme wie im Leistungs-Temperatur-Diagramm: Die Werte der statischen Berechnung stimmen nicht mit den tatsächlichen Werten des dynamischen Betriebs überein. Dies soll durch den Faktor «f» korrigiert werden. Dieser Korrekturfaktor kommt analog auch in der allgemein bekannten «Hottinger-Formel» vor. Dort wird mit 16...18 «Vollbetriebsstunden» entsprechend einem Faktor von 0,67...0,75 gerechnet.

Im vorliegenden Fall konnte der Faktor zuverlässiger aufgrund der Energiebedarfsrechnung mit effektiver Nutzung gemäss SIA 380/1 festgelegt werden:

$$f = \frac{172000 \text{ kWh}}{(40800 + 51600 + 60200 + 87750) \text{ kWh}}$$

$$f = 0,72$$

Die Berechnung der Jahresarbeitszahlen für konstante und für gleitende Verflüssigeraustrittstemperatur (Witterungsführung gemäss Wärmepumpen-«Heizkurve» in Bild 60) sind in Tabelle 65 zusammengestellt.

Elektro-Thermo-Verstärkung ETV

Die Elektro-Thermo-Verstärkung wird wie folgt definiert (siehe Abschnitt 1.2):

$$\text{ETV} = \frac{\text{Substitution fossil erzeugter Wärme}}{\text{Elektrizitäts-Mehraufwand für diese Substitution}}$$

Da der Kessel der konventionellen Anlage mehr Strom braucht als der kleinere Kessel der Wärmepumpenanlage, kann die Differenz von 911 kWh (Zahlen aus Tabelle 66) noch im Nenner in Abzug gebracht werden:

$$\text{ETV}_{\text{gleitend}} = \frac{(143000 - 610) \text{ kWh}}{(41716 - 911) \text{ kWh}} = 3,49$$

$$\text{ETV}_{\text{konstant}} = \frac{(143000 - 610) \text{ kWh}}{(45436 - 911) \text{ kWh}} = 3,20$$

## 4.7 Wirtschaftlichkeit

Eine einfache «Milchmädchenrechnung» zeigt, dass bei einem durchschnittlichen Strompreis von 16Rp./kWh (60% Hochtarif zu 20 Rp./kWh und 40% Niedertarif zu 10 Rp./kWh) und einem Ölpreis von 3,5 Rp./kWh eine Jahresarbeitszahl in der Größenordnung von etwa

$$JAZ = 0,9 \frac{16}{3,5} = 4,1$$

notwendig wäre, um mit einer konventionellen Anlage konkurrieren zu können. Und dabei dürfte die Wärmepumpenanlage nicht einmal mehr kosten als die konventionelle Anlage!

Eine wesentlich seriösere Wirtschaftlichkeitsrechnung zeigt Tabelle 66. Die dazu notwendigen Annuitäts- und Mittelwertfaktoren sind in Tabelle 67 zusammengestellt. Ausführliche Hinweise mit vollständigen Tabellen enthält die folgende RAVEL-Publikation:



Müller, André und Felix Walter: RAVEL zahlt sich aus. Praktischer Leitfaden für Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Bern: Bundesamt für Konjunkturfragen, 1992. (Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, Best.-Nr. 724.397.42.01 d)

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung gemäss Tabelle 66 geht davon aus, dass der Ölpreis in Zukunft einer um 1% grösseren Preissteigerung unterworfen sein wird als der Strompreis (Begründung: stärkere Besteuerung der fossilen Energieträger z.B. durch CO<sub>2</sub>-Abgabe). Damit ergibt sich immer noch eine Jahreskostendifferenz von 2'815 Franken zugunsten der konventionellen Anlage.

Demgegenüber steht eine Substitution von 158'880 kWh – entsprechend 13'350 kg – Heizöl durch Strom. Dies entspricht gemäss «RAVEL zahlt sich aus» der folgenden Umweltkosteneinsparung (1,322 ist der Mittelwertfaktor für 7% Zins und Preissteigerung 4%):

$$13'350 \text{ kg} \cdot 0,09 \text{ Fr./kg} \cdot 1,322 = 1588 \text{ Fr.}$$

Mehr als die Hälfte der Kostendifferenz von 2815 Fr. kommt also der Umwelt zugute. (Diese Rechnung berücksichtigt den Treibhauseffekt nicht, vernachlässigt aber dafür die Umweltkosten der Elektrizität.)

Bezeichnung	Annuitätsfaktoren WP		Kalkulationszins	Konventionell
	6%	7%		
Nutzungsdauer				
Investitionskosten:	0,136	0,142		0,149
Wärmepumpe, Speicher		0,110	16000	0,117
Wärmequellenanlage	0,087	0,094	10500	0,102
- Heizkessel, Brenner			7500	11000
- Schaltkasten, Elektroanschluss			7000	4000
- Steuerung, Regelung, Pumpen			16500	9500
- Kaminanlage			7000	3000
- Ofenanlage	1,222	1,285	1,353	1,424
- Holzofen usw.	1,322	1,421	1,529	1,647
20 Jahre	1,419	1,558	1,715	1,880
Erklärung:	Jährliche Kapitalkosten:			
	Investitionskosten x Annuitätsfaktor = jährl. Kapitalkosten			
	Wartungskosten x Mittelwertfaktor = mittl. jährl. Wartungskosten			
	Energiekosten x Mittelwertfaktor = mittl. jährl. Energiekosten			
	- Annuitätsfaktor		0,110	10725
				9680
Tabelle 67: Ausgewählte Faktoren zur Wirtschaftlichkeitsrechnung				
Jährliche Energiekosten:				
- Strompreis HT	20 Rp./kWh			
- Strompreis NT	10 Rp./kWh			
- Aufteilung HT/NT	60%/40%			
- Heizölpreis	3,5 Rp./kWh			
- Preissteigerungen				
- Strom	5%			
- Heizöl	6%			
- Nutzungsdauer	15 Jahre			
- Mittelwertfaktoren				
- Strom	1,421			
- Heizöl	1,529			
- Strom WP HT	25030 kWh	7114		
- Strom WP NT	16686 kWh	2371		
- Strom Kessel HT	220 kWh	63		
- Strom Kessel NT	146 kWh	21		
- Heizöl	32220 kWh	1724		
- Strom Kessel HT	766 kWh		218	
- Strom Kessel NT	511 kWh		73	
- Heizöl	191100kWh		10227	
Jahreskosten		24150		21335

Tabelle 66: Wirtschaftlichkeitsrechnung

## 4.8 Computerberechnung

Einerseits bekommt man nur durch die Berechnung «von Hand» ein «Gefühl» für die Zusammenhänge. Andererseits kostet sie aber nicht nur sehr viel Zeit, sondern es ergeben sich auch zwangsläufig Ungenauigkeiten, wegen der rein statischen Betrachtung.

tungsweise. Auch eine Optimierung durch Variantenrechnung ist in den meisten Fällen viel zu aufwendig. Deshalb wurde durch RAVEL in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energiewirtschaft eine Software entwickelt, die eine wesentlich schnellere und genauere Berechnung erlaubt als die geschilderte «Handrechnung»:



Wärmeerzeugungsanlagen-Kalkulationsprogramm W-CALC bestehend aus den Modulen WP-CALC für Wärmepumpen und WKK-CALC für Wärmekraftkopplungsanlagen. Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft und Bundesamt für Konjunkturfragen, 1993.

