



*Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Swiss Federal Office of Energy*

Ry

Pilot- und Demonstration
Umgebungswärme, WKK

Grosswärmepumpen

Kostenermittlung und Marktsituation

ausgearbeitet durch

Stefan Roth

André Montani

Beat Hinder

Nordostschweizerische Kraftwerke, Abt. HSP

Parkstrasse 23

5401 Baden

im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

August 2000

Schlussbericht

Zusammenfassung:

In einem ersten Schritt wurden die Wärmegestehungskosten unter den heute gültigen technisch/ökonomischen Randbedingungen für die drei Heizsysteme Wärmepumpe, Öl- und Gasheizung ermittelt.

Während die Wärmekosten grosser Wasser/Wasser-Wärmepumpenanlagen sehr nahe bei den verglichenen Konkurrenzsystemen liegen, sind kleinere Anlagen streng ökonomisch gesehen zu teuer.

Aus der Sicht der Elektrizitätsversorgungsunternehmen bietet sich die Schaffung eines günstigeren unterbrechbaren Tarifes für Wärmepumpen an. Da dadurch kein Zubau neuer Kraftwerkskapazitäten notwendig ist, sieht die Ökobilanz für die Wärmepumpenheizung überragend aus. Dieser Aspekt sollte besonders auch im Marketing ausgeprägtere Beachtung finden.

Aufgrund dieser ökologischen Vorteile werden in Zukunft auch von der Gesetzgebung und den Behörden administrative Vereinfachungen sowie Fördermassnahmen erwartet.

Abstract:

In a first step the actual heating costs were calculated for three different heating systems: heat pumps, natural gas- and oil-heatings.

Whereas the heating costs of large water/water heat pump systems are close to those of competing systems, smaller heat pump systems are still too expensive as long as the consideration is strictly economical.

The utility companies should take the opportunity to introduce a more favorable rate for interruptable energy supplies. In this case there is a considerable potential where no further power plants are necessary to feed additional heat pumps. Consequently, basing on nuclear- and hydropower, the environmental impact determined by the method of life cycle assessment for heat pump systems is excellent. This aspect should be used as a marketing tool in a more extensive way.

In the future the ecological benefits and advantages over the competing systems should stronger involve legislation and authorities to promote these environmentally benign heating systems.

Dieser Bericht ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für Inhalt und Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren verantwortlich.

INHALT

1	ZIEL DER STUDIE	5
2	BESTANDESAUFNAHME UND ERFAHRUNGEN MIT BESTEHENDEN ANLAGEN	5
2.1	EINSATZGRENZEN DER GROSSWÄRMEPUMPEN	5
2.1.1	LUFT/WASSER-WÄRMEPUMPEN	5
2.1.2	SOLE/WASSER-WÄRMEPUMPEN MIT ERDWÄRMESONDEN	6
2.1.3	WASSER/WASSER-WÄRMEPUMPEN	7
2.2	UMFRAGE	8
3	WÄRMEKOSTENANALYSE	9
3.1	SYSTEMGRENZEN ALLER BETRACHTETEN HEIZSYSTEME	10
3.2	TECHNISCH-PHYSIKALISCHE MODELLBILDUNG DES WÄRMEPUMPENHEIZSYSTEMS	11
3.3	KAPITALKOSTEN EINER WÄRMEPUMPENANLAGE	13
3.4	INVESTITIONSKOSTEN EINER WÄRMEPUMPENANLAGE	13
3.4.1	MASCHINENKOSTEN	13
3.4.2	SPEICKERKOSTEN	13
3.4.3	QUELLENERSCHLIESSUNGSKOSTEN	14
3.4.4	KOSTEN FÜR DEN STROMANSCHLUSS	14
3.4.5	MASCHINENRAUMKOSTEN	14
3.4.6	ENGINEERINGAUFWAND	14
3.5	BETRIEBSKOSTEN EINER WÄRMEPUMPENANLAGE	14
3.5.1	KOSTEN FÜR ELEKTRISCHE ENERGIE	15
3.5.2	QUELLENBENÜTZUNGSKOSTEN	15
3.5.3	AUFWAND FÜR UNTERHALT, SERVICE UND BEDienung	15
3.5.4	VERSICHERUNG DER ANLAGE	15
3.6	KONKURRENZSYSTEME	15
3.6.1	KAPITALKOSTEN	15
3.6.2	INVESTITIONSKOSTEN	16
3.6.3	BETRIEBSKOSTEN	16
3.7	WÄRMEGESTEHUNGSKOSTEN	16
3.7.1	SOLE/WASSER-WÄRMEPUMPENANLAGE	16
3.7.2	WASSER/WASSER-WÄRMEPUMPENANLAGE	18
3.7.3	LUFT/WASSER-WÄRMEPUMPENANLAGE	18
3.7.4	ÖLHEIZUNG	19
3.7.5	GASHEIZUNG	19
3.7.6	SYSTEMVERGLEICH	19
4	MASSNAHMEN ZUR STEIGERUNG DES WÄRMEPUMPENANTEILS AM WÄRMEMARKT	20
4.1	VERSORGUNGSTECHNISCHE VORTEILE UNTERBRECHBARER STROMTARIFE	22
4.2	GRENZKOSTENBETRACHTUNG FÜR UNTERBRECHBARE STROMTARIFE	22
4.2.1	SOLE/WASSER-WÄRMEPUMPENANLAGE MIT EINER LEISTUNG VON 100 kW _{TH}	23
4.2.2	SOLE/WASSER-WÄRMEPUMPENANLAGE MIT EINER LEISTUNG VON 300 kW _{TH}	23
4.2.3	WASSER/WASSER-WÄRMEPUMPENANLAGE MIT EINER LEISTUNG VON 150 kW _{TH}	24

4.2.4	WASSER/WASSER-WÄRMEPUMPENANLAGE MIT EINER LEISTUNG VON 500 kW _{TH}	24
4.2.5	LUFT/WASSER-WÄRMEPUMPENANLAGE MIT EINER LEISTUNG VON 100 kW _{TH}	25
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN		26
<hr/>		
6 ANHANG		27
<hr/>		
6.1	LITERATUR	27
6.2	ZEICHENERKLÄRUNG	27
<hr/>		
7 BEILAGEN		28
<hr/>		
7.1	METHODISCHES VORGEHEN UND STANDARDBETRIEB	28
7.2	DEFINITION DER STANDARDBEDINGUNGEN, RESULTIERENDE JAZ	29
7.3	WÄRMEPUMPE MIT ERDSONDE	30
7.4	WÄRMEPUMPE MIT GRUNDWASSER	31
7.5	WÄRMEPUMPE MIT UMGEBUNGSLUFT	32
7.6	BERECHNUNG DER WÄRMEGESTEHUNGSKOSTEN FÜR EINE ÖLHEIZUNG	33
7.7	BERECHNUNG DER WÄRMEGESTEHUNGSKOSTEN FÜR EINE GASHEIZUNG	34
7.8	UNTERBRECHBARE TARIFE, 100-kW-SOLE/WASSER-ANLAGE	35
7.9	UNTERBRECHBARE TARIFE, 250-kW-SOLE/WASSER-ANLAGE	36
7.10	UNTERBRECHBARE TARIFE, 100-kW-WASSER/WASSER-ANLAGE	37
7.11	UNTERBRECHBARE TARIFE, 500-kW-WASSER/WASSER-ANLAGE	38
7.12	UNTERBRECHBARE TARIFE, 100-kW-LUFT/WASSER-ANLAGE	39

1 Ziel der Studie

Die vorliegende Studie, *Grosswärmepumpen, Kostenermittlung und Marktsituation*, hat zum Ziel, die Chancen und das Potenzial für den Einsatz von Wärmepumpen im Leistungsbereich zwischen 50 und 1'000 kW_{th} Heizleistung zu ermitteln und die v.a. von Seiten der Elektrizitätswirtschaft zu schaffenden Randbedingungen zu skizzieren, die notwendig sind, damit Grosswärmepumpen gegenüber konventionellen Heizsystemen konkurrenzfähig sein können und eine entsprechende Verbreitung stattfinden kann.

Anschliessend wird empfohlen, aufbauend auf die Ergebnisse dieser Studie, in einem weiteren Schritt ein Umsetzungsprogramm zu lancieren, welches die notwendigen Massnahmen bezüglich Informationstätigkeit und Unterstützung der potenziellen Anwender, Tarifgestaltung, usw. in die Wege leitet.

2 Bestandesaufnahme und Erfahrungen mit bestehenden Anlagen

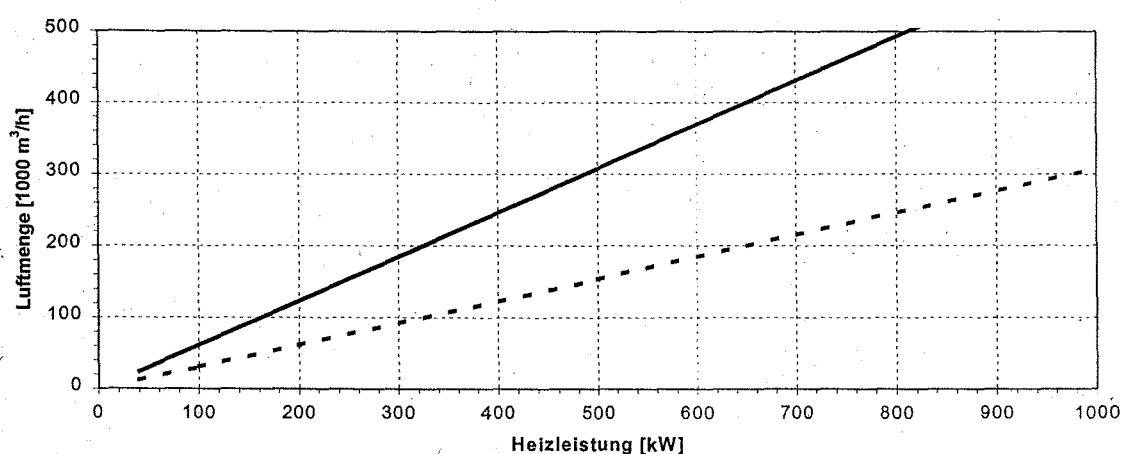
2.1 Einsatzgrenzen der Grosswärmepumpen

Die sinnvoll zu realisierende maximale Leistungsgrösse einer Wärmepumpenheizanlage ist massgeblich von der zur Verfügung stehenden Wärmequelle abhängig. In der Praxis haben sich im wesentlichen die nachfolgend beschriebenen Systeme durchgesetzt.

2.1.1 Luft/Wasser-Wärmepumpen

Der grosse Vorteil der Wärmequelle Luft ist, dass diese praktisch uneingeschränkt überall genutzt werden kann. Sie ist ohne Risiken und zudem kostengünstig zu erschliessen. Ferner darf Wärme aus der Umgebungsluft ohne Kosten und Gebühren genutzt werden.

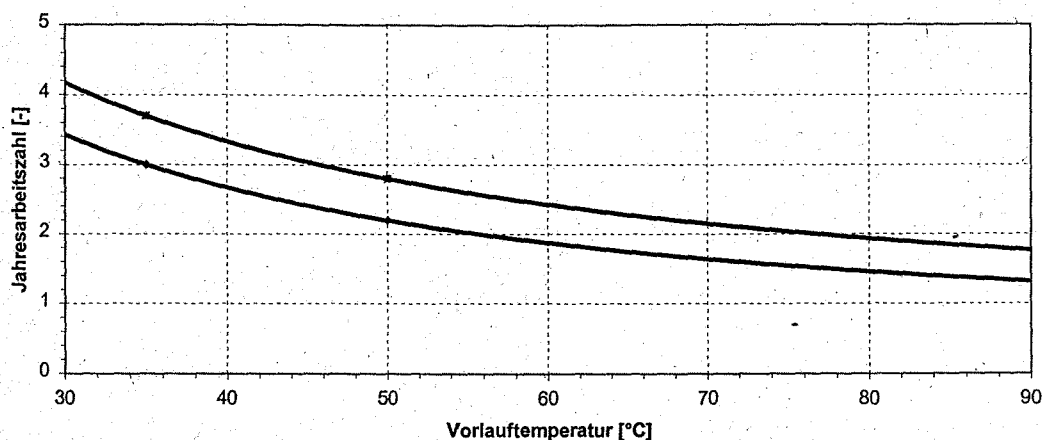
Fig. 2.1: Benötigte Luftmenge in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz für $\delta T = 3^\circ\text{C}$ (ausgezogene Linie) und $\delta T = 6^\circ\text{C}$, ohne Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit



Allerdings stehen diesen Vorteilen auch ein paar gewichtige Nachteile gegenüber. Einerseits werden die Verdampfer hin zu höheren Leistungen sehr gross, andererseits erzeugt der Luftstrom, der durch diese Wärmetauscher geführt werden muss, einen Geräuschpegel, welcher störend sein kann. Die Geräuschfrage verschärft sich naturgemäss mit der Erhöhung des Luftdurchsatzes. Das Einsatzgebiet der Luft/Wasser-Wärmepumpe ist in der Praxis auf etwa 200 kW_{th} beschränkt.

Aus den praktisch auftretenden Temperaturverhältnissen ergeben sich zudem vor al-

Fig. 2.2: Erreichbare Jahresarbeitszahlen für monovalenten (untere Linie) und bivalenten (obere Linie) Betrieb. Abschätzungen anhand der Töss-Messungen



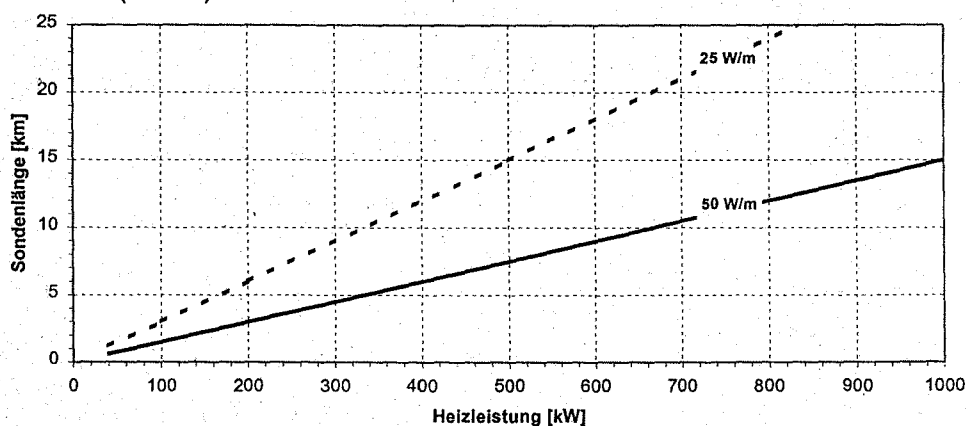
lem im monovalenten Betrieb thermodynamische Nachteile, so dass die Wirkungsgrade resp. Jahresarbeitszahlen gegenüber den Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Anlagen deutlich tiefer liegen.

Weiter ist für Luft/Wasser-Wärmepumpen sowohl für Splitt- wie auch für aussenaufgestellte Kompaktanlagen meist eine Baubewilligung notwendig.

2.1.2 Sole/Wasser-Wärmepumpen mit Erdwärmesonden

Sole/Wasser-Wärmepumpen bieten sich aufgrund der meist guten geologischen Verhältnisse und der daraus erzielbaren hohen Wirkungsgrade fast überall im schweize-

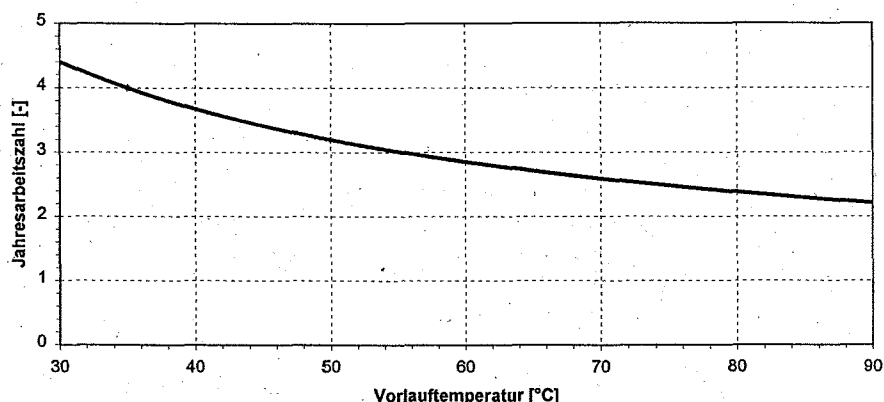
Fig. 2.3: Benötigte Sondenlänge für monovalenten (spezifische Entzugsleistung = 50 W/m) und bivalenten (25 W/m) Betrieb



rischen Mittelland an. Die Systeme sind einfach und praktisch wartungsfrei. Sonden können im Sommer zusätzlich zu Kühlzwecken eingesetzt werden.

