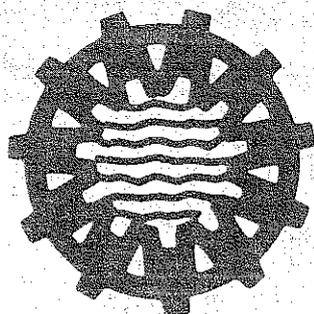


**Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
(LAWA)**

**Grundlagen zur Beurteilung
des Einsatzes
von Wärmepumpen aus
wasserwirtschaftlicher Sicht**



ausgearbeitet von der LAWA-Arbeitsgruppe
Wärmebelastung der Gewässer
1980

Herausgeber: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) 1980

Vertrieb: ZfGW-Verlag GmbH., Postfach 90 10 80, 6000 Frankfurt/Main, Telefon (06 11) 77 08 77

Geleitwort

Eine der zentralen Aufgaben dieses Jahrzehntes ist die Bewältigung der Energieprobleme. Dabei ist die Energieeinsparung sicher eines der wichtigsten Glieder in der Lösungskette. Eine große Bereitschaft aller Bürger, den Energieverbrauch einzuschränken, ist deutlich spürbar geworden. Im Hinblick auf unsere knapper werdenden natürlichen fossilen Energiequellen und deren vielfältigen, wertvollen anderen Verwendungsmöglichkeiten sollte dieser Trend noch verstärkt und bewußter werden. Der Einsatz der Wärmepumpe ist dabei ein Beitrag, Primärenergie so effektiv wie möglich auszunutzen.

Viele Mitbürger beteiligen sich durch die Verwendung von Wärmepumpen an der Energieeinsparung. Bund und Länder unterstützen solche Vorhaben. Gerade aber dort, wo Wasser als Wärmequelle dienen kann, verhindern oft höherwertige Gründe des Wohls der Allgemeinheit deren Einsatz.

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser sah es deshalb als besondere Aufgabe an, mit einer aufklärenden und fundierten Schrift die breite Öffentlichkeit über die Einsatzmöglichkeiten von Wärmepumpen aus wasserwirtschaftlicher Sicht zu unterrichten und den Wasserbehörden einheitliche Beurteilungskriterien an die Hand zu geben. Sie will damit einerseits den Nutzen der Wasser/Wasserwärmepumpe deutlich werden lassen, aber auch gleichzeitig die Grenzen der Einsatzmöglichkeit aufzeigen und dafür Verständnis wecken.

Den Mitarbeitern aus Wissenschaft, Technik und Verwaltung in der Arbeitsgruppe „Wärmebelastung der Gewässer“ sei für ihre gründliche Bearbeitung des Themenkreises gedankt.

Der Minister für Ernährung,
Landwirtschaft, Umwelt und Forsten
des Landes Baden-Württemberg
Vorsitzender
der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser

Stuttgart, im August 1980

Vorwort

Die energiepolitische Situation, in der wir uns gegenwärtig befinden, läßt es angezeigt erscheinen, über die Möglichkeiten des Einsatzes von Wärmepumpen aus der Sicht der Wasserwirtschaft umfassend zu berichten. Es ist verständlich, daß Unsicherheit, gar Mißbehagen aufgekommen ist, weil einerseits der Einsatz der Wärmepumpe propagiert wird und andererseits von den örtlich zuständigen Behörden ihr Einsatz und Betrieb untersagt werden mußte. Hier erschien es notwendig Klarheit zu schaffen sowie die Möglichkeiten und die Beurteilungskriterien zum Einsatz von Wärmepumpen aufzuzeigen. Es darf jedoch nicht übersehen werden, daß auch Wärmepumpen Energie benötigen. Wir sind folglich nach wie vor zusätzlich auf andere Energiequellen angewiesen.

In Kapitel 1 „Einführung“ werden diese Problemstellungen in aller Deutlichkeit noch einmal aufgezeigt. Die übrigen Kapitel befassen sich mit Fachfragen. Die einzelnen Einsatzmöglichkeiten von Wärmepumpen werden in den Kapiteln 6 und 7 aus wasserrechtlicher Sicht eingehend behandelt. Sie sollen den Fachbehörden und den für das Wasserrecht zuständigen Behörden bei den Beurteilungen der Einzelfälle eine Entscheidungshilfe sein, zugleich aber auch den Antragstellern die Problematik des Einsatzes von Wärmepumpen deutlich machen.

Mein Dank gilt den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe, die mich bei der Aufstellung dieser Grundlagen mit Rat und Tat ganz wesentlich unterstützt haben.

Mainz, im Juli 1980

Prof. Dr. Klotter

Mitglieder der Arbeitsgruppe

Min. Rat Prof. Dr. Klotter (Obmann)	Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz
Prof. Dr.-Ing. Böhnke	Technische Hochschule Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft (Vertreter der ATV)
Reg. Baudirektor Fleig	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
Oberreg. Rat Günneberg	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Direktor Dr. Heymann	Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen (Vertreter des DVGW)
Reg. Dir. Johannsen	Deutscher Wetterdienst, Offenbach
Reg. Dir. Dr. Kothé	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Dr. Kraus	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Eschborn
Direktor Dr.-Ing. Krolewski	Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG, Dortmund (Vertreter der VDEW)
Chem. Dir. Dr. von Loh	Niedersächsisches Wasseruntersuchungsamt, Hildesheim
Obering. Dipl.-Ing. Nagel	Thyssen Niederrhein AG, Energiebereich, Oberhausen (Vertreter des BDI)
Reg. Direktorin Dr. Pätze	Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf
Direktor Dr. Peine	BASF AG, Ludwigshafen (Vertreter des BDI/VCI)
Abt.-Dir. Dr.-Ing. Richter	Bayernwerk AG, München (Vertreter der VDEW)
Oberreg. Rat Dr.-Ing. Steinlein	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München
Dipl.-Biol. Dr. Tent	Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Landwirtschaft, Strom- und Hafenaubau, Hamburg
Reg. Baudirektor Wörner	Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg, Stuttgart
Weiterhin haben an der Erarbeitung der „Grundlagen – Wärmepumpen“ insbesondere mitgewirkt:	
Dr. Balke	Institut für Geologie und Paläontologie Uni Tübingen
Dr. Fritzmann	BASF AG, Ludwigshafen
Bauoberamtsrat Loos	Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz
Dipl.-Ing. Müller	Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG, Dortmund
Dr.-Ing. Ritter	Technische Hochschule Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft
Dr.-Ing. Täubert	Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG, Dortmund
Dr. Wunderlich	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Inhalt

	Seite
Geleitwort	3
Vorwort	3
1. Einführung	7
1.1 Erfordernis rationeller Energieverwendung	7
1.2 Prinzip der Wärmepumpe	7
1.3 Anwendungsbereich der Wärmepumpe und benötigte Wassermengen	9
2. Energieumwandlungsketten	10
3. Technik und Technologie der Wärmepumpen	13
3.1 Funktionsprinzip einer Kompressionswärmepumpe	13
3.2 Wärmequelle Grundwasser	15
3.3 Wärmequelle Oberflächenwasser	18
3.4 Wärmequelle Erdreich	19
3.4.1 Horizontale Wärmetauscherrohre	19
3.4.2 Vertikale Erdwärmesonden	21
4. Arbeitsmittel für Wärmepumpen	23
4.1 Allgemeines	23
4.2 Thermisch-physikalische Betrachtung der Arbeitsmittel für Wärmepumpen	23
4.3 Wasserwirtschaftlich-toxikologische Eigenschaften	24
4.4 Handelsprodukte für Arbeitsmittel in Wärmepumpen	24
4.5 Wärmeträgerflüssigkeit „Sole“	25
4.5.1 Wasserwirtschaftlich-toxikologische Eigenschaften der „Sole“	26
5. Mögliche wasserwirtschaftliche Auswirkungen beim Einsatz von Wärmepumpen	27
5.1 Allgemeine physikalisch-chemische Aspekte	27
5.2 Biologische Aspekte	30
5.3 Auswirkungen bei den verschiedenen Wärmenutzungen	31
5.3.1 Auswirkungen bei der Nutzung der Grundwasserwärme	31
5.3.2 Auswirkungen bei der Nutzung von Oberflächenwasser	34
5.3.3 Auswirkungen bei der Nutzung von Abwasser	35
5.3.4 Auswirkungen bei der Nutzung von Erdreichwärme	39
5.3.5 Auswirkungen bei der Nutzung von Trinkwasser	42
6. Hinweise für die wasserrechtliche Prüfung von Anlagen zur Nutzung der Wasser-, Boden- und Abwasserwärme	43
6.1 Einführung	43
6.2 Wasserrechtliche Beurteilung der verschiedenen Arten von Wärmepumpen	43
6.3 Kriterien für die Beurteilung von Wärmepumpenanlagen aus wasserwirtschaftlicher Sicht	44
6.4 Wasserrechtliches Verfahren	45
7. Muster eines Erlaubnisbescheids für Grundwasserbenutzungen im Zusammenhang mit dem Betrieb einer Wärmepumpe	47
8. Schrifttum	50

1. Einführung

1.1 Erfordernis rationeller Energieverwendung

In der Fortschreibung ihrer Energieprogramme mißt die Bundesregierung der rationellen Energieverwendung und der Energieeinsparung einen hohen Stellenwert bei. Diese Auffassung baut auf folgender Einschätzung der Energiesituation auf: *

1. Die Vorräte der bisher hauptsächlich genutzten fossilen Energieträger sind begrenzt. Vor allem die Weltvorräte an Erdöl und Erdgas gehen in einigen Jahrzehnten zur Neige.
2. Das wirtschaftliche Wachstum in den Industrieländern und der Nachholbedarf der Entwicklungsländer werden zu weltweit steigender Nachfrage nach Energieträgern und folglich zu rascherer Erschöpfung der nutzbaren Vorräte führen.
3. Eine schon früher eintretende Verknappung kann sich ergeben, wenn die Gewinnung fossiler Energieträger entweder aus wirtschaftlichen Gründen oder wegen technischer Schwierigkeiten hinter der Nachfrageentwicklung zurückbleibt. Aber auch politisch bedingte Engpaßsituationen können zu Energiekonflikten führen.
4. Energieumsatz ist mit Umweltbelastungen verbunden, die oftmals begrenzende Bedingungen für den Umfang der Energienutzung insgesamt und die Art der Verwendung einzelner Energieträger darstellen.

Technologien zur größtmöglichen Ausnutzung der eingesetzten Primärenergie kommt besondere Bedeutung zu, weil sie allen diesen Zielen gleichzeitig dienen. Eine dieser Technologien ist die – zwar schon lange bekannte, jetzt jedoch stärker in den Vordergrund gerückte – Wärmepumpe. Sie beruht auf demselben Prinzip wie die Kältemaschine, die sich in nahezu jedem Haushalt, nämlich in jedem Kühlschrank, befindet. Haushalte werden auch der überwiegende Einsatzort für Wärmepumpen sein, wo sie zur Heizung und Warmwasserbereitung verwendet werden.

1.2 Prinzip der Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist ein Aggregat, das die einem Medium entzogene Wärme auf ein höheres Temperaturniveau anhebt. Dabei wird das Arbeitsmittel (Kältemittel), eine schon bei niedriger Temperatur siedende Flüssigkeit in einem Kreislauf geführt (Bild 1.2).

Technisch sind zwei Möglichkeiten realisierbar: Sorptions- und Kompressionswärmepumpen. Da z.Zt. vorwiegend Kompressionswärmepumpen verwendet werden, wird in den nachfolgenden Ausführungen nur hierauf eingegangen:

Bei der Kompressionswärmepumpe saugt ein motorisch angetriebener Verdichter ① flüssiges, kaltes Arbeitsmittel in bzw. durch einen Verdampfer ②. Dort wird es von wärmerer Luft oder wärmerem Wasser umströmt. Das Arbeitsmittel nimmt dabei Wärme auf und verdampft. Im Verdichter wird der Dampf komprimiert und dabei erwärmt. Die mechanische Verdichterarbeit wird in Wärme und Druck umgewandelt.

Der erwärmte Kältemitteldampf strömt in einen Verflüssiger ③, wo er die Wärme an kälteres Heizungswasser abgibt und durch Kondensation wieder flüssig wird. Dem Verflüssiger ist ein Expansionsventil ④ angefügt, durch das das Arbeitsmittel vom hohen Druck des Verflüssigers auf den niederen Druck des Verdampfers entspannt wird. Durch die plötzliche Druckverringerung kühlt sich das Arbeitsmittel ab und fließt wieder in den Verdampfer, wo es Wärme aufnimmt und der Kreislauf von neuem beginnt.

Aus Bild 1.2 ist außerdem ersichtlich, daß die dem Verdampfer (Wärmetauscher) zugeführte Wärme dem Erdreich ⑤, der Luft ⑥ oder dem Wasser ⑦ entzogen werden kann.

Bei Wärmepumpenanlagen mit Antrieb durch Verbrennungsmotoren wird die dort anfallende Abwärme zusätzlich genutzt.

Eine vollständige Wärmepumpenheizungsanlage besteht aus der Wärmepumpenanlage, ggf. mit Abwärmenutzung und der Wärmeverteilungsanlage, mit deren Hilfe die erzeugte Wärme an die Verbrauchsorte verteilt und übergeben wird.

Häufig werden Wärmepumpenheizungsanlagen durch Angabe der Wärmequellen und des Wärmeverteilungsmediums gekennzeichnet. Man spricht von Wasser/Wasser-Wärmepumpen bei Nutzung der Wärmequelle Wasser und Wärmeverteilung durch Heizwasser. Demgegenüber entziehen Erdreich/Wasser-Wärmepumpen bei gleicher Wärmeverteilung dem Erdreich Wärme.

* Der Bundesminister für Forschung und Technologie: Programm-Energieforschung und Energietechnologien 1977–1980; Bonn 1977

Wird die Wärmepumpe so ausgelegt, daß sie zu jeder Zeit allein (bei Luft/Wasser-Wärmepumpe also auch zu Frostzeiten) den Wärmebedarf deckt, spricht man von einer monovalenten Anlage. Bivalente Heizsysteme decken dagegen den Wärmebedarf durch zwei voneinander unabhängige Wärmeerzeuger, die entweder im Alternativbetrieb (ein Heizkessel arbeitet unterhalb einer bestimmten Außentemperatur allein) oder im Parallelbetrieb (unterhalb festgelegter Außentemperaturen arbeiten Wärmepumpen und Heizkessel gemeinsam oder der Heizkessel allein) eingesetzt werden.

Das Verhältnis der dem Heizwasser zugeflossenen Nutzwärmeleistung zu der dem Verdichter zugeführten Leistung nennt man Leistungsziffer. Sie wird ermittelt aus

$$\varepsilon = \frac{T_w \cdot \eta}{T_w - T_k}$$

Hierin bedeuten:

ε = Leistungsziffer,

T_w = Verflüssigungstemperatur in K,

T_k = Verdampfungstemperatur in K und

η = Wirkungsgrad des Systems.

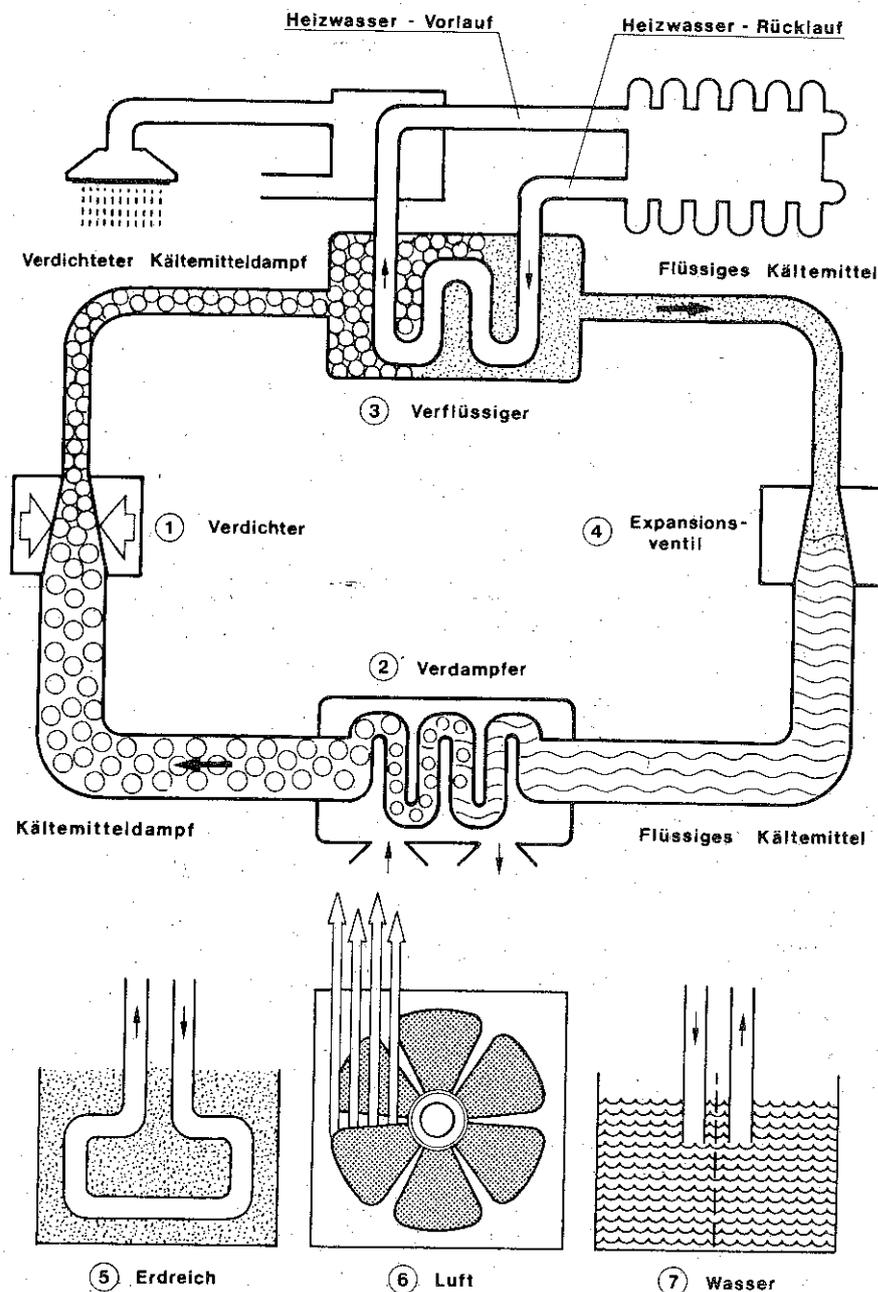


Bild 1.2 Prinzip der Wärmepumpe

Mit Wirkungsgraden des Systems zwischen 0,35 und 0,7 (je nach Größe der Anlage) kann man Leistungsziffern zwischen 2,5 und 6,0 erreichen. Das bedeutet, daß die aufzuwendende Energie am Antrieb nur 40 bis 15 % der nutzbaren Wärmemenge beträgt.

Geht man von den Anteilen für Antriebsleistung μ_1 und für übernommene Wärme μ_2 aus, ergibt sich die Leistungsziffer zu

$$\epsilon = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\mu_1}$$

Höhere Leistungsziffern werden dort erreicht, wo ein Wärmeträger mit relativ gleichmäßiger Temperatur zur Verfügung steht. Wärmeträger mit wechselnden Temperaturen lassen nur geringere Leistungsziffern zu, bei Raumheizungen z.B. mit Luft im Jahresdurchschnitt um 3.

1.3 Anwendungsbereich der Wärmepumpe und benötigte Wassermengen

Der Einsatz von Wärmepumpen ist dort vorteilhaft, wo:

- Temperaturen bis +55 °C,
- Kälte oder
- beide gleichzeitig

benötigt werden.

Dies ist in der Regel bei:

- Heizung und Klimatisierung von Gebäuden, evtl. mit integrierter Wärmeversorgung,
- Warmwasserversorgung im Wohnungsbau, Gewerbe und Industrie,
- Schwimmbadheizungen,
- Eisbahnen,
- Industrien (Molkerei, Chemie),
- Landwirtschaft u.a.

der Fall.

Höhere Temperaturen erreicht man mit mehrstufigen Anlagen (vergl. 1.2). Dabei wird die am Verflüssiger der 1. Stufe der Wärmepumpe freiwerdende Wärmeenergie zum Erwärmen des Verdampfers der nächsten Stufe verwendet. Durch Aufteilen der Spanne auf mehrere Stufen ist ein besserer Gesamtwirkungsgrad zu erzielen, der allerdings mit zunehmenden Endtemperaturen wieder absinkt.

Ausgehend von der Grundlage, daß mit jedem K Temperaturunterschied einem m³ Wasser 1,16 kWh Wärme entzogen werden kann, kann der Wasserbedarf der Wärmepumpen wie folgt angegeben werden (s. Bild 1.3):

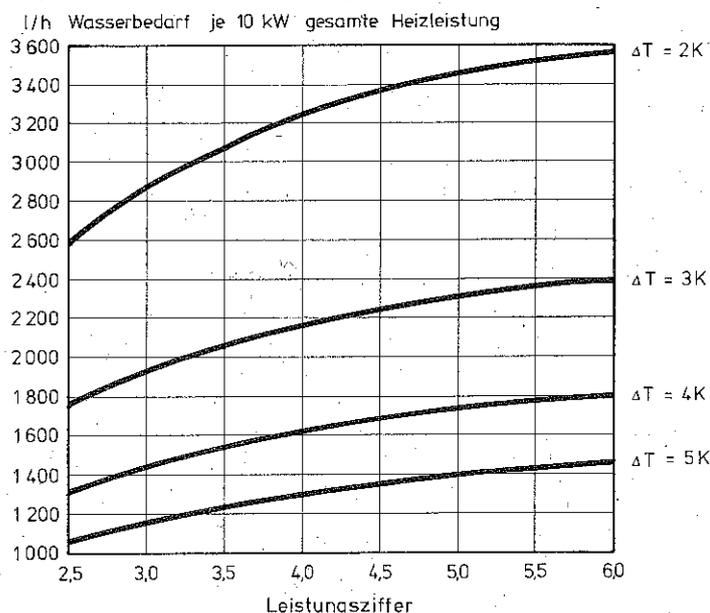


Bild 1.3 Wasserbedarf für Wärmepumpe

2. Energieumwandlungsketten

Bei der thermodynamischen Betrachtung des Energieverbrauchs zeigt sich, daß fast die gesamte erzeugte Energie dazu nötig ist, irgend welche Energieverluste zu ersetzen [1]. Dabei ist der Zusammenhang zwischen Primärenergie und Nutzenergie nicht immer ersichtlich. In einem Exergie-Anergie-Flußbild (Exergie = konvertierbarer Energieanteil oberhalb des Umgebungsniveaus, Anergie = unterhalb des Umgebungsniveaus) eines Dampfkraftwerkes mit nachgeschalteter elektrischer Widerstandsheizung veranschaulicht LORENTZEN, (Bild 2.1), wie sehr der Wirkungsgrad mit zunehmender „Veredelung“ zurückgeht.

Beinahe 90 % der Endenergie liegt in Form von Anergie vor, die man genauso gut aus der Umgebung hätte nehmen können. Die Umwandlungsverluste hängen dabei stark vom eingesetzten Brennstoff und von der Länge der Energiekette ab. Sie sind bei Erdgas geringer als bei Öl oder Kohle. Der geringe Wirkungsgrad zeigt aber auch, daß es andere effektivere Nutzenergieerzeugungsmethoden geben müßte. Versucht man für diesen Fall, den anergischen Teil der eingesetzten Energien mit Hilfe der Wärmepumpe aus der Umwelt zurückzugewinnen, so wird die Energiebilanz (Bild 2.2) ausgeglichener. Ein entscheidender Vorteil gegenüber einer direkt befeuerten Zentralheizung besteht jedoch nicht (Bild 2.3). Wesentlich besser läßt sich die eingesetzte Primärenergie jedoch ausnutzen, wenn eine Kompressionswärmepumpe direkt durch einen Verbrennungsmotor angetrieben wird und zusätzlich die im Kühlwasser und in den Auspuffgasen des Motors enthaltene Abwärme zurückgewonnen wird. Auf diese Art und Weise läßt sich die im Treibstoff (Gas oder Mineralöl) enthaltene Energie durch die Abwärmegewinnung und die Umgebungswärme nahezu verdoppeln (Bild 2.4).

Für ein konkretes Beispiel läßt sich der in Bild 2.2 dargestellte Energiefluß auch so darstellen (Bild 2.5): Setzt man den Heizwärmebedarf eines Wohnhauses gleich 100, so können davon 66 % aus Sonnenenergie in Form von Erd-, Wasser- oder Luftwärme aus der Umgebung gewonnen werden, während 34 % in Form von Strom als Endenergie am Verbrauchsort für den Antrieb der Wärmepumpe verwendet werden müssen. Die Gesamtverluste durch den Stromtransport vom Kraftwerk bis zur Wärmepumpe liegen bei etwa 3 %.

Dagegen können Kompressionswärmepumpen, die direkt durch Verbrennungsmotoren angetrieben werden (Gas oder Öl) durch unmittelbare Abwärmennutzung die Primärenergie (evtl. mit nachgeschalteter Sorptionswärmepumpe) bis etwa 6-fach ausnutzen (s. Bild 2.4).

Vom Kraftwerk müssen demnach 37 Teile Strom in das Versorgungsnetz eingespeist werden. Der Aufwand zur Erzeugung dieser 37 % Nutzenergie in Form von Strom liegt jedoch wesentlich höher. Wegen des niederen und nur noch begrenzt steigerungsfähigen Wirkungsgrades thermischer Kraftwerke müssen ca. 100 Teile Primärenergie (fossile oder Kernbrennstoffe) eingesetzt werden, um den vollen Heizwärmebedarf von 100 zu decken. Der Einsatz der Wärmepumpe erlaubt in diesem Anwendungsfall die 3-fache bessere Ausnutzung des Primärenergieeinsatzes. Hervorzuheben ist allerdings, daß die bei der Stromerzeugung anfallende Abwärme, die ungefähr den gleichen Wärmeinhalt wie der durch die Wärmepumpe gewonnene Nutzanteil besitzt, noch am Umwandlungsort an Gewässer oder an die Atmosphäre abgegeben wird.

Als wesentliche Erkenntnis aus dieser Darstellung muß herausgestellt werden, daß die Nutzung der Erdwärme, der Wasser- oder Luftwärme ohne Inanspruchnahme von Primärenergie zur Erzeugung eines entsprechend hohen Temperaturniveaus nicht möglich ist. Wie schon dargestellt wurde, reicht allerdings der Einsatz von Wärmepumpensystemen in vielen Fällen nicht aus, um auch den Spitzenbedarf abzudecken. Dafür müssen zusätzlich noch die klassischen Energieträger, Erdöl, Erdgas, Strom eingesetzt werden (s. bivalente Systeme 1.2).