Hier einige Besonderheiten des Programms:

- Mit DRY-Meteodaten (speziell für Energieanwendungen entwickelt) wird ein typisches Jahr tageweise in Stundenschritten durchgerechnet. Damit können Speicherbewirtschaftung, Quelltemperaturverlauf, Ferienbetrieb, Tarifaufteilung, Jahresarbeitszahl usw. wesentlich genauer berechnet werden.
- Durch die Berücksichtigung des effektiven Heizenergiebedarfs mit Darstellung der Energiekennlinie werden häufige Dimensionierungsfehler wesentlich besser erkannt.
- Die Wirtschaftlichkeitsrechnung nach BKP-Nummern mit individueller Nutzungsdauer der einzelnen Bauteile ist wesentlich genauer.

## 5. Bewilligungsverfahren

### 5.1 Elektrizitätswerk

Bei Wärmepumpenanlagen werden grössere Asynchronmotoren im Bereich der Haushaltstromversorgung eingesetzt. Deren Anlauf kann in schwach ausgelegten Netzen zu unzulässigen Spannungseinbrüchen führen. Wärmepumpen sind deshalb bewilligungspflichtig. Die Anschlussbedingungen sind geregelt in:



Empfehlungen für den Anschluss von Wärmepumpenanlagen für Heizung und Wassererwärmung an das Netz der Elektrizitätswerke. Zürich: Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE), 1983. (Bezugsquelle: VSE, Bahnhofplatz 3, 8023 Zürich, Best.-Nr. 2.29d)

Damit wird eine gesamtschweizerische Vereinheitlichung der Beurteilung und Bewilligungsverfahren angestrebt. Da jedes Elektrizitätswerk für sein Netz verantwortlich ist, sind allerdings örtliche Abweichungen möglich. Es ist deshalb unbedingt empfehlenswert, die geltenden Anschlussbestimmungen des zuständigen Elektrizitätswerks frühzeitig in Erfahrung zu bringen.

#### Anschlussgesuch

Gesuchsformulare können beim zuständigen Elektrizitätswerk bezogen werden. Neben objektbezogenen Daten, wie Standort, Wärmeleistungsbedarf, Wärmequelle, Betriebsart, Heizsystem usw., müssen vor allem die elektrischen Daten gemäss Tabelle 68 angegeben werden. Diese Daten findet man in den Projektierungsunterlagen des Wärmepumpenlieferanten oder auf dem AWP-Normschild (Bild 69), welches auf jeder Wärmepumpe angebracht werden muss.

Mit der Bewilligung können noch weitere technische Bedingungen verbunden sein. Um beispielsweise zu verhindern, dass nach einem Netzausfall alle angeschlossenen Wärmepumpen gleichzeitig anlaufen, kann eine Einschaltverzögerung verlangt werden.

#### Anlaufstrombegrenzung

Mit der heute üblichen Auslegung elektrischer Netze kann damit gerechnet werden, dass über 80% der Wärmepumpen mit Direktanlauf bewilligt werden. Nur in relativ wenigen Fällen ist der bewilligte maximale Anlaufstrom kleiner als der LRA-Wert (Tabelle 68). Dann können folgende Anlaufstrombegrenzungen angewandt werden:

- Einfache Widerstands-Startstufe (bei kleinen Anlagen die häufigste Variante)

$P_{NT}$	Mittlere Aufnahmeleistung Angabe bei Normdaten (z.B. W10/W35). Zur Beurteilung der mittleren Netzbelastung.
$I_{MAX}$	Maximaler Betriebsstrom Zur Dimensionierung der Netzzuleitung und deren Absicherung.
$\cos \varphi$	Kosinus Phi Zur Beurteilung der Blindstrombelastung des Netzes. Blindstromkompensation in der Regel erforderlich bei $P_{NT} > 10 \text{ kW}$ .
LRA	Blockierstrom Grösster auftretender Strom beim Start. Zur Beurteilung der Netzzurückwirkung bei Direktanlauf.
$I_{ANLAUF}$	Anlaufstrom Zur Beurteilung der Netzzurückwirkung. Entspricht bei Direktanlauf dem Blockierstrom LRA. Kann mit einer Starthilfe auf unter 50% reduziert werden.
$n_{MAX}$	Maximale Anzahl Anläufe pro Stunde Zur Beurteilung der Häufigkeit von Netzzurückwirkungen. In der Regel werden 3 Anläufe pro Stunde zugelassen.

Tabelle 68: Elektrische Daten, die bei der Bewilligung eine Rolle spielen

		No.: Anno:	A . W . P .			
Typ		Arbeitsmittel [R]	Füllung		kg	
Normdaten						
Heizleistung [Q]		[kW]	[kW]		[kW]	
Kälteleistung [Q <sub>o</sub> ]						
Aufnahmeleistung [P <sub>NT</sub> ]						
$I_{max}$	A	LRA A	Sicherung A		V/50Hz	
max. Betriebsdruck		[bar]	Pumpe/ Ventilator		Abtauung	Zusatz
Heizung [H <sub>2</sub> O]			kW	kW	kW	kW
Verflüssiger [R]			A	A	A	A
Verdampfer [R]			V	V	V	V
Wärmequelle [H <sub>2</sub> O]						
			50 Hz			

Bild 69: AWP-Normschild

**Hinweise zur Wärmequelle «Wasser»**

- Öffentliches Interesse geht immer vor (z.B. die Trinkwasserversorgung)
- Grundwasser gilt als öffentliches Gewässer
- Die Nutzung von Grundwasser und Oberflächenwasser ist konzessionspflichtig
- Eine Konzession ist gebührenpflichtig und zeitlich begrenzt
- Die Konzession beinhaltet gegebenenfalls auch die fischereirechtliche Bewilligung
- Auch wenn keine Bewilligung verlangt wird, müssen selbstverständlich allfällige andere gesetzlichen Bestimmungen eingehalten werden

Kasten 70

- Stufenweise Erhöhung der Spannung mit mehreren Widerständen
- Vollwellen-Sanftanlasser durch Widerstände mit NTC-Verhalten

Mit diesen Massnahmen ist in der Regel eine Anlaufstrombegrenzung auf unter 50% des LRA-Wertes möglich. Die Stern-Dreieck-Schaltung ist für Wärmepumpen nicht geeignet. Da die Schwungmasse des Kompressors sehr klein ist, wird beim Umschalten praktisch der volle Anlaufstrom wirksam. Wichtig ist eine Verdichter-Anfahrrentlastung, die das Arlaufen gegen hohen Druck verhindert.

## 5.2 Wärmequelle

Praktisch alle Wärmequellen – ausser private Abwässer und Aussenluft – brauchen eine Bewilligung der zuständigen kantonalen Behörden. Diese kantonalen Beurteilungen basieren auf dem eidgenössischen Gewässerschutzgesetz und dem eidgenössischen Fischereigesetz. Obwohl versucht wurde, gesamtschweizerisch eine Vereinheitlichung zu erreichen, weichen die Bewilligungspraktiken der Kantone heute noch immer voneinander ab. Um Enttäuschungen und unnötige Arbeit zu vermeiden, ist es deshalb empfehlenswert, sich bereits in der Vorprojektphase um die Bewilligungen zu kümmern. Dies lohnt sich auch deshalb, weil oft finanzielle Begünstigungen möglich sind. Grundsätzlich müssen zwei Aspekte beachtet werden:

- Wasserwirtschaftliche Vorschriften
- Auflagen des Gewässerschutzes

Diese werden in Bild 71 beispielhaft für den Kanton Zürich dargestellt. Die Vorschriften in anderen Kantonen sind zwar ähnlich, müssen aber von Fall zu Fall abgeklärt werden. Weitere Hinweise zur Wärmequelle «Wasser» enthält Kasten 70.