Negativ wirken sich die erforderlichen kantonalen Bewilligungen sowie die relativ teuren Sondenbohrungen aus. Die Bohrpreise sind zudem praktisch linear zur Bohrtiefe,

Fig 2.4: Erreichbare Jahresarbeitszahlen. Abschätzungen anhand der Töss-Messungen



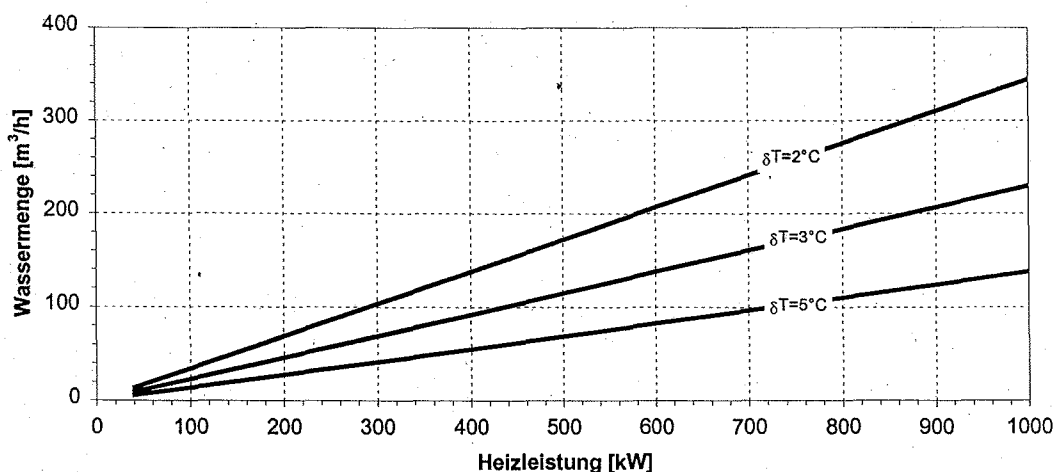
so dass sich grössere Leistungen kaum in günstigeren spezifischen Bohrpreisen niederschlagen. Werden ganze Sondenfelder erschlossen, verschlechtert sich zudem die spezifische Entzugsleistung aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung. Aus diesen Überlegungen ist auch bei Sole/Wasser-Wärmepumpenanlagen die praktische Einsetzbarkeit auf ca. 200 kW_{th} begrenzt. Mit offenen Sonden und Wasser/Wasser-Wärmepumpen sind Leistungen bis etwa 300 kW_{th} möglich.

2.1.3 Wasser/Wasser-Wärmepumpen

Geeignete Grundwasservorkommen, Flüsse oder Seen sind die Voraussetzungen für den Betrieb von Wasser/Wasser-Wärmepumpen. In Verbindung mit technischen Infrastrukturanlagen kommen weiter Trinkwasserfassungen, Abwasserreinigungsanlagen oder generell Industriekühlwasser als Wärmequelle in Frage.

Mit Wasser/Wasser-Wärmepumpen können sehr gute Wirkungsgrade realisiert werden. Die Systeme sind einfach und bei guter Wasserqualität wartungsarm. Das Wassertersystem kann im Sommer zusätzlich zu Kühlzwecken eingesetzt werden.

Fig. 2.5: Benötigte Wassermengen in Abhängigkeit der entzogenen Temperaturdifferenz

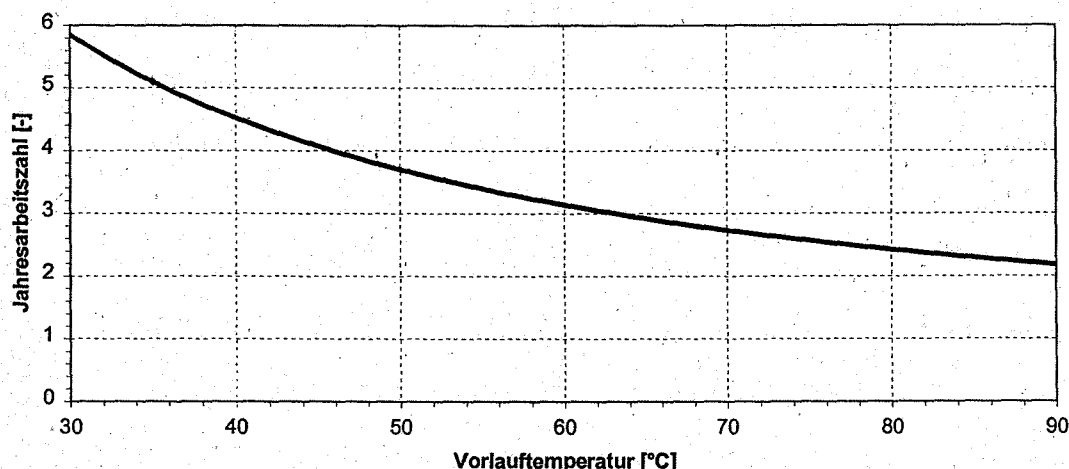


Die Erschliessung der Wärmequellen ist unter Umständen mit ein paar Risiken ver-

bunden. Zur Abklärung der Ergiebigkeit sind Pumpversuche und Abklärungen der Wasserqualität nötig. Zudem ist eine kantonale Bewilligung erforderlich, welche mit Auflagen (z.B. Verwendung eines Zwischenkreises) verbunden sein kann. Im späteren Betrieb ist zu beachten, dass je nach Kanton Gebühren für die Wassernutzung anfallen, und dass bei schlechter Wasserqualität (Algen, Wandermuscheln, Schwebeteilchen, Chemie) Betriebsstörungen auftreten können.

Leistungsmässig sind den Wasser/Wasser-Wärmepumpen nach oben kaum Grenzen

Fig. 2.6: Erreichbare Jahresarbeitszahlen. Abschätzungen anhand der Töss-Messungen



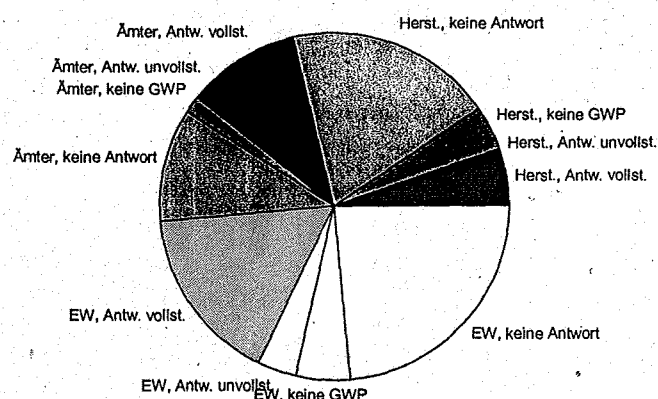
gesetzt. Es können ohne weiteres Anlagen bis 5 MW_{th} realisiert werden. Es ist dann allenfalls zu prüfen, ob anstelle einer grossen zentralen Maschine eventuell eine Kaltwasserverteilung mit mehreren kleineren dezentralen Wärmepumpen die bessere Lösung darstellt. Es liessen sich dann die thermischen Verteilverluste reduzieren und individuell an die einzelnen Verbraucher angepasste Vorlauftemperaturen ausnutzen.

2.2 Umfrage

Um für die Modellbildung möglichst realitätsbezogene Annahmen treffen zu können, wurde eine breit angelegte Umfrage bei Herstellern, Betreibern, Elektrizitätswerken und kantonalen Ämtern betreffend Daten und Informationen über installierte und geplante Grosswärmepumpenanlagen durchgeführt. Das der Umfrage zugrunde gelegte Formular war auf den Kapiteln

1. Adressen
2. Charakteristik der Anlage
3. Technische Daten von Maschine, Wärmequelle und Wärmenutzer
4. Betriebsdaten
5. Investitions-, Betriebs- und Unterhaltskosten

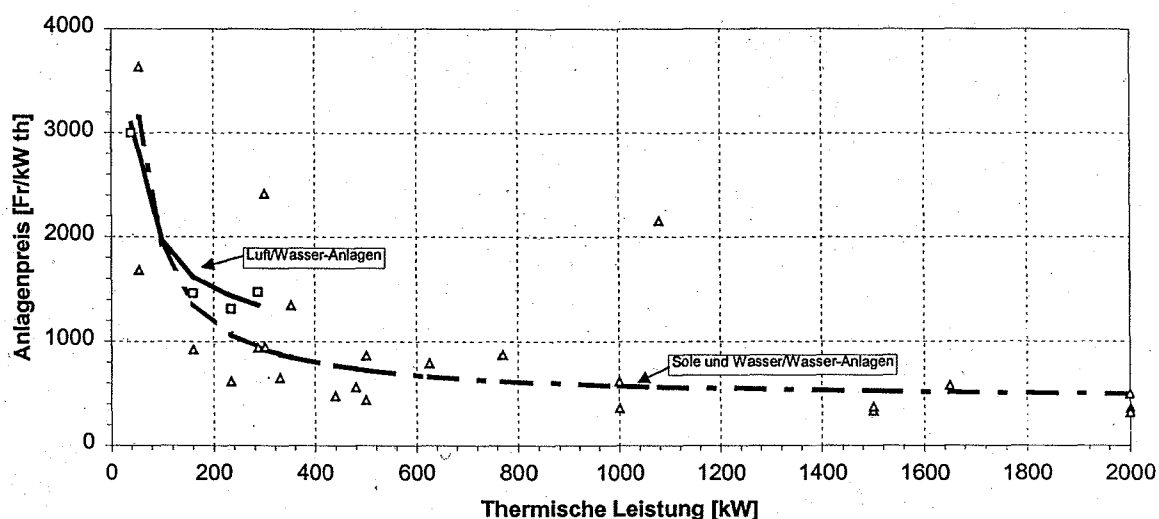
Fig. 2.7: Rücklauf der Umfrage



aufgebaut. Es wurden insgesamt 155 Stellen angefragt. Daraus gingen 33 verwertbare Antworten hervor. Insgesamt zeigte sich, dass die Befragten Mühe bekundeten, einerseits das System genau abzugrenzen, andererseits die Betriebs- und Unterhaltskosten für das isoliert betrachtete Heizungssystem zu beziffern.

Sowohl die Unsicherheiten bei der Systemabgrenzung wie auch die vielen untereinander verschiedenen Parameter innerhalb der Systeme führten zu einem breiten Streuband der Investitionskosten. Bei den Betriebs- und Unterhaltskosten waren die Anga-

Fig. 2.8: Investitionskosten von Wärmepumpenanlagen, Resultate aus der Umfrage

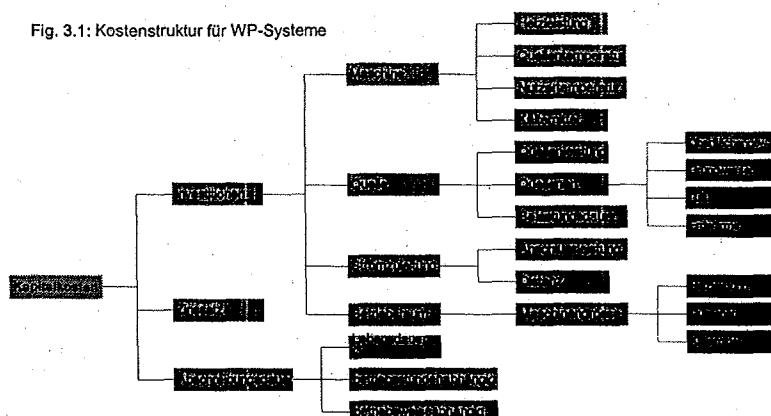


ben so unvollständig, dass eine Darstellung der Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit der Anlagengrösse nicht direkt von den Umfrageergebnissen abgeleitet werden konnte. Aus diesen Erfahrungen wurde das Vorgehen für die weitere Bearbeitung festgelegt. Die Wärmegestehungskosten wurden detailliert strukturiert. Alle Parameter wurden normiert auf einen definierten "Durchschnittsfall". Die einzelnen Umfragewerte wurden differenziert auf diese normierten Parameter umgerechnet. Alle plausiblen Informationen aus der Umfrage wurden statistisch verwertet. Gewisse aus der Umfrage schlecht reflektierte Grössen wurden theoretisch ermittelt. Dieses Vorgehen hat zur Folge, dass die einzelnen konkreten Anlagen aus der Umfrage in den weiteren Berechnungen, Tabellen und Graphiken nicht mehr explizit ersichtlich sind.

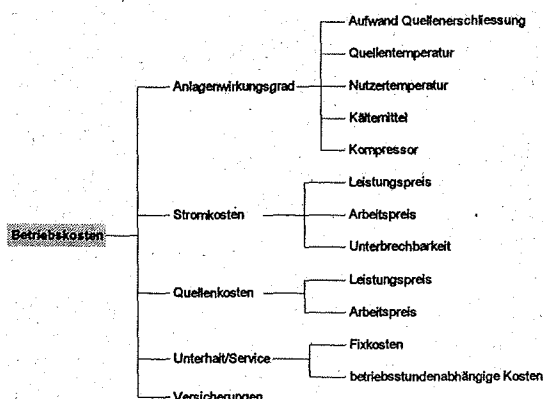
3 Wärmekostenanalyse

Mit einem einheitlichen methodischen Ansatz wurden die Wärmegestehungskosten der Systeme Wärmepumpen-, Öl- und Gasheizung berechnet. Dabei sollten die Systemgrenzen und übrigen Randbedingungen so gewählt werden, dass die Wärmekosten vorbehaltlos miteinander verglichen werden können (Beilagen 1 und 2). Der Aufwand für die Wärmeerzeugung setzt sich aus den Kosten für den Kapital-

Fig. 3.1: Kostenstruktur für WP-Systeme



dienst (Kapitalkosten) sowie aus jenen für den Betrieb und Unterhalt der Heizungsanlage zusammen. Nachfolgend werden die einzelnen in den Strukturbäumen abgebildeten Positionen (vgl. Fig. 3.1), welche schliesslich für die Berechnung der Wärmege-stehungskosten bestimmt werden müssen, beschrieben.



3.1 Systemgrenzen aller betrachteten Heizsysteme

Das System beinhaltet alle Komponenten und Gebäudeteile, welche direkt oder indirekt mit der Wärmeerzeugung zu tun haben. Es beinhaltet jedoch keine Installation zur Wärme-nutzung (Wärmeverteilsysteme, Wärmeabga-besysteme, usw.).

Fig. 3.2 Systemgrenze Luft/Wasser-Wärmepumpensystem

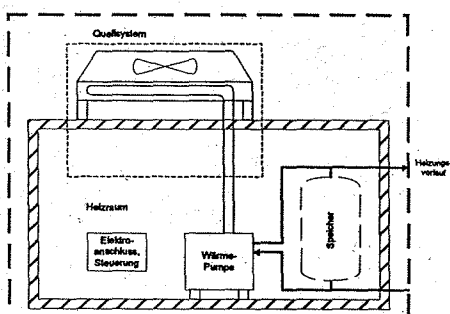


Fig. 3.3: Systemgrenze für Sole/Wasser-Wärmepumpensystem

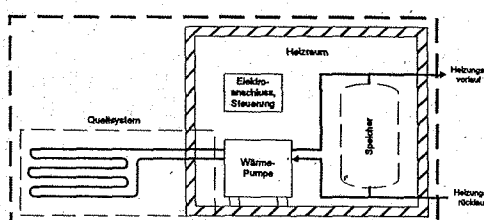


Fig. 3.4: Systemgrenze für Wasser/Wasser-Wärmepumpensystem

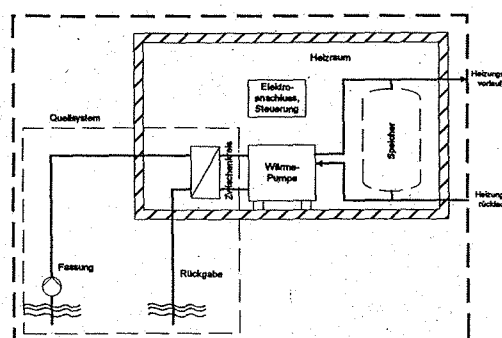


Fig. 3.5: Systemgrenze Ölheizung

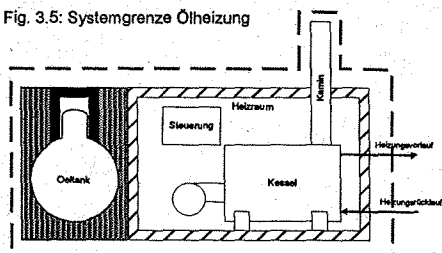
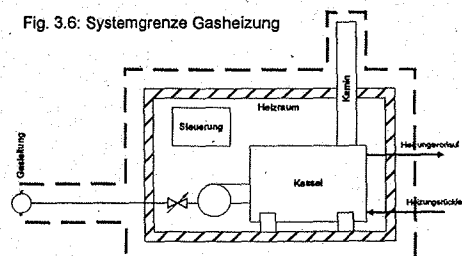


Fig. 3.6: Systemgrenze Gasheizung



(Flansch Wärmeverteilsystem) sowie die dazugehörige Steuerung und Elektroverteilung.

Das **Ölheizungssystem** beinhaltet den Heizungsraum, den erdverlegten Öltank, die hydraulische Installation bis zum Heizungsvor- und Rücklauf sowie die dazugehörige Steuerung und Elektroverteilung.

Das **Gasheizungssystem** beinhaltet den Heizungsraum, den Gasanschluss inkl. Zuleitung zum Gebäude, die hydraulische Installation bis zum Heizungsvor- und Rücklauf sowie die dazugehörige Steuerung und Elektroverteilung.

3.2 Technisch-physikalische Modellbildung des Wärmepumpenheizsystems

Der der Wärmepumpe zugrunde liegende Prozess ist der Kaltdampfprozess, welcher durch diverse thermodynamische und mechanische Parameter sowie durch die Eigenschaften des Kältemittels definiert ist. Als Basis für die nachfolgenden Berechnungen wurden **Standardparameter** definiert. In von diesen Standardparametern abweichende Fällen sind **Parametervariationsrechnungen** durchzuführen.

Verdichter

Im Leistungsbereich von 50 kW_{th} bis 5 MW_{th} finden sich vom Scroll- über den Hubkolbenverdichter bis zum Turbokompressor in hermetischer, halbhermetischer bis offener Bauweise die verschiedensten Verdichtertypen, deren Wirkungsgrade von der Bauart und von den Betriebsbedingungen abhängig sind. In den Berechnungen wurden folgende festen Wirkungsgradwerte verwendet: $\eta_K=70\%$ für Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Maschinen sowie $\eta_K=65\%$ für Luft/Wasser-Maschinen.

Kältemittel

Es wurden dem Prozess die Kältemittel R22 (Chlordifluormethan CHClF₂) und R134a (Tetrafluoräthan CH₂FCF₃) zugrunde gelegt.

Kreisprozess

Als Grundlage für die durchgeführten Berechnungen diente ein idealisierter einstufiger Kreisprozess. Das Kältemittel durchläuft dabei die folgenden vier Schritte:

1. isobare Verdampfung und anschliessende **Überhitzung von 5°C**
2. polytrope Kompression entsprechend dem oben definierten Verdichterwirkungsgrad
3. isobare Kondensation bis zur Flüssigkeitslinie
4. isenthalpe Expansion.