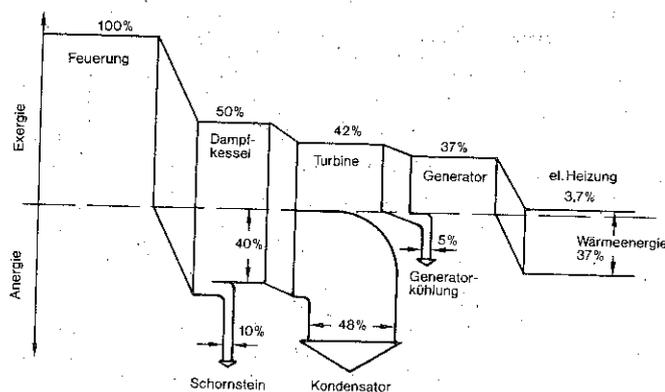


Bild 2.1 Dampfkraftwerk und elektrische Widerstandsheizung

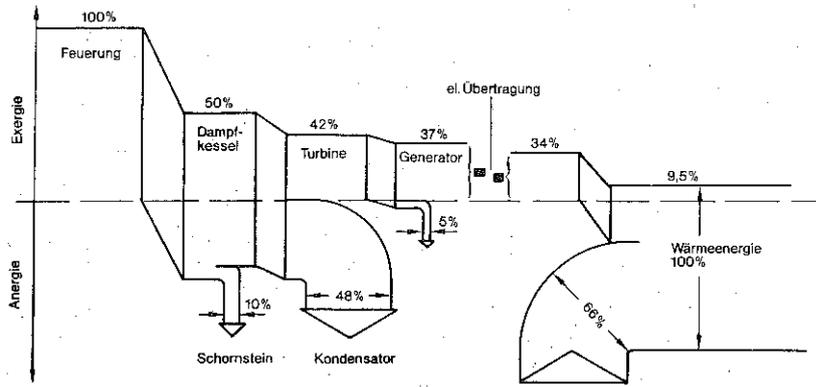


Bild 2.2 Kraftwerk und Wärmepumpe ($\epsilon = 3,0$)

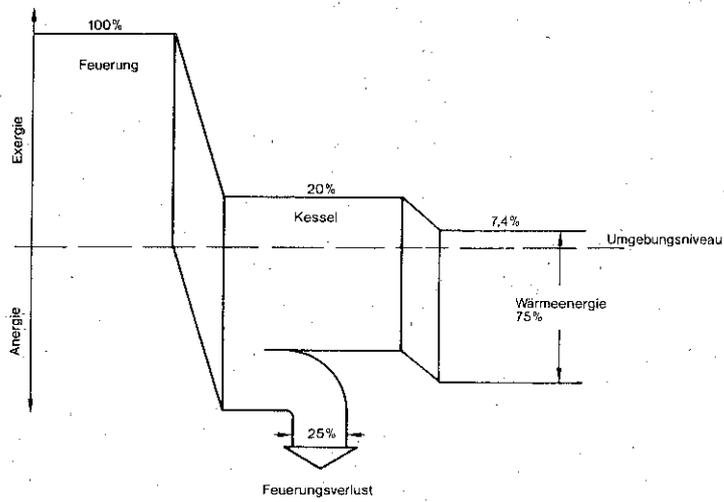


Bild 2.3 Direkt befeuerte Zentralheizung

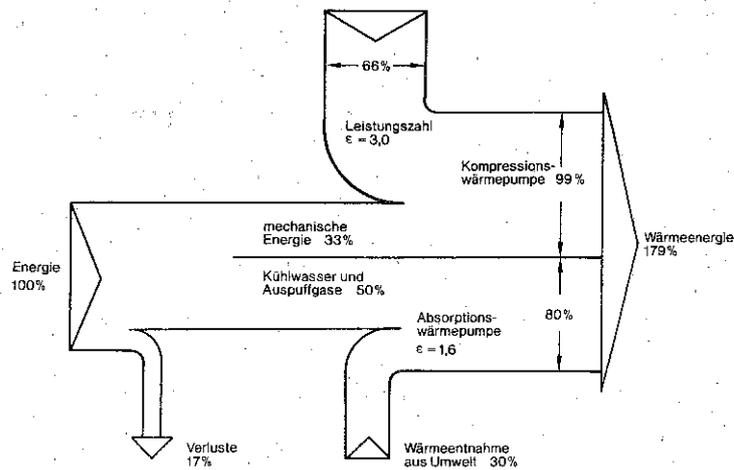


Bild 2.4 Gasmotorbetriebene Kompressionswärmepumpe mit Wärmenutzung

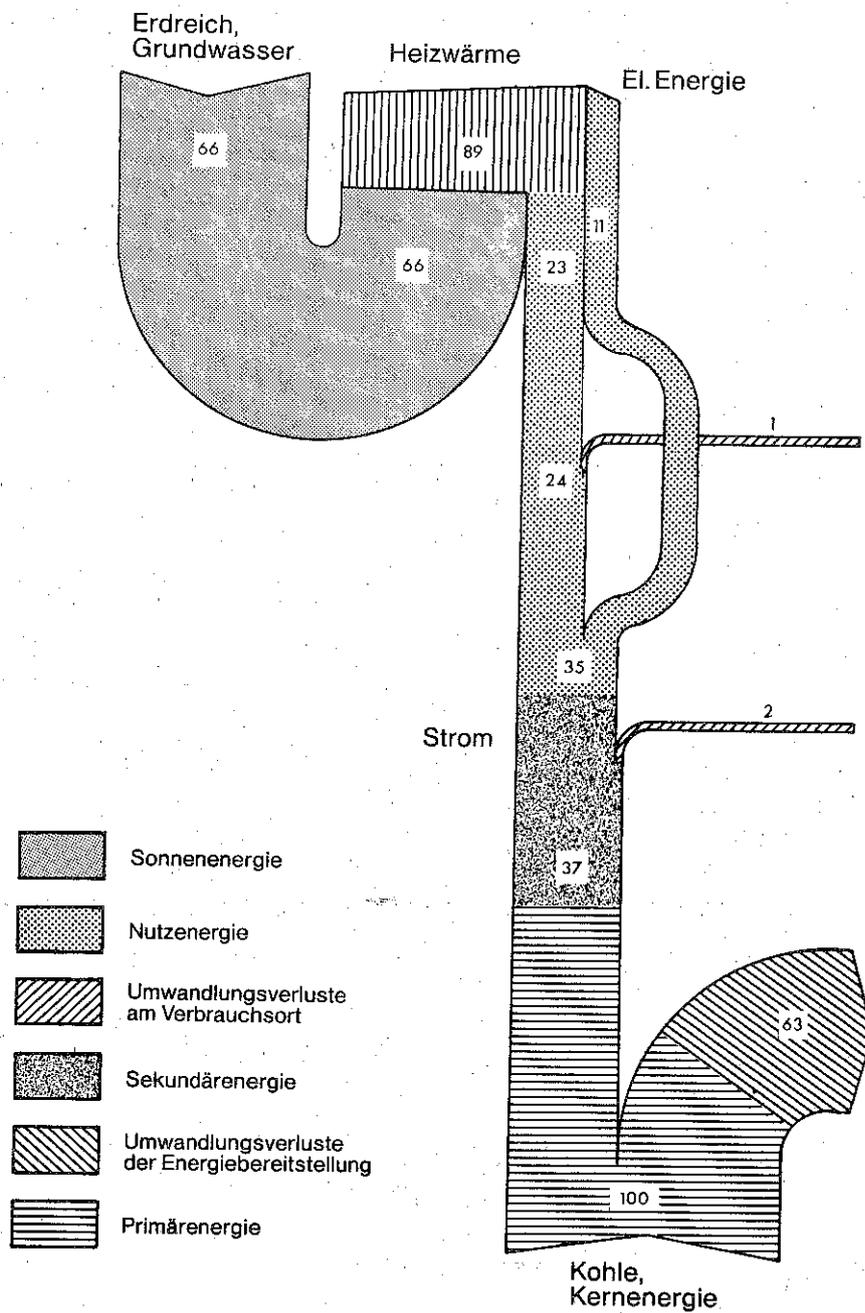


Bild 2.5 Kraftwerk und Wärmepumpe ($\epsilon = 3,0$)

3. Technik und Technologie der Wärmepumpen

3.1 Funktionsprinzip einer Kompressionswärmepumpe

Das Arbeitsmittel einer Wärmepumpe weist die Besonderheit auf, bei Temperaturen, die deutlich unterhalb der tiefsten Wärmequellentemperatur liegen, zu verdampfen. Dadurch kann einem Wärmeträger bei niedrigerer Temperatur die Energie entzogen werden, die zur Verdampfung des Arbeitsmittels nötig ist.

Bild 3.1.1 zeigt beispielhaft wie im Verdampfer der Wärmepumpe das Grundwasser von +10 °C auf +5 °C abgekühlt wird. Demgegenüber ändern sich Druck und Temperatur des Arbeitsmittels nicht, wohl aber dessen Phase. Das Arbeitsmittel tritt in flüssiger Phase in den Verdampfer ein und verdampft dort unter Wärmeaufnahme. Dabei regelt das Expansionsventil den Mengenfluß in der Weise, daß das gesamte, in den Verdampfer einströmende Arbeitsmittel in dampfförmigen Zustand übertreten kann.

Der Verdichter, in Bild 3.1.1 mit elektrischem Antrieb dargestellt, saugt das Arbeitsmittel an und verdichtet es. Mit der Druckerhöhung ist eine Erhöhung der Temperatur des Arbeitsmittels verbunden.

Auf dem so erzielten Temperaturniveau wird dem Arbeitsmittel im Verflüssiger durch Kondensation seine Verdampfungswärme und die in Wärme umgewandelte Antriebsenergie des Verdichters wieder entzogen und einem Heizmedium, meist dem Wasser einer Pumpenheizung übertragen. Die Wärmepumpe arbeitet damit als Wärmetransformator, mit dem unter Einsatz von Strom oder Gas Wärme von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau transformiert wird. Im Expansionsventil wird das Arbeitsmittel entspannt, um auf niedrigem Druck- und Temperaturniveau dem Verdampfer wieder zugeführt werden zu können.

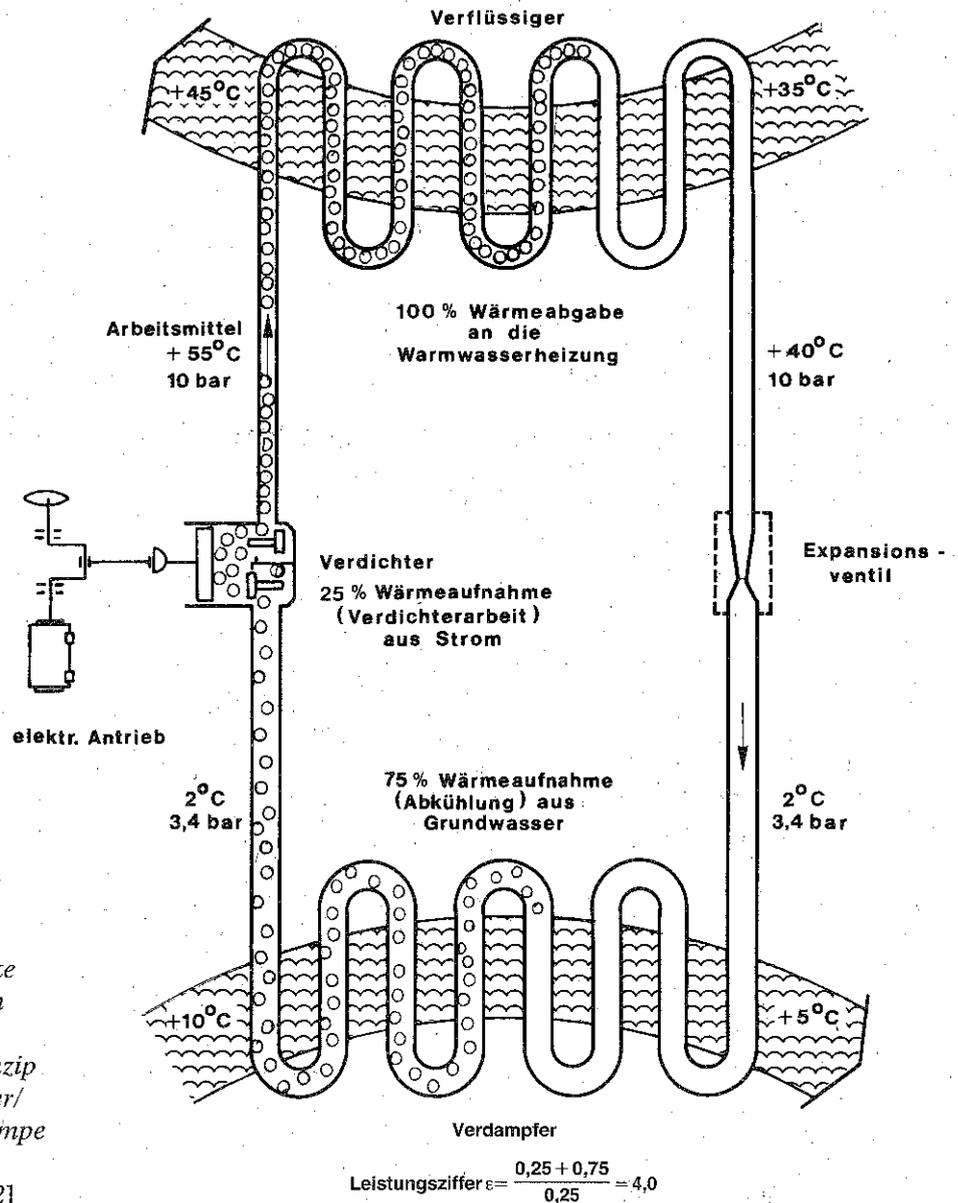


Bild 3.1.1 Beispiel für Drücke und Temperaturen einer nach dem Kompressionsprinzip arbeitenden Wasser/Wasser-Wärmepumpe mit R 12 als Arbeitsmittel [2]

In Bild 3.1.1 sind die bei Verwendung des Arbeitsmittels R 12 (s. 4) üblichen Drücke und Temperaturen eingetragen. Diese Betriebsparameter hängen vom verwendeten Arbeitsmittel ab. Der Druck des Arbeitsmittels im Verdampfer einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe ist in jedem Fall größer als der Druck des Wärmeträgers Wasser. Zur Schmierung der z.Zt. üblichen Kolbenkompressoren muß dem Arbeitsmittel Öl beigemischt werden. Die erzielbaren Verdichtungs- bzw. Heizwassertemperaturen im Arbeitsmittelkreislauf nach dem Verdichter und damit auch die erreichbaren Kondensations- bzw. Heizwassertemperaturen hängen davon ab, welche Temperatur ohne Alterung des Schmieröls im Dauerbetrieb gehalten werden kann. Diese Temperaturgrenze liegt bei den z.Zt. verwendeten Ölen bei max. +150 °C.

Zur Beurteilung der Effizienz einer Wärmepumpe verwendet man die bereits in 1.2 definierte Leistungsziffer. Die Leistungsziffer kann nur als Momentanwert bei einem definierten Betriebszustand der Wärmepumpe angegeben werden. Da die Heizleistung stets größer als die Verdichterantriebsleistung ist, ist die Leistungsziffer immer > 1 . In dem in Bild 3.1.1 dargestellten Beispiel beträgt die Leistungsziffer $\epsilon = 4$. Setzt man die Heizleistung der Wärmepumpe (Wärmeabgabe an die Warmwasserheizung) = 100%, so zeigt das Beispiel, daß zum Betrieb der Wärmepumpe Verdichterleistung durch Strom in Höhe von 25% der Heizleistung aufzuwenden ist. 75% der Heizleistung werden durch Abkühlung des dort eingesetzten Grundwassers gewonnen. Betrachtet man den Quotient der genutzten Wärmemenge pro Jahr und der im gleichen Zeitraum aufgewendeten Verdichterarbeit und zusätzlich den Energieverbrauch der Pumpen und anderer Zusatzeinrichtungen, so ergibt sich die Jahresarbeitszahl β . Die Jahresarbeitszahl von monovalenten elektrischen Wasser/Wasser-Wärmepumpen und Erdreich/Wasser-Wärmepumpen beträgt in der Praxis

$$\begin{aligned} \text{Wasser/Wasser} &\approx 3,6 \\ \text{Erdreich/Wasser} &\approx 3,1 \end{aligned}$$

bei Verwendung eines Niedertemperaturheizsystems. Die günstige Jahresarbeitszahl einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe erklärt sich aus der vergleichsweise hohen, während des ganzen Jahres annähernd konstanten Grundwassertemperatur. Sie besagt, daß in diesem Fall je eingesetzter Energieeinheit 3,6 Einheiten Wärme nutzbar sind.

Bild 3.1.2 zeigt ein Blockschaltbild einer Wärmepumpe. Dabei unterscheiden sich die Blockschaltbilder von Wasser/Wasser-Wärmepumpen und Erdreich/Wasser-Wärmepumpen nicht. Bei der Erdreich/Wasser-Wärmepumpe fließt im Erdreich erwärmte „Sole“ (s. 4.5) durch den Verdampfer. Demgegenüber wird bei der Wasser/Wasser-Wärmepumpe Wasser durch den Verdampfer gepumpt. Zusätzlich zu den bereits bekannten Anlagenbauteilen zeigt Bild 3.1.2 beispielhaft üblicherweise verwendete Sicherheitseinrichtungen. Diese sind:

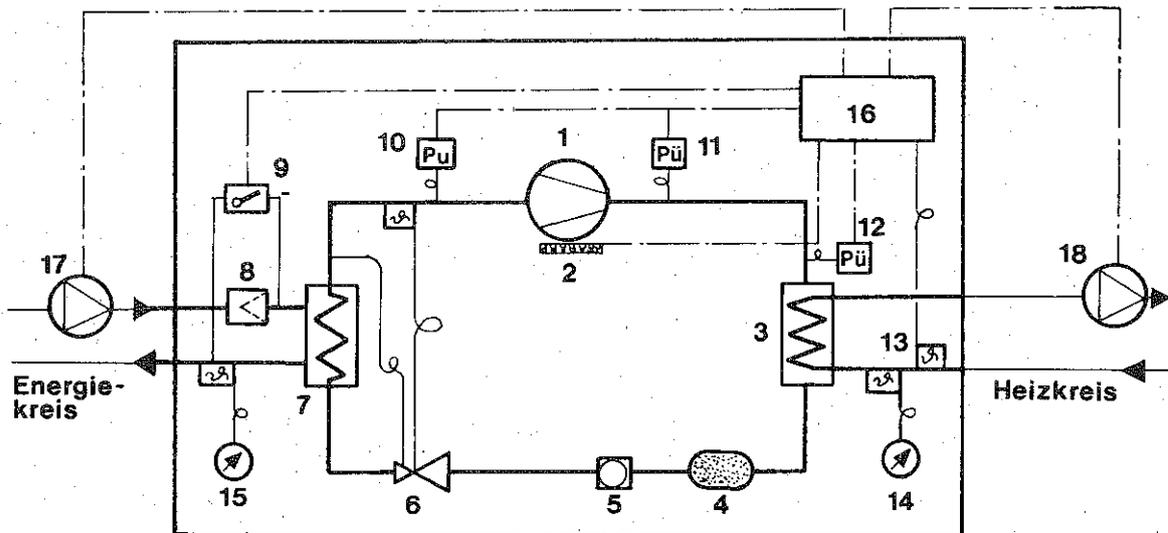
wärmequellenseitig	Druckschalter oder Druckwächter
wärmepumpenseitig	Saugdruckschalter Druckschalter Sicherheitsdruckbegrenzer

Der Druckschalter oder Druckwächter schaltet die Wärmepumpe ab, wenn der Wasser- oder „Soledurchfluß“ unterbrochen ist. Dadurch wird vermieden, daß durch Vereisung des im Verdampfer der Wärmepumpe befindlichen Wassers oder der „Sole“ eine mechanische Beschädigung mit der Folge von Arbeitsmittel- und damit verbundenen Ölleckagen eintreten kann. Dem gleichen Zweck dient zusätzlich und unabhängig davon der Saugdruckschalter im Arbeitsmittelkreislauf. Bei Unterschreiten eines vorgegebenen Unterdruckgrenzwertes (z.B. 3,4 bar s. Bild 3.1.1) und damit einer definierten Arbeitsmitteltemperatur auf Grund mangelnder Wärmeanlieferung schaltet sich ebenfalls die Wärmepumpe selbsttätig ab.

Bei Überschreiten eines vorgegebenen Überdrucks auf der „warmen Seite“ der Wärmepumpe über den im Sicherheitsdruckbegrenzer und im Druckschalter vorgegebenen Höchstwert erfolgt ebenfalls die Abschaltung der Wärmepumpe. Die übrigen in Bild 3.1.2 dargestellten Einrichtungen dienen teilweise zur Beurteilung des Wärmepumpenbetriebs bei Wartungsarbeiten. Sie sind aber auch aus betriebstechnischen Gründen notwendig. Das Abschalten der Anlage kann jedoch nicht verhindern, daß Arbeitsmittel bei Leckagen austreten.

Außer den maschinentechnischen Sicherheitseinrichtungen zum Schutze des Wärmeträgers sind auch Einrichtungen zum Schutze des Brauchwassers vorzusehen.

Als Materialien für Verdichter, Wärmetauscher und Rohrleitungen werden möglichst korrosionsbeständige Werkstoffe verwendet. Üblicherweise werden Rohrleitungen aus Kupfer und Wärmetauscher aus Kupfer bzw. Edelstahl hergestellt.



- | | | | |
|-----------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------|
| 1 Verdichter | 6 Therm. Expansionsventil | 11 Druckschalter | 16 Schaltschrank |
| 2 Kurbelwannenheizung | 7 Verdampfer | 12 Sicherheitsdruckbegrenzer | 17 Pumpe – primär |
| 3 Verflüssiger | 8 Sieb | 13 Heizungstemperaturregler | 18 Heizungspumpe |
| 4 Filter-Trockner | 9 Fließdruckschalter | 14 Thermometer | |
| 5 Schauglas | 10 Saugdruckschalter | 15 Thermometer | |

Bild 3.1.2 Blockschaltbild einer Wasser/Wasser oder Erdreich/Wasser-Wärmepumpe mit Sicherheitseinrichtungen [3]

3.2 Wärmequelle Grundwasser

Grundwasser ist das Wasser, das die Hohlräume der Gesteine zusammenhängend erfüllt und nur der Schwerkraft (hydrostatischer Druck) unterworfen ist.

Festgesteine führen Grundwasser nur in Klüften und Spalten. Allgemein nimmt die Klufthäufigkeit und -weite zur Tiefe hin ab. Da die Klüfte den Gesteinskörper nur selten gleichmäßig durchziehen und oftmals weitmaschig angelegt sind, kann die Ergiebigkeit von Brunnen und Quellen im gleichen Festgesteinsaquifer selbst auf kurze Entfernung hin sehr stark schwanken.

Grundwasserführende Lockergesteine (Porengrundwasserleiter) finden sich vor allem als quartäre Talfüllungen, Schotterflächen und Sanderflächen. Sie werden vom Grundwasser durchströmt, dessen Fließgeschwindigkeit zwischen wenigen Zentimetern und einigen Metern pro Tag liegt. Die Grundwasserfließgeschwindigkeit (Abstandsgeschwindigkeit) im Lockergestein wird errechnet mit

$$v_a = \frac{v_f}{n_a} = \frac{k_f \cdot i}{n_a} \text{ (m/s)}$$

v_a = Abstandsgeschwindigkeit in m/s

v_f = Filtergeschwindigkeit in m/s

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert in m/s

i = Grundwasserspiegelgefälle
(dimensionslos)

n_a = durchflußwirksamer Hohlraumanteil
(dimensionslos)

Sande und Kiese können auf Grund ihres großen Porenraumes zwischen den Gesteinspartikeln erhebliche Wassermengen enthalten.

Sind in der Schichtenfolge Schluff- und Tonlinsen eingelagert, so verringert sich die verfügbare Wassermenge und die Wasserdurchlässigkeit nimmt ab.

Entsprechend den örtlichen hydrogeologischen Verhältnissen und dem Brunnenausbau sind die Ergiebigkeiten von Bohrbrunnen in Lockergesteinen sehr unterschiedlich. Nachstehend sind einige Erfahrungswerte (umgerechnet nach RICHTER & LILLICH, [4]) von Brunnen mit einem Durchmesser von 250 mm und einer Filterlänge von 10 m angegeben:

Sandige Kiese	27–55 m ³ /h
Grob- bis Mittelsande	8–27 m ³ /h
Mittelsande	3– 8 m ³ /h
Feinsande	3 m ³ /h

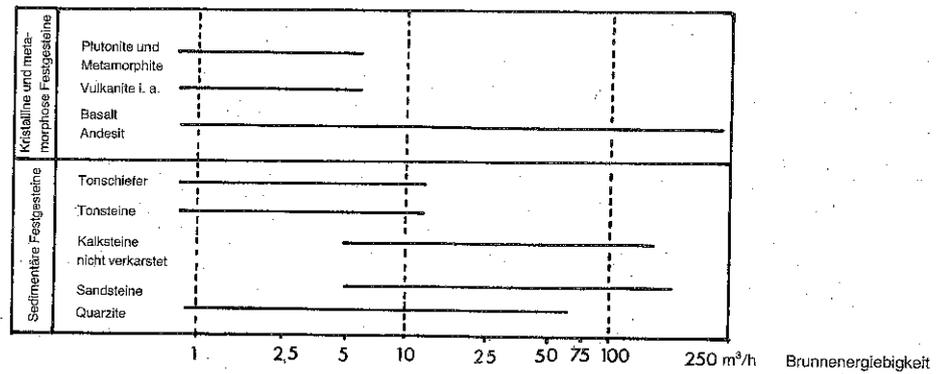


Bild 3.2.1 Ergiebigkeit von Brunnen in Festgesteinen nach [4]

Die Grundwassertemperatur ist der entscheidende Parameter bei der Nutzung des Grundwassers als Energieträger. Sie wird im erdoberflächennahen Bereich im wesentlichen von der Luft- und Bodentemperatur geprägt.

Es kann davon ausgegangen werden, daß der Jahresmittelwert der Bodentemperatur etwa 0,5 bis 1,0 K höher liegt als der entsprechende Jahresmittelwert der Lufttemperatur. Für die Jahresreihe 1931/60 wurden folgende Jahresmittel der Lufttemperatur ermittelt [6].

Hamburg	8,6 °C	Kassel	9,2 °C
Münster	9,3 °C	Coburg	8,1 °C
Bochum	10,3 °C	Mannheim	10,0 °C
Düsseldorf	10,2 °C	München	7,9 °C

Durch den Einfluß des Jahresganges der Lufttemperatur verändert sich die Temperatur des oberflächennahen Grundwassers mit einer gewissen Phasenverschiebung im jahreszeitlichen Rhythmus. Dabei nimmt die Amplitude der in den Untergrund eindringenden „Temperaturwelle“ zur Tiefe hin ab [5]. Ab 15 bis 20 m Tiefe betragen die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen weniger als 0,1 K.