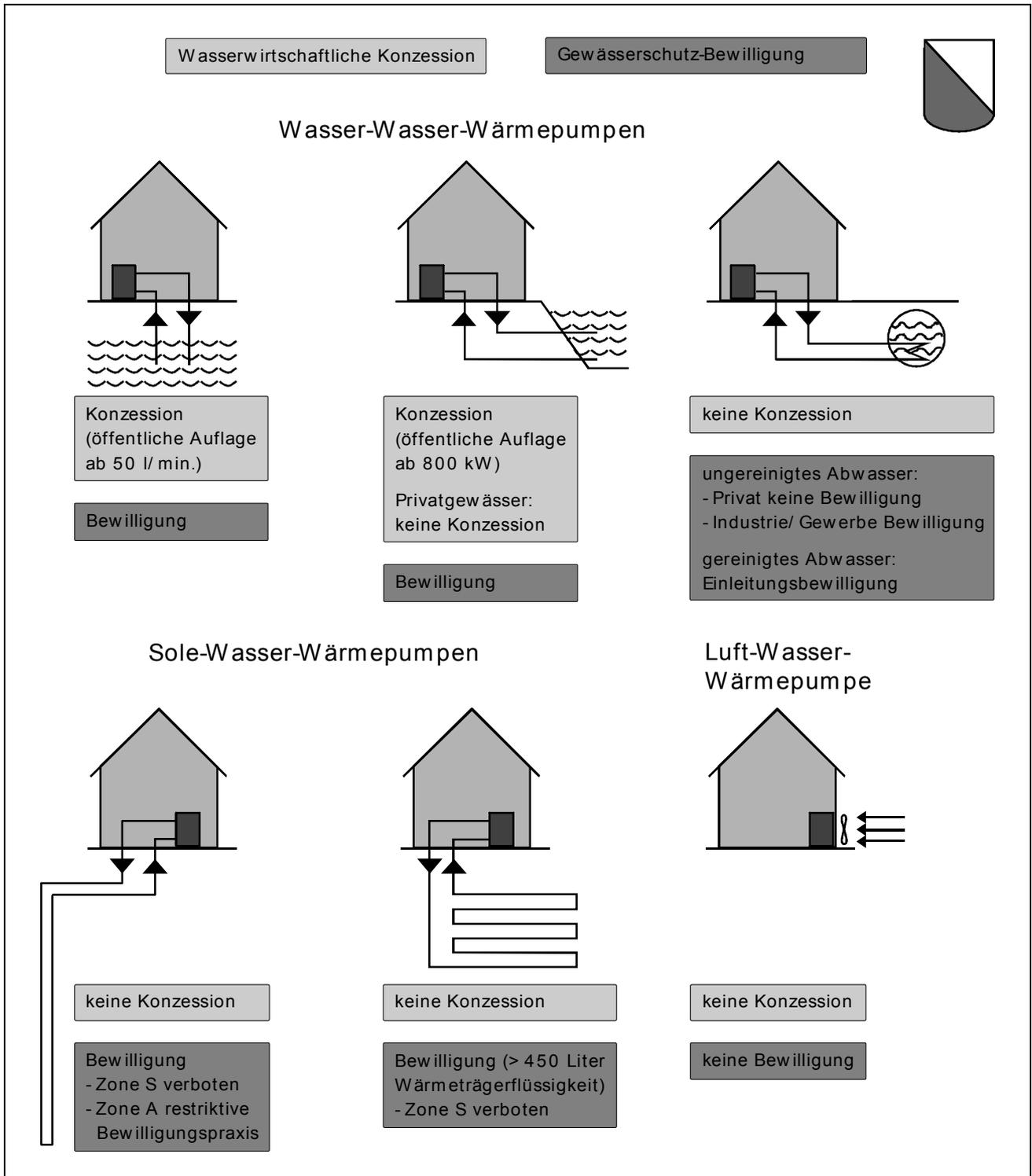


Bild 71: Wasserwirtschaftliche Konzessionen und Gewässerschutz-Bewilligungen am Beispiel des Kantons Zürich

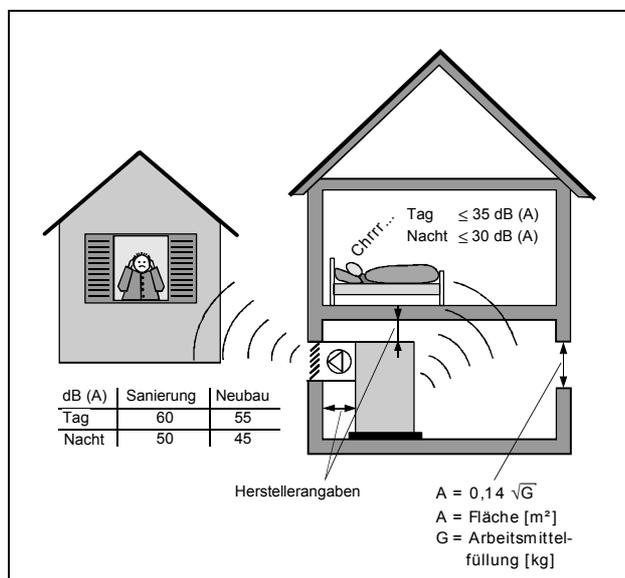


Bild 72: Weitere Vorschriften, die eingehalten werden müssen

### 5.3 Weitere Vorschriften

Neben den bisher genannten müssen noch zahlreiche weitere Vorschriften und Normen eingehalten werden, wie z.B. die eidgenössische Lärmschutzverordnung, die SIA-Norm 181 «Schallschutz», SUVA-Vorschriften, Baugesetze, feuerpolizeiliche Vorschriften usw. Daneben sollten unbedingt auch die Herstellerangaben beachtet werden. Nachfolgend werden nur die wichtigsten Punkte aufgeführt.

#### Schallschutz

Der Einsatz einer Wärmepumpe bedeutet – wie jeder andere Einsatz einer technischen Einrichtung –, dass unerwünschte Schallübertragungen möglich sind (Bilder 72 und 73):

- Belästigung durch Körper- und Luftschall im Gebäudeinnern
- Belästigung der Nachbarschaft durch Luftschall

#### Raumbelüftung

Bei kleineren Wärmepumpen genügt in der Regel ein natürlich belüfteter Raum, der mit einer schalldicht schliessenden Türe vom Wohnbereich getrennt ist. Für grössere Wärmepumpen müssen unter Umständen weitere Abklärungen getroffen werden. Der notwendige ins Freie führende Öffnungsquerschnitt kann nach der Formel in Bild 72 berechnet werden.

#### Aufstellung und Zugänglichkeit

Der Aufstellungsraum der Wärmepumpe ist wie ein «normaler» Heizraum zu planen. Im Falle einer Luft-Wasser-Wärmepumpe muss zusätzlich ein Kondensatablauf vorgesehen werden. Nur eine gut zugängliche Installation kann instandgehalten und gewartet werden. Die Wärmepumpe muss deshalb mindestens von zwei, besser aber von drei Seiten her zugänglich sein. Die entsprechenden Herstellerangaben sind zu beachten.