Leistungsziffer COP (Coefficient of Performance)

Die Leistungsziffer ist das Verhältnis zwischen der an das Heizsystem abgegebenen Wärmeleistung \dot{Q}_C und der elektrischen Leistung des Kompressors P_{el} . In dieser Studie wurde der COP anhand eines theoretischen Modells in Abhängigkeit der entsprechenden Parameter berechnet.

Heizleistung

Die Heizleistung ist in starkem Masse von der Verdampfungs- und in geringerem Masse von der Kondensationstemperatur abhängig. Für die Heizleistungsberechnung wurde vereinfachend angenommen, dass das Fördervolumen des Verdichters unter allen Betriebsbedingungen konstant sei.

Wärmeübertragung

Bei der Auslegung einer Anlage sind nicht die Verdampfungs- und Kondensations-, sondern die Quellen- und Netzvorlauftemperaturen bekannt. In der Rechnung wurde die für die Wärmeübertragung notwendige Temperaturdifferenz wie folgt angenommen:

Bei Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Maschinen ist $\Delta T_{\text{Quelle-Verdampfung}} = 8^\circ\text{C}$, bei Luft/Wasser-Maschinen ist $\Delta T_{\text{Luft-Verdampfung}} = 10^\circ\text{C}$. Wird bei Wasser/Wasser-Maschinen auf der Quellenseite ein Zwischenkreis verwendet, wird dies mit einer Reduktion der Quellentemperatur von $\Delta T_{\text{Quelle-Zwischenkreis}} = 3^\circ\text{C}$ berücksichtigt.

Auf der Seite der Wärmesenke wird für alle Typen $\Delta T_{\text{Kondensation-Heizungsvorlauf}} = 3^\circ\text{C}$ angenommen.

Bei Luft/Wasser-Maschinen wird weiter berücksichtigt, dass die Verdampfer bei Quellentemperaturen unter ca. 7°C typischerweise vereisen. Der daraus resultierende schlechtere Wärmeübergang sowie der Aufwand für die Abtauung werden pauschal mit einer **Reduktion der Verdampferleistung von 10%** berücksichtigt.

Diese Annahmen werden von den Messungen im WPZ Töss recht gut bestätigt.

Energetischer Erschliessungsaufwand der Wärmequellen

Für die Abschätzung des Erschliessungsaufwandes der verschiedenen Wärmequellen müssen diverse Annahmen getroffen werden. Die Modellrechnungen ergeben folgende Werte für den Erschliessungsaufwand:

Tab. 1: Elektrischer Erschliessungsaufwand für unterschiedliche Quellen (in %-thermischer Quellenleistung)

Maschinentyp	Quellenerschliessung	Energieaufwand
Sole/Wasser	Sonde mit $\varnothing=32$ mm	4.7%
Sole/Wasser	Sonde mit $\varnothing=40$ mm	3.4%
Wasser/Wasser	ohne Zwischenkreis	2.7%
Wasser/Wasser	mit Zwischenkreis	3.6%
Luft/Wasser	zwangsbelüfteter Verdampfer	6.0%

Temperaturwertigkeit der Wärmequellen

Die Wärmepumpe nutzt zum grössten Teil Umweltwärme aus regenerativen Quellen oder Abwärme. Die Charakteristik dieser Wärmequellen wurde für die energetische Systemanalyse ebenfalls berücksichtigt.

Die Auskühlung der Erdsonden wurde von der Firma Grundag AG mit einem Simulationsprogramm über die gesamte Sondenlebensdauer der Sonden berechnet.

Für Grundwasser- und Oberflächengewässeranlagen wurde von einer konstanten Quellentemperatur von 9°C ausgegangen.

Die Temperatur der Umgebungsluft ist sehr grossen Schwankungen unterworfen. Als

typischer Standort für das schweizerische Mittelland wurde die SMA-Station Buchs-Suhr bei Aarau ausgewählt und den Berechnungen zugrunde gelegt.

3.3 Kapitalkosten einer Wärmepumpenanlage

Die Kapitalkosten werden mittels der Annuitätenmethode ermittelt. Die Einflussgrößen sind die zu amortisierenden Investitionskosten, der Realzinssatz i sowie die Abschreibungszeit n . Der Annuitätsfaktor a berechnet sich nach folgender Formel:

$$a = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Die Abschreibungszeit, eine kalkulatorische Lebensdauer also, wird für die Berechnungen wie folgt festgelegt:

S/W und W/W-Maschinen:	15 Jahre oder 40'000 Betriebsstunden
L/W-Maschinen:	15 Jahre oder 32'000 Betriebsstunden
Quelle, Gebäude, Speicher:	30 Jahre

Es wird jeweils auf das zuerst erfüllte Kriterium (Alter oder Betriebsstunden) Bezug genommen.

Da die Wärmegestehungskosten auf den heutigen Zeitpunkt bezogen werden, ist der Realzinssatz, welcher der mittleren Differenz zwischen Nominalzins und Jahresteuierung entspricht, anzuwenden. In [1] wird empfohlen, einen langjährigen Durchschnittswert von 3% zu verwenden.

3.4 Investitionskosten einer Wärmepumpenanlage

3.4.1 Maschinenkosten

Die Zusammenhänge zwischen Leistungsgrösse und Maschinenkosten wurden aus den Umfrageergebnissen abgeleitet und auf die z.T. bereits in Kap. 3.2 spezifizierten Standardbedingungen umgerechnet.

Die Kosten für den Transport, die Montage vor Ort und die Inbetriebsetzung wurden pauschal mit 20% der Maschinenkosten beziffert.

3.4.2 Speicherkosten

Die Kosten des Speichers setzen sich aus Fertigungs-, Transport-, Montage-, Inbetriebnahme- und Raumkosten zusammen. Bei der Dimensionierung des Speichers wird aufgrund des Anwendungsfalles unterschieden zwischen technischem Speicher und Überbrückungsspeicher.

Die Kosten für Fertigung, Transport, Montage und Inbetriebnahme des Speichers wurden bei den Herstellern angefragt.

Für die Bestimmung des Speichervolumens eines **technischen Speichers** werden folgende Annahmen getroffen: Die Mindestlaufzeit unter Standardbedingungen bei halber Leistung beträgt 15 Minuten. Die Vor- und Rücklauftemperaturen werden durch eine Gerade durch die Punkte 90°C/70°C und 50°C/40°C charakterisiert.

Die Grösse des **Überbrückungsspeichers** ergibt sich aus der zu deckenden Last P_{ab} , der Überbrückungszeit Δt und den Temperaturverhältnissen.

3.4.3 Quellenerschliessungskosten

Erdsonden

Die Preise für die Erdsondenanlagen beruhen auf der Offerte der Firma Grundag AG. Die Anordnung der Bohrungen ist preislich optimiert, d.h. dass alle Sonden in einer Linie angeordnet sind. Es wird von unproblematischen Bohrverhältnissen ausgegangen. Alle im Zusammenhang mit dem Bau der Erdsondenanlage anfallenden Kosten wie Bohrung, Schlammabfuhr, Verbindungsgraben, Anschluss, Rekultivierung und Versicherung wurden, basierend auf Offerten, berücksichtigt. Die Kosten für den Einbezug eines Geologen wurden pauschal mit Fr. 5'000.-- berechnet. Der durchschnittliche Sondenbohrpreis beträgt ca. 55 Fr/m, der abgeschätzte Preis für das SONDENSYSTEM kostet, unabhängig von der Bohrlänge, ca. **95 Fr/m**.

Grundwasser

Analog den Annahmen bei der Erdsonde wird auch hier von unproblematischen Bohrverhältnissen sowie Kosten für den Einbezug des Geologen und für die Laboruntersuchung der Wasserproben in der Höhe von Fr. 5'000.-- ausgegangen.

Umgebungsluft

Die notwendigen zusätzlichen Installationen für die Luftführung (Kanäle, Gitter und einfache Schallschutzmassnahmen) werden pauschal mit 10% des Maschinenpreises abgehandelt. Allfällige bauliche Anpassungen sind in den Raumkosten begriffen.

3.4.4 Kosten für den Stromanschluss

Der Strom wird in der Regel vom Elektrizitätswerk bis in die Liegenschaft geliefert. Der Bauherr hat somit direkt keine Kosten an die Zuleitung zu bezahlen.

3.4.5 Maschinenraumkosten

Um den für die Aufstellung von Wärmepumpensystemen notwendigen Raumbedarf zu bestimmen, wurden alle verfügbaren Geometriedaten von auf dem Markt erhältlichen Produkten analysiert.

Ausgehend von innen aufgestellten Anlagen, beträgt der Volumenbedarf für Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Maschinen ca. $25 \text{ m}^3/\text{MW}_{\text{th}}$. Wird ein Zwischenkreis benötigt, erhöht sich der Volumenbedarf aufgrund der zusätzlichen Wärmetauscher um ca. 25%. Analog wird bei Luft/Wasser-Maschinen vorgegangen.

Für das notwendige Raumvolumen wird zum Maschinenvolumen zusätzlich rundherum 0.5 m Luft zugeschlagen.

Die spezifischen Kosten für den Betriebsraum V_R werden mit **400 Fr/m³** angesetzt.

3.4.6 Engineeringaufwand

Für die übergeordnete Planung, Abwicklung und Inbetriebnahme werden pauschal **12%** der Vergabesumme eingesetzt.

3.5 Betriebskosten einer Wärmepumpenanlage

Analog der Investitionskosten werden auch für die Betriebskosten standardisierte Annahmen getroffen.

3.5.1 Kosten für elektrische Energie

Für *nicht unterbrechbare* Verbraucher wird ein Leistungspreis von **120 Fr/kW/y** und ein durchschnittlicher Arbeitspreis von **12 Rp/kWh** angenommen. Der Leistungspreis wird üblicherweise quartalsweise verrechnet.

Im Zusammenhang mit Tarifen für *unterbrechbare* Energielieferungen wird kein Leistungspreis berücksichtigt.

3.5.2 Quellenbenützungskosten

Für die Nutzung der Erdwärme und der Umgebungsluft sind keine Gebühren zu entrichten. Hingegen ist die Nutzung von Grund- und Oberflächengewässer entschädigungspflichtig. Ein einheitliches Gebührenregulativ bei den Kantonen besteht zwar nicht, es sind jedoch keine allzu grossen Unterschiede zu verzeichnen. Für die ökonomischen Betrachtungen wurden die folgenden Werte verwendet:

Oberflächengewässer, Leistungspreis:	3.00 Fr/kW/y
Oberflächengewässer, Arbeitspreis:	0.10 Rp/kWh
Grundwasser, Leistungspreis:	5.00 Fr/kW/y
Grundwasser, Arbeitspreis:	0.15 Rp/kWh

3.5.3 Aufwand für Unterhalt, Service und Bedienung

Über den Unterhaltsaufwand von Wärmepumpenanlagen liegen praktisch keine Angaben vor. Prinzipiell verlangt ein solches System auch keinen Unterhalt. Bei der Wärmeauskopplung aus Grund- und Oberflächengewässern ist jedoch ein periodisches Reinigen des Filters nötig.

Von den meisten Herstellern werden Serviceverträge angeboten. In der Studie wurden diese Vertragskosten stellvertretend für die Unterhaltskosten eingesetzt.

Der Bedienungs- und Betreuungsaufwand der Anlage wird mit 5‰ der Anlagekosten in Rechnung gestellt.

3.5.4 Versicherung der Anlage

Für die Versicherung der Wärmeerzeugungsanlage wird ein Satz von **0.15%** der Investitionskosten angewandt. Dies entspricht etwa dem anteilmässigen Gebäudeversicherungsaufwand.

3.6 Konkurrenzsysteme

Wärmepumpenheizsysteme stehen hauptsächlich mit Öl- und Gasheizungen in Konkurrenz. Deshalb werden zu Vergleichszwecken die Wärmegestehungskosten dieser Systeme mit demselben methodischen Ansatz hergeleitet.

Bei fossil befeuerten Anlagen besteht die ausgeprägte Sensitivität zwischen Wirkungsgrad und den übrigen Parametern nicht, so dass einfachere systemtechnische Ansätze und Annahmen gewählt werden können.

3.6.1 Kapitalkosten

Die verwendeten finanzmathematischen Grundlagen entsprechen jenen der Berechnungen der Wärmekosten von Wärmepumpenanlagen. Die Abschreibungszeiten werden wie folgt festgelegt:

Kessel und Brenner: 15 Jahre oder 50'000 Betriebsstunden
 Tank, Gaszuleitung, Kamin: 30 Jahre

3.6.2 Investitionskosten

Die Ermittlung der Investitionskosten von Kessel, Brenner, Kamin, Tank und Gasanschluss wurde auf [2], Hersteller- und Lieferantenangaben sowie auf firmeneigene Projekte abgestützt.

3.6.3 Betriebskosten

Die eingesetzten Brennstoffkosten betragen **30 Rp/l** für Öl und **4.9 Rp/kWh** für Gas. Die Vorfinanzierung des Öls wird entsprechend der Tankgrösse resp. des Jahresbedarfes berücksichtigt. Die Zählergebühren für die Gasmessung betragen unabhängig von der Leistung **204 Fr/y**.

Für Service und Unterhalt werden analog zum Vorgehen des AfB **2%** der Investitionskosten, für die Bedienung der Anlagen **1%** der Investitionskosten eingesetzt.

Für die Versicherung der Wärmeerzeugungsanlage wird ein Satz von **0.15%** der Investitionskosten angewandt.

3.7 Wärmegestehungskosten

Die Wärmegestehungskosten sind der pro erzeugte Wärmeeinheit anfallende Aufwand aus der Summe der Betriebs- und der Kapitalkosten. Sie werden auf den Zeitpunkt 0 bezogen. Es wird davon ausgegangen, dass die Betriebskosten gegenüber dem Konsumentenpreisindex über die gesamte Lebensdauer keiner zusätzlichen Verteuerung unterworfen sind.

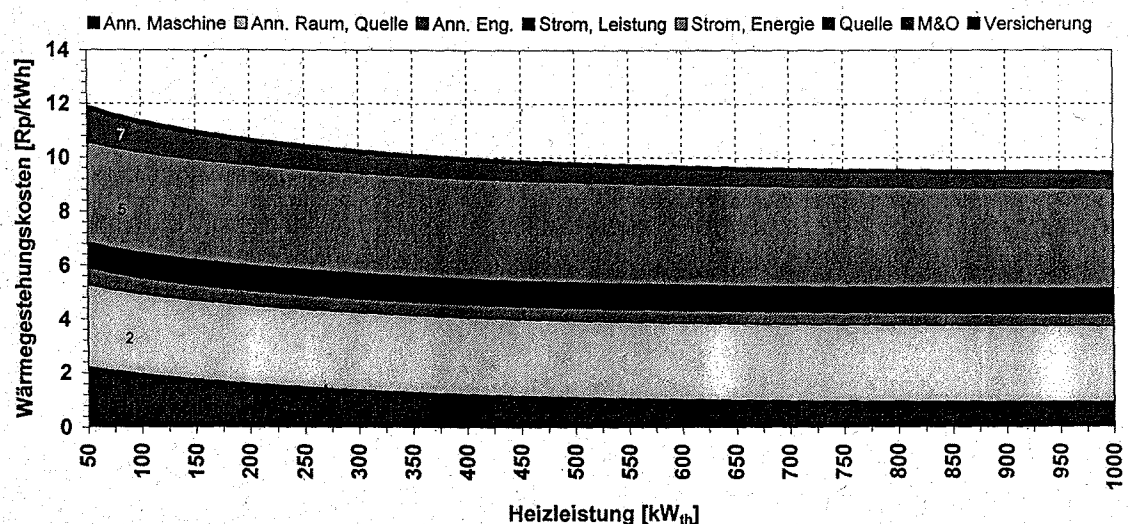
Es wird für alle Anlagentypen von einer jährlichen Vollastbetriebsdauer von 2'500 Stunden ausgegangen.

Für die nachfolgend berechneten Wärmegestehungskosten gelten alle in den vorangehenden Kapiteln definierten Randbedingungen, Voraussetzungen und Annahmen.

3.7.1 Sole/Wasser-Wärmepumpenanlage

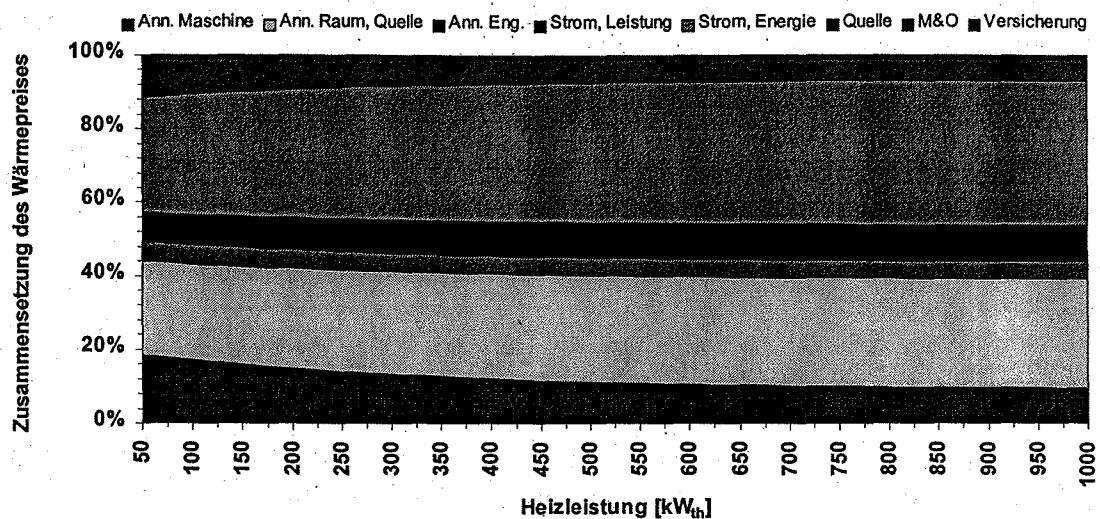
Die Wärmekosten einer 100-kW-Anlage betragen 11.4 Rp/kWh. Der Einfluss der Anlagengrösse ist nicht sehr ausgeprägt. Bei einer Leistung von 500 kW betragen die Kos-

Fig. 3.7: Wärmepumpe mit Erdsonde, absolute Wärmekosten (Legende von Unten nach Oben)



ten 9.8 Rp/kWh (-14.0%), bei 1'000 kW sind es 9.5 Rp/kWh (-16.7%). Der Hauptgrund

Fig. 3.8: Wärmepumpe mit Erdsonde, relative Wärmekosten (Legende von Unten nach Oben)



für dieses unelastische Preisgefüge liegt in den Quellenerschliessungskosten, welche mit zunehmender Leistung keine spezifische Kostenreduktion zeigen. Der Investitionskostenanteil (die untersten 3 Lagen im nebenstehendem Diagramm) variiert von 49.5% bei kleinen Leistungen bis 43.9% bei grossen Leistungen und liegt damit relativ hoch. Der Stromkostenanteil verhält sich entgegengesetzt und steigt von 39.2% auf 49.3%. Mit der Tarifgestaltung können also $\frac{2}{5}$ bis $\frac{1}{2}$ der Wärmegestehungskosten beeinflusst werden. (Beilage 3)

In von den Standardbedingungen abweichenden Fällen können die Wärmekosten mittels des Parametervariationsdiagrammes abgeschätzt werden. Am Beispiel der 100 kW-S/W-Anlage wurde eine solche Rechnung durchgeführt.