In Bild 3.2.2 sind beispielhaft Temperaturen aufgezeichnet wie sie Anfang Februar, Mai, August und November in Tiefen bis 15 m auftreten können. Die mittlere Jahrestemperatur ist dabei mit 10 °C angesetzt, die mittlere Monats-temperatur im Februar mit 0 °C, im August mit 20 °C.

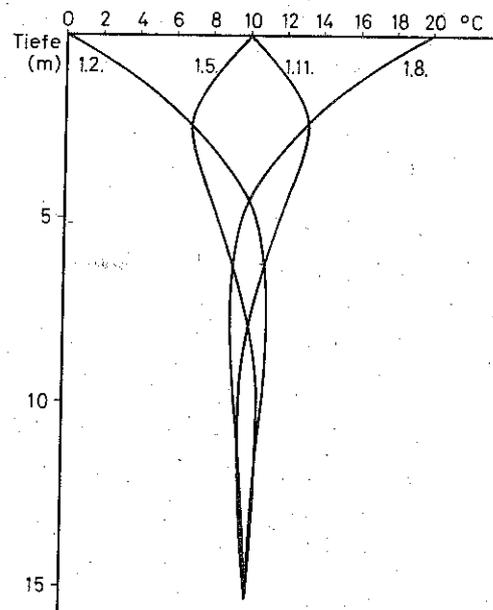


Bild 3.2.2 Schema des Temperatur-Jahresganges [5]

Aus Bild 3.2.2 ist zu entnehmen, daß während der Heizperiode die höchsten, über dem Jahresmittelwert liegenden Temperaturen Anfang November in 3 m Tiefe auftreten und sich im Verlauf des Winters immer tiefer verlagern. Je nach Bodenart empfiehlt es sich daher, das der Wärmepumpe zuzuführende Grundwasser, wenn möglich aus größeren Tiefen, hier zum Beispiel unterhalb 5 m zu fördern.

Allgemein nimmt die Temperatur von der Erdoberfläche zur Tiefe hin zu – entsprechend den örtlichen geothermischen Gradienten. Der Mittelwert des geothermischen Gradienten liegt in der Bundesrepublik Deutschland bei 0,03 K/m, Gebietsweise treten auch größere Abweichungen nach oben und nach unten auf. Die Grundwassertemperatur läßt sich abschätzen mit

$$T_o = T_m + 1 + 0,03 \cdot h$$

T_m = mittlere Jahrestemperatur der Luft in °C
 h = Tiefe des Grundwassers unter Gelände in m

Die oberflächennahen Untergrundtemperaturen werden sehr stark von der Art der anstehenden Gesteine, der Sonneneinstrahlung und der Vegetation beeinflusst. In der Nähe von Oberflächengewässern werden diese Temperaturen je nach Grundwasserfließrichtung mehr oder weniger durch die Beimischung von Uferfiltrat überlagert. Sein Einfluß kann mit wachsender Grundwasserentnahme sehr stark zunehmen, so daß sich die Entnahmetemperatur kaum mehr von der des Oberflächengewässers unterscheidet.

Ein nicht unerheblicher Einfluß auf die Grundwassertemperatur geht von Gebäuden, Abwasserkanälen und Fernheizungsleitungen aus. Die Temperaturen im Untergrund von Stadtgebieten liegen bis zu 4 K über denen in thermisch unbeeinflussten Bereichen. Auch das gegenüber unbebauten Gebieten um etwa 1 K erhöhte Stadtklima wirkt sich aus [7].

Bei der Nutzung von Grundwasser sollte das entnommene Wasser wieder restlos in den Grundwasserleiter zurückgegeben werden, aus dem es entnommen wurde. Nur in Ausnahmefällen, wenn eine unmittelbare Wechselwirkung zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser besteht, ist eine Rückleitung in das Oberflächengewässer wirtschaftlich vertretbar.

Die Grundwassergewinnung und -rückleitung erfolgt in der Regel über Bohrbrunnen. Soweit es der geologische Schichtenaufbau erlaubt, kann auch eine Versickerung des genutzten Wassers erfolgen.

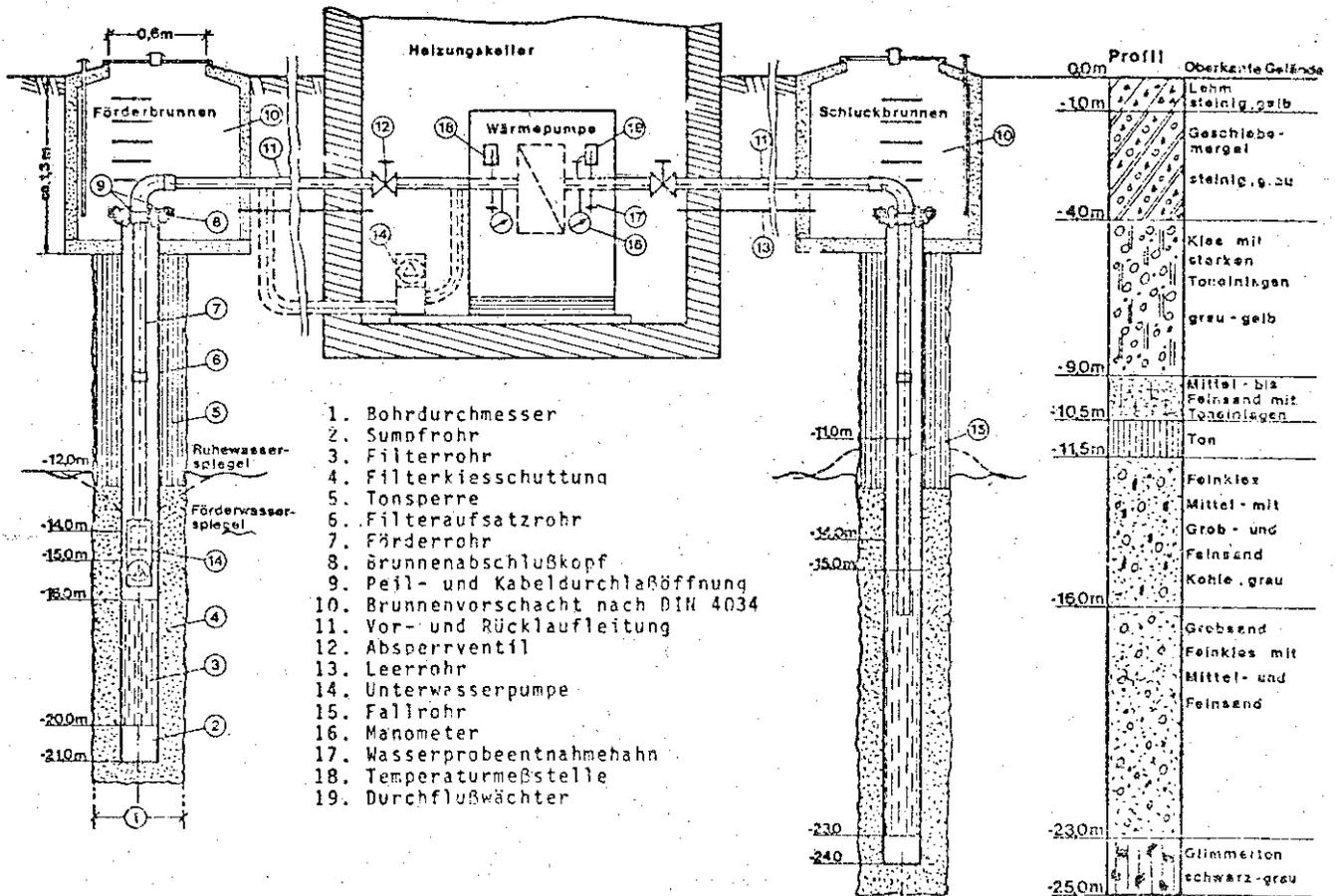


Bild 3.2.3 Schema einer Brunnenanlage für eine Grundwasser-/Wasser-Wärmepumpe

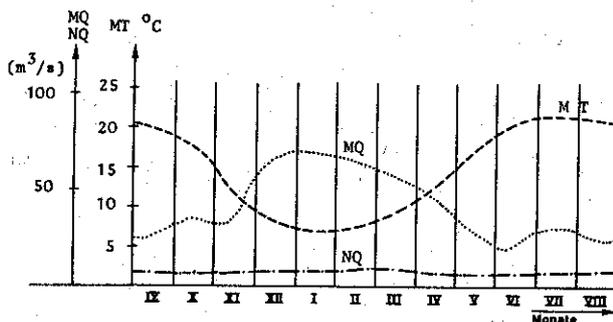
Um beurteilen zu können, ob in einem Gebiet Grundwasser als wirtschaftliche Wärmequelle zur Verfügung steht, sollte der Schichtenaufbau des Untergrundes und der Flurabstand des Grundwassers, bekannt sein ebenso die Richtung der Grundwasserströmung. Diese Kenntnisse sind für die Anordnung der Förder- und Schluckbrunnen unerlässlich. Die wasserwirtschaftliche Unbedenklichkeit eines Vorhabens sollte deshalb vor der eigentlichen Planung im Grundsatz geklärt sein.

Weiter sind die Entnahme- und Rückgabeeinrichtungen fachgerecht nach den anerkannten Regeln der Technik auszuführen. Die Brunnen sind dicht verschließbar auszuführen. Sie müssen die erforderlichen Meßeinrichtungen aufnehmen können. Bild 3.2.3 zeigt eine Brunnenanlage in rolligem Boden (Kiese und Sande).

3.3 Wärmequelle Oberflächenwasser

Im Wasser der Flüsse und Seen wird ein Wärmepotential dargeboten, das durch Abfluß (Q) und die nutzbare Temperaturdifferenz (ΔT) des Wassers vor und nach der Wärmepumpe bestimmt ist.

In den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern [8] und deren Ergänzungsheften [9] werden regelmäßig Abflüsse und Wasserstände der deutschen Flüsse veröffentlicht. Darüber hinaus werden für einige Flüsse auch Wassertemperaturen angegeben. Es ist zu beachten, daß die Nutzung des Wärmepotentials des Oberflächenwassers durch den Niedrigabfluß NQ und die dazugehörige Wassertemperatur begrenzt ist. Bild 3.3 zeigt am Beispiel der Lippe bei Haltern, daß das Wärmepotential der Lippe in den Monaten Januar–März im Mittel der Jahre 1961–1970 relativ zu den übrigen Monaten die geringsten Werte aufweist. Um zu vermeiden, daß in diesen Zeiten der Verdampfer der Wärmepumpe vereist und dadurch der Wärmetauscher beschädigt wird, darf nicht bis zum Gefrierpunkt abgekühlt werden. Ein zweites Heizsystem muß in solchen Fällen die Wärmeversorgung übernehmen (bivalentes System).



MQ: mittlerer Abfluß
NQ: Niedrigwasserabfluß
MT: mittlere Temperatur

Bild 3.3
Abflussmengen und Temperaturen der Lippe,
Pegel Haltern [10]

Um das Oberflächenwasser thermisch nutzen zu können, bieten sich verschiedene Möglichkeiten an:

- Direkte Montage des Wärmepumpen-Verdampfers in ein Flußbett oder in ein wasserdurchströmtes Verdampferbecken in der Uferböschung.
- Indirekte Nutzung der Wasserwärme durch einen Solekreislauf (s. 4.5) zwischen Gewässer und Wärmepumpe mit den zugehörigen Wärmetauschern.
- Flußwasserentnahme (Rohwasser) im Uferbereich und Transport des Rohwassers zum Verdampfer der Wärmepumpe.
- Förderung von Uferfiltrat und dessen Transport zum Verdampfer der Wärmepumpe.

Im ersten Fall handelt es sich um eine Split-Ausführung der Wärmepumpe, d.h. Verdampfer und übriges Aggregat sind getrennt. Damit werden Kältemittel-Verbindungsleitungen zwischen Gewässer und Wärmepumpe erforderlich.

Im zweiten Fall sind die durch die Zwischenschaltung eines weiteren Kreislaufs verursachten zusätzlichen Übergangsverluste zu berücksichtigen. Der Einsatz des Zwischenwärmeträgers „Sole“ für die Wärmeübertragung aus dem Rohwasser erfordert wegen der Gefahren für das Gewässer sorgfältige Auswahl der Rohrleitungen und gewissenhafte Montage, um auch schleichende Verluste und Bruch zu verhindern.

Die Verwendung von Uferfiltrat bietet den Vorzug, ein schwebstofffreies Rohwasser an den Verdampfer zu führen, allerdings auch den Nachteil der Verockerung der Brunnen.

Untersuchungen für verschiedene Bauvorhaben und ausgeführte Anlagen zeigen, daß die Erschließung von Oberflächenwasser umfangreiche bauliche Maßnahmen für das Ein- und Auslaufbauwerk erfordert. Hierbei sind vielfältige Belange, z.B. auch die der Schifffahrt zu berücksichtigen.

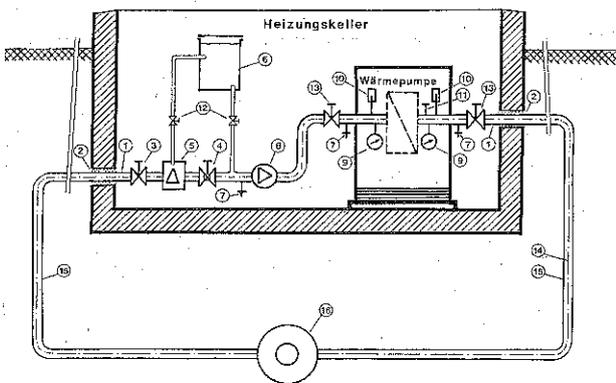
Voraussetzung für einen guten Wärmeübergang sind saubere Wärmetauscher. Während Schwimmstoffe bereits durch entsprechende Maßnahmen im Einlaufbauwerk zurückgehalten werden, können je nach der Beschaffenheit des Oberflächenwassers Schwebstoffe, aufwuchsbildende Organismen, auch Öle und Fette den Wärmeübergang behindern. Eine Wasseraufbereitung mittels Absetzbecken, Filtration oder Fällungsverfahren kann sehr aufwendig werden.

Der Planung, insbesondere der Materialauswahl für den Verdampfer sollte eine ausführliche chemisch-physikalische und biologische Gewässeranalyse zu Grunde gelegt werden.

3.4 Wärmequelle Erdreich

3.4.1 Horizontale Wärmetauscherrohre

Die Gewinnung der Wärme aus dem Erdreich erfolgt über einen Wärmetauscher, der auf einer Freifläche in der Nähe des zu beheizenden Gebäudes in das Erdreich verlegt wird. Die Fläche die dazu benötigt wird, hängt im wesentlichen davon ab, welcher Boden, welche klimatischen Bedingungen und welche Geometrie des Wärmetauschers anstehen oder gewählt werden. In Bild 3.4.1 ist der prinzipielle Aufbau einer Wärmepumpenheizungsanlage mit Wärmequelle Erdreich dargestellt.

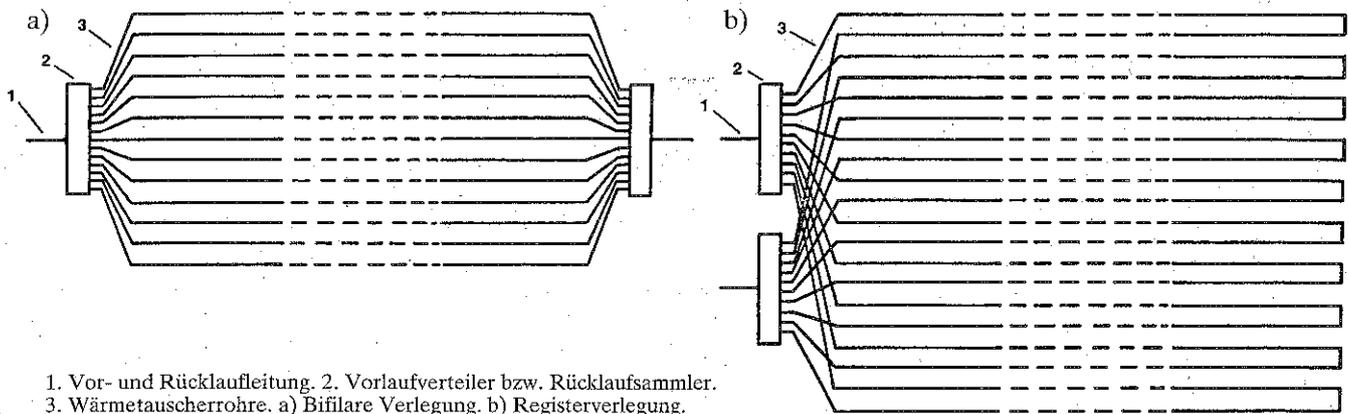


1. Vor- und Rücklaufleitung.
2. Mauerdurchführung.
3. Absperrschieber.
4. Drosselschieber.
5. Luftabscheider.
6. Sole-Ausgleichsgefäß.
7. Revisionsventil.
8. Sole-Umlaufpumpe.
9. Manometer.
10. Temperaturmeßstelle.
11. Durchflußwächter.
12. Absperrventile.
13. Geräteabsperrschieber.
14. Sole.
15. Vor- und Rücklaufleitungen, außen.
16. Wärmetauscher.

Bild 3.4.1 Schema einer Erdreich-Wärmepumpenanlage

Am Anfang der Nutzung der Wärmequelle Erdreich wurde die Wärmeleistungsdichte bei Tiefen des Erdreichwärmetauschers von 1,20 bis 2 m unter der Oberfläche und Abständen der einzelnen Wärmetauscherrohre von 1 m bis 2 m sehr vorsichtig gewählt. Dadurch wurde das Doppelte bis Dreifache der zu beheizenden Fläche als Wärmetauscherfläche im Boden verlegt. Auch z. Zt. kann die alle Einflußgrößen berücksichtigende, optimale Anordnung des Wärmetauschers noch nicht angegeben werden. Eine Reihe von Forschungsarbeiten beschäftigt sich mit dieser Frage mit dem Ziel, dieser Wärmequelle, die insgesamt die technisch problemloseste aller möglichen Wärmequellen ist, den gebührenden Nutzungsbereich zu erschließen.

In Bild 3.4.2 sind die Prinzipschaltbilder eines bifilaren Wärmetauschers und eines Registerwärmetauschers dargestellt. Als bifilar wird die Verlegetechnik bezeichnet, bei der Vor- und Rücklauf im Wechsel mit gleichbleibendem Abstand parallel verlegt werden. Beim Registerwärmetauscher sind Vor- und Rücklaufsammler jeweils am gleichen Ende des Wärmetauscherfeldes angeordnet. Die einzelnen Wärmetauscherrohre werden damit, im Gegensatz zur bifilaren Verlegung, in gleicher Strömungsrichtung durchflossen.



1. Vor- und Rücklaufleitung.
2. Vorlaufverteiler bzw. Rücklaufsammler.
3. Wärmetauscherrohre. a) Bifilare Verlegung. b) Registerverlegung.

Bild 3.4.2 Prinzipschaltbilder für die Verlegung des Wärmetauschers

Bei der Festlegung von Verlegeabstand und -tiefe der Wärmetauscherrohre sowie der Größe der benötigten Wärmetauscherfläche ist folgendes zu beachten:

In Bild 3.4.3 wird das System gezeigt, anhand dessen die in den folgenden Bildern dargestellten Zusammenhänge ermittelt wurden. Bild 3.4.4 veranschaulicht, daß sich im Boden Eis bildet und gibt Rohroberflächentemperatur und Betriebsdauer mit der Entzugsleistungsdichte als Parameter bei einer Bodenwärmeleitfähigkeit von $1,4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ an. Bei größerer Entzugsleistungsdichte ergibt sich für die Rohroberflächentemperatur in Abhängigkeit von der Betriebsdauer ein deutlicher Wendepunkt, der bei etwa 13 Tagen liegt. Dieser Wendepunkt deutet an, daß die Eistradien um die Wärmetauscherrohre so groß werden, daß die Eissäulen zusammenwachsen. Man hat sich hier vor Augen zu halten, daß die hohe Entzugsleistungsdichte nur dann vorliegt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen dem Gebäudeinnern und der Außentemperatur in der Nähe des Auslegungspunktes für die Gebäudeheizung liegt. Sobald die Außentemperatur steigt und damit die Heizleistung abnimmt, stellt sich eine Rohroberflächentemperatur ein, die mit einer geringeren Entzugsleistungsdichte korrespondiert. Bei mittleren Außentemperaturen während der Heizperiode von etwa $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ kommt man etwa mit der halben Entzugsleistungsdichte aus, so daß während der Heizperiode nicht mit einem Zusammenwachsen der Eissäulen zu rechnen ist.

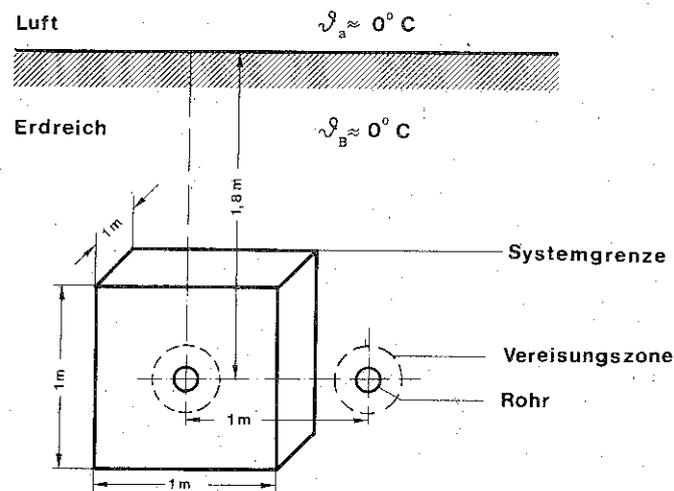


Bild 3.4.3 Erdreich-Sole-Wärmetauscher, Geometrie und Ausgangsbedingungen

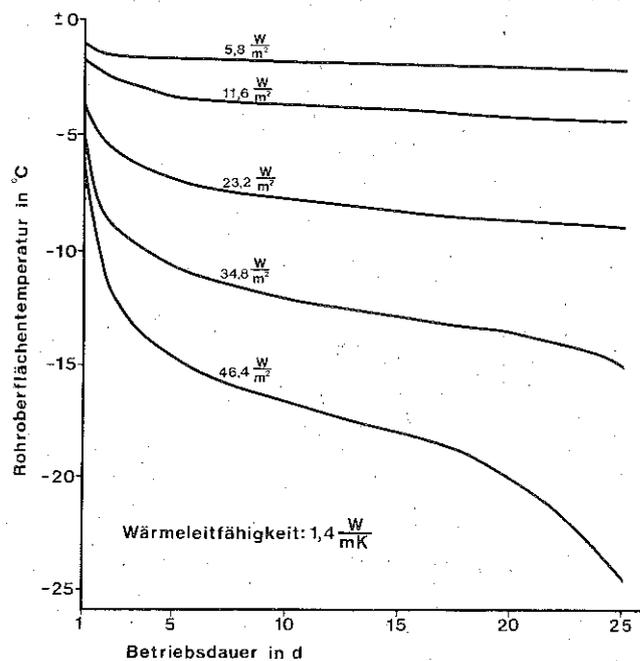


Bild 3.4.4 Rohroberflächentemperatur eines Erdreich/Sole-Wärmetauschers bei verschiedenen konstant gehaltenen Wärmeentzugsdichten (Sandboden, mittlerer Wassergehalt)

Bild 3.4.5 zeigt korrespondierende Angaben für eine Bodenwärmeleitfähigkeit von $2,6 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

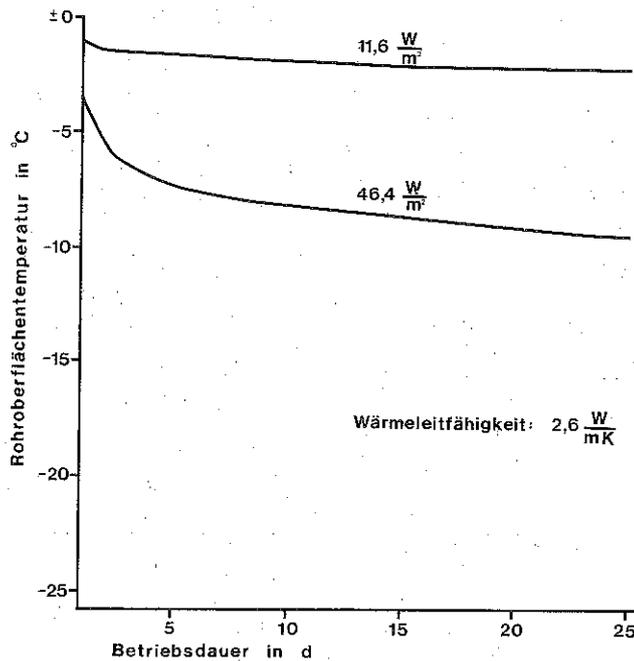


Bild 3.4.5
Rohroberflächentemperatur eines Erdreich-/Sole-Wärmetauschers bei verschieden konstant gehaltenen Wärmeentzugsdichten (Lehmboden, hoher Wassergehalt)

In Bild 3.4.6 und 3.4.7 ist die Bodentemperatur abhängig vom seitlichen Abstand zum Wärmetauscherrohr als Funktion der Betriebszeit für Sandboden mit mittlerem Wassergehalt dargestellt. Grundlage für diese Aussagen sind umfangreiche Temperaturprofilmessungen, die in mehreren ausgeführten Wärmepumpenheizungsanlagen durchgeführt wurden [13]. Sie gelten für Dauerbetrieb der Wärmepumpe, wenn über die Bodenoberfläche dem Wärmetauscher keine Wärme zufließt.

Die Festlegung des optimalen Verhältnisses zwischen Wärmetauscherfläche und der zu beheizenden Wohnfläche hängt u.a. sehr stark von den klimatischen Bedingungen des Ortes ab.