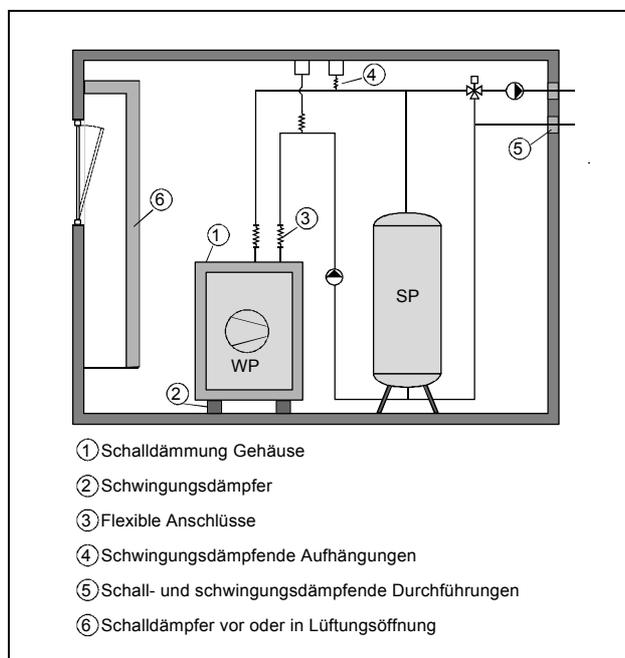


Bild 73: Schallschutzmassnahmen im Aufstellungsraum der Wärmepumpe

## 6. Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle

☞ Warum eine Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle notwendig ist und wie die damit zusammenhängenden Honorierungsfragen gelöst werden können, wird ausführlich in Heft 1, Kapitel 6, behandelt.

### 6.1 Instrumentierung

Die Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle beginnt bereits bei der Planung der Wärmepumpenanlage. Nur wenn man sich zu diesem frühen Zeitpunkt über den Ablauf und die notwendige Instrumentierung im klaren ist, kann später eine einwandfreie Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle durchgeführt werden. In den RAVEL-Standardschaltungen sind die notwendigen Messstellen definiert.

☞ Heft 5 «Standardschaltungen»

In einem ersten Schritt wird eine Messstellenliste erstellt und die einzelnen Messpunkte im Prinzipschema der Wärmeerzeugungsanlage eingezeichnet. Bild 75 zeigt als Beispiel das Prinzipschema des RAVEL-Wärmepumpenmodells (Bild 74). Folgende Gruppen von Messgrößen sind zu berücksichtigen:

- Zugeführte hochwertige Energien, wie Strom, Gas und Öl
- Abgegebene Energien (Nutzenergien), wie Wärme, Kälte und Strom
- Betriebsstunden und Schalthäufigkeit einzelner

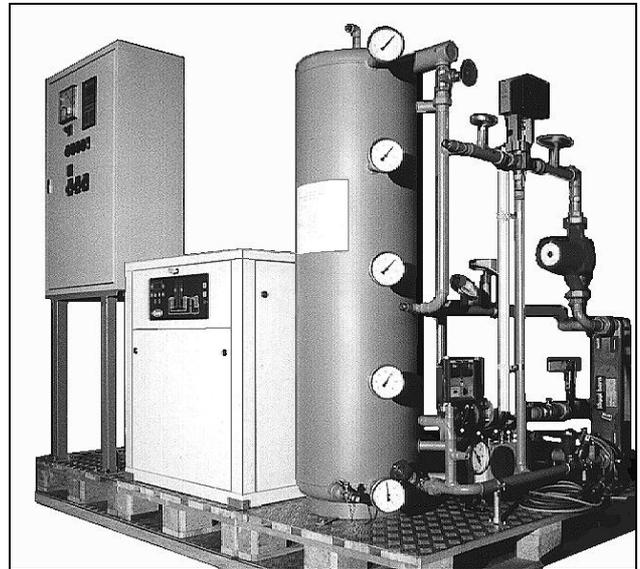


Bild 74: Dieses Wärmepumpenmodell (Prinzipschema siehe Bild 75) wird an RAVEL-Weiterbildungskursen eingesetzt. Damit kann die Einbindung der Wärmepumpe ins Gesamtsystem praxisgerecht demonstriert werden. Links der Elektro-schaltschrank, in der Mitte die Wärmepumpe, rechts der Speicher und die «Wärmenutzungsanlage» mit Plattenwärmetauscher.

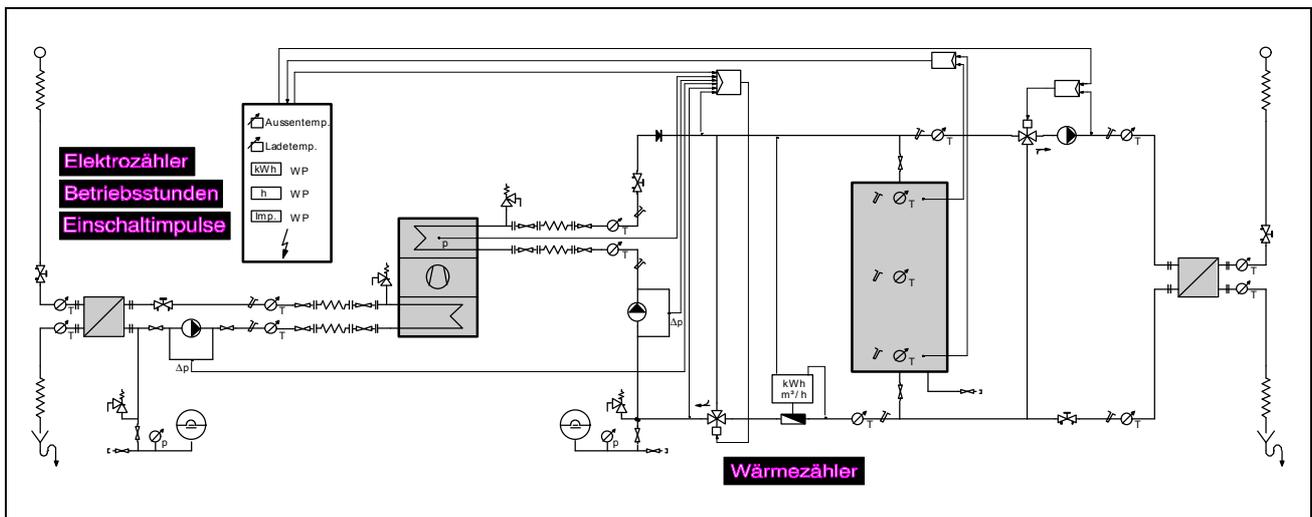


Bild 75: Prinzipschema des RAVEL-Wärmepumpenmodells. Die für eine einwandfreie Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle absolut notwendigen vier Messgeräte sind hervorgehoben. Temporärmeßstellen für wichtige Systemtemperaturen sind als Tauchhülensymbol dargestellt.



## 6.2 Manuelle Datenaufzeichnung und Auswertung

Dem Betreiber muss klar gemacht werden, dass es in seinem eigenen Interesse ist, eine gewisserhafte manuelle Datenaufzeichnung und Auswertung durchzuführen. Dazu sind dem Betreiber nach der Inbetriebnahme vorbereitete Messprotokolle (Tabelle 77) und eine «Gebrauchsanweisung» für die manuelle Datenaufzeichnung zu überreichen. Während der Betriebsoptimierung ist eine wöchentliche, möglichst immer zur selben Zeit stattfindende Datenaufzeichnung nötig. Für spezielle Betriebs- und Lastphasen ist sogar – für kurze Zeit – eine tägliche Datenaufzeichnung sinnvoll. Nur auf diese Weise besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, das Regelverhalten überprüfen zu können oder Fehlfunktionen zu erfassen (z.B. zu häufiges Ein- und Ausschalten der Wärmepumpe).