Bei einer eher kapitalintensiven Anlage wie im vorliegenden Fall macht sich erwartungsgemäss eine Reduktion der Betriebszeit sehr ausgeprägt bemerkbar. Bei 2'000 anstelle der 2'500 Volllaststunden (80%) erhöht sich der Wärmepreis um 1.6 Rp oder 14%. Andererseits gibt es weit weniger wärmekostensensitive Grössen wie beispielsweise das Engineering, wo eine Reduktion des Aufwandes um $\frac{1}{4}$ lediglich eine Kostenreduktion von 0.15 Rp/kWh oder 1.3% zur Folge hat. Mit diesem Hilfsmittel

Fig. 3.9a: 100 kW-Wärmepumpe mit Erdsonde, Parametervariation Teil A

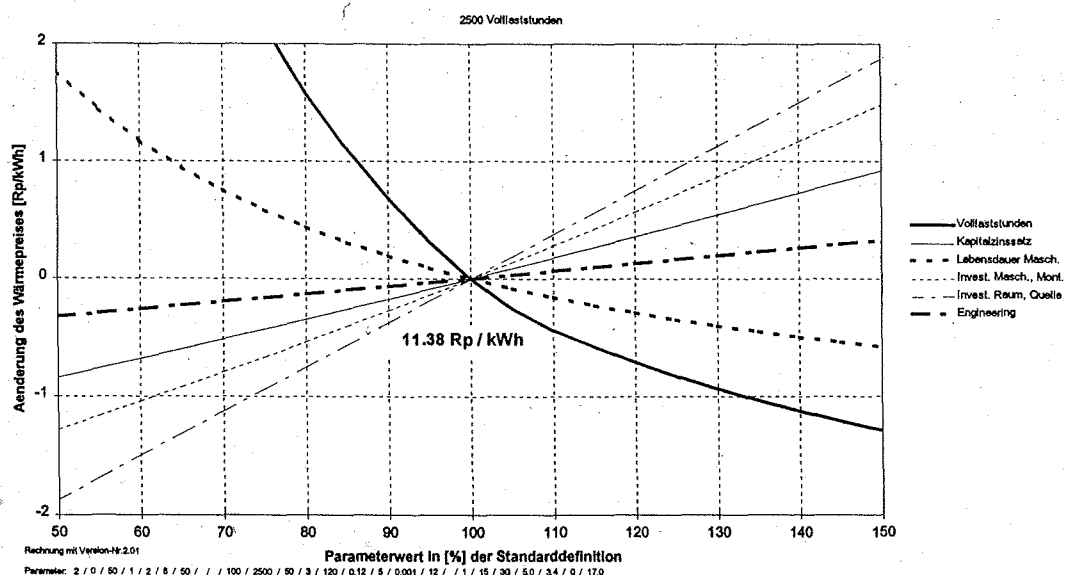
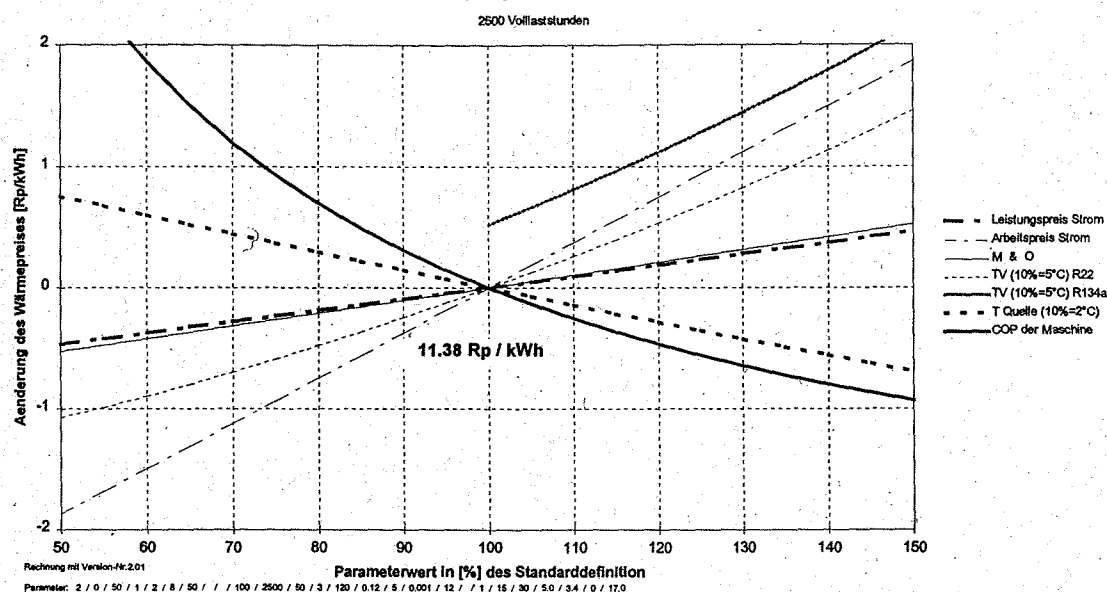


Fig.: 3.9b: 100 kW-Wärmepumpe mit Erdsonde, Parametervariation Teil B



können alle gewünschten Fälle im Bereich von $\pm 50\%$ der Standardbedingungen einfach bestimmt werden. Es muss an dieser Stelle jedoch von der Variation von Parameterkombinationen gewarnt werden. Aufgrund der Nicht-Linearität des Systemes darf das Superpositionsprinzip nur in sehr engen Grenzen angewendet werden.

3.7.2 Wasser/Wasser-Wärmepumpenanlage

Die Resultate der Berechnungen der Wasser/Wasser-Wärmepumpenanlage sind in der Beilage 4 graphisch dargestellt. Es wird deutlich, dass speziell der Einfluss des Quellenerschliessungsaufwandes zu markant tieferen Wärmepreisen bei grösseren Einheiten führt (100 kW \blacktriangleright 9.9 Rp/kWh, 500 kW \blacktriangleright 7.2 Rp/kWh, -27.3%, 1'000 kW \blacktriangleright 6.7 Rp/kWh, -32.3%). Der Investitionskostenanteil sinkt im Bereich von 50 bis 1'000 kW von 47.7% auf 23.5%, während der Stromanteil von 23.5% auf 68.8% ansteigt. Die Tarifgestaltung könnte somit besonders im höheren Leistungsbereich die Konkurrenzfähigkeit nachhaltig beeinflussen. Sehr deutlich wird jedoch auch die Sensitivität der thermodynamischen Parameter (besonders COP und T_{VL}), was die Wichtigkeit einer sorgfältigen Auslegung unterstreicht.

Wird die Wärmequelle im Sommer zu Kühlzwecken (als Wärmesenke) eingesetzt, können die Quellenerschliessungskosten anteilmässig der Gebäudekühlung angelastet werden, was zu einer beträchtlichen Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit des Wärmepumpensystems führt. Als Grössenordnung kann im Falle von gleicher Heiz- wie Kühlenergie von einer Reduktion des Wärmepreises um ca. 2 Rp/kWh_{th} ausgegangen werden. Bei Anwendungen mit grossem Abwärmeanfall (Einkaufszentren, Banken, usw.) verschiebt sich das Verhältnis zu höherem Kälteenergieanteil, was die Wärmekosten noch weiter reduziert. Die gleichen Überlegungen sind im übrigen auch für die Erdsondenanlagen gültig.

3.7.3 Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage

Die Resultate der Berechnungen der Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage sind in der Beilage 5 graphisch dargestellt. Der praktische Einsatzbereich ist aufgrund der erforderlichen Verdampferflächen auf ca. 300 kW_{th} beschränkt. Die spezifischen Maschinenpreise sind vor allem im untersten Leistungsbereich stark abnehmend, was zu folgender Wärmekostendegression führt: 50 kW \blacktriangleright 12.8 Rp/kWh, 100 kW \blacktriangleright

11.3 Rp/kWh, (-11.7%), 300 kW ► 10.4 Rp/kWh, (-18.8%). Der Investitionskostenanteil sinkt im Bereich von 50 bis 300 kW von 42.4% auf 36.7%, während der Stromanteil von 46.1% auf 56.6% ansteigt, also grob etwa die Hälfte der Kosten ausmacht. Insgesamt muss aber doch festgestellt werden, dass diese Art der Wärmeerzeugung unter den gegebenen Randbedingungen über den gesamten Bereich einiges zu teuer ist.

Etwas wirtschaftlicher wird die Situation jedoch für die Luft/Wasser-Wärmepumpe im bivalenten Betrieb, wenn mit höherer Betriebsstundenzahl und Quellenauslegungstemperatur sowie allenfalls mit einem günstigeren unterbrechbaren Stromtarif tiefere Wärmegestehungskosten realisiert werden können. Im reinen Heizbetrieb reduziert sich der Wärmepreis durch den Bivalenzbetrieb mit einem Umschaltunkt bei 0°C um etwa 1 Rp/kWh_{th}.

3.7.4 Ölheizung

Die Resultate der Berechnungen der Ölheizung sind in der Beilage 6 graphisch dargestellt. Erwartungsgemäss ist der Anteil der Kapitalkosten gegenüber den Betriebskosten sehr klein. Damit entsteht eine sehr ausgeprägte Brennstoffkostenabhängigkeit. Die Wärmepreise betragen für 100 kW ► 7.1 Rp/kWh, 500 kW ► 5.7 Rp/kWh, -19.7%, 1'000 kW ► 5.3 Rp/kWh, -25.4%). Der Investitionskostenanteil sinkt im Bereich von 50 bis 1'000 kW von 36.3% auf 20.9%, während der Brennstoffkostenanteil von 41.0% auf 62.7% ansteigt.

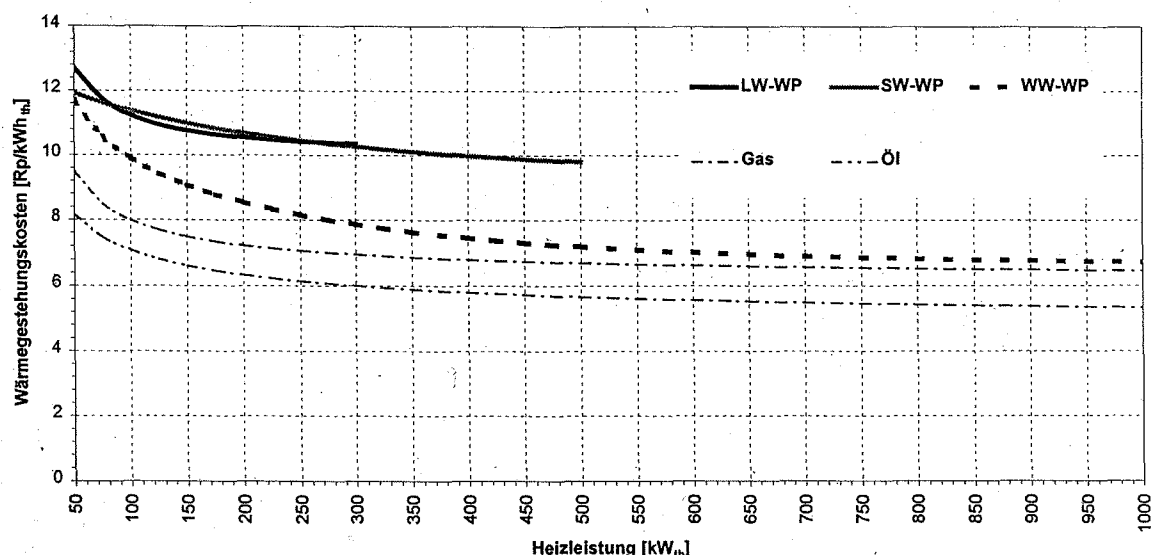
3.7.5 Gasheizung

Die Resultate der Berechnungen der Gasheizung sind in der Beilage 7 graphisch dargestellt. Die Verhältnisse sind jenen der Ölheizung sehr ähnlich, wobei die Brennstoffkostenabhängigkeit noch wesentlich dominanter ausfällt. Die Wärmepreise betragen für 100 kW ► 8.0 Rp/kWh, 500 kW ► 6.7 Rp/kWh, -16.3%, 1'000 kW ► 6.5 Rp/kWh, -18.8%). Der Investitionskostenanteil sinkt im Bereich von 50 bis 1'000 kW von 25.7% auf 8.8%, während der Brennstoffkostenanteil von 57.4% auf 84.4% ansteigt.

3.7.6 Systemvergleich

Die Wärmeerzeugungssysteme Wärmepumpen-, Öl- und Gasheizung wurden mit standardisierten Randbedingungen nach einer einheitlichen Methodik analysiert. Diese

Fig. 3.10: Vergleich der Wärmegestehungskosten der verschiedenen Systeme



standardisierten Randbedingungen widerspiegeln den heutigen Stand der Technik sowie die heute gültigen Energiepreise und Energietarifsysteme.

Unter diesen Bedingungen zeigt sich, dass die Ölheizung erwartungsgemäss über den gesamten Leistungsbereich die günstigsten Wärmegestehungskosten aufweist.

Die Gasheizung ist über den ganzen Bereich ungefähr 1 Rp/kWh teurer als die "Vergleichswährung" Öl. Obwohl dies 13 bis 23% mehr sind, zeigt die Praxis steigende Marktanteile für die erdgasbasierende Wärmeerzeugung.

Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Anlagen sind gegenüber einer entsprechenden Ölheizung um 4 bis 5 Rp/kWh teurer. Das ist 60% und mehr über dem Vergleichspreis für Öl.

Hingegen sind die Wasser/Wasser-Anlagen im höheren Leistungsbereich nur unwesentlich teurer als Gasheizungen. Bei geringerer Leistung sind es vor allem die Quellerschliessungskosten, die sich ungünstig auf die Wärmegestehungskosten und somit auf die Konkurrenzfähigkeit auswirken.

Tab. 2: Wärmegestehungskosten in [Rp/kW_{th}] und in [%] der Kosten einer Ölheizung

	100 kW _{th}		500 kW _{th}		1'000 kW _{th}	
Luft/Wasser-Anlage	11.3	159%				
Sole/Wasser-Anlage	11.9	168%	9.8	172%		
Wasser/Wasser-Anlage	9.9	139%	7.2	126%	6.7	126%
Gasheizung	8.0	113%	6.7	118%	6.5	123%
Ölheizung	7.1	100%	5.7	100%	5.3	100%

Insgesamt zeigt diese Analyse deutlich, dass heute Wärmepumpenheizungen nur dort gebaut werden, wo entweder die ökonomischen Kriterien nicht die alleinige Priorität geniessen, oder aber wo die Voraussetzungen gegenüber den hier getroffenen Annahmen zu Gunsten der Wärmepumpenheizung abweichen. (z.B. Einfamilienhausbereich)

4 Massnahmen zur Steigerung des Wärmepumpenanteils am Wärmemarkt

Die sauberen und umweltfreundlichen Wärmepumpenheizsysteme können auf drei Ebenen gefördert werden.

Gesetzgebung

Im Rahmen einer ökologischen Energiegesetzgebung könnten die Internalisierung der externen Kosten, emissionsabhängige Sonderabgaben oder eine CO₂-Steuer die Voraussetzungen für eine neben der Umweltwärme auf Kernenergie und Wasserkraft basierenden und damit im wesentlichen emissionsfreien Komfortwärmeversorgung deutlich verbessern.

Mit einer undifferenzierten, nicht emissionsbezogenen Energiesteuer mit vornehmlich fiskalischem Charakter ist die ökologische Wirksamkeit allerdings sehr gering.

Auch kann über gesetzlich verankerte Minimalanforderungen an den Einsatz erneuerbarer Energie in Neubauten, wie sie beispielsweise mit dem im Oktober 1997 im Kanton Zürich in Kraft getretenen Energiegesetz [5] und den dazugehörigen Vollzugsbestimmungen eingeführt wurden, u.a. eine Förderung der Wärmepumpen erzielt werden. Unter § 10a ist dort festgehalten, dass Neubauten so ausgerüstet sein müssen,

dass höchstens 80% des zulässigen Energiebedarfs für Heizung und Warmwasser mit nicht erneuerbaren Energien gedeckt werden darf. Dies bietet neben Wärmedämmmassnahmen insbesondere für Wärmepumpen, wie sie im *Vollzugsordner Energie* unter Standardlösung 4 (als L/W-, S/W- oder W/W-Wärmepumpenanlage) oder Standardlösung 8 (Wärmepumpenanlage in Kombination mit ARA-Abwärme) propagiert werden, ein bevorzugtes Einsatzgebiet.