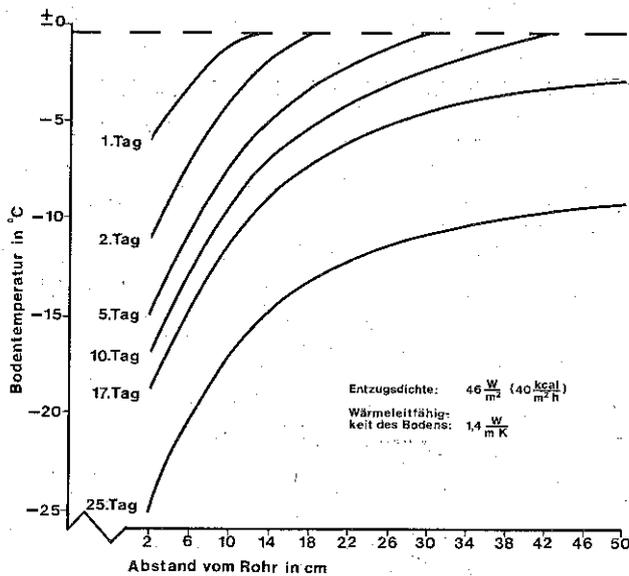


Bild 3.4.6 Vereisungsradius und Temperaturgradient in Sandboden mit mittlerem Wassergehalt

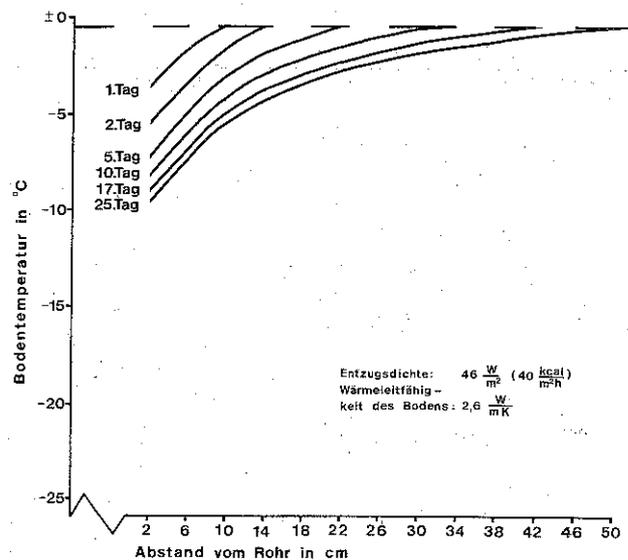


Bild 3.4.7 Vereisungsradius und Temperaturgradient in Lehmboden mit hohem Wassergehalt

3.4.2 Vertikale Erdwärmesonden

Die Gewinnung von Wärmeenergie aus dem Untergrund ist auch mittels senkrecht oder schräg in den Boden eingebrachter Erdwärmesonden möglich (Bild 3.4.8). Die Sonden bestehen aus einem am unteren Ende verschlossenen Außenrohr, in das ein unten offenes Innenrohr mit geringerem Durchmesser eingebaut ist. Die Länge der

Erdwärmesonde kann entsprechend den hydrogeologischen Gegebenheiten bis 100 m betragen. Beim Betrieb der Sonde wird ein Kühlmittel durch das Innenrohr nach unten und durch den Raum zwischen Innen- und Außenrohr wieder nach oben geführt. Beim Aufsteigen nimmt die Kühlflüssigkeit Erdwärme aus der unmittelbaren Umgebung der Erdwärmesonde auf. Die um 3 bis 5 K erwärmte Kühlflüssigkeit wird dann in einer Wärmepumpe wieder bis auf Temperaturwerte um 0 °C abgekühlt.

Als Kühlmittel können aus Gründen des Grundwasserschutzes nur solche Flüssigkeiten verwendet werden, die bei einer evtl. Leckage der Erdwärmesonde keine gefährdenden Grundwasserkontaminationen nach sich ziehen. Ein geeignetes Kühlmittel ist z.B. CaCl₂-Sole. Zur Erhöhung der Schutzwirkung sollte die Innenseite des Außenrohres ausgekleidet sein.

Die Energieausbeute hängt bei Erdwärmesonden stark von der Grundwasserführung der durchteuften Gesteine ab; in trockenem Gestein ist ein wirtschaftlicher Einsatz kaum zu erreichen. Aufgrund von Berechnungen und ersten Versuchsergebnissen kann davon ausgegangen werden, daß beim Vorhandensein von grundwassererfüllten Gesteinen die Versorgung eines Einfamilienhauses mit 3 bis 4 Erdwärmesonden von ca. 50 m Länge möglich ist. Für den praktischen Einsatz ist bedeutsam, daß Erdwärmesonden nur einen geringen Flächenbedarf haben, d.h. sie können auch bei kleinen Grundstücken verwendet werden.

Untersuchungen über die Einsatzmöglichkeiten von Erdwärmesonden werden in Finnland, Schweden, Belgien und den Niederlanden durchgeführt. Auch in der Bundesrepublik Deutschland sind mehrere Erdwärmesonden in Betrieb. Dabei werden Kälteleistungen zwischen 60 und 100 W/m erreicht.

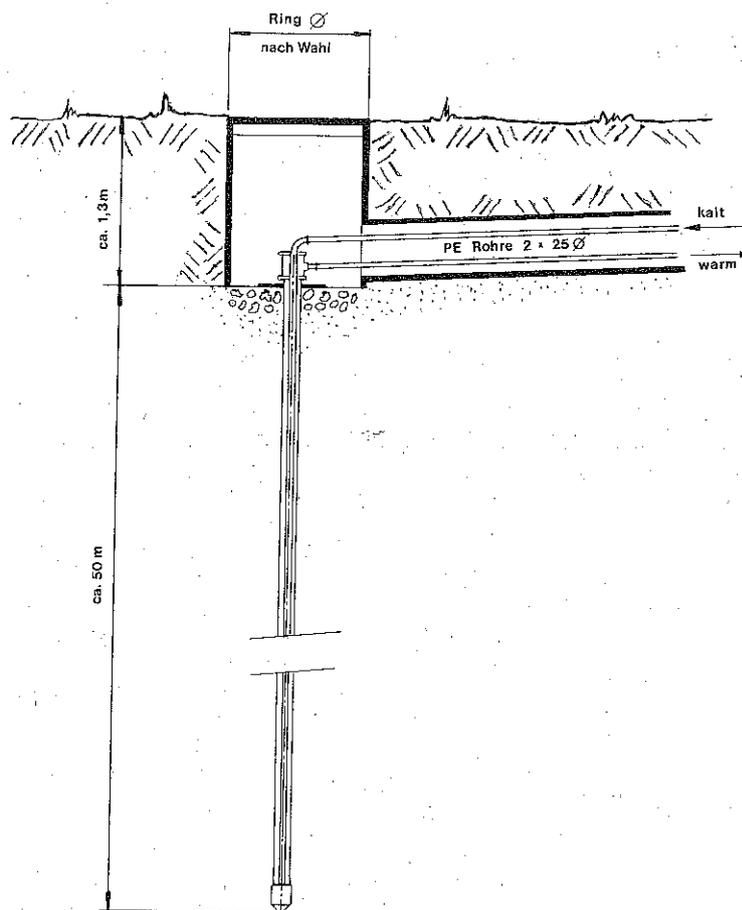


Bild 3.4.8 Schema einer Erdsonde

Alle in der Erde verlegten Rohre können in Kunststoff ausgeführt sein, unabhängig davon, daß der Wärmeübergang bei Metallrohren günstiger ist. Rohre aus Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylen (PE) werden seit über 20 Jahren in den Rohrnetzen der öffentlichen Versorgungswirtschaft eingesetzt. Bei der Anwendung sind die entsprechenden Regelwerke zu beachten, z.B. die des DVGW [11].

4. Arbeitsmittel für Wärmepumpen

4.1 Allgemeines

In Wärmepumpen können eine Vielzahl von Arbeitsmitteln (Kältemittel plus Kältemaschinenöle) eingesetzt werden. Grundvoraussetzung für übliche Anwendung ist primär, daß es sich um bei niedrigen Temperaturen siedende Stoffe handelt.

In nachfolgender Tabelle 4.4.1 sind einige der technisch anwendbaren Arbeitsmedien aufgeführt. Im allgemeinen handelt es sich dabei um Fluorchlorkohlenwasserstoffe, einzeln oder als azeotrope Gemische verschiedener Derivate, denen auf Grund weiter unten zu besprechender Eigenschaften heute der Vorzug gegeben wird, doch können von der Sache her alle in der Kältetechnik üblichen Arbeitsmittel auch als Arbeitsmedien in Wärmepumpen eingesetzt werden.

In der Bundesrepublik Deutschland werden vor allem Monochlordifluormethan (R22) und Dichlordifluormethan (R12) als Arbeitsmedium in Wärmepumpen mit den Wärmequellen Wasser und Erdreich eingesetzt (über Sole s. 4.5).

Die Auswahl des Arbeitsmediums erfolgt nach thermisch-physikalischen, wasserrechtlich-toxikologischen und ökonomischen Gesichtspunkten.

4.2 Thermisch-physikalische Betrachtung der Arbeitsmittel für Wärmepumpen

Für Auswahl und Anwendung eines Arbeitsmediums ist in erster Linie seine Siedetemperatur entscheidend. Wärmepumpen werden im Temperaturbereich oberhalb der Normsiedetemperatur und unterhalb der kritischen Temperatur des Mediums betrieben.

Wärmepumpen, die auf der Verdampferseite im Unterdruck gegenüber dem Atmosphärendruck arbeiten, sind bei Leckagen der Gefahr der inneren Korrosion durch Eindringen von Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt.

Der Feuchtigkeitsgehalt des Arbeitsmittels sollte grundsätzlich 40 mg H₂O/kg nicht überschreiten, um Korrosionen im Kreislauf der Wärmepumpe und Vereisungen der Ventile zu vermeiden. Wegen des in der Nähe des kritischen Punktes erforderlichen hohen Druckes wird man den Arbeitsbereich der Wärmepumpe unterhalb des kritischen Punktes wählen.

Für die Auslegung und den Betrieb einer Wärmepumpe hat die Maximierung der Leistungszahl (s. 1.2) grundsätzliche Bedeutung. Diese Leistungszahl wird unter anderem von den thermodynamischen Stoffdaten der Arbeitsmittel beeinflusst aber auch die Randbedingungen für einzusetzende Materialien und die Konstruktion der Wärmepumpen werden über die Auswahl der Arbeitsmedien mitbestimmt oder die Arbeitsmedien müssen danach gewählt werden.

Zum Erreichen einer möglichst hohen Leistungszahl und zur Optimierung der Anlage insgesamt, müssen eine Reihe von Kriterien bei der Auswahl der Arbeitsmedien ins Kalkül gezogen werden. Die wichtigsten sollen im nachfolgenden benannt werden:

- a) Bei vorgegebener Kondensationstemperatur ist die Leistungszahl der Wärmepumpe stoffspezifisch umso günstiger, je höher die Verdampfungstemperatur ist (letztere hängt von der Temperatur der Wärmequelle ab), d.h. je näher Kondensations- und Verdampfertemperatur beieinander liegen.
- b) Der Saugdruck am Eintritt in den Verdichter sollte > 1 bar sein, um Unterdruck im System zu vermeiden. Dadurch wird der Eintritt von Luft und Feuchtigkeit mit den oben erwähnten Folgen vermieden und andererseits die Leistungszahl nicht negativ beeinflusst.
- c) Ein kleines Verhältnis zwischen Verdampfer- und Kondensationsdruck sowie ein niedriger Verdichtungsdruck hilft Antriebsenergie am Verdichter sparen.
- d) Ein kleines spezifisches Volumen und damit eine große volumetrische Heizleistung des Arbeitsmittels (Quotient abgegebene Heizwärme geteilt durch Volumen des angesaugten Dampfes) haben kleine Abmessungen für Verdichter bzw. Wärmepumpe insgesamt zur Folge. Zusätzlich verringert sich mit steigender volumetrischer Heizarbeit die aufzuwendende Hubarbeit.
- e) Die stoffspezifische Wärmeübergangszahl Arbeitsmittel/Austauschfläche ist zu berücksichtigen. Dabei gilt, daß der Wärmeübergang umso günstiger wird je höher Verdampfungs- bzw. Kondensationsdrücke sind.

Zur Schmierung des Kolbenkompressors muß dem Kältemittel Öl beigemischt werden. Die erzielbare Verdichtungstemperatur im Arbeitsmittelkreislauf hängt dabei davon ab, welche Temperatur ohne Alterung des Schmiermittels im Dauerbetrieb gehalten werden kann.

Die parallelen Erfahrungen auf dem Gebiet der Kälteanlagen lassen den Schluß zu, daß die obere Temperaturgrenze im Dauerbetrieb bei 150–160 °C liegt. Diese Temperaturgrenze kann durch Fremdgase, Feuchtigkeit oder Metallabrieb merklich herabgesetzt werden.

Neben Kompressionswärmepumpen können auch Sorptionswärmepumpen zum Einsatz kommen. Über die dabei einzusetzenden Arbeitsmittel ist eine Aussage noch verfrüht. Z.Zt. wird hauptsächlich Ammoniak verwendet.

4.3 Wasserwirtschaftlich-toxikologische Eigenschaften

Wie bereits oben erwähnt, hat sich die Anwendung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen als Arbeitsmittel in Wärmepumpen weitgehend durchgesetzt.

Fluorchlorkohlenwasserstoffe zeichnen sich gegenüber den anderen üblicherweise anwendbaren Stoffen dadurch aus, daß sie in Wasser schwerer löslich und gegenüber Warmblütern weitestgehend ungiftig sind.

Zur Verdeutlichung sei als Beispiel genannt, daß Fluorchlorkohlenwasserstoffe komplikationsfrei seit langem in Trinkwasserkühlern eingesetzt werden. Fluorchlorkohlenwasserstoffe sind nicht entzündbar und wirken nicht korrodierend auf die Materialien der Wärmepumpe.

Gelangen die biologisch weitestgehend persistenten Fluorchlorkohlenwasserstoffe in Gewässer, so werden sie auf Grund ihres hohen Dampfdruckes bei den üblichen Wassertemperaturen in kurzer Zeit durch die natürliche Bewegung des Wassers ausgestrippt (Löslichkeit s. Tabelle 4.4.2). Da sie außerdem kaum Geruch und Geschmack besitzen, können sie zu keiner derartigen Beeinträchtigung von Gewässern führen.

Die toxikologische Unbedenklichkeit der genannten Fluorchlorkohlenwasserstoffe auf Warmblüter ist nachgewiesen (Tabelle 4.4.2). Untersuchungen an anderen Organismen werden z.Zt. durchgeführt. Bekannt ist, daß die letale Dosis bei Fischen für die Kältemittel R 12 120 mg/l und für R 22 400 mg/l beträgt. Vom menschlichen Organismus werden die Fluorchlorkohlenwasserstoffe nicht metabolisiert, sondern auf Grund ihres hohen Dampfdruckes schnell über Atemorgane und Hautoberfläche ausgeschieden.

Derzeit sind keine Gründe bekannt, die die Anwendung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen als Arbeitsmittel für Wärmepumpen einschränken. In Trinkwasserkühlern sind vom Bundesgesundheitsamt nur die Kältemittel R 12, R 22, R 115 und deren Gemische zugelassen. Eine andere Situation ergibt sich beim Einsatz von NH₃ oder SO₂. Für beide muß eine Betrachtungsweise entsprechend ihrer Stellung in der Liste wassergefährdender Stoffe angewendet und die Unfallverhütungsvorschrift (UVV) 20 – Kälteanlagen – beachtet werden. Sie sollten daher als Arbeitsmittel für Wärmepumpen mit den Wärmequellen Wasser und Erdreich nur in Sonderfällen eingesetzt werden.

Über die Gewässerrelevanz bzw. Toxikologie der den Kältemitteln zugesetzten Öle ist zum Zeitpunkt eine Aussage nicht möglich.

4.4 Handelsprodukte für Arbeitsmittel in Wärmepumpen

In der Tabelle 4.4.1 wird zur Kennzeichnung der einzelnen Fluorchlorkohlenwasserstoffe die allgemein eingeführte Notation verwendet. Die Produkte sind unter den Bezeichnungen Frigen, Freon, Genetron, Ucon usw. im Handel.

Verbindung	Formel	Kennzahl	M	K _p °C	t _k °C	p _k bar	VW kJ/kg
Trichlorfluormethan	CCl ₃ F	R 11	137,4	23,7	198,0	14	18,216
Dichlordifluormethan	CCl ₂ F ₂	R 12	120,9	-29,8	112,0	42,1	16,688
Chlortrifluormethan	CClF ₃	R 13	104,5	-81,1	28,8	38,6	14,850
Chlordifluormethan	CHClF ₂	R 22	86,5	-40,8	96,0	49,4	23,412
1,1,2-Trichlortrifluorethan	CCl ₂ F-CClF ₂	R 113	187,4	47,7	214,1	34,1	14,570
1,2-Dichlortetrafluorethan	CClF ₂ -CClF ₂	R 114	170,9	3,8	145,7	32,7	13,942
Monochlorpentafluorethan	CF ₃ -CClF ₂	R 115	154,5	-38,0	80,0	31,3	13,532
Ammoniak	NH ₃	—	17	-33,4	132,9	111,3	1368,250
Schwefeldioxid	SO ₂	—	64	-10,0	157,5	77,8	389,917

M = Molekulargewicht, K_p = Siedepunkt, t_k = Kritische Temperatur, p_k = Kritischer Druck (Partialdruck), VW = Verdampfungswärme

Tabelle 4.4.1

Kennzahl	Löslichkeit von Wasser (mg/l)		Löslichkeit in Wasser (mg/l) 25 °C	Toxizitätsklasse * nach HODGE/STERNER
	0 °C	30 °C		
R 11	36	130	1100	5
R 12	25	125	280	6
R 22	600	1500	3000	6
R 113	36	130	170	6
R 114	26	110	130	6
R 115	25	100	60	6
NH ₃	∞	∞	ca. 350000 (20 °C)	2-3
SO ₂	∞	∞	ca. 110000 (20 °C)	

* Toxizitätsklasse nach HODGE/STERNER	Oral LD ₅₀ Ratte	4-h-Inhalation Ratte Mortalität
1 = extrem toxisch	≤ 1 mg/kg	< 10 ppm
2 = hoch toxisch	1-50 mg/kg	10-100 ppm
3 = mäßig toxisch	5-500 mg/kg	100-1000 ppm
4 = leicht toxisch	0,5-5 g/kg	1000-10000 ppm
5 = praktisch nicht toxisch	5-15 g/kg	10000-100000 ppm
6 = relativ harmlos	> 15 g/kg	> 100000 ppm

Tabelle 4.4.2

LD₅₀ = Dosis letalis bei der 50 % der Versuchsorganismen gestorben sind.

4.5 Wärmeträgerflüssigkeit „Sole“

Für die Wärmeübertragung bei der Nutzung der Erdwärme wird „Sole“ eingesetzt. Ein Ausdruck, der sich im Sprachgebrauch für alle frostsicher machenden Flüssigkeiten eingebürgert hat. Als Flüssigkeit zur Aufnahme der Bodenwärme wird meist ein Äthylenglycol-Wasser-Gemisch verwendet. Das Mischungsverhältnis der Flüssigkeiten ist abhängig von der gewählten Grenztemperatur, bis zu der die „Sole“ ohne Gefahr von Eisbildung genutzt werden kann. Üblicherweise wird auf eine Grenztemperatur von ca. -10 °C ausgelegt. In diesem Fall sind dem Wasser z.B. ca. 20 % Glycol oder Gleichwertiges beizumengen.

Bei der Festlegung des Mischungsverhältnisses ist ein Kompromiß zwischen der minimalen Grenztemperatur, der spezifischen Wärme und der Viskosität der Flüssigkeit zu schließen. Die endgültige Füllung des Wärmetauschers mit „Sole“ erfolgt zweckmäßig nach beendetem Probelauf der Gesamtanlage.

Die spezifische Wärme der verschiedenen Zusätze ist kleiner als die von Wasser. Deshalb ist die spezifische Wärme der „Sole“ umso kleiner, je größer der Anteil an Zusätzen ist.

Daraus folgt, daß bei vorgegebener Heizleistung und relativ niedriger Solegrenztemperatur eine erhöhte Solemenge gefördert werden muß. Die entsprechenden Daten sind für eine Auswahl von Zusätzen in Tabelle 4.5 angegeben.

Zusätze	Solegrenztemperatur -10 °C					Solegrenztemperatur -20 °C				
	Mischungs- verhältnis Vol.-%	Soletemperaturen				Mischungs- verhältnis Vol.-%	Soletemperaturen			
		0 °C	-10 °C		0 °C		-20 °C			
Viskosität mm ² /s	spez. Wärme kJ/(kg · K)	Viskosität mm ² /s	spez. Wärme kJ/(kg · K)	Viskosität mm ² /s	spez. Wärme kJ/(kg · K)	Viskosität mm ² /s	spez. Wärme kJ/(kg · K)	Viskosität mm ² /s	spez. Wärme kJ/(kg · K)	
Antifrogen N	20	3	3,852	5	3,831	34	4,7	3,517	11	3,559
Antifrogen L (Lebensmittelbereich)	25	6	3,914	10	3,894	38	12	3,684	45	3,642
Calciumchlorid- lösung CaCl ₂	12,7	1,81	4,199	4,14	—	20,8	—	4,199	8,75	—
TKL (Äthylenglycol + Propandiol-Gemisch)	20	8,0	—	14,6	—	34	—	—	—	—
Fricofin Äthylenglycol- Gemisch	20	3,6	3,642	~5	~3,370	33	5	3,433	~9,3	~3,307

Tabelle 4.5

4.5.1 Wasserwirtschaftlich-toxikologische Eigenschaften der „Sole“

Die in Tabelle 4.5 aufgeführten Zusätze zur „Sole“ zeichnen sich allgemein durch toxikologische Unbedenklichkeit gegenüber Warmblütern aus (Tabelle 4.5.1).

Zusatz	Löslichkeit in Wasser 20 °C, g/l	Toxizitätsklasse nach HODGE/STERNER (s. Tabelle 4.4.2)
CaCl ₂	74,5	5
Äthylenglycol	> 1000	4
Propandiol	> 1000	6
Antifrogen N (Basis: Äthylenglycol)		5
Antifrogen L (Basis: Propandiol)		6

Tabelle 4.5.1

Auch gegenüber anderen Organismen (z.B. Fischen, Algen, Bakterien) ist die Toxizität relativ gering: Die in der Literatur zu findenden Letalitätskonzentrationen liegen im Gramm-Bereich pro Liter.

Die organischen Zusätze sind zwar biologisch gut abbaubar, jedoch sehr geschmacksintensiv. Sie gehören zur Gruppe L des Katalogs der wassergefährdenden Flüssigkeiten, [41] d.h. in der Regel führen nur größere Mengen eine Gewässergefährdung herbei.

5. Mögliche wasserwirtschaftliche Auswirkungen beim Einsatz von Wärmepumpen

Der Einsatz von Wärmepumpen kann auf mannigfache Weise Auswirkungen auf wasserwirtschaftliche Belange haben. Im folgenden werden diese Auswirkungen – soweit bekannt – dargestellt.

Da die Temperaturerniedrigung des Wassers, das als Wärmequelle dient, bei dieser Beschreibung im Vordergrund steht, soll zunächst allgemein auf die durch die Temperatur beeinflussten physikalischen Eigenschaften und chemischen Reaktionen eingegangen werden.

5.1 Allgemeine physikalisch-chemische Aspekte

Die meisten physikalischen Eigenschaften und nahezu alle chemischen Reaktionen sind temperaturabhängig.

Bei der vorliegenden Fragestellung spielen insbesondere folgende Eigenschaften des Wassers und Reaktionsabläufe unter Beteiligung des Wassers eine Rolle:

- Viskosität
- Löslichkeit gasförmiger, flüssiger und fester Substanzen
- Gasdiffusion
- Dichte
- Dampfdruck
- Oberflächenspannung
- Kompressionsmodul
- pH-Wert

Wie aus Bild 5.1.1 zu ersehen, sind im Temperaturbereich zwischen 0 und 40 °C die Änderungen der Dichte, der Oberflächenspannung und des Kompressionsmoduls gering. Diese Parameter werden daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

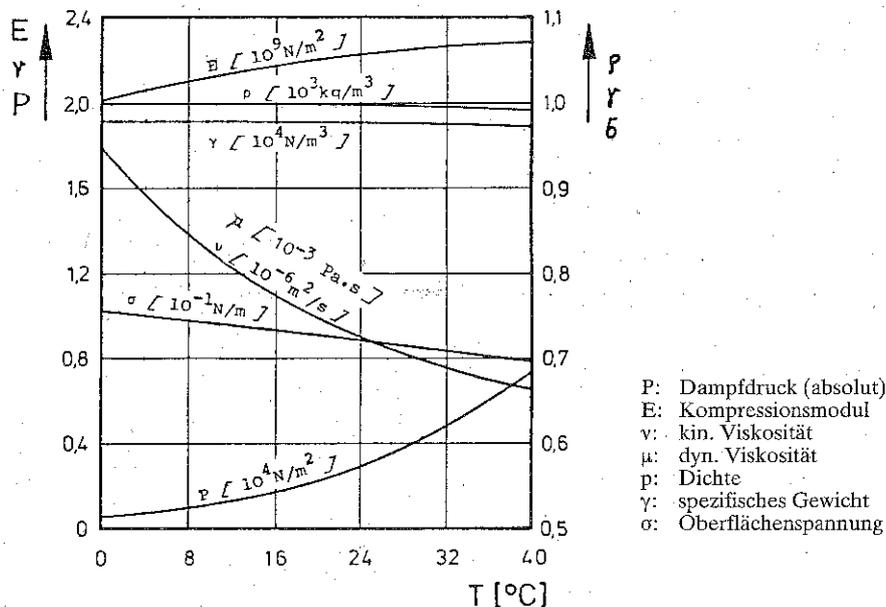


Bild 5.1.1 Abhängigkeit physikalischer Eigenschaften des Wassers von der Temperatur

Die kinematische Viskosität bzw. die Zähigkeit einer Flüssigkeit ist die Größe, die die innere Reibung der Flüssigkeit wiedergibt. Bei fallender Temperatur nimmt die Viskosität des Wassers zu (Bild 5.1.1). Dies wirkt sich z.B. auf die Fließgeschwindigkeit (Abstandsgeschwindigkeit) des Wassers bei der Bodenpassage aus (Siehe auch Abschnitt 3.2).

Nach Darcy gilt:

$$v_a = \frac{k_f \cdot i}{n_a}$$

mit v_a = Fließgeschwindigkeit des Grundwassers, k_f = Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens, i = Grundwasserspiegelgefälle und n_a = durchflußwirksamer Hohlraumanteil. Der Durchlässigkeitsbeiwert ist auf die Temperatur von 10 °C bezogen. Er ist proportional zur Viskosität; er sinkt bei fallender Temperatur.

Nach Fair und Geyer [14] gilt:

$$k_{f_1}/k_{f_2} = v_2/v_1$$

Bei einer Senkung der Grundwassertemperatur von 10 °C auf 5 °C wird wegen der geringeren kinematischen Viskosität der Durchlässigkeitsbeiwert auf den Faktor 0,85 verringert.

$$k_{f_5} = \frac{v_{10}}{v_5} \cdot k_{f_{10}} = \frac{1,31}{1,53} \cdot k_{f_{10}} = 0,85 \cdot k_{f_{10}}$$

Dies bedeutet, daß sich die Fließvorgänge während der Bodenpassage verlangsamen (s.a. 5.2).