Die Auswertung und Interpretation der Daten muss laufend durch den Planer erfolgen. Die so gewonnenen Erkenntnisse versetzen ihn in die Lage, Mängel zu eliminieren und durch gezielte Korrekturen einen einwandfreien Betrieb zu garantieren.

## 6.3 Automatische Datenaufzeichnung und Auswertung

Für eine gezielte Systemoptimierung (Speicherbewirtschaftung, Spitzenlasten usw.) ist bei grösseren oder komplexeren Anlagen die Erfassung des zeitlichen Zusammenspiels der verschiedenen Komponenten entscheidend (Kasten 78). Nur mit Hilfe einer Intensivmessung mit dichtem Aufzeichnungsintervall können diese dynamischen Zusammenhänge und Funktionsabläufe erfasst werden. Dies bedingt den Einsatz von Geräten zur automatischen Datenaufzeichnung.

Vorhandene Gebäudeleitsysteme können unter gewissen Umständen dafür eingesetzt werden, wenn dies bei der Planung des Leitsystems bereits ins Pflichtenheft aufgenommen wird. Bedingung dafür ist allerdings, dass die gewünschten Daten auch tatsächlich ausgelesen und in einem PC-Tabellenkalkulationsprogramm weiterverarbeitet werden können (ASCII-Format).

Sicher immer dafür einsetzbar sind sogenannte Datalogger welche mit Eingängen für die Messung von analogen Signalen (Spannungen, Temperaturen, usw.)

Wann genügt eine manuelle Aufzeichnung und wann ist eine ergänzende automatische Aufzeichnung nötig?

Manuelle Aufzeichnung genügt in der Regel bei Standard-Wärmepumpenanlagen in Einfamilienhäusern (monovalent und bivalent) und Mehrfamilienhäusern (monovalent, wenige Gruppen, kurze Verbindungsleitungen).

Eine zusätzliche automatische Aufzeichnung ist bei Nicht-Standardanlagen in der Regel sinnvoll, speziell bei bivalenten und multivalenten Anlagen mit mehreren Gruppen und langen Verbindungsleitungen. Ausserdem ist eine automatische Aufzeichnung immer dann von Nutzen, wenn Schwierigkeiten auftreten und deren Ursache nicht gefunden wird.

Kasten 78



Bild 79: Datalogger (Quelle: Flexum Messtechnik AG, 8636 Wald)



Bild 80: Elektronischer Elektrozähler mit Impulsausgang (Quelle: Rauscher & Stoecklin AG, 4450 Sissach)

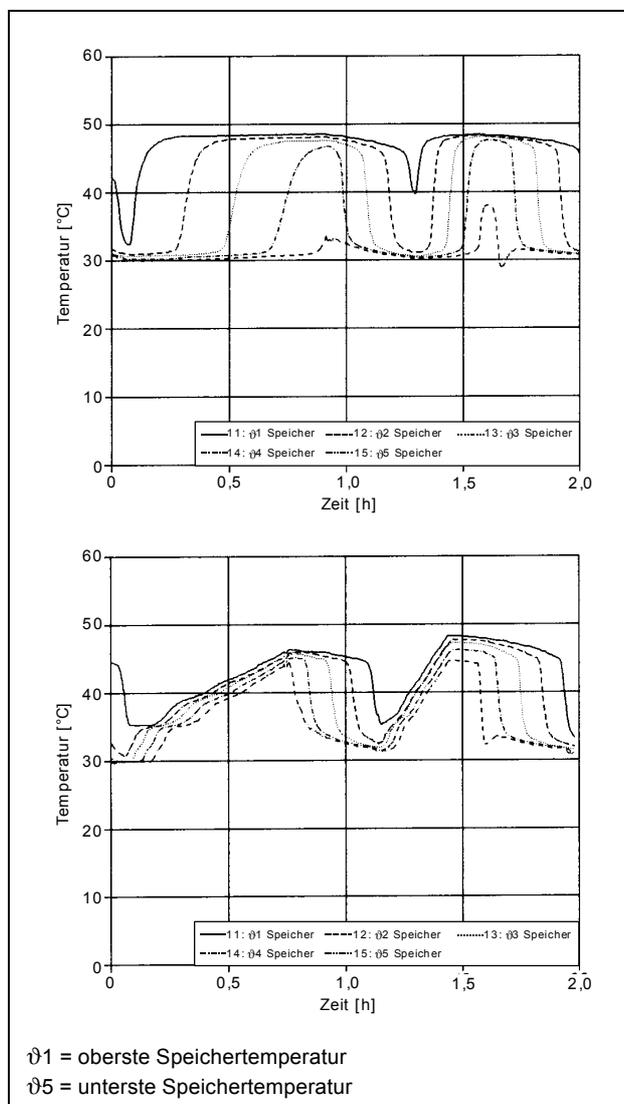


Bild 81: Darstellung von Messwerten in Funktion der Zeit. Damit können auch dynamische Vorgänge aufgezeigt werden, die bei einer manuellen Aufzeichnung nicht erkennbar wären. Hier sind, als Beispiel, die Speichertemperaturen des RAVEL-Wärmepumpenmodells dargestellt. Jeweils der erste Ladevorgang erfolgte mit und der zweite ohne Last.

Oben: Bei der Schichtladung steigt die Temperatur von oben nach unten bei einem Fühler nach dem andern relativ rasch an, sobald die Schichtung den Fühler passiert.

Unten: Bei der Stufenladung wird der Speicher in etwa vier Durchgängen geladen. Deutlich erkennbar ist nur die erste «Stufe», danach steigen die Temperaturen mehr oder weniger kontinuierlich an, weil die Schichtung infolge der kleinen Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger von etwa 5 K und des damit verbundenen grossen Durchflusses gestört ist.

und digitalen Signalen (Statussignale und Impulse) sowie einem Programmspeicher und einem Messdatenspeicher ausgerüstet sind (Bild 79). Folgende Hinweise betreffend Messsignal und Messfühler sind zu beachten:

- Messfühler mit Normsignalausgang (0...1/10 V oder 0/4...20 mA) sind üblicherweise direkt an den Datalogger anzuschliessen. Vorsicht gilt aber bei unterschiedlichen Potentialen der verschiedenen Messsignale. Häufig kann zwischen Momentanwert- und Mittelwertaufzeichnung gewählt werden; bei den hier vorkommenden Signalen ist eine Mittelwertaufzeichnung unbedingt vorzuziehen.
- Die in der Haustechnik am häufigsten verwendeten Widerstands-Temperaturfühler (Pt 100, Pt 1000, Ni 1000, Heissleiter) bedürfen einer Linearisierung, welche oft bereits im Datalogger vorgesehen ist (speziell für Pt 100). Bei manchen Dataloggern können auch eigene Fühlerlinearisierungen definiert werden. Bei Temperaturmessungen mit Widerstandsfühlern muss unbedingt der zusätzliche Widerstand der Anschlussleitungen mitberücksichtigt werden (z.B. Kompensation mittels Vierleiterschaltung). Infolge der grösseren Widerstandsänderung pro Grad sind deshalb auch Fühler mit höheren Widerstandswerten vorzuziehen (Pt 1000 oder Ni 1000). Auch Temperaturen sollen, wenn möglich, als Mittelwerte über den Aufzeichnungsintervall aufgezeichnet werden.
- Die bei Durchfluss- und Energiezählern üblichen Impulssignale können mit Zählereingängen erfasst werden, welche die meisten Datalogger vorsehen. Zählereingänge werden mit Relaiskontakten (potentialfrei) oder mit Transistorausgängen (nicht immer potentialfrei) angesteuert. Da Zählereingänge die Impulse über den gewählten Aufzeichnungsintervall aufsummieren, muss darauf geachtet werden, dass der maximale Zählbereich der Eingänge nicht überschritten wird.
- Statussignale (z.B. «Pumpe ein» oder «Stufe 2 ein») können mit den meisten Dataloggern erfasst werden. Mittels auf Klemmen im Schaltschrank herausgeführten Relaiskontakten oder Optokoppler-Ausgängen sind diese Signale problemlos und insbesondere ungefährlich zu erfassen.
- Interessanter als Momentanwerte sind bei Statussignalen Zeitwerte («Betriebsstunden»), welche die Einschaltdauer innerhalb eines Aufzeichnungsintervalls angeben. Diese Art von Eingang sieht man bei Dataloggern allerdings eher selten. Diese Messungen