Behörden

Die Behörden könnten mit einer vereinfachten und überkantonal vereinheitlichten Bewilligungspraxis den Entscheid für eine Wärmepumpenheizung begünstigen. Die zusätzliche Erstellung von Erdsonden- und Grundwasserstromkarten sowie ein zusammenfassendes Informationsblatt über das Bewilligungsverfahren wie auch über die geltenden Vorschriften wären wertvolle Hilfsmittel, die einem breiteren Kreis die Option Wärmepumpe erst eröffnen könnten.

Elektrizitätsversorgungsunternehmen

Die Branche hat verschiedene Mittel in der Hand, um der Stromanwendung im Komfortwärmebereich zum Durchbruch zu verhelfen.

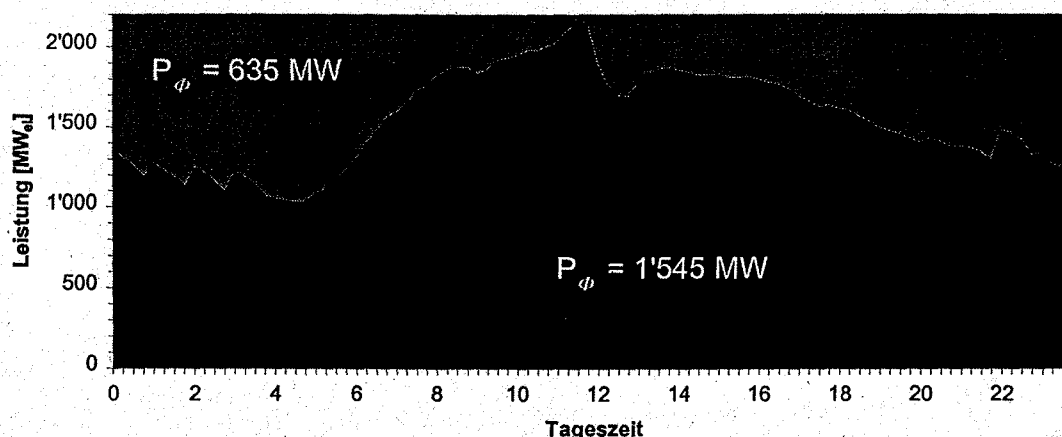
Wichtig ist sicher ein einheitlicher und koordinierter Auftritt in der Öffentlichkeit, so wie dies andere Energieträger mit Erfolg tun. Die sehr gute Resonanz und der hohe Beachtungsgrad der Nichtraucher-Werbekampagne des VSE zeigt bereits ansprechende Ansätze. Weiter könnte das Zielpublikum, namentlich Bauherren und Architekten, mit gezielten Aktionen wie Tage der offenen Türen (auch für Grossanlagen) und technischer Unterstützung in der Vorprojektphase direkt angesprochen werden.

Dann drängt sich, wie die detaillierten Wärmekostenanalysen schonungslos offenlegen, eine Neuorientierung bei der Tarifgestaltung bei spezifischen Kundengruppen wie beispielsweise den Wärmepumpenbetreibern, auf. Interessante Perspektiven eröffnet insbesondere die Möglichkeit einer flexibleren Regelung der Stromliefermodalitäten. Dieser Fragestellung soll im folgenden ein separates Kapitel gewidmet werden.

Wenn schon an Eingriffe in die Energielieferung gedacht wird, wäre es natürlich naheliegend, wenn der Stromlieferant direkt als Contractor auftreten würde und dem Kunden nicht wie bisher das Zwischenprodukt Strom, sondern gerade das gewünschte Endprodukt Wärme liefern würde.

4.1 Versorgungstechnische Vorteile unterbrechbarer Stromtarife

Fig. 4.1: Gemessener Lastverlauf im NOK-Hochspannungsnetz an einem typischen Werktag



Die Gesamtinfrastruktur eines Stromversorgungssystems, speziell in der schweizerischen Produktionszusammensetzung, ist sehr investitionskostenintensiv. Das bedeutet, dass der Hauptteil der Stromkosten aus Festkosten resultiert. Aus dieser Überlegung ist zu folgern, dass alles an eine möglichst gleichmässige hohe Auslastung der Anlagen, sowohl was die Produktion, die Übertragung wie die Verteilung anbetrifft, zu setzen ist. Diese Ausgangslage eröffnet der Stromanwendung, die technisch so gestaltet werden kann, dass Lieferunterbrüche kundenseits überbrückt werden können, ein immenses Potenzial von verfügbarer Energie (obere Fläche in Fig. 4.1), die zu deutlich tieferen als den in den Standardannahmen definierten Preisen vermarktet werden kann, da diese nicht in die Leistungsbilanz des Kraftwerkbetreibers eingeht. Die Energiegrenzkosten orientieren sich in diesem Fall einzig am variablen Gestehungskostenanteil.

4.2 Grenzkostenbetrachtung für unterbrechbare Stromtarife

Im nun folgenden Kapitel wird berechnet, wie hoch der Arbeitspreis für die elektrische Energie angesetzt werden kann, dass, Fall 1, die Wärmegestehungskosten gleich hoch sind wie mit der unterbruchsfreien Wärmepumpenanwendung (oberer Grenzwert), und, Fall 2, die Wärmegestehungskosten gleich hoch sind wie mit einer äquivalenten Ölheizung (Referenzwert). Als unterer Grenzwert gilt der Spotmarktwert für elektrische Energie, der sich in der Grössenordnung von ca. 3 Rp/kWh bewegt. Die Betrachtung erfolgt also nicht aus der Sicht der Stromgestehungskosten, sondern basierend auf den Gegebenheiten auf dem Wärme- und Strommarkt.

Für den Betrieb mit unterbrechbarem Stromtarif muss die Wärmepumpenanlage mit einem grösseren Speicher (Überbrückungsspeicher) ausgerüstet werden. Das Kriterium für die Auslegung dieses Speichers ist der maximal erzielbare Strompreis bei vorgegebenem Wärmepreis bei einem optimal ausgelegten Gesamtsystem. Für diese Optimierungsaufgabe kann folglich die Speichertemperatur und das Speichervolumen nicht isoliert betrachtet werden. Da diese Parameter auch die Leistungskennwerte der Wärmepumpe selbst beeinflussen, muss das für die Kostenberechnungen entwickelte Wärmepumpenmodell ebenfalls in diese Berechnung integriert werden. Generell nimmt die Speichertemperatur mit steigender Überbrückungszeit und kürzerer Aufladezeit zu. Die maximal zulässige Speichertemperatur ist aus praktischen Gründen auf

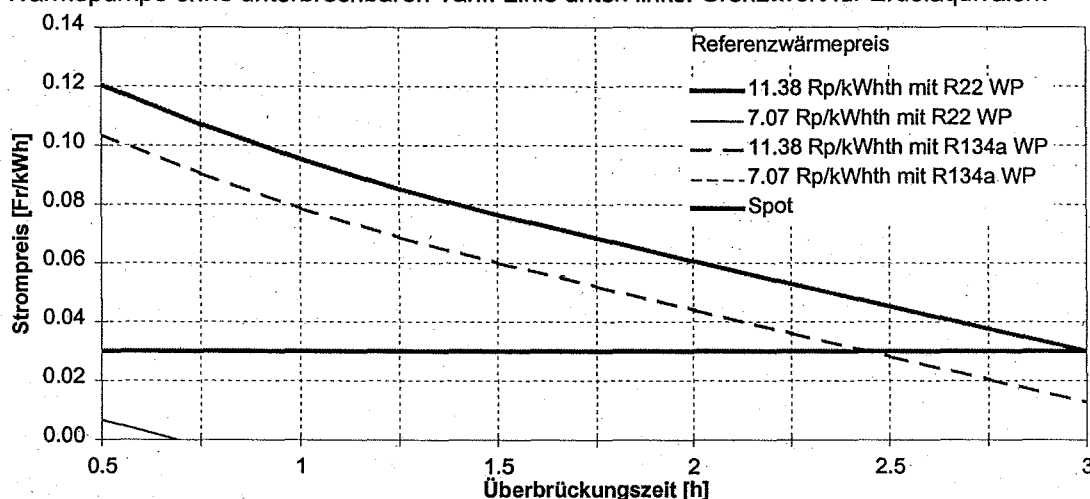
90°C beschränkt. Es ist offensichtlich, dass lange Überbrückungszeiten und/oder kurze Aufladezeiten sehr grosse Maschinen erfordern, so dass der für einen vorgegebenen Wärmepreis erzielbare Strompreis uninteressant tief, das heisst unter den unteren Grenzwert von 3 Rp/kWh fällt.

Für alle folgenden Betrachtungen wird eine feste Aufladezeit von 4 Stunden angenommen.

4.2.1 Sole/Wasser-Wärmepumpenanlage mit einer Leistung von 100 kW_{th}

Im Falle der 100-kW-Sole/Wasser-Anlage liegen die möglichen Stromerlöse bei einem Referenzwärmepreis von Öl von 7.07 Rp/kWh_{th} über den gesamten Bereich der mög-

Fig. 4.2: Sole/Wasser-Maschine 100 kW_{th}, Strompreis. Obere 2 Linien: Grenzwert für Wärmepumpe ohne unterbrechbaren Tarif. Linie unten links: Grenzwert für Erdöläquivalent

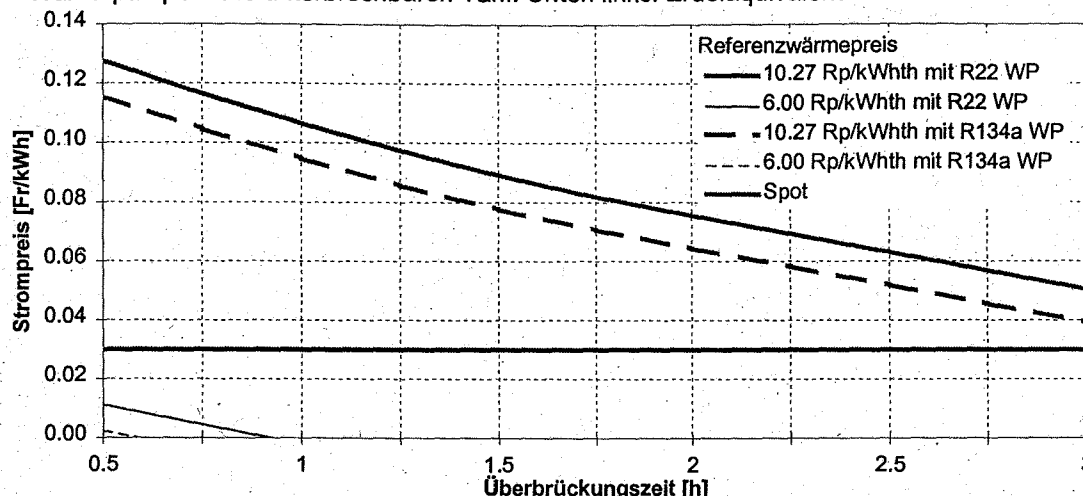


lichen Überbrückungszeiten ausserhalb des interessanten Bereiches (Fig. 4.2). Hier könnte demzufolge bestenfalls versucht werden, mit Marketinganstrengungen den Bereich zwischen Spotpreis (0.03 Fr.) und den oberen 2 Linien zu bewirtschaften. Über den oberen beiden Linien ist die unterbrechungsfreie Wärmepumpenanwendung in jedem Fall die ökonomisch günstigere Lösung. (vgl. Beilage 8)

4.2.2 Sole/Wasser-Wärmepumpenanlage mit einer Leistung von 300 kW_{th}

Nur unwesentlich besser ist die Situation bei einer drei Mal grösseren Maschine. Begründet liegt dieser doch eher enttäuschende Sachverhalt darin, dass sich auch der Referenzwärmepreis der Ölheizung hin zu grösseren Leistungen reduziert, im vorliegenden Fall von 7.07 Rp/ kWh_{th} für die 100 kW-Anlage auf 6.00 Rp/kWh_{th} für die 300 kW-Anlage. Eine deutliche Verbesserung gegenüber der heutigen Situation mit nicht unterbrechbaren Tarifen (obere 2 Linien) ist jedoch sehr wohl möglich.

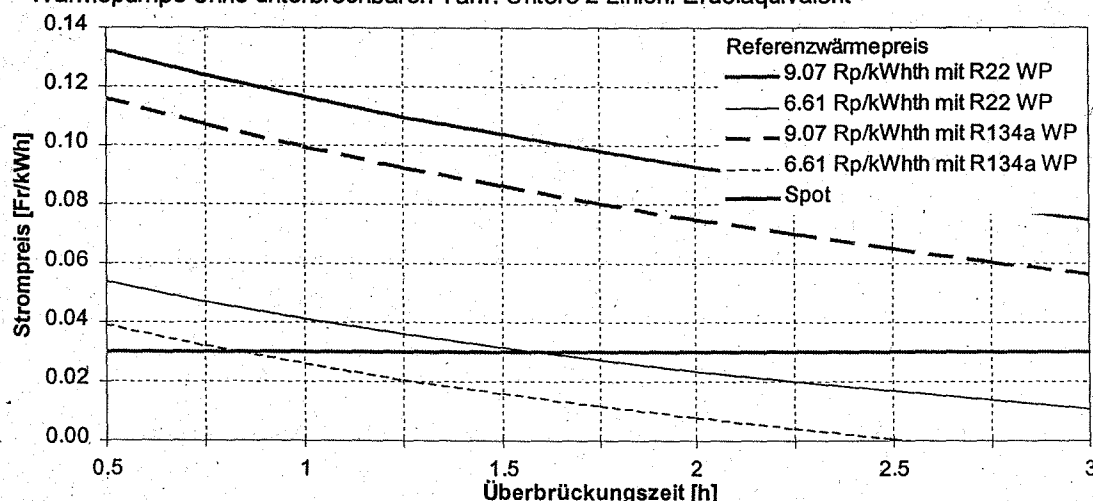
Fig. 4.3: Sole/Wasser-Maschine 300 kW_{th}, Strompreis. Obere 2 Linien: Grenzwert für Wärmepumpe ohne unterbrechbaren Tarif. Unten links: Erdöläquivalent



4.2.3 Wasser/Wasser-Wärmepumpenanlage mit einer Leistung von 150 kW_{th}

Für die 150 kW-Sole/Wasser-Anlage liegt der Referenzwärmepreis der Ölheizung bei 6.61 Rp/kWh_{th}. Das ergibt einen kleinen Bereich bei kurzen Überbrückungszeiten, wo

Fig. 4.4: Wasser/Wasser-Maschine 150 kW_{th}, Strompreis. Obere 2 Linien: Grenzwert für Wärmepumpe ohne unterbrechbaren Tarif. Untere 2 Linien: Erdöläquivalent



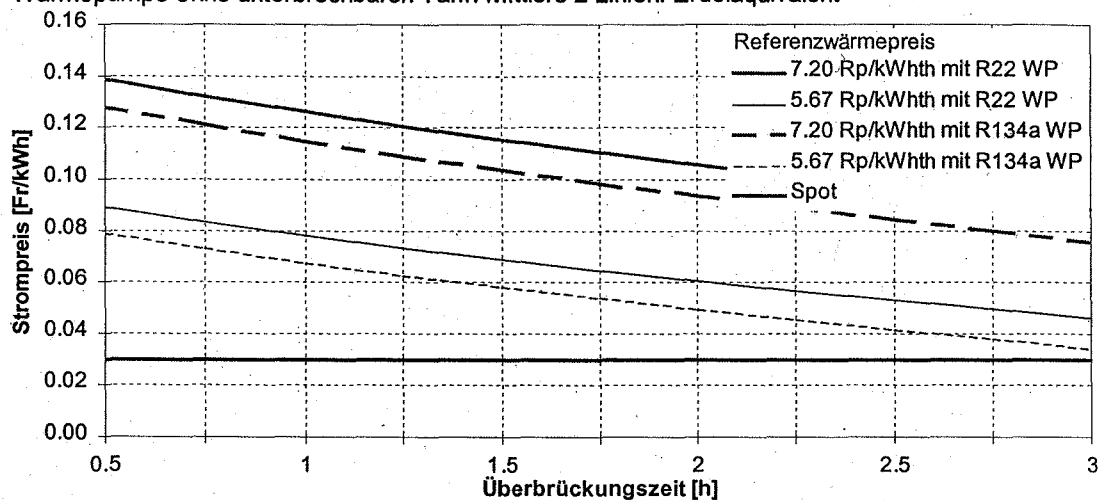
der erzielbare Strompreis über dem Spotmarktpreis liegt. Allerdings sind sowohl die betriebliche Flexibilität wie auch das ökonomische Ertragspotenzial bei dieser tiefen Vorgabe des Wärmepreises sehr gering. (vgl. Beilage 10)

4.2.4 Wasser/Wasser-Wärmepumpenanlage mit einer Leistung von 500 kW_{th}

Das interessanteste Potenzial unter den betrachteten Fällen weist klar die grosse Wasser/Wasser-Anlage auf. Trotz des tiefen Referenzwärmepreises von 6.61 Rp/kWh_{th} erstreckt sich das ökonomisch nutzbare Band über den gesamten Überbrückungszeitenbereich. Insbesondere bei kurzen Überbrückungszeiten und dem

Einsatz von R22-Maschinen können attraktive Strompreise von 8 Rp/ kWh_{el} und mehr erzielt werden. (vgl. Beilage 11)