Die Temperatur hat über die dynamische und kinematische Viskosität auch Einfluß auf die Aggregation und Sedimentation von Suspensa im Oberflächenwasser. Nach Hahn [15] und nach Fair, Geyer, Okun [16], können dabei ähnlich wie beim Durchlässigkeitsbeiwert folgende Relationen für die Trübungsänderung in einer Flüssigkeit aufgestellt werden:

Aggregation:	$\frac{(\Delta\tau) T_1}{(\Delta\tau) T_2} = \frac{v T_2}{v T_1}$	mit: T_1, T_2 = Temperaturen
		$\Delta\tau$ = Trübungsänderung
		v = kinematische Viskosität
Sedimentation:	$\frac{(\Delta\tau) T_1}{(\Delta\tau) T_2} = \frac{\mu T_2}{\mu T_1}$	μ = dynamische Viskosität

Bei fallender Temperatur nimmt die Löslichkeit gasförmiger Stoffe zu, wohingegen sie bei festen und flüssigen Stoffen i.a. niedrigere Werte annimmt.

So steigt beim CO₂ (Bild 5.1.2) bei einer Abkühlung der Sättigungswert. Das Verhalten des CO₂ spielt über das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht eine wichtige Rolle hinsichtlich der Löslichkeit der Kalke und Dolomite, die mit fallender Temperatur zunimmt (Bild 5.1.3).

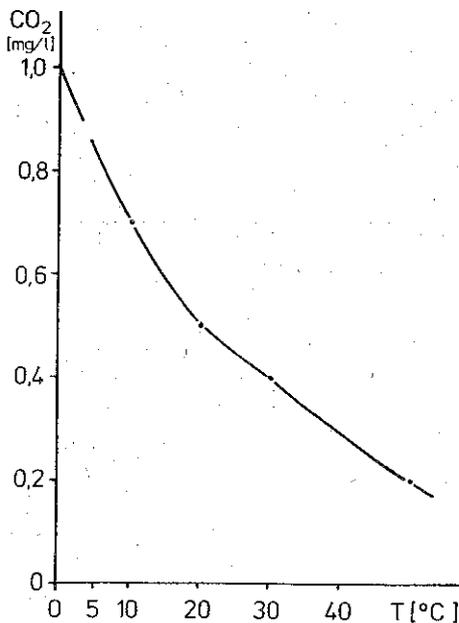


Bild 5.1.2 Abhängigkeit der CO₂-Sättigung von der Temperatur

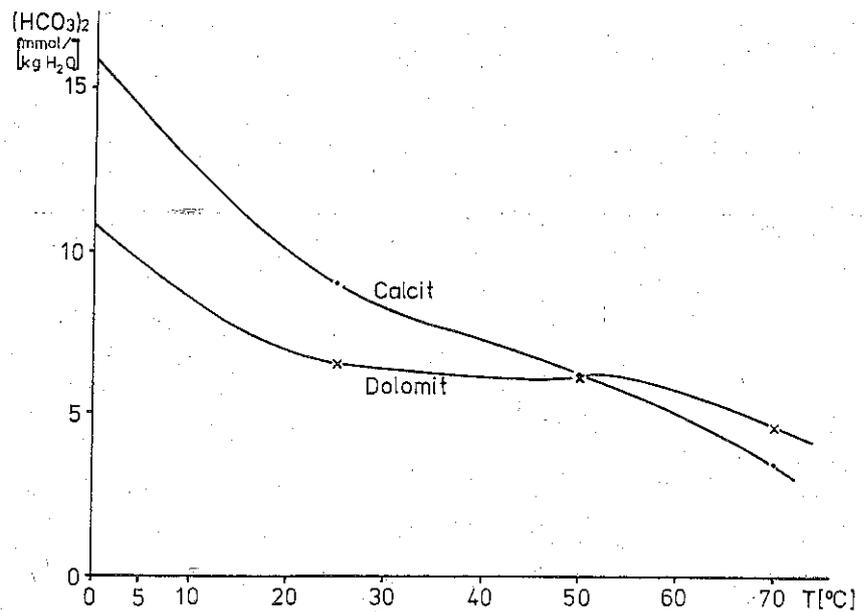


Bild 5.1.3 Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von Calcit und Dolomit

Von größtem Einfluß ist dabei die Änderung der Sauerstofflöslichkeit im Wasser. Bild 5.1.4 zeigt, welche starke Abhängigkeit zwischen Temperatur und Sauerstoffsättigung besteht.

Eine Absenkung der Wassertemperatur bewirkt eine Erhöhung des Sättigungswertes. Dadurch wird bei gleichbleibender Konzentration ein Sättigungsdefizit erhöht, bzw. geschaffen. Da nach dem Fick'schen Gesetz die Sauerstoffaufnahme unter turbulenten Strömungsbedingungen dem Sättigungsdefizit direkt proportional ist, wird durch eine Abkühlung die Sauerstoffaufnahme begünstigt.

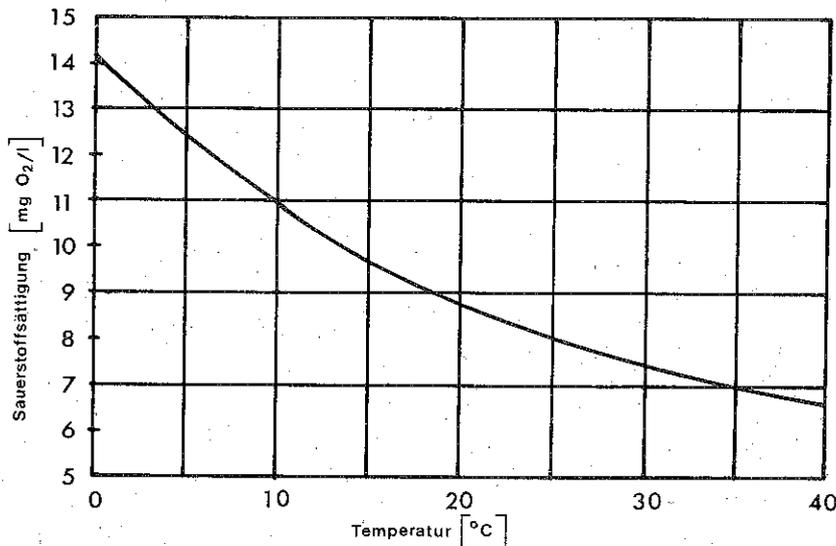


Bild 5.1.4
Temperaturabhängigkeit
der Sauerstoffsättigung
in salzfreiem Wasser

Der Steigerung des Sauerstoffdefizits bei der Abkühlung des Wassers, die eine erhöhte Sauerstoffaufnahme in Wasser ermöglicht, steht eine Abnahme der Diffusionsgeschwindigkeit entgegen. Die Diffusionsgeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit, mit der der gelöste Sauerstoff von der Grenzfläche Wasser – Gas in den Wasserkörper eindringt. Der Diffusionskoeffizient D sinkt mit fallender Temperatur. Es gilt die Beziehung:

$$D = \frac{K_B \cdot T}{6 \pi \cdot r \cdot \mu}$$

- K_B – Boltzmann-Konstante
- T – absolute Temperatur
- μ – dynamische Viskosität
- r – Radius des diffundierenden Moleküls
- D – Diffusionskoeffizient

Die nach dieser Gleichung errechnete Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten für Sauerstoff in Wasser ist in dem Bild 5.1.5 für den Bereich zwischen 0 °C und 40 °C dargestellt.

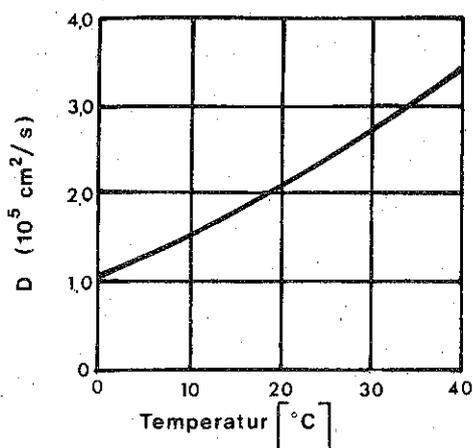


Bild 5.1.5
Temperaturabhängigkeit
des Diffusionskoeffizienten für Sauerstoff in Wasser

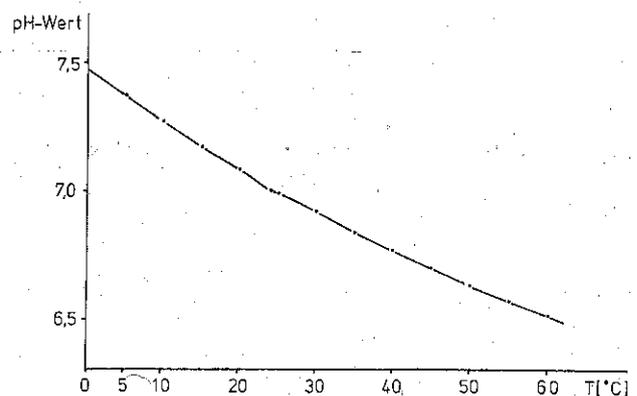


Bild 5.1.6
Temperaturabhängigkeit des pH-Wertes

Von hydrochemischer Bedeutung ist auch die Zunahme des pH-Wertes bei Temperaturenniedrigung, Bild 5.1.6. Der pH-Wert bestimmt die Löslichkeit vieler Stoffe. So sind viele Metalle in sauren Wässern löslich.

Insgesamt betrachtet sind die physikalisch-chemischen Veränderungen in dem Temperaturbereich zwischen 0 und 40 °C bei Abkühlungsspannen von 5 K gering, z.T. wirken sie gegenläufig und heben sich dadurch praktisch auf. Dabei ist allerdings auf bestimmte Temperaturgrenzen zu achten, auf die in den folgenden Kapiteln genauer eingegangen wird.

5.2 Biologische Aspekte

Abwasser, Oberflächenwasser und Grundwasser unterscheiden sich meist stark in ihrer Beschaffenheit. Gemeinsam ist ihnen jedoch, daß organische Schmutzstoffe in Gegenwart von molekularem Sauerstoff durch Mikroorganismen und höhere Lebewesen mineralisiert werden, d.h. zu Stoffwechselprodukten wie CO_2 , Wasser und anorganischen Salzen abgebaut werden. Am auffälligsten ist dieser Prozeß bei Kläranlagen mit biologischer Reinigungsstufe und im Verlauf der Selbstreinigungsstrecken von Fließgewässern.

Die Rückgabe von abgekühltem Wasser in den Untergrund, in Kläranlagen oder in Oberflächengewässer wird die dort vorhandenen Organismen insoweit beeinflussen, als die Temperaturerniedrigungen die Stoffwechselaktivität und Vermehrungsrate herabsetzen. Nach der auch in diesem Fall gültigen van't Hoff'schen Regel verlangsamen sich biochemische Reaktionen auf etwa $1/2-1/3$, wenn sich die Temperaturen um 10 K erniedrigen.

Kläranlagen werden im allgemeinen nach empirisch ermittelten Bezugsgrößen geplant, die die normalen jahreszeitlichen Schwankungen der Zulufttemperaturen implizit berücksichtigen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie hoch der Anteil an Wärmepumpen sein darf, die dem Abwasser Wärme entziehen, ohne daß es zu einer nachteiligen Temperaturabsenkung in den nachgeschalteten Kläranlagen kommt. Berechnungen zeigen, daß die Abkühlung unerheblich ($< 1 \text{ K}$) bleibt, wenn nicht mehr als 10 % aller Einleiter die Abwasserwärme nutzen.

Diese Angabe braucht nicht allgemeine Gültigkeit zu haben. So sind Möglichkeiten in Betracht zu ziehen, daß Siedlungsgebiete (vornehmlich mit Hochhäusern) fernab der Kläranlage eine Abwasserwärmenutzung in dem Umfange durchführen, die der natürlichen Abkühlung des Abwassers innerhalb des Kanalisationsnetzes bis zur Kläranlage entspricht. Solche Situationen lassen sich unschwer nach den in [17] beschriebenen Rechenmodellen darstellen.

Unabhängig von diesen durchaus diskutierbaren Möglichkeiten sollte dem massiven Einsatz von Wärmepumpen zur Abwasserwärmenutzung seitens der Kommunen besondere Beachtung geschenkt werden, weil bei spürbaren Temperaturerniedrigungen Erweiterungen des biologischen Teiles von Kläranlagen notwendig werden könnten.

Für Oberflächengewässer gilt, daß ihre Selbstreinigungsleistung nicht gemindert werden darf. Kläranlagen mit nur biologischer Reinigungsstufe eliminieren hauptsächlich leicht abbaubare Schmutzstoffe, während die persistenteren Verbindungen in die Gewässer gelangen und, wenn überhaupt, erst nach längeren Verweilzeiten mineralisiert werden können. Diese Vorgänge können durch eine Abkühlung der Gewässer verzögert werden. Tatsächlich wird man aber in der Praxis nur an sehr kleinen Fließgewässern mit einem Abfluß von wenigen Kubikmetern pro Sekunde und vergleichsweise sehr großen Wärmepumpenanlagen eine Minderung der Selbstreinigungsleistung nachweisen können.

Die mikrobiologischen Abbauvorgänge können nicht als einziges Kriterium bei der Abwägung des Für und Wider von Wärmepumpenanlagen gelten, da die Oberflächengewässer Biotope für eine spezifische Fauna und Flora sind. Durch tiefere Wassertemperaturen verzögern sich Wachstum und Entwicklung der meisten Gewässerorganismen. Normalerweise dürften hieraus für die Gewässerbiozöosen jedoch keine gravierenden Nachteile erwachsen. Jedoch erscheint es angezeigt, jeden Einzelfall gewissenhaft zu prüfen.

Die Bedeutung der im Untergrund lebenden Organismen liegt – wie in den zuvor betrachteten Gewässern auch – in der Mineralisation organischer Substanzen, die z.B. mit Verunreinigungen in das Grundwasser gelangen.

Auch im Grundwasser werden organische Substanzen durch Bakterien abgebaut. Wo Lockergestein vorkommt, wird die Mineralisation durch die Tätigkeit einer speziell an das Lückensystem angepaßten Tierwelt (Interstitialfauna) begünstigt. In den oberflächennahen Bodenschichten werden die meisten Organismen angetroffen. Durch ihre Aktivität verhindern sie ein Zusetzen des Lückensystems. Der Effekt des Bodens als mechanisches und adsorptives Filter (abhängig von der Porengröße, d.h. gut bei Sand, schlecht bei Kies und spaltenreichem Gestein) zeigt sich an den Keimzahlen im Wasser. Im allgemeinen finden sich:

an der Geländeoberfläche:	mehrere Millionen Keime pro cm^3 Boden
in 0,1–0,2 m Tiefe:	mehrere hunderttausend Keime
in 1 m Tiefe:	mehrere tausend Keime
in 4 m Tiefe und tiefer:	einige wenige bis keine Keime.

Die Temperaturen des Grundwassers betragen in unseren Breiten etwa 10°C und unterliegen im Jahresgang ab etwa 5 m Tiefe nur geringfügigen Schwankungen (Bild 3.2.2). Es ist verständlich, daß sich die Organismen des Lückensystems im Verlauf ihrer Entwicklungsgeschichte diesem Temperaturwechsel in den Oberschichten und den niedrigen Temperaturen in tieferen Schichten angepaßt haben. Selbst Temperaturerniedrigungen bis in die Nähe des Gefrierpunktes brauchen nicht zu einer Schädigung dieser kälteliebenden Organismen zu führen. Allenfalls wird ihre Abbauleistung mehr oder weniger stark verzögert.

Wegen der meist langen Fließzeiten des Grundwassers, die bei Abkühlung des Grundwassers noch verlängert werden, nicht zuletzt wegen des bei Einzelmaßnahmen anzunehmenden engbegrenzten Bereiches der Abkühlung, kann der Einfluß der Abkühlung allein als geringfügig bis vernachlässigbar angesehen werden.

Bei der Nutzung der Erdwärme und der damit verbundenen Vereisung des Untergrundes – zwar im eng begrenzten Umfange – besteht die Gefahr einer Beeinflussung der oberirdischen Flora unabhängig davon, daß die Vereisung bis in die Nähe des Oberbodens in die vegetationslose Zeit fällt. Inwieweit bei Errichtung und Betrieb von Wärmepumpen nachbarschaftsrechtliche Belange zu berücksichtigen sind, bedarf der örtlichen Prüfung. Aus biologischer Sicht stellt sich die Forderung, daß die soleführenden, erdverlegten Leitungen absolut dicht sind und keiner Korrosion unterliegen (vergl. 3.4).

Der massierte Einsatz von Grundwasserentnahme- und Schluckbrunnen sollte weitestgehend vermieden werden, da mit jedem Eingriff in das Grundwasser die schützende Deckschicht durchbrochen wird und insbesondere die Gefahr einer Grundwasserverunreinigung über den Schluckbrunnen nicht restlos ausgeschlossen werden kann.

5.3 Auswirkungen bei den verschiedenen Wärmenutzungen

5.3.1 Auswirkungen bei der Nutzung der Grundwasserwärme

Beim Betrieb von Grundwasser-Wärmepumpen bildet sich in der Umgebung des Förderbrunnens ein Absenkungstrichter, um den Schluckbrunnen staut sich ein „Grundwasserberg“ auf, Bild 5.3.1.1. Punktiert abgegrenzt ist der durch Grundwasserstands-Absenkungen bzw. -Anhebungen beeinflusste Bereich um die Brunnen.

Der Abstand zwischen Förder- und Schluckbrunnen muß mit Sicherheitszuschlag so bemessen sein, daß kein hydraulischer und thermischer Kurzschluß entsteht, d.h., daß das eingeleitete, abgekühlte Wasser direkt wieder in den Einzugsbereich des Förderbrunnens kommt. Der Mindestabstand zwischen Förder- und Schluckbrunnen ist entsprechend den lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten, dem Brunnenausbau und -betrieb sowie der Position der Brunnen im Grundwasserstrom sehr unterschiedlich.

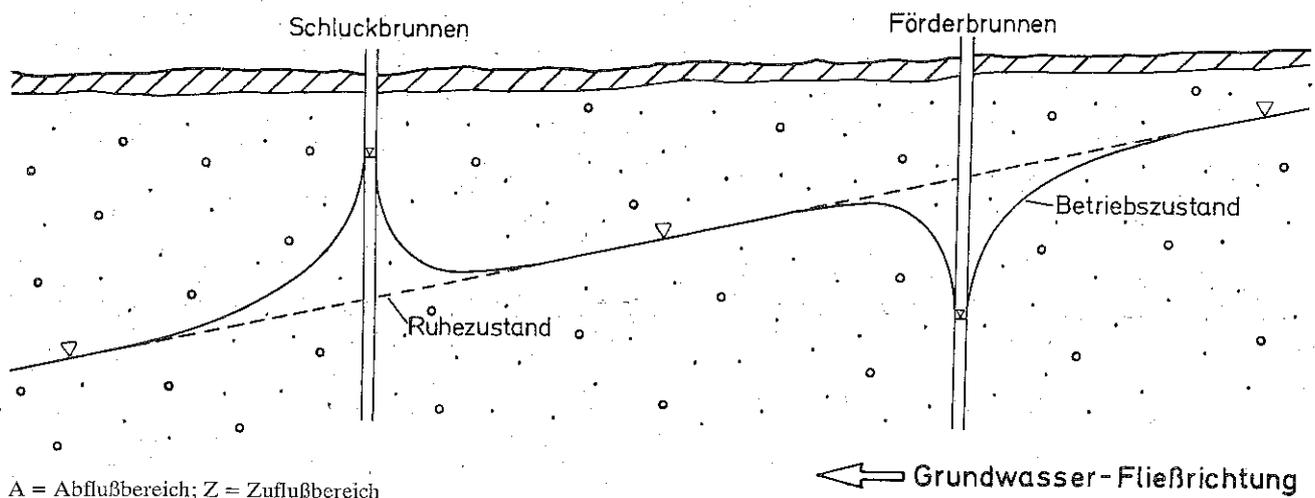


Bild 5.3.1.1 Schematische Darstellung der Grundwasserverhältnisse im Förder- und Schluckbrunnen [4]

Der Mindestabstand wird umso kleiner, je geringer die Förder- bzw. Einleitungsströme, je geringer die Temperaturerniedrigung durch die Wärmepumpe und je größer die Grundwasserfließgeschwindigkeit sind.

Das Einhalten eines Mindestabstandes zwischen Förder- und Schluckbrunnen kann entbehrlich sein, wenn zwei hydrologisch getrennte Grundwasserstockwerke genutzt werden können.

Die ständige Einleitung von Wärmepumpenwasser in einen Grundwasserleiter führt dazu, daß sich vom Schluckbrunnen aus eine ellipsenförmige, grundwasserstromabwärts ausgelängte, negative Temperaturanomale ausbildet, Bild 5.3.1.2.

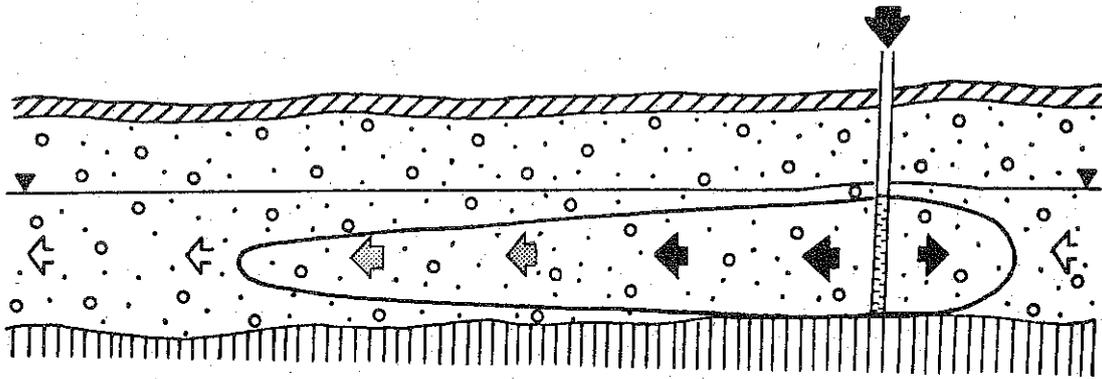


Bild 5.3.1.2 Schema der Ausbreitung eines Wasserkörpers kälterer Temperatur in einem beispielhaften Grundwasserleiter (sandig-kiesiges Material)

Wirkt im Untergrund eine künstliche Wärmequelle, so überlagert sich deren thermisches Feld dem natürlichen thermischen Feld. Im Falle der Versickerung von kaltem Wasser kommt es zu Abkühlungen, d.h. es baut sich ein negatives thermisches Feld auf. Diese negative thermische Anomalie breitet sich zunächst rasch aus und strebt dann langsam einem stationären Zustand zu. Dieser ist erreicht, wenn die pro Zeiteinheit aus der Umgebung in die Anomalie einfließende Wärmemenge gleich der bei der Kaltwasserversickerung dem Untergrund zugeführten „negativen Wärmemenge“ ist. Bild 5.3.1.3 zeigt die der Anomalie zufließenden, positiven Wärmeströme.

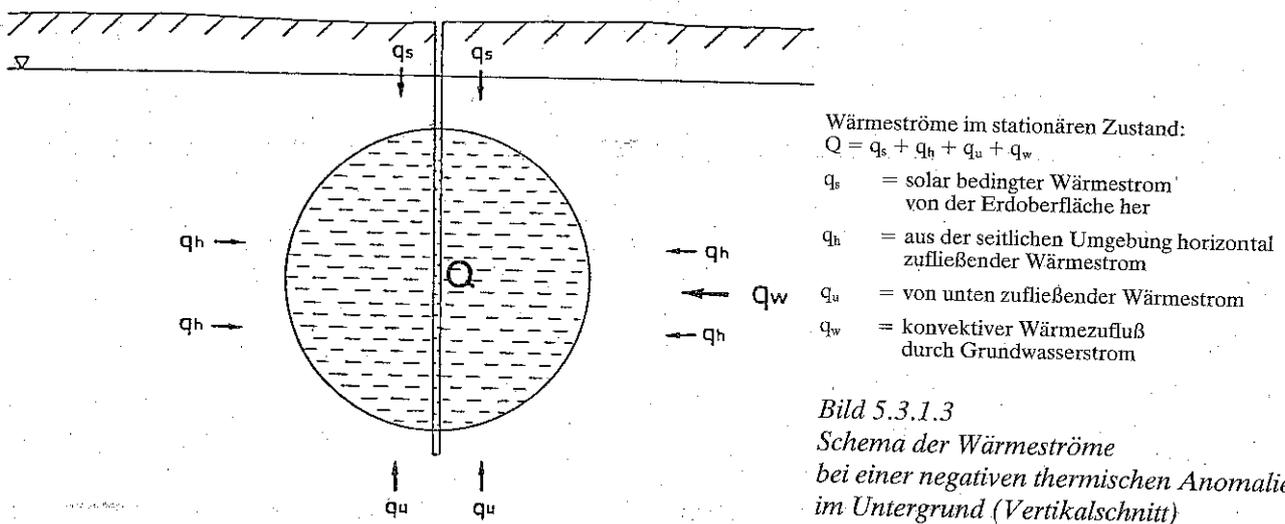


Bild 5.3.1.3 Schema der Wärmeströme bei einer negativen thermischen Anomalie im Untergrund (Vertikalschnitt)

Die Wärmestromdichten von q_s und q_h sind – außer von der Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsschichten – besonders von der Stärke der Anomalie abhängig. Im Wärmestrom q_u ist der natürliche Erdwärmestrom q_n – im Mittel $6,3 \cdot 10^{-6} \text{ W/cm}^2$ – enthalten, d.h. $q_u > q_n$. Da sich das Grundwasser normalerweise im fließenden Zustand befindet, tritt noch ein konvektiver Term q_w auf, der direkt proportional der Grundwasserfließgeschwindigkeit ist. Das zuströmende Grundwasser vermischt sich mit dem kalten Wasser und vermindert dadurch die Anomalie. Gleichzeitig wird deren Form elliptisch verzerrt und in Grundwasserfließrichtung ausgelängt, Bild 5.3.1.4.

Die wirkenden Wärmeströme lassen sich durch die Gleichung

$$Q = q_u + q_s + q_h + q_w$$

(Q = eingebrachte, „negative Wärmemenge“ pro Zeiteinheit)

beschreiben.

Form und Größe der thermischen Anomalie werden im wesentlichen von den Parametern

- Menge und Temperatur des wiedereingeleiteten Wassers,
- k_f -Wert (Durchlässigkeitsbeiwert), nutzbares und Gesamtporenvolumen und Mächtigkeit des Grundwasserleiters,
- Wärme- bzw. Temperaturleitfähigkeit von Gestein und Wasser,
- Grundwasserfließgeschwindigkeit und Grundwasserflurabstand,
- Lufttemperatur und Niederschlagshöhe,
- Länge der Filterstrecke des Schluckbrunnens und ihrer Tiefenlage unter Gelände,
- Mächtigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht

bestimmt.