müssen deshalb oft über Zählereingänge durchgeführt werden (mit Hilfe von fixen externen Zeitimpulsen). Bei automatischen Datenaufzeichnungen zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens einer Anlage haben sich Aufzeichnungsintervalle von etwa 10 Minuten als günstig erwiesen. Nachdem anhand der manuellen Datenerfassung sichergestellt wurde, dass eine Anlage keine grösseren Mängel mehr aufweist, genügen üblicherweise Intensivmessungen über 1 bis 2 Monate. Für die Auswertung sind normale Tabellenkalkulationsprogramme (Excel, SuperCalc, usw.) geeignet. Einige Beispiele zeigen die Bilder 81 und 83. Der Datenaustausch zwischen Datalogger und Tabellenkalkulationsprogramm geschieht am einfachsten über ein ASCII-Datenfile. Intensivmessungen mit oder ohne Datenauswertung und Dateninterpretation werden auch als Dienstleistung von verschiedenen Firmen angeboten.

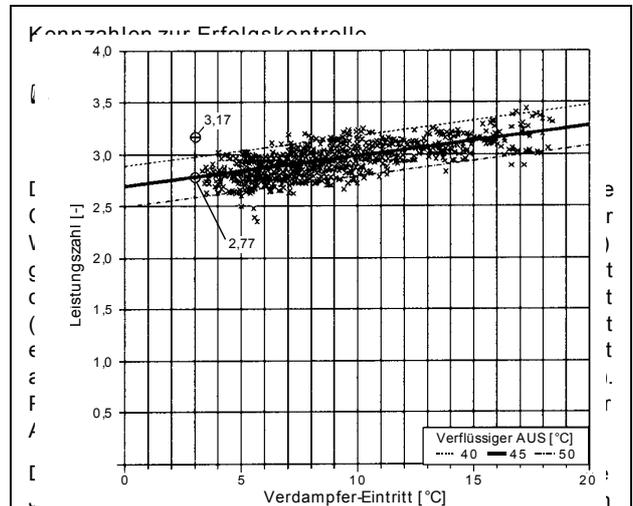
## 6.4 Erfolgskontrolle

Abschluss jeder Betriebsoptimierung bildet die Erfolgskontrolle. Nur so kann eine einwandfreie zweite Abnahme (Garantieabnahme) durchgeführt werden. Nun zeigt sich, ob die Ziel- und Grenzwerte der Kennzahlen gemäss Kasten 82 auch tatsächlich erreicht werden. Voraussetzung dazu ist allerdings, dass sich der Bauherr diese Kennzahlen hat schriftlich garantieren lassen. Die gemessenen Energieverbräuche ermöglichen ferner die Erstellung einer Jahres-Energiebilanz und die Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsrechnung.

## 6.5 Betriebsüberwachung

Wenn die Betriebsoptimierung durchgeführt und die Anlage endgültig abgenommen ist, muss dafür gesorgt werden, dass auch weiterhin ein einwandfreier Betrieb gewährleistet ist. Folgende Fragen müssen geklärt sein:

- Ist eine für den Nichtfachmann verständliche Anlagendokumentation vorhanden? (Nachgeführte Schemata, Funktionsbeschreibung, sämtliche Reglereinstellungen, Betriebsanleitung, wichtige Adressen und Telefonnummern)
- Welche Betriebsdaten und Ereignisse müssen durch den Verantwortlichen (z.B. Hauswart), zu welchen Zeitpunkten im Messprotokoll eingetragen werden?
- Wie wertet der Betreiber die Messprotokolle aus, und wann muss er allenfalls einen Fachmann beziehen?



die Planerin oder den Planer schriftlich als Ziel- und Grenzwert (siehe unten) garantiert werden. Die Kontrolle ist Bild 83. Parallel dazu muss der Grenzwert in Funktion der Messwerte problematisch möglich, die Leistungszahl in Funktion der Verdampfereintrittstemperatur mit der Verflüssigeraus-Bei bivalenten Anlagen ist es zusätzlich sinnvoll, den Verdampfereintrittstemperatur als weiteren Parameter. Der Hersteller gab für die Anlage eine Leistungszahl von 3,17 an, die gemessene Leistungszahl beträgt jedoch 2,77. Eine Überprüfung ist allerdings nur möglich, wenn auch der Energieverbrauch des zusätzlichen Wärmeerzeugers gemessen wird.



Als absolutes Minimum sollte beim Bau einer Wärmepumpenanlage die Jahresarbeitszahl als Ziel- und Grenzwert dem Bauherrn schriftlich garantiert werden. Den beiden Werten soll dabei eine unterschiedliche rechtliche Bedeutung beigemessen werden:

- Nichteinhaltung des Zielwertes sagt nur etwas über die Qualität der Planung aus, hat aber keine garantierechtlichen Folgen
- Nichteinhaltung des Grenzwertes hat hingegen garantierechtliche Folgen

Wie weit und mit welchen rechtlichen Konsequenzen die übrigen Kennzahlen fixiert werden, bleibt den Beteiligten überlassen. Der Bauherr sollte sich den Endenergieverbrauch «Wärme» garantieren lassen, und der Planer sollte sich – als «Rückversicherung» – vom Wärmepumpenhersteller eine Garantie über Leistungszahl oder COP geben lassen.

Kasten 82

- Was ist bei einer Störung zu tun, und wer muss informiert werden?
- Welche Wartungsarbeiten sind wann durch den Betreiber zu erledigen? (Filterwechsel usw.)
- Wer ist dafür verantwortlich, dass bei Änderungen und Erweiterungen die Anlagedokumentation nachgeführt wird?

Bei den meisten auftretenden Betriebsstörungen handelt es sich um Ausfälle, die über eine längere Betriebsdauer entstanden sind. Demzufolge können bei einer regelmässigen Überprüfung der Wärmepumpe Totalausfälle weitgehend vermieden werden. In Tabelle 84 sind die häufigsten Störungsursachen bei Wärmepumpenanlagen zusammengestellt. Bei minimalen Grundkenntnissen und guten Betriebsunterlagen könnten Fehlfunktionen durch den Installateur oder Betreiber der Anlage oft frühzeitig erkannt werden.

Bei «massgeschneiderten» Wärmepumpen grösserer Bauart, die nicht aus einer Serienfabrikation stammen, können zusätzlich konstruktionsbedingte Störquellen auftreten. Dabei ist vor allem auf Vibrationen zu achten, die nach einiger Zeit zu Rohrbrüchen führen können. Auch dieses Problem kann durch eine vorbeugende Wartung weitgehend gelöst werden.