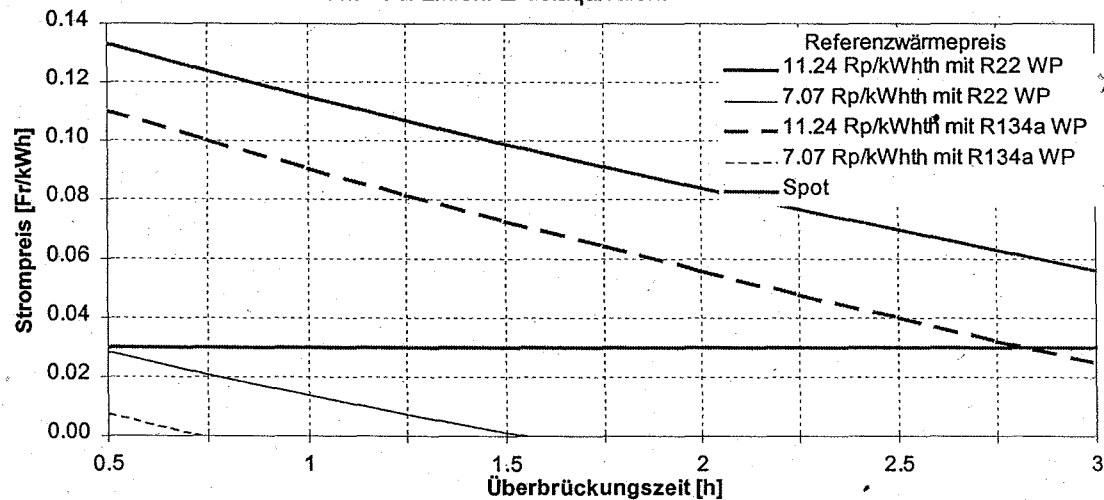
Fig. 4.5: Wasser/Wasser-Maschine 500 kW_{th}, Strompreis. Obere 2 Linien: Grenzwert für Wärmepumpe ohne unterbrechbaren Tarif. Mittlere 2 Linien: Erdöläquivalent



4.2.5 Luft/Wasser-Wärmepumpenanlage mit einer Leistung von 100 kW_{th}

Wie bereits bei den anderen kleineren Maschinen festgestellt werden musste, ist die

Fig. 4.6: Luft/Wasser-Maschine 100 kW_{th}, Strompreis. Obere 2 Linien: Grenzwert für Wärmepumpe ohne unterbrechbaren Tarif. Untere 2 Linien: Erdöläquivalent



Konkurrenzfähigkeit gegenüber dem Öl-Referenzwärmepreis auch bei der Luft-/Wasser-Wärmepumpenanlage nicht gegeben. Es müssen also auch hier andere als die reinen Wärmegestehungskosten in die Argumentation für diese Anwendung einbezogen werden. (vgl. Beilage 12)

5 Schlussfolgerungen

Die Infrastruktur zur Erzeugung, Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie weist in den Teillastzeiten ein grosses Potenzial für Stromkunden, deren Energielieferungen zu Hochlastzeiten unterbrochen werden können, auf. Für diese Kunden sollte ein Tarif angeboten werden können, welcher auf den Leistungspreis verzichtet und einen Arbeitspreis aufweist, welcher der Wertigkeit der Energielieferung entsprechend je nach Überbrückungs- und Aufladedauer angesetzt werden kann, in jedem Fall aber natürlich höher als der Spotmarktpreis in den Überschusszeiten sowie die Grenzgestehungskosten in der übrigen Zeit sein muss.

Orientiert man sich an den heutigen sehr tiefen Wärmegestehungskosten von Ölheizungen, so haben nur grössere Wasser/Wasser-Wärmepumpenanlagen die Voraussetzungen, zu konkurrenzfähigen Kosten Wärme bereitzustellen. Diese Aussage relativiert sich jedoch bei steigenden Heizölpreisen, welche durch höhere Rohölpreise oder durch fiskalische Bestimmungen herbeigeführt werden könnten, sehr stark, da die Referenzwärmekosten auf solche Veränderungen ausgesprochen sensitiv zu Gunsten der Wärmepumpenheizung reagieren.

Die den gesamten Ausführungen zugrundeliegende Betrachtungsweise berücksichtigt ausschliesslich die betriebswirtschaftlichen Randbedingungen. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung sollten jedoch zusätzlich zu den Kosten auch die Emissionen, der Ressourcenabbau und die Risiken betrachtet werden. Volkswirtschaftlich sinnvolle Lösungen schliessen all diese Faktoren in den Optimierungsprozess ein. Gerade ein Wärmepumpenkonzept mit unterbrechbaren Tarifen, welches keinen zusätzlichen Leistungsausbau von Kraftwerkskapazitäten nach sich zieht, schneidet diesbezüglich unter den Verhältnissen der heutigen Stromproduktion in der Schweiz, welche mit ca. 40% Kernenergie und 60% Wasserkraft zu fast 100% schadstoff- und CO₂-frei ist, vorzüglich ab.

Wird eine Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus eines Systems gemacht (Life Cycle Assessment), verbessert sich beispielsweise das Treibhausgaspotential bei der Umsetzung des vorgeschlagenen Wärmepumpensystems von 345 g CO₂-Äquivalent/kWh_{th} einer modernen Ölheizung oder 280 g CO₂-Äquivalent/kWh_{th} einer kondensierenden Gasheizung um eine ganze Grössenordnung auf 29 g CO₂-Äquivalent/kWh_{th} einer elektrischen Wärmepumpe, betrieben mit dem Strommix Schweiz [3]. Wird die Strombereitstellung allerdings mittels fossil betriebenen BHKW's bewerkstelligt, wird dieser Vorteil grösstenteils verspielt.

Das Hauptproblem bei der Internalisierung der externen Kosten liegt nicht etwa in der Quantifizierung der Emissionen selbst, sondern in deren Monetarisierung. In [4] wurde versucht, kalkulatorische Energiepreiszuschläge zu berechnen. Diese enthalten nicht nur die Schadstoffkosten inkl. Treibhauseffekt während des Betriebes einer Anlage, sondern auch die vor- und nachgelagerten Prozesse. Für die Ölheizung werden die Zuschläge mit 2.4 bis 38.0 Rp/kWh_{th} beziffert, für eine Gasheizung sind es 1.3 bis 27.0 Rp/kWh_{th}. Für Strom aus dem schweizerischen Kraftwerksmix sind es 0.5 bis 3.8 Rp/kWh_{el}, resp. ca. 0.1 bis 1.1 Rp/kWh_{th} für Wärme aus einer elektrischen Wärmepumpe. Obwohl der grosse Unsicherheitsbereich bei der Bestimmung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge eine praktische Umsetzung quasi verunmöglicht, wird doch deutlich, dass die elektrisch betriebene Wärmepumpe volkswirtschaftlich, unter Berücksichtigung aller gesamtheitlich auftretenden Kosten, die sinnvollste Art der Wärmeerzeugung darstellt. Das führt zur Schlussfolgerung, dass neben einem attraktiven Tarifsystem für die Stromlieferung mit der Möglichkeit einer Lieferunterbrechung

ein grosses Marketingdefizit besteht, welches es mit Entschlossenheit zu reduzieren gilt.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die beschriebenen Systeme detailliert modelliert und die für die Berechnungen notwendigen technischen und ökonomischen Basisdaten zusammengetragen. Die Programmierung erfolgte im Tabellenkalkulationsprogramm Excel mittels diverser Makros. Damit steht für weitere Berechnungen mit anderen Randbedingungen und Parametern, im Rahmen von Machbarkeits- und Variantenstudien sowie Vorprojekten beispielsweise, ein leistungsfähiges Tool zur Verfügung. Entsprechende Arbeiten können von NOK-Engineering (Adresse siehe Titelseite) bei Bedarf ausgeführt werden.

6 Anhang

6.1 Literatur

- [1] Bundesamt für Energie, *Empfehlung für energetische Wirtschaftlichkeitsrechnungen mit Einbezug der externen Kosten*, BFE (9.97)
- [2] EWU Engineering GmbH, *Kennziffernkatalog für Investitionskosten, Bereich Wärmeerzeugung*, Berlin (1996)
- [3] PSEL Tätigkeitsbericht 1997, Schlussbericht Nr. 10, Prof. Dr. P. Suter, Dr. R. Frischknecht, *Umweltbelastung durch Energiesysteme*, ETHZ (1997)
- [4] *Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich*, 724.270, BFE 1994
- [5] Staatskanzlei 8090 Zürich, *Energiegesetz und Energieverordnung*, 730.1/730.11, Oktober 1997

6.2 Zeichenerklärung

P_{el}	vom Verdichter aufgenommene elektrische Leistung	kW_{el}
\dot{Q}_C	an das Heizsystem abgegebene Wärmeleistung	kW_{th}
T_{VL}	Vorlauftemperatur des Wärmeverteilsystems	K, °C
T_{RL}	Rücklauftemperatur des Wärmeverteilsystems	K, °C
V_R	Volumen des Maschinenraumes	m^3

7 Beilagen

Beilage 1:

7.1 Methodisches Vorgehen und Standardbetrieb

- Definition der **Standardbedingungen** für eine GWP-Anlage (Maschine, Betrieb)
 - Umrechnung der Informationen aus der **Umfrage** auf die Standardbedingungen
 - Ermitteln der **Maschinenkosten** aus den standardisierten Umfrageergebnissen
 - Ermitteln der **übrigen Systemkosten**
 - Energetische **Modellbildung** der WP-Systeme (Programmierung der Abhängigkeiten und Verknüpfungen in einem Excel-Arbeitsblatt)
 - Berechnung der **Wärmegestehungskosten** für den Leistungsbereich $50 \text{ kW}_{\text{th}} - 1'000 \text{ kW}_{\text{th}}$ (inkl. Konkurrenzsysteme)
 - **Parametervariation** für ausgewählte Konfigurationen (Leistung, Quelle)
-
- **Energiekosten:**
 Strom: Leistung **120 Fr/kW_{el}/y** (quartalsweise), Arbeit **12 Rp/kW_h_{el}**
 Gas: **4.9 Rp/kW_h Hu**
 Heizöl EL: **30 Rp/Liter**
 - **Unterhaltskosten:** Basis = **Servicevertrag**
 - **Feste Vorlauftemperatur:** **$T_{\text{VL}} = 50 \text{ °C}$** (nicht gleitend)
 - **Jahresbetriebsstunden S/W und W/W (Volllaststunden):** **2'500 h**
 - **Zinssatz auf das investierte Kapital:** Nominal 5% p.a., Teuerung 2% p.a., **Realzins = 3% p.a.**
 - **Kapitalkosten:** **Annuitätsmethode**

Beilage 2:

7.2 Definition der Standardbedingungen, resultierende JAZ

- Kondensationstemperatur: **3 °C** höher als Heizungsvorlauftemperatur
- Verdampfungstemperatur: **8 °C** (S/W und W/W) resp. **10 °C** (L/W) tiefer als Quellentemperatur
- Verdichterwirkungsgrad: $\eta_K = 70\%$ (S/W und W/W) resp. **65%** (L/W)
- Kältemittel: **R22**
- Technischer Speicher
- Lebensdauer der Maschine: **15 J / 40'000 h**

- Grundwassertemperatur: **9° C**
- Lufttemperaturganglinie der SMA-Station von **Buchs/Suhr**
- Quellenaufwand: L/W **6.0%**, S/W **4.6%**, W/W **2.7%**, Zwischenkreis **0.9%**
- Grundwassernutzung über **Zwischenkreis**
- Kosten für die Grundwassernutzung: Leistungspreis **5 Fr/kW/y**, Arbeitspreis **0.15 Rp/kWh**
- Kosten für die Oberflächengewässernutzung: Leistungspreis **3 Fr/kW/y**, Arbeitspreis **0.10 Rp/kWh**

- | | |
|---------------------------------|-------------|
| • JAZ Luft/Wasser-Wärmepumpe: | 2.56 |
| • JAZ Sole/Wasser-Wärmepumpe: | 3.21 |
| • JAZ Wasser/Wasser-Wärmepumpe: | 3.25 |

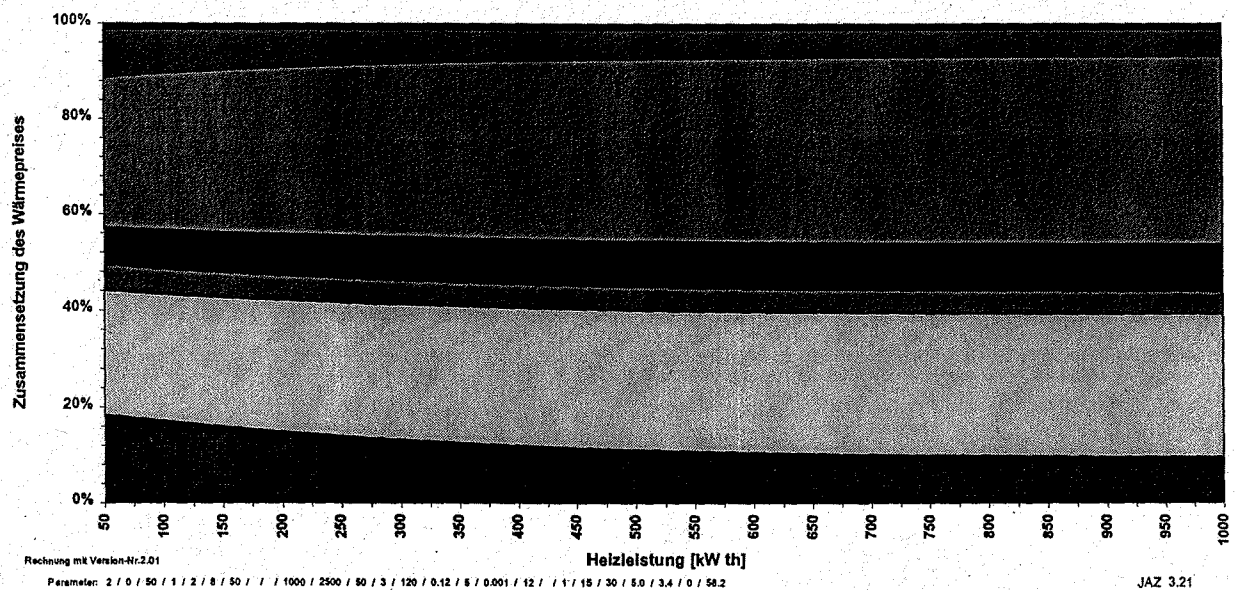
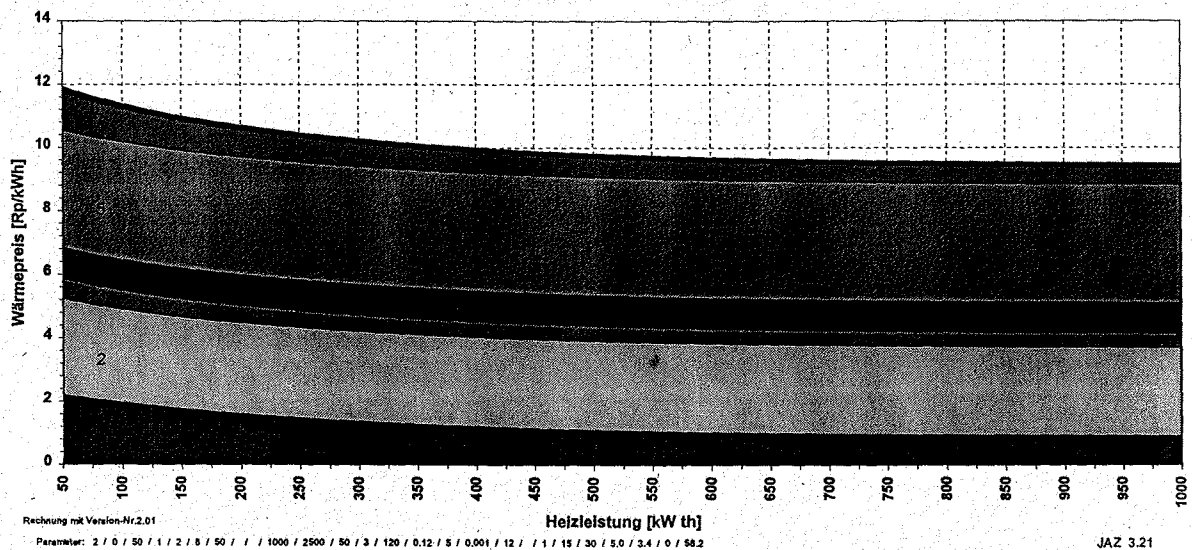
Beilage 3:

7.3 Wärmepumpe mit Erdsonde

Berechnung der Wärmegestehungskosten für eine Sole/Wasser-Anlage mit R22

Zusammensetzung der Kosten in der Reihenfolge der Graphik von Oben nach Unten:

- Versicherung (sehr dünn) (8)
- Betrieb und Unterhalt der Anlage (7)
- Nutzung der Wärmequelle (sehr dünn!) (6)
- Strom, Arbeitspreis (5)
- Strom, Leistungspreis (4)
- Kapitalkosten (Annuität) Engineering (3)
- Kapitalkosten (Annuität) Heizungsraum und Wärmequelle (2)
- Kapitalkosten (Annuität) Wärmepumpe (1)