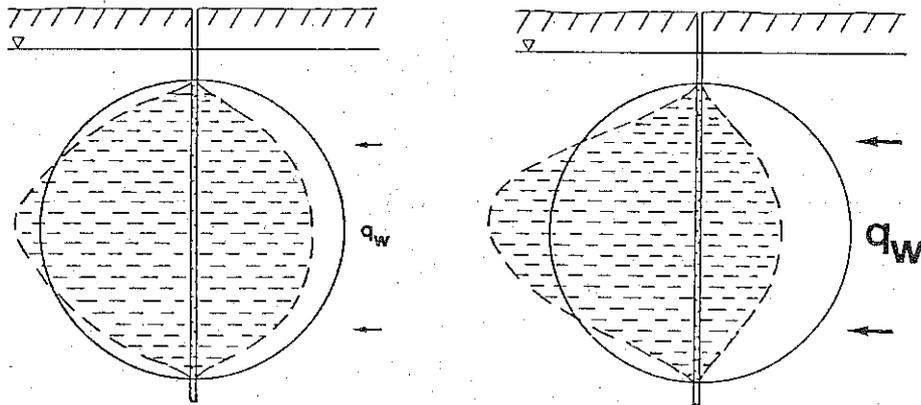


Bild 5.3.1.4 Einfluß des Grundwasserstroms auf Größe und Form einer negativen thermischen Anomalie im Untergrund

Über die raumzeitliche Ausbreitung einer negativen thermischen Anomalie um einen Grundwasser-Wärmepumpen-Schluckbrunnen liegen noch keine experimentell abgesicherten Kenntnisse vor. Erste Ergebnisse aus hydrothermischen Versuchsfeldern in rolligen Böden und Modellrechnungen zeigen jedoch, daß bei Einfamilienhäusern mit ca. $25 \text{ m}^3/\text{d}$ Grundwasserbedarf für die Wärmepumpe die radiale Erstreckung der Temperaturanomalie von Schluckbrunnen in Abhängigkeit von den o. a. Parametern wenige zehn Meter beträgt [39]. Liegt die Temperatur des eingeleiteten Kaltwassers ganzjährig bei 7°C , d.h. nur 2 bis 3 K unter dem Jahresmittel der Lufttemperatur, so bildet sich bei der Versickerung in einem erdoberflächennahen Niveau nur während des Sommers eine negative, im Winterhalbjahr dagegen eine positive Temperaturanomalie heraus. Die thermische Beeinflussung des Untergrundes ist in diesem Falle sehr gering. Eine im Jahresverlauf \pm konstante Temperatur des Kaltwassers von 7°C kann gehalten werden, wenn durch großen Grundwasserdurchsatz die Temperaturdifferenz klein gehalten wird oder, wenn das durch den Förderbrunnen erschlossene Grundwasser einem tieferen Grundwasserhorizont entstammt und dadurch eine entsprechend höhere Temperatur aufweist.

Aus den Erfahrungen eines Versuchsfeldes in rolligen Böden kann gefolgert werden, daß der thermisch beeinflusste Bereich in Fließrichtung des Grundwassers selbst bei eingeleiteten Mengen kalten Wassers bis zu $2500 \text{ m}^3/\text{d}$ eine Entfernung von 500 m kaum übersteigen dürfte [13].

Die Temperaturgrenzwerte, die ein Grundwasser nicht über- bzw. unterschreiten soll, müssen sich an den natürlichen Grundwassertemperaturen orientieren. Diese geben die thermischen Randbedingungen für das unserem Klimaraum entsprechende Ökosystem im Grundwasserbereich vor.

Nach Bild 3.2.2 schwanken die Temperaturen des flachen Grundwassers – in beispielsweise 2 m Tiefe – bei einer Jahresmitteltemperatur von 10°C zwischen 6 und 14°C , bei einer Jahresmitteltemperatur von 8°C zwischen 4 und 12°C .

Bei künstlich verursachten, dauernd bei diesen Grenzwerten liegenden Temperaturen sind keine nennenswerten Auswirkungen zu erwarten. Die physikalisch-chemischen Veränderungen halten sich in engem Rahmen und bei den Organismen dürfte aufgrund ihrer Adaptionfähigkeit – vor allem bei einer langsamen Temperaturänderung – die ursprüngliche Artengemeinschaft im Wesentlichen erhalten bleiben. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist daher – soweit eine Verunreinigungsmöglichkeit durch austretende Kühl- oder Schmiermittel ausgeschlossen wird – bei der Versickerung von auf 4 bis 6°C abgekühltem Wasser aus Wärmepumpenanlagen bei Einzelanlagen die Gefahr einer nachteiligen Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit vernachlässigbar gering.

Für dichter besiedelte Gebiete sollen hydrothermische Pläne erstellt werden, um Angaben über die Verfügbarkeit des Grundwassers als Energieträger zu erhalten und um eine flächenhafte thermische Überbeanspruchung zu verhüten.

Vorstehende Aussagen beziehen sich auf Lockergesteins-Grundwasserleiter. Für klüftige Grundwasserleiter können wegen der spezifischen Verhältnisse derzeit keine allgemein gültigen Angaben gemacht werden.

5.3.2 Auswirkungen bei der Nutzung von Oberflächenwasser

Die Wärmebilanz der Oberflächengewässer ist durch Wärmeaufnahme, -verteilung und -abgabe bestimmt. Die Wärmeaufnahme erfolgt hauptsächlich durch die Adsorption von Strahlungsenergie in den obersten Wasserschichten. Daneben kann auch die anthropogene Wärmezufuhr eine gewisse Rolle spielen. Durch Ausstrahlungen, Verdunstung und Verfrachtung von warmem Oberflächenwasser sowie durch Ableitung (an die Umgebung) gibt ein Gewässer die Wärme wieder ab. Es bestehen charakteristische Unterschiede im Wärmehaushalt von stehenden und fließenden Gewässern.

Bei Fließgewässern spielt der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre die maßgebende Rolle. In Abhängigkeit von Abfluß, Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit zeigen Fließgewässer eine unterschiedlich ausgeprägte Temperaturamplitude im Tagesverlauf. Da Abkühlung und Erwärmung zeitabhängige Vorgänge sind, verlaufen sie in räumlicher Verschiebung mit der fließenden Welle. Die Jahres- und Tagesschwankungen werden mit zunehmender Entfernung von der Quelle größer.

In Bild 5.3.2 sind charakteristische Jahressganglinien der Wassertemperatur geographisch unterschiedlicher Flüsse dargestellt [17]. Mit Ausnahme von Gletscher- und Gebirgsflüssen liegen die Wassertemperaturen der anderen Fließgewässer im Jahresmittel über der mittleren Lufttemperatur.

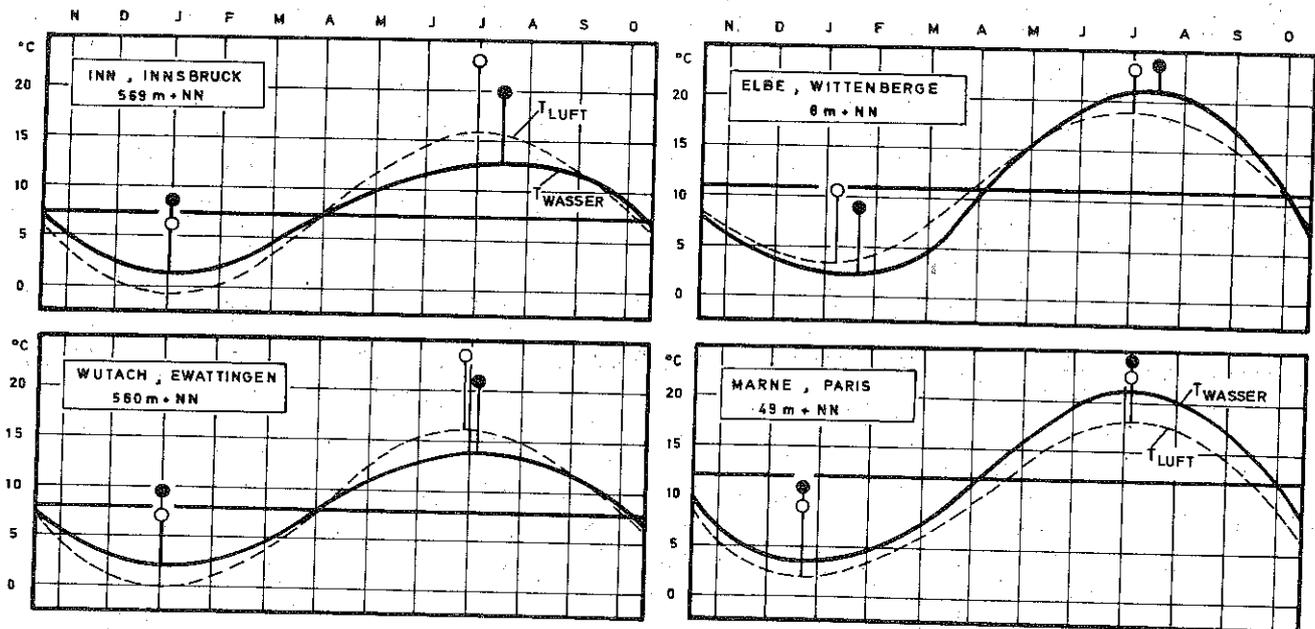


Bild 5.3.2 Charakteristische Jahressganglinien der Flußwassertemperaturen (mit Luft-Temperaturen zum Vergleich) [17]

Auch die Wärmehalte der Oberflächengewässer könnten genutzt werden. Jedoch sind folgende Einschränkungen zu beachten:

Der Einsatz von Wärmepumpen für die Raumheizung ist in der kalten Jahreszeit, also zwischen Oktober und April von besonderem Interesse. In den Monaten Dezember bis Februar setzen die natürlichen Wassertemperaturen von 5 °C und darunter der Wärmenutzung technische Grenzen, da die üblichen Temperaturabsenkungswerte von 4–6 K zu einer Vereisung der Wärmetauscher führen können. Umgehen läßt sich dieses Problem nur mit einem relativ hohen Wasserdurchsatz mit geringer Abkühlung.

Die aus der Gewässerökologie abzuleitenden Grenzen können nicht pauschal angegeben werden. Man kann voraussetzen, daß die Auswirkungen bei einer intensiven Wärmenutzung ähnlich vielfältig sind wie die der Gewässer-erwärmung.

Die ökologischen und wasserwirtschaftlichen Auswirkungen der künstlichen Gewässererwärmung sind in der Literatur eingehend behandelt worden. Im Vergleich zu der Fülle von Veröffentlichungen zu diesem Thema gibt es über anthropogene Abkühlungen von Gewässern bisher kaum Veröffentlichungen. Es sind Hinweise aus Australien vom River Murray [18] und von der Weser bekannt, wo durch die Abgabe von kaltem Tiefenwasser aus Stauseen die Temperaturen der aufnehmenden Gewässer beträchtlich erniedrigt werden. Aus ökologischer Sicht führen Erniedrigungen der Gewässertemperatur hauptsächlich zur Herabsetzung der Stoffwechselleistung und zur Verlängerung der Reproduktionsdauer von Gewässerorganismen.

Hierbei ist es wichtig, ob es sich um kurzfristige oder langfristige Temperaturänderungen handelt. In letzterem Fall sind viele Organismen in der Lage, sich durch Adaption bis zu einem gewissen Grad auf die neuen thermischen Bedingungen einzustellen [19]. Eine längerdauernde Veränderung der Milieuverhältnisse begünstigt diejenigen Arten, deren Optimaltemperaturen allgemein niedriger liegen.

Kurz andauernde Temperaturerniedrigungen dürften mit Sicherheit die Selbstreinigungsleistung des Gewässers herabsetzen [19]–[23]. Hierfür gelten ebenfalls die unter 5.2 gemachten prinzipiellen Ausführungen. Die bei der Abwasserreinigung unvermeidliche Restbelastung bleibt durch die Herabsetzung der Selbstreinigungsleistung in den Gewässern länger erhalten, dieser Effekt wird allerdings teilweise durch eine Erhöhung der Individuendichte der am Abbau beteiligten Organismen ausgeglichen. Im Hinblick auf eine zunehmende Nutzung der Oberflächengewässer zur Gewinnung von Trink- und Betriebswasser kann eine Temperaturerniedrigung wegen des Vorhandenseins noch nicht abgebauter Stoffe durchaus nachteilig wirken.

Eine Nutzung der Wärmeinhalte wäre u.U. dort wünschenswert, wo der Wärmeeintrag von Kraftwerken und Industrie die Kühlkapazität der Gewässer voll beansprucht. Für die Beurteilung der Wärmenutzung aus Gewässern müssen die Voraussetzungen jeweils im Einzelnen geprüft werden.

5.3.3 Auswirkungen bei der Nutzung von Abwasser

Als Alternative zu der Nutzung natürlicher Wärmequellen (Grund- und Oberflächenwasser, Luft und Erdreich) als Energiequelle für Wärmepumpen wird vielfach die Nutzung der im kommunalen Abwasser enthaltenen Wärme genannt. Bisher beschränkten sich die Vorhaben jedoch fast ausschließlich auf kleinere Einheiten für Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie öffentliche Gebäude und Schwimmbäder. Da die dabei entzogene Wärme die Temperatur des gesamten kommunalen Abwassers nur unwesentlich beeinflusst, sind durch vereinzelte Anlagen dieser Art sicherlich keine Auswirkungen auf den Klärprozeß zu erwarten.

Eine Versuchsanlage zur Wärmerückgewinnung aus Haushaltsabwässern ist im Dezember 1976 in einem Siebenfamilien-Wohnhaus in Essen in Betrieb genommen worden.

Die Wärme der Abwässer aus Küche und Bad wurde dabei für die Brauchwasserbereitung genutzt. (Die WC-Abwässer werden über eine eigene Leitung unmittelbar in die Kanalisation geführt). Die Wärmepumpe entzieht dem aufgefangenen Abwasser Wärme und gibt sie an das Brauchwasser weiter. Ausreichend dimensionierte Speicher machen den Betrieb der Wärmepumpe von unterschiedlichem Abwasseranfall und von Bedarfsspitzen bei der Brauchwasserversorgung unabhängig [24] (s. Bild 5.3.3.1 u. 5.3.3.2).

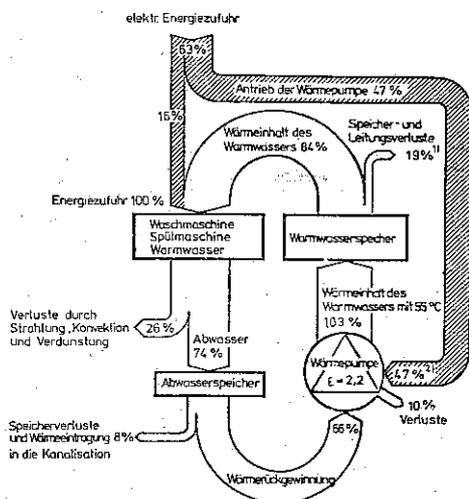


Bild 5.3.3.1 Energieflußbild bei der Wärmerückgewinnung aus Haushaltsabwässern [42]

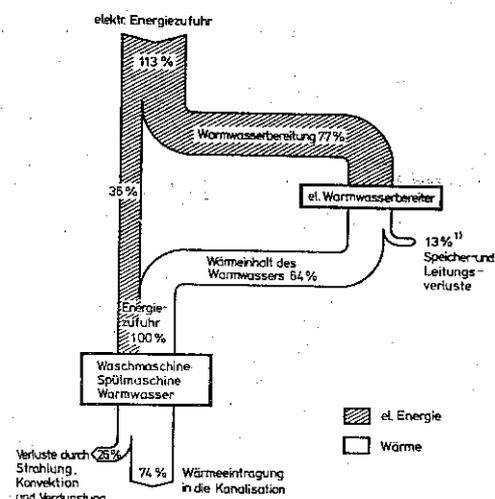


Bild 5.3.3.2 Energieflußbild bei der elektrischen Warmwasserbereitung [42]

Bei massivem Einsatz solcher „Hausanlagen“ sowie bei der bereits im Gespräch befindlichen Wärmeversorgung von Großverbrauchern bzw. ganzer Stadtteile durch Entzug von Wärme aus dem Abwasser muß jedoch mit einer merklichen Absenkung der auf der Kläranlage anfallenden Abwassertemperatur gerechnet werden. In der Diskussion sind Wärmepumpenleistungen im MW-Bereich und Temperaturabsenkungen im Abwassersammler um bis zu 5 K [39]. Da aber zwischen Temperatur und biologischer Abbaugeschwindigkeit entsprechend Bild 5.3.3.3 theoretisch ein enger Zusammenhang besteht, sollte eine Beeinflussung des Klärprozesses berücksichtigt werden.

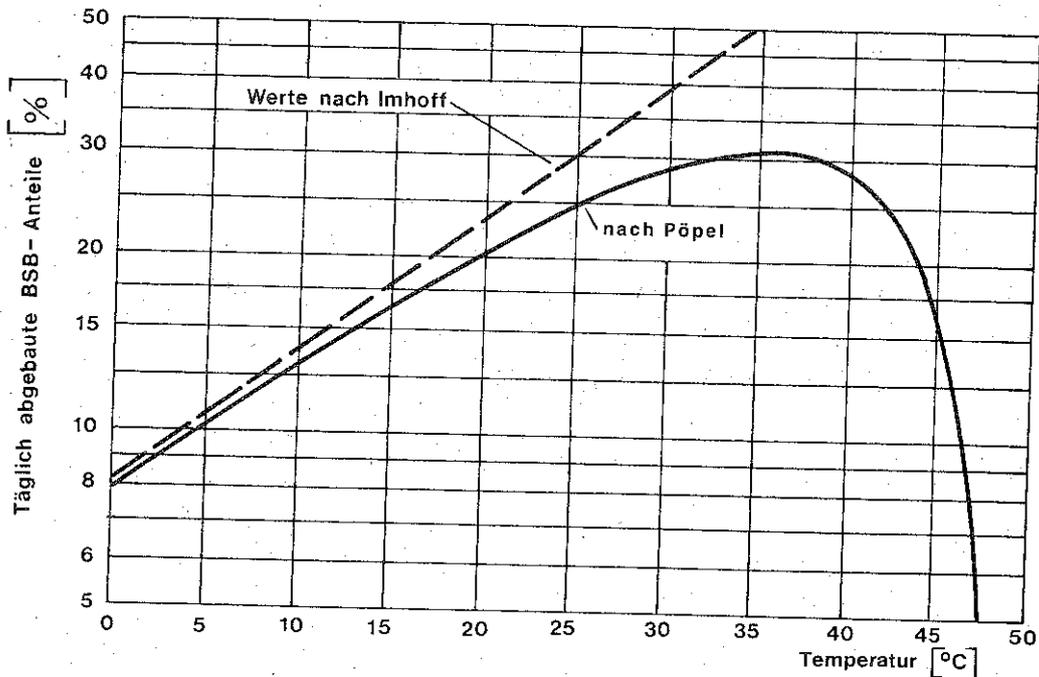


Bild 5.3.3.3 Die bei verschiedenen Temperaturen täglich theoretisch abgebauten BSB-Anteile

Dem Einfluß der Temperatur auf den biochemischen Umsatzprozeß in Kläranlagen ist außerhalb der Wissenschaft wenig Bedeutung geschenkt worden. Lediglich auf Anlagen, die bei „normalem“ Winterbetrieb offensichtliche Beeinträchtigungen zeigen, wie z.B. bei Tropfkörperanlagen und Anlagen mit getrennt aerober Schlammstabilisierung, wird der Einfluß niedriger Temperaturen im Winter manchmal berücksichtigt. Daß man den niedrigen Temperaturen in Belebungsanlagen bisher wenig Bedeutung schenkte, obwohl man weiß, daß nach dem Gesetz von Arrhenius die biologische Aktivität des Abwassers sich bei 10 K Temperaturänderung um den Faktor 2 verschiebt, liegt an den Ergebnissen der Praxis, die einen relativ „geringen Einfluß der Temperatur auf den Reinigungsprozeß von häuslichem Abwasser erkennen lassen“ [24].

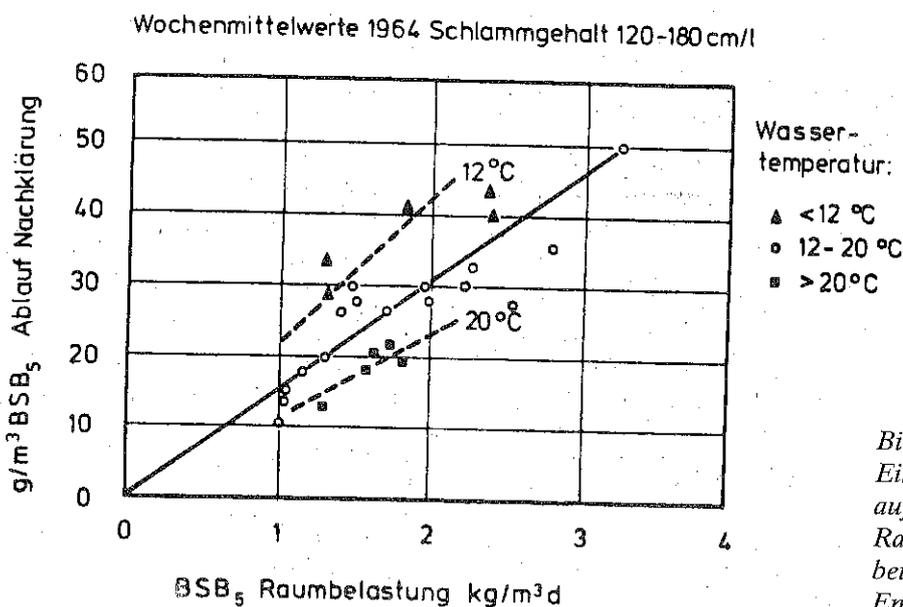


Bild 5.3.3.4 Einfluß der Temperatur auf das Verhältnis zwischen Raumbelastung und BSB₅-Abnahme bei Versuchen zum Bau der Emschermündungskläranlage [26]

Dies gilt besonders für Anlagen mit geringer Schlammbelastung, was auf die relativ schwach ausgeprägte Temperaturabhängigkeit der endogenen Atmung zurückgeführt wird. VIEHL [25] führt den geringen Einfluß milderer Prozeßtemperaturen darauf zurück, daß das Absinken der Abwassertemperatur nicht plötzlich erfolgt, sondern daß der Belebtschlamm sich an die niedrigen Temperaturen anpassen kann. Lediglich bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt (3 °C) hat VIEHL eine stärkere Abnahme der Abbaugeschwindigkeit festgestellt. Dies ist verständlich, da hier die Tätigkeit der Bakterien und Protozoen zum Erliegen kommt und eine Eliminierung der Abwasserinhaltsstoffe nur noch überwiegend adsorptiv erfolgen kann. Bei Tropfkörpern ist eine merkliche Beeinflussung schon bei Temperaturen um 10 °C zu erwarten, da hier bereits die Aktivitäten der am Abbau beteiligten vielzelligen Organismen wie z.B. Insektenlarven und Würmer erliegen [24].

Einen größeren Einfluß der Abwassertemperaturen auf den Reinigungseffekt von Belebungsanlagen hat KNOP [26] bei seinen Untersuchungen in der Großversuchsanlage zum Bau der Flußkläranlage Emschermündung festgestellt. Aus Bild 5.3.3.4 ist ersichtlich, daß der Ablauf der Nachklärung bei 12 °C einen doppelt so hohen Gehalt an biologisch abbaubaren Stoffen (gemessen als BSB₅) aufweist wie bei 20 °C.

Diese Größenordnung fand auch KIENZLE [27] beim Betrieb eines Versuchsoxidationsgrabens in Stuttgart-Büsnau. Dort war festzustellen, daß bei Temperaturen über 10 °C Ablaufwerte von < 10 mg BSB₅/l erreicht wurden, während bei Temperaturen unter 10 °C der Ablauf 10–25 mg BSB₅/l erreichte.

Auch MÜLLER-NEUHAUS [30] weist auf den erheblichen Einfluß der Prozeßtemperatur auf die getrennte aerobe Schlammstabilisierung hin. Die von ihm gefundene Abhängigkeit der erforderlichen Stabilisierungszeit von der Prozeßtemperatur ist in der Tabelle 5.3.3 dargestellt.

Tabelle 5.3.3

Prozeßtemperatur °C	5	10	15	20	25	30	35
erf. Stabilisierungszeit d	28	17	11	7,7	5,5	4,0	3,2

In der Literatur wird an vielen Stellen berichtet, daß die Stickstoffoxidation bei niederen Temperaturen zum Erliegen kommt. Dies scheint allerdings an die Aufenthaltszeit im Belebungsbecken gekoppelt zu sein, denn die maximale Stickstoffoxidation ist durch Verlängerung der Aufenthaltszeit zu erreichen.

Zu ähnlichen Aussagen kommen LIN und HEINKE [32] bezüglich des Gesamtwirkungsgrades von Kläranlagen. Aufgrund einer empirischen Ermittlung und der Weiterführung der Überlegungen von Arrhenius geben sie eine Beziehung an, mit der die Volumensänderung – und damit die Durchflußzeit – ermittelt werden kann, die erforderlich ist, um bei einer Änderung der Abwassertemperatur eine bestimmte Abbauleistung zu halten.

$$\frac{V_2}{V_1} = 1,06 (T_1 - T_2)$$

mit

V = Volumen des Belebungsbeckens

T = Abwassertemperatur

1, 2 = Indices für Verhältnisse vor und nach der Temperaturänderung

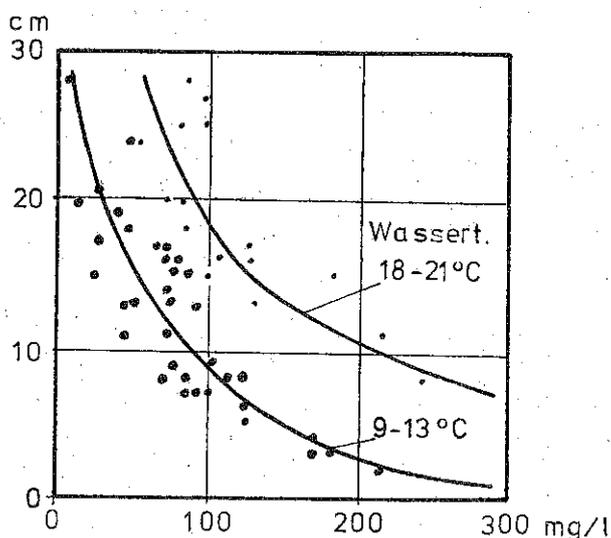


Bild 5.3.3.5
Abhängigkeit zwischen
der Durchsichtigkeit im Ablauf
der Nachklärung
und dem Schwebstoffgehalt
im Ablauf der Vorklärung [26]

Damit wird eine Berechnungsgrundlage geboten, den Einfluß massiver Wärmenutzungen aus dem Abwasser in die Planungen oder Erweiterungen von Abwasserbehandlungsanlagen einzubeziehen.