Zudem führen oft viel zu «grobe» Sollwertpotentiometer infolge ungenauer Einstellung zu undefinierten Betriebszuständen und Störungen. Deshalb sollte schon bei der Gerätewahl speziell auf die Bedienungsfreundlichkeit geachtet werden.

Störungen und deren Ursachen	Frühzeitig erkennbar? (durch Installateur oder Betreiber)
Niederdruckstörung – Arbeitsmittelmangel – Zu kleine Wärmequellenleistung – Wärmeträgermangel (Wasser-Glykol-Gemisch) auf der Wärmequellenseite – Fehlerhafte Abtauung – Fehlerhafte Wasseraufbereitung	Ja Ja Teilweise Nein Nein
Hochdruckstörung – Verschmutzter Verflüssiger – Fehlerhafte Wasseraufbereitung – Fehlerhafte Abtauung – Wassermangel im Heizungssystem	Nein Nein Nein Ja
Überlast Verdichter – Mangel Elektrizitätsversorgung – Schlechte elektrische Anschlüsse – Defekt im Arbeitsmittelkreislauf	Nein Nein Nein
Ventilator – Schlechte elektrische Anschlüsse – Fehlerhafte Abtauung	Nein Nein
Pumpen – Schlechte elektrische Anschlüsse – Mechanisch blockiert	Nein Ja

Tabelle 84: Zusammenstellung der häufigsten Störungen an WP-Anlagen

# Benennungen, Formelzeichen, Abkürzungen

## Benennungen und Formelzeichen

Anlaufstrom [A].....	$I_{ANLAUF}$
Aufnahmeleistung bei Normdaten [kW].....	$P_{NT}$
Ausschalttemperatur [°C].....	$\vartheta_{AUS}$
Betriebsstrom, maximal [A].....	$I_{MAX}$
Blockierstrom [A].....	$LRA$
Brennstoffverbrauch der Kesselanlage [kWh].....	$W_{KEA}$
Druck [kPa].....	$p$
Druckdifferenz [kPa].....	$\Delta p$
Durchfluss, Massenstrom [kg/h].....	$\dot{m}$
Durchfluss, Volumenstrom [m³/h].....	$V$
Einschalttemperatur [°C].....	$\vartheta_{EIN}$
Elektro-Thermo-Verstärkung [-].....	$ETV$
Energie, allg. [J, MJ, Ws, kWh].....	$W$
Energiekennzahl [MJ/m²].....	$E$
Energieverbrauch Abtaueinrichtung [kWh].....	$W_A$
Energieverbrauch Carterheizung [kWh].....	$W_C$
Energieverbrauch Steuerung/Regelung [kWh].....	$W_{SR}$
Energieverbrauch Verdampferpumpe [kWh].....	$W_{P,V}$
Energieverbrauch Verdichter [kWh].....	$W_{WP}$
Energieverbrauch Verflüssigerpumpe [kWh].....	$W_{P,K}$
Heizleistung Verflüssiger [kW].....	$Q_{WP}, Q_K$
Hilfsenergieverbrauch der Kesselanlage [kWh].....	$W_{KEA,H}$
hydraulische Leistung [kW].....	$P_{hydraul.}$
Jahresarbeitszahl [-].....	$JAZ$
Jahresnutzungsgrad Kessel [-].....	$\eta_{KE,J}$
Korrekturfaktor, allg. [-].....	$f$
Kosinus Phi [-].....	$\cos \varphi$
$k_v$ -Wert [m³/h].....	$k_v$
Ladetemperatur [°C].....	$\vartheta_{Ladung}$
Leistung Wärme, allg. [W, kW].....	$Q$
Leistung, allg. [W, kW].....	$P$
Leistungsanteil Verdampfendruckabfall [kW].....	$P_V$
Leistungsanteil Verflüssigerdruckabfall [kW].....	$P_K$
Leistungsaufnahme Abtaueinrichtung, mittl. [kW].....	$P_A$
Leistungsaufnahme Pumpe [kW].....	$P_{Pumpe}$
Leistungsaufnahme Steuerung/Regelung [kW].....	$P_{SR}$
Leistungsaufnahme Verdichter [kW].....	$P_{WP}$
Leistungszahl Wärmepumpe [-].....	$\varepsilon$
Massenstrom [kg/h].....	$\dot{m}$
Nutzungsgrad, Wirkungsgrad [-].....	$\eta$
Pumpenwirkungsgrad [-].....	$\eta_{Pumpe}$
Rücklauftemperatur [°C].....	$\vartheta_{RL}$
Schalthäufigkeit, maximale [1/h].....	$n_{MAX}$
Speicherinhalt [m³].....	$V_{SP}$
Speicherkapazität [kWh].....	$Q_{SP}$
Temperatur [°C].....	$\vartheta$
Temperaturdiff. VL-RL im Auslegepunkt [K].....	$\Delta\vartheta_{Auslegung}$
Temperaturdiff. VL-RL im Bivalenzpunkt [K].....	$\Delta\vartheta_{Bivalenz}$

Temperaturdifferenz [K].....	$\Delta\vartheta$
Temperaturdifferenz über Verflüssiger [K].....	$\Delta\vartheta_K$
Verdampfungstemperatur [°C].....	$\vartheta_{Verdampfung}$
Verdampfungstemperatur, minimal [°C].....	$\vartheta_{Verdampfung, MIN}$
Verdampferaustrittstemperatur, minimal [°C].....	$\vartheta_{V,MIN}$
Verflüssigeraustrittstemperatur [°C].....	$\vartheta_{K,A}$
Verflüssigeraustrittstemperatur, maximal [°C].....	$\vartheta_{K,MAX}$
Verflüssigerdurchfluss [m³/h].....	$V_K$
Verflüssigungstemperatur [°C].....	$\vartheta_{Verflüssigung}$
Verflüssigungstemperatur, maximal [°C].....	$\vartheta_{Verflüssigung, MAX}$
Volumenstrom [m³/h].....	$V$
Vorlauftemperatur [°C].....	$\vartheta_{VL}$
Wärmeleistung, Wärmestrom, allg. [W, kW].....	$Q$
Wärmemenge Wärmeerzeugungsanlage [kWh].....	$Q_{WEA}$
Wärmemenge Wärmepumpe [kWh].....	$Q_{WP}$
Wärmemenge, allg. [J, MJ, Ws, kWh].....	$Q$
Wärmeverluste der Speicheranlage [kWh].....	$Q_{SPA}$
Wirkungsgrad, Nutzungsgrad [-].....	$\eta$
Zeit [s, h].....	$t$

## Abkürzungen

Abwärmenutzung.....	AWN
Austritt.....	A
Eintritt.....	E
Heizungsanlage.....	HA
Kessel.....	KE
Kesselanlage.....	KEA
Maximalwert.....	MAX
Minimalwert.....	MIN
Rücklauf.....	RL
Speicher.....	SP
Speicheranlage.....	SPA
Steuerung/Regelung.....	SR
Verdampfer.....	V
Verflüssiger («Kondensator»).....	K
Vorlauf.....	VL
Wärmeabgabe.....	WA
Wärmeerzeugungsanlage.....	WEA
Wärmeerkopplung.....	WKK
Wärmenutzungsanlage.....	WNA
Wärmepumpe.....	WP
Wärmepumperheizungsanlage.....	WPHA
Wärmepumpenanlage.....	WPA
Wärmequelle.....	WQ
Wärmequellenanlage.....	WQA
Wärmerückgewinnung.....	WRG
Wärmeverteilung.....	WV

 Vollständiges Verzeichnis in Heft 1!