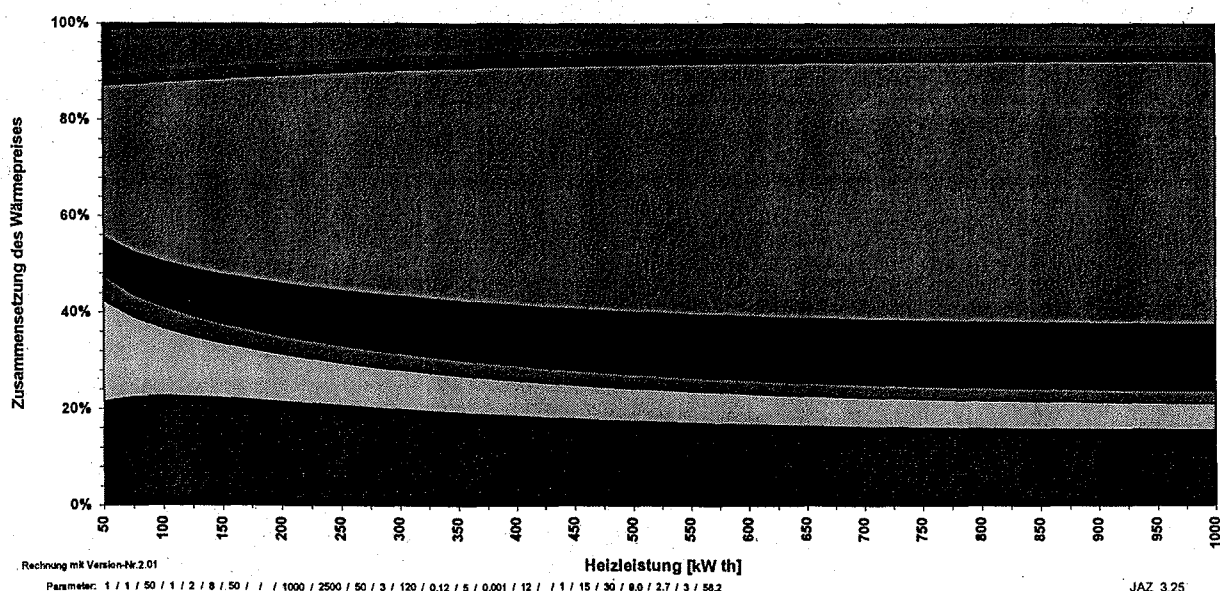
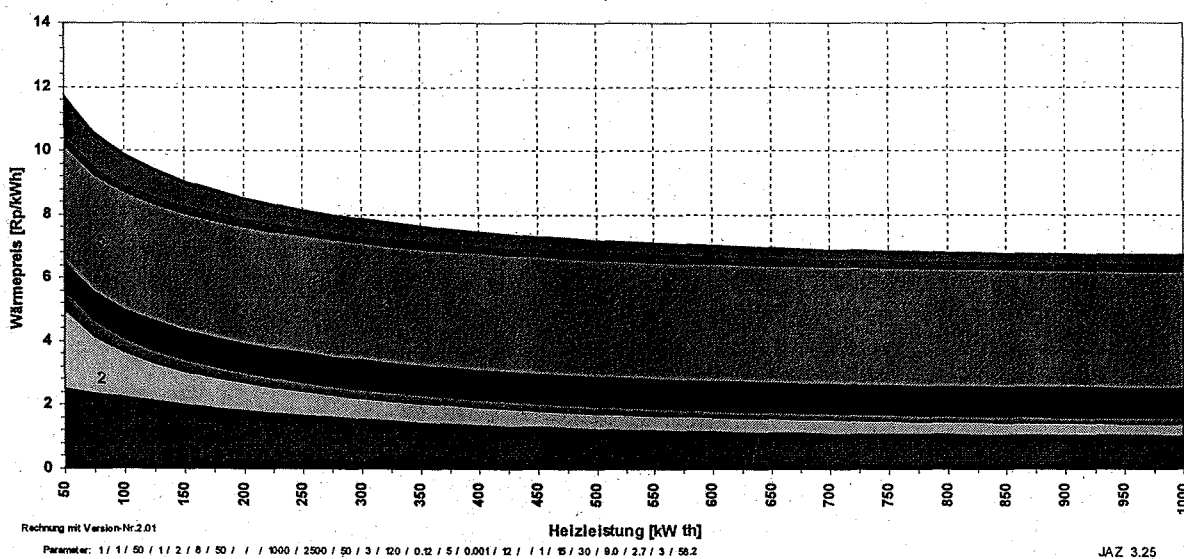
Beilage 4:

7.4 Wärmepumpe mit Grundwasser

Berechnung der Wärmegestehungskosten für eine Wasser/Wasser-Anlage mit R22

Zusammensetzung der Kosten in der Reihenfolge der Graphik von Oben nach Unten:

- Versicherung (sehr dünn) (8)
- Betrieb und Unterhalt der Anlage (7)
- Nutzung der Wärmequelle (sehr dünn!) (6)
- Strom, Arbeitspreis (5)
- Strom, Leistungspreis (4)
- Kapitalkosten (Annuität) Engineering (3)
- Kapitalkosten (Annuität) Heizungsraum und Wärmequelle (2)
- Kapitalkosten (Annuität) Wärmepumpe (1)



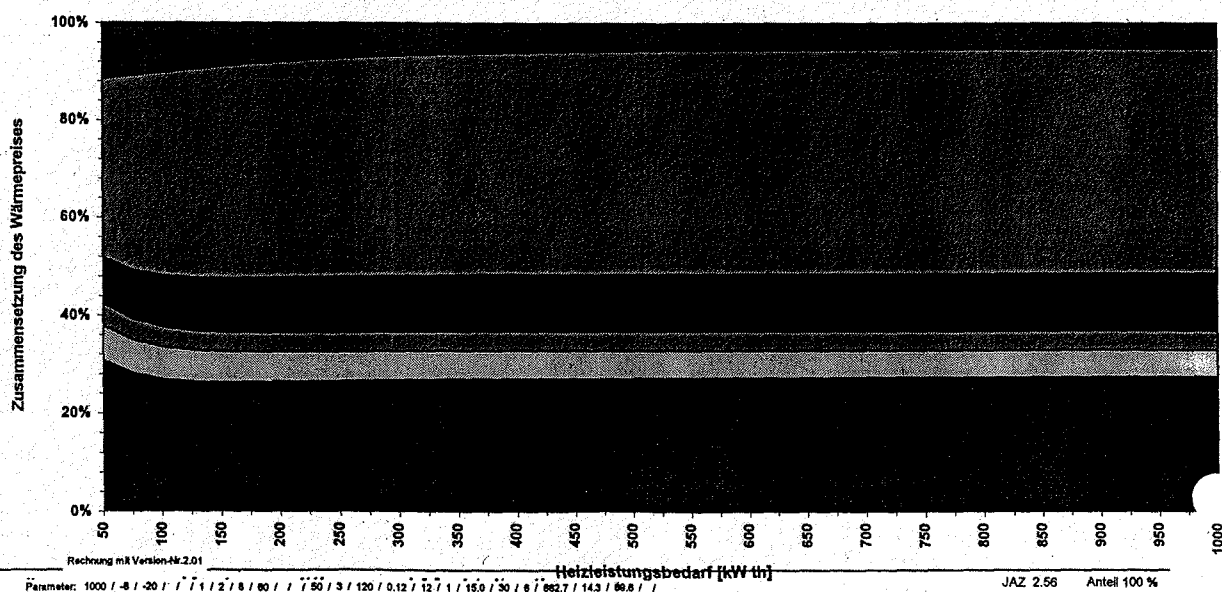
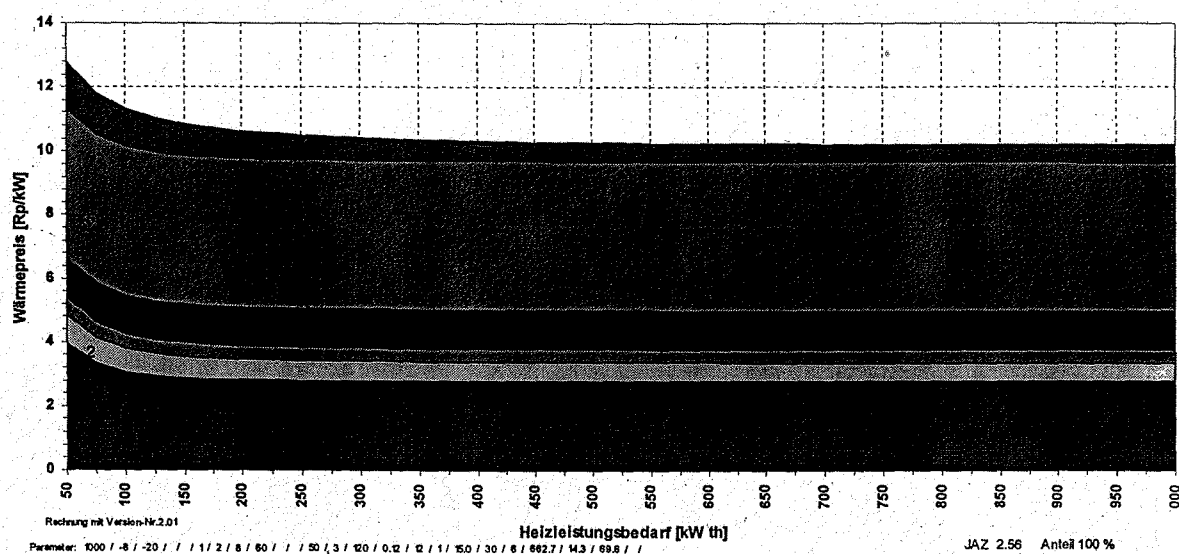
Beilage 5:

7.5 Wärmepumpe mit Umgebungsluft

Berechnung der Wärmegestehungskosten für eine Luft/Wasser-Anlage mit R22

Zusammensetzung der Kosten in der Reihenfolge der Graphik von Oben nach Unten:

- Versicherung (sehr dünn) (8)
- Betrieb und Unterhalt der Anlage (7)
- Nutzung der Wärmequelle (sehr dünn!) (6)
- Strom, Arbeitspreis (5)
- Strom, Leistungspreis (4)
- Kapitalkosten (Annuität) Engineering (3)
- Kapitalkosten (Annuität) Heizungsraum und Wärmequelle (2)
- Kapitalkosten (Annuität) Wärmepumpe (1)

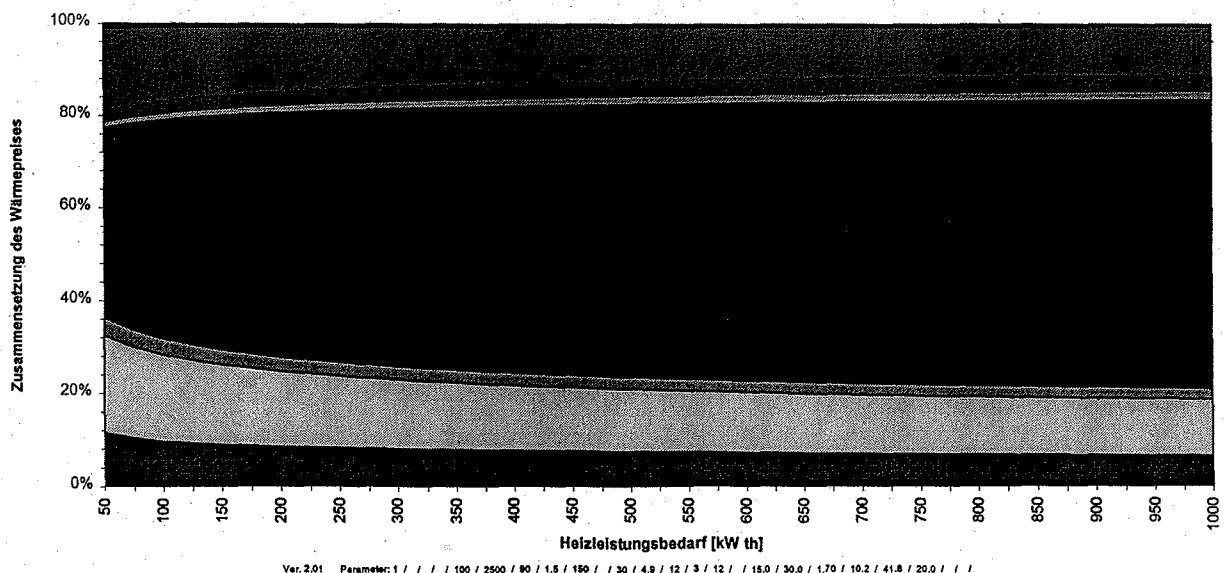
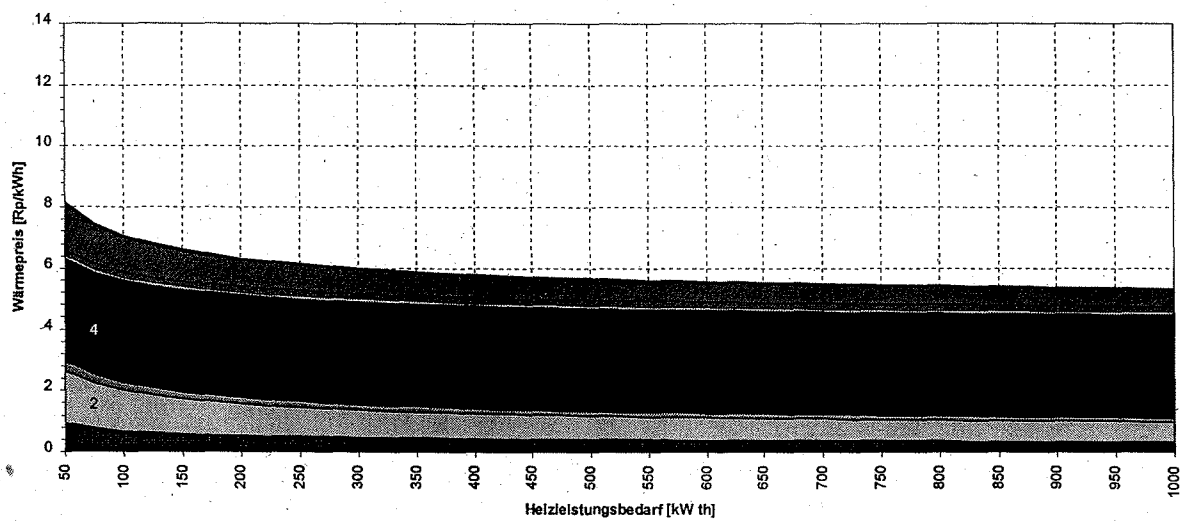


Beilage 6:

7.6 Berechnung der Wärmegestehungskosten für eine Ölheizung

Zusammensetzung der Kosten in der Reihenfolge der Graphik von Oben nach Unten:

- Versicherung (sehr dünn) (8)
- Betrieb und Unterhalt der Anlage (7)
- Strom (sehr dünn!) (6)
- Vorfinanzierung Brennstoff (sehr dünn) (5)
- Brennstoffkosten (4)
- Kapitalkosten (Annuität) Engineering (3)
- Kapitalkosten (Annuität) Heizungsraum und Tank (2)
- Kapitalkosten (Annuität) Kessel (1)

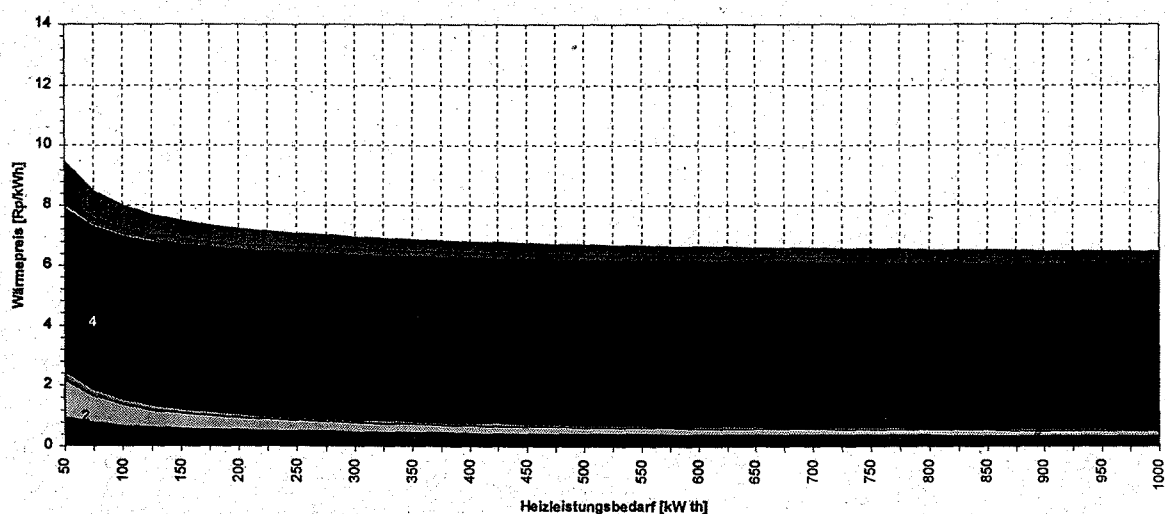


Beilage 7:

7.7 Berechnung der Wärmegestehungskosten für eine Gasheizung

Zusammensetzung der Kosten in der Reihenfolge der Graphik von Oben nach Unten:

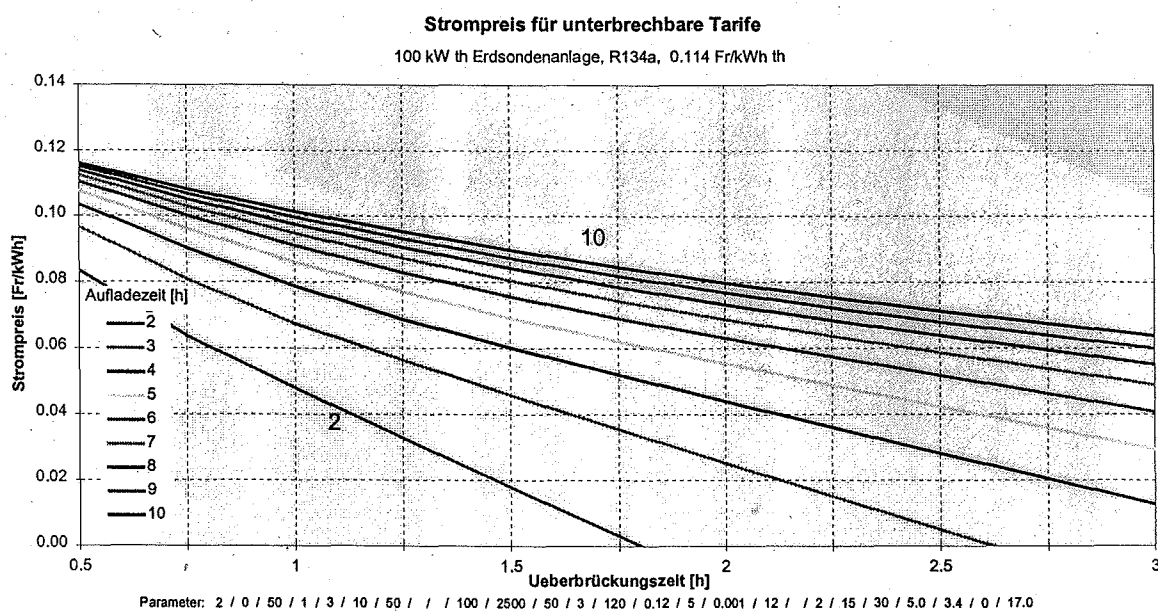
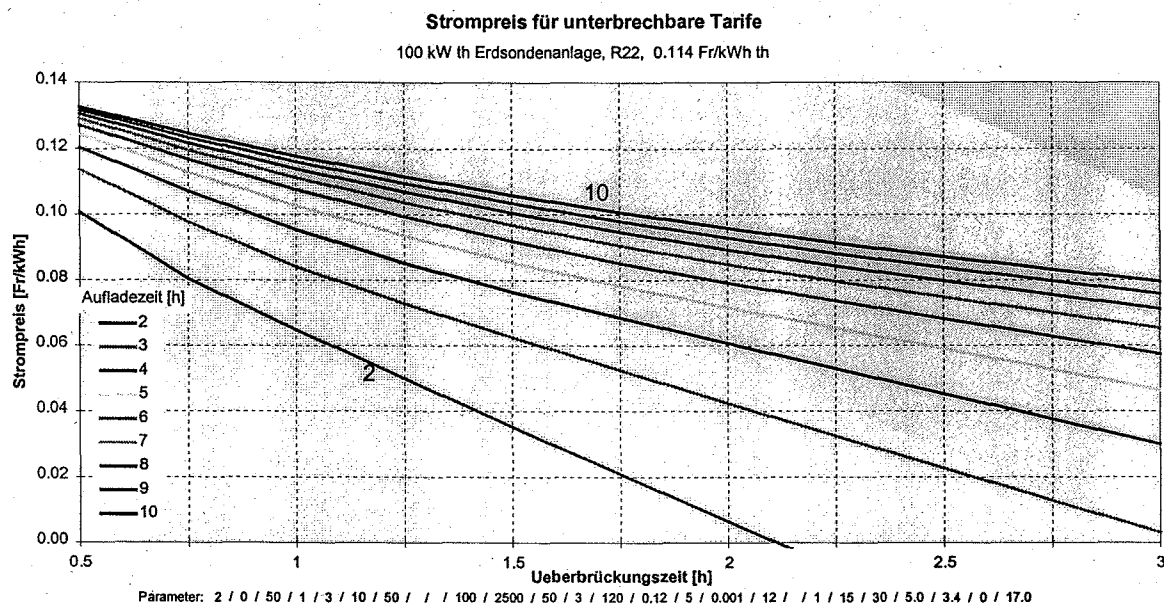
- Versicherung (sehr dünn) (8)
- Betrieb und Unterhalt der Anlage (7)
- Strom (sehr dünn!) (6)
- Zählermiete (sehr dünn) (5)
- Brennstoffkosten (4)
- Kapitalkosten (Annuität) Engineering (3)
- Kapitalkosten (Annuität) Heizungsraum und Gasanschluss (2)
- Kapitalkosten (Annuität) Kessel (1)



Beilage 8:

7.8 Unterbrechbare Tarife, 100-kW-Sole/Wasser-Anlage

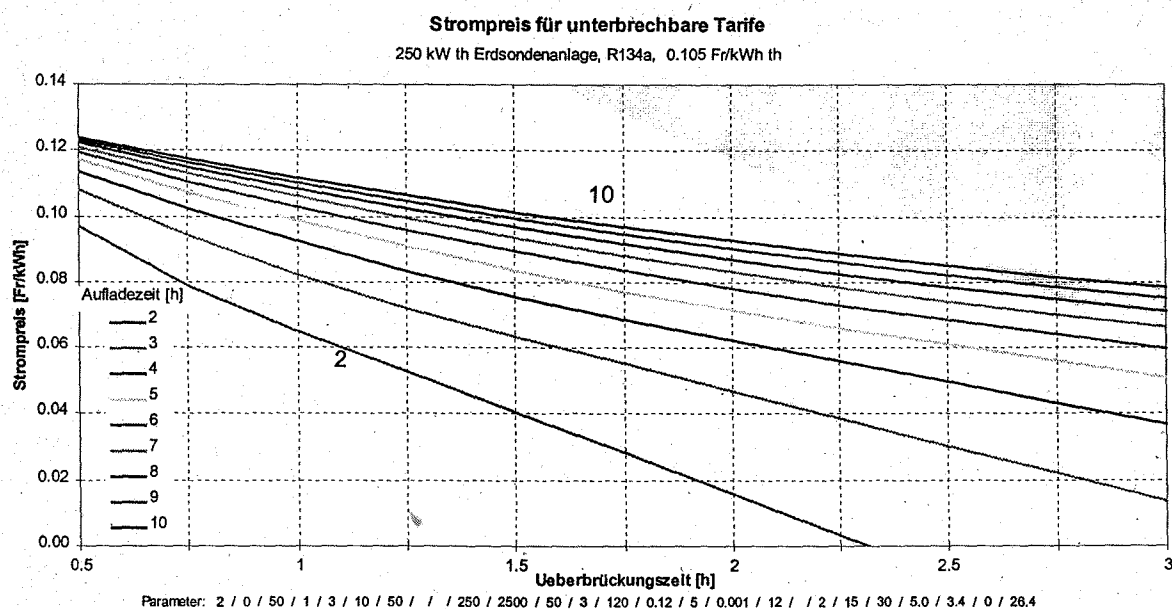
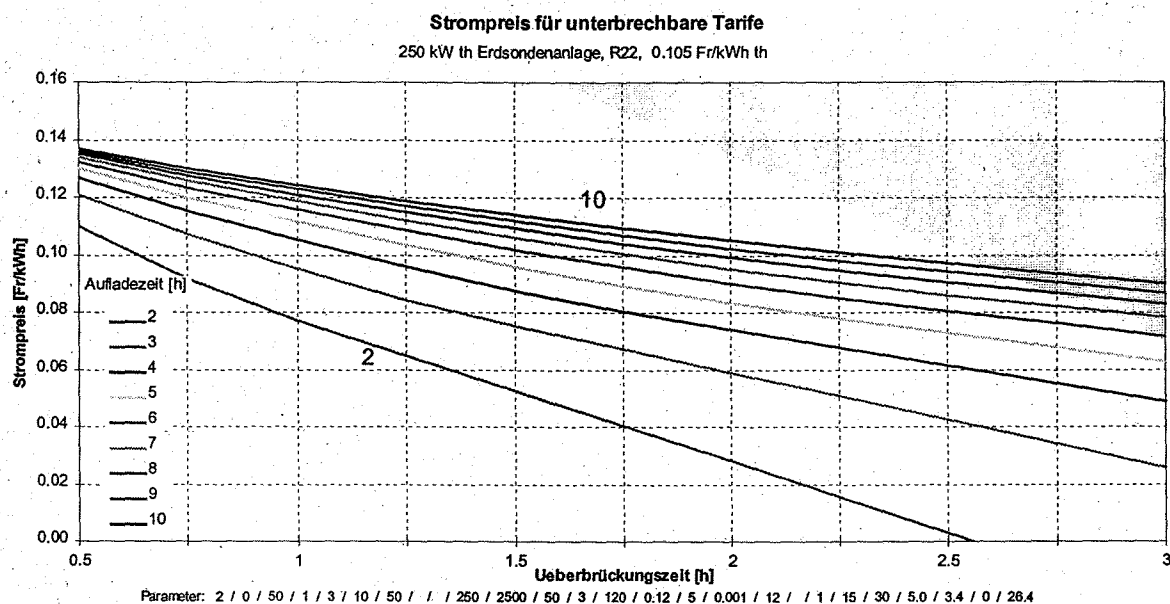
Maximal erzielbarer Strompreis für unterbrechbare Tarife bei vorgegebenem Wärme-
preis, Kältemittel R22 (oben) und R134a (unten)



Beilage 9:

7.9 Unterbrechbare Tarife, 250-kW-Sole/Wasser-Anlage

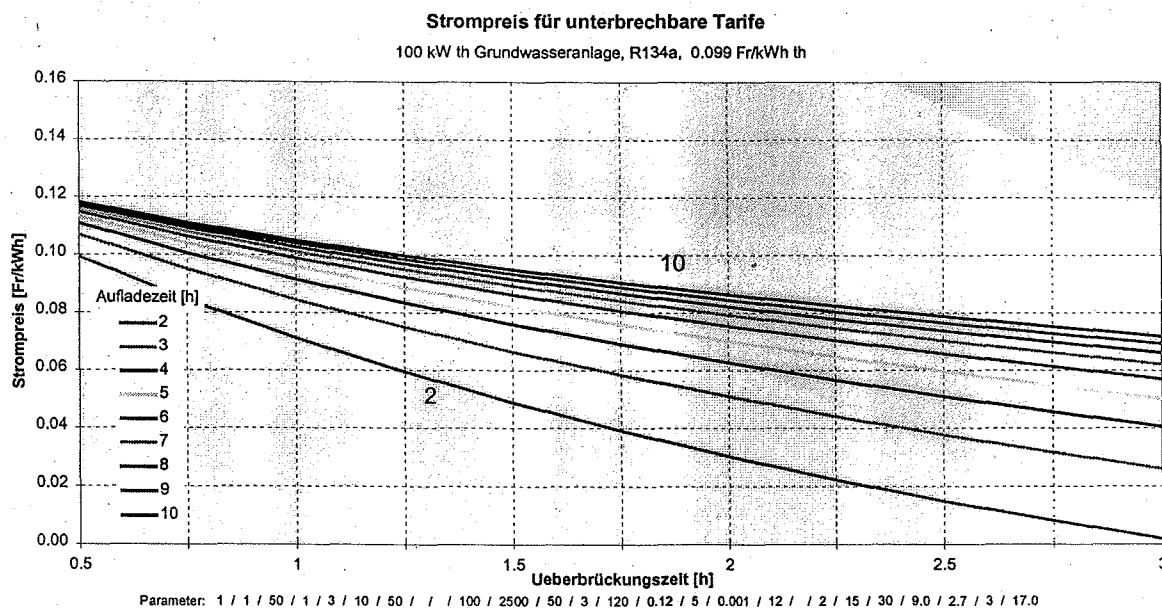
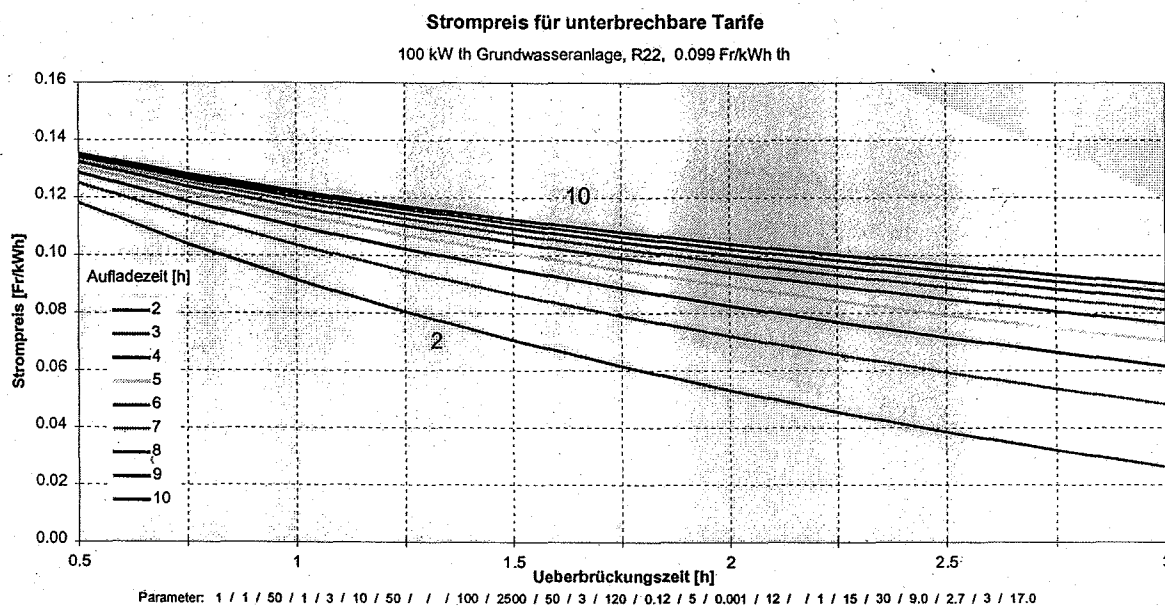
Maximal erzielbarer Strompreis für unterbrechbare Tarife bei vorgegebenem Wärme-
preis, Kältemittel R22 (oben) und R134a (unten)



Beilage 10:

7.10 Unterbrechbare Tarife, 100-kW-Wasser/Wasser-Anlage

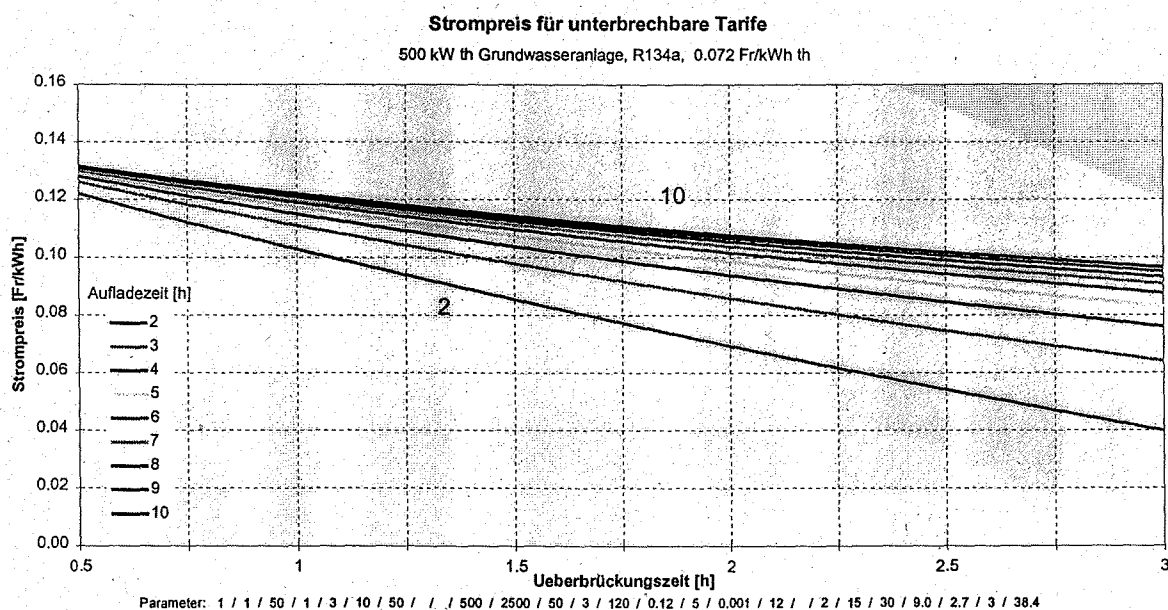
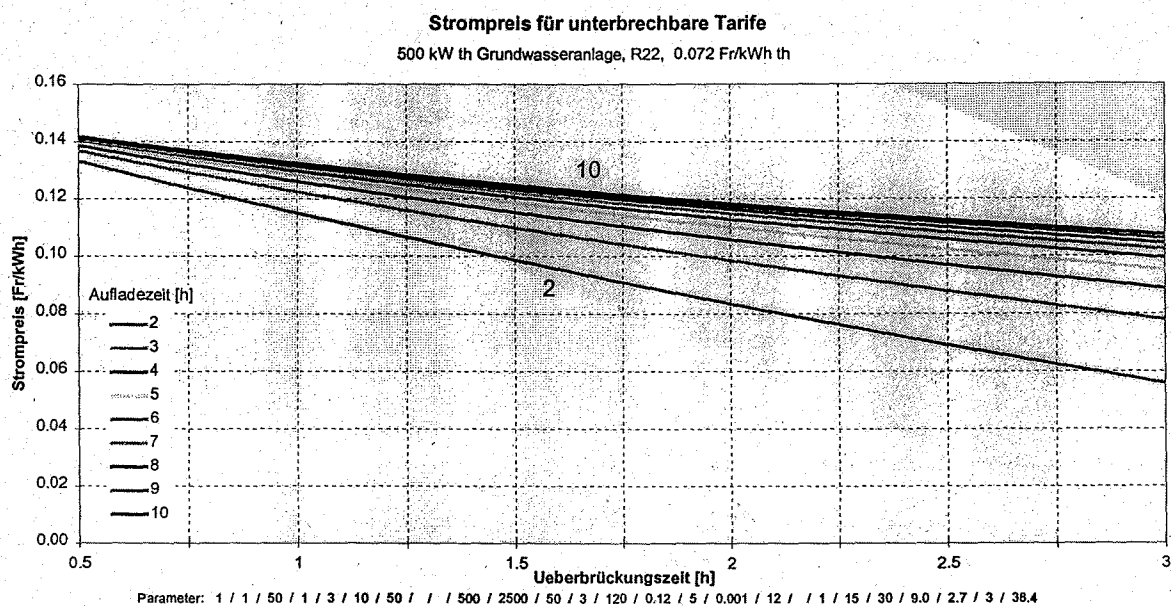
Maximal erzielbarer Strompreis für unterbrechbare Tarife bei vorgegebenem Wärme-
preis, Kältemittel R22 (oben) und R134a (unten)



Beilage 11:

7.11 Unterbrechbare Tarife, 500-kW-Wasser/Wasser-Anlage

Maximal erzielbarer Strompreis für unterbrechbare Tarife bei vorgegebenem Wärme-
preis, Kältemittel R22 (oben) und R134a (unten)



Beilage 12:

7.12 Unterbrechbare Tarife, 100-kW-Luft/Wasser-Anlage

Maximal erzielbarer Strompreis für unterbrechbare Tarife bei vorgegebenem Wärme-
preis, Kältemittel R22 (oben) und R134a (unten)