Über die Viskositätsänderung hat die Temperatur darüber hinaus Einfluß auf die Aggregations- und Sedimentationsprozesse. Da diese Prozesse letztendlich entscheidend sind für die Ablaufqualität der Kläranlage, ist ihnen ebenso besondere Bedeutung zu schenken. Einen Eindruck über den Einfluß der Temperatur auf die Aggregation und Sedimentation – hier ausgedrückt durch die Durchsichtigkeit im Ablauf der Nachklärung der Emscher-Mündung-Versuchskläranlage – gibt Bild 5.3.3.5 [26]. Es wird deutlich, daß bei gleichen Ausgangsschwebstoffgehalten, aber unterschiedlichen Temperaturen, bei hohen Abwassertemperaturen bessere Durchsichtigkeiten (und damit allgemein bessere Ablaufwerte) erzielt werden konnten als bei niederen Temperaturen.

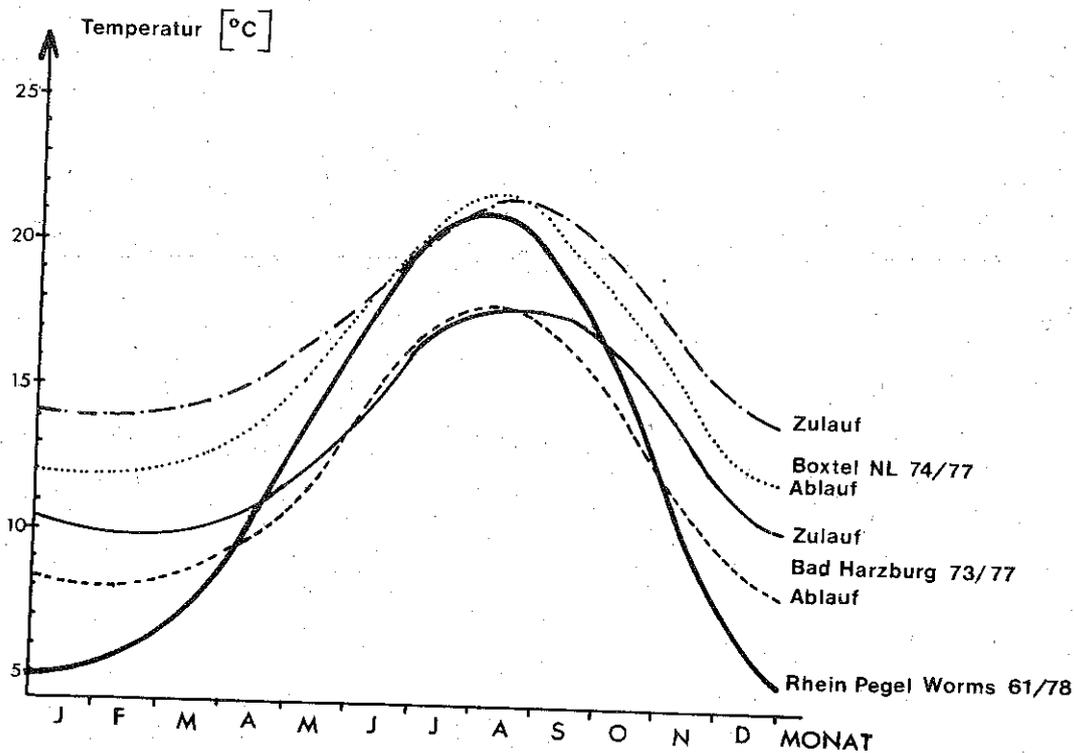


Bild 5.3.3.6 Wassertemperaturen im Zu- und Ablauf von Kläranlagen und des Rheins am Pegel Worms

Wenngleich die quantitativen Aussagen zur Temperaturabhängigkeit der Reinigungsleistungen von Kläranlagen in der Literatur widersprüchlich sind, so zeigen die zitierten Ergebnisse aus der Praxis, daß man durchaus von einer Beeinflussung der Ablaufqualität von Kläranlagen durch niedere Temperaturen ausgehen muß. Der Temperaturbereich um 10 °C scheint dabei der Grenzbereich zu sein, bei dessen Unterschreitung der Ablauf der Kläranlagen – bei Auslegung nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik – nicht mehr den Anforderungen entsprechen dürfte. Wenn man also versucht, dem Abwasser einen Teil der Wärme zu entziehen, so muß man sich vorher fragen, ob man dadurch nicht in die kritischen Bereiche kommt und eine Leistungsminderung der Kläranlage dadurch hervorruft.

In Bild 5.3.3.6 sind die Zu- und Ablauftemperaturen von zwei Kläranlagen wiedergegeben, die die Spanne der Abwassertemperaturen für mitteleuropäische Verhältnisse aufzeigen. Die Ablauftemperatur der Kläranlage Bad Harzburg unterschreitet während 4 Monaten des Jahres die 10 °C-Marke.

Die Zulauftemperatur bewegt sich während dieser Zeit schon im Bereich von 10 °C. Eine weitere Abkühlung kann hier sicherlich nicht hingenommen werden. Wenn auch der Jahresgang der Wassertemperaturen der Kläranlage Boxtel in den Niederlanden um durchschnittlich 4 K über den Temperaturen in Bad Harzburg liegt, so ist eine intensive Wärmenutzung und damit eine starke Abkühlung des Abwassers sicher auch hier nicht zu vertreten, denn die Ablauftemperaturen erreichen im Winter auch 12 °C.

Eine intensive Nutzung der Abwasserwärme vor der kommunalen Kläranlage kann daher im allgemeinen mit Rücksicht auf die Leistungsfähigkeit der Abwasserreinigung nicht befürwortet werden. Eine Nutzung der im Ablauf von Kläranlagen befindlichen Restwärme erscheint allerdings vielversprechend. Wie der in Bild 5.3.3.6 dargestellte Vergleich des Temperaturganges des Rheins am Pegel Worms mit den Wassertemperaturen von Kläranlagen deutlich macht, könnte dies erhebliche Vorteile gegenüber der Nutzung des Flußwassers bringen.

5.3.4 Auswirkungen bei der Nutzung der Erdreichwärme

Unter Erdreich wird im Zusammenhang mit Erdreichwärmepumpen die oberste Erdschicht mit einer Mächtigkeit bis zu 3 m verstanden.

Die Erdreichwärmepumpe nutzt die während des Jahres eingestrahlte und gespeicherte Sonnenenergie. Als relativ schnell regeneratives Speichersystem bietet sich das Erdreich, bei Erfüllung gewisser Randbedingungen, zum monovalenten Betrieb an. Technisch wird eine Erdreichwärmepumpe derart realisiert, daß in einem in ca. 1–2 m Tiefe verlegten Rohrsystem eine Flüssigkeit zirkuliert, die während der Bodenpassage dem Erdreich Wärme entzieht.

Die nutzbaren Wärmemengen hängen hierbei entscheidend von den thermophysikalischen Kenngrößen des Bodens und der Einstrahlungsenergie ab. Vereinfachend läßt sich dieses Speichersystem in drei relevante Größen einteilen:

- feste mineralische Bestandteile
- luftgefüllter Porenraum
- wassergefüllter Porenraum.

Die thermischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten bestimmen, entsprechend ihrem Anteil, die Wärmeleitfähigkeit und damit die nutzbaren Wärmemengen des Gesamtsystems. Unter den festen mineralischen Stoffen hat z.B. Quarz eine Wärmeleitfähigkeit von 8,8 W/mK, während Feldspat und andere Bodenminerale ca. 3 W/mK besitzen. Wasser hat eine Leitfähigkeit von etwa 0,58 W/mK; Luft dagegen nur 0,025 W/mK. Ähnlich verhält sich die spezifische Wärme.

Hieraus folgt unmittelbar, daß die Speichereigenschaft eines Bodens umso größer ist, je größer der Quarzanteil, je geringer der Porenanteil und je mehr der Boden mit Wasser angereichert ist.

Ein idealer Boden für den Wärmeentzug wäre deshalb ein möglichst dichtgepackter Quarzsand mit größtmöglichem Wassergehalt. Diese Bodenart kommt jedoch in der Natur nicht vor. In natürlich gewachsenen Sandböden mit einem Wassergehalt von ca. 13 % (wie er über die Wintermonate vorherrscht) beträgt die Wärmeleitfähigkeit ca. 1,5 W/mK. Lehm Böden haben infolge ihres größeren Wasserhaltevermögens eine Leitfähigkeit von ca. 2,3 W/mK, weshalb sie zur Wärmenutzung geeignet sind. In der folgenden Tabelle 5.3.4.1 sind einige bodenphysikalische Stoffgrößen von drei verschiedenen Bodenarten zusammengestellt.

	Trockendichte g/cm ³	Wassergehalt Vol. %	Volumetrische Wärme- kapazität kJ/m ³ K (cal/cm ³ K)	Wärmeleit- fähigkeit W/mK
Lehmboden	1,65	35	2847 (0,58)	2,3
Sandboden 1	1,6	13	1800,3 (0,43)	1,5
Sandboden 2	1,44	8,6	1507,2 (0,36)	0,98

Tabelle 5.3.4.1

Zur Quantifizierung der thermischen Auswirkungen wurden von NEISS [48] für obige Bodentypen die Soletemperaturen in Abhängigkeit der Verlegetiefe berechnet. Randbedingungen waren hierbei Klimadaten, der Wärmebedarf des Wohnhauses sowie das Verhältnis von Wärmetauscherfläche zur beheizten Fläche.

In Bild 5.3.4.1 sind beispielhaft einige Ergebnisse dieser Berechnungen dargestellt. Zuzufolge dieser Berechnungen fallen die Soletemperaturen bei dem Lehmboden Mitte Dezember unter 0 °C und sinken von Januar bis März auf etwa –5 °C. Bei den beiden Sandböden sind die Verhältnisse wesentlich schlechter, hier sinken die Soletemperaturen schon Mitte November unter 0 °C und erreichen im März ihren niedrigsten Wert mit –15 °C. Bei diesen grundsätzlichen Berechnungen wurde jedoch die bei Vereisung frei werdende Wärme nicht berücksichtigt. Bei der konzeptionellen Dimensionierung einer Erdreichwärmepumpenanlage wird jedoch eine Vereisung um die Wärmetauscherrohre zugelassen, da die Erstarrungswärme des Wassers ein nicht unerheblicher Beitrag zur Deckung des Gesamtwärmebedarfs ist. In den Bildern 3.4.6 und 3.4.7 ist die zeitliche Entwicklung der Vereisungszonen bei konstanter Entzugsleistungsdichte von 46 W/m² für Sand- und Lehmboden dargestellt.

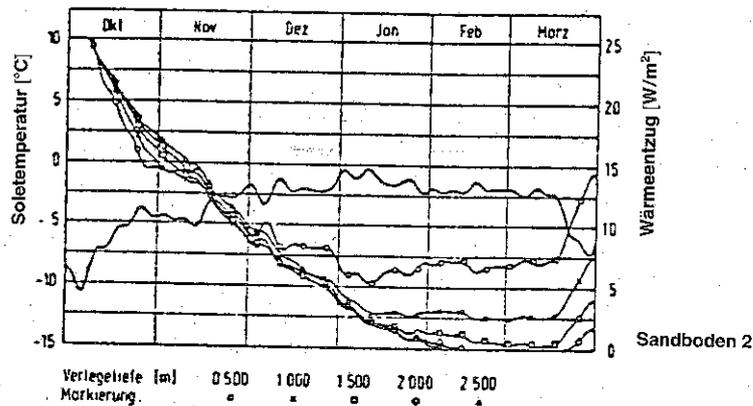
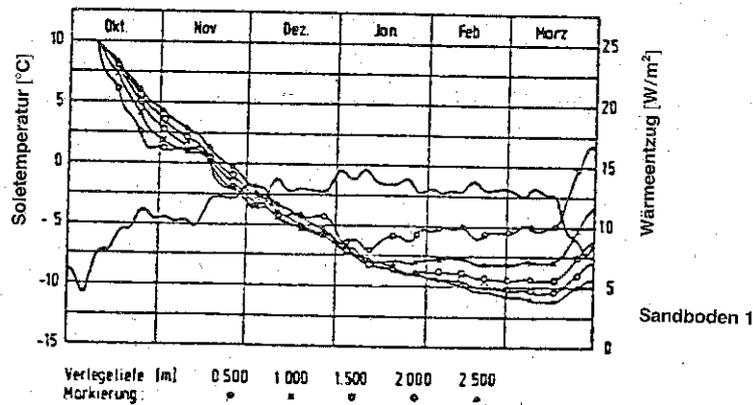
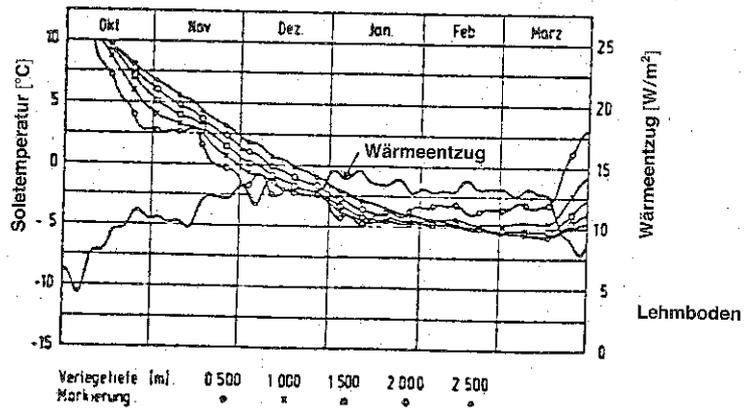


Bild 5.3.4.1 Berechnete Soletemperaturen in Abhängigkeit der Bodenart und der Verlegetiefe, NEISS [48]

Eine Vereisung der Wärmetauscherrohre ist also zunächst unbedenklich, solange gewährleistet ist, daß während der Erwärmungsphase ein Abschmelzen der Eiszonen eintritt und die Temperaturen wieder Werte wie die des ungenutzten Erdreiches annehmen. Bei hoher Entzugsleistungsdichte kann es zu einem Zusammenwachsen der Eiszonen kommen. Dies hat zur Folge, daß die Temperaturen an den Tauscherrohren stark absinken und somit die Wirtschaftlichkeit der Erdreichwärmepumpen nicht mehr gegeben ist. Messungen der Erdbodentemperatur an bestehenden Wärmepumpenanlagen haben ergeben, daß bei richtiger Verlegeart der Wärmetauscherrohre sich die Temperaturen im Entzugsbereich im Frühjahr wieder den ungestörten Bodentemperaturen angleichen.

Für den Grundwasserhaushalt kann es im Bereich der Wärmeentzugsfläche zu einer Beeinträchtigung der Sicker-spende kommen.

Durch die Abkühlung des Erdreiches wird auch der Bodenwassergehalt im Entzugsvolumen abgekühlt. Dies hat zur Folge, daß die Viskosität des Wassers erniedrigt wird und somit die Sickerungsgeschwindigkeit geringer wird. Der abgekühlte Bereich bildet dann für das Sickerwasser eine Zone verminderter Durchlässigkeit. Bei Fehlen einer durchgehenden Vereisung wird dieser Effekt jedoch kaum eine Verminderung der Sickerrate bilden. Liegt jedoch eine geschlossene Vereisungszone vor, so wird der vertikale Wasserfluß gehindert. Die Folge davon wird ein erhöhter Wassergehalt im Bereich der oberen Bodenschichten sein, der bis zur Vernässung führen kann. Für die großräumige Grundwasserbilanzierung sind diese lokalen Grundwasserneubildungsminderungen jedoch nicht von Bedeutung, zumal die totale Vereisung der Wärmeentzugsfläche vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe nicht anzustreben ist. Ergebnisse der Untersuchungen über den Wasserhaushalt der ungesättigten Zone im Bereich von Erdreichwärmepumpenanlagen liegen noch nicht vor.

Der Boden bildet mit Flora und Fauna ein Ökosystem, dessen Entwicklung von der Bodentemperatur und vom Bodenwassergehalt mitbeeinflusst wird. Der Abbau organischer Substanzen durch Mikroorganismen wird z.B. von der Temperatur beeinflusst. SCHRÖDTER [49] stellte einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Wassergehalt einerseits und der Nitrifikation andererseits im oberen Bereich eines vegetationsfreien Bodens fest. Danach bleibt der Nitratwert unter winterlichen Verhältnissen konstant, d.h. die mikrobiellen Umsetzungen ruhen weitestgehend. Mit steigender Bodentemperatur steigt auch der Nitratstickstoffgehalt an, wobei eine signifikante Zunahme ab etwa 5 °C festgestellt wurde. Bei konstanter Temperatur und zunehmender Bodenfeuchtigkeit wurde ebenfalls eine Nitratzunahme bis etwa Feldkapazität festgestellt. Bei weiterer Zunahme des Wassergehaltes nimmt der Nitratstickstoffgehalt infolge des Sauerstoffmangels und damit verminderter Aktivität der Mikroorganismen wieder ab. Die Umsetzungen organischen Materials finden in den obersten Bodenschichten statt. Dort ist die Mehrzahl der Bodenorganismen zu finden (s. Tabelle 5.3.4.2 über die Verteilung von Mikroorganismen in den verschiedenen Bodenhorizonten).

Horizont	Tiefe in cm	Mikroorganismen/g Boden x 10 ³				
		Aerobe Bakterien	Anaerobe Bakterien	Actinomyces	Fungi	Algae
A ₁	3–8	7800	1950	2080	119	25
A ₂	20–25	1800	379	245	50	5
A ₂ –B ₁	35–40	472	98	49	14	0,5
B ₁	65–75	10	1	5	6	0,1
B ₂	135–145	1	0,4	—	3	—

Tabelle 5.3.4.2

Die Häufigkeit sämtlicher Mikroorganismen nimmt also mit zunehmender Tiefe deutlich ab.

Während der Vegetationsperiode ist in diesen Bodenschichten keine oder nur eine geringfügige Abkühlung gegenüber einer Vergleichsfläche gegeben, so daß nach heutigem Kenntnisstand keine Beeinflussung zu erwarten ist.

Bodenorganismen unterliegen den täglichen und jährlichen Temperaturschwankungen. Eine gute Anpassungsfähigkeit gegenüber Temperaturschwankungen und Bodenfrost ist deshalb gegeben.

Die Größe einer evtl. Ertragsminderung landwirtschaftlich und gartenbaulich genutzter Flächen hängt von der Größe und der Dauer der Temperaturerniedrigung ab. REINKEN [47] berichtet über Ergebnisse ganzjährig beheizter landwirtschaftlich genutzter Flächen mittels Kraftwerksabwärme. Hierbei hat sich eine Temperaturerhöhung der Wurzelwerkzone von 4–6 °C bei zahlreichen Kulturen als ertragssteigernd ausgewirkt. In Umkehrung dieser Ergebnisse kann man schließen, daß sich eine Temperaturerniedrigung der oberen Bodenschichten ertragsmindernd auf landwirtschaftliche Kulturen auswirken kann.

Die bisher vorliegenden Berichte über die Beeinflussung einer Temperaturerniedrigung auf das Bodenökosystem einerseits und die Änderung der Grundwasserneubildungsrate andererseits lassen den Schluß zu, daß bei sachgerechter Verlegung der Wärmetauscherrohre keine feststellbare nachteilige Veränderung der Boden- und Grundwasserbeschaffenheit zu erwarten ist.

Da bei den meist tiefreichenden vertikalen Erdsonden verschiedene Grundwasserstockwerke durchstoßen werden können, sind die baulichen Maßnahmen nach den allgemein anerkannten Regeln der Brunnenbautechnik auszuführen. Besonderer Wert kommt hierbei der Abdichtung der jeweiligen Grundwasserstockwerke gegeneinander zu.

5.3.5 Auswirkungen bei der Nutzung von Trinkwasser

Im Rahmen der Energienutzung aus den verschiedensten Medien ist auch die Nutzung des Wärmeinhalts des Trinkwassers wie auch des zum Trinkwasserdargebot bereitgestellten Rohwassers angeregt worden.

In Hausanschlußleitungen würden Wärmepumpenanlagen mit anschließender Rückführung des abgekühlten Wassers in die Leitung den technischen Regeln (DIN 1988 „Trinkwasser-Leitungsanlagen in Grundstücken; technische Bestimmungen für Bau und Betrieb“ Abschnitte 8.1.2 und 8.5.1) widersprechen. Ebenso kann es den kommunalen Entwässerungssatzungen und würde es den allgemein anerkannten Regeln der Technik widersprechen, wenn das abgekühlte Wasser der Ortskanalisation zugeführt würde, da dieses Verfahren zu einer unerwünschten Temperatursenkung und Verdünnung im Abwasser führt. Im übrigen können auch die Satzungen der Wasserversorgungsunternehmen einer derartigen Nutzung des Trinkwassers entgegenstehen.

Anders liegen dagegen die Verhältnisse der Wasserversorgungsunternehmen, denen die Möglichkeit der Wasserwärmenutzung durchaus, wenn auch mit Einschränkungen, zugestanden werden kann. Denkbar – auch schon realisiert – sind solche Fälle, bei denen mit höheren Temperaturen anfallendes Rohwasser, vornehmlich Uferfiltrat, mittels Wärmepumpen auf ein niedriges Temperaturniveau gebracht wird.

Es dürfte sich aus allgemein hygienischen Gründen von selbst verstehen, daß in derartigen Fällen nur solche Systeme und Arbeitsmittel der Wärmepumpen zum Einsatz kommen, die keine Gefährdung des der Bevölkerung dargebotenen Wassers besorgen lassen (z.B. Tertiärwärmetauscher). Je nach Länge des Versorgungsnetzes können Temperaturminderungen angesichts der Wiedererwärmung in den im Erdreich verlegten Rohrleitungen in Kauf genommen werden.

Es bedarf des besonderen Hinweises, daß alle in diesem Zusammenhang durchgeführten oder durchzuführenden Maßnahmen die Bestimmungen nach § 11 Abs. 1 Bundesseuchengesetz vom 18. Dezember 1979 (BGBl. IS. 2262) erfüllen müssen und insoweit die zuständige Gesundheitsbehörde eingeschaltet werden muß.

6. Hinweise für die wasserrechtliche Prüfung von Anlagen zur Nutzung der Wasser-, Boden- und Abwasserwärme

6.1 Einführung

Soweit mit Errichtung und Betrieb einer Anlage zur Nutzung der Wasser-, Boden- oder Abwasserwärme die Benutzung eines Gewässers verbunden ist, bedarf sie grundsätzlich der behördlichen Gestattung (Erlaubnis oder Bewilligung, § 2 Abs. 1 WHG). Bei Wärmepumpenanlagen kommt dabei in aller Regel nur die Erteilung einer Erlaubnis nach § 7 WHG in Betracht (vgl. § 8 Abs. 2 Satz 2 WHG).

6.2 Wasserrechtliche Beurteilung der verschiedenen Arten von Wärmepumpen

Die Verwendung von Kältemitteln und Frostschutzmitteln als Betriebsmittel der Wärmepumpenanlage fällt nicht unter §§ 19 g ff WHG. Bei im Boden verlegten Rohrleitungen zur Entnahme von Erdwärme können jedoch Einzelanordnungen auf §§ 26 Abs. 2 Satz 2, 34 Abs. 2 Satz 2 WHG in Verbindung mit den jeweiligen Regelungen des Landesrechts gestützt werden.

Die verschiedenen Arten der Gewässerbenutzungen im Zusammenhang mit Errichtung und Betrieb einer Wärmepumpe sind wie folgt rechtlich zu beurteilen:

6.2.1 Entnahme von Grundwasser und Wiedereinleiten in das Grundwasser:

Die Entnahme von Grundwasser stellt eine Benutzung im Sinne des § 3 Abs. 1 Nr. 6 WHG dar. Sie ist nach § 2 Abs. 1 WHG gestattungspflichtig. Eine gestattungsfreie Benutzung nach § 33 Abs. 1 WHG liegt nicht vor.

Das Wiedereinleiten von abgekühltem Wasser in das Grundwasser ist ebenfalls eine erlaubnispflichtige Benutzung nach § 3 Abs. 1 Nr. 5 WHG.

6.2.2 Entnahme von Grundwasser und Einleiten in ein oberirdisches Gewässer:

Für die Entnahme des Grundwassers gilt das oben unter 6.2.1 Gesagte. Das Wiedereinleiten des Grundwassers in ein oberirdisches Gewässer ist eine Benutzung nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 WHG. Die Benutzung ist erlaubnispflichtig, § 2 Abs. 1 WHG.

In den seltenen Fällen, in denen auf Grund besonderer wasserwirtschaftlicher Verhältnisse durch das Einleiten des abgekühlten Wassers andere nicht beeinträchtigt werden, keine nachteiligen Veränderungen der Eigenschaften des Wassers und keine andere Beeinträchtigung des Wasserhaushaltes zu erwarten sind, kann – soweit er nicht landesrechtlich ausgeschlossen ist – ein Eigentümergebrauch oder – soweit er landesrechtlich zugelassen ist – ein Anliegergebrauch nach § 24 Abs. 1 und 2 WHG vorliegen.

Grundsätzlich ist jedoch die Wiedereinleitung des entnommenen Grundwassers in den Grundwasserleiter zu fordern. Die hier genannte Variante der Gewässerbenutzung sollte deswegen nur in begründeten Einzelfällen zugelassen werden (s. 3.2).

6.2.3 Entnahme von Wasser aus einem oberirdischen Gewässer und Wiedereinleiten in ein oberirdisches Gewässer:

Das Entnehmen von Wasser stellt eine Benutzung nach § 3 Abs. 1 Nr. 1 WHG, das Wiedereinleiten des abgekühlten Wassers eine Benutzung nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 WHG dar. In Fällen, in denen durch das Entnehmen und Wiedereinleiten von Wasser andere nicht beeinträchtigt werden, keine nachteilige Veränderung der Eigenschaft des Wassers, keine wesentliche Verminderung der Wasserführung und keine andere Beeinträchtigung des Wasserhaushalts zu erwarten ist, kann nach Maßgabe des Landesrechts ein Eigentümer- und Anliegergebrauch, § 24 Abs. 1–3 WHG, vorliegen.

6.2.4 Entzug von Wärme aus dem Grundwasser durch einen Wärmeentzugspol:

Es liegt eine erlaubnispflichtige Benutzung nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG vor.

6.2.5 Entzug von Wärme aus einem oberirdischen Gewässer durch einen Wärmeentzugspol:

Es ist zu prüfen, ob die durch das Einbringen des Wärmeentzugspols (Rohrschlangen oder anderer Einrichtungen am oder im Gewässerbett zum Wärmeaustausch) gegebene Benutzung nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 WHG gestattungspflichtig nach § 2 Abs. 1 WHG (in Verbindung mit landesrechtlichen Vorschriften) oder unter den Voraussetzungen des § 24 WHG gestattungsfrei ist. In diesen Fällen kann jedoch das Einbringen von Rohrschlangen u.ä. im und am Gewässerbett nach Maßgabe der Landeswassergesetze genehmigungspflichtig sein.

Daneben kann auch eine Benutzung nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG vorliegen, wenn der Wärmeentzug geeignet ist, schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen (z.B. Verminderung der Selbstreinigungskraft des Gewässers, erhöhte Vereisungsgefahr).