## Index

- Abgrenzung, 5
- Abkürzungen, 59
- Abluft, 24
- Abtauvorrichtung, 11
- Abwärme, 24
- Abwärmenutzung, 13
- Abwasser, 24
- Anlaufstrom, 49
- Anlaufstrombegrenzung, 49
- Anschlussgesuch, 49
- Arbeitsmittel, 12; 19
- Aufnahmeleistung bei Normdaten, 49
- Aufstellung, 52
- Auslegepunkt, 15
- Auslegung, 29
- Ausschalttemperatur, 36; 37
- Aussenluft, 23; 34; 44
- Aussentemperatur, 54
- Auswertung, 57
- automatische Datenaufzeichnung, 55
- AWP-Normschild, 49
- Bauarten, 7
- Bauteile, 8
- Benennungen, 59
- Betriebsarten, 16; 26
- Betriebsoptimierung, 53
- Betriebsstrom, maximaler, 49
- Betriebsstunden, 57
- Betriebsüberwachung, 57
- Betriebsverhalten, 15
- Bewilligungsverfahren, 49
- Bilanzgrenzen, 6; 7
- bivalent-alternativer Betrieb, 17
- bivalent-paralleler Betrieb, 16
- Bivalenzpunkt, 16
- Blindstrom, 49
- Blockierstrom, 49
- Coefficient of Performance, 45; 57
- Computerberechnung, 48
- COP, 45; 57
- Datalogger, 56
- Dauermessstellen, 54
- Definitionen, 6; 7
- Direktanlauf, 49
- Direktnutzung, 18
- Druckdifferenz, 29
- Druckverlust, 25
- Durchfluss, 29
- Durchflusszähler, 56
- Einheiten, 59
- Einsatzbedingungen, 18
- Einschalttemperatur, 36; 37
- elektrische Widerstandsheizung, 5
- Elektrizitätstarife, 28
- Elektrizitätswerk, 49
- Elektro-Thermo-Verstärkung, 5; 7; 46
- elektronisches Expansionsventil, 14
- Energiekennlinie, 42
- Energiekennzahl, 57
- Energiezähler, 56
- Entwicklungstendenzen, 14
- Erdregister, 22
- Erdreich, 22; 33
- Erdwärmesonden, 22; 26
- Erfolgskontrolle, 53; 57
- Europäische Norm EN 255, 7
- Expansionsventil, 10
- Fallbeispiel, 41
- Fehlervermeidung, 30
- Fehlzirkulation, 44
- Filterbrunnenanlage, 21
- Formeln, 29
- Formelzeichen, 59
- Frostschutzmittel, 19
- Funktionsweise der Wärmepumpe, 5
- Gebäudeleitsysteme, 55
- Geothermische Wärme, 23
- Gewässerschutz-Bewilligungen, 51
- gleitende Verflüssigeraustrittstemperatur, 18
- Glykol, 19
- Grenzwert, 57
- Grundwasser, 20; 31
- halbhermetischer Hubkolbenverdichter, 8
- Heizgrenze, 16
- Heizkessel, 44
- Heizkurve, 42
- Heizleistung, 15; 16
- Heizungsanlage, 6
- hermetischer Hubkolbenverdichter, 8
- Hochdruckpressostat, 30
- hydraulische Entkopplung, 35
- hydraulischer Abgleich, 44
- Impulsausgänge, 54
- Indices, 59
- Indirektnutzung, 18
- Instrumentierung, 53
- Intensivmessung, 55
- Investitionskosten, 28
- Jahresarbeitszahl, 27; 46; 57
- Jahresnutzungsgrad, 27
- Kennzahlen, 6; 7; 27; 45; 57
- Kesselanlage, 6
- Kesselpumpe, 45
- Kleinwärmepumpe, 13
- Kompakt-Wärmepumpen, 7
- konstante Verflüssigeraustrittstemperatur, 18
- Kosinus Phi, 49
- Kosten, 28
- Kurzbezeichnung, 7
- Leistungszahl, 27; 45; 57
- LRA-Wert, 49
- Luft-Luft-Wärmepumpe, 7
- Luft-Wasser-Wärmepumpe, 7; 44
- manuelle Datenaufzeichnung, 55
- Messprotokoll, 54; 55
- Messstellen, 53
- Mikroprozessortechnik, 14
- monoenergetischer Betrieb, 17

- monovalenter Betrieb, 16  
Niederdruckpressostat, 30  
Normsignalausgang, 56  
Nutzungsgrad der Wärmeerzeugungsanlage, 57  
Oberflächengewässer, 21; 32  
Planungshinweise, 15  
Planungszielwerte, 25  
PNT-Wert, 49  
potentialfreie Kontakte, 54  
Produkttoleranz, 25  
Pumpenleistung, 29  
Raumbelüftung, 52  
RAVEL und die Wärmepumpentechnik, 5  
Rotationsverdichter, 9; 14  
Schallschutz, 52  
Schalthäufigkeit, 49  
Schichtladung, 18; 35  
Schichtladung, bivalent-alternativ, 40  
Schichtladung, bivalent-parallel, 39  
Schichtladung, monovalent, 38  
Schraubenverdichter, 9  
Scroll-Verdichter, 9; 14  
Sicherheitseinrichtungen, 10  
Sole-Wasser-Wärmepumpe, 7  
Speicher, 35; 44  
Speicheranlage, 6  
Split-Wärmepumpen, 8  
Standardschaltungen, 29  
Statussignale, 56  
Störungen, 58  
Stufenladung, 18; 35  
Stufenladung, bivalent-alternativ, 40  
Stufenladung, bivalent-parallel, 39  
Stufenladung, monovalent, 38  
Tabellenkalkulationsprogramme, 57  
Tauchhülsen, 54  
technischer Speicher, 35; 36  
Temperatur-Leistungs-Diagramm, 15; 42  
Temperaturdifferenz über dem Verflüssiger, 36  
temporäre Messstellen, 54  
Turboverdichter, 8  
Umweltstrategie, 5  
Verdampfer, 9; 25  
Verdampferpumpe, 43  
Verdampfungstemperatur, 15; 30  
Verdichter, 8  
Verflüssiger, 10; 25  
Verflüssigeraustrittstemperatur, 18  
Verflüssigerdurchfluss, 37  
Verflüssigerpumpe, 43  
Verflüssigungstemperatur, 15; 30  
Verordnung über umweltgefährdende Stoffe, 12  
Wärmeabgabe, 6  
Wärmeerzeugungsanlage, 6  
Wärmekraftkopplung, 5  
Wärmenutzungsanlage, 6  
Wärmepumpe, Bilanzgrenze, 6  
Wärmepumpen-Entfeuchter, 13  
Wärmepumpen-Wassererwärmer, 13  
Wärmepumpenanlage, 6  
Wärmepumpenheizungsanlage, 6  
Wärmepumpenmodell, 53  
Wärmepumpentechnik, 5  
Wärmequelle, 20; 50  
Wärmequellenanlage, 6  
Wärmerückgewinnung, 13  
Wärmespeicher, 35; 36  
Wärmetauscher, 14  
Wärmeverteilung, 6  
Wärmezähler, 56  
Wäschetrocknung, 13; 14  
Wasser-Wasser-Wärmepumpe, 7  
Wasseranalyse, 21  
Wassererwärmung, 13  
Wasserwirtschaftliche Bewilligungen, 51  
Widerstands-Temperaturfühler, 56  
Wirtschaftlichkeit, 47  
Witterungsführung, 19  
Zielwert, 25; 27; 57  
Zugänglichkeit, 52