6.2.6 Entzug von Wärme aus dem Boden durch im Boden verlegte Rohrleitungen oder Erdwärmesonden:

Es ist in jedem Einzelfall zu prüfen, ob eine Benutzung nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG vorliegt (Eindringen in grundwasserführende Schichten). Maßgebend ist dabei der Grad einer möglichen Grundwassergefährdung. Beeinträchtigungen der Grundwasserströmung oder Versickerungsmöglichkeit von Oberflächenwasser können sich durch den während einer längeren Zeit der Heizperiode auftretenden „Permafrost“ im bodennahen Bereich ergeben.

6.2.7 Entzug von Wärme aus dem Abwasser:

Für die Verwendung von Abwasser als Wärmeträger sind die kommunalen Abwassersatzungen maßgebend. Soweit das Abwasser nicht in den natürlichen Gewässerkreislauf zurückgeleitet ist, ist das Wasserrecht (WHG und Landeswassergesetze) nicht anwendbar. Nachdem jedoch im Rahmen der wasserrechtlichen Einleitungserlaubnis für das Abwasser Vorschriften über die Temperatur des einzuleitenden Abwassers gemacht werden, können sich daraus mittelbar Zulässigkeitsfragen im Rahmen der Prüfung nach den kommunalen Abwassersatzungen ergeben.

6.3 Kriterien für die Beurteilung von Wärmepumpenanlagen aus wasserwirtschaftlicher Sicht

6.3.1 Allgemeines

Die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser hat Vorrang vor Maßnahmen der Energieeinsparung. In Trinkwasserschutzgebieten sind Gewässerbenutzungen im Zusammenhang mit dem Betrieb von Wärmepumpen deshalb unzulässig; in der Schutzzone III B können jedoch nach den jeweiligen Gegebenheiten Ausnahmen zugelassen werden. Wegen der Gefahr des Leckwerdens sowie Beschädigung schützender Deckschichten und der dadurch möglichen Verunreinigung des Grundwassers sind in Wasserschutzgebieten – ausgenommen Schutzzone III B – auch solche Wärmepumpenanlagen unzulässig, die ohne ein Gewässer zu benutzen dem Erdreich Wärme entziehen (vgl. 6.2.6). Wegen des vorrangigen Schutzzwecks von Heilquellenschutzgebieten sind auch dort in den Schutzzonen I–III Wärmepumpenanlagen im Zusammenhang mit Gewässerbenutzungen in der Regel unzulässig.

Wärmepumpenanlagen dürfen wegen der Möglichkeit des Leckwerdens grundsätzlich nicht mit wassergefährdenden Kältemitteln betrieben werden. Daneben sind Vorkehrungen zu treffen, die bei Beschädigung oder Undichtwerden den Austritt von Kältemitteln aus Rohrleitungen und Wärmetauschern verhindern und Leckagen anzeigen. Müssen Ammoniak oder Schwefeldioxid als Kältemittel eingesetzt werden, sind zusätzliche Schutzmaßnahmen wie Tertiärwärmetauscher oder Druckbarrieren erforderlich.

Soweit mehrere Wärmepumpenanlagen mit Gewässerbenutzungen in engem örtlichen Zusammenhang errichtet werden sollen (z.B. Reihenhaussiedlung), ist auf eine gemeinsame Entnahme- und Rückgabereinrichtung für das genutzte Wasser hinzuwirken.

Dem benutzten Wasser dürfen keine Chemikalien zugegeben werden.

6.3.2 Wärmequelle Grundwasser

Beim Betrieb von Wärmepumpen im Zusammenhang mit Grundwasserbenutzungen (vgl. 6.2.1, 6.2.2 und 6.2.4) sind nachteilige Veränderungen der biologischen oder chemischen Grundwasserbeschaffenheit bei einer Abkühlung des genutzten Wassers um max. 5 K bis zu einer Temperatur von 4–5 °C im unbelasteten Grundwasser nicht zu erwarten.

Das durch die Wiedereinleitung des abgekühlten Wassers in den Grundwasserleiter oder durch den direkten Wärmeentzug entstehende Temperaturfeld kann bei Erreichen eines quasistationären Zustands andere Grundwasserbenutzungen im Nachbarbereich beeinträchtigen. Inwieweit die Belange betroffener Dritter zu berücksichtigen sind, richtet sich nach § 4 WHG und dem jeweiligen Landesrecht. Gegebenenfalls sind nachteilige Wirkungen für andere durch Auflagen oder Bedingungen zu verhüten oder auszugleichen.

Der Bau und Betrieb der Brunnen oder das Einbringen des Wärmeentzugspols hat so zu erfolgen, daß schädliche Verunreinigungen des Grundwassers oder eine nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften sicher verhindert werden.

Der Verockerung ist bei eisen- und manganhaltigem Grundwasser durch entsprechende bauliche und betriebliche Maßnahmen entgegenzuwirken. Das Einbringen von Chemikalien in das Grundwasser zur Brunnenregenerierung ist erlaubnispflichtig.

6.3.3 Wärmequelle Oberflächenwasser

Gegen die Verwendung von Oberflächenwasser als Wärmequelle wird im allgemeinen nichts einzuwenden sein. Abkühlungen, die das Selbstreinigungsvermögen des Gewässers merkbar herabsetzen, sind zu vermeiden.

Entnahme- und Einleitungsbauwerke sowie geschlossene Wärmeentzugssysteme sind so zu gestalten, daß die Gewässerunterhaltung nicht behindert wird. Die Belange der Schifffahrt und der Fischerei sind zu berücksichtigen. Anfallendes Rechen- und Siebgut darf nicht wieder in das Gewässer zurückgegeben werden, sondern ist entsprechend den Regelungen des Abfallrechts zu beseitigen.

6.3.4 Wärmequelle Erdreich

Die Soleleitungen sind nach Wiedereinbringen der Deckschicht durch eine Druckprobe auf ihre Dichtheit zu überprüfen. Für das System sind korrosionsbeständige Materialien zu verwenden.

6.3.5 Wärmequelle Abwasser

Die allgemeine Verwendung von Abwasser als Wärmequelle ist abzulehnen; in Einzelfällen oder im Ablauf von Kläranlagen aber durchaus erwägenswert.

6.3.6 Wärmequelle Trinkwasser

Maßgeblich sind hier die kommunalen Satzungen.

6.4 Wasserrechtliches Verfahren

6.4.1 Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis

Eine wasserrechtliche Erlaubnis für Gewässerbenutzungen wird nur auf Antrag hin erteilt. Dem Antrag sind die für die Beurteilung der Auswirkungen der Gewässerbenutzung notwendigen Pläne und Beilagen beizufügen.

6.4.2 Antragsunterlagen

Der Umfang der notwendigen Pläne und Beilagen richtet sich nach der wasserwirtschaftlichen Bedeutung des Vorhabens im jeweiligen Einzelfall.

Bei Gewässerbenutzungen von geringer wasserwirtschaftlicher Bedeutung, insbesondere bei Wärmepumpen, die der Versorgung von Einfamilienhäusern mit Wärme dienen, soll je nach der Lage des Einzelfalls auf einzelne der genannten Unterlagen verzichtet werden, soweit eine Beurteilung nach § 6 WHG möglich bleibt.

6.4.2.1 Erläuterungsbericht

Beschreibung des Vorhabens: Art, Umfang, Funktion und Betriebsweise der Anlage, zur Verwendung kommende Materialien für alle Teile der Anlage, Sicherungseinrichtungen, Meß- und Kontrolleinrichtungen (u.a. Menge und Temperatur).

Lage zu evtl. vorhandenen oder vorgesehenen Wasserschutzgebieten, Angaben über evtl. vorhandene Grundwasserentnahmen und deren Zweck im Einflußbereich der geplanten Entnahme, Angabe der Geländehöhe, des niedersten und des höchsten Grundwasserstandes (m. ü. NN).

6.4.2.2 Berechnungen

Wärmeenergiebedarf, Leistung der Wärmepumpe, mittlere und maximale Wasserentnahme (z.B. in m³/h, m³/Tag und m³/Jahr), Leistungsfähigkeit des Schluckbrunnens, Ermittlung des niedersten bzw. höchsten Grundwasserstandes bei max. Betrieb, max. Größe und Reichweite der Absenkung bzw. des Aufstaus, Abschätzung des Temperaturfeldes.

Die Kenndaten des Grundwasserleiters können im allgemeinen bei sachkundigen Stellen erfragt werden, sofern sie nicht von benachbarten Brunnen oder anderen Untersuchungen bekannt sind.

6.4.2.3 Lagepläne

Übersichtslageplan M 1 : 2500 bzw. 1 : 500 (Einordnung in den überörtlichen Raum); Auszug aus dem Liegenschaftskataster M 1 : 500 mit Eintragung der genauen Lage der Anlagenteile (Entnahme- und Schluckbrunnen, Rohrleitungen, Wärmepumpe) und mit Angabe der Anlieger (Name und Anschrift).

6.4.2.4 Konstruktionszeichnungen

Schema der Gesamtanlage mit Sicherheits-, Kontroll- und Meßeinrichtungen, Grund- und Aufriß der Brunnen und der Brunnenvorschächte mit detaillierten Angaben über Filterlänge, Filteraufbau, Ausbildung der Brunnenköpfe, Anordnung der Peilöffnungen, Pumpenanordnung, wasserdichte Abdeckung usw., Maßangaben.

6.4.3 Prüfungsumfang im wasserrechtlichen Verfahren

Der Prüfungsumfang im wasserrechtlichen Verfahren ergibt sich aus § 6 WHG. Es sind deshalb nur solche Fragen zu überprüfen, die Anlaß zur Besorgnis geben, das Wohl der Allgemeinheit könnte durch die vorgesehene Gewässerbenutzung beeinträchtigt sein. Fragen, deren Klärung allein einem optimalen Betrieb der Wärmepumpe dienen (z.B. Abstand von Entnahme- und Schluckbrunnen, ausreichende Ergiebigkeit des Grundwasserleiters für den vorgesehenen Betrieb der Wärmepumpe), sind deshalb nicht Gegenstand der Überprüfungen im wasserrechtlichen Verfahren.

Inwieweit die Belange betroffener Dritter zu berücksichtigen sind, richtet sich nach § 4 WHG und dem jeweiligen Landesrecht.

7. Muster eines Erlaubnisbescheids für Grundwasserbenutzungen im Zusammenhang mit dem Betrieb einer Wärmepumpe

Das nachstehend abgedruckte Muster kann sinngemäß auf Benutzungen anderer Gewässer im Zusammenhang mit dem Betrieb einer Wärmepumpe angewendet werden. Es ist jedoch zu beachten, daß das Muster nur Anhaltspunkte für die notwendigen Auflagen und Bedingungen enthält, die in jedem Einzelfall gesondert zu prüfen sind.

Muster

für die Erlaubnis nach § 7 WHG in Verbindung mit der jeweiligen Norm des Landesrechts zum Zutagefördern von Grundwasser/

und zur Rückleitung von Grundwasser/

und zur Einleitung zutagegeförderten Grundwassers in ein oberirdisches Gewässer für eine Wärmepumpenanlage/

zur Entnahme von Wärme aus dem Grundwasser durch eine Wärmepumpenanlage

Landratsamt den

Vollzug der Wassergesetze;

Antrag des/der auf Erteilung der wasserrechtlichen Erlaubnis/
zum Entnehmen/ Zutagefördern/ Zutageleiten/ Ableiten von Grundwasser/ und zur Rückleitung von Grundwasser/ und zur Einleitung des entnommenen/ zutagegeförderten/ zutagegeleiteten/ abgeleiteten Grundwassers in die (oberirdisches Gewässer) für eine Wärmepumpenanlage/
zur Entnahme von Wärme aus dem Grundwasser auf dem Grundstück Fl. Nr.
der Gemarkung

Das erläßt folgenden

Bescheid:

A. Erlaubnis

I. Gegenstand der Erlaubnis, Zweck und Plan der Gewässerbenutzung

1. Gegenstand der Erlaubnis

Herrn/Frau/der Gemeinde – Unternehmer(-in) wird auf seinen/ihren Antrag vom die stets widerrufliche Erlaubnis erteilt/

auf dem Grundstück Fl. Nr. der Gemarkung Grundwasser zum Betrieb einer Wärmepumpe zu entnehmen/zutagezufördern/zutagezuleiten/abzuleiten, nach Maßgabe der in Ziffer II genannten Bedingungen und Auflagen zu nutzen und wieder in das Grundwasser/und in (Gewässer Ordnung) einzuleiten (§ 3 Abs. 1 Nr. 6, § 3 Abs. 1 Nr. 5/§ 3 Abs. 1 Nr. 4 WHG)/

auf dem Grundstück Fl. Nr. der Gemarkung das Grundwasser unter Verwendung einer Wärmepumpe nach Maßgabe der in Ziffer II genannten Auflagen und Bedingungen durch Wärmeentzug in seiner physikalischen Beschaffenheit zu verändern (§ 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG).

2. Zweck der Benutzung

Die erlaubte Gewässerbenutzung dient dem Zweck, zur Heizung dem entnommenen/zutagegeleiteten/zutagegeförderten/abgeleiteten/Grundwasser Wärme zu entziehen und der Beseitigung des abgekühlten Wassers.

3. Plan

Der Benutzung liegt der aus folgenden Unterlagen bestehende Plan des nach Maßgabe der von den amtlichen Sachverständigen durch Roteintragung vorgenommenen Änderungen und Ergänzungen zugrunde:

.....
.....

Die Unterlagen sind mit dem Prüfvermerk des vom und mit dem Bescheidsvermerk des Landratsamtes vom versehen.

4. Beschreibung der Anlagen

Die Wärmepumpenanlage besteht im wesentlichen aus folgenden Bestandteilen:

- a) Anlageteile (z.B. Pumpen, Wärmepumpen, Rohrleitungen)
- b) Wasserzu- und -ableitung
- c) Brunnen, Brunnenausbau
- d) Schutzvorkehrungen bei Leckagen.

5. Betriebsmittel der Anlage (Arbeitsmittel, Sole)

II. Erlaubnisbedingungen und -auflagen

Für die erlaubte Gewässerbenutzung sind die einschlägigen Vorschriften des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) und des (Landeswassergesetz) mit den dazu ergangenen Verordnungen maßgebend. Die hiernach bestehenden Rechte, Verpflichtungen und Vorbehalte sind in den folgenden Erlaubnisbedingungen und -auflagen grundsätzlich nicht enthalten.

1. Dauer der Erlaubnis Die Erlaubnis wird bis zum erteilt.

2. Rechtsnachfolge ¹⁾

Die Erlaubnis geht mit allen Befugnissen und Pflichten auf einen anderen Unternehmer (Besitz- und Rechtsnachfolger) über, wenn die gesamten Benutzungs- und Behandlungsanlagen übertragen werden und das Landratsamt dem Rechtsübergang schriftlich zustimmt. Für Übergänge kraft Erbrecht bedarf es keiner Zustimmung.

3. Umfang der erlaubten Benutzung

3.1 Die Erlaubnis gewährt die stets widerrufliche Befugnis auf dem Grundstück Fl. Nr. der Gemarkung / max. l/sec. Grundwasser zu entnehmen, um max. °C abzukühlen und wieder in das Grundwasser/und in die (oberirdisches Gewässer) bei Fluß-km einzuleiten/das Grundwasser mittels eines Wärmetauschers um max. °C abzukühlen.

3.2 Die Temperatur des abgekühlten Wassers muß mindestens °C betragen.

3.3 Die größte abzuleitende bzw. rückzuleitende/in die einzuleitende Jahreswassermenge wird auf m³ beschränkt.

3.4 Das Wasser darf nur für den Betrieb der Wärmepumpenanlage verwendet werden (Nichttrinkwasser).

3.5 Das Wasser darf außer der Abkühlung in seiner Beschaffenheit nicht verändert werden.

4. Anzeige von Baubeginn und Bauvollzug, Bauabnahme

a) Beginn und Vollendung der Bauarbeiten sind dem und dem (Wasserwirtschaftsamt) unverzüglich anzuzeigen. Wird die Anlage in mehreren Bauabschnitten ausgeführt, so sind Beginn und Vollendung jedes Bauabschnittes anzuzeigen.

b) Die Anlagen dürfen erst nach der Bauabnahme in Betrieb genommen werden.

5. Bauausführung

a) Die Unternehmerin hat die gesamten Baumaßnahmen nach den geprüften Plänen, nach den vorgeschriebenen Bedingungen und Auflagen, ferner nach den geltenden Vorschriften und anerkannten Regeln der Technik und der Baukunst durchzuführen.

b) (soweit erforderlich, weitere technische Auflagen, z.B. für die Ausführung der Brunnen).

¹⁾ Nicht erforderlich, wenn Unternehmerin eine Gemeinde, ein Gemeindeverband, ein Zweckverband oder ein Wasser- und Bodenverband ist.

6. Betrieb und Unterhaltung der Anlagen

- 6.1 Der/Die Betreiber(in) ist für den sachgemäßen Betrieb und die vorschriftsmäßige Wartung der gesamten Anlage verantwortlich. Er/Sie hat dem einen Verantwortlichen für den Betrieb und die Wartung der Anlage zu benennen.
- 6.2 (Angabe der zur Kontrolle der Benutzungsbedingungen erforderlichen Meßgeräte und Aufzeichnungen).
- 6.3 Durch geeignete Vorrichtungen ist sicherzustellen, daß die Wärmepumpenanlage bei Kühlmittelverlust automatisch abgeschaltet wird.
In den wasserführenden Rohrleitungen der Wärmepumpenanlage dürfen keine Korrosionsschutzmittel verwendet werden (evtl. zusätzliche Angabe der Schutzvorkehrungen, die zur Abwendung einer Gewässerverunreinigung notwendig sind).

7. Anzeigepflichten

- 7.1 Jede Änderung der Anlage, der Nutzung des abgeleiteten bzw. rückgeführten/in die eingeleiteten Wassers aus der Wärmepumpenanlage oder der Betriebsmittel, insbesondere die Verwendung eines anderen Arbeitsmittels ist unverzüglich dem (Wasserwirtschaftsamt) und dem (Verwaltungsbehörde) anzuzeigen.
- 7.2 Änderungen der Betriebs- und Verfahrensweise, die den in Ziffer II.3 erlaubten Umfang der Benutzung überschreiten, sowie eine Beendigung der Benutzung sind dem und dem anzuzeigen.

8. Unterhaltung des Vorfluters

(nur bei Einleitung in ein oberirdisches Gewässer und nichtstaatseigenen Gewässern)

- a) Die Unternehmerin hat das Einleitungsbauwerk, sowie das Flußufer von m oberhalb bis m unterhalb der Einleitungsstelle zu sichern und zu unterhalten.
- b) Darüber hinaus hat sie sich an der Unterhaltung der nach Maßgabe der jeweiligen gesetzlichen Bestimmungen zu beteiligen.
9. Im unmittelbaren Bereich der Brunnen dürfen wassergefährdende Stoffe nicht gelagert, abgefüllt, umgeschlagen oder sonst wie verwendet werden.

10. Vorbehalt weiterer Auflagen

Weitere Auflagen, die sich im öffentlichen Interesse als notwendig erweisen sollen, bleiben vorbehalten.

B. Kostenentscheidung

C. Begründung:

8. Schrifttum

- [1] LORENTZEN, G. Die Wärmepumpe im Energiebild der Welt
Jahrbuch der Wärmerückgewinnung 1977/78, Vulkan-Verlag, Essen 1977
- [2] STOY, B. Sonnenenergie, Geothermische Energie, Massenanziehung, Energieverlag
Heidelberg 1976
- [3] HERZOG-Klimatechnik Technische Informationen
- [4] RICHTER, W. und
LILLICH, W. Abriß der Hydrogeologie,
Stuttgart 1975
- [5] KAPPELMEYER, O. und
HÄNEL, R. Geothermics with special reference to application,
Verlag Borntraeger, Berlin-Stuttgart 1974
- [6] Berichte des Deutschen Wetterdienstes NR 115, 1969
- [7] BALKE, K.-D. Der thermische Einfluß besiedelter Gebiete auf das Grundwasser –
dargestellt am Beispiel der Stadt Köln, gwf-wasser/abwasser 115 (1974) S. 117
- [8] Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch (DGJ). Rheingebiet einschließlich
Teile von Maas und Vechte, Abflußjahr 1970, Landesamt für Gewässerkunde
Rheinland-Pfalz, Mainz
- [9] Ergänzungsheft zu den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern Rhein-
gebiet sowie Weser-Ems-Gebiet Pegel II. Ordnung in Nordrhein-Westfalen,
Abflußjahr 1972, Landesanstalt für Wasser und Abfall Nordrhein-West-
falen, Düsseldorf
- [10] Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch-Allgemeinteil, Abflußjahr 1966/70,
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz 1975
- [11] DVGW Studie über erdverlegte Trinkwasserleitungen aus verschiedenen Werkstoffen,
Teil 2, Frankfurt 1971
- [12] BALKE, K.-D. und
WERNER, D. Der Abkühlungsvorgang bei anthropogen verursachten, positiven Temperatur-
anomalien im erdoberflächennahen Grundwasser, Zeitschrift der deutschen
Geologischen Gesellschaft, Bd. 126, S. 385, Hannover 1975
- [13] WERNER, D. und
BALKE, K.-D. Die Wärmeausbreitung in der Umgebung eines Kühlwasser-Sickerbrunnens,
gwf-wasser/abwasser 118 (1977) S. 528
- [14] FAIR und GEYER Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung, Verlag R. Oldenbourg,
München 1961
- [15] HAHN, H. H. Simulation von Filtrationsmodellen, Wasserchemie, Universität Karlsruhe,
Heft 5, Karlsruhe 1971
- [16] OKUN, D. A. A System of Bio-Precipitation of Organic Matter from Sewage.
Sewage Works J. 21, 763 (1949)
- [17] Länderarbeitsgemeinschaft Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastung von Gewässern (2. Aufl.),
Wasser (LAWA) Universitätsdruckerei und Verlag Hanns Krach, Mainz 1977
- [18] WALKER, K. F.,
HILLMANN, T. J. und
WILLIAMS, W. D. The effects of impoundments on rivers: An Australian case study,
Verh. Internat. Verein. Limnol. 20 (1978)
- [19] COUTANT, C. C. Thermal Pollution – Biological Effects (Review),
Journ. Wat. Poll. Control Fed. 43 (1971) 1292
- [20] COUTANT, C. C. Thermal effects, Journ. Wat. Poll. Control Fed. 47 (1975) 1656
- [21] KNÖPP, H. Neuere Untersuchungen über die Wirkung von Kühlwasser auf die Selbst-
reinigungseistung, Deutsche Gewässerk. Mitteilungen (Sonderheft) (1969)
- [22] MÜLLER, D. Zum Einfluß der Aufwärmung auf die mikrobiologischen Stoffumsetzungen in
Gewässern, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 19 (1975) H. 3, 76

- [23] PRECHT, H., CHRISTOPHERSEN, J., HENSEL, H. und LARCHER, W. Temperature and Life, Springer-Verlag, Berlin, New York 1973
- [24] ATV Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band II, 2. Auflage, Berlin 1975
- [25] VIEHL, K. Der Einfluß der Temperatur auf die biologische Abwasserreinigung, Gesundheitsingenieur, 1935, S. 555
- [26] KNOP, E. Die Versuche für den Bau der großen biologischen Kläranlage an der Mündung der Emscher in den Rhein, Journ. Wat. Poll. Control Fed. WPCF 38 (1966), S. 1194
- [27] KIENZLE, K. H. Der Einfluß der Temperatur auf die Reinigungsleistung und Betrieb von Oxidationsgräben, Österreichische Abwasserrundschau 1974, H. 2
- [28] SOMERS, J. A. Oxidation ditch operating during a sever winter, Research Institute for Public Health Engineering, TNO, The Hague Report A 30, 1963
- [29] LUDZACK, F. J., SCHAFFER, R. B. und ETTINGER, A. B. Temperature and feed as variables in activated sludge performance, Journ. Wat. Poll. Control Fed. WPCF, 33 (1961)
- [30] MÜLLER-NEUHAUS, G. Die getrennte aerobe Schlammstabilisierung, gwf-wasser/abwasser 112 (1971)
- [31] SEKULOV, I. ATV-Fortbildungskurs II B, 4.3.-5.3.1974, HdT Essen
- [32] LIN, K.-C. und HEINKE, G. W. Plant data analysis of temperatur significance in the activated sludge process, Journ. Wat. Poll. Control. Fed. 49, (1977) S. 286
- [33] EDWARDS, C. A. und LOFTY, J. R. Biology of Earthworms, Dhapman and Hall, London
- [34] SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL Lehrbuch der Bodenkunde, Verl. Ferd. Enke, Stuttgart, 1979
- [35] TISCHLER, W. Einführung in die Ökologie, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1976
- [36] SCHREIBER, K. F. Kontrolliertes Brennen als Pflegemaßnahme in der Brachlandbewirtschaftung, Freiburger Waldschutz-Abhandlungen, Postzoologisches Institut Band I, Heft 1, 1978
- [37] GEHREMANN, P. Wasserkunde und Elektrolytverlagerung in einem mit Wald und einem mit Wiese bestockten Boden in ebener Lage, Mitteilung Eidgenössischer Anstalt für das forstliche Versuchswesen, 52 (1976), Heft 3
- [38] DÄRR, M. Grundwasserpumpen zur Energieeinsparung und der gemeindliche Anschluß- und Benutzungszwang an Wasserleitungen, Energiewirtschaftl. Tagesfragen 26/1976
- [39] BALKE, K.-D. Die Abkühlung des Untergrundes beim Betrieb von Grundwasserwärmepumpen, Elektrowärme international, 37, (1979) S. A 243
- [40] FLORSCHÜTZ, R., HAU, E. und WIEDMANN, U. Heizwärme aus Abwärme; Energie 4/1979
- [41] Katalog wassergefährdender Flüssigkeiten, 17. Mai 1973, Anhang zur VLwF vom 14. 12. 1970
- [42] Wärmerückgewinnung aus Abwässern in Haushaltungen. Neue Möglichkeiten zum Energiesparen in Haushalten, Abwassertechnik 30 (1979) S. 28
- [43] WINNACKER, KÜCHLER Chemische Technologie Bd. 4, 3. Auflage, Handbook of Toxicology, Vol. 1, 1956

- [44] ULLMANN
Encyclopädie der Technischen Chemie, 3. Auflage 1973
- [45] GÖRIKE
Elektrowärme international, 34 (1976) S. A 129
- [46]
Wärmepumpen, Vulcan-Verlag Essen 1978
- [47] REINKEN, G. et al
Abwärmeverwertung von Kraftwerken mittels Rohrsystem zur ganzjährigen
Beheizung von Freilandböden, Wasser und Boden 10, 1978
- [48] NEISS, J. und
WINTER, E.R.F.
Erdsreich als Wärmequelle,
Elektrowärme im technischen Ausbau 35 (1977)
- [49] SCHRÖDTER, H. und
TIETJEN, C.
Statistische Betrachtungen zur Frage der Abhängigkeit der Nitrifikation von
Bodentemperatur und Bodenfeuchtigkeit, Agric. Meteorol., 9 (1971/72), S. 